



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΤΙΤΛΟΣ

**ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ Co-Cr ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΣΚΕΛΕΤΩΝ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ Ο-
ΔΟΝΤΟΣΤΟΙΧΙΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΟΛΛΙΑΣ

ΑΜ: 16054

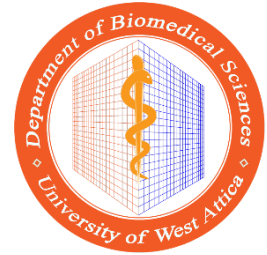
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΠΡΟΜΠΟΝΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2021



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF HEALTH & CARE
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES
DIVISION OF DENTAL TECHNOLOGY



TITLE

THE CO-CR ALLOYS AND THEIR USE IN THE CONSTRUCTION OF REMOVABLE PARTIAL DENTURES FRAMEWORKS



DISSERTATION

NAME: PANAGIOTIS KOLLIAS

Candidate Number: 16054

SUPERVISOR: ANTHONY PROMBONAS

TITLE: PROFESSOR

ATHENS 2021

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ	ΑΝΤΩΝΗΣ ΠΡΟΜΠΟΝΑΣ	
ΜΕΛΟΣ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΤΣΟΛΚΑ	
ΜΕΛΟΣ	ΑΝΤΩΝΗΣ ΘΕΟΧΑΡΟΠΟΥΛΟΣ	



ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Κόλλιας του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 16054 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Βιοιατρικών Επιστημών του Τμήματος Οδοντικής Τεχνολογίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Κόλλιας



*Στους γονείς μου,
και σε όλους εκείνους που πιστεύουν
ότι η επιστήμη είναι η γνώση των λίγων
στην υπηρεσία των πολλών.*



Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «τα κράματα κοβαλτίου-χρωμίου και η χρήση τους στη κατασκευή σκελετού μερικών οδοντοστοιχιών» αποτελεί το επιστέγασμα της ολοκλήρωσης των σπουδών μου, στον Τομέα Οδοντικής Τεχνολογίας του Τμήματος Βιοϊατρικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κατά το Ακαδημαϊκό έτος 2020-2021.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μελέτη και ανάλυση των κραμάτων Co-Cr όσον αφορά τη σύνθεση, τη δομή, τις ιδιότητες και τις παράμερους τους ανάλογα με τις εργαστηριακές διαδικασίες που υφίστανται καθώς και η σύγκριση τους με εναλλακτικά υλικά κατασκευής σκελετού. Για το σκοπό αυτό, σε μια προσπάθεια κατανόησης και σαφήνειας του περιεχομένου στον αναγνώστη, χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί συγκεντρωτικοί πίνακες και πληθώρα φωτογραφικού υλικού.

Με την περάτωση της εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους ανθρώπους των οποίων η συμβολή και η συμπαράσταση ήταν πολύτιμη και καθοριστική στην εκπόνηση της.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, τον σεβασμό και την εκτίμηση μου στον καθηγητή και επιβλέποντα της δοθείσας εργασίας κ. Προμπονά Αντώνιο, πρώτα από όλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο να αναλάβω το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για την καθοδήγηση του επί της οργάνωσης, της δομής και του περιεχομένου της παρούσας εργασίας, οι εύστοχες υποδείξεις του οποίου βοήθησαν στην αρτιότερη και πληρέστερη εμφάνιση της. Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους καθηγητές των φοιτητικών μου χρόνων, καθένας από τους οποίους με το τρόπο διδασκαλίας και τη μεταδοτικότητα του, μου δημιούργησε ερεθίσματα για περαιτέρω έρευνα και μελέτη.

Επίσης θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον οδοντικό τεχνολόγο κ. Μουζή Νικόλαο, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, καθώς και για τις γνώσεις διεκπεραίωσης που μου μετέφερε στα πλαίσια κατασκευής και φωτογράφισης, των αναλυτικών σταδίων δημιουργίας ενός σκελετού μερικής οδοντοστοιχίας από κράμα κοβαλτίου-χρωμίου χρησιμοποιώντας τη συμβατική μέθοδο της χύτευσης, ειδικά για την ανάγκες της παρούσης πτυχιακής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένεια μου για την αγάπη τους, την εμπιστοσύνη τους, την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσφέρει όλα τα χρόνια.

Σας ευχαριστώ όλους θερμά!

Παναγιώτης Κόλλιας



Πίνακας περιεχομένων

Πρόλογος.....	vi
Περίληψη.....	ix
Abstract.....	xi
Συντομεύσεις και αντιστοίχιση ξένων-ελληνικών όρων.....	xiii
Χημικά στοιχεία – ιόντα – ενώσεις.....	xv
1 Εισαγωγή και σκοπός.....	1
2 Σύντομη ιστορική ανασκόπηση.....	6
2.1 Ιστορική διαδρομή των μερικών οδοντοστοιχιών.....	6
2.2 Ιστορική διαδρομή των κραμάτων Κοβαλτίου-Χρωμίου.....	9
Γενικό μέρος.....	11
3 Μερική οδοντοστοιχία (Μ.Ο.).....	12
3.1 Μέρη των Μ.Ο.	12
3.1.1 Σκελετός.....	12
3.1.2 Εφίππια ή βάση.....	18
3.1.3 Τεχνητά δόντια.....	22
3.2 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, ενδείξεις και αντενδείξεις των Μ.Ο.....	23
3.3 Ιδιότητες των Μ.Ο.....	24
3.4 Ταξινόμηση των Μ.Ο.....	26
3.5 Στάδια συμβατικής και ψηφιακής μεθόδου κατασκευής των Μ.Ο.....	31
3.5.1 Συμβατικά στάδια κατασκευής Μ.Ο.....	31
3.5.2 Ψηφιακά στάδια κατασκευής Μ.Ο.....	35
3.6 Σχεδίαση αποκατάστασης με Μ.Ο.....	41
4 Σκελετός Μ.Ο.....	47
4.1 Τεχνικές κατασκευής.....	47
4.1.1 Συμβατικές τεχνικές.....	50
4.1.1.1 Πυροχρώματα χύτευσης κραμάτων Co-Cr.....	51
4.1.1.2 Μέθοδος τήξης και χύτευσης.....	56
4.1.1.3 Μέθοδος ψύξης.....	61
4.1.2 Ψηφιακές τεχνικές (CAD/CAM).....	62
4.2 Μεταεπεξεργασία και τελική επεξεργασία.....	71
4.2.1 Θερμικές κατεργασίες.....	71
4.2.2 Τελική επεξεργασία.....	75
4.3 Υλικά κατασκευής σκελετού Μ.Ο.....	77
4.3.1 Μεταλλικά υλικά.....	77
4.3.1.1 Κράματα με βάση το χρυσό.....	84
4.3.1.2 Κράματα Co-Cr.....	85
4.3.1.3 Κράματα Ni-Cr.....	86
4.3.1.4 Ti και κράματα Ti.....	86
4.3.2 Μη μεταλλικά υλικά.....	89
Ειδικό μέρος.....	97
5 Κράματα Co-Cr.....	98
5.1 Σύνθεση των κραμάτων Co-Cr.....	98



5.2	Δομή και ιδιότητες κραμάτων Co-Cr	104
5.2.1	Δομή	104
5.2.2	Ιδιότητες	128
5.2.2.1	Επιφανειακές	128
5.2.2.2	Χυτευσιμότητα	130
5.2.2.3	Μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στη κόπωση και σκληρότητα.....	131
5.2.2.4	Βιοσυμβατότητα.....	136
5.2.2.5	Αντοχή στη διάβρωση	143
5.2.2.6	Ακρίβεια και εφαρμογή σκελετού.....	156
5.2.2.7	Συγκρατητική δύναμη	170
5.2.2.8	Μεταλλοκεραμικός δεσμός.....	176
5.2.2.9	Άλλες ιδιότητες	178
6	Παράμετροι επεξεργασίας	182
6.1	Παράμετροι που επηρεάζουν τη χύτευση.....	182
6.1.1	Πυρόχωμα.....	182
6.1.2	Τήξη-χύτευση	184
6.1.3	Επανάτηξη – Επαναχύτευση	191
6.1.4	Ψύξη	210
6.2	Παράμετροι που επηρεάζουν τη μέθοδο PBF (Powder Bed Fusion)	213
6.2.1	Επιλογή της σκόνης.....	213
6.2.2	Προσανατολισμός κατασκευής και δομές υποστήριξης	213
6.2.3	Παράμετροι μηχανήματος	218
6.2.4	Τύπος συσκευής	224
7	Μεταεπεξεργασία – Θερμική κατεργασία.....	227
8	Τελική επεξεργασία.....	249
9	Σύγκριση υλικών	268
9.1	Σύγκριση Co-Cr με μεταλλικά υλικά	268
9.1.1	Σύγκριση Co-Cr με το χρυσό	268
9.1.2	Σύγκριση Co-Cr με το σφυρήλατο σύρμα.....	271
9.1.3	Σύγκριση Co-Cr με το Ti και κράματα Ti	274
9.1.4	Σύγκριση Co-Cr με άλλα μεταλλικά υλικά	282
9.2	Σύγκριση Co-Cr με το PMMA	287
9.3	Σύγκριση Co-Cr με την GFRC και το GFRTF	289
9.4	Σύγκριση Co-Cr με τα θερμοπλαστικά υλικά	291
9.4.1	Σύγκριση Co-Cr με το πολυμερές αρυλ κετόνης (ultraire AKP).....	300
9.5	Σύγκριση Co-Cr με τη ζιρκόνια	302
10	Συζήτηση	305
11	Συμπεράσματα και προτάσεις	355
12	Βιβλιογραφία	361
13	Παραρτήματα	379
13.1	Παράρτημα Α – στάδια κατασκευής σκελετού Μ.Ο. χρησιμοποιώντας τη συμβατική μέθοδο	379
13.2	Παράρτημα Β – χημική σύνθεση και ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr	396



Περίληψη

Τα κράματα κοβαλτίου-χρωμίου χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σκελετού – διπλών-στεφανών, συνδέσμων-ακριβείας, συμβατικών-αγκίστρων και συνδυασμένων – μερικών οδοντοστοιχιών. Παρόλο που αναφέρονται δεδομένα για όλους τους τύπους, η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στον τελευταίο, διερευνώντας και συγκρίνοντας τα κράματα με άλλα υλικά. Οι σκελετοί μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατική-χύτευση (C-CST), έμμεση (I-3DP) και άμεση (D-3DP) τρισδιάστατη εκτύπωση προπλασμάτων [κηρού/πολυμερούς που χυτεύεται, κοβαλτίου-χρωμίου (τήξη/πυροσυσσωμάτωση με λείζερ), αντίστοιχα]. Διαφορές στην χημική σύνθεση (στοιχεία, ρόλος, πιθανότητα απόκλισης από τα δεδομένα κατασκευαστή) εξετάζονται. Η I-3DP δημιουργεί, μικροδομή, μηχανικές ιδιότητες και καλή χυτευσιμότητα, χαρακτηριστικές της C-CST, υψηλότερη ακρίβεια-διαστάσεων και εφαρμογή κυμαινόμενη από χαμηλότερη έως υψηλότερη. Αντίθετα με τα χυτά, τα D-3DP κράματα διαθέτουν, περισσότερο ομοιογενή, λεπτόκοκκη, και μειωμένων-ελαττωμάτων, μικροδομή που δημιουργεί υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα, αντοχή, ολκιμότητα), μεγαλύτερη πιστότητα, ακρίβεια-διαστάσεων, διατήρηση συγκρατητικής δύναμης, βιοσυμβατότητα, αντίσταση διάβρωσης, ικανοποίηση ασθενή, και άλλα τεχνολογικά-εξαρτώμενα οφέλη, αλλά επίσης μεγαλύτερες υπολειμματικές τάσεις, ανακρίβειες-εφαρμογής, και παρουσιάζουν ανισότροπες μηχανικές ιδιότητες ιδίως στην διάρκεια ζωής σε κόπωση. Η επιφανειακή τραχύτητα στην D-3DP είναι, συγκριτικά με την, C-CST μεγαλύτερη, D-3DP χαμηλότερη, ενώ διαφορές εντοπίζονται στην επιφανειακή – μορφολογία, δομή, στοιχειακή αναλογία και κατανομή. Οι βασικές παράμετροι, στην χύτευση (πυρόχρωμα, μέθοδος/ρυθμός ψύξης, μέθοδος/θερμοκρασία τήξης/χύτευσης, επανάτηξη-επαναχύτευση) και στην D-3DP (σκόνη, προσανατολισμός κατασκευής, δομές-υποστήριξης, παράμετροι-μηχανήματος, τύπος-συσκευής), με την θερμική-κατεργασία (απαραίτητη μόνο στην D-3DP) και τελική-επεξεργασία (επεξεργασίες αντοχής δεσμού ρητίνης-χυτού, λείανση/στίλβωση), βελτιώνουν όλα τα προαναφερόμενα εφόσον εκτελούνται σωστά. Τα άγκιστρα έχουν κατασκευαστεί και με κάμψη σφυρήλατου σύρματος (κυρίως παλαιότερα), υβριδική-επεξεργασία, και σκληρή-κοπή. Παρά τις περιορισμένες υπάρχουσες μελέτες, συγκριτικά με την χύτευση και την D-3DP, οι δύο τελευταίες μέθοδοι έχουν την υψηλότερη –επιφανειακή ομαλότητα, διατήρηση



συγκρατητικών δυνάμεων, ακρίβεια-διαστάσεων αλλά χαμηλότερη εφαρμογή, και –εφαρμογή, αντίστοιχα. Πολλά υλικά όπως πλατίνα, νικέλιο-χρώμιο, ανοξείδωτος χάλυβας, παλλάδιο- και άργυρο- επικρατούντα κράματα, χρυσός, τιτάνιο και τα κράματα τους, πολυμεθυλ-μεθακρυλικό, θερμοπλαστικά-πολυμερή και σύνθετες-ρητίνες – ενισχυμένες-ινών-υάλου, εύκαμπτες θερμοπλαστικές ρητίνες, πολυμερή υψηλή απόδοσης και ζιρκόνια, έχουν συγκριθεί με το κράμα κοβαλτίου-χρωμίου. Καθένα έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Λέξεις κλειδιά: Οδοντιατρικά κράματα κοβαλτίου-χρωμίου (Co-Cr) ; Μερικές οδοντοστοιχίες ; Οδοντιατρική χύτευση ; Επιλεκτική τήξη/πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ ; Μηχανοποιημένη Σχεδίαση Και Παραγωγή



Abstract

Cobalt-chromium alloys are used for the framework fabrication of double-crown, precision-attachment, conventional-clasp – retained, and combined, removable partial dentures. Although some literature data are referred to all types, this dissertation focuses on the third-type, alloys investigation and its comparison with other materials. Frameworks can be fabricated by conventional-casting (C-CST), indirect (I-3DP) and direct (D-3DP) 3d printing patterns [wax/polymeric followed by casting, cobalt-chromium (laser melting/sintering), respectively]. Differences in chemical composition (elements, their role, deviation probability from manufacturer data) are examined. I-3DP creates, microstructure, mechanical properties and good castability, typical for C-CST, dimensional- and adjustment- accuracy higher and ranging from lower to higher respectively. Contrary to cast, D-3DP alloys exhibit, more homogeneous, fine, and defect-tolerant microstructure which defines higher mechanical properties (hardness, strength, ductility), precision, dimensional-accuracy, retentive force stability, biocompatibility, corrosion resistance, patient satisfaction, and other process-dependent benefits, but also higher residual-stresses, adjustment-inaccuracies, and present anisotropy in mechanical properties especially in the fatigue life. D-3DP surface roughness comparing to, C-CST is higher, D-3DP is lower, while differences exist in surface – morphology, structure, elemental ratio and distribution. Basic parameters, in casting (investment, cooling method/rate, melting/casting method/temperature, remelting-recasting) and in D-3DP (powder, build-orientation, support-structures, device-process, device-type), with heat-treatment (necessary only in D-3DP) and final-processing (treatments for cast-resin bond strength, finishing/polishing), improve all the aforementioned when done correctly. Clasps have been also fabricated by wrought wire bending (mainly in the past), hybrid-manufacturing and hard-milling. Despite the limited existing studies, compared to casting and D-3DP, the last two methods exhibit the highest –surface smoothness, retentive forces stability, dimensional-accuracy but lower fitness, and –fitness, respectively. Many materials e.g., platinum, nickel-chromium, stainless steel, Pd- and Ag- based alloys, gold, titanium and their alloys, polymethyl-methacrylate, glass-fiber-reinforced – thermoplastic-polymers and composites, flexible



thermoplastic resins, high performance polymers and zirconia, have been compared to cobalt-chromium alloy. Each one has benefits and disadvantages.

Keywords: Cobalt-chromium (Co-Cr) dental alloys ; Removable partial dentures ; Dental casting ; Additive manufacturing ; laser melting/sintering ; Cad/Cam



Συντομεύσεις και αντιστοίχιση ξένων-ελληνικών όρων

Πίνακας συντομεύσεων – ακρωνύμια.

Συντόμευση	Απόδοση συντόμευσης ή/και μετάφραση αυτής
A.D.A.	American Dental Association = Αμερικανική Οδοντιατρική Ένωση
AFM	Atomic Force Microscopy = Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης
AKP	Aryl Ketone Polymer = Πολυμερές Αρυλ Κετόνης
AM	Additive Manufacturing = Προσθετική Κατασκευή
ASTM	American Society for Testing and Material = Αμερικανική Ομοσπονδία Δοκιμών και Υλικών
BSE	Back-Scattered Electrons = Οπισθοσκεδαιζόμενα Ηλεκτρόνια
CAD/CAM	Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing = Μηχανοποιημένη Σχεδίαση Και Παραγωγή
C-CST/C-LWT	Conventional Casting / Conventional Lost Wax Technique = Τεχνική Συμβατικής Χύτευσης ή του Χαμένου Κηρού
CE-TZP/A	Σταθεροποιημένη Ζιρκόνια με Δημήτριο / Νανοσύνθετων Αλουμινιάς
CNC MIL/CNC/MIL	Computer Numerical Control Milling = Μηχανοποιημένη Κοπή
CST	CaSTing = Χύτευση
D-3DP/PBF <i>or</i> DMLM/SLM/SLS/DMLS	Direct 3-Dimensional Printing / Powder Bed Fusion <i>or</i> Direct Metal Laser Melting / Selective Laser Melting / Selective Laser Sintering / Direct Metal Laser Sintering = Άμεση Τρισδιάστατη Εκτύπωση / Σύντηξη Σκόνης σε Κλίνη ή Τήξη με Λείζερ Μετάλλων / Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ / Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ / Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ Μετάλλων
DLP	Digital Light Projection = Προβολή Ψηφιακού Φωτός
EBSA	Electron Backscatter Diffraction = Περίθλαση Ηλεκτρονίων Οπισθοσκέδασης
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy = Φασματοσκοπία Ακτίνων Χ
E _i	Input Energy = Ενέργεια Εισόδου
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy = Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης
E _{ocp}	Open Circuit Potential = Δυναμικό Ανοιχτού Κυκλώματος
FCC	Face-Centered Cubic = Εδροκεντρωμένη Κυβική Δομή
FCM	Flow Cytometry Assay = Ανάλυση με Κυτταρομετρία Ροής
FDM	Fused Deposition Modeling = Μοντελοποίηση Με Εναπόθεση-Εξώθηση Τηγμένου Υλικού
GBs	Grain Boundaries = Όρια κόκκου
GFRC	Glass Fiber-Reinforced Composite = Σύνθετη Ρητίνη Ενισχυμένη με Ίνες Υάλου
GF RTP	Glass Fiber-Reinforced Thermoplastic Polymer = Θερμοπλαστικό Πολυμερές Ενισχυμένο με Ίνες Γυαλιού
HCP	Hexagonal Close-Packed = Πυκνή Εξαγωνική Δομή
HDPL	High-Power Diode Lasers = Λείζερ Διόδου Υψηλής Ισχύος
HIP	Hot Isostatic Pressing = Θερμή Ισοστατική Πίεση



HM <i>or</i> RLS+MIL <i>or</i> SLM+MIL	Hybrid Manufacturing <i>or</i> Repeated Laser Sintering and Milling <i>or</i> Selective Laser Melting and Milling = Υβριδική Επεξεργασία ή συνδυασμός SLM/SLS και MIL σε μια ταυτόχρονη διαδικασία
H-MIL	Hard-MILling = Σκληρή Κοπή
I-3DP/ I-AM/ AM+CST	Indirect-3 Dimensional Printing / Indirect Additive Manufacturing / Additive Manufacturing + Casting = Έμμεση Τρισδιάστατη Εκτύπωση / Έμμεση Προσθετική Κατασκευή / Δημιουργία προπλάσματος κηρού ή ρητίνης με Τρισδιάστατη Εκτύπωση / Προσθετική Μέθοδο το οποίο στη συνέχεια θα Χυτευθεί
I-MIL/MIL+CST	Indirect MILling / MILing +CaSTing = έμμεση κοπή / συνδυασμός κοπής και χύτευσης
IPF	Inverse Pole Figure = Χάρτης Αντίστροφων Πολικών Συντεταγμένων
ISO	International Standard Organization = Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης
KAM	Kernel Average Misorientation = Μέση απώλεια προσανατολισμού κατά Kernel
LED/E _v	Laser Energy Density / Volume Energy Density = Ενεργειακή Πυκνότητα Λέιζερ / Ενεργειακή Πυκνότητα Όγκου
Micro-CT	Micro-Computed Tomography = Μικρο-Υπολογιστική Τομογραφία
MJ	Material Jetting = Εκτόξευση Υλικού
MPBs	Molten Pool Boundaries = Όρια Τετηγμένης Δεξαμενής
MWCNTS	Multi-Walled Carbon Nanotubes = Νανοσωλήνες Άνθρακα Πολλαπλού Τοιχώματος
Nd: YAG	NeoDymium: Doped Yttrium Garnet = Γρανάτες Δημήτριου-Υτρίου
NP/NPS	NanoParticle/S = Νανοδοματίδιο/α
NY <i>or</i> PA	NYlon <i>Or</i> PolyAmide = Νάylon ή Πολυαμίδιο
PC	PolyCarbonate = Πολυανθρακικό
PDI	Prosthodontic Diagnostic Index = Προσθετικός Διαγνωστικός Δείκτης
PEEK	Poly (Ether Ether Ketone) = Πολύ (αιθερ αιθερ κετόνη)
PEKK	Poly (Ether Ketone Ketone) = Πολύ (αιθέρα κετόνη κετόνη)
PES	PolyESTer = Πολυεστέρας
PMMA	Poly (Methyl Methacrylate) = Πολύ (μεθακρυλικό μεθύλιο)
POM/Acetal	Polyoxymethylene = Πολυοξυμεθυλένιο / ρητίνη ακετάλης
PP	PolyPropylene = Πολυπροπυλένιο
R _{ct}	Charge Transfer Resistance = Αντίσταση Μεταφοράς Φορτίου
RP/AM/3DP/LM/SF	Rapid Prototyping / Additive Manufacturing / Three Dimensional Printing / Layer Manufacturing / Solid Freeform Fabrication = ταχεία πρωτοτυποποίηση / Προσθετική κατασκευή / Τρισδιάστατη εκτύπωση / Κατασκευή με Διαστρωμάτωση / Κατασκευή Ελεύθερης Μορφής Στερεού
RPC	Rest Plate (Proximal) C Bar Clasp = Άγκιστρο Με Εφαπτήρα, Όμορη Πλάκα, Και Συγκρατητικό Βραχίονα Σε Σχήμα C.
RPI	Rest Plate (Proximal) I Bar clasp = άγκιστρο με Εφαπτήρα, Όμορη Πλάκα, Και Συγκρατητικό Βραχίονα σε Σχήμα I.
RW	Resistance Welding = Ηλεκτροσυγκόλληση Αντίστασης
SEM	Scanning Electron Microscope = Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης
SLA	StereoLithogrAphy = Στερεολιθογραφία
SM	Subtractive Manufacturing = Αφαιρετική Μέθοδος
S-MIL	Soft Milling = Κοπή και Πυροσυσσωμάτωση «Ευκατέργαστου Κραματικού Συμπιέσματος»
STL	STereoLithography = Αρχείο Στερεολιθογραφίας
SWCNTS	Single-Walled Carbon Nanotubes = Νανοσωλήνες Άνθρακα Μονού Τοιχώματος
Yb: YAG	YtterBium: Doped Yttrium Aluminum Garnet = Γρανάτες Υττερβίου-Υτρίου



YSZ	Yttria-Stabilized Zirconia = Ζιρκονία Σταθεροποιημένη με Ύτριο
Y-TZP	Τετραγωνική Πολυκρυσταλλική Ζιρκονία Σταθεροποιημένη με Ύτριο
H/Y	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
K.B.	Κατά Βάρος
M.O.	Μερική Οδοντοστοιχία
ΠΦΤ	Πυροχώματα Φωσφορικού Τύπου

Πίνακας αντιστοίχισης ελληνικών και ξένων επιστημονικών όρων.

Ξένος όρος	Ελληνικός όρος
As-built state	Η κατάσταση ενός κράματος αμέσως μετά τη κατασκευή του με AM
As-cast state	Η κατάσταση ενός κράματος αμέσως μετά τη χύτευση και ψύξη του
Cellular	Κυτταρικός
Columnar	Στηλοειδής
Dislocation	Εκτόπιση, Διαταραχή
Equiaxed	Ισοαξονικός
Heat-treated state	Η κατάσταση ενός κράματος μετά από θερμική κατεργασία
Lamellar	Ελασματοειδή
Misorientation angle	Γωνία διαφορετικού προσανατολισμού
Precipitation	Ισχυροποίηση / σκλήρυνση με σχηματισμό ιζήματος
Recovery	Ανακούφιση-αποκατάσταση
Shot peening	Σφαιροβολή
Slip	Ολίσθηση
Solid solution strengthening	Ισχυροποίηση στερεού διαλύματος
Stair-step effect	Φαινόμενο της κλίμακας
Sub-grain	Υπο-κόκκος
Work hardening	Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση

Χημικά στοιχεία – ιόντα – ενώσεις



Πίνακας χημικών στοιχείων, ιόντων και ενώσεων.

Στοιχεία		Ιόντα		Ενώσεις	
Ag	Άργυρος	H ⁺	Υδρογόνου	Al ₂ O ₃	Οξειδίο του Αλουμινίου
Al	Αργίλιο	Co ²⁺	Κοβαλτίου	BaTiO ₃	Τιτανικό Βάριο
Au	Χρυσός	Co ³⁺	Κοβαλτίου	C ₂ H ₂	Αιθυλένιο
B	Βόριο	Cr ³⁺	Χρωμίου	CeO ₂	Διοξειδίο του Δημητρίου
Be	Βυρρήλιο	CrO ₄ ²⁻	Χρωμικά	CO ₂	Διοξειδίο του Άνθρακα
C	Άνθρακας	Mo ⁶⁺	Μολυβδαίνιου	Co ₂ SiO ₄	Όρθοπυριτικό Κοβάλτιο
Ca	Ασβέστιο	Na ⁺	Νατρίου	CoO	Οξειδίο του Κοβαλτίου
Cd	Κάδμιο	NH ₄ ⁺	Αμμωνίου	Cr ₂ O ₃	Τριοξειδίο του Χρωμίου
Cl	Χλώριο	OH ⁻	Υδροξυλίου	Cr ₃ O ₄ (CrO.Cr ₂ O ₃)	Επιτεταρτοξειδίο του Χρωμίου
Co	Κοβάλτιο			Fe ₂ O ₃	Τριοξειδίο του Σιδήρου
Cr	Χρώμιο			H ₂ O	Νερό
Cu	Χαλκός			H ₂ O ₂	Υπεροξειδίο του υδρογόνου
F	Φθόριο			H ₃ BO ₃	Βορικό οξύ
Fe	Σίδηρος			HCl	Υδροχλωρικό οξύ
Ga	Γάλλιο			HNO ₃	Νιτρικό οξύ
H	Υδρογόνο			K ₂ SO ₄	Θεικό Κάλιο
Hg	Υδράργυρος			KCl	Χλωριούχο Κάλιο
In	Ίνδιο			Mg(PO ₃) ₂	Μεταφωσφορικό Μαγνήσιο
Ir	Ιρρίδιο			Mg ₂ P ₂ O ₇	Πυροφωσφορικό Μαγνήσιο
K	Κάλιο			Mg ₃ (PO ₄) ₂	(Όρθο)Φωσφορικό Μαγνήσιο
Mg	Μαγνήσιο			MgCr ₂ O ₄ (MgO.Cr ₂ O ₃)	Χρωμικό Μαγνήσιο
Mn	Μαγγάνιο			MgH ₂ (PO ₄) ₂	Δισόξινο φωσφορικό μαγνήσιο
Mo	Μολυβδαίνιο			MgHPO ₄	Μονόξινο Φωσφορικό Μαγνήσιο
Na	Νάτριο			MgHPO ₄ ·3H ₂ O	Ένυδρο Μονόξινο Φωσφορικό Μαγνήσιο
Nb	Νιόβιο			MgO	Οξειδίο του Μαγνησίου
Ni	Νικέλιο			NaCl	Χλωριούχο Νάτριο
O	Οξυγόνο			NaOCl	Υποχλωριώδες Νάτριο
Os	Όσμιο			NaOH	Υδροξειδίο του Νατρίου
P	Φώσφορος			NH ₃	Αμμωνία
Pb	Μόλυβδος			NH ₄ H ₂ PO ₄	Δισόξινο φωσφορικό αμμώνιο
Pd	Παλλάδιο			NH ₄ MgPO ₄	Εναμμώνιο Φωσφορικό μαγνήσιο
Pt	Πλατίνα			NH ₄ MgPO ₄ ·6H ₂ O	Ένυδρο Εναμμώνιο Φωσφορικό Μαγνήσιο(εφυδατωμένο)
Ra	Ράδιο			NH ₄ MgPO ₄ ·H ₂ O	Ένυδρο Εναμμώνιο Φωσφορικό Μαγνήσιο
Rh	Ρόδιο			P ₂ O ₅	Πεντοξειδίο του Φωσφόρου
Ru	Ρουθίνιο			SiO ₂	Διοξειδίο του Πυριτίου / πυριτία
S	θειό			TiH, TiH ₂	Υδρίδιο του Τιτανίου
Si	Πυρίτιο			TiO ₂	Διοξειδίο του Τιτανίου
Sn	Κασσίτερος			TiO ₃	Τριοξειδίο του Τιτανίου
Ta	Ταντάλιο			ZnO	Οξειδίο του Ψευδαργύρου
Ti	Τιτάνιο			ZrO ₂	Διοξειδίο του Ζιρκονίου / Ζιρκονία
V	Βανάδιο				
W	Βολφράμιο				
Zn	Ψευδάργυρος				
Zr	Ζιρκόνιο				



Κατώφλι νέας χιλιετίας. Νέες προκλήσεις, πολλοί στόχοι. Η εξέλιξη σε όλους τους τομείς δεν είναι απλά ραγδαία. Το τέλος του 20ου αιώνα βρήκε την Οδοντιατρική με μια κατακλυσμιαία προσφορά γνώσεων, μεθόδων και υλικών που είναι δύσκολη η παρακολούθηση. Μοιραία εγείρεται η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη διασπορά σε περισσότερες ειδικότητες. Η πρόληψη και η περιοδοντολογία είναι από τις ειδικότητες που είναι υπεύθυνες για τη μείωση του ποσοστού της νωδότητας. Σύγχρονες προληπτικές μέθοδοι και η ενεργοποίηση όλο και μεγαλύτερων τμημάτων του πληθυσμού στη στοματική υγιεινή έχουν επιφέρει μεγάλη μείωση του επιπολασμού στην τερηδόνα. Παράλληλα η εφαρμογή πρωτοποριακών μεθόδων ανάπλασης του οστού και αναγέννησης του περιοδοντικού συνδέσμου περιόρισαν σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των δοντιών που χάνονται από τις ουλικές ασθένειες. Όμως, παρά την μεγάλη πρόοδο στον τομέα της διατήρησης των οδοντικών ιστών ένας σημαντικός αριθμός ανθρώπων αντιμετωπίζει το πρόβλημα απώλειας τους. Αν σε αυτούς προστεθεί ένα ποσοστό που χάνουν δόντια λόγω ατυχήματος, ή παρουσιάζουν ελλείψεις λόγω συγγενών ανωμαλιών διάπλασης είναι πασιφανές ότι η νωδότητα εξακολουθεί να αποτελεί πρόβλημα για τον άνθρωπο και πρόκληση για τον οδοντιατρικό-οδοντοτεχνικό χώρο. Εκτός όμως από τους οδοντικούς ιστούς, ελλείψεις παρουσιάζονται αρκετά συχνά σε μαλακά ή σκληρά μόρια σαν αποτέλεσμα παθήσεων ή τραυμάτων.¹

Με τον όρο «νωδότητα» εννοείται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο νωδός ασθενής, δηλαδή χωρίς φυσικά δόντια. Η νωδότητα διακρίνεται σε ολική όταν απουσιάζουν όλα τα φυσικά δόντια και μερική όταν απουσιάζουν ορισμένα. Η αποκατάσταση στοιχείων του στοματογναθικού συστήματος που λείπουν από καταστροφή κατά τη διάρκεια της ζωής του ατόμου, είτε χάθηκαν βίαια από τραυματισμούς ή θεραπευτικές επεμβάσεις, είτε λείπουν εκ γενετής, είναι αντικείμενο κλάδου της οδοντιατρικής, της οδοντικής προσθετικής, η οποία διακρίνεται σε γναθοπροσωπική, ακίνητη και κινητή, εκ των οποίων η τελευταία χωρίζεται σε προσθετική των ολικών και των μερικών οδοντοστοιχιών. Ο αριθμός των μερικώς νωδών ασθενών συνεχίζει να αυξάνεται καθώς ο πληθυσμός στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες συνεχίζει να γερνάει. Με την πρόοδο στην οδοντιατρική επιστήμη, την τεχνολογία, την προαγωγή της οδοντιατρικής ευαισθητοποίησης και τις προηγμένες υπηρεσίες οδοντιατρικής



περίθαλψης, υπάρχουν περισσότεροι μερικώς νωδοί ασθενείς, παρά ολικά νωδοί. Η μερική νωδότητα συνήθως αποκαθίσταται με μια κινητή ή ακίνητη ή επιεμφυτευματική πρόσθεση. Ωστόσο, παρά την ύπαρξη διαφόρων προσθέσεων για την αποκατάσταση της μερικής νωδότητας, η Μ.Ο. (μερική οδοντοστοιχία) χρησιμοποιείται τακτικά επειδή προσφέρει μια συντηρητική, φθηνή λύση για την αντικατάσταση ελλειπόντων δοντιών, που διατηρεί την υγεία του στόματος επιτρέποντας τον αποτελεσματικότερο έλεγχο της πλάκας, ενώ συχνά αποτελεί την μόνη βιώσιμη επιλογή θεραπείας για πολλούς ασθενείς, και θεωρείται ότι θα συνεχίσει να είναι μια από τις κύριες μεθόδους αποκατάστασης στο προσεχές μέλλον. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτό.^{1,2} Σε πολλούς ασθενείς, οι ακίνητες αποκαταστάσεις δεν ενδείκνυνται όπως όταν η νωδή περιοχή είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, το κόστος και η ψυχολογία του ασθενή για χειρουργική επέμβαση μεταξύ άλλων παραγόντων όπως η έλλειψη ικανού πάχους οστού, οι βαθιές εσοχές, η ανεπαρκής οστική πυκνότητα, οι συνήθειες καπνίσματος, τα γενικά θέματα υγείας (π.χ. διαβήτη), αποκλείουν τη χρήση οδοντικών εμφυτευμάτων στους περισσότερους ασθενείς. Χαρακτηριστικά, έχει αναφερθεί ότι για τις Ηνωμένες Πολιτείες, ο αριθμός των μερικώς νωδών ασθενών που αποκαθίστανται με οδοντικά εμφυτεύματα φτάνει το 3 % έως 5 % αυτών που ενδέχεται να έχουν ανάγκη αυτής της υπηρεσίας. Σε μια ενδιαφέρουσα εργασία που δημοσιεύθηκε πριν από αρκετά χρόνια (1996), αναφέρθηκε ότι μόνο 1 από τους 40 μερικώς νωδούς ασθενείς που αναζήτησαν θεραπεία με εμφυτεύματα, αποκαταστάθηκε τελικά με οστεοενσωματούμενα εμφυτεύματα, διότι υπήρχαν διάφοροι λόγοι που κατέστησαν τους υπόλοιπους 39 υποψήφιους μη κατάλληλους για αυτή τη θεραπεία. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι τα λειτουργικά αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με Μ.Ο. είναι συγκρίσιμα με αυτά που επιτυγχάνονται με ακίνητες επιεμφυτευματικές αποκαταστάσεις. Επιπρόσθετα, η ευρεία αντίληψη ότι η υγεία των εναπομεινάντων δοντιών διακυβεύεται από τις Μ.Ο. σε σύγκριση με άλλες μορφές θεραπείας δεν υποστηρίζεται από τα στοιχεία. Μελέτες που συνέκριναν τα αποτελέσματα των ακίνητων προσθετικών εργασιών και των Μ.Ο. δεν έχουν δείξει διαφορές στην περιοδοντική υγεία των δοντιών-στηριγμάτων μεταξύ των ομάδων. Οι μόνες διαφορές που σημειώθηκαν σε αυτές τις μελέτες ήταν τα υψηλότερα επίπεδα συντήρησης που απαιτούνται για τις Μ.Ο.³ Επιπλέον, μελέτες στον Ελληνικό πληθυσμό δείχνουν ότι όσο μειώνεται το μηνιαίο εισόδημα τόσο το είδος των αποκαταστάσεων μετακινείται από την Ακίνητη Προσθετική, στην Κινητή Προσθετική.¹ Πάντως, η διαφορά δυσθραυστότητας, δηλαδή της ελαστικής ενέργειας μεταξύ του περιοδοντικού συνδέσμου του στηρίγματος και του βλεννογόνου της υπολειμματικής ακρολοφίας γενικά αναγνωρίζεται ως το κύριο πρόβλημα με αυτόν τον τύπο θεραπείας.²



Η μερική οδοντοστοιχία είναι η κινητή πρόσθεση (μπορεί να αφαιρεθεί από το στόμα και να αντικατασταθεί κατά βούληση) που κατασκευάζεται σε περιπτώσεις μερικής νωδότητας, ήτοι όταν υπάρχει έλλειψη ενός ή περισσοτέρων ή όλων πλην ενός φυσικών δοντιών, με σκοπό την αναπλήρωση τόσο των ελλειπόντων του οδοντικού φραγμού δοντιών και την αποκατάσταση της σύγκλεισης όσο και των ελλειμάτων των σκληρών (οστούν) και μαλακών (βλεννογόνο) ιστών, την αποκατάσταση ή βελτίωση της αισθητικής εμφάνισης τόσο του προσώπου όσο της φωνητικής απόδοσης καθώς και της μασητικής ικανότητας, και τέλος την διατήρηση της υγείας των ιστών του στοματογναθικού συστήματος με τους οποίους έρχεται σε άμεση ή έμμεση επαφή. Η Μ.Ο. εδράζεται, στα δόντια-στηρίγματα με τα συγκρατητικά της μέσα, και στις φατνιακές ακρολοφίες με τις βάσεις της. Έτσι τα μασητικά φορτία μεταφέρονται στα δόντια-στηρίγματα και στους υποκείμενους μαλθακούς ιστούς. Για το λόγο αυτό κάθε λάθος στην σχεδίαση ή στα στάδια κατασκευής της Μ.Ο. θα έχει άμεση επίδραση στην διατήρηση της υγείας του περιοδοντίου των δοντιών-στηριγμάτων και των φατνιακών ακρολοφιών των μαλθακών ιστών.^{4,5}

Η Μ.Ο. είναι μια σύνθετη κατασκευή προσθετική εργασία δεδομένου ότι, αποτελείται από έναν σκελετό επάνω στον οποίο ενσωματώνονται οι βάσεις με τα τεχνητά δόντια. Θα πρέπει για αυτό το λόγο ο οδοντικός τεχνολόγος να γνωρίζει τις ιδιότητες και τις τεχνικές εφαρμογής ενός μεγάλου φάσματος υλικών συμπεριλαμβανομένου των υλικών κατασκευής των σκελετών Μ.Ο., για να είναι βέβαιο ότι δεν θα υπάρχουν προβλήματα στη Μ.Ο. από την μη τήρηση των προδιαγραφών κατεργασίας αυτών των υλικών.⁴

Οι ευνοϊκές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους του χρυσού και την αλλεργιογόνο επίδραση του νικελίου, έχουν καταστήσει το συνηθέστερο υλικό κατασκευής των σκελετών Μ.Ο. από το 1940 – που αντικατέστησαν τα κράματα χρυσού και χρωμιο-νικελίου που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. – μέχρι σήμερα, τα κράματα Co-Cr που αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.⁶

Με βάση τα παραπάνω, στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται αρχικά μια σύντομη ιστορική αναδρομή αναφορικά με την Μ.Ο. και τα κράματα. Εν συνεχεία, παρατίθενται ορισμένες γενικές πληροφορίες που αφορούν τη Μ.Ο., ήτοι τα μέρη, τα πλεονεκτήματα, τις ενδείξεις, τη ταξινόμηση και τα στάδια κατασκευής της (με έμφαση σε εκείνα του σκελετού), και τη σχεδίαση της προκειμένου να διαμορφωθεί μια ευρύτερη εικόνα επι του θέματος. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στις τεχνικές κατασκευής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός σκελετού Μ.Ο. από κράματα Co-Cr για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους και των παραγόντων που τις επηρεάζουν, και αναφέρονται



ορισμένα γενικά στοιχεία που αποτελούν ξεχωριστές ενότητες στο ειδικό μέρος, και τα οποία αφορούν τις θερμικές κατεργασίες, τη τελική επεξεργασία και τα υλικά κατασκευής σκελετού συμπεριλαμβανομένων στοιχείων που αφορούν τόσο τα μεταλλικά υλικά όσο και τα μη μεταλλικά.

Στο ειδικό μέρος, πραγματοποιείται ανάλυση των κραμάτων Co-Cr για κάθε τεχνική κατασκευής, και σύγκριση τους με άλλες τεχνικές, ως προς τη σύνθεση, τη δομή και τις ιδιότητες συμπεριλαμβανομένων των επιφανειακών, της χυτευσιμότητας, των μηχανικών (εφελκυσμού και κάμψης), της αντοχής στη κόπωση, της σκληρότητας, της βιοσυμβατότητας, της αντίστασης στη διάβρωση, της ακρίβειας διαστάσεων, της πιστότητας, της εφαρμογής, της συγκρατητικής δύναμης και της μεταβολής της, την ικανοποίηση του ασθενούς, και άλλων ιδιοτήτων που είναι συνυφασμένες με την τεχνολογία κατασκευής (π.χ. χρόνος, κόστος). Ακολούθως, αναλύονται οι παράγοντες, που επηρεάζουν άμεσα την συμπεριφορά των κραμάτων, σε κάθε τεχνική κατασκευής, σχετικά με τις επιδράσεις τους και με το ποια προβλήματα μπορούν να δημιουργήσουν αλλά και να επιλύσουν. Κατόπιν της ανάλυσης των κραμάτων σε κατάσταση κατασκευής, αναλύονται σε κατάσταση μετα-επεξεργασίας ιδίως θερμική κατεργασία, καθώς και τελικής επεξεργασίας (κατεργασίες για την ενίσχυση της αντοχής κράματος – θερμοπολυμεριζόμενη ακρυλική ρητίνη, λείανση και στίλβωση). Στο τέλος, ακολουθεί μια ξεχωριστή ενότητα στην οποία αρχικά παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα των κραμάτων Co-Cr στην χρήση τους ως υλικό κατασκευής σκελετού Μ.Ο., και έπειτα συγκρίνονται με εναλλακτικά υλικά, κατασκευής σκελετού (παλαιά, νέα, πειραματικά). Σημειώνεται, ότι η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε κράματα Co-Cr που χρησιμοποιούνται για κλασσικούς σκελετούς με άγκιστρα. Έτσι παρόλο που αναφέρθηκαν στο ειδικό μέρος στοιχεία και για τα κράματα των υπόλοιπων τύπων Μ.Ο. (π.χ. διπλών στεφανών), αυτά δεν συμπεριλήφθηκαν στη συζήτηση και στα συμπεράσματα.

Στην συζήτηση, αναφέρονται τα βασικότερα σημεία που προέκυψαν από το σύνολο των ερευνών που αξιοποιήθηκαν για την καταγραφή της συγκεκριμένης εργασίας κατά τη διερεύνηση των κραμάτων Co-Cr, γίνεται μια προσπάθεια σύγκρισης των διαφόρων παραμέτρων και απόψεων διαφόρων μελετών που αφορούν το θέμα, και παρατίθενται και η προσωπική άποψη του συγγραφέα της διπλωματικής ανά θεματική ενότητα.

Τέλος, ακολουθούν τα βασικότερα συμπεράσματα, και γίνεται προσπάθεια παράθεσης ορισμένων, κατά το δυνατόν στοχευμένων, προτάσεων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν μελλοντικό αντικείμενο έρευνας.

Στόχος της δοθείσας εργασίας είναι η παρουσίαση όλων των θεωρητικών δεδομένων που αφορούν τα κράματα Co-Cr, και που χρειάζεται να γνωρίζει ο σύγχρονος οδοντικός



τεχνολόγος προκειμένου να κατασκευάσει έναν σωστό σκελετό μερικής οδοντοστοιχίας. Με τον τρόπο αυτό συνδυάζονται η Επιστήμη και η Τεχνολογία, τα δύο απαραίτητα «συστατικά» της ΟΔΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ.



2.1 Ιστορική διαδρομή των μερικών οδοντοστοιχιών

Οι ασθένειες της στοματικής κοιλότητας αποτελούν πρόβλημα της ανθρώπινης ύπαρξης από την έναρξής της. Το πρώτο εγχείρημα του ανθρώπου να σώσει και να αντικαταστήσει δόντια που είχαν υποστεί βλάβες αναφέρεται το 2.500 π.Χ. στην αρχαία Αίγυπτο και αφορά περιπτώσεις ναρθηκοποίησης δοντιών με χρυσό σύρμα ή δακτυλίους. Η πρόοδος και η ανάπτυξη των ολικών και μερικών οδοντοστοιχιών ξεκινάει γύρω στο 800 π.Χ. από την Ιταλία στη σημερινή περιοχή της Τοσκάνης όπου αναπτύχθηκε ο πολιτισμός των Ετρούσκων. Αργότερα, γύρω στο 400-300 π.Χ., ο Ρωμαίος σατυρικός Μαρτιάλης μέσα από ένα ποίημα του αποδίδοντας το λόγο σε μια γυναίκα αναφέρει «Εσύ που κάθε βράδυ βγάζεις τα δόντια, όπως βγάζεις το φόρεμα σου...», μας μαρτυρεί τη χρήση τεχνητών οδοντοστοιχιών από τους Ρωμαίους χωρίς ωστόσο να υπάρχουν συγκεκριμένα ευρήματα. Η κατάρρευση όμως της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας και η διάδοση του χριστιανισμού, η επικράτηση της μονολιθικής θρησκευτικής πίστης, ο θρησκευτικός φανατισμός και μυστικισμός οδήγησαν κατά την περίοδο του μεσαίωνα, στην αναστολή στην ανάπτυξη της οδοντιατρικής. Στην περίοδο των μέσων χρόνων (8ος-15ος αιώνας) οι αναλαμπές στο χώρο της οδοντιατρικής είναι ελάχιστες με εκπροσώπους, κυρίως, τους Άραβες. Από τον 15ο αιώνα και έπειτα εμφανίζονται οι πρώτοι «τολμηροί» άνθρωποι που επιχειρούν να παρουσιάσουν τις επιστημονικές τους γνώσεις στην Οδοντιατρική. Στο χώρο της Προσθητικής τα πρώτα βήματα γίνονται τον 16ο αιώνα με την κατασκευή προσθητικών αποκαταστάσεων. Στη Ζυρίχη της Ελβετίας, γύρω στο 1500, ανακαλύφθηκε οδοντοστοιχία σκαλισμένη πάνω σε κόκκαλο βοδιού που πιθανώς χρησίμευε μόνο στην αισθητική. Την ίδια περίοδο (1510-1590) ο Γάλλος χειρουργός Ambroise Pare δημιούργησε σειρές δοντιών σκαλισμένες σε κόκαλο ή ελεφαντόδοντο. Το 1594, ο Jacques Guillemeau κατασκεύασε οδοντοστοιχίες σε ελεφαντόδοντο και σε δόντια θαλάσσιου ίππου. Τον 17ο αιώνα στην Ιαπωνία κατασκευάζονται μερικές οδοντοστοιχίες σκαλισμένες σε ειδικό ξύλο ή σε συνδυασμό ξύλου με δόντια σκαλισμένα πάνω σε κόκκαλο. Οι οδοντοστοιχίες αυτές είναι οι πρώτες με ολική κάλυψη υπερώας.⁷



Γενικώς, τα πρώτα υλικά που αξιοποιήθηκαν για την κατασκευή υποκατάστατων των ελλειπόντων δοντιών και την κάλυψη των κενών που άφηναν τα χαμένα δόντια αποτελούσαν υλικά που προσέφερε η φύση, κατεργασμένα με τις μεθοδολογίες και τον εξοπλισμό της εποχής. Οι προσθετικές κατασκευές αποτελούνταν από «τεχνητά» δόντια που δεν ήταν τεχνητά αλλά φυσικά, όπως δόντια ανθρώπινα ή ζώων, δόντια σκαλισμένα σε ελεφαντόδοντο ή σε δόντια ιπποπόταμου, κοχύλια σε κατάλληλο σχήμα, βότσαλα κ.α. Για τη σταθεροποίησή τους χρησιμοποιούνταν σύρματα ή δακτύλιοι από σύρμα ή έλασμα χρυσού.⁸

Η εξέλιξη των Μ.Ο. επιταχύνθηκε αποφασιστικά από τον 18ο αιώνα ο οποίος θεωρείται ο αιώνας που έδωσε ώθηση γενικότερα στην οδοντιατρική, αλλά και στην κινητή προσθετική ειδικότερα, οπότε νέα υλικά και τεχνικές επέτρεψαν στους οδοντιάτρους της εποχής να διαφοροποιήσουν το σχήμα, τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα των κατασκευών, ενώ ένα σύνολο ικανών και αφοσιωμένων κλινικών επιστημόνων συνέβαλε στην αναζήτηση διαρκώς αποτελεσματικότερων λύσεων.⁸ Η ιστορία χρονολογείται από τον 18ο αιώνα όταν δημιουργήθηκαν τα πρώτα τεχνητά δόντια. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τεχνητών δοντιών ήταν φυσικά δόντια (τόσο ανθρώπινα όσο και από ζώα, καμπυλωμένα στο επιθυμητό σχήμα και μέγεθος), ελεφαντόδοντο και πορσελάνη.⁷

Η πρώτη καταγεγραμμένη περιγραφή κινητής μερικής αποκατάστασης αποδίδεται στον Γερμανό χειρουργό Lorenz Heister, χρονολογείται από το 1711 και αφορούσε το σκάλισμα ενός κομματιού από κόκκαλο, ώστε να ταιριάζει στο στόμα και να λειτουργεί ως βάση οδοντοστοιχίας. Ο Heister χρησιμοποιούσε κόκκαλα από θαλάσσιο ίππο ή ιπποπόταμο, τα στερέωνε με μεταξωτή κλωστή και χρυσό σύρμα και συνιστούσε την αφαίρεσή τους το βράδυ, ώστε να καθαρίζονται.⁸ Σε άλλη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι, ο Lorenz Heister αναφέρει την κατασκευή Μ.Ο. από ελεφαντόδοντο, οι οποίες συγκρατούνται σε κατάλληλα τροποποιημένα παρακείμενα δόντια, χωρίς τη χρήση συγκρατητικών μέσων.⁷

Οι πρώτες οδοντοστοιχίες μεταλλικού σκελετού έγιναν από τον Pierre Fauchard το 1728. Έκτοτε, υπήρξαν σημαντικές βελτιώσεις στις Μ.Ο. αν και η χρήση μετάλλου εξακολουθεί να είναι κοινή. Ο Γάλλος χειρουργός Pierre Fauchard, που θεωρείται από πολλούς ο πατέρας της σύγχρονης Οδοντιατρικής, στο κλασικό σύγγραμμά του *Le chirurgien Dentiste* του 1728, περιγράφει λεπτομερώς τη διαδικασία κατασκευής προσθετικών αποκαταστάσεων, με ιδιαίτερη έμφαση στην κατασκευή Μ.Ο. Για να αντικαταστήσει τα ελλείποντα δόντια, χρησιμοποιούσε δόντια ανθρώπινα και ιπποπόταμου, αλλά αναφέρει και βοδιού, θαλάσσιου λέοντα, ελέφαντα, κόκκαλα κνήμης. Για τη στερέωση αυτών των «τεχνητών» δοντιών χρησιμοποιούσε όλα τα εναπομείναντα φυσικά δόντια. Όταν έλειπαν μέχρι 6 δόντια, δημιουργούσε πρώτα στα «τεχνητά» δόντια οπές, μέσα από τις οποίες περνούσε χρυσό



σύρμα ή καρφίδες, ώστε να τα συνδέσει μεταξύ τους, και στη συνέχεια τα στερέωνε στα διπλανά. Για προσθέσεις με πάνω από 6 δόντια, χρησιμοποιούσε μια βάση, μια χρυσή πλάκα με πάχος 3mm, πάνω στην οποία στερέωνε τα τεχνητά δόντια. Για τη συγκράτηση των τεχνητών δοντιών από τα στηρίγματά τους χρησιμοποιούσε περιδέσεις με νήματα από λινάρι, κερωμένο μετάξι και χρυσά νήματα, που τα είχε ζεστάνει, για να καταστούν ευλύγιστα. Γύρω από τα φυσικά δόντια είχε δημιουργήσει οριζόντιες αύλακες, για να μην γλιστρούν τα σύρματα προς τα ούλα. Πρότεινε και περιέγραψε, επίσης, λεπτομερώς τα εργαλεία, τρυπάνια, διαβήτες, κατσαβίδια και σμίλες που χρειάζονταν για την κατασκευή των οπών και για το σκάλισμα της βάσης. Έτσι, προώθησε πολύ τις μεθόδους περίδεσης-σταθεροποίησης της Μ.Ο. Τέλος, έχοντας αναγνωρίσει τις επιθυμητές ποιότητες των αποκαταστάσεων – στήριξη, σταθερότητα, συγκράτηση – χρησιμοποιούσε μεταλλικές δοκούς, τους πρώτους μείζονες συνδετήρες, για τη βελτίωση της ακαμψίας και σταθερότητας της πρόσθεσης.⁸

Το 1746 γίνεται η πρώτη αναφορά για άγκιστρα μερικών οδοντοστοιχιών και συγκράτηση με τα παρακείμενα δόντια από τον Claude Mouton.⁸

Το 19ο αιώνα η εξέλιξη στον χώρο της κινητής προσθετικής συνεχίζεται εντονότερη και παρουσιάζονται αξιόλογα γεγονότα και επιτεύγματα. Ο F.H. Balkwill το 1880 ανέπτυξε τη θεωρία της ισορροπίας των Μ.Ο. που βασίζεται φυσικά στη χρήση του μασητικού εφαιπτήρα και αγκίστρου. Η θεωρία του Balkwill συνεχίστηκε από τον J.H. Prothero, ο οποίος ονόμασε τον άξονα που διέρχεται από τους μασητικούς εφαιπτήρες και γύρω από τον οποίο η Μ.Ο. έχει την τάση να περιστρέφεται, άξονα υπομοχλίου. Έτσι, ξεκίνησε η ιδέα της έμμεσης συγκράτησης των Μ.Ο. Στη δεκαετία του 1850, οι οδοντοστοιχίες άρχισαν να κατασκευάζονται από βουλκανίτη, μια μορφή σκληρυμένου καουτσούκ στο οποίο τοποθετήθηκαν δόντια πορσελάνης.⁷

Τον 20^ο αιώνα η εξέλιξη συνεχίζεται εντονότερη. Το 1912 ο Herman Cheyes, ο οποίος θεωρείται ο πρωτοπόρος στους συνδέσμους ακριβείας, κατασκευάζει τον ομώνυμο σύνδεσμο ακριβείας και το 1915 παίρνει δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Ο F.E. Roach το 1913 στην προσπάθειά του να μειώσει τον τερηδονισμό των δοντιών στηριγμάτων από την εκτεταμένη κάλυψη των χρησιμοποιούμενων αγκίστρων (ελασμάτων) παρουσιάζει το διπλό άγκιστρο από σύρμα (άγκιστρο περιβολής). Το 1914 ο Heinrichsen παρουσίασε στο Μόναχο το πρώτο άγκιστρο μετά δοκού, από στρογγυλό σύρμα που κατέληγε σε ένα σφαιρίδιο στο μεσοδόντιο χώρο μεταξύ δυο δοντιών χωρίς να έρχεται σε επαφή με τη μεσοδόντια θηλή. Το άγκιστρο τελειοποιήθηκε από τον Roach και καθιερώθηκε με το όνομα του, το 1930. Το 1918 ο A.J. Fortunati αναφέρεται ως ο πρώτος που χρησιμοποίησε μηχανικό όργανο για να προσδιορίσει την παραλληλότητα δύο ή περισσότερων δοντιών. Μεταπολεμικά οι εξελίξεις συνεχίζονται



και, πιο συγκεκριμένα, το 1949 κατασκευάζεται και χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σκελετός από κράμα Co-Cr από τον Kenneth Peters Liddelow. Η κατασκευή αυτή θα αντικαταστήσει το βουλκανίτη στις Μ.Ο. Στα μέσα του 20ού αιώνα κάνουν την εμφάνιση τους οι σύνδεσμοι ακριβείας. Την ίδια περίοδο εισάγονται στο χώρο της προσθετικής οι «μαγνήτες» διαφόρων κραμάτων (Sm-Co, Pt-Co, Nd-Fe-B), οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ευρέως για ολικές και μερικές οδοντοστοιχίες, καθώς και στην Ορθοδοντική.⁷

Μετά την αλλαγή του 20ου αιώνα, εισήχθησαν η ακρυλική ρητίνη και άλλα πλαστικά.⁷

Γενικώς, μετά τον 18^ο αιώνα στα πρώιμα οδοντιατρικά συγγράμματα οι μερικές οδοντοστοιχίες περιγράφονται ως κατασκευές που περιλαμβάνουν μια σφυρήλατη χρυσή βάση στερεωμένη στα δόντια στηρίγματα με άγκιστρα, τα οποία είχαν περισσότερο τη μορφή δακτυλίων, ταινιών από κράμα χρυσού που διαμορφώνονταν προσεκτικά, ώστε να αγκαλιάζουν τις μύλες. Το ύψος τους ήταν σχεδόν όσο και εκείνο της μύλης, κατασκευάζονταν από ειδικά για τον σκοπό αυτό κράματα πολύτιμων μετάλλων και διαμορφώνονταν με λαβίδες, ώστε να επεκτείνονται στις περιοχές εσοχής, για να εξασφαλίζουν συγκράτηση. Με αφετηρία αυτές τις πρώιμες κατασκευές, το σχήμα της Μ.Ο. εξελίχθηκε σταδιακά στη σημερινή του μορφή, μέσα από τη σταδιακή παράλληλη ανάπτυξη νέων υλικών και των τεχνικών, καθώς επίσης και την βελτιστοποίηση ορισμένων παλαιών όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.⁸

2.2 Ιστορική διαδρομή των κραμάτων Κοβαλτίου-Χρωμίου

Τα περισσότερα από τα κράματα Co-Cr που χρησιμοποιούνται σήμερα σε βιομηχανικούς και βιοϊατρικούς τομείς εξελίχθηκαν από το έργο του Elwood Haynes στα τέλη του προηγούμενου αιώνα. Πιο συγκεκριμένα, το 1907 ο Haynes δημιούργησε τα πρώτα κράματα Co-Cr τα οποία ήταν δυαδικά και αφού απέδειξε ότι διαθέτουν υψηλή αντοχή και αντίσταση στην οξειδωση, έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και τους προσέδωσε το όνομα στελλίτες λόγω της ανοξειδωτής φύσης τους και της μόνιμης λάμψης που μοιάζει με αστέρι. Έτσι, τα κράματα Co-Cr χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία, για πρώτη φορά το 1907, με το εμπορικό όνομα στελλίτες. Στη συνέχεια ο Haynes πρόσθεσε στα κράματα αυτά, το Mo και το W ως ισχυρούς ενισχυτικούς παράγοντες προκειμένου να αυξήσει την σκληρότητα, την αντοχή και την αντίσταση στην αποτριβή.^{4,5,7,9,10}

Έκτοτε, ένα τέτοιο κράμα τροποποιήθηκε στα εργαστήρια της Austenal (Νέα Υόρκη, Πενσυλβάνια) από τους Erdle και Prang, και έτσι το 1929 ανέπτυξαν τα κράματα Co-Cr-Mo και Co-Cr-W, τα πρώτα κράματα Co-Cr τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για



οδοντιατρική χρήση. Στο κράμα Co-Cr-Mo δόθηκε αργότερα το 1932 το εμπορικό όνομα Vitallium της εταιρείας Austenal. Το Vitallium είναι στην ουσία μια τροποποιημένη μορφή του βιομηχανικού στελλίτη HS-21 ώστε να είναι κατάλληλος για οδοντιατρική χρήση.^{4,5,7,9,10}

Η πρώτη γνωστή οδοντιατρική εφαρμογή όπως προαναφέρθηκε των κραμάτων Co-Cr πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1930 για την κατασκευή σκελετών Μ.Ο. Έκτοτε, τα κράματα Co-Cr (παλαιότερα και τα κράματα Ni-Cr), έχουν γίνει όλο και πιο δημοφιλή σε σύγκριση με τα συμβατικά κράματα χρυσού τύπου IV, τα οποία ήταν τα επικρατούντα μέταλλα που είχαν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο. Τα κράματα αυτά είχαν τεράστια επιτυχία και μέσα σε τριάντα χρόνια (1930-1960) κατάφεραν να εκτοπίσουν τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή μεταλλικού σκελετού Μ.Ο. Η δημοφιλία τους αυξήθηκε επιπλέον το από το 1980 λόγω του αυξανόμενου κόστους των ευγενών μετάλλων, ειδικά μετά την παγκόσμια οικονομική κρίση του 2008.^{4,5,7,9,10}

Σήμερα τα κράματα Co-Cr χρησιμοποιούνται στο τομέα της βιομηχανίας, της ορθοπεδικής και της οδοντιατρικής. Στην ορθοπεδική, οι βιοϊατρικές εφαρμογές τους σχετίζονται κυρίως με την κατασκευή ορθοπεδικών προσθέσεων για αντικατάσταση γόνατος, ώμου και ισχίου καθώς και για χρήση ως συσκευές στερέωσης σπασμένων οστών (ενδοπροσθέσεις αρθρώσεων). Στην οδοντιατρική, τα κράματα Co-Cr χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή μεταλλικών σκελετών Μ.Ο. και πρόσφατα χρησιμοποιήθηκαν ως μεταλλικά υποστρώματα για την κατασκευή μεταλλοκεραμικών αποκαταστάσεων και σκελετών εμφυτευμάτων.⁹

Όσον αφορά τις τεχνικές κατασκευής σκελετών Μ.Ο. από κράματα Co-Cr, σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως η χύτευση και η επιλεκτική τήξη με λέιζερ. Η τεχνική της χύτευσης, πιθανότατα ήταν γνωστή από πολύ παλιά, ωστόσο «ξεχάστηκε» για πολλούς αιώνες, και την επανάφερε ο William Taggart το 1907 με την ονομασία «τεχνική του χαμένου κερίου» (lost wax technique), οπότε, συστηματοποιήθηκε και άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως για οδοντιατρικές κατασκευές από τις αρχές του 20ου αιώνα.¹¹ Το 2005, οι Eggbeer και συν¹² κατέγραψαν τους πρώτους σκελετούς Μ.Ο. από ρητίνη με μηχανή στερεολιθογραφίας (SLA-250) που ήταν δημοφιλής εκείνη την εποχή, οι οποίοι στη συνέχεια χυτεύθηκαν σε κράμα Co-Cr χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους. Ο πρώτος σκελετός Μ.Ο. από κράμα Co-Cr που κατασκευάστηκε από SLM, πιστώνεται στους Williams και συν¹³ το 2006.



Γενικό μέρος



3.1 Μέρη των Μ.Ο.

Μια Μ.Ο. αποτελείται από:

- Τον σκελετό
- Τα εφίπια και
- Τα τεχνητά δόντια.^{4,5}

3.1.1 Σκελετός

Ο μεταλλικός σκελετός απαρτίζεται από τους μείζονες (ή μεγάλους) συνδετήρες, τους ελάσσονες (ή μικρούς) συνδετήρες, τα πλέγματα και τα συγκρατητικά στοιχεία.⁴

Οι μεγάλοι συνδετήρες αποτελούν το τμήμα του μεταλλικού σκελετού που συνδέει τα εφίπια. Θα πρέπει να είναι άκαμπτοι ώστε να μπορούν να κατανέμουν τις δυνάμεις της μάσησης ομοιομερώς σε όλη την επιφάνεια που εδράζεται η Μ.Ο. (δόντια, βλεννογόνος, υποκείμενο οστό) Να μην μεταβάλλουν ουσιωδώς την ανατομικότητα της καλυπτόμενης επιφάνειας. Να μην ερεθίζουν ή τραυματίζουν τους ιστούς του στόματος. Να απέχουν από τα ελεύθερα ούλα τουλάχιστον 6mm για την άνω γνάθο και 2-3mm για την κάτω γνάθο, ώστε να αποφεύγεται ο ερεθισμός, η φλεγμονή και η υπερπλασία τους. Να εκτείνονται μόνο στην απολύτως αναγκαία καλυπτόμενη επιφάνεια, για την σωστή λειτουργία της Μ.Ο.: Και τέλος, να μην ευνοούν την κατακράτηση τροφών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μείζονων συνδετήρων. Στην άνω γνάθο οι συνηθέστεροι τύποι είναι η οπίσθια υπερώια δοκός ή απλή υπερώια δοκός ή υπερώια ζώνη, η διπλή υπερώια δοκός ή διπλή υπερώια ζώνη, η πρόσθια υπερώια δοκός (ή δοκός σχήματος «ιππείου πετάλου» ή υπερώιο πέταλο) και η υπερώια πλάκα. Στην κάτω γνάθο οι βασικότεροι τύποι είναι η υπογλώσσια δοκός, η γλωσσική δοκός, η οδοντική δοκός (ή δοκός γλωσσικού φύματος ή ενισχυμένη δευτερεύουσα γλωσσική δοκός ή Karlson), η γλωσσική πλάκα, η διπλή γλωσσική δοκός, η χειλική δοκός και η οριζόντια περιστρεφόμενη δοκός (Swinglock ή «αρθρωτή χειλική δοκός»)^{4,5,7}

Οι μικροί συνδετήρες αποτελούν μικρές, λεπτές και άκαμπτες προεκτάσεις των μεγάλων συνδετήρων οι οποίες συνδέουν τα άμεσα και έμμεσα συγκρατητικά στοιχεία με τον



υπόλοιπο μεταλλικό σκελετό. Θα πρέπει να είναι άκαμπτοι ώστε να μην σπάζουν. Να μην παρεμβάλλονται στην λειτουργία της γλώσσας και για το λόγο αυτό πρέπει να τοποθετούνται μέσα σε εσοχές, κοιλότητες ή αύλακες του βλεννογόνου και των δοντιών. Να μην είναι παράλληλοι αλλά να έχουν μια ελαφρά απόκλιση κατά 2° προς την φορά των μασητικών δυνάμεων για λόγους αυτοκαθαρισμού και διατήρησης της φυσιολογικής κατάστασης των ελεύθερων ούλων. Να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 5mm για να μην ευνοείται η ενσφήνωση τροφών και να μην δημιουργείται τριχοειδικό φαινόμενο. Να μην πιέζουν (ακουμπούν) και ερεθίζουν τα ελεύθερα ούλα. Το άκρο τους να καταλήγει σε ένα άμεσο συγκρατητικό στοιχείο (άγκιστρο) ή ένα έμμεσο (εφαπτήρας). Όταν συνδέουν άμεσα συγκρατητικά στοιχεία (άγκιστρα) με τον υπόλοιπο μεταλλικό σκελετό, πρέπει να εφαρμόζουν στις όμορες επιφάνειες των δοντιών και όταν συνδέουν έμμεσα συγκρατητικά στοιχεία (εφαπτήρες) με τον υπόλοιπο μεταλλικό σκελετό πρέπει να εφαρμόζουν σε μεσοδόντιες περιοχές.^{4,5}

Τα πλέγματα συγκράτησης αποτελούν προεκτάσεις των μείζονων συνδετήρων πάνω στις φατνιακές ακρολοφίες τα οποία αποσκοπούν στην μηχανική συγκράτηση των ακρυλικών εφιππίων με τα τεχνητά δόντια στο μεταλλικό σκελετό της Μ.Ο. Θα πρέπει να είναι άκαμπτα για να δίνουν στήριξη στο ακρυλικό. Να σχεδιάζονται σε μορφή αραιή (μεγάλα διάκενα) ή πυκνή (η αραιή μορφή υποστηρίζεται ότι παρέχει καλύτερη μηχανική συγκράτηση στο ακρυλικό και έτσι ο κίνδυνος θραύσης είναι μικρότερος). Η επιφάνεια τους να είναι αδροποιημένη ώστε να έχει καλή μηχανική συγκράτηση με το ακρυλικό. Να απέχουν από την ακρολοφία 1,5-2 mm, γιατί από κάτω τους πρέπει να περάσει ρητίνη. Να καλύπτουν το γναθιαίο όγκωμα στις Μ.Ο. ελευθέρων άκρων άνω γνάθου στις οποίες μάλιστα τα πλέγματα δεν απαιτούν ανασχετικά σημεία, αφού η σταθερότητα εξασφαλίζεται από την καλή εφαρμογή του μεγάλου συνδετήρα στην σκληρή υπερώα. Να καταλήγουν στην περιοχή ανάκαμψης της φατνιακής ακρολοφίας προς το οπισθογόμφιο προσκεφάλαιο στις Μ.Ο. ελευθέρων άκρων κάτω γνάθου στις οποίες τα πλέγματα απαιτούν ανασχετικά σημεία στο οπίσθιο όριο πάχους 1-1,5 mm που να καλύπτουν την απόσταση μέχρι την φατνιακή ακρολοφία ώστε ο σκελετός να αποκτά σταθερότητα κατά την εφαρμογή του τόσο στο εκμαγείο όσο και στο στόμα.⁴ Τα συγκρατητικά στοιχεία αποτελούν τα τμήματα του σκελετού της Μ.Ο. που εφαρμόζουν στα φυσικά δόντια-στηρίγματα εξασφαλίζοντας την λειτουργική σταθερότητα (στήριξη, συγκράτηση, σταθερότητα) της Μ.Ο. Θα πρέπει να προσφέρουν στη Μ.Ο. τρεις χαρακτηριστικές ιδιότητες και συγκεκριμένα στήριξη, συγκράτηση και σταθερότητα οι οποίες αναλύονται διεξοδικά παρακάτω. Διακρίνονται σε έμμεσα και άμεσα. Τα έμμεσα συγκρατητικά στοιχεία εφαρμόζουν σε δευτερεύοντα δόντια-στηρίγματα, παρέχουν πρόσθετη στήριξη και σταθερότητα καθώς ενεργούν σαν μοχλοβραχίονες αντίστασης και



αποτρέπουν την στροφή γύρω από την γραμμή υπομοχλίου που μπορεί να προκληθεί στην Μ.Ο. από την μάσηση κολλώδους τροφής είτε από το βάρος της, δηλαδή γύρω από τον νοητό άξονα που περνά από τους εφαπτήρες των 2 ακραίων, κύριων δοντιών-στηριγμάτων της Μ.Ο. Εφαρμόζουν είτε σε μορφή μεμονωμένων εφαπτήρων (μασητικών – γλωσσικών – κοπτικών) στο άκρο ενός μικρού συνδετήρα είτε με τη μορφή ενός αγκίστρου συνεχείας στις γλωσσικές επιφάνειες των υπαρχόντων φυσικών δοντιών άνωθεν της μεγίστης περιμέτρου σε οπίσθια δόντια, και άνωθεν του γλωσσικού φύματος σε πρόσθια δόντια, ή σε ειδική υποδοχή σε ακίνητες προσθέσεις. Τα άμεσα συγκρατητικά στοιχεία εφαρμόζουν στα κύρια ή πρωτεύοντα δόντια-στηρίγματα, παρέχουν στήριξη, συγκράτηση, σταθερότητα στην Μ.Ο. και διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους συνδέσμους ακριβείας και τα άγκιστρα.^{4,5} Οι σύνδεσμοι ακριβείας αποτελούν μικρομηχανικά συστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η ακριβής σύνδεση (συνάρθρωση) μιας κινητής προσθετικής εργασίας με μια ακίνητη προσθετική εργασία και μέσω αυτής με τα υπάρχοντα δόντια. Αποτελούνται από δύο τμήματα. Το ένα συνδέεται με τη στεφάνη που σκεπάζει το δόντι στήριγμα και είναι το βασικό (ακίνητο) τμήμα του συνδέσμου και το άλλο ενσωματώνεται στη Μ.Ο. και είναι το κινητό τμήμα του συνδέσμου. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους διακρίνονται σε προχτυπημένους (μεταλλικούς) και σε χτυτούμενους στο εργαστήριο (με τη μορφή πλαστικού προπλάσματος). Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης βασικού και κινητού τμήματος συνδέσμου διακρίνονται σε ενδοτικούς και ανένδοτους. Ανάλογα με τον τρόπο που παρέχουν συγκράτηση διακρίνονται σε συνδέσμους τριβής και αγκιστρώσεις. Γενικώς, η απλούστερη και άρα πιο εύκολα απομνημονεύσιμη είναι η ταξινόμηση του Priskel, όπου οι σύνδεσμοι με βάση το σχήμα τους ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες, τους ενδοκορωνικούς, τους εξωκορωνικούς, τους στυλίσκους ή αγκυρώματα ή τηλεσκοπικά κομβία, τις δοκούς, και τους βοηθητικούς συνδέσμους. Οι ενδείξεις εφαρμογής των συνδέσμων ακριβείας είναι ευρύτατες και καλύπτουν όλο σχεδόν το φάσμα των κινητών προσθέσεων. Αντένδειξη αποτελεί όταν ο χώρος μεταξύ φατνιακής ακρολοφίας και ανταγωνιστών δοντιών είναι περιορισμένος και συγκεκριμένα μικρότερος των 6mm, όπου παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαιρετικά μικροί σύνδεσμοι που κυκλοφορούν στο εμπόριο, η αντοχή τους είναι μειωμένη και η θραύση τους πιθανή ιδίως όταν συνυπάρχουν συγκλεισιακά προβλήματα. Οι ηλικιωμένοι και άτομα με αναπηρίες ή γενικότερα κινησιολογικά προβλήματα καθώς θα αντιμετωπίσουν δυσκολία κατά την ένθεση και απένθεση της Μ.Ο. Πλεονεκτήματα των συνδέσμων είναι το άριστο αισθητικό αποτέλεσμα που δημιουργεί καλύτερες προϋποθέσεις αποδοχής της πρόσθεσης από τον ασθενή και η ισχυρή συγκράτηση στην αρχική φάση. Μειονεκτήματα των συνδέσμων είναι ότι η εφαρμογή ειδικότερα των ενδοκορωνικών συνδέσμων



απαιτεί εκτεταμένο τρόχισμα των δοντιών-στηριγμάτων στα οποία αυτοί εφαρμόζονται, με αποτέλεσμα πολλές φορές την αναγκαστική ενδοδοντική θεραπεία των δοντιών αυτών. Ασκούν μεγαλύτερες δυνάμεις στα δόντια-στηρίγματα κατά τη λειτουργία της Μ.Ο., με αποτέλεσμα την πρόωρη απώλεια, αν δεν προβλεφθεί εκτεταμένη ναρθηκοποίηση. Η εκτεταμένη ναρθηκοποίηση των δοντιών που συχνά επιβάλλεται κατά την εφαρμογή των συνδέσμων οδηγεί, πολλές φορές σε τρόχισμα υγιών δοντιών ενώ η τοποθέτηση πρόσθετων στεφανών επιβαρύνει σημαντικά το περιοδόντιο αλλά και το κόστος κατασκευής. Η εφαρμογή και ειδικότερα των εξωκορωνικών συνδέσμων προκαλεί πολλές φορές την επιβάρυνση του περιοδοντίου στην περιοχή των ούλων πάνω από την οποία προβάλλει ο σύνδεσμος. Επειδή η διαδικασία κατασκευής και τοποθέτησης προσθετικών εργασιών με συνδέσμους ακρίβειας απαιτεί δύσκολη και εξειδικευμένη κλινική και εργαστηριακή εμπειρία, η πιθανότητα λάθους αυξάνει. Η τοποθέτηση και η αφαίρεση της κινητής πρόσθεσης που φέρει συνδέσμους ακριβείας απαιτεί μια σχετική δεξιότητα από τον ασθενή και για αυτό η εφαρμογή τους σε ηλικιωμένα άτομα πρέπει να εξετάζεται με προσοχή. Ο ασθενής θα πρέπει επίσης για διατηρεί τη στοματική υγιεινή του σε υψηλά επίπεδα, αφού είναι αυξημένη η πιθανότητα φλεγμονής των παρακείμενων ιστών. Η επιλογή συγκεκριμένου συνδέσμου ακρίβειας απαιτεί έλεγχο μακροχρόνιας επάρκειας στην ελεύθερη αγορά, ώστε να είναι ευκολότερη η επισκευή. Τέλος, η αγορά και τοποθέτησή τους αυξάνει αρκετά το κόστος της πρόσθεσης.^{4,5,14} Τα άγκιστρα είναι απλά συγκρατητικά στοιχεία που τοποθετούνται γύρω από την περιφέρεια του δοντιού ή στεφάνης και εξασφαλίζουν άμεση συγκράτηση, σταθερότητα και στήριξη στην Μ.Ο. Αποτελούνται από τρία λειτουργικά στοιχεία, ήγουν, τη μασητική αντηρίδα (εφαπτήρα), τον παρειακό (συνήθως συγκρατητικό) και το γλωσσικό (συνήθως αντιρροπιστικό) βραχίονα. Ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής τους στα στηρίγματα τα άγκιστρα διακρίνονται στα περιβάλλοντα, τα έρποντα (ή τύπου δοκού ή ουλικής προσπέλασης) και τα μικτά (δηλαδή αποτελούμενα από ένα βραχίονα περιβολής και ένα τύπου δοκού). Βασική διαφορά των περιβαλλόντων άγκιστρων από τα τύπου δοκού είναι ότι τα περιβάλλοντα κατευθύνονται στην συγκρατητική εσοχή από τη μασητική επιφάνεια του δοντιού ενώ τα τύπου δοκού από την αυχενική περιοχή μέσω του βλεννογόνου τον οποίον έρπουν σε κάποιο τμήμα του. Αντιπροσωπευτικοί τύποι των περιβαλλόντων άγκιστρων είναι το απλό τρισκελές (ή άγκιστρο Akers ή άγκιστρο μασητικής προσπέλασης) και οι παραλλαγές του, το διπλό περιβάλλον (ή επιπεύον), το δακτυλιοειδές και το οπισθότονο (ή οπισθενεργό ή φατνωθητικό άγκιστρο), ενώ των τύπου δοκού αντιπροσωπευτικοί τύποι είναι τα άγκιστρα τύπου Roach και τα άγκιστρα κατά Krol (RPI, RPC, RII). Ένα άγκιστρο για να λειτουργεί επιτυχώς πρέπει να περιβάλλει το δόντι-στήριγμα περισσότερο από 180° και λιγότερο από 360°. Να



καλύπτει μόνο την απολύτως απαραίτητη επιφάνεια του δοντιού, στο οποίο πρέπει να εφαρμόζει με απόλυτη ακρίβεια και σε επαρκές βάθος εσοχής: Να μην δημιουργεί σοβαρό αισθητικό πρόβλημα: Να είναι ανενεργό όταν δεν ασκούνται δυνάμεις σε δόντια–στηρίγματα: Να μεταφέρει παράλληλα τις δυνάμεις προς τον επιμήκη άξονα του δοντιού στηρίγματος έτσι ώστε να είναι κατά το δυνατόν λιγότερο βλαπτικές: Να μην προκαλεί βλάβες στα μεταλλικά μόρια και να μην τραυματίζει τους ιστούς του στόματος που έρχεται σε επαφή (γλώσσα, χείλη, παρειές). Γενικώς τα άγκιστρα αποτελούν τον πλέον συνήθη, απλό και ασφαλή τρόπο επαφής της Μ.Ο. με τα δόντια-στηρίγματα και πλεονεκτούν στο ότι σχεδιάζονται και κατασκευάζονται εύκολα και οικονομικά αφού αποτελούν τμήματα του μεταλλικού σκελετού: Δεν απαιτούν την κατασκευή ακίνητης εργασίας στο δόντι-στήριγμα: Εύκολα, εφαρμόζουν στο στόμα, και επιδιορθώνονται: Παρέχουν ασφάλεια και προκαλούν τις λιγότερες δυνατές βλάβες στα δόντια-στηρίγματα. Πάρα ταύτα, μειονεκτήματα των άγκιστρων αποτελούν η κατακράτηση μικροβιακής πλάκας: Η πιθανότητα θραύσης: Η μεταφορά δυνάμεων στα δόντια στηρίγματα εάν έχει γίνει πλημμελής σχεδίαση και κακή κατασκευή και η έκθεση του μετάλλου προστομαικά.^{4,5}

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και μια άλλη κατηγορία συγκρατητικών μέσων που ονομάζονται τηλεσκοπικά συστήματα και συμπεριφέρονται σαν σύνδεσμοι ακριβείας καθώς η αρχή λειτουργίας και των δύο είναι η κοινή, ήγουν υπάρχει ένα ακίνητο τμήμα συγκολλημένο στο φυσικό δόντι και ένα κινητό τμήμα συγκολλημένο στη κινητή πρόσθεση, που συνταιριάζονται με υψηλή ακρίβεια. Ωστόσο, οι σύνδεσμοι ακριβείας περιγράφονται ξεχωριστά ενώ στα τηλεσκοπικά συστήματα εμπίπτουν τα φρεζαριστά άγκιστρα και οι διπλές στεφάνες οι οποίες χωρίζονται σε τηλεσκοπικές στη περίπτωση που τα τοιχώματα τους είναι σε απόλυτη παραλληλότητα, σε κωνικές όταν διαθέτουν μικρή κλίση, και σε υβριδικές στεφάνες όταν κατά το ήμισυ του ύψους τους προς τον αυχένα, φέρουν παράλληλα τοιχώματα ενώ κατά το υπόλοιπο μισό του ύψους τους προς το μασητικό άκρο έχουν τοιχώματα με κλίση. Οι διπλές στεφάνες αποτελούνται από δύο τμήματα, την πρωτεύουσα στεφάνη που συνήθως κατασκευάζεται από κράμα Co-Cr που συγκολλείται στο δόντι-στήριγμα και τη δευτερεύουσα στεφάνη η οποία δημιουργείται συνήθως από ευγενή κράματα που ενσωματώνεται στην κινητή πρόσθεση. Το φρεζαριστό άγκιστρο απαρτίζεται από μία ακίνητη στεφάνη που συγκολλάται στο δόντι-στήριγμα και έχει φρεζαριστεί γλωσσικά για την δημιουργία όμορων αυλάκων και γλωσσικού βάρους. Είθισται να παρασκευάζεται και μία μασητική αύλακα όποτε προκύπτει το άγκιστρο CSP από τα αρχικά των λέξεων Channel (μασητικό κανάλι) – Shoulder (αυχενικό γλωσσικό βάρους) – Pin (όμορες αύλακες και καρφίδες). Τα τηλεσκοπικά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως ως μέσα συγκράτησης



στη συνδυασμένη προσθετική. Στα πλεονεκτήματα των τηλεσκοπικών συστημάτων συγκρατάλούνται η υψηλή αποδοχή ως προς την αισθητική πλευρά: Η στενή επαφή που βελτιώνει τη λειτουργική αποτελεσματικότητα. Με τις τηλεσκοπικές εργασίες επιτυγχάνεται πρωτογενής και δευτερογενής ναρθηκοποίηση, η οποία καθιστά εφικτή την εκτεταμένη περιοδοντική στήριξη. Η κινητή πρόσθετική εργασία είναι καθαρίζεται με ευκολία. Η ακριβής φορά ένθεσης εξασφαλίζει εύκολη μεταχείριση – ένευση και απένθεση από τη στοματική κοιλότητα. Τα τοιχώματα τριβής των τηλεσκοπικών εργασιών καθοδηγούν και συγκρατούν το κινητό μέρος της Μ.Ο. Τα δόντια στηρίγματα δεν υποβάλλονται σε κάποια αλλαγή της διεύθυνσης του επιμήκους τους άξονά (απόκλιση) κατά την τοποθέτηση και απομάκρυνση της προσθετικής εργασίας. Εν αντιθέσει με τις κλασσικές Μ.Ο. τα δόντια-στηρίγματα δεν υφίστανται διατμητικές τάσεις και φορτία στρέψης ενώ τα φορτία ασκούνται μόνο αξονικά. Έτσι, θεωρούνται ως ασφαλείς προσθετικές εργασίες για τα δόντια-στηρίγματα. Όλα τα συγκρατητικά συστήματα που έχουν ως βάση την ίδια αρχή λειτουργίας με εκείνη των τηλεσκοπικών συστημάτων, δύνανται να συνδυάζονται μεταξύ τους στην δημιουργία συνδυασμένων προσθετικών εργασιών, δηλαδή μπορούν να συνδυαστούν φρεζαριστά άγκιστρα, τηλεσκοπικές στεφάνες και σύνδεσμοι ακριβείας στην ίδια προσθετική εργασία.¹⁴ Μάλιστα η σύγχρονη βιβλιογραφική έρευνα έχει δείξει ότι σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να υπάρξει ακόμη και συνδυασμός τηλεσκοπικών συστημάτων με άγκιστρα στον ίδιο σκελετό, αν και δεν είθισται. Στην Εικόνα 3-1 παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι σκελετού Μ.Ο.¹⁵⁻¹⁸

Έτσι, συνοψίζοντας τα διάφορα είδη Μ.Ο. ανάλογα με τα συγκρατητικά στοιχεία που διαθέτουν μπορούν να ενταχθούν σε μια από την ακόλουθες κατηγορίες:

- Μ.Ο. με άγκιστρα που εφαρμόζουν σε φυσικά δόντια ή στεφάνες (clasp-retained removable partial dentures). Στο υπόλοιπο της εργασίας όπου χρησιμοποιείται ο όρος «κλασσικές Μ.Ο.» ή «κλασσικοί σκελετοί Μ.Ο.», ουσιαστικά επρόκειτο για αυτό το είδος Μ.Ο. δηλαδή με άγκιστρα.
- Μ.Ο. με συνδέσμους ακριβείας (attachment-retained removable partial dentures) που ο μηχανισμός τους εφαρμόζει σε φυσικά δόντια, στεφάνες ή εμφυτεύματα.
- Μ.Ο. με τηλεσκοπικά συστήματα με συνηθέστερα τις διπλές στεφάνες είτε τηλεσκοπικές είτε κωνικές είτε υβριδικές (telescopic/conical/hybrid double crown – retained removable partial dentures).
- Συνδυασμένες κατασκευές που αποτελούν τον συνδυασμό των ανωτέρω.¹⁵





Εικόνα 3-1 Σκελετός κλαστικός με άγκιστρα (α),³ με συνδέσμους ακριβείας (β),³ με φρεζαριστά άγκιστρα (γ),¹⁸ και με διπλές υβριδικές στεφάνες.¹⁷ Περιστατικό από το τομέα προσθετικής του πανεπιστημίου της οδοντιατρικής της Κορέας (ε, ζ) όπου κατασκευάστηκε σκελετός που συνδυάζει διπλές στεφάνες με άγκιστρα στην ίδια κατασκευή, για έναν ασθενή με συγγενή αμφίπλευρη σχισμή στα χείλη και τον ουρανίσκο για κλείσιμο της στοματο-ρινικής επικοινωνίας.¹⁶

3.1.2 Εφίπια ή βάση

Βάση λέγεται το τμήμα (ή τα τμήματα) εκείνα της Μ.Ο., το οποίο καλύπτει τη νωδή περιοχή και μπορεί να παρέχει στην Μ.Ο. στήριξη οδοντική (με στήριξη μόνο στα δόντια-στηρίγματα), βλεννογόνια (με στήριξη μόνο στον υποκείμενο βλεννογόνο στον οποίον εδράζεται η Μ.Ο. στην νωδή περιοχή της γνάθου), ή μικτή (με στήριξη και στα δύο).^{4,7}

Προορισμός της βάσης είναι να συγκρατεί τα τεχνητά δόντια, να μεταφέρει τις δυνάμεις που ασκούνται επάνω στα δόντια προς τους υποκείμενους ιστούς και να δρα σαν λειτουργικό ερέθισμα στο υποκείμενο του βλεννογόνου οστό, το οποίο υποβαστάζει την Μ.Ο. και συμβάλει με τον τρόπο αυτό στην διατήρηση τόσο του σχήματος όσον και της υγιεινής κατάστασης της φατνιακής απόφυσης και γενικά των ιστών της. Για τους παραπάνω λόγους, η βάση θα πρέπει να καλύπτει έκταση ανάλογη με την ένταση των μασητικών δυνάμεων, ώστε οι δυνάμεις να κατανέμονται σε ικανή έκταση της φατνιακής ακρολοφίας, για να μην βλάπτονται η φατνιακή ακρολοφία και οι υπερκείμενοι ιστοί έδρασης, εφόσον η κατά μονάδα επιφάνειας ασκούμενη δύναμη θα είναι ελάχιστη δυνατή.^{4,7}

Η αναζήτηση υλικού βάσης οδοντοστοιχίας ξεκίνησε πριν από πολύ καιρό, ξεκινώντας από ξύλο, ελεφαντόδοντο, βουλκανίτη, κεραμικά, κερί, μέταλλο και καταλήγοντας στο πολυμερές μεθακρυλικό πολυμεθύλιο (PMMA) όπου εισήχθη 1937 και από τότε έχει καταστεί ουσιαστικό μέρος της προσθετικής. Σήμερα η βάση μπορεί να κατασκευαστεί από θερμοπολυμεριζόμενη, αυτοπολυμεριζόμενη, ειδική χυτεύσιμη αυτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, φωτοπολυμεριζόμενη από ορατό φως, πολυμεριζόμενη σε μικροκύματα ή CAD/CAM ακρυλική ρητίνη. Επίσης πέρα από ακρυλική ρητίνη η βάση μπορεί να κατασκευαστεί και από θερμοπλαστικές ρητίνες (νάιλον, ακετάλη, ακρυλικό, πολυκαρβονικό) με συνηθέστερη



τη πολυακετάλη, και από υποαλλεργικές ρητίνες αλλά συνήθως κατασκευάζεται από εν θερμώ πολυμεριζόμενη ακρυλική ρητίνη.²

Η βάση της Μ.Ο. μπορεί να κατασκευαστεί ψηφιακά είτε με MIL (MILLing = κοπή) PMMA είτε με 3DP (3D Printing = τρισδιάστατη εκτύπωση). Έχειδειχθεί ότι, οι περισσότερες ιδιότητες υλικού και η τραχύτητα της επιφάνειας των δίσκων PMMA που χρησιμοποιήθηκαν για τις ψηφιακές Μ.Ο. είναι ανώτερες από αυτές των θερμοπολυμεριζόμενων PMMA. Πιο αναλυτικά, οι δίσκοι για την κατασκευή βάσης Μ.Ο. με MIL που βασίζονται στο PMMA διαθέτουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, σκληρότητα, αντοχή σε κρούση και μικρότερη τραχύτητα επιφάνειας, προσκόλληση σε *Candida*, απελευθέρωση υπολειπόμενου μονομερούς, και αλλαγή χρώματος μετά την αποθήκευση σε διαφορετικά μέσα αποθήκευσης (π.χ. καφές, κοκ, κόκκινο κρασί και απεσταγμένο νερό) από ότι η θερμοπολυμεριζόμενη PMMA ($P < 0,05$), ενώ δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην αντοχή στη κάμψη και τη δυσθραυστότητα κατάγματος μεταξύ των δύο υλικών (πάντως οι δίσκοι MIL με βάση το PMMA έχουν εμφανίσει υψηλότερη αντοχή σε κάμψη εκτός από ένα άρθρο). Ακόμη, αρκετές μελέτες έχουν αναλύσει τις μηχανικές ιδιότητες των βάσεων Μ.Ο. από 3DP, αν και ακόμη υπάρχει έλλειψη πληροφοριών σχετικά με αυτές. Μια μελέτη ανέφερε ότι ο προσανατολισμός της εκτύπωσης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή και την τραχύτητα. Σε μια άλλη μελέτη, επισημάνθηκε ότι η προσθήκη νανο-πληρωτικών επιφανειακά τροποποιημένου διοξειδίου του τιτανίου και μικροπληρωμάτων PEEK ενισχύει την αντοχή στην κάμψη και τις αντιβακτηριακές ιδιότητες της τρισδιάστατης τυπωμένης PMMA σύνθετης ρητίνης. Ωστόσο, αυτές οι μελέτες δεν περιλάμβαναν σύγκριση με θερμοπολυμεριζόμενη PMMA.¹⁹

Σε μια μελέτη σύγκρισης του PMMA με τη ρητίνη ακετάλης, δείχθηκε ότι εμφανίζουν μια μικρή αλλαγή χρώματος μετά από 4.000 θερμικούς κύκλους και ο αποχρωματισμός και των δύο υλικών είναι σημαντικός μετά από 12.000 θερμικούς κύκλους, όμως οι τιμές αποχρωματισμού είναι κλινικά αποδεκτές. Οι τιμές απορρόφησης νερού όλων των δοκιμασμένων υλικών πληρούσαν τα πρότυπα ISO για υλικά βάσης οδοντοστοιχίας τύπου 3, υποδεικνύοντας ότι οι θερμοπλαστικές ρητίνες είναι σταθερά και υγιεινά υλικά. Ακόμη η ροζ ρητίνη ακετάλης παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερη απορρόφηση νερού από την πολυμερισμένη ακρυλική ρητίνη και τη λευκή ρητίνη ακετάλης. Η απορρόφηση νερού και η διαλυτότητα της ρητίνης ακετάλης ήταν εντός των ορίων προδιαγραφής ISO. Σε σύγκριση του PMMA με τις θερμοπλαστικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή βάσεων οδοντοστοιχιών, έχειδειχθεί ότι αν και η αντοχή σε κάμψη και το μέτρο ελαστικότητας είναι σχετικά χαμηλά στις θερμοπλαστικές ρητίνες, εμφανίζουν μεγάλη δυσθραυστότητα και



αντοχή στη θραύση. Οι θερμοπλαστικές ρητίνες θα μπορούσαν να αντέξουν τις τάσεις μέσω ενός σημαντικού βαθμού εκτροπής, υποδεικνύοντας ότι έχουν επαρκή διάρκεια ζωής στην επαναλαμβανόμενη ένθεση και απένθεση από την στοματική κοιλότητα.²⁰

Το PMMA έχει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες ως ιδανικό υλικό βάσης οδοντοστοιχίας εκτός από μηχανικές ιδιότητες, όπως αξιοσημείωτη αισθητική (το κοραλλιογενές χρώμα του μοιάζει με το φυσικό χρώμα του βλεννογόνου), η καλά καθορισμένη κατασκευή και οι μέθοδοι επεξεργασίας, η ευκολία επισκευής, η εύκολη διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος. Το μεγάλο όμως μειονέκτημα του PMMA είναι η χαμηλή αντοχή του που οδηγεί σε μεγάλο αριθμό επισκευών οδοντοστοιχιών κάθε χρόνο. Για την επίλυση του προβλήματος της μειωμένης μηχανικής αντοχής του PMMA, και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των βάσεων οδοντοστοιχιών PMMA έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά. Η ενίσχυση του PMMA έχει οδηγήσει μεταξύ άλλων σε βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη, αντοχή σε κρούση και αυξημένη αντίσταση στην κόπωση, και μπορεί να πραγματοποιηθεί με:

- Καουτσούκ είτε καουτσούκ το οποίο έχει εμβυθιστεί σε MMA (ρητίνες υψηλής πρόσκρουσης).²¹
- Ίνες: υάλου, αλατισμένου υάλου, αραμιδίου, πολυαιθυλενίου, πολυπροπυλενίου, αλατισμένου πολυπροπυλενίου OPEFB, και φυτικές ίνες.^{2,21,22} Ακόμη, πολυαμιδίου και άνθρακα.²¹
- Νανοσωματίδια: λειαντικών αλουμίνας (Al_2O_3 , Al_2O_3 επεξεργασμένη με σιλάνιο, Al_2O_3 NPs), ζirkονίας (ZrO_2 , ZrO_2 NPs, αλατισμένη ZrO_2 NPs, «νανοσωλήνες» ZrO_2), τιτανίου (TiO_2 , TiO_2 NPs, παράγοντες σύζευξης- TiO_3 , $BaTiO_3$), αργύρου (Ag, Ag NP), με βάση το πυρίτιο (νιφάδα υάλου, μαρμαρυγία, SiO_2 , επιφανειακά κατεργασμένο SiO_2 , SiO_2 NPs),^{2,21} πληρωτικών υδροξυαπατίτη,^{2,21} κατεργασμένων με σιλάνιο πληρωτικών HA NPs,² νανο-χρυσού, της οικογένειας του άνθρακα (νανο-άνθρακας, SWCNT'S, MWCNTs, νανοσωματίδια).^{2,21} Ακόμη, από νανοπληρωτικά Pt, Pd, Cu, νανοδιαμάντια, χαλλουϊσίτη, και νανοσωλήνες χαλκού.²¹
- Υβριδικές ενισχύσεις: μεταλλικά οξειδία και κεραμικά, ίνες και άλλα υλικά πληρώσεως δηλαδή σωματίδια καουτσούκ, νιτριλίου, βουταδιενίου και κεραμικά πληρωτικά (Al_2O_3 , SiO_2 και YSZ).^{2,21}

Πέρα, από το μεγάλο πρόβλημα της αντοχής άλλο ένα ζήτημα που προκύπτει από το PMMA έχει σχέση με τις βιολογικές ιδιότητες. Πιο αναλυτικά:

- Το PMMA παρουσιάζει τραχιά επιφάνεια εσωτερικά που το καθιστά ευαίσθητο σε μικροβιακό αποικισμό ο οποίος τελικά οδηγεί σε ασθένειες που σχετίζονται με την



οδοντοστοιχία όπως η στοματίτιδα. Για να γίνει μια βάση οδοντοστοιχίας ανθεκτική σε μικροβιακές λοιμώξεις, έχουν διεξαχθεί διάφοροι τύποι έρευνας για την τροποποίηση της βάσης οδοντοστοιχιών και έχει δείχθει ότι τα νανοσωματίδια ZnO και Ag, έχουν αντιμικροβιακές και αντιμυκητιασικές δράσεις.²

- Η αλλεργική αντίδραση στην ακρυλική ρητίνη είναι επίσης ένα κοινό πρόβλημα, το οποίο όμως έχει αντιμετωπιστεί με τροποποιήσεις της ρητίνης των βάσεων οδοντοστοιχιών. Η επίστρωση διοξειδίου του τιτανίου στην ακρυλική ρητίνη βάσης οδοντοστοιχίας αποτρέπει κάθε είδους βλεννογόνο, υποδόριο και δερματικό ερεθισμό, προλαμβάνει την ταλαιπωρία αλλά και την αλλεργία/ευαισθησία του βλεννογόνου σε ακρυλικό καθιστώντας τις ακρυλικές ρητίνες πιο βιοσυμβατές, αποτρέπει την προσκόλληση των μικροβίων στην ακρυλική ρητίνη και προλαμβάνει λοιμώξεις όπως η καντιντίαση σε ηλικιωμένους ανοσοκατεσταλμένους ασθενείς. Ορισμένα προβλήματα όπως η αστάθεια χρώματος πρέπει να αντιμετωπιστούν.²
- Αν και οι ακρυλικές ρητίνες θεωρούνται βιολογικά ασφαλείς, έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν δερματίτιδα εξ' επαφής σε άτομα που παρουσιάζουν ευαισθησία. Το εναπομείναν μονομερές σε μη πολυμερισμένο MMA προκαλεί ερεθισμό του βλεννογόνου και δερματίτιδα εξ επαφής όχι μόνο σε ασθενείς αλλά και στους οδοντίατρους και τεχνολόγους. Τα προϊόντα MMA είναι επίσης γνωστό ότι προκαλούν άσθμα. Η μη πλήρως πολυμερισμένη ακρυλική ρητίνη είναι επικίνδυνη λόγω των απελευθερωμένων τοξικών χημικών προϊόντων, δηλαδή μονομερούς μεθυλίου, φορμαλδεΐδης, μεθακρυλικού μεθυλεστέρα, φθαλικού διβουτυλεστέρα, βενζοϊκού φαινυλεστέρα και σαλικυλικού. Οι ερευνητές ανέφεραν σημεία και συμπτώματα ακρυλικής κυτταροτοξικότητας που περιλαμβάνουν, εντοπισμένη φλεγμονή του βλεννογόνου, έλκος και αίσθημα καύσου σε εκτεθειμένη θέση στην στοματική κοιλότητα. Ο αναπνευστικός ερεθισμός είναι επίσης κλινικά ορατός. Οι τοποθεσίες έκθεσης συνήθως παρουσιάζονται με νέκρωση, ιστοκυτάρωση, ίνωση και υπερβολική κερατινοποίηση. Οι μη πολυμερισμένες ακρυλικές ρητίνες έχουν αναφερθεί ότι προκαλούν οξειδωτική έκρηξη με αποτέλεσμα την παραγωγή ελευθέρων ριζών η οποία με τη σειρά της προκαλεί βλάβη στο DNA. Κυτταροτοξικές μεταβολές στα ηπατοκύτταρα, καθυστέρηση στον κυτταρικό κύκλο, μειωμένα αντιοξειδωτικά και επαγωγή απόπτωσης και νέκρωσης. Αυτές οι αλλαγές οφείλονται στην παρουσία υπολειπόμενου μονομερούς στις ακρυλικές ρητίνες.² Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθαρισμού οδοντοστοιχιών, δηλαδή η μέθοδος στην οποία η οδοντοστοιχία βυθίζεται σε χημικές ουσίες έχει αποδειχθεί ότι είναι τοξική. Τα απολυμαντικά παραμένουν συνήθως εμποτισμένα στις οδοντοστοιχίες ακόμη και μετά το ξέπλυμα.²



3.1.3 Τεχνητά δόντια

Τα τεχνητά δόντια χρησιμεύουν για την μάσηση της τροφής, την αποκατάσταση της αισθητικής και την διατήρηση της κάθετης διάστασης σύγκλεισης του προσώπου.⁴

Τα τεχνητά δόντια έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με πολλές παραμέτρους όπως το σχήμα, το υλικό. Σύμφωνα με το σχήμα ταξινομούνται σε τρεις τύπους, δηλαδή, ανατομικά δόντια, μη ανατομικά δόντια και λειτουργικά δόντια με γωνία φύματος 200°. Η ταξινόμηση με βάση τον τύπο του υλικού δίνει δύο τύπους δοντιών: δόντια σκληρής ακρυλικής ρητίνης και δόντια πορσελάνης που χρησιμοποιούνται σπανιότερα.^{2,4}

Η πορσελάνη έχει ανώτερες ιδιότητες, δηλαδή μεγαλύτερη αντοχή στην αποτριβή, βιοσυμβατότητα, λιγότερη συσσώρευση πλάκας και αντίσταση στον αποχρωματισμό καθιστώντας την κατάλληλη για χρήση ως υλικό για δόντια οδοντοστοιχίας. Ωστόσο, έχει χαμηλή αντίσταση στην κρούση, χαμηλή αντοχή δεσμού με τη ρητίνη της βάσης και κροταλίζει όταν έρχεται σε επαφή με τους ανταγωνιστές. Η χρήση της πλέον έχει περιοριστεί λόγω εκτεταμένης αποτριβής των ανταγωνιστών δοντιών.²

Η ακρυλική ρητίνη είναι απαραίτητη για τα τεχνητά δόντια και για το υλικό βάσης οδοντοστοιχιών. Τα τεχνητά δόντια της ακρυλικής ρητίνης προτιμώνται από την πορσελάνη επειδή μπορεί να ανθίστανται καλύτερα στις μασητικές δυνάμεις, έχουν καλύτερη πρόσφυση στις βάσεις οδοντοστοιχιών και επισκευάζονται εύκολα αλλά η αστάθεια χρώματος και η ελάχιστη αντοχή στην αποτριβή είναι προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης. Η συνεχής έκθεση σε διαφορετικά ποτά, τσάι και καφέ, δυνάμεις μασητικών κύκλων, διαλύματα βουρτσίσματος και καθαριστικών καθιστούν τα τεχνητά δόντια ευαίσθητα στον αποχρωματισμό, την αποτριβή της επιφάνειας και την τραχύτητα. Το pH, η διάρκεια της πολικότητας έκθεσης και η παρουσία συγκεκριμένων χρωστικών επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των οδοντοστοιχιών. Αυτό δημιουργεί αισθητικό και λειτουργικό πρόβλημα για τους χρήστες οδοντοστοιχιών, μειώνει την περίοδο αποτελεσματικότητας-διάρκεια ζωής της οδοντοστοιχίας και καθιστά δυσάρεστη για τους ασθενείς την χρήση της. Προκειμένου να βελτιωθούν αυτά τα προβλήματα, πρέπει να ληφθούν μελλοντικά μέτρα.²

Πέρα, από τα προκατασκευασμένα τεχνητά δόντια, τα ψηφιακά τεχνητά δόντια μπορούν να κατασκευαστούν με MIL ή 3DP, και μάλιστα υπάρχει μια ευρεία ποικιλία υλικών που δεν περιορίζονται μόνο σε εκείνα που χρησιμοποιούνται για αφαιρούμενες οδοντοστοιχίες, αλλά τα οποία περιλαμβάνουν και εκείνα που χρησιμοποιούνται για ακίνητες προσθέσεις, όπως ρητίνη με βάση το PMMA, σύνθετη ρητίνη, ζirkόνια και PEEK. Από μελέτες έχειδειχθεί ότι, το φορτίο μάσησης και το φορτίο θραύσης των τεχνητών δοντιών με 3DP που προκλήθηκε από εφελκυστική τάση ήταν εντός του εύρους εκείνων που επιδεικνύονταν



από διάφορους τύπους προκατασκευασμένων τεχνητών δοντιών. Ομοίως, όταν η αντίσταση στην αποτριβή δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας ανταγωνιστές ζirkονίας και μετάλλου, η αντίσταση στη αποτριβή των 3DP τεχνητών δοντιών ήταν εντός του εύρους αυτών που εμφανίστηκαν από διάφορα τεχνητά δόντια.¹⁹

Από την άλλη πλευρά, τα τεχνητά δόντια που κατασκευάζονται με MIL ή 3DP πρέπει να γυαλίζονται και να συνδέονται με τη βάση της οδοντοστοιχίας και μερικές φορές πρέπει να εξατομικεύονται χρησιμοποιώντας εξωτερικά υλικά χρώσης. Επομένως, απαιτείται πρόσθετος χρόνος για τεχνική εργασία και προηγμένες δεξιότητες κατά τη χρήση αυτής της προσέγγισης αντί για τη χρήση προκατασκευασμένων τεχνητών δοντιών. Κατά την αξιολόγηση της αντοχής δεσμού των τεχνητών δοντιών στη βάση της οδοντοστοιχίας, ένα τεχνητό δόντι που συνδέθηκε με τη βάση οδοντοστοιχίας PMMA θερμοπολυμεριζόμενη επέδειξε την υψηλότερη δυσθραυστότητα και την αντοχή δεσμού, ακολουθούμενη από ένα τεχνητό δόντι συνδεδεμένο με τη MIL PMMA βάση οδοντοστοιχίας με αυτοπολυμεριζόμενη ρητίνη και τέλος 3DP τεχνητά δόντια συνδεδεμένα σε 3DP βάση οδοντοστοιχίας με φωτοπολυμερισμό. Όσον αφορά τη σταθερότητα χρώματος μιας βάσης οδοντοστοιχίας που συνδέεται με τεχνητά δόντια, η διεπαφή μεταξύ του δίσκου CAD/CAM που βασίζεται σε PMMA και του τεχνητού δοντιού έδειξε λιγότερη αλλαγή χρώματος από το θερμοπολυμεριζόμενη PMMA. Δεν βρέθηκαν αναφορές για υπολειπόμενο μονομερές ή αλλαγές χρώματος στις οδοντοστοιχίες στερεολιθογραφίας. Πάντως, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για τις μεθόδους σύνδεσης.¹⁹

Κατά την ψηφιακή σύνταξη τεχνητών δοντιών, είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν τεχνητά δόντια που διατίθενται στο εμπόριο και απαιτούν προσαρμογή της σύγκλεισης και προσαρμογή των βασικών και εγγύς επιφανειών, καθώς το νωδό μήκος και η απόσταση μεταξύ των τόξων περιορίζονται από τα υπόλοιπα δόντια. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιηθούν ψηφιακά κατασκευασμένα δόντια οδοντοστοιχιών, το μέγεθος και το σχήμα των τεχνητών δοντιών μπορεί να αλλάξει χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD. Επιπλέον, η χρήση της λειτουργίας αντιγραφής ή κατοπτρισμού στο λογισμικό με τα υπάρχοντα δόντια και η εκτέλεση προσαρμογής της σύγκλεισης σε εικονικούς αρθρωτές μπορεί να ενισχύσει τις αρμονικές ευθυγραμμίσεις με τα υπόλοιπα δόντια.¹⁹

3.2 Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, ενδείξεις και αντενδείξεις των Μ.Ο.

Παρά το γεγονός ότι το είδος της Μ.Ο., τα υλικά κατασκευής και άλλοι παράγοντες μπορεί να επιφέρουν διαφοροποιήσεις στα πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, τις ενδείξεις και τις



αντενδείξεις της Μ.Ο. σε γενικές γραμμές για τις κλασσικές Μ.Ο. με άγκιστρα και κράμα Co-Cr ισχύουν τα παρακάτω. Τα προτερήματα είναι:

- Η δυνατότητα επιδιόρθωσης των διαφόρων τμημάτων της Μ.Ο.·
- Η προσθήκη τεχνητών δοντιών, σε αντικατάσταση απολεσθέντων φυσικών δοντιών, μετά την κατασκευή της·
- Η δυνατότητα μετατροπής της σε προσωρινή άμεση ολική οδοντοστοιχία.⁵

Τα μειονεκτήματα σχετίζονται με:

- Την ψυχολογική επιβάρυνση ασθενή·
- Αναπόφευκτα αισθητικά προβλήματα λόγω της κακής σχεδίασης μεταλλικού σκελετού·
- Με τον αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης τερηδογονών βλαβών και περιοδοντικής νόσου σε περιπτώσεις ελλιπούς στοματικής υγιεινής.⁵

Η Μ.Ο. ενδείκνυται:

- Σε περιπτώσεις όπου η βαρύτητα της περιοδοντικής νόσου καθιστά δυσμενή την πρόγνωση μιας ακίνητης προσθετικής εργασίας·
- Σε περιπτώσεις ανεπάρκειας δοντιών-στηριγμάτων για ακίνητη πρόσθεση, δηλαδή στην ύπαρξη μεγάλων κενών διαστημάτων·
- Όταν η απώλεια των δοντιών συνοδεύεται από μεγάλη απώλεια φατνιακού οστού·
- Σαν προσωρινή αποκατάσταση μέχρι να κατασκευαστεί η μόνιμη εργασία (ακίνητη ή εμφυτεύματα)·
- Στα νεαρά άτομα όπου δεν έχει ολοκληρωθεί η διάπλαση δοντιών·
- Σε ηλικιωμένα άτομα τα οποία δεν μπορούν να υποβληθούν σε χρονοβόρες και πολύπλοκες θεραπείες·
- Για οικονομικούς λόγους, καθώς κοστίζει λιγότερο η κατασκευή της·

Γενικώς, στην κλινική πράξη δεν υπάρχουν αντενδείξεις, μπορεί όμως να αναζητηθούν στην ψυχολογία και στην διάθεση του ασθενή να αποδεχθεί τη Μ.Ο. Η αποκατάσταση της μερικής νωδότητας με Μ.Ο εξακολουθεί να αποτελεί λύση εκλογής για πολλές περιπτώσεις γιατί είναι μη επεμβατική λύση, χαμηλού κόστους, που θεωρητικά αποκαθιστά κάθε περίπτωση μερικής νωδότητας.⁵

3.3 Ιδιότητες των Μ.Ο.

Η Μ.Ο. για να λειτουργεί επιτυχώς και να εκπληρώνει πλήρως τον σκοπό της κατασκευής της πρέπει να πληροί το κριτήριο της λειτουργικής σταθερότητας δηλαδή πρέπει να έχει ορισμένες ιδιότητες και συγκεκριμένα στήριξη, συγκράτηση και σταθερότητα (Εικόνα 3-2).^{4,7}



Στήριξη της Μ.Ο. ορίζεται ως η ικανότητα της Μ.Ο. να αντιστέκεται στις δυνάμεις που τείνουν να την μετατοπίσουν κατακόρυφα προς τους υποκείμενους ιστούς, όπως είναι οι δυνάμεις της μάσησης. Η στήριξη εξασφαλίζεται με τους εφαπτήρες (δηλαδή τα δόντια στηρίγματα), τις βάσεις (δηλαδή τον βλεννογόνο) ή και τα δύο μαζί. Η έννοια της κατακόρυφης μετατόπισης είναι βέβαια σχετική, και αποδίδεται ως μετατόπιση σε διεύθυνση κάθετη προς το οριζόντιο επίπεδο ή ακριβέστερα κάθετη προς το μασητικό επίπεδο των δοντιών. Αντιστήριξη της Μ.Ο. είναι ο μηχανισμός με τον οποίο εξουδετερώνονται οι πλάγιες δυνάμεις που ασκούνται στο δόντι–στήριγμα της Μ.Ο., και οι οποίες αναπτύσσονται κατά την πορεία του συγκρατητικού βραχίονα του αγκίστρου στην καμπύλη επιφάνεια του δοντιού–στηρίγματος. Η αντιστήριξη εξασφαλίζεται με το βραχίονα αντιστήριξης που τοποθετείται στην αντίθετη από το συγκρατητικό βραχίονα επιφάνεια του δοντιού–στηρίγματος και διαμορφώνεται σύμφωνα με την φορά ενθέσεως.^{4,7}

Ο όρος συγκράτηση της Μ.Ο. υποδηλώνει την ικανότητα της Μ.Ο να αντιστέκεται στην απομάκρυνση από τους ιστούς έδρασης (τουτέστιν σε δυνάμεις αντίθετης φοράς από τις δυνάμεις της μάσησης όπως το βάρος της, η επίδραση ελκτικών δυνάμεων κατά την μάσηση κολλώδους τροφής και η επίδραση δυνάμεων που ασκούνται στα περιφερειακά της όρια από τους παρακείμενους ιστούς, όπως γίνεται π.χ. στην ομιλία, στο βήχα, στο γέλιο κλπ.). Η απομάκρυνση της Μ.Ο. από τους ιστούς στους οποίους στηρίζεται, λόγω της έλλειψης συγκράτησης, γίνεται είτε στο σύνολο της είτε μόνο στο ελεύθερο άκρο της βάσης της. Στην πρώτη περίπτωση απομακρύνονται και οι εφαπτήρες από τα δόντια στηρίγματα, ενώ στην δεύτερη και ενώ οι εφαπτήρες παραμένουν σε επαφή με τα δόντια στηρίγματα, ολόκληρη η Μ.Ο. στρέφεται ή τείνει να περιστραφεί γύρω από τον άξονα υπομοχλίου, και έτσι απαιτείται άμεση και έμμεση συγκράτηση αντίστοιχα στην κάθε περίπτωση. Η ύπαρξη των έμμεσων συγκρατητικών εξουδετερώνει την τάση περιστροφής της Μ.Ο. Άμεση συγκράτηση της Μ.Ο είναι η ικανότητα της Μ.Ο να αντιστέκεται στις δυνάμεις που τείνουν να την μετατοπίσουν μακριά από τους υποκείμενους ιστούς, κατά τη φορά αφαίρεσης και εξασφαλίζεται με τους άμεσους συγκρατητήρες και ειδικότερα με τους συγκρατητικούς βραχίονες των αγκίστρων ενώ έμμεση συγκράτηση της Μ.Ο είναι η αποτροπή της απομάκρυνσης των βάσεων της Μ.Ο με ελεύθερο άκρο από τους υποκείμενους ιστούς, κατά την περιστροφή της Μ.Ο γύρω από τον άξονα υπομοχλίου και εξασφαλίζεται από τους έμμεσους συγκρατητήρες (εφαπτήρας ή και άγκιστρο συνεχείας). Η θέση των εφαπτήρων σχεδιάζεται μπροστά από τον άξονα υπομοχλίου και στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση. Η σχεδίαση του αγκίστρου συνεχείας πρέπει να αποκλείεται σε περιπτώσεις αραιοδοντίας γιατί δημιουργεί αισθητικά προβλήματα, ενώ στην άνω γνάθο θα πρέπει να ελέγχεται με προσοχή η πιθανή



παρεμβολή και στη σύγκλειση των πρόσθιων φυσικών δοντιών. Σημειώνεται ότι οι πλάκες, γλωσσικές ή υπερώιες, χωρίς να είναι, δρουν σαν έμμεσοι συγκρατητήρες, εφόσον τοποθετηθούν βοηθητικοί επαπτήρες στα άκρα τους, συνήθως στους κυνόδοντες άνω και κάτω γνάθου. Επιπλέον, σε περιπτώσεις εφαρμογής συνδέσμων ακρίβειας, κάθε στοιχείο που παρέχει σταθερότητα και καλύτερη κατανομή των πιέσεων πρέπει να χρησιμοποιηθεί, όπως έμμεσα συγκρατητικά στοιχεία, βραχίονες αντιστήριξης, μέγιστη καλυπτόμενη επιφάνεια.^{4,5,7}

Με την όρο σταθερότητα της Μ.Ο εννοείται η ικανότητα της Μ.Ο, να αντιστέκεται στις οριζόντιες δυνάμεις που τείνουν να την μετατοπίσουν σε προσθοπίσθια και πλάγια κατεύθυνση, και να παραμένει ακίνητη και σταθερή στην θέση της. Η σταθερότητα εξασφαλίζεται από σταθεροποιητικά της στοιχεία δηλαδή με τις βάσεις, τους μείζονες και ελάσσονες συνδετήρες και τους βραχίονες αντιστήριξης, με την προϋπόθεση να είναι άκαμπτοι, τους επαπτήρες και τους έμμεσους συγκρατητήρες.^{4,7}



Εικόνα 3-2 Συγκράτηση (αριστερά), στήριξη (μεσαία), σταθερότητα (δεξιά).⁷

3.4 Ταξινόμηση των Μ.Ο.

Η ταξινόμηση των μερικών νωδοτήτων και των αντίστοιχων Μ.Ο. είναι απαραίτητη για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας και για τον σχεδιασμό της αποκατάστασης. Η ταξινόμηση των Μ.Ο. προέκυψε ως αναγκαιότητα ταυτόχρονα με την ωρίμανση της θεωρητικής και κατασκευαστικής της υπόστασης από τις αρχές του περασμένου αιώνα.⁸

Στις απαιτήσεις που θα πρέπει να καλύπτει ένα σύστημα ταξινόμησης Μ.Ο. περιλαμβάνονται:

- Να είναι σε γενικές γραμμές αποδεκτό
- Να δίνει άμεσα τη γενική εικόνα της θέσης τόσο των νωδών περιοχών όσο και των υπάρχοντων δοντιών
- Να καθοδηγεί τον σχεδιασμό
- Να διευκολύνει την επικοινωνία των εμπλεκόμενων στο σχέδιο θεραπείας
- Να εισφέρει στη διδασκαλία του αντικειμένου.⁸



Από το 1920, εισηγήθηκαν από ποικίλους συγγραφείς διάφορα συστήματα ταξινόμησης (Πίνακας 3-1), καθένα από τα οποία χρησιμοποιούσε διαφορετικά, αλλά, κατά περιπτώσεις, σχετικά κριτήρια, που ανακεφαλαιώνονται στα εξής:

- Μήκος, αριθμός, και θέση των νωδοτήτων, συχνά συνδυαστικά με τη θέση και τον αριθμό των δοντιών-στηριγμάτων
- Τύπος της στήριξης (οδοντική, βλεννογόνια, μικτή) – εκτιμώμενο ποσοστό στήριξης από τα δόντια-στηρίγματα και την φατνιακή ακρολοφία.
- Θέση και αριθμός των έμμεσων και άμεσων συγκρατητικών μέσων.⁸

Η ταξινόμηση κατά Kennedy, ένα από τα πρώτα εγχειρήματα για οργάνωση και συστηματική ταξινόμηση των μερικών νωδοτήτων και των αντίστοιχων οδοντοστοιχιών, τέθηκε υπό χρήση στο σύγγραμμα του Edward Kennedy «Partial Denture Construction» που δημοσιεύτηκε το 1928 (Kennedy 1928). Από τότε και μέχρι σήμερα διατηρεί σταθερά την προτίμηση και την κοινή αποδοχή, καθώς επιτρέπει άμεση και εύκολη ανάπτυξη μιας νοερής «εικόνας» κάθε περίπτωσης, προσφέρει ευκολία στη λογική προσέγγιση του σχεδιασμού και υποδεικνύει τις σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Η ταξινόμηση στηρίζεται στον εξαιρετικής σημασίας διαχωρισμό μεταξύ οδοντικά αφοριζόμενων νωδοτήτων (Μ.Ο. οδοντικής στήριξης) και ελεύθερων άκρων (Μ.Ο. μικτής στήριξης). Στα αρνητικά της εντάσσεται το γεγονός ότι δεν περιγράφει επαρκώς τη στηρικτική ικανότητα των δοντιών και των δομών στήριξης καθώς επίσης δεν δίνει πληροφορίες για τη θέση (πρόσθιες – οπίσθιες) καθώς και την έκταση των δευτερευουσών νωδοτήτων. Για την αντιμετώπιση των ελλείψεων αυτών προτάθηκαν στη συνέχεια συστήματα ταξινόμησης που τροποποιούν ή επεκτείνουν τη βασική ταξινόμηση (Πίνακας 3-1), και η πλέον γνωστή αυτών των τροποποιήσεων είναι εκείνη του Applegate που περιλαμβάνει εκτίμηση της στηρικτικής ικανότητας των δοντιών-στηριγμάτων, καθώς και η λιγότερο γνωστή του Fiest η οποία, σε προσπάθεια κάλυψης όλων των πιθανών περιπτώσεων, επεκτείνεται σε 10 συνολικά κατηγορίες Μ.Ο. Σήμερα το σύστημα ταξινόμησης Kennedy-Applegate χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά μεταξύ των επαγγελματιών του χώρου και πρόσφατα έχουν δημοσιευτεί προτάσεις για συμπλήρωση, ώστε να συμπεριλάβει και τις μεταβολές της μορφολογίας, λειτουργίας και εμβιομηχανικής που προκαλούν τα τεχνητά στηρίγματα, τα εμφυτεύματα.⁸

Στο σύστημα ταξινόμησης Kennedy-Applegate (Εικόνα 3-3), η ταξινόμηση αφορά ουσιαστικά τους μερικά νωδούς οδοντικούς φραγμούς και κατ' επέκταση και τις Μ.Ο. που κατασκευάζονται, για να τους αποκαταστήσουν. Έτσι, Μ.Ο. Κατηγορίας II κατά Kennedy είναι η σύντομη ονομασία της Μ.Ο. που δημιουργείται για να αποκαταστήσει οδοντικό φραγμό με μερική νωδότητα Κατηγορίας II κατά Kennedy. Σε κάθε μερικά νωδό φραγμό



αναγνωρίζεται μία (ή δύο, για την Κατηγορία I) κύρια νωδότητα, από τη θέση και την οριοθέτηση της οποίας καθορίζεται η Κατηγορία στην οποία εντάσσεται η νωδότητα (Kennedy 1928). Συγκεκριμένα, στην ταξινόμηση κατά Kennedy διακρίνονται 4 Κατηγορίες:

- Κατηγορία I: Αμφοτερόπλευρες οπίσθιες (άπω των φυσικών δοντιών) νωδότητες. Δεν υπάρχει φυσικό δόντι άπω των νωδών περιοχών (αμφιπλευρου ελευθέρου άκρου M.O.)
- Κατηγορία II: Μονόπλευρη οπίσθια (άπω των φυσικών δοντιών) νωδότητα. Δεν υπάρχει φυσικό δόντι άπω της νωδής περιοχής
- Κατηγορία III: Μονόπλευρη οπίσθια νωδότητα: Υπάρχουν φυσικά δόντια, τόσο εγγύς όσο και άπω της νωδής περιοχής
- Κατηγορία IV: Πρόσθια αμφίπλευρη (διασχίζει τη μέση γραμμή) νωδότητα. Τα φυσικά δόντια εντοπίζονται άπω της νωδότητας.

Ο Applegate, συμπλήρωσε το σύστημα ταξινόμησης κατά Kennedy με δύο επιπρόσθετες κατηγορίες (Κατηγορίες V και VI κατά Kennedy-Applegate) (Applegate 1954):

- Κατηγορία V: Μερικές νωδότητες Κατηγορίας III (οδοντικά αφοριζόμενες), όπου το πρόσθιο δόντι-στήριγμα δεν διαθέτει ικανοποιητική ικανότητα στήριξης, οπότε η M.O. σχεδιάζεται ως κατηγορία I ή II κατά Kennedy, ήτοι με ελεύθερο άκρο, αλλά στην πρόσθια περιοχή
- Κατηγορία VI: Μερικές νωδότητες Κατηγορίας III (οδοντικά αφοριζόμενες), με τα παρακείμενα δόντια απόλυτα ικανά να υποστηρίξουν ακίνητη αποκατάσταση, που για διάφορους λόγους (οικονομικούς, υγιεινής κλπ.) κατασκευάζεται M.O., πλήρως στηριζόμενη οδοντικά, και πιθανόν (χωρίς να συνιστάται) μονόπλευρη.⁸

Οι κανόνες του Applegate για την εφαρμογή του συστήματος ταξινόμησης Kennedy (Applegate 1954) είναι:

1. Η ταξινόμηση γίνεται μετά από τις απαραίτητες προ-προσθετικές εξαγωγές των φυσικών δοντιών
2. Ο ελλείπων τρίτος γομφίος που δεν προβλέπεται να αποκατασταθεί, δεν λαμβάνεται υπόψη ως νωδότητα για την ταξινόμηση
3. Ο υπάρχων τρίτος γομφίος που προβλέπεται να χρησιμοποιηθεί ως στήριγμα υπολογίζεται για την ταξινόμηση
4. Ο ελλείπων δεύτερος γομφίος που δεν προβλέπεται να αποκατασταθεί, δεν υπολογίζεται ως νωδή περιοχή για την ταξινόμηση
5. Η πλέον οπίσθια (άπω) νωδή περιοχή (ή περιοχές) θεωρείται πάντα ως κύρια νωδότητα και καθορίζει την Κατηγορία



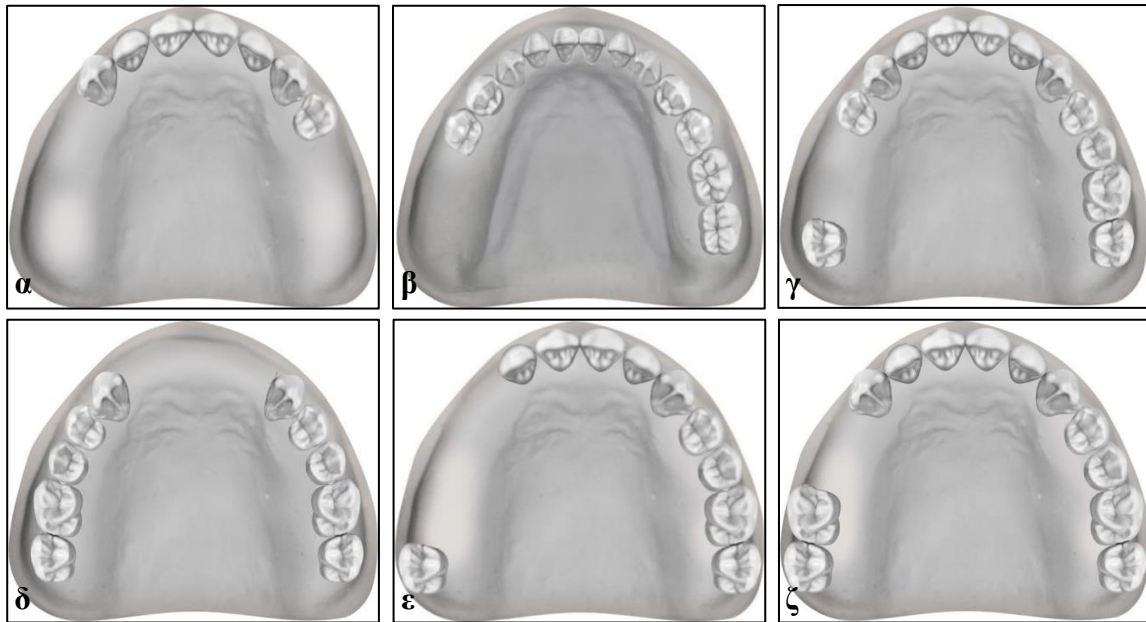
6. Οι κωδές περιοχές πλην αυτής που προσδιορίζει την Κατηγορία (κύριας κωδότητας) λέγονται δευτερεύουσες κωδότητες και αναφέρονται με τον αριθμό τους: 1 δευτερεύουσα κωδότητα προσδιορίζει Υποκατηγορία 1, 2 δευτερεύουσες κωδότητες Υποκατηγορία 2 κ.ο.κ. (Εικόνα 3-4 α, β)
7. Η έκταση των δευτερευουσών κωδοτήτων δεν υπολογίζεται, παρά μόνο ο αριθμός τους.

Στους οδοντικούς φραγμούς Κατηγορίας IV δεν ορίζονται δευτερεύουσες κωδότητες, αφού σύμφωνα με τον κανόνα 5, η οπίσθια κωδότητα ορίζεται αυτόματα ως κύρια.⁸

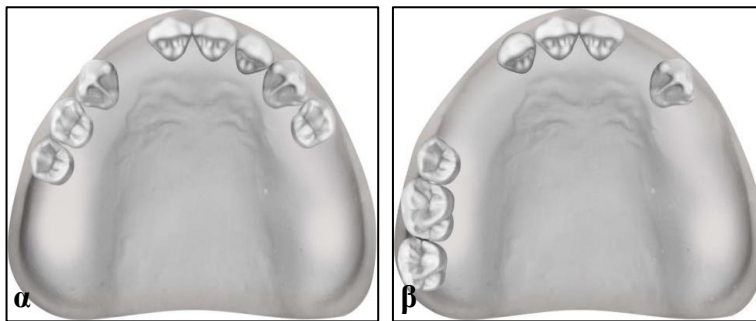
Πίνακας 3-1 Συστήματα ταξινόμησης μερικών οδοντοστοιχιών.⁸

Συγγραφέας	Έτος	Κριτήρια	Ταξινόμηση
Cummer	1920	Θέση και αριθμός άμεσων συγκρατητήρων, θέση έμμεσων συγκρατητήρων	Κατηγορία I-IV
Kennedy	1923	Σχέση των κωδών περιοχών με τα δόντια-στηρίγματα	Κατηγορία I-IV
Bailyn	1928	Τύπος στήριξης: οδοντική, βλεννογόνια, μικτή	Κατηγορία I-IV A, P
Neurohr	1939	Τύπος στήριξης	Κατηγορία I-II παραλλαγές I-II
Mauk	1941	Αριθμός, θέση και μήκος των κωδών περιοχών, αριθμός και θέση των φυσικών δοντιών	Κατηγορία I-VI
Wild	1949	Σχέση των κωδών περιοχών με τα δόντια-στηρίγματα	Κατηγορία I-III
Godfrey	1951	Θέση και έκταση της κωδής περιοχής	Κατηγορία A-D
Friedman	1953	Θέση και οριοθέτηση των κωδών περιοχών	Κατηγορία A-C
Beckett	1953	Τύπος στήριξης: οδοντική, βλεννογόνια, μικτή	Κατηγορία I-III
Craddock	1954	Τύπος στήριξης	Κατηγορία I-III
Austin-Lidge	1957	Θέση των ελλειπόντων δοντιών	Κατηγορία A, P, AP
Watt	1958	Τύπος στήριξης	Οδοντικά/βλεννογόνια στήριζόμενη
Skinner	1957	Ποιότητα και ποσοστό στήριξης από τα δόντια-στηρίγματα και τη φατνιακή ακρολοφία	Κατηγορία I-IV
Applegate-Kennedy	1954	Στηρικτική ικανότητα των γειτονικών στις κωδές περιοχές δοντιών	Kennedy Κατηγορία I-IV, + V, VI
Swenson	1963	Σχέση των κωδών περιοχών με τα δόντια-στηρίγματα	Κατηγορία I-IV
Avant	1960	Μήκος των κωδών περιοχών και σχέση με τα δόντια-στηρίγματα	Κατηγορία I-III
Costa	1974	Εντοπισμός των κωδών περιοχών	Πρόσθιες, πλάγιες και ακραίες κωδότητες Kennedy-Applegate
Fiest	1973	Στηρικτική ικανότητα των γειτονικών στις κωδές περιοχές δοντιών	Κατηγορία I-VI, + VII-X
Osborne	1979	Τύπος στήριξης	Κατηγορία I-III
Misch	1987	Εκτίμηση του οστού στις κωδές περιοχές για τοποθέτηση εμφυτευμάτων	Υποκατηγορίες A-D
Al-Johany	2008	Μερικά κωδοί οδοντικοί φραγμοί με εμφυτεύματα	Τροποποιημένη Kennedy Κατηγορία I-IV (ICK)





Εικόνα 3-3 Ταξινόμηση Kennedy-Applegate. Μερική νωδότητα Κατηγορίας Kennedy I (α), Kennedy II (β), Kennedy III (γ), Kennedy IV (δ), Kennedy-Applegate V, Kennedy-Applegate VI.⁸



Εικόνα 3-4 Μερική νωδότητα Κατηγορίας I, Υποκατηγορίας 1 (1 δευτερεύουσα νωδή περιοχή) (α) και μερική νωδότητα Κατηγορίας II, Υποκατηγορίας 2 (2 δευτερεύουσες νωδές περιοχές) (β).⁸

Παρόλο που οι ταξινομήσεις Kennedy και Kennedy-Applegate είναι χρήσιμες για την οπτικοποίηση του μερικώς νωδού τόξου και την επικοινωνία, δεν αντιμετωπίζουν τη λεπτομερή πολυπλοκότητα που είναι απαραίτητη για ζητήματα χρέωσης και για τη διάκριση περίπλοκων καταστάσεων που χρειάζονται παραπομπή. Το σύστημα ταξινόμησης Prosthodontic Diagnostic Index (PDI) για μερικώς νωδούς ασθενείς αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Αυτή η ταξινόμηση διακρίνει τη μερική νωδότητα σύμφωνα με την πολυπλοκότητα που καθορίζεται από 5 κριτήρια, συγκεκριμένα τη θέση και την έκταση των νωδών περιοχών, την κατάσταση των δοντιών-στηριγμάτων, το συγκλεισιακό σχήμα, την μορφολογία της κορυφογραμμής της φατνιακής ακρολοφίας και άλλες καταστάσεις, για τη διευκόλυνση συνεπών και προβλέψιμων αποφάσεων σχεδιασμού θεραπείας. Ο περιγραφικός χαρακτήρας αυτού του συστήματος ταξινόμησης (Εικόνα 3-5) παρέχει μια πιο λεπτομερή επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων στο σχέδιο θεραπείας. Η υιοθέτηση αυτού του συστήματος έχει τη δυνατότητα να ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό την



οδοντιατρική, δίνοντας έμφαση στο σύστημα ταξινόμησης PDI στην οδοντιατρική εκπαίδευση και στη χρήση του για χρέωση, αποζημίωση / αποζημίωση και δημιουργία παραπομπών. Δυστυχώς, αυτό το σύστημα ταξινόμησης έχει περιορισμένη χρήση στην οδοντιατρική λόγω της πολυπλοκότητάς του, της αντίστασης του στην αλλαγή και της διαγνωστικής βάσης σε ένα επάγγελμα που καθοδηγείται σε μεγάλο βαθμό στη θεραπεία.²²

	Τάξη I	Τάξη II	Τάξη III	Τάξη IV
Θέση και έκταση της νωδής περιοχής				
Ιδανικός ή ελάχιστος κίνδυνος—Ένα τόξο				
Μέτριος κίνδυνος—και τα 2 τόξα				
Σημαντικός κίνδυνος—>3 δόντια				
Σοβαρός κίνδυνος—προστατευόμενη πρόγνωση				
Συγγενές ή επίκτητο γναθοπροσωπικό ελάττωμα				
Κατάσταση στηριγμάτων				
Ιδανικός ή ελάχιστος κίνδυνος—				
Μέτριος κίνδυνος—1-2 sextants				
Σημαντικός κίνδυνος—3 sextants				
Σοβαρός κίνδυνος—≥4 sextants				
Σύγκλειση				
Ιδανικός ή ελάχιστος κίνδυνος				
Μέτριος κίνδυνος—τοπικό adjunctive tx				
Σημαντικός κίνδυνος—συγκλεισιακό σχήμα				
Σοβαρός κίνδυνος—Αλλαγή στον OVD				
Φατνιακή ακρολοία				
Τάξη I νωδότητα				
Τάξη II νωδότητα				
Τάξη III νωδότητα				
Τάξη IV νωδότητα				
Συνθήκες δημιουργίας ασφαλούς πρόγνωσης				
Σοβαρές στοματικές εκδηλώσεις συστηματικής νόσου δυσκινησία της άνω-κάτω γνάθου και/ή αταξία Πυρίμαχος ασθενής				

Εικόνα 3-5 Ταξινόμηση PDI για μερική νωδότητα. Αξιολογούνται μεμονωμένα-ατομικά κριτήρια διάγνωσης και επιλέγεται το κατάλληλο πλαίσιο. Το πιο προηγμένο εύρημα καθορίζει την τελική ταξινόμηση.²²

Τέλος, σκόπιμο κρίνεται να αναφερθεί και η ταξινόμηση Bailyn όπου συχνά αναφέρεται μέχρι και σήμερα, κατά τον οποίον οι Μ.Ο. μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μ.Ο. οδοντικής στήριξης, ήτοι Μ.Ο. που στηρίζονται εξολοκλήρου στα δόντια-στηρίγματα.
- Μ.Ο. βλεννογόνιας στήριξης, ήτοι Μ.Ο. που στηρίζονται εξολοκλήρου στο βλεννογόνο και τους υποκείμενους μαλθακούς ιστούς και το οστό.
- Μ.Ο. μικτής στήριξης, ήτοι Μ.Ο. που στηρίζονται και στα δύο, ήτοι στα δόντια στηρίγματα και στον υποκείμενο της βλεννογόνο.^{4,5,7}

3.5 Στάδια συμβατικής και ψηφιακής μεθόδου κατασκευής των Μ.Ο.

3.5.1 Συμβατικά στάδια κατασκευής Μ.Ο.

Παρακάτω παρατίθεται τόσο τα κλινικά (Κ) όσο και τα εργαστηριακά (Ε) στάδια κατασκευής των Μ.Ο., αφενός για να έχει ο τεχνολόγος μια ολοκληρωμένη εικόνα της



κατασκευής της Μ.Ο. και αφετέρου να γνωρίζει ποια στάδια είναι αμιγώς κλινικά ή εργαστηριακά και σε ποια στάδια θα πρέπει να συνεργάζεται στενά με τον οδοντίατρο για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα τα στάδια είναι:

1. Εξέταση του ασθενούς (Κ):
 - 1.1. Συνέντευξη (καταγραφή των προσωπικών στοιχείων, κύριο παράπονο, αιτία προσέλευσης, ερωτήσεις, προσδοκίες, φόβοι, επιφυλάξεις)
 - 1.2. Ιατρικό (γενικές παθήσεις, φάρμακα) και οδοντιατρικό ιστορικό (αιτία απώλειας των δοντιών, εμπειρία από προσθετικές αποκαταστάσεις, δίαιτα, έξεις)
 - 1.3. Πρώτη κλινική εξέταση (επιπτώσεις της μερικής νωδότητας στην εμφάνιση, πρώτη ενδοστοματική εξέταση, εκτίμηση στοματικής υγιεινής – οδηγίες)
 - 1.4. Ακτινολογικός έλεγχος – λήψη ακτινογραφιών (οπισθοφατνιακές ακτινογραφίες, πανοραμική ακτινογραφία)
 - 1.5. Λήψη αρχικών αποτυπωμάτων
 - 1.6. Καταγραφές σύγκλεισης ή της σχέσης των γνάθων για την ανάρτηση των αρχικών εκμαγείων.
2. Εργαστηριακός έλεγχος (Ε):
 - Κατασκευή αρχικών εκμαγείων (ή αλλιώς εκμαγείων μελέτης)
 - Μελέτη περιστατικού που περιλαμβάνει αφενός την τοποθέτηση και ανάλυση του εκμαγείου μελέτης στον αρθρωτήρα και αφετέρου την ανάλυση του σε παραλληλογράφο
 - Κατασκευή ατομικού δισκαρίου.
3. Σχέδιο θεραπείας – κλινική εξέταση, ακτινογραφική εξέταση, μελέτη των αναρτημένων εκμαγείων (Κλινικό στάδιο σε συνεργασία με τον τεχνολόγο).
4. Προπροσθετικές παρεμβάσεις – γενική και ειδική (τροποποιήσεις στις επιφάνειες των δοντιών στηριγμάτων με εκτροχισμό, ώστε να διαθέτουν όμορα οδηγιά επίπεδα, επίπεδα αντιστήριξης, ενιαία μείζονα περίμετρο στο σωστό ύψος, συγκρατητικές εσοχές στη θέση και με το βάθος που απαιτείται, κατάλληλου βάθους και σχήματος υποδοχές για τους εφαπτήρες και γενικώς δημιουργούνται οι συνθήκες οι οποίες θα πρέπει να συνάδουν με τα προαποφασισμένα στοιχεία που προέκυψαν από τη σχεδίαση στον παραλληλογράφο για την κατασκευή του μεταλλικού σκελετού της Μ.Ο. για την κατά το δυνατό καλής λειτουργίας της (Κ).
5. Έναρξη εκπόνησης του σχεδίου θεραπείας ξεκινώντας με την κατασκευή ατομικού δισκαρίου (Ε).
6. Λήψη οριστικού ή τελικού αποτυπώματος (Κ).



7. Κατασκευή οριστικού ή τελικού εκμαγείου (Ε).
8. Ανάλυση τελικού εκμαγείου και σχεδίαση της υπό κατασκευή Μ.Ο. ώστε να ανταποκρίνεται στις εμβιομηχανικές και βιολογικές απαιτήσεις (Ε).
9. Διαδικασία κατασκευής μεταλλικού σκελετού (Ε):
 - 9.1. Προετοιμασία του τελικού εκμαγείου για ανατύπωση (εξουδετέρωση εσοχών, δημιουργία πορείας των συγκρατητικών βραχιόνων και καθορισμός σημείου απόληξης τους σύμφωνα με το βάθος εσοχής το οποίο μπορεί να είναι 0,25, 0,50 ή 0,75 mm, καθορισμός της θέσης τοποθέτησης του βραχίονα αντιστήριξης, καθορισμός σχήματος του μείζονα συνδετήρα και μεγέθους του σύμφωνα με όσες οδηγίες του έχουν αποσταλεί εγγράφως) (Ε)
 - 9.2. Ανατύπωση τελικού εκμαγείου με πυρόχωμα (Ε)
 - 9.3. Κατασκευή πυροχωμάτινου εκμαγείου και μεταφορά σχεδίασης στο πυροχωμάτινο εκμαγείο, από το τελικό (Ε)
 - 9.4. Διαμόρφωση κέρινου προπλάσματος του μεταλλικού σκελετού της Μ.Ο. (κέρωμα εκμαγείου) (Ε)
 - 9.5. Τοποθέτηση αγωγών χύτευσης (Ε)
 - 9.6. Επένδυση με πυρόχωμα του κερωμένου προπλάσματος του σκελετού και του εκμαγείου (Ε)
 - 9.7. Αποκήρωση και προθέρμανση του πυροχωμάτινου εκμαγείου (Ε).
 - 9.8. Χύτευση μεταλλικού σκελετού (Ε).
 - 9.9. Καθαρισμός από το πυρόχωμα, λείανση και στίλβωση του μεταλλικού σκελετού (Ε)
 - 9.10. Έλεγχος εφαρμογής μεταλλικού σκελετού στο εκμαγείο (Ε)
 - 9.11. Έλεγχος μεταλλικού σκελετού στο στόμα (Κ).
10. Κατασκευή βασικών πλακών και κέρινων υψών – τόξων καταγραφής για την καταγραφή της σύγκλεισης / σχέσεων των γνάθων (Ε).
11. Καταγραφές του προσώπου – λήψη κεντρικής σχέσης των γνάθων (Κ).
12. Μεταφορά των καταγραφών και τοποθέτηση των εκμαγείων στον αρθρωτήρα (Ε).
13. Εκλογή τεχνητών δοντιών (Κ).
14. Σύνταξη τεχνητών δοντιών (Ε).
15. Δοκιμή Μ.Ο στο στόμα του ασθενούς (Κ).
16. Εργαστηριακές διαδικασίες τελείωσης της Μ.Ο.
 - 16.1. Τοποθέτηση στα έγκλειστρα (Ε)
 - 16.2. Αποκήρωση, στοιβαγμός και όπτηση Μ.Ο (Ε)



- 16.3. Λείανση και στίλβωση Μ.Ο. (Ε).
17. Παράδοση Μ.Ο – τοποθέτηση στο στόμα (Κ):
- 17.1. Εξωστοματικός έλεγχος (προεξοχές, ανωμαλίες)
- 17.2. Ενδοστοματικός έλεγχος (δυσκολία ένθεσης, εσοχές υπολειμματικής φατνιακής ακρολοφίας, ενσωμάτωση συγκρατητικών βραχιόνων στο ακρυλικό, καταγραφή σύγκλεισης, εντοπισμός υπερπιέσεων – υπερεκτάσεων)
- 17.3. Οδηγίες (ανάγκη προσαρμογής, ένθεση – αφαίρεση, καθαρισμός – διατήρηση υγιεινής, ανάγκη παρακολούθησης).
18. Επανάλεγκχοι της Μ.Ο. (Κ). Ο πρώτος επανέλεγχος προγραμματίζεται 2-7 ημέρες μετά από την παράδοση της Μ.Ο. και αν υπάρχουν προβλήματα πραγματοποιείται σύντομα άμεση αντιμετώπισή τους, ενώ αν δεν υπάρχουν τότε είναι θεμιτό να γίνει ο επανέλεγχος μετά από περίπου μια εβδομάδα όπου θα υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία της Μ.Ο. Ο επανέλεγχος περιλαμβάνει τον έλεγχο των περιοχών υπερπιέσεων ή υπερεκτάσεων. Οι περιοχές που τραυματίζουν τους ιστούς διευθετούνται με εκτροχισμό. Μόνον όταν ο ασθενής είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τη Μ.Ο. δίχως να αισθάνεται πόνο, μπορεί ο επανέλεγχος να προχωρήσει στην τελική διευθέτηση της σύγκλεισης, που είναι απαραίτητη στη χρονική αυτή στιγμή όπου η Μ.Ο. έχει λειτουργήσει και έχει λάβει την οριστική της θέση, σε σχέση με τα δόντια-στηρίγματα και τον βλεννογόνο των φατνιακών ακρολοφιών.
19. Επανάρτηση της Μ.Ο. στον αρθρωτήρα (προαιρετικό Κ+Ε). Εξαιτίας του ότι, στις Μ.Ο. με ελεύθερα άκρα η καταγραφή των επαφών σύγκλεισης μπορεί να επηρεαστεί από τη μικρή υποχώρηση της βάσης της Μ.Ο. λόγω της ενδοτικότητας του βλεννογόνου, η εξισορρόπηση πραγματοποιείται με επανάρτηση της Μ.Ο. στον αρθρωτήρα, όπου υπάρχει η σταθερή στηρίζουσα επιφάνεια της γύψου. Για την επανάρτηση λαμβάνεται αρχικά η καταγραφή της σύγκλεισης χρησιμοποιώντας κατάλληλο υλικό καταγραφής (κερί για καταγραφές ή σιλικονούχο αποτυπωτικό δήξης) και έπειτα πραγματοποιείται ήψη αποτυπώματος της στοματικ'ξς κοιλότητας με υδροκολλοειδές αποτυπωτικό υλικό και με τη Μ.Ο. στη θέση της, προκειμένου να αφαιρεθεί μαζί με το αποτύπωμα. Το εργαστήριο χρησιμοποιεί τα στοιχεία αυτά για την δημιουργία εκμαγείου με τη Μ.Ο. πάνω του, το οποίο αναρτάται σύμφωνα με τη ληφθείσα καταγραφή και το υπάρχον εκμαγείο των ανταγωνιστών. Ακολουθεί εκλεκτικός τροχισμός των παρεμβολών τόσο στην κεντρική όσο και τις πλάγιες κινήσεις. Η εξισορρόπηση της σύγκλεισης θα πρέπει να ικανοποιεί το συγκλεισιακό σχήμα που έχει αποφασιστεί να αποδοθεί με τη Μ.Ο., είτε αυτό είναι ενσωμάτωση της στην ήδη υπάρχουσα σύγκλειση είτε απόδοση της μέγιστης



συναρμογής στην κεντρική θέση της κάτω γνάθου. Με το τέλος της εξισορρόπησης, οι επαφές σύγκλεισης πρέπει να αποτυπώνονται ολοκληρωμένα και ομοιόμορφα τόσο στα φυσικά όσο και στα τεχνητά δόντια, σύμφωνα με το επιλεχθέν συγκλεισιακό σχήμα (κυνοδοντική καθοδήγηση, ομαδικών επαφών, αμφοτερόπλευρα εξισορροπημένη), ενώ τα στοιχεία του σκελετού πρέπει να μην παρεμβαίνουν στη σύγκλειση.

20. Παρακολούθηση – διατήρηση αποτελέσματος.

21. Επιδιόρθωση τεχνικών επιπλοκών και επανεφαρμογή όταν χρειάζεται.^{4,8}

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται με τη μορφή φωτογραφιών και συνοπτικής περιγραφής στις λεζάντες τους τα αναλυτικά στάδια κατασκευής σκελετού Μ.Ο. από κράματα Co-Cr χρησιμοποιώντας την συμβατική μέθοδο, τα οποία λήφθηκαν σε συνεργασία με το οδοντοτεχνικό εργαστήριο του κ. Μουζή αποκλειστικά για χρήση τους σε αυτή την πτυχιακή εργασία.

3.5.2 Ψηφιακά στάδια κατασκευής Μ.Ο.

Τα στάδια κατασκευής Μ.Ο. με τη χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας είναι:

1. Σάρωση με τη χρήση ενδοστοματικού σαρωτή του φραγμού που θα κατασκευαστεί η Μ.Ο., του αντίθετου φραγμού και σάρωση της διασυγκλεισιακής τους σχέσης εφόσον υπάρχει ειδιάλλως της σχέσης των γνάθων (3 σαρώσεις), ή λήψη αποτυπωμάτων των δύο φραγμών με τη χρήση συμβατικών αποτυπωτικών υλικών, δημιουργία γύψινων εκμαγείων και σάρωση των εκμαγείων με τη χρήση εξωστοματικού σαρωτή, και δημιουργία αρχείων STL ανεξάρτητα από την τεχνική αποτύπωσης. Μετατροπή STL αρχείων σε τρισδιάστατες εικόνες (ψηφιοποίηση των αρχείων) και εισαγωγή τους στο λογισμικό CAD του ηλεκτρονικού υπολογιστή το οποίο μπορεί να είναι ένα ή περισσότερα του ενός (π.χ. λογισμικό 3Shape CAD Points της 3Shape, λογισμικό Dental System D-810 της 3Shape, λογισμικό Freeform της εταιρείας 3D SYSTEMS Santa Clara CA USA κ.α.).²³ Στη βιβλιογραφία αναφέρεται επίσης ότι μπορεί να γίνει και σάρωση του διαμορφωμένου προπλάσματος της εργασίας στο τελικό εκμαγείο, με ειδική μέριμνα για την επιφάνεια έδρασης.²⁴
2. Τοποθέτηση των ψηφιακών εκμαγείων σε εικονικό-ψηφιακό αρθρωτήρα και με τη χρήση λογισμικού CAD εντοπίζεται ψηφιακά η φορά ένθεσης και πραγματοποιείται η αρχική σχεδίαση των τμημάτων της Μ.Ο. από τον οδοντικό τεχνολόγο με όλους τους κανόνες της προσθετικής και επιπλέον κανόνες που αφορούν το είδος της αποκατάστασης, το υλικό κατασκευής της και την εργαστηριακή συνέχεια στο σύστημα CAD/CAM. Στο στάδιο αυτό βεβαιώνονται επίσης ότι τυχόν παρασκευές των δοντιών έχουν γίνει με



τον ορθό τρόπο ώστε να είναι συμβατές με τη προγραμματισμένη σχεδίαση του σκελετού, και με τη βοήθεια των σαρώσεων κατασκευάζονται οι στεφάνες (για την υποδοχή των αγκίστρων κλπ.) εφόσον κρίνεται αναγκαία η κατασκευή τους από το σχέδιο θεραπείας και οριστικοποιείται η οριζόντια και κάθετη πρόταξη των δοντιών.

3. Λαμβάνεται τελικό αποτύπωμα ή πραγματοποιείται η τελική ενδοστοματική σάρωση, αφού προηγηθεί η τοποθέτηση των στεφανών στο στόμα, ή μόνο των παρασκευασμένων δοντιών στην περίπτωση που δεν κατασκευαστούν στεφάνες και πραγματοποιείται καταγραφή της σχέσης των γνάθων.
4. Εξάλειψη εσοχών και τελική ψηφιακή σχεδίαση της Μ.Ο, μετατροπή των πληροφοριών CAD σε γλώσσα STL και μεταφορά σε μηχανή κατασκευής CAM.
5. Μόνο ο σκελετός ή κάθε τμήμα της Μ.Ο. (συνδετήρες, άγκιστρα, τεχνητά δόντια, επίπια) κατασκευάζεται ξεχωριστά με τη βοήθεια μιας μηχανής κοπής CAM ή/και ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή. Στο σημείο αυτό διακρίνονται 4 περιπτώσεις. Πιο αναλυτικά:
 - Στην 1^η περίπτωση – μερικώς ψηφιακή ροή εργασίας – για την δημιουργία του μεταλλικού σκελετού χρησιμοποιείται η I-3DP ή κοπή ρητίνης ή κεριού για την κατασκευή του προπλάσματος του σκελετού το οποίο ακολούθως χυτεύεται σε μέταλλο με τη συμβατική μέθοδο. Στην περίπτωση αυτή, παραλείπονται τα στάδια της συμβατικής μεθόδου μέχρι και το κέρωμα του σκελετού, όμως παραμένουν και δεν εξαλείφονται ορισμένα συμβατικά στάδια (τοποθέτηση αγωγών χύτευσης, επένδυση με το πυρόχωμα, χύτευση και κατεργασία μετά τη χύτευση) και ο έλεγχος της εφαρμογής του στο εκμαγείο και ενδοστοματικά. Η σύνδεση της βάσης των δοντιών και του μεταλλικού σκελετού γίνεται με τη μέθοδο της όπτησης οδοντοστοιχιών ή με ειδική τεχνική που χρησιμοποιεί πλήρως χυτεύσιμη ακρυλική ρητίνη. Για τους παραπάνω λόγους αυτή η μέθοδος πρόκειται για μια μερικώς ψηφιακή ροή εργασίας.
 - Στην 2^η περίπτωση – ολοκληρωμένη όχι όμως εξολοκλήρου ψηφιακή ροή εργασίας – για την κατασκευή του σκελετού χρησιμοποιείται η D-3DP (SLM/SLS). Στην περίπτωση αυτή παραλείπονται τα στάδια της συμβατικής μεθόδου μέχρι και το στάδιο της χύτευσης, και παραμένει μόνο η κατεργασία του σκελετού μετά την κατασκευή του, ο έλεγχος της εφαρμογής του στο εκμαγείο και ενδοστοματικά. Η σύνδεση της βάσης, των δοντιών και του μεταλλικού σκελετού γίνεται με τη μέθοδο της όπτησης οδοντοστοιχιών ή με ειδική τεχνική που χρησιμοποιεί πλήρως χυτεύσιμη ακρυλική ρητίνη. Συνεπώς επειδή ο σκελετός κατασκευάζεται πλήρως ψηφιακά, όμως η σύνδεση των τμημάτων μεταξύ τους γίνεται με συμβατικό τρόπο, αυτή η μέθοδος πρόκειται για μια ολοκληρωμένη όχι όμως εξολοκλήρου ψηφιακή ροή εργασίας.



- Στην 3^η περίπτωση – περίπτωση μεταξύ ολοκληρωμένης μη εξολοκλήρου ψηφιακής ροής εργασίας και εξολοκλήρου ψηφιακής ροής εργασίας – για την κατασκευή του μεταλλικού σκελετού χρησιμοποιείται η D-3DP (SLM/SLS), ωστόσο παραμένει το στάδιο της κατεργασίας του, ο έλεγχος της εφαρμογής του στο εκμαγείο και ενδοστοματικά. Η βάση της οδοντοστοιχίας και τα τεχνητά δόντια κατασκευάζονται με κοπή με τη χρήση μηχανής κοπής από μπλοκ PMMA χωρίς τελικό εκμαγείο και έπειτα συναρμολογούνται όλα τα τμήματα της Μ.Ο (μεταλλικός σκελετός, τεχνητά δόντια, βάση οδοντοστοιχίας) με αυτοπολυμεριζόμενη ρητίνη, χωρίς εκμαγείο, χρησιμοποιώντας τα βοηθήματα επανατοποθέτησης (Εικόνα 3-6) και τα παράλληλα τοιχώματα από τη σχεδίαση του σκελετού. Σε αυτή τη τεχνική συνίσταται η μη εργαστηριακή ενσωμάτωση των συνδέσμων ακριβείας εφόσον αυτοί έχουν επιλεγεί για το σχέδιο θεραπείας (ήτοι η ενσωμάτωση του κινητού τμήματος του συνδέσμου γίνεται από τον οδοντίατρο με αυτοπολυμεριζόμενη ακρυλική ρητίνη μετά την τοποθέτηση, έλεγχο και τυχόν επιδιόρθωση της Μ.Ο. στο στόμα).²⁵ Άλλη τεχνική αναφέρει ότι μετά τη κατασκευή του σκελετού, σαρώνονται το εκμαγείο και ο σκελετός, σχεδιάζονται τα τεχνητά δόντια και η βάση και έπειτα, είτε κόβονται από δίσκο κεριού ως μια δομή, συναρμολογούνται στο εκμαγείο το οποίο ακολούθως επενδύεται με πυρόχωμα και αποκηρώνεται, είτε κόβονται τα δόντια από δίσκο PMMA, και ανεξάρτητα από την τεχνική που επιλέγεται ακολουθεί η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης.²⁶
- Στην 4^η περίπτωση – πλήρως ψηφιακή ροής εργασίας – εντάσσεται η περίπτωση που χρησιμοποιηθούν άλλα υλικά κατασκευής, όπου ο σκελετός δεν είναι από μέταλλο. Ένα παράδειγμα που αναφέρθηκε στη βιβλιογραφία είναι οι συνδετήρες, τα άγκιστρα και τα τεχνητά δόντια να κοπούν με τη βοήθεια μιας μηχανής CAM από Ce-TZP/A, PEEK και σύνθετη ρητίνη αντίστοιχα, ενώ η βάση της οδοντοστοιχίας να κατασκευαστεί με τη βοήθεια ενός 3D-εκτυπωτή από PMMA. Όλα αυτά τα μεμονωμένα τμήματα που έχουν κατασκευαστεί συγκολλώνται με συγκολλητικό παράγοντα συνθέτοντας έτσι την Μ.Ο.^{23,25}



Εικόνα 3-6 Συνδυαστικό περιστατικό Μ.Ο. που στηρίζεται στα εμφυτεύματα και στα δόντια (α). Διακρίνεται η πρόγνωση για τα παράλληλα τοιχώματα και τα βοηθήματα επανατοποθέτησης (β), και η τελική Μ.Ο. (γ, δ).²⁵

Γενικώς, η ανάπτυξη της πλήρως ψηφιακής ροής εργασίας για τη διαδικασία κατασκευής Μ.Ο. αλλάζει σημαντικά την εργαστηριακή ροή καθώς οι συμβατικές εργαστηριακές διαδικασίες, όπως η χύτευση σκελετών, η σύνταξη των τεχνητών δοντιών ή ο πολυμερισμός της ρητίνης, είναι πολύ πιο περίπλοκες σε σύγκριση με την ψηφιακή ροή εργασίας. Στην τεχνική αυτή κάθε στοιχείο οδοντοστοιχίας σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD και τα σχεδιασμένα δεδομένα στέλνονται στη μηχανή CAM και στη συνέχεια κατασκευάζονται αυτόματα, κάτι που απλοποιεί σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής. Η μέθοδος αυτή ενδέχεται να επιτρέψει την αποτελεσματική διαδικασία κατασκευής οδοντοστοιχιών, τόσο σε κλινική όσο και σε εργαστηριακή ροή, ωστόσο, απαιτείται πιο συστηματική αξιολόγηση της διαδικασίας με τη χρήση μεγαλύτερου δείγματος και μακροπρόθεσμη παρακολούθηση για την επιβεβαίωση τέτοιων ισχυρισμών. Οι συμβατικές ροές εργασίας εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται με τις ψηφιακές τεχνικές και η ψηφιακή ροή εργασίας δεν έχει αντικαταστήσει πλήρως την αναλογική ροή εργασίας.^{23,25,27}

Πάντως, στα πλεονεκτήματα της ψηφιακής κατασκευής Μ.Ο. σε σχέση με τη συμβατική περιλαμβάνονται:

- Η ψηφιακή αποτύπωση, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με σάρωση του στόματος με τη χρήση ενός ενδοστοματικού σαρωτή ή μετά τη λήψη αποτυπώματος ή μετά την κατασκευή του εκμαγείου με τη σάρωση του με τη χρήση ενός εργαστηριακού σαρωτή. Το κύριο πλεονέκτημα μιας ψηφιακής σάρωσης είναι η δυνατότητα άμεσης απόκτησης δεδομένων από ένα παρασκευασμένο δόντι σε πραγματικό χρόνο. Ακόμη, η ακρίβεια των τρισδιάστατων εκμαγείων που κατασκευάστηκαν με ψηφιακή αποτύπωση έχει αναφερθεί ότι είναι στο εύρος 50-70 μικρών που πλησιάζει τη μέγιστη ακρίβεια μιας μηχανής κοπής. Επιπλέον, οι ψηφιακές εντυπώσεις παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μείωση του χρόνου θεραπείας (less chair time), εξάλειψη της ταλαιπωρίας που μπορεί να βιώσουν οι ασθενείς από μια συμβατική διαδικασία εντύπωσης, ελαχιστοποίηση του κόστους, του χρόνου και του χώρου αποθήκευσης για τα υλικά των αποτυπωτικών, απολυμαντικών και γύψου κατασκευής εκμαγείων. Εκτός αυτού, οι ψηφιακές αποτυπώσεις μπορούν να αποθηκευτούν επ' αόριστον με καλή ποιότητα. Επιπλέον εξασφαλίζεται η αποτελεσματικότητα, η ικανότητα αποθήκευσης συλλαμβανόμενων πληροφοριών και η μεταφορά των ψηφιακών εικόνων από το οδοντιατρείο στο εργαστήριο. Επιπλέον πλεονεκτήματα προκύπτουν εάν χρησιμοποιηθεί ψηφιακή αποτύπωση με τη χρήση ενδοστοματικού σαρωτή έναντι της συμβατικής, όπου ο ενδοστοματικός σαρωτής μπορεί να καταγράψει με ακρίβεια τη μορφολογία σκληρών και μαλακών ιστών, ενώ παράλληλα, σε αντίθεση με την ενδοστοματική σάρωση η εργαστηριακή



σάρωση συγκεντρώνει τα σφάλματα που εισάγονται με τη συμβατική διαδικασία αποτύπωσης, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων χειρισμού των υλικών (συστολή του υλικού εντύπωσης, διαστολή του προϊόντος γύψου), με αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόκλιση. Ωστόσο, είναι δύσκολη η σάρωση άπω εκτεταμένων και ευρέων νωδών περιοχών λόγω της λειτουργίας ενός ενδοστοματικού σαρωτή και επιπλέον, η τεχνική βασίζεται στην εικόνα, γεγονός που καθιστά αδύνατη την λήψη ενός λειτουργικού αποτύπωματος.²⁵ Ακόμη, για τους εργαστηριακούς σαρωτές έχουν βρεθεί διαφορές στην ακρίβεια εφαρμογής μεταξύ διαφορετικών δοντιών λόγω της δυσκολίας ανίχνευσης της ανατομικής πολυπλοκότητας σε ορισμένες περιπτώσεις. Σημειώνεται ότι, και οι δύο ψηφιακοί σαρωτές είναι κλινικά αποδεκτοί σε περίπτωση αποκατάστασης ενός δοντιού. Ωστόσο, σε περίπτωση αποκατάστασης μεγάλης έκτασης, θα μπορούσαν να προκαλέσουν πιο συστηματικά σφάλματα και να οδηγήσουν σε αποτυχία της κατασκευής της πρόσθεσης. Ορισμένοι παράγοντες όπως η εμπειρία του οδοντικού τεχνολόγου, η ψηφιακή αλλοίωση της σύγκλεισης, και η δυσκολία της διαδρομής σάρωσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.^{28,29}

- Το λογισμικό CAD, το οποίο επιτρέπει τον αυτόματο προσδιορισμό μιας προτεινόμενης φοράς ένθεσης, την άμεση αναγνώριση και εξάλειψη των ανεπιθύμητων εσοχών και περιοχών που χρήζουν ανακούφισης, τον ακριβή σχεδιασμό των τμημάτων του σκελετού της Μ.Ο. σε σχέση με την ανατομία των δοντιών και τους μαλακούς ιστούς της στοματικής κοιλότητας, καθώς και τον συνεχή έλεγχο των μεμονωμένων τμημάτων της πρόσθεσης για την τήρηση των προγραμματισμένων (σχεδιασμένων) μηχανικών παραμέτρων και το σχεδιασμό ελάχιστα ορατών τμημάτων. Η εξέταση των εκμαγείων με τη βοήθεια λογισμικού είναι ταχύτερη και ακριβέστερη σε σύγκριση με τη χειροκίνητη εξέταση. Επιπρόσθετα, επιτρέπει την εύκολη επανάληψη της οδοντοστοιχίας (η οποία μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των ανθρώπινων σφαλμάτων και στην ενίσχυση του ποιοτικού ελέγχου στο οδοντοτεχνικό εργαστήριο) και την κατασκευή νέας ή προσωρινής χρησιμοποιώντας τα αποθηκευμένα ψηφιακά δεδομένα.
- Τη μηχανή CAM, στη περίπτωση που χρησιμοποιηθεί για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο. ή/και εφιππίων ή/και τεχνητών δοντιών. Για τον σκελετό θα γίνει διεξοδική ανάλυση στο ειδικό μέρος, ενώ για τη βάση και τα τεχνητά δόντια ήδη αναφέρθηκαν ορισμένες πληροφορίες στις αντίστοιχες ενότητες στο γενικό μέρος (π.χ. η αποφυγή της συστολής της ακρυλικής βάσης στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί κοπή προπολυμερισμένης ακρυλικής ρητίνης αυξάνοντας την αντοχή και την εφαρμογή των Μ.Ο., και η μείωση του κινδύνου αποικισμού μικροοργανισμών και επακόλουθης μόλυνσης). Η χρήση ενός



σκελετού CAD/CAM και ενός δίσκου PMMA για ψηφιακές Μ.Ο. προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές Μ.Ο. Ωστόσο, οι τεχνικές προκλήσεις σχετικά με την ακρίβεια και την αντοχή της πρόσφυσης μεταξύ του σκελετού και της βάσης οδοντοστοιχιών πρέπει να επιλυθούν.

- Απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής, μείωση του κόστους υλικών και μείωση του χρόνου εργασίας τόσο για τους εργαστηριούχους όσο και για τους ασθενείς και τους οδοντιάτρους και η μείωση του αριθμού των προγραμματισμένων συναντήσεων με τον ασθενή, και όλα αυτά λόγω της αποφυγής πολλών σταδίων κατασκευής. Αντίθετα, η συμβατική μέθοδος κατασκευής πρόκειται για μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, με πολλαπλά στάδια καθένα από τα οποία απαιτούν σημαντική ανθρώπινη παρέμβαση και χειρισμό υλικών που μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένα σφάλματα και ανακρίβειες. Έτσι, η αναπαραγωγιμότητα της διαδικασίας κατασκευής αυξάνεται, ενώ ελαχιστοποιούνται οι αποκλίσεις στα αποτελέσματα κατασκευής μεταξύ των διαφόρων εργαστηριούχων.
- Η ύπαρξη προόδου στην τυποποίηση για έρευνα για Μ.Ο.
- Γενικώς η τεχνολογία CAD/CAM υποστηρίζεται ότι παρέχει ανώτερα λειτουργικά και αισθητικά αποτελέσματα.^{27,28,30}

Γενικά, οι περιορισμοί και τα μειονεκτήματα της ψηφιακής κατασκευής οδοντοστοιχιών περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την λήψη αποτυπώματος για τη διατήρηση της στήριξης των χειλιών. Την αδυναμία καθορισμού του οπίσθιου επιπέδου της κάτω γνάθου. Ακριβά υλικά και αυξημένο εργαστηριακό κόστος σε σύγκριση με αυτά των συμβατικών μεθόδων.²⁷

Οι τεχνικές CAD/CAM αναπτύσσονται γρήγορα και αναμένεται στο εγγύς μέλλον, η κατασκευή των Μ.Ο. να γίνει ιατρική πληροφορική (medical informatics). Ωστόσο, οι μέθοδοι έχουν ορισμένους περιορισμούς προς το παρόν.²⁷

Σημείωση: ο όρος ιατρική πληροφορική βρίσκεται στη διασταύρωση της υγειονομικής περίθαλψης και της τεχνολογίας. Είναι εκεί όπου οι δεξιότητες τόσο στις ιατρικές όσο και στις επιστήμες των υπολογιστών συγκεντρώνονται σε μια προσπάθεια βελτίωσης του συστήματος υγείας προς όφελος των ασθενών. Οι επαγγελματίες σε αυτόν τον υβριδικό τομέα βασίζονται στην εμπειρογνωμοσύνη και από τους δύο κλάδους για να αξιοποιήσουν την τεχνολογία στην καλύτερη χρήση της στη φροντίδα των ασθενών, στο κλινικό και ερευνητικό χώρο.



Ήδη από τα παραπάνω έχουν καταστεί ορατές ορισμένες προκλήσεις σχετικά με τη σάρωση, το CAD και το CAM το οποίο θα αναλυθεί διεξοδικά στο ειδικό μέρος. Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει αναφορά σε κάτι το οποίο δεν πολυαναλύθηκε, ήτοι σε μελλοντικές προκλήσεις για την επέκταση της εφαρμογής ψηφιακών Μ.Ο. όσον αφορά τη λήψη εντύπων και την καταγραφή της σχέσης των γνάθων, οι οποίες είναι οι εξής: ανάπτυξη μεθόδων εντύπωσης γύρω από τα όρια της βάσης οδοντοστοιχίας, ανάπτυξη αλγορίθμου για προσαρμογή στην μετατόπιση πίεσης του βλεννογόνου στις περιοχές έδρασης της οδοντοστοιχίας, και ανάπτυξη μεθόδων για καταγραφή της σχέσης των γνάθων σε περιπτώσεις χωρίς συγκλεισιακή υποστήριξη.¹⁹

3.6 Σχεδίαση αποκατάστασης με Μ.Ο.

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται γενικά χαρακτηριστικά που αφορούν τη σχεδίαση, δεδομένου ότι το κομμάτι της σχεδίασης αποτελεί ένα αντικείμενο με μεγάλο όγκο βιβλιογραφίας στη κατασκευή Μ.Ο. από μόνο του, και ξεφεύγει από το θέμα της παρούσας εργασίας.

Η σχεδίαση της Μ.Ο. ακολουθεί δύο άξονες που αφορούν την ανταπόκριση της στις εμβιομηχανικές και βιολογικές απαιτήσεις. Ο εμβιομηχανικός άξονας της σχεδίασης αφορά την υποδοχή από τη Μ.Ο. των εφαρμοζόμενων σε αυτήν δυνάμεων, ήτοι των δυνάμεων μάσησης και κινήσεων των μυών του στόματος κατά τη λειτουργία τους και τη μεταφορά προς το υποκείμενο οστό με τρόπο που να διατηρεί την υγεία των στοματικών ιστών. Ο βιολογικός άξονας αποσκοπεί στην κατά το δυνατόν μικρότερη επιβάρυνση του βιολογικού περιβάλλοντος και αποσκοπεί σε διακριτικό σχήμα με όσο το δυνατόν μικρότερη επέκταση, περιορισμένη κάλυψη των σκληρών και μαλακών ιστών, αποφυγή της ενόχλησης των ελεύθερων ούλων και τη διευκόλυνση του αυτοκαθαρισμού. Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχή κάλυψη των απαιτήσεων της Μ.Ο. αποτελεί η διατήρηση όσο το δυνατόν σταθερής της θέσης της καθώς και ο έλεγχος των λειτουργικών κινήσεών της.⁸

Ο σχεδιασμός, η διαδικασία εκλογής του τύπου και της θέσης των στοιχείων της Μ.Ο. καθορίζει το σχήμα της και καθοδηγεί τα στάδια και τις διαδικασίες που χρειάζονται για την πραγμάτωση του σχεδίου θεραπείας. Η σχεδίαση αποσκοπεί στην κάλυψη των απαιτήσεων, εμβιομηχανικών, βιολογικών, άνεσης και αισθητικής, μέσω της ελεγχόμενης λειτουργίας και σταθεροποίησης της Μ.Ο. Η σταθεροποίηση της Μ.Ο. εξειδικεύεται στις τρεις κύριες ιδιότητες, δηλαδή τη στήριξη, τη συγκράτηση, και την οριζόντια σταθερότητα. Ακόμη, η λειτουργία της Μ.Ο. γίνεται πιο πολύπλοκη στις μικτά στηριζόμενες περιπτώσεις από τις στροφές που αναπτύσσονται εξαιτίας της διαφορετικής ενδοτικότητας και ικανότητας



συγκράτησης των ιστών έδρασης, ήγουν των δοντιών-στήριξης και του βλεννογόνου των φατνιακών ακρολοφιών.⁸

Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού διαμορφώνεται το σχήμα της Μ.Ο. που θα περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που εξασφαλίζουν τις απαραίτητες ιδιότητες: τους εφαπτήρες που θα εξασφαλίσουν την οδοντική στήριξη, με τη συνεπικουρία των εφιππίων, όταν η στήριξη είναι μικτή, τους άμεσους συγκρατητήρες που θα προσδώσουν συγκράτηση, συμπληρωμένοι με την κατάλληλη αντιστήριξη, τους έμμεσους συγκρατητήρες που θα παρέχουν την αποτροπή της στροφής της Μ.Ο. με ελεύθερο άκρο. Η σχεδίαση συμπληρώνεται με την επιλογή του τύπου του μείζονα συνδετήρα και της θέσης των ελάσσονων συνδετήρων που θα συνδέσουν όλα τα υπόλοιπα τμήματα σε έναν ενιαίο σκελετό, καθώς και με την αξιολόγηση της οριζόντιας σταθερότητας, της άνεσης και της αισθητικής.⁸

Η εκλογή του καταλληλότερου από τους διαθέσιμους τύπους των στοιχείων της Μ.Ο., της ευνοϊκότερης θέσης και του ακριβούς σχήματος ή διαστάσεων του ακολουθεί τις γενικές αρχές σχεδίασης. Αυτές διαμορφώνονται με βάση τις συνθήκες, ιδίως ανάλογα με την εντόπιση των δοντιών-στηριγμάτων σε σχέση με τις νωδές περιοχές, μέσα από τη συνεκτίμηση εμβιομηχανικών και βιολογικών παραμέτρων. Ανατομικές, μορφολογικές και λειτουργικές ιδιαιτερότητες διαφοροποιούν και εξατομικεύουν τον σχεδιασμό και κατευθύνουν την απόφαση για την καταλληλότερη για κάθε περίπτωση επιλογή, σύμφωνα πάντα με τις κλασσικές σχεδιαστικές αρχές αλλά και τη διαθέσιμη επιστημονική τεκμηρίωση. Εναλλακτικές σχεδιάσεις, όπως εκείνες που συνδυάζουν την κινητή και ακίνητη αποκατάσταση ή τη χρήση αθέατων συγκρατητικών στοιχείων, εξετάζονται με βάση το όφελος, δηλαδή τις εμβιομηχανικές, βιολογικές και αισθητικές βελτιώσεις που μπορούν να εξασφαλίσουν, αλλά και το κόστος, την κατασκευαστική και/ή οικονομική επιβάρυνση που μπορεί να συνοδεύει την επιλογή τους.⁸

Βασικός σχεδιαστικός κανόνας είναι η διατήρηση του σχεδίου του σκελετού όσο το δυνατόν απλούστερου.⁸

Ο σχεδιασμός είναι προσανατολισμένος στους βασικούς άξονες: πρώτα, να καλύπτει τις εμβιομηχανικές απαιτήσεις της σταθεροποίησης μέσω της ορθής μεταφοράς δυνάμεων, ταυτόχρονα, να εξετάζεται η κάλυψη των βιολογικών απαιτήσεων της ελάχιστης δυνατής κάλυψης και αποφυγής των ελεύθερων ούλων, στη συνέχεια, να ελέγχεται και να τροποποιείται ως προς την αισθητική και την άνεση.⁸

Αφού ολοκληρωθεί, η σχεδίαση περιγράφεται κωδικοποιημένη σε φύλλο σχεδίου θεραπείας και σχεδιάζεται πάνω στο εκμαγείο. Γίνεται φανερό ότι η διαδικασία της σχεδίασης συχνά δεν καταλήγει σε ένα μοναδικό σχέδιο θεραπείας, αλλά μπορεί να υποδείξει



ποικίλους συνδυασμούς των τύπων και θέσης των στοιχείων του σκελετού της Μ.Ο., συμπληρωμένους ή όχι με ακίνητες αποκαταστάσεις, μονήρεις ή εκτεταμένες. Διάφορα σχεδιαστικά σχήματα μπορεί να αναδειχτούν, τα οποία να είναι επιστημονικά και κλινικά τεκμηριωμένα και να καλύπτουν επαρκώς μεν, αλλά σε διάφορο βαθμό, τις εμβιομηχανικές και βιολογικές ανάγκες, καθώς και τις απαιτήσεις για αισθητική και άνεση. Αυτή η ευελιξία στη σχεδιαστική προσέγγιση αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα της κινητής προσθετικής αποκατάστασης, γιατί επιτρέπει στον οδοντίατρο να συνεργαστεί με τον ασθενή, ώστε από κοινού να επιλεγεί η αποκαταστατική λύση που πλησιάζει περισσότερο τις ιδιαίτερες συνθήκες και απαντά αποτελεσματικότερα στις εξατομικευμένες ανάγκες.⁸

Ο οδοντικός τεχνολόγος είναι ένα εκπαιδευμένο, εξειδικευμένο άτομο που είναι ικανό να παράγει μια πρόθεση που μπορεί να αντικαταστήσει με επιτυχία ένα μέρος που λείπει της στοματικής κοιλότητας, εφόσον του δοθούν πλήρεις πληροφορίες, οδηγίες και κατάλληλα εκμαγεία. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι η μεταφορά λεπτομερών κλινικών πληροφοριών και οδηγιών από τον οδοντίατρο στο εργαστήριο. Η επικοινωνία πρέπει να είναι πλήρης, ακριβής και τρισδιάστατη. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο αυτές οι πληροφορίες μπορούν να μεταδοθούν είναι με ένα τρισδιάστατο αντίγραφο της στοματικής ανατομίας του ασθενούς, με το σχέδιο και τα εκμαγεία. Έτσι, αφού γίνει η εντύπωση από τον οδοντίατρο, μπορεί να κατασκευαστεί και ένας ενδοστοματικός δείκτης της σύγκλεισης για να βοηθήσει τον οδοντίατρο και το εργαστήριο στην επαλήθευση της ακρίβειας των τελικών και των πυροχωμάτων εκμαγείων. Έτσι, ο οδοντίατρος καλό είναι να αποστείλει στον τεχνολόγο τον επαληθευτή του εκμαγείου, μαζί με τα τελικά εκμαγεία που φέρουν τη σχεδίαση από εκείνον μαζί με τη γραπτή συνταγή, προκειμένου να μεταφερθούν στο εργαστήριο οι βασικές πληροφορίες (Εικόνα 3-7). Στην γραπτή συνταγή πέρα από τις βασικές πρέπει να αναγράφονται και οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Ταυτοποίηση ασθενούς
- Τύπος πρόθεσης
- Τύπος μετάλλου ή κράματος που θα χρησιμοποιηθεί
- Μια κατάλληλη συνταγή σχεδιασμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-8, που περιλαμβάνει τα ακόλουθα:
 - Ξεκάθαρα, ομαλά περιγράμματα του σχεδιασμού σκελετού που έχουν σχεδιαστεί αναλογικά
 - Μείζονες συνδετήρες με σαφή σήμανση
 - Υπόδειξη των περιοχών συγκράτησης
 - Γραμμές τελειώματος ακρυλικού με σαφή σήμανση



- Ειδικές οδηγίες ανάλογα με τις ανάγκες
- Υπογραφή και αριθμός άδειας οδοντιάτρου.³

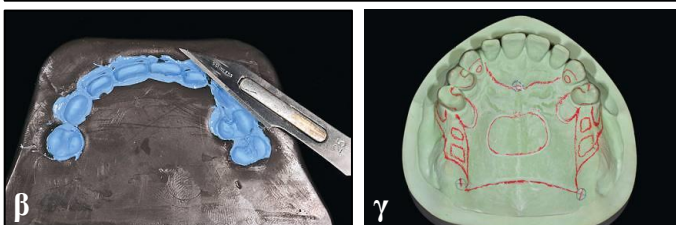


PEGASUS INTERPRINT (562) 714-1748

UCLA Dental Center / Professional Laboratory Request		Professional Lab Use Only
Type of Payment: <input type="checkbox"/> SELF PAY <input type="checkbox"/> MEDI-CAL <input type="checkbox"/> INSURANCE <input type="checkbox"/> CHART # _____ Patient Name <u>LAST NAME FIRST NAME</u> Date ____/____/____ <small>(Please Print) Last First</small>		Delivery & Pick-up <u>XX/XX/XXXX</u>
Student, Resident, Faculty Name Billing OK: _____ Clinic #: _____ <u>CLINICIAN'S NAME</u> ID # (3 digit) _____ <small>(Please Print) Last First</small>		LAB CODE: _____ Remake <input type="checkbox"/>
SUB-DIVISIONS: (Please select one of the following) <input type="checkbox"/> AEGD <input type="checkbox"/> General Clinic <input type="checkbox"/> Grad. Prosth <input type="checkbox"/> FGDP <input type="checkbox"/> AEGD - Venice Clinic <input type="checkbox"/> Other _____		
INSTRUCTIONS: ① PLEASE FOLLOW DESIGN ON DIAGNOSTIC CAST ② BLOCK-OUT MASTER CAST AS TRIPODED ③ <u>MAXILLARY RPD FRAMEWORK</u> • MAJOR CONNECTOR: ANTERIOR-POSTERIOR PALATAL STRAP • RESTS: # 4 M, # 5 M, # 6 CINGULUM, # 11 CINGULUM, # 12 M • PROXIMAL PLATES: # 4 DISTAL, # 12 DISTAL • RETAINERS: # 4 0.01" MIDBUCCAL I-BAR # 12 0.01" MIDBUCCAL I-BAR ④ BEAD AS INDICATED ⑤ CAST IN CHROME-COBALT ALLOY ⑥ POLISH AND FIT TO MASTER CAST <p style="text-align: center;">THANK YOU!</p>		
COMPLETE DENTURES ONLY: I WANT MY LAST NAME, FIRST INITIAL FOR IDENTIFICATION ID: _____ YES _____ NO _____ Patient Signature: _____		
RPD Design: <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>R MAXILLA L</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>R MANDIBLE L</p> </div> </div>		
INSTRUCTOR SIGNATURE <u>SIGNATURE</u>		NAME (Print) <u>CLINICIAN'S NAME</u> ID # _____
White/Yellow - Professional Laboratory / Pink - Patient Record / Gold - Professional Laboratory		

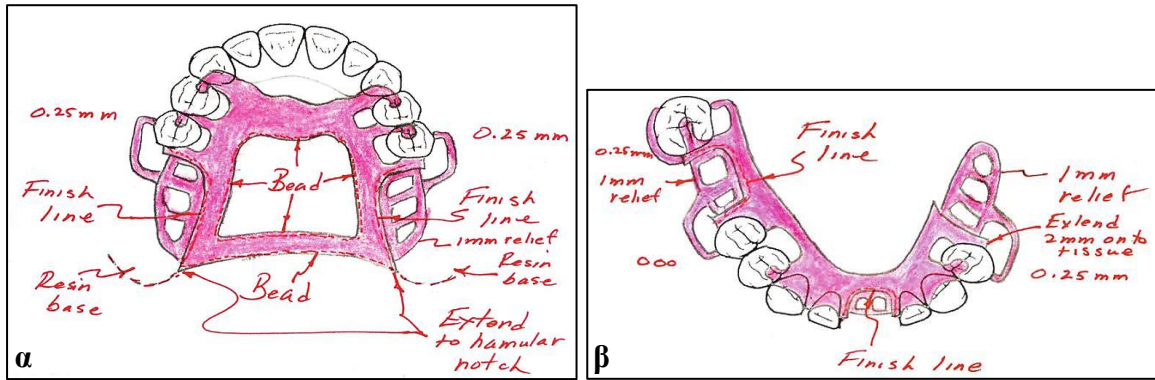
MH02 01/01 1360-006 (4/09)

COMPLETE DENTURE & REMOVABLE PARTIAL DENTURE DEPARTMENT



Εικόνα 3-7 Η γραπτή εργαστηριακή συνταγή (α), ο επαληθευτής του εκμαγείου (β) και το τελικό εκμαγείο (γ) υποβάλλονται στο εργαστήριο για να παρέχουν ακριβείς οδηγίες για την κατασκευή σκελετού της Μ.Ο.³





Εικόνα 3-8 Μια κατάλληλη συνταγή σχεδίασης έχει ευκρινή και ομαλά περιγράμματα, αναλογικά σχεδιασμένα, όπου διακρίνονται οι περιοχές συγκράτησης, οι οδηγές πλάκες – η επαφή με τους ιστούς, οι γραμμές τελειώματος ακρυλικού και τα όρια του μείζονα συνδετήρα με σαφή σήμανση όπως φαίνεται στη άνω (α) και στην κάτω (β) γνάθο.³



4.1 Τεχνικές κατασκευής

Ο σκελετός των Μ.Ο. τόσο των κλασικών όσο και των τηλεσκοπικών συστημάτων, κράματος Co-Cr μπορεί να κατασκευαστεί με συμβατικές και ψηφιακές μεθόδους.³¹

Στις συμβατικές μεθόδους περιλαμβάνεται αφενός η μέθοδος της παραδοσιακής χύτευσης (Conventional Casting = C-CST) του επενδυμένου με πυρόχωμα εκ χειρός διαμορφωμένου κέρινου προπλάσματος ή τεχνικής του χαμένου κεριού (Conventional Lost Wax Technique = C-LWT), και αφετέρου η διαμόρφωση (κάμψη) συρμάτινων αγκίστρων. Στις ψηφιακές μεθόδους, οι σκελετοί Μ.Ο. μπορούν να κατασκευαστούν με τη βοήθεια μηχανοποιημένης σχεδίασης και παραγωγής (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing = CAD/CAM) η οποία διακρίνεται σε αφαιρετική (Subtractive Manufacturing = SM) και σε προσθετική (AM ή RP ή 3DP ή LM ή SF) μέθοδο. Η κατηγορία των αφαιρετικών τεχνικών κατασκευής (SM) σκελετού Μ.Ο. διακρίνεται σε έμμεση κοπή (Indirect Milling = I-MIL), σε άμεση σκληρή κοπή [(Direct) Hard Milling = DH-MIL ή H-MIL] και σε μαλακή κοπή ευκατέργαστου κραματικού συμπίεσματος μετά την οποία απαιτείται σύντηξη (Soft Milling = S-MIL). Στην κατηγορία προσθετικών τεχνικών κατασκευής (AM = Additive Manufacturing) ή αλλιώς τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης (3DP = 3 Dimensional Printing) ή αλλιώς τεχνικών ταχείας πρωτοτυποποίησης (RP = Rapid Prototyping) ή αλλιώς τεχνικών διαστρωμάτωσης (LM = Layer Manufacturing) ή κατασκευή ελεύθερης μορφής στερεού (Solid Freeform = SF) περιλαμβάνονται η άμεση 3DP (Direct 3DP = D-3DP) ή αλλιώς σύντηξη σκόνης σε κλίνη (Powder Bed Fusion = PBF) που ουσιαστικά περιλαμβάνει τις τεχνικές: DMLM, SLM, SLS, DMLS (Direct Metal Laser Melting / Selective Laser Melting / Selective Laser Sintering / Direct Metal Laser Sintering = Άμεση Εκτύπωση / ή Τήξη με Λείζερ Μετάλλων / Επιλεκτική Τήξη με Λείζερ / Επιλεκτική Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ / Πυροσυσσωμάτωση με Λείζερ Μετάλλων), η έμμεση 3DP (Indirect 3DP or Additive Manufacturing-Casting = I-3DP ή AM+CST), και η υβριδική κατασκευή [Hybrid Manufacturing = HM]. Η I-3DP περιλαμβάνει την στερεολιθογραφία (Stereolithography = SLA), τη προβολή ψηφιακού φωτός (Digital Light Projection = DLP), την εκτύπωση τζετ [(Pro/Poly/Multi/In) Jet printing] και την μοντελοποίηση με εναπόθεση λιωμένου υλικού



(Fused Deposition Modeling = FDM). Οι όροι «άμεση» και «έμμεση» ψηφιακή μέθοδος κατασκευής, χρησιμοποιούνται ανάλογα με το αν η τελική μεταλλική πρόσθεση μπορεί να κατασκευαστεί από ένα ψηφιακό σχέδιο CAD είτε απευθείας (άμεση ψηφιακή μέθοδος κατασκευής) με τη χρήση DMLM/SLM/SLS/DMLS για τη σύντηξη σκόνης κράματος Co-Cr, είτε έμμεσα από ένα πρόπλασμα ρητίνης ή κεριού που κατασκευάζεται ψηφιακά με κοπή (I-MIL) ή τρισδιάστατη εκτύπωση (I-3DP) και στη συνέχεια χυτεύεται σύμφωνα με τη τεχνική LWT (έμμεση ψηφιακή μέθοδος κατασκευής-συνδυασμός ψηφιακής και LWT τεχνικής).³¹

Από αυτές τις μεθόδους που αναφέρθηκαν, εκείνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κλασικές Μ.Ο. που αφορούν και το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η C-CST,⁸ η κάμψη σύρματος,³² η I-MIL,²² η I-3DP,^{11,33} η D-3DP,^{33,34} και η HM³⁵ (Εικόνα 4-1, Εικόνα 4-2). Όσον αφορά την MIL εφαρμόζεται κυρίως στην ακίνητη προσθετική, και ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πωλούνται δίσκοι κοπής κράματος Co-Cr ή άλλων υλικών για σκελετούς Μ.Ο. εντούτοις οι βιβλιογραφίες σχετικά με αυτήν για κλασικούς σκελετούς Μ.Ο. που εντοπίστηκαν είναι περιορισμένες. Αυτό συμβαίνει λόγω του αυξημένου χρόνου κατασκευής, της πολυπλοκότητας του σκελετού, της σπατάλης σημαντικής ποσότητας κράματος και της φθοράς των εργαλείων κοπής κατά τη διάρκεια της κοπής με αποτέλεσμα την επιβάρυνση περαιτέρω του κόστους.²⁸ Όπως έχει επισημανθεί η H-MIL μπορεί να είναι μια άστατη δραστηριότητα, ακριβής σε ορισμένες περιπτώσεις, «άκαμπτη», σπάταλη και η παραγωγή ενός σκελετού Μ.Ο. με αυτή θα απαιτούσε μια δαπανηρή τεχνολογία κοπής 5 αξόνων που δεν εγγυάται την παραγωγή των λεπτών ενδιάμεσων λεπτομερειών ή των λεπτών αγκίστρων που είναι το κλειδί για την επιτυχία μιας Μ.Ο.^{24,30,31}

Σημειώνεται ότι στην υπόλοιπη εργασία όπου αναφέρεται ο όρος PBF ουσιαστικά αντιστοιχεί στις τεχνικές DMLM/SLM/SLS/DMLS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. από κράμα Co-Cr. Αυτό διευκρινίζεται καθώς ο όρος PBF στη βιβλιογραφία περιλαμβάνει και άλλες τεχνικές όπως η EBM.





Εικόνα 4-1 Σκελετός C-CST (α).⁸ Πρόπλασμα σκελετού μετά την 3DP στην πλατφόρμα κατασκευής (β), ενώ οι αγωγοί, ο κώνος και ο σκελετός μπορούν να δημιουργηθούν και ως ξεχωριστά τμήματα και αφού ενωθούν μεταξύ τους με κερί (γ) να χυτευθούν (δ).³³ Τελικός σκελετός από AM+CST (ε).¹¹ Πρόπλασμα σκελετού από κοπή κηρού (ζ) που θα χυτευθεί.²² Σκελετός από SLM στην πλατφόρμα κατασκευής και σκελετός μετά από εφαρμογή στο εκμαγείο (η, θ αντίστοιχα).³³ Άγκιστρο από AM+CST (ι), H-MIL (κ), SLS (λ).³⁴



Εικόνα 4-2 Ο βραχιόνας συγκράτησης σφυρήλατου σύρματος έχει σχεδιαστεί για να ενσωματωθεί στο πρόπλασμα κηριού αυτού του σκελετού όπου θα γίνει αναπόσπαστο μέρος του σκελετού. Το σύρμα περιβάλλεται σε δύο επίπεδα και θα συγκρατηθεί μηχανικά στη χύτευση.³²

Όσον αφορά τους σκελετούς Μ.Ο. με τηλεσκοπικά συστήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι κατασκευής πλην της κάμψης σύρματος και επιπλέον προκειμένου για τις δευτερεύουσες στεφάνες η μέθοδος της γαλβανοπλαστικής³⁶.

Όπως αναφέρθηκε η AM+CST (Additive Manufacturing + Casting, δηλαδή συνδυασμός προσθετικής κατασκευής και χύτευσης, ή αλλιώς I-3DP) προσφέρει σχετικά χαμηλό κόστος μηχανών και υλικών από ό, τι οι άλλες τεχνικές και είναι συμβατή με το λογισμικό CAD και άλλα ψηφιακά αρχεία. Οι σκελετοί SLA προτιμώνται, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις που απαιτούν λεπτές δομές και εσωτερική γεωμετρία, λόγω της υψηλής ακρίβειας και του σχετικού χαμηλού κόστους. Επιπλέον οι 3D εκτυπωτές είναι μικροί και σχετικά οικονομικοί. Οι SLS και FDM έχουν αναφέρει πολλά μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιούνται στην κατασκευή προπλάσματος Μ.Ο. Επιπλέον, τα μηχανήματα SLS είναι μεγάλα και απαιτούν σημαντική επένδυση κεφαλαίου. Η κατασκευή σκελετού Μ.Ο. με SLM εξακολουθεί να έχει υψηλό κόστος παραγωγής, καθώς και τις απαιτήσεις της για την απόκτηση μηχανών εκτύπωσης και υλικών.²⁸

Πάντως σαν γενικός κανόνας ισχύει, ότι κάθε τεχνολογία CAD/CAM θα πρέπει να επιλέγεται μετά από προσεκτική εξέταση των οικονομικών, σχετικών με την παραγωγικότητα, περιβαλλοντικών και άλλων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων.³⁰

4.1.1 Συμβατικές τεχνικές

Η τεχνική της χύτευσης αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο κατασκευής σκελετού Μ.Ο. από κράμα Co-Cr. Πιθανότατα ήταν γνωστή από πολύ παλιά, ωστόσο «ξεχάστηκε» για πολλούς αιώνες, και την επανάφερε ο William Taggart το 1907 με την ονομασία «τεχνική του χαμένου κεριού» (lost wax technique), οπότε, συστηματοποιήθηκε και άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως για οδοντιατρικές κατασκευές από τις αρχές του 20ου αιώνα.^{8,37}

Το ομοίωμα του σκελετού, συνήθως από κεριό ή από ακρυλική ρητίνη, αφού τοποθετηθούν σε αυτό οι αγωγοί χύτευσης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, επενδύεται με πυροχώρα πυριτικού ή κατά κανόνα φωσφορικού τύπου, και το επενδεδυμένο πλέον ομοίωμα αποκηρώνεται και προθερμαίνεται στους 871°C ή κατά άλλους στους 1000 °C με διάφορους τρόπους και ακολουθεί η χύτευση.³⁷

Η τεχνική αυτή περιγράφει την δημιουργία χυτού, το οποίο κατασκευάζεται από έγχυση μετάλλου σε πυριάντοχο καλούπι, το οποίο δημιουργείται μετά την εξάχνωση ενός κέρινου πρότυπου.³⁷

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα ενός χυτού σκελετού από κράμα Co-Cr είναι:

1. Η φροντίδα και ακρίβεια με την οποία αναπαράγεται το εκμαγείο
2. Η νοημοσύνη με την οποία σχεδιάζεται και αναλογίζεται ο σκελετός
3. Η φροντίδα και καθαριότητα στο κέρωμα του εκμαγείου
4. Η εξέταση της διαστολής του κεριού που προκαλείται από τη θερμοκρασία
5. Το μέγεθος, το μήκος, πάχος, η διαμόρφωση, τα σημεία και ο τρόπος σύνδεσης των αγωγών
6. Η επιλογή του πυροχώματος
7. Η θέση του σκελετού στο καλούπι
8. Το υγρό ή νερό ανάμειξης: ποσότητα, θερμοκρασία και ακαθαρσίες
9. Η ανάμειξη του πυροχώματος κατά τη διάρκεια της ανάμειξης των υλικών
10. Ο περιορισμός που προσφέρεται για διαστολή του πυροχώματος που προκαλείται από τον δακτύλιο χύτευσης
11. Ο χρόνος πήξης
12. Η θερμοκρασία και χρόνος αποκήρωσης



13. Η μέθοδος χύτευσης
14. Τα αέρια: συγκολλημένα, εγκλωβισμένα και απορροφημένα
15. Η δύναμη που χρησιμοποιείται για τη ρίψη του κράματος στο καλούπι
16. Η συστολή του κράματος κατά την ψύξη
17. Η αφαίρεση από το πυρόχωμα μετά τη χύτευση
18. Η τελική επεξεργασία
19. Η επίδραση της θερμότητας.³²

Από τα στάδια κατασκευής σκελετού Μ.Ο. από κράματα Co-Cr, τα στοιχεία που σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο της εργασίας (τα κράματα), και ειδικότερα την επεξεργασία (τεχνική χύτευσης) του κράματος, είναι το υλικό στο οποίο χυτεύεται και έρχεται σε άμεση επαφή το κράμα δηλαδή το πυρόχωμα καθώς και η μέθοδος της τήξης, της χύτευσης και της ψύξης του κράματος. Για το λόγο αυτό, τα στοιχεία αυτά αναλύονται περισσότερο σε σχέση με τους προηγούμενους παράγοντες για τους οποίους έγινε μια απλή αναφορά, χωρίς αυτό να μειώνει την σημαντικότητα όλων των παραγόντων για την κατασκευή ενός άρτιου σκελετού.

Σημειώνεται ότι πλην της τεχνικής της χύτευσης, οι βραχίονες άμεσης συγκράτησης μπορεί να είναι προκατασκευασμένοι από σύρμα και να προσαρτηθούν στην αποκατάσταση είτε ενσωματώνοντας-εμβυθίζοντας ένα τμήμα του σύρματος στη βάση ρητίνης της οδοντοστοιχίας, είτε συγκολλώντας το στον κατασκευασμένο σκελετό ή επιχυτεύοντας το σκελετό σε ένα σύρμα το οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο στο πρόπλασμα κεριού (Εικόνα 4-2). Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των διαθέσιμων σφυρήλατων συρμάτων είναι οι πιο σημαντικές σκέψεις όταν επιλέγεται ένα κατάλληλο σύρμα για την επιθυμητή μέθοδο σύνδεσης. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν το όριο διαρροής ή το όριο αναλογίας, τη ποσοστιαία επιμήκυνση, την αντοχή εφελκυσμού και τη θερμοκρασία τήξης. Όλοι οι κατασκευαστές εντύπων επεξεργασμένων συρμάτων για οδοντιατρικές εφαρμογές παρέχουν γραφήματα με τα προϊόντα τους και τις φυσικές ιδιότητες κάθε προϊόντος. Επιπλέον, οι περισσότεροι κατασκευαστές ορίζουν σύρματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία χύτευσης.³²

4.1.1.1 Πυροχώματα χύτευσης κραμάτων Co-Cr

Με την ανατύπωση του εκμαγείου κατασκευάζεται ένα πυροχωμάτινο εκμαγείο πάνω στο οποίο διαμορφώνεται το κέρινο ομοίωμα του σκελετού της Μ.Ο. Για την κατασκευή αυτού του εκμαγείου καθώς επίσης και για την επένδυση του κέρινου ομοιώματος της Μ.Ο., χρησιμοποιούνται σαν υλικά τα πυροχώματα. Πυροχώματα καλούνται μίγματα συνήθως σκόνης και υγρών τα οποία μπορούν, στην συνήθη θερμοκρασία αλλά και σε σημαντικά



υψηλότερες θερμοκρασίες, να διαμορφώνονται σε συμπαγείς μάζες σκληρές και ανθεκτικές, σταθερού σχήματος. Η σκόνη μετά την ανάμιξη της με το νερό ή το ειδικό υγρό που τη συνοδεύει δίνει μια πλαστική μάζα, με την οποία επενδύεται το κέρινο ομοίωμα της προσθετικής εργασία, ενώ μετά την πήξη της δίνει μια συμπαγή μάζα που λειτουργεί σαν μήτρα για την χύτευση του μετάλλου. Τα πυροχώματα λοιπόν αποτελούν τα υλικά από τα οποία εξαρτάται κυρίως η επιτυχία κάθε χυτού και κατά συνέπεια η συμβολή τους είναι καθοριστική, για μια σωστή χύτευση και την παραλαβή ενός χυτού με σημαντική ακρίβεια των διαστάσεων του.⁴

Τα πυροχώματα φωσφορικού τύπου θεωρούνται τα καταλληλότερα για την χύτευση κραμάτων Co-Cr καθώς έχουν πολλές επιθυμητές ιδιότητες ιδίως στις υψηλές θερμοκρασίες και δεδομένου ότι οι υψηλές θερμοκρασίες χύτευσης των κραμάτων αυτών (1400-1550 °C συνήθως) καταστούν αδύνατη την χρήση πυροχωμάτων γύψου αφενός λόγω του ότι αποσυντίθενται απελευθερώνοντας ενώσεις θείου που δημιουργούν τραχύτητα και ευθραυστότητα στο χυτό αφετέρου λόγω της αδυναμίας τους αντιστάθμισης της θερμικής συστολής (~2-2,3 %).³⁸⁻⁴⁰

Επιπροσθέτως, δύνανται να χρησιμοποιηθούν και τα πυροχώματα πυριτικού τύπου, αν και στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται μόνο τα ΠΦΤ (Πυροχώματα Φωσφορικού Τύπου) καθώς με την παρέλευση του χρόνου οι κατασκευαστικές εταιρείες τείνουν να τα αποσύρουν από την αγορά.^{4,39,41}

Μεταξύ άλλων η πιο σημαντική ιδιότητα που πρέπει να έχουν τα πυροχώματα είναι ότι θα πρέπει να διαστέλλονται αρκετά και με όσον το δυνατόν ελεγχόμενο τρόπο, ώστε με την διαστολή τους να αντισταθμίζουν την συστολή του χυτού κράματος Co-Cr (1,8-2,3 %), την οποία υφίσταται αυτό κατά την ψύξη του από τη θερμοκρασία στερεοποίησης μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.⁴

Τα ΠΦΤ υπάρχουν είτε με τη μορφή σκόνης και ειδικού υγρού ανάμειξης είτε με τη μορφή δύο παστών (paste-paste type investments).^{38,39,42}

Η ακριβής ποιοτική και ποσοτική σύσταση της σκόνης διατηρείται μυστική από τις εταιρείες. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές η σκόνη αποτελείται από, α) SiO₂ (πυράντοχη ουσία, 75-80 % χαλαζίας ή χριστοβαλίτης ή και τα δύο), β) μία πηγή φωσφορικών ιόντων (θεωρητικά πολλά φωσφορικά οξέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όμως στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται μόνο το NH₄H₂PO₄ καθώς είναι θερμοανθεκτικό, 10 %^{26,38,43}), γ) MgO [αντιδρά με το P σχηματίζοντας NH₄MgPO₄ (συνδετική ουσία, < 20 %)], και δ) κατά περίπτωση διάφορες χημικές ουσίες (π.χ. NaCl, K₂SO₄, H₃BO₃, σκόνη Cu οι οποίες αποσκοπούν



στην επιτάχυνση ή επιβράδυνση των χημικών αντιδράσεων κατά την πήξη του πυροχώματος, ενώ C δεν θα πρέπει να προστίθεται).^{4,26,38,41}

Το ειδικό υγρό ανάμειξης είναι υδατικό διάλυμα SiO_2 ή υδατικό κολλοειδές διάλυμα SiO_2 αποτελούμενο από νερό, παράγοντες μείωσης επιφανειακής τάσης, παράγοντες μείωσης του ιξώδους, γλυκερίνη, αντιαφριστικά και λεπτά μόρια ένυδρου SiO_2 , τα οποία μπορούν να σχηματίσουν πήγμα (gel) και να συνδέσουν μεγαλύτερα μόρια μη κολλοειδούς φύσεως.³⁸ Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν σαν υγρό ανάμειξης το νερό, αλλά βρέθηκε ότι είναι ατελές στην απαιτούμενη διαστολή κραμάτων Co-Cr. Ως διαλύτης του ειδικού υγρού δεν χρησιμοποιείται απεσταγμένο νερό, αλλά ειδικά ιόντα όπως Na^+ που επηρεάζουν μάλλον την αντίδραση πήξης. Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί ότι το ειδικό υγρό περιορίζει την παραμόρφωση.^{38,39}

Η χρήση ωστόσο πυροχωμάτων ανάμειξης σκόνης-υγρού ενέχει τον κίνδυνο εισπνοής λεπτής σκόνης και ανάπτυξης πνευμοκονίασης και άλλων αναπνευστικών ασθενειών. Για την αντιμετώπιση των ανωτέρω προβλημάτων διερευνήθηκε η δημιουργία πυροχωμάτων άνευ σκόνης με τη χρήση δύο παστών με τυποποιημένες συνθέσεις ΠΦΤ (paste-paste type investments). Αρχικά παρασκευάστηκαν μια όξινη υδατική πάστα υδατοδιαλυτού φωσφορικού ανιόντος-χριστοβαλίτη και μια ελαιώδης βασική πάστα βαζελίνης- MgO , και μολονότι η ρευστότητα και η στερεοποίηση τους ήταν παρόμοιες με αυτές του συμβατικού πυροχώματος, η ελαιώδης ένωση παρουσίαζε δυσκολίες κατά τους χειρισμούς όπως κατά την ανάμειξη ή την ζύγιση λόγω του υψηλού ιξώδους της, καταδεικνύοντας την μη καταλληλότητα των παστών ως υλικά επένδυσης. Εν συνεχεία, εξετάστηκαν τα διαλύματα κολλοειδούς πυριτίας για την παρασκευή άλλης υδατοδιαλυτής πάστας η παραγωγή της οποίας βασίστηκε στη διεργασία sol-gel (κολλοειδούς πήγματος) μεταξύ MgO και διαλύματος κολλοειδούς πυριτίας και αναπτύχθηκαν τα πυροχώματα τύπου πάστας-πάστας με χρήση κολλοειδούς πυριτίας. Η μια πάστα ήταν $\text{MgH}_2(\text{PO}_4)_2$ -χριστοβαλίτης και η άλλη MgO -διάλυμα κολλοειδούς πυριτίας. Εντούτοις, παρέμεινε το πρόβλημα δημιουργίας χυτών χαλαρούς εφαρμογής, ενώ η μακροχρόνια αποθήκευση τους εθεωρείτο αμφισβητήσιμη επειδή η πήξη της κολλοειδούς πυριτίας εξαρτάται από το χρόνο. Τελικώς, όλα τα παραπάνω ζητήματα επιλύθηκαν με την παρασκευή πυροχωμάτων τύπου πάστας-πάστας με χρήση κολλοειδούς πυριτίας αραιωμένης με νερό. Η μια πάστα αποτελούσε όξινο μείγμα χριστοβαλίτη-διαλύματος $\text{MgH}_2(\text{PO}_4)_2$ και η άλλη ένα αλκαλικό μίγμα MgO - 20ml διαλύματος κολλοειδούς πυριτίας- 30ml απεσταγμένου νερού. Η αναλογία των 20ml είναι σημαντική διότι μεταξύ άλλων που δοκιμάστηκαν βρέθηκε να είναι η μόνη κατάλληλη για κλινική χρήση εφόσον οι τιμές



εφαρμογής, θλιπτικής αντοχής, διαστολής και χρόνου πήξης πληρούν τις προϋποθέσεις και είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών ΠΦΤ σκόνης-υγρού.⁴²

Συνοπτικά οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την πήξη^{43,44} των ΠΦΤ χύτευσης κραμάτων Co-Cr είναι:

1. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{MgO} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
2. $2\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + 3\text{MgO} \rightarrow \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$
3. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{MgO} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$
4. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{MgO} \rightarrow \text{MgHPO}_4 + \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$

Κατά τη θέρμανση (αντιδράσεις 5-11), αρχικά γίνεται μερική αφυδάτωση και σταδιακή διάσπαση του $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (από ~ 50 °C).⁴⁴

5. $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + 5 \text{H}_2\text{O} \uparrow$

Η διαδικασία αυτή μπορεί να ξεκινήσει και κατά τη διάρκεια της πήξης ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες (εάν χαθεί το νερό, όπως στην ελεύθερη επιφάνεια), περιπλέκοντας επιπλέον την περιγραφή του πηγμένου υλικού. Τότε, συμβαίνει επιπλέον διάσπαση σε άμορφο πολυμερές ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) n (> 300 °C).

6. $2\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O} \uparrow + 2\text{NH}_3 \uparrow$

Η αντίδραση αυτή αντιπροσωπεύει τη χαρακτηριστική έντονη μυρωδιά αμμωνίας κατά τη διάρκεια της καύσης. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πάνω από τους ~ 690 °C, αυτό το υαλώδες (άμορφο) υλικό αρχίζει να κρυσταλλοποιείται. Η θερμική διάσπαση του $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ μπορεί να σχηματίσει ένα μείγμα άμορφου $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ και $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$.

7. $4\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{άμορφο } \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{Mg}(\text{PO}_3)_2 + 4\text{NH}_3 \uparrow + 6\text{H}_2\text{O} \uparrow$

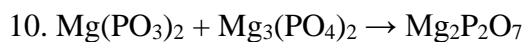
Το $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$ δεν κρυσταλλοποιείται σε αυτές τις συνθήκες και παραμένει υαλώδες. Έτσι, ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες μπορεί να σχηματισθούν $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$, $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$, και $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$.

Κάθε περίσσεια $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ που παρέμεινε στο διάλυμα μετά την πήξη, διασπάται για να σχηματίσει P_2O_5 (το νερό έχει εξατμιστεί μακράν) και αυτό μπορεί να αντιδράσει με τα σημαντικά ή τα λίγα προϊόντα αντίδρασης. Τα καθαρά αποτελέσματα είναι:

8. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{MgPO}_4 \rightarrow \text{Mg}(\text{PO}_3)_2 + 2\text{NH}_3 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} \uparrow$
9. $2\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + 2\text{MgHPO}_4 \rightarrow 2\text{Mg}(\text{PO}_3)_2 + 2\text{NH}_3 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O} \uparrow$

Σε υψηλές θερμοκρασίες θέρμανσης τα $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ και το άμορφο $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ παραμένουν, αλλά το $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$ εξαφανίζεται διότι:





Επιπλέον, και ειδικά αφότου έχει καταναλωθεί το $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$, θα σχηματιστεί άμορφο $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ από την αντίδραση του $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ με την περίσσεια MgO , αν υπάρχει (είθισται).



Έτσι για την συνήθη θερμοκρασία θέρμανσης (1000-1300 °C), ίσως παραμείνει κάποιο $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ στην δομή ή μπορεί να αντικατασταθεί πλήρως από άμορφο $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, εξαρτάται από την πραγματική σύνθεση.⁴⁴

Σε όλες αυτές τις αντιδράσεις θερμικής αποσύνθεσης, πρέπει να αναγνωριστούν οι κινητικοί περιορισμοί. Οι αντιδράσεις μπορούν να αρχίσουν αργά σε χαμηλές θερμοκρασίες και να επιταχυνθούν καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αλλά, πάλι επειδή η θερμική αγωγιμότητα είναι χαμηλή, το προφίλ θερμοκρασίας δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφο σε όλο το σώμα. Έτσι, μπορεί να έχουμε την κατάσταση των αντιδράσεων να προχωρούν με διαφορετικούς ρυθμούς σε διαφορετικά μέρη (και ο κανόνας του Arrhenius του διπλασιασμού ενός ποσοστού για αύξηση 10 °C είναι χρήσιμος ως ένδειξη), πάνω από την παραλλαγή της ρύθμισης των προϊόντων αντίδρασης, ακολουθούμενη από διαφορετικές αντιδράσεις σύμφωνα με αυτές οι παραλλαγές. Επομένως, δεν αναμένεται ομοιομορφία στη χημεία σε οποιοδήποτε στάδιο, ή ομοιομορφία στις μηχανικές ιδιότητες, και ειδικά όχι ομοιομορφία στη διαστολή πήξης και τη θερμική διαστολή όταν επιτρέπεται η μεταβολή οτιδήποτε άλλο, όπως ο λόγος ανάμιξης, η θερμοκρασία ανάμιξης, το σχήμα και το μέγεθος του καλουπιού. Ασυμφωνία στη βιβλιογραφία μπορεί να έχει προκύψει από τέτοιους παράγοντες που δεν αναγνωρίζονταν, και σίγουρα μπορεί να ληφθεί υπόψη μεταξύ των εργαστηριακών παραλλαγών όταν γίνονται δοκιμές τυποποίησης.⁴⁴

Επίσης υπάρχουν αρκετά άλλα συστατικά στα προϊόντα αυτά (Zn σε μεγάλη αναλογία), αλλά συνιστούν εμπορικά μυστικά αδημοσίευτα της εκάστοτε εταιρείας. Μπορεί να αναμένεται ότι αφού τα φωσφορικά άλατα Mg και Zn σχηματίζουν συνεχή στερεά διαλύματα στις περισσότερες συνθήκες, είναι σε μεγάλο βαθμό θέμα αντιδραστικότητας και ποσοστού. Τα διάφορα χρώματα των ΠΦΤ οφείλονται σε μικρές ποσότητες χρωματισμένων οξειδίων μεταβατικών μετάλλων (π.χ. Fe_2O_3 , Cr_2O_3), αλλά αυτά δεν φαίνεται να έχουν άλλη λειτουργία.⁴⁴

Παραπάνω περιγράφηκαν οι αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη πήξη και τη θέρμανση του κράματος. Στο ειδικό μέρος, στην ενότητα 6.1.1 παρουσιάζεται η συνέχεια των άνω αντιδράσεων, ήτοι οι αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά τη χύτευση του κράματος.



4.1.1.2 Μέθοδος τήξης και χύτευσης

Τα κράματα Co-Cr χαρακτηρίζονται και ως ευαίσθητα κράματα, επειδή η σύστασή τους είναι καθοριστική για τις μηχανικές τους ιδιότητες και κάθε μεταβολή στη σύσταση των στοιχείων τους οδηγεί σε δραστικές μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Σημαντική επίδραση στη διατήρηση της σύνθεσης των κραμάτων Co-Cr έχει ο τρόπος τήξης και χύτευσης τους.⁴

Τα κράματα Co-Cr τήκονται σε θερμοκρασίες σχετικά υψηλές, οι οποίες κυμαίνονται από 1250-1500 °C ή και υψηλότερες, και για τον λόγο αυτό απαιτούνται πηγές θερμότητας κατά πολύ ισχυρότερες εκείνων που χρησιμοποιούνται για την τήξη των κραμάτων χρυσοπλατίνας, της οποίας η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται μεταξύ των 850-1150 °C. Τα κράματα Co-Cr ανάλογα με τους διαθέσιμους τύπους μηχανών χύτευσης, τήκονται είτε σε ξεχωριστή χοάνη με φλόγα (οξυγόνο-προπάνιο, οξυγόνο-ασετυλίνη, αέρας-προπάνιο), η οποία οδηγείται στο κράμα μέσω φλόγιστρου, και χυτεύονται στο καλούπι με φυγοκεντρική δύναμη, είτε με υψίσυχνα ρεύματα (επαγωγικός κλίβανος υψηλής συχνότητας) και κατόπιν χυτεύονται στο καλούπι είτε φυγοκεντρικά με κινητήρα ή ελατήριο. Σημειώνεται ότι το τετηγμένο κράμα μπορεί να χυτευθεί με πίεση αέρα ή αδρανούς αερίου, κενό ή και τα δύο. Η γενική διαδικασία για καθένα περιγράφεται στις ακόλουθες ενότητες, με ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναφέρονται. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ακολουθούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή επακριβώς για οποιαδήποτε από αυτές τις συσκευές.^{4,7,45}

ΤΗΞΗ

Όσον αφορά την μέθοδο τήξης των κραμάτων με φλόγα, είναι αυτονόητο ότι η χρήση φλόγας δεν τηρεί τις προδιαγραφές μιας ασφαλούς τήξης (και κατά συνέπεια χύτευσης) επειδή αφενός δεν ελέγχεται η θερμοκρασία τήξης του κράματος και αφετέρου προστίθεται C στο κράμα από το αέριο με το οποίο το κράμα έρχεται σε επαφή. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει αλλοίωση της σύνθεσης του κράματος δεδομένου ότι στην μεν πρώτη η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να εξαχνώσει κάποια συστατικά του κράματος ή να ενσωματώσει καμένα στοιχεία στο κράμα, στη δε δεύτερη το κράμα γίνεται εξαιρετικά ψαθυρό. Ακόμη, ο μη έλεγχος θερμοκρασίας τήξης, αφενός οδηγεί σε πιθανή μη πλήρη τήξη του κράματος με αποτέλεσμα την πρόωρη στερεοποίηση του, την μη πλήρωση όλου του τύπου και την δημιουργία ατελούς χυτού, αφετέρου καθιστά δύσκολο τον προϋπολογισμό και την αντιστάθμιση της διαστολής του πυροχώματος αφού δεν είναι πλέον γνωστή η συστολή του κράματος (π.χ. ένα κράμα που έχει υπερθερμανθεί κατά 100 °C άνωθεν της ενδειγμένης θερμοκρασίας, αυτό σημαίνει ότι έχει διασταλεί κατά 100 °C παραπάνω και είναι



αυτονόητο ότι θα συσταλεί περισσότερο μετά την ψύξη του). Αξιοσημείωτη είναι και η δημιουργία εσωτερικών ατελειών (έγκλειστα, καρβίδια, πόροι) στην εσωτερική δομή του κράματος κατά τη χρήση της μεθόδου φλόγας παράγοντες που μεταξύ άλλων προβλημάτων ενισχύουν την πιθανότητα θραύσης. Για όλους αυτούς τους λόγους, η μόνη ασφαλής μέθοδος τήξης των κραμάτων Co-Cr και η πλέον ελεγχόμενη είναι η χύτευση με επαγωγικό τρόπο (χρήση μαγνητικών πεδίων υψηλών συχνοτήτων) και σε κενό ή παρουσία αδρανούς αερίου.⁴

Μολαταύτα, η τεχνική τήξης με τη χρήση φλόγας εξακολουθεί να εφαρμόζεται από ορισμένους τεχνολόγους λόγω του υψηλότερου κόστους των επαγωγικών συσκευών, και για το λόγο θα αναφερθούν τα βασικά σημεία. Η πλέον κατάλληλη φλόγα για την τήξη των κραμάτων Co-Cr είναι η φλόγα ακετυλενίου-οξυγόνου (οξυακετυλενική φλόγα) δεδομένου ότι επιτυγχάνει υψηλή θερμοκρασία τήξης αφενός και αφετέρου το ακετυλένιο με δύο άτομα C τροφοδοτεί το κράμα με λιγότερο άνθρακα συγκρινόμενο με άλλα αέρια όπως το βουτάνιο με τέσσερα άτομα C ή το προπάνιο με τρία άτομα C. Στην τήξη με οξυακετυλενική φλόγα, μεγάλο ρόλο παίζει αφενός η σύνθεση της φλόγας και αφετέρου η απόσταση της φλόγας από τη χοάνη χύτευσης (δηλαδή το τηκόμενο κράμα). Όσον αφορά την σύνθεση της φλόγας, με τις αντίστοιχες συνθέσεις μπορούν να επιτευχθούν οι τρεις τύποι φλόγας. Η οξειδωτική φλόγα (Α τύπος φλόγας) επιτυγχάνεται με ανάμειξη O₂ πίεσεως 30 Ib/in² και ασετυλίνης (ή αλλιώς ασετυλίνης) 5 Ib/in². Έχει ένα οξύ υποκύανον εσωτερικό κώνο ο οποίος περιβάλλεται από ένα μικρό (δεύτερο) μπλε κώνο, ενώ κατά την καύση των αερίων ακούγεται «ένας τραχύς» ήχος. Η ουδέτερη φλόγα (Β τύπος φλόγας), επιτυγχάνεται με ανάμειξη O πίεσεως 25 Ib/in² και ασετυλίνης 5 Ib/in². Χαρακτηρίζεται από μια κοντή, λευκή, εσωτερική φλόγα (κώνο) με αποστρογγυλεμένη κορυφή, περιβάλλεται από μια μεγαλύτερη μπλε φλόγα, ενώ κατά την καύση των αερίων η φλόγα αυτή συνοδεύεται από ένα «ήπιο και συριστικό ήχο». Η ενανθρακωμένη φλόγα (Γ τύπος φλόγας) επιτυγχάνεται με ανάμειξη O πίεσεως 20 Ib/in² και ασετυλίνης 5 Ib/in². Δημιουργείται επειδή το μείγμα περιέχει περισσότερο ακετυλένιο το οποίο καίγεται ήρεμα και έχει μια «φερωτή» φλόγα που περιβάλλει τον τραχύ εσωτερικό κώνο. Χαρακτηριστικό της φλόγας αυτή είναι η πρόσθεση άνθρακα στο κράμα με επακόλουθο την ελάττωση της πλαστικότητάς του χυτού. Όσον αφορά την απόσταση της φλόγας από το τηκόμενο κράμα, κυμαίνεται από 2,5-10 cm. Ο συνδυασμός κάθε ενός από τους παραπάνω τύπους με κάθε μια από τις αποστάσεις της φλόγας, δίνει και ένα τύπο χυτού με, διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, μεταλλογραφική δομή και εξωτερική επιφάνεια. Γενικώς, έχει παρατηρηθεί ότι για την παραγωγή χυτών με τη μικρότερη δυνατή αλλαγή στη μεταλλογραφική δομή από τον αρχικό όγκο του κράματος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η



ουδέτερη φλόγα σε μια απόσταση του φλογίστρου από την χοάνη χύτευσης που θα είναι ίση με 10 cm, η οποία απόσταση θα πρέπει να διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια της τήξης. Αντίθετα, όταν ο αυλός βρίσκεται πολύ κοντά στο τηκόμενο κράμα επέρχεται υπερθέρμανση του κράματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την τήξη των κραμάτων αυτών χρησιμοποιείται συνήθως ένας αυλός με πολλαπλές εκροές για να καλύπτει την περιοχή του κράματος, όμως οι ατομικοί κώνοι δεν δίνουν στη φλόγα τον ίδιο τύπο σε όλη της την έκταση, με αποτέλεσμα στο κέντρο της η φλόγα να είναι περισσότερο οξειδωτική. Επίσης όταν τήκονται κράματα σε χοάνη, η φλόγα επηρεάζεται από τα τοιχώματα της χοάνης που περιβάλλουν την φλόγα και συνήθως στην περίπτωση αυτή μια ελαφρά ενανθρακωμένη φλόγα, παράγει τις καλύτερες συνθήκες τήξης.^{4,7}

Κατά την χρήση οξυακετυλενικής φλόγας, η φλόγα αντιδρά περίπου κατά την αντίδραση $C_2H_2 + O_2 \rightarrow 2CO + H_2$. Μέσα στην διαχεόμενη φλόγα, το CO και το H₂ αντιδρούν με το οξυγόνο O₂ του αέρα, σύμφωνα με τις αντιδράσεις: $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ και $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. Ταυτόχρονα με τα όσα συμβαίνουν μέσα στην φλόγα, οξειδώνεται και ο C που περιέχεται στο κράμα σε διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτά τα οξείδια αλλά και τα οξείδια του άνθρακα της φλόγας, συνήθως όταν παρατείνεται η τήξη, εγκλείονται μέσα στη μάζα του χυτού. Το αποτέλεσμα είναι η παρουσία του πορώδους από την ύπαρξη αερίων. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αναγνωριστεί στον σκελετό του χυτού, από την παρουσία σφαιρικών κενών με λαμπρές εσωτερικές επιφάνειες.^{4,7}

Η τήξη του κράματος με επαγωγικό τρόπο (ηλεκτρικός επαγωγικός κλίβανος) όπως προαναφέρθηκε πλεονεκτεί. Συγκεκριμένα, οι επαγωγικές συσκευές διαθέτουν ένα μεγάλο υδρόψυκτο μεταλλικό πηνίο (από σωλήνα χαλκού) μέσα στο οποίο τοποθετούνται ειδικές χοάνες τήξης με κυπελλοειδές σχήμα. Για την τήξη το κράμα με τη μορφή κύβων ή κυλίνδρων εισάγεται στην κυπελλοειδή χοάνη και αυτή με τη σειρά της έρχεται ακριβώς επάνω από το πηνίο το οποίο και ανυψώνεται με ειδικό μοχλό. Στη θέση αυτή η χοάνη βρίσκεται μέσα στα στο πηνίο. Κατά την έναρξη της διαδικασίας τήξης, η οποία πραγματοποιείται είτε στον ατμοσφαιρικό αέρα είτε σε κενό, το επαγωγικό ρεύμα διέρχεται μέσω του πηνίου, και δημιουργεί ένα μεταβλητό μαγνητικό πεδίο στη θέση του κράματος το οποίο θέτει σε ταλάντωση τα άτομα των στοιχείων του κράματος με αποτέλεσμα να αυξάνει την θερμική τους κίνηση και έτσι τη θερμοκρασία του κράματος, προκαλώντας τελικά την τήξη του. Ο έλεγχος για την επιβεβαίωση της τήξης του κράματος ώστε να προχωρήσει η διαδικασία στην χύτευση γίνεται με διπλό τρόπο. Ο πρώτος τρόπος είναι ο άμεσος οπτικός έλεγχος από τον τεχνολόγο ο οποίος επιβεβαιώνει ότι το κράμα μέσα στη χοάνη έχει χάσει την επιφανειακή του γκριζάδα και ότι οι κύλινδροι έχουν χάσει το κανονικό (συμμετρικό) τους σχήμα. Ο



δεύτερος τρόπος είναι με το οπτικό ή ηλεκτρικό πυρόμετρο με το οποίο είναι εφοδιασμένες οι επαγωγικές μηχανές τήξης και χύτευσης, όπου ο τεχνολόγος επιβεβαιώνει από το πυρόμετρο ότι η θερμοκρασία έχει φτάσει την θερμοκρασία τήξης του κράματος. Μόλις το κράμα φτάσει τη θερμοκρασία χύτευσης (στον αέρα ή σε κενό), ωθείται στο καλούπι με την βοήθεια φυγόκεντρου δύναμης, είτε με την βοήθεια πίεσης ρεύματος αδρανούς αερίου. Πολλές από αυτές τις μηχανές, για την τήξη, διαθέτουν ειδικό κλειστό θάλαμο στον οποίο δημιουργούνται συνθήκες κενού. Στις πλέον προηγμένες μηχανές υπάρχει συνδυασμός τήξης σε κενό αέρα και προώθηση του μετάλλου με πίεση από ρεύμα αδρανούς αερίου.^{4,46} Με τις μηχανές αυτού του τύπου εξασφαλίζεται η σωστή θέρμανση του μετάλλου χωρίς τον κίνδυνο υπερθέρμανσης αφού υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας με την βοήθεια πυρομέτρων και ψηφιακού προγραμματισμού της ανόδου της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία του τήγματος ελέγχεται εκτός από τα ειδικά πυρόμετρα και με οπτικό έλεγχο μέσα από ειδικούς φακούς. Σημειώνεται ότι ο τρόπος λειτουργίας των συσκευών αυτών εμπεριέχει τον κίνδυνο υλικά τα οποία δεν ρευστοποιούνται σε μια μάζα κατά το λιώσιμο και τα οποία βρίσκονται έξω από το μαγνητικό πεδίο να θερμαίνονται πολύ σιγά, μόνο από την ακτινοβολία του ήδη θερμού υλικού και κατά συνέπεια για την αποφυγή αυτού του κινδύνου θα πρέπει το υλικό να προσφέρεται με την μορφή κύβων διαφορετικού μεγέθους ή να διατάσσεται κυκλικά σε μια ομοιόμορφη θέση των κύβων στο ηλεκτρικό πεδίο. Χρειάζεται επομένως προσεκτική επιλογή της τοποθέτησης του μετάλλου (κύβοι) έτσι ώστε να βρίσκεται όλο το μέταλλο μέσα στο πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ακόμη σημειώνεται ότι υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης της ποσότητας του κράματος που βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο μέσα στη χοάνη τήξης και για την αποφυγή της υπερθέρμανσης συνίσταται η χρήση ενός πυρομέτρου για την συνεχή ένδειξη της θερμοκρασίας, έτσι ώστε αυτή να βρίσκεται υπό έλεγχο.^{4,22}

ΧΥΤΕΥΣΗ

Με τον όρο χύτευση εννοείται η προώθηση του ρευστοποιημένου κράματος μέσα στην ήδη προθερμασμένη πυροχωμάτινη μήτρα. Οι συσκευές που μπορεί να πραγματοποιηθεί η χύτευση διακρίνονται στις, φυγόκεντρες (μηχανικές ή ηλεκτρικές), κενού και πίεσης ατμοσφαιρικού αέρα, κενού και πίεσης με αδρανές αέριο (αργόν).⁴ Στην ουσία η πλήρωση του ελεύθερου χώρου που αφήνεται από το κερί στο πυροχωμάτινο καλούπι πραγματοποιείται με κράμα που εισάγεται με φυγόκεντρική δύναμη ή πίεση.⁴⁵

Η συσκευή φυγόκεντρη μηχανική αποτελείται από μια βάση πάνω στην οποία περιστρέφεται ένας κατακόρυφος άξονας, με τη βοήθεια ενός ελατηρίου. Με τον άξονα αυτόν



είναι συνδεδεμένος ένας οριζόντιος βραχίονας. Στο ένα άκρο του βραχίονα υπάρχει μια βάση (υποδοχή) για τη συγκράτηση του δακτυλίου χύτευσης και μια χοάνη (πυρίμαχη βάση), για την τήξη του κράματος. Στο άλλο άκρο του βραχίονα υπάρχει ένα κινητό βάρος (αντίβαρο) για την ισορρόπηση της συσκευής. Για να οπλιστεί η συσκευή στρέφεται ο οριζόντιος βραχίονας 2-3 φορές με ανάποδη φορά και οπλίζεται, οπότε συσπειρώνεται το ελατήριο δεσμεύοντας της ελαστική ενέργεια συσπείρωσης. Με την απελευθέρωση του βραχίονα κατά την χύτευση απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια του ελατηρίου η οποία μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια περιστροφής βάζοντας τον οριζόντιο βραχίονα σε περιστροφή. Το κράμα ρέει προς τα έξω και κάτω, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, της βαρύτητας και της αδράνειας.⁴

Η συσκευή φυγόκεντρη ηλεκτρική διαφέρει από την μηχανική, όχι στην αρχή λειτουργίας της, αλλά στο ότι δεν χρειάζεται πριν την χύτευση χειροκίνητη περιστροφή του οριζόντιου βραχίονα, καθώς πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρα. Απλά καθορίζεται από πριν ο αριθμός των περιστροφών που είναι επιθυμητό να εκτελεστούν και όταν το κράμα είναι έτοιμο να χυτευθεί, ασφαρίζεται η μηχανή, οπότε αυτόματα μπαίνει σε λειτουργία ο ηλεκτροκινητήρας που βάζει σε περιστροφή τον οριζόντιο βραχίονα της μηχανής. Η συσκευή αυτή μπορεί να συνδυαστεί με τήξη του κράματος με την μέθοδο φλόγιστρου ή με επαγωγικό ρεύμα. Το κράμα ρέει προς τα έξω και κάτω, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, της βαρύτητας και της αδράνειας.⁴

Στη συσκευή χύτευσης κενού και πίεσης ατμοσφαιρικού αέρα, η τήξη του κράματος γίνεται με ηλεκτρική θέρμανση του σκαφιδίου σε κενό αέρα, ενώ η χύτευση του στον πυροχωμάτινο κύλινδρο γίνεται με πίεση ατμοσφαιρικού αέρα. Συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, η συσκευή αυτή πλεονεκτεί, παρά το υψηλότερο κόστος, παρέχοντας έναν βελτιωμένο τρόπο χύτευσης (μείωση των αποτυχημένων χυτών, μεγαλύτερη ευκολία στους χειρισμούς).⁴

Η συσκευή χύτευσης κενού και πίεσης με αδρανές αέριο (αργόν), πρόκειται για μια επαγωγική συσκευή χύτευσης η οποία παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα. Έχει μικρό μέγεθος και έτσι εξοικονομείται χώρος ιδιαίτερα σε μικρά εργαστήρια. Ο εύκολος χειρισμός δίνει την δυνατότητα, οπτικού ελέγχου τήξης κράματος από το χειριστή με απόλυτη ασφάλεια ενώ η χύτευση μπορεί να γίνει και με προγραμματιζόμενη αλλά και με χειροκίνητη λειτουργία. Εγγυάται την καλύτερη και πιο σταθερή χύτευση για όλα τα οδοντοτεχνικά κράματα (πολύτιμα, ημιπολύτιμα, μη πολύτιμα). Τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια περιγράμματος και πυκνή ομοιογενή δομή, χωρίς φυσαλίδες και χωρίς πτερόγυια. Πραγματοποιεί ήπια διαδικασία επαγωγικής θερμότητας μέχρι 1600 °C για



προθέρμανση και τήξη (δεν απαιτείται φούρνος προθέρμανσης), άρα υπάρχει οικονομία στο ρεύμα και στον εξοπλισμό. Η τήξη εκτελείται, από μια γεννήτρια επαγωγικού ρεύματος με ισχυρή απόδοση θερμικής ενέργειας, μέσα σε κλειστό θάλαμο για 1-3 min στον οποίο εξασφαλίζεται κενό, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται ο σχηματισμός στρωμάτων οξειδίων στο χυτό. Μετά την τήξη η χοάνη τήξης αναποδογυρίζει και, το κράμα εισέρχεται μέσα στον πυροχωμάτινο κύλινδρο και εφαρμόζεται ταυτόχρονα πίεση αδρανούς αερίου για την τελική προώθηση του κράματος. Η παροχή αργόν αντί ατμοσφαιρικού αέρα αποτρέπει την οξείδωση. Υπάρχει εναλλακτική χρήση σκαφιδίων χύτευσης από γραφίτη για πολύτιμα κράματα ή κεραμικών σκαφιδίων χύτευσης για μη πολύτιμα κράματα τα σκαφίδια έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Σημειώνεται ότι το πηνίο είναι κατασκευασμένο από ειδικό χάλκινο σωλήνα λεπτής διατομής και ότι η ψύξη του πηνίου του επαγωγικού ρεύματος εξασφαλίζεται με κλειστό κύκλωμα νερού το οποίο διέρχεται μέσα από το χάλκινο σωλήνα του πηνίου.⁴

4.1.1.3 Μέθοδος ψύξης

Μετά το στάδιο της χύτευσης ακολουθεί η ψύξη των κραμάτων Co-Cr. Η σύνθεση, η ψύξη όσο και η θερμική κατεργασία των κραμάτων Co-Cr έχουν άμεση επίδραση στην μεταλλογραφική δομή του κράματος, δηλαδή στον αριθμό και το μέγεθος των κόκκων και στην κατανομή των καρβιδίων μέσα στη μάζα του χυτού. Ο τύπος της μεταλλογραφικής δομής του κράματος καθορίζει τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Με την ορθή ψύξη του χυτευμένου κράματος, επιχειρείται η βελτίωση ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων του, η οποία θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραλαβή ενός μεταλλικού σκελετού, ανθεκτικού και ικανού να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του προορισμού του (εφόσον έχουν τηρηθεί όλες οι συνθήκες που αναφέρει ο κατασκευαστής). Γενικά είναι γνωστό ότι η μικροκρυσταλλική δομή προσδίδει στο κράμα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες ενώ η μεγαλοκρυσταλλική δομή χειρότερες. Ο τρόπος της ψύξης των κραμάτων Co-Cr, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ της απότομης ψύξης και της αργής ψύξης.^{4,7}

Όσον αφορά το μηχανισμό στερεοποίησης CST κραμάτων Co-Cr, ο σχηματισμός των κρυστάλλων (στοιχειώδεις κυτταρικές μονάδες) αρχίζει από άτομα τα οποία θα χάσουν πρώτα την κινητική τους ενέργεια, στα οποία στη συνέχεια προσκολλώνται νέα άτομα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συσσωματώματα (αθροίσματα) στερεοποιημένων ατόμων, οι δενδρίτες. Με την πάροδο του χρόνου και ενώ η εναπόθεση νέων ατόμων αυξάνει, οι δενδρίτες μεγαλώνουν κατ' όγκο, μέχρις ότου να εφάπτεται ο ένας του άλλου, για να συνεχισθεί αυτό μέχρι να εξαφανισθεί τελείως ο μεταξύ τους χώρος από τα συναθροιζόμενα και συνωστιζόμενα άτομα. Τα συνωστιζόμενα αυτά άτομα, τα οποία αθροίζονται πολλές φορές



ακανόνιστα, σχηματίζουν, ακανόνιστους κρυστάλλους, τους γνωστούς κόκκους.⁴ Στη μεταλλογραφική δομή των κραμάτων εκτός από τους κόκκους μπορεί να συνυπάρχουν και άλλες φάσεις, όπως καρβίδια και φάση-σ, οι οποίες θα αναλυθούν στο ειδικό μέρος.⁴

4.1.2 Ψηφιακές τεχνικές (CAD/CAM)

Οι τεχνικές αυτές αφορούν την τρισδιάστατη ψηφιακή σχεδίαση ή σάρωση της εργασίας, με ειδικό πρόγραμμα σε υπολογιστή και την κατασκευή της από ειδικές συμβατές αφαιρετικές ή προσθετικές συσκευές που προαναφέρθηκαν.³⁷

Τα συστήματα CAD αποτελούνται από τον σαρωτή και το λογισμικό. Ο σαρωτής «αντιγράφει» την επιφάνεια ενός αντικειμένου με τη βοήθεια δέσμης ορατού φωτός ή δέσμης ακτινών λέιζερ, και την μετατρέπει σε ψηφιακά δεδομένα τα οποία είναι δυνατόν να επεξεργαστούν από τον υπολογιστή. Το λογισμικό επεξεργάζεται τα δεδομένα και αναπαράγει ψηφιακά το αντικείμενο. Με τη βοήθεια υπολογισμών βασισμένων στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει την εικόνα σε πρόγραμμα STL προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα CAM για την παραγωγή των αντικειμένων. Για τον σχεδιασμό των οδοντιατρικών αποκαταστάσεων, διάφορες εταιρίες έχουν διαθέσει στο εμπόριο λογισμικό κατάλληλο για την κατασκευή όλων σχεδόν των ειδών των οδοντοπροσθετικών εργασιών (στεφάνες, τηλεσκοπικές στεφάνες, μερικές οδοντοστοιχίες κ.α.), το οποίο το εκσυγχρονίζουν διαρκώς.³⁷

Τα συστήματα CAM αποτελούνται από τις συσκευές κοπής μη μεταλλικών και μεταλλικών υλικών, τις συσκευές κοπής και σύντηξης «ευκατέργαστου κραματικού συμπίεσματος», και τις συσκευές σύντηξης σκόνης κράματος με ακτίνες λέιζερ (SLS και DMLS), τις συσκευές έμμεσης τρισδιάστατης εκτύπωσης και τις υβριδικές.³⁷

Στις συσκευές κοπής και σύντηξης «ευκατέργαστου κραματικού συμπίεσματος» (S-MIL), χρησιμοποιείται μια πλάκα από το υλικό αυτό, οι μεταλλικοί κόκκοι της οποίας είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με κερί ή πολυμερές, και τοποθετείται σε ειδικό μηχάνημα κοπής, όπου με εκτροχισμό κατασκευάζεται, μέσω των οδηγιών σχεδίασης του υπολογιστή, πρόπλασμα, κατά 10-11 % περίπου μεγαλύτερο, από τις πραγματικές διαστάσεις του επιθυμητού αντικείμενου. Η τεχνική κοπής του «ευκατέργαστου κραματικού συμπίεσματος» έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την τεχνική της κοπής, με τις εξής διαφορές: α) μετά την ψηφιακή σχεδίαση και την εντολή που αποστέλλεται στο μηχάνημα κοπής, αντί για την κλασική πλάκα μετάλλου, εισάγεται η πλάκα του «ευκατέργαστου κραματικού συμπίεσματος». Στην περίπτωση αυτή το υλικό κόβεται με μεγάλη ευκολία από τα κοπτικά του μηχανήματος, β) το πρόπλασμα κατασκευάζεται με τον εκτροχισμό, σε μεγαλύτερες διαστάσεις και γ) κατά



τον σχεδιασμό λαμβάνεται πρόνοια για την τοποθέτηση ειδικών δοκών οι οποίες σκοπό έχουν να αποτρέψουν την παραμόρφωση της κατασκευής, κατά την διαδικασία της πυροσυσσωμάτωσης, η οποία θα ακολουθήσει και η οποία θα επιτευχθεί με την βοήθεια θερμότητας. Στην συνέχεια, η κατασκευή, τοποθετείται σε ειδικό έγκλειστρο και τοποθετείται σε κλίβανο, όπου με το πρόγραμμα όπτησης, επιτυγχάνεται η εξάχνωση του οργανικού συνδετικού υλικού και η σύντηξη των κόκκων ώστε να παραχθεί τελικά η επιθυμητή κατασκευή.³⁷

Στις συσκευές σκληρής και έμμεσης κοπής (H-MIL, I-MIL), χρησιμοποιείται μια πλάκα μεταλλικού κράματος για την κατασκευή σκελετού ή πλάκα από κερί ή ρητίνη ή συνθετικό υλικό για την κατασκευή χυτού προπλάσματος. Η κατασκευή του μεταλλικού σκελετού ή του προπλάσματος γίνεται με εκτροχισμό με τη βοήθεια κατάλληλων εργαλείων (φρέζες, διαμάντια κ.α.) με τη βοήθεια μιας πενταξονικής (συνήθως) μηχανής κοπής (CNC Milling). Το λογισμικό CAM μεταφέρει αυτόματα το σχέδιο στο κατάλληλο τμήμα – εργαλείο της μηχανής CNC. Αυτό περιλαμβάνει ρυθμίσεις που ενεργοποιούν τη κοπή CNC συμπεριλαμβανομένων αλληλουχίας, εργαλείων κοπής και κατεύθυνσης και μεγέθους κίνησης εργαλείου. Οι συσκευές κοπής CNC έχουν την δυνατότητα να συνδυάζουν φρέζες με διαφορετικά μεγέθη (λόγω των ανατομικών διαφορών των αποκαταστάσεων) και να εκτροχίζουν κινούμενες σε 3, 4 ή 5 άξονες. Η ακρίβεια της κοπής φαίνεται να είναι εντός 10 μm. Οι τεχνικές κοπής εξαρτώνται ως επί το πλείστον από τις ιδιότητες της συσκευής όπως η ακρίβεια διαστάσεων και οι δυνατότητες των αξόνων εργασίας.²⁷

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί μια νέα τεχνολογία κοπής, που ονομάζεται «κοπή με λέιζερ» (laser milling ή laser ablation), και η οποία αντί να χρησιμοποιεί κοπτικά εργαλεία για την αφαίρεση πλεονάζοντος υλικού από μια στέρεη επιφάνεια, χρησιμοποιεί εκατομμύρια παλμούς λέιζερ υψηλής έντασης έως ότου ολοκληρωθεί το τελικό σχήμα. Κάθε παλμός λέιζερ αφαιρεί μια μικρή ποσότητα υλικού από το μπλοκ εξατμίζοντας την περίσσεια υλικού. Το μέγεθος κηλίδων των παλμών λέιζερ είναι πολύ μικρό καθιστώντας την ανάλυση αυτού του συστήματος υψηλότερη από οποιοδήποτε άλλο παραδοσιακό σύστημα κοπής. Αυτή η τεχνολογία είναι σχετικά νέα στην οδοντιατρική και εισήχθη στην οδοντιατρική από την Dental Wings Inc το 2015 (Dental Wings Lasermill™), και εφαρμόζεται για την παραγωγή διαφόρων οδοντικών αποκαταστάσεων όπως στεφάνες, γέφυρες, ένθετα, επένθετα και όψεις, με κοπή τεμαχίων από μπλοκ



κεραμικών, πολυμερών ή σύνθετων υλικών, ωστόσο η εφαρμογή της δεν έχει επεκταθεί σε μεταλλικά υλικά και σε Μ.Ο. πράγμα που ενδεχομένως να πραγματοποιηθεί μελλοντικά και για αυτό αναφέρεται, ή ενδεχομένως να μπορεί να δημιουργηθούν υλικά για I-3DP και χύτευση. Τα οφέλη περιλαμβάνουν: παρόλο που το αρχικό κόστος του εξοπλισμού και των υλικών είναι υψηλό, εντούτοις το συνολικό κόστος είναι χαμηλότερο καθώς το σύστημα δεν χρησιμοποιεί εργαλεία εκτροχισμού, όπως φρέζες, τα οποία πρέπει να αντικαθίστανται συχνά λόγω θραύσης και φθοράς. Αποφυγή αποστρογγύλευσης λεπτών άκρων. Χαρακτηριστικά υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης (ποιότητας) γιατί η διάμετρος της δέσμης λέιζερ είναι μικρότερη από τη διάμετρο των φρεζών τουλάχιστον κατά 10 φορές. Υψηλή παραγωγικότητα δεδομένου ότι το σύστημα είναι γρήγορο και συγκρίσιμο με τα παραδοσιακά μηχανήματα κοπής. Δυνατότητα χρήσης μεγάλης ποικιλίας υλικών οδοντικών αποκαταστάσεων χωρίς την απαίτηση υγρού.^{27,47}

Για τις τεχνικές I-3DP ή αλλιώς AM+CST (Εικόνα 4-3^{33,48}) έχουν αναφερθεί τα εξής:

- Στον φωτοπολυμερισμό, υγρές ρητίνες φωτοπολυμερούς υφίστανται χημική αντίδραση κατά την ακτινοβόληση, συνήθως στην περιοχή υπεριώδους (UV) για να γίνουν στερεές. Επί του παρόντος, οι τεχνικές SLA (στερεολιθογραφία), DLP (προβολή ψηφιακού φωτός) και η MJ (εκτόξευση υλικού) είναι οι τρεις μέθοδοι που βασίζονται στον φωτοπολυμερισμό, και οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ρητινών/κεριών σκελετών Μ.Ο. για χύτευση (CST). Πιο συγκεκριμένα:
 - Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης SLA περιλαμβάνει ένα λουτρό από μια φωτοευαίσθητη υγρή ρητίνη μονομερούς, μια πλατφόρμα οικοδόμησης του μοντέλου, και υπεριώδες (UV) φως ή λέιζερ το οποίο χρησιμοποιείται για τον πολυμερισμό-σκλήρυνση και σύνδεση των στρωμάτων υγρής φωτοευαίσθητης ρητίνης στρώμα-στρώμα (50-200 μm) ή επιλεκτικά, σχηματίζοντας τελικά έναν στέρεο σκελετό Μ.Ο. από ρητίνης. Στη συνέχεια, το αντικείμενο αφαιρείται από το λουτρό. Η μεταεπεξεργασία εφαρμόζεται στο τελικό αντικείμενο συμπεριλαμβανομένης της αφαίρεσης των δομών υποστήριξης. Το αντικείμενο μπορεί να πολυμεριστεί περαιτέρω με υπεριώδες φως ή λέιζερ και μπορεί επίσης να υποστεί επιφανειακές επεξεργασίες με συγκολλητικούς παράγοντες, χρώματα ή στεγανωτικά για να αλλάξει την τραχύτητα της επιφάνειας. Η ακρίβεια της τεχνικής SLA είναι ανώτερη από όλες τις



υπόλοιπες τεχνικές 3DP συμπεριλαμβανομένου της SLM/SLS και μπορεί να εκτυπώσει γεωμετρίες με πολύ λεπτές λεπτομέρειες. Η ανάλυση 5 μm στον άξονα X-/Y- και 10 μm στον άξονα Z μπορεί να επιτευχθεί με το SLA. Ωστόσο, η απόδοση και η λειτουργικότητα των τμημάτων SLA επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους, όπως τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ρητινών φωτοπολυμερούς, την ταχύτητα και ανάλυση των οπτικών συστημάτων σάρωσης, το σύστημα επίστρωσης (πάχος στρώσης), τις παραμέτρους υπεριώδους λέιζερ ή φωτός (μήκος κύματος, ισχύς και χρόνος έκθεσης), το μέγεθος κηλίδας του λέιζερ, και την επεξεργασία μετά τον πολυμερισμό. Επίσης, η ακρίβεια εξαρτάται από τη θέση του αντικειμένου στην πλατφόρμα κατασκευής (η ακρίβεια είναι υψηλή στο κέντρο παρά στην περιφέρεια της πλατφόρμας κατασκευής). Ένας περιορισμός είναι ότι η τεχνολογία SLA απαιτεί δομές υποστήριξης για την επεξεργασία αντικειμένων, γεγονός που αυξάνει το χρόνο παραγωγής και καταναλώνει πρόσθετο υλικό. Επιπλέον, το SLA παράγει μαλακά αντικείμενα με περιορισμένη μηχανική αντοχή.^{11,49,50}

- Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης DLP (Digital Light Projection = Προβολή Ψηφιακού Φωτός) είναι παρόμοια με την SLA, αλλά ο σκελετός δημιουργείται ανάποδα, και τα μέρη του χτίζονται σε ρηχό δοχείο ρητίνης με αποτέλεσμα μικρότερη σπατάλη υλικού και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Επίσης αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί με διαφορετική – πιο συμβατική – πηγή φωτός (λέιζερ UV και ορατό φως) όπως μια λυχνία τόξου, με έναν πίνακα επίδειξης υγρών κρυστάλλων ή μια διάταξη παραμορφώσιμου καθρέφτη. Ουσιαστικά αυτή πηγή φωτός προβολέα εφαρμόζεται σε ολόκληρη την επιφάνεια του λουτρού ρητίνης φωτοπολυμερούς σε ένα μόνο πέραςμα, καθιστώντας τη γενικά αρκετά ταχύτερη από το SLA. Η διαδικασία μετά το πολυμερισμό περιλαμβάνει την τοποθέτηση των κατασκευασμένων σκελετών σε διάλυμα διαλύτη για την απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων υγρής ρητίνης, ακολουθούμενη από τελικό πολυμερισμό σε φούρνο UV που πολυμερίζει πλήρως αυτούς τους σκελετούς και τους επιτρέπει να διατηρούν τη δομική τους ακεραιότητα.^{11,27,33,47}
- Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης Jetting (με τους εκτυπωτές PolyJet/ProJet/Multi-jet/InkJet), χρησιμοποιεί πολλαπλές κεφαλές εκτόξευσης-ψεκασμού υγρού φωτοπολυμερούς που εκτοξεύονται πάνω σε υλικό υποστήριξης και στη συνέχεια πολυμερίζεται σκληρύνεται με τη διέλευση υπεριώδους (UV) φωτός καθώς κάθε στρώση εναποτίθεται. Οι σκελετοί Μ.Ο. σε αυτή τη μέθοδο μπορούν να κατασκευαστούν εκτός από οδοντιατρική ρητίνη και με κερία. Ουσιαστικά δηλαδή, μετά τη σάρωση και το σχεδιασμό κάθε



τιμήματος του σκελετού, μια φωτοευαίσθητη ρητίνη θα εκτυπωθεί σε στρώση προς στρώση και θα στερεοποιηθεί υπό υπεριώδες φως. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνει την παραγωγή σκελετών ακριβείας με πολύ ομαλό φινίρισμα με ακρίβεια 29-32 μm . Σε αντίθεση με τις τεχνικές SLA και DLP, δεν απαιτείται επιπλέον επεξεργασία μετά τον πολυμερισμό. Ορισμένοι εκτυπωτές 3D έχουν την ικανότητα να παράγουν με μια εκτύπωση, δηλαδή ένα ενιαίο σκελετό Μ.Ο. από πολλά υλικά που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Οι δομές υποστήριξης λιώνουν σε θερμαινόμενο φούρνο σε ορισμένες διαδικασίες ενώ άλλες απαιτούν προσεκτική αφαίρεση των δομών υποστήριξης με υδροπίδακα ή με το χέρι για να αποφευχθεί η θραύση ή η παραμόρφωση. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να εκτυπώσει αντικείμενα με πολύπλοκη γεωμετρία, καθώς είναι δυνατή η εκτύπωση αντικειμένων με λεπτές λεπτομέρειες σε ανάλυση 16 μικρών. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η ικανότητα χρήσης άλλων υλικών όπως κερί ή γέλης (ζελέ) για τις δομές υποστήριξης, γεγονός που επιτρέπει την ευκολότερη αφαίρεση της από τον σκελετό. Οι τεχνολογίες εκτόξευσης υλικών είναι περιορισμένες στην οδοντιατρική λόγω του υψηλού κόστους τους σε σύγκριση με άλλες λιγότερο δαπανηρές τεχνολογίες 3D εκτύπωσης όπως η SLA.^{11,29,30,33,47}

- Η τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης FDM (Μοντελοποίηση με Εναπόθεση-Εξώθηση Τηγμένου Υλικού-Fusion Deposition Modeling), χρησιμοποιεί μια κεφαλή ακροφυσίου με ελεγχόμενη θερμοκρασία για να εξωθεί ένα νήμα θερμοπλαστικού υλικού σε μια πλατφόρμα οικοδόμησης. Το αντικείμενο 3D είναι κατασκευασμένο από κάτω προς τα πάνω, ένα επίπεδο κάθε φορά. Στη συνέχεια θερμαίνεται σε ημίρρευστη μορφή ελεύθερης ροής. Η κίνηση της κεφαλής του ακροφυσίου κατευθύνεται από έναν επεξεργαστή από το λογισμικό CAM και μπορεί να μετακινηθεί τόσο σε οριζόντιες όσο και σε κάθετες κατευθύνσεις. Η κεφαλή οδηγεί το υλικό στη θέση του με εξαιρετική ακρίβεια. Το θερμοπλαστικό υλικό τήκεται εν μέρει στο ακροφύσιο και κατά την απόθεση στη πλατφόρμα οικοδόμησης στερεοποιείται αμέσως εντός 0,1 δευτερολέπτων. Η διαδικασία εναπόθεσης συνεχίζεται για τα ακόλουθα επίπεδα έως ότου ο τελικός σκελετός διαμορφωθεί πλήρως. Τα στρώματα των εναποτιθέμενων υλικών μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τη χρήση χημικών παραγόντων ή με έλεγχο θερμοκρασίας. Ολόκληρο το σύστημα περιέχεται εντός ενός θαλάμου που διατηρείται σε μια θερμοκρασία λίγο κάτω από το σημείο τήξης του πλαστικού. Οι δομές υποστήριξης εξετάζονται για προεξέχουσες γεωμετρίες οι οποίες αργότερα απομακρύνονται με την κοπή τους έξω από το αντικείμενο. Η μέση ακρίβεια του FDM είναι περίπου $\pm 127 \mu\text{m}$ και είναι χαμηλότερη από εκείνη των υπόλοιπων 3DP μεθόδων. Η ακρίβεια του FDM εξαρτάται από την ταχύτητα



εναπόθεσης, τη ροή του υλικού, το πάχος του ακροφυσίου του υλικού και το μέγεθος κάθε στρώσης. Ένα πλεονέκτημα του FDM είναι ότι δεν απαιτείται μετα-επεξεργασία. Ωστόσο, η χαμηλή ανάλυση, η ταχύτητα και η χαμηλή ποιότητα επιφάνειας, είναι τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής. Το FDM περιορίζεται σε θερμοπλαστικά υλικά όπως κερί για σύνθετα σχήματα και γεωμετρία κατασκευής.^{33,47}

Η άμεση τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης (D-3DP) ή αλλιώς PBF, περιλαμβάνει κυρίως τις τεχνικές SLS και την SLM. Η διαδικασία SLM είναι γνωστή και με άλλες επωνυμίες όπως Direct Metal Laser Sintering (DMLS), LaserCUSING, ή Direct Metal Laser Melting (DMLM) αλλά γενικά η ίδια διαδικασία που περιγράφουν παραμένει ίδια.^{15,41} Κατά άλλους, οι τεχνικές DMLM και SLM βασίζονται στην πλήρη τήξη των κόκκων σκόνης ενώ οι τεχνικές DMLS και SLS αποτελούν μεθόδους μερικής τήξης ιδιαίτερα τήξη στην επιφάνεια του σωματιδίου.¹⁵ Η κύρια διαφορά μεταξύ SLS και DMLS, είναι ότι η σκόνη SLS μπορεί να είναι μέταλλο ή άλλα υλικά (π.χ. κεραμικά ή πολυμερές) και η σκόνη λιώνει μόνο εν μέρει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, ενώ το DMLS χρησιμοποιεί ένα μείγμα μεταλλικών σκονών με διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης (υψηλή ή χαμηλή) και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας DMLS η σκόνη με τη χαμηλή θερμοκρασία τήξης λιώνει πλήρως ενώ η σκόνη με υψηλή θερμοκρασία τήξης λιώνει μερικώς.⁵¹ Επίσης οι ονομασίες DMLS ή SLM αναφέρονται πάντα σε πυροσυσσωμάτωση για μεταλλικά υλικά. Στην τεχνική PBF, διαδοχικά στρώματα συμπιεσμένης σκόνης πυροσυσσωματώνονται σε ένα 3D μοντέλο από ένα λέιζερ που κατευθύνεται από έναν H/Y. Ένα ρολό διανέμει το κονιοποιημένο υλικό πάνω από την επιφάνεια ενός κυλίνδρου κατασκευής. Ο κύλινδρος κατασκευής είναι στην ουσία ένα έμβολο με κινούμενη βάση. Η πλατφόρμα κατασκευής στην οποία απλώνεται η σκόνη είναι θερμαινόμενη (80-200 °C) για την αποφυγή της στρέβλωσης. Η σκόνη απλώνεται στρώμα με στρώμα πάνω από το στρώμα που προηγούμενα είχε σκληρύνει και πυροσυσσωματώνεται επανειλημμένα. Για να κρατήσει το νέο φρέσκο στρώμα σκόνης, η πλατφόρμα υποστήριξης (κινούμενη βάση του κυλίνδρου κατασκευής) χαμηλώνει (κατεβάζει) το αντικείμενο τόσο όσο είναι το πάχος μίας διαστρωμάτωσης του υλικού. Η επιφάνεια αυτής της έντονα συμπιεσμένης σκόνης στη συνέχεια εκτίθεται σε μία δέσμη λέιζερ. Εάν η δέσμη είναι συγχρονισμένη να λειώνει τους κόκκους του υλικού επιφανειακά τότε πρόκειται για τη μέθοδο SLS ενώ εάν προκαλεί την πλήρη τήξη των κόκκων τότε πρόκειται για τη μέθοδο SLM. Η διαδικασία είναι αυτοσυντηρούμενη και όλα τα μέρη μπορούν να συνδεθούν στρώμα με στρώμα. Η προσθήκη και συγκόλληση του νέου στρώματος επί του ήδη κατασκευασμένου επιτυγχάνεται με την ενέργεια που προσφέρει, κατευθυνόμενη ακτίνα λέιζερ, μετά από εντολή του σχεδιαστικού προγράμματος του υπολογιστή. Ουσιαστικά δηλαδή



κατευθυνόμενη (λόγω ανακλαστήρα) δέσμη λέιζερ συντήκει ή λιώνει τη σκόνη σε μια συγκεκριμένη περιοχή που καθορίζεται από το λογισμικό CAD, ενώ τα υπόλοιπα σωματίδια σκόνης παραμένουν μη συντηγμένα. Κάθε νέο προστιθέμενο στρώμα έχει πάχος από 20 μm έως 100 μm ή κατά άλλους έως 150 μm και μέγεθος σωματιδίων 20-45 μm .^{2,11,27,37,41}

Η ακρίβεια του SLM είναι $\pm 20\mu\text{m}$ και θεωρείται εξαιρετικά υψηλή, ενώ το ελάχιστο μέγεθος χαρακτηριστικού που μπορεί να εκτυπωθεί είναι 75-100 μm . Ωστόσο, η ακρίβεια εξαρτάται από τις παραμέτρους επεξεργασίας, την κατεύθυνση κατασκευής και τη γεωμετρία των αντικειμένων.¹¹ Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας κατάλληλος συνδυασμός παραμέτρων επεξεργασίας είναι απαραίτητος για την μια επιτυχημένη κατασκευή με αυτήν την τεχνολογία καθώς αυτές οι παράμετροι μπορούν να αλλάξουν τις ιδιότητες του τελικού αντικειμένου (π.χ. ακρίβεια, πυκνότητα, επιφάνεια τραχύτητα, σκληρότητα και αντοχή).^{33,47} Περισσότερες πληροφορίες για τις παραμέτρους υπάρχουν στο ειδικό μέρος.

Στον Πίνακα 4-1 συνοψίζονται οι διαφορές των τεχνικών AM.³³ Γενικώς, πάντως στη μέθοδο AM+CST, για την κατασκευή χυτών υψηλής ποιότητας, πρέπει να τηρούνται ορισμένα βήματα. Σχετικά με το πρώτο μέρος, δηλαδή τις διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης: πρέπει να επιλεγεί ο εκτυπωτής, διασφαλίζοντας την δημιουργία ενός προπλάσματος χύτευσης με υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και εφαρμογής και ικανοποιητική τραχύτητα επιφάνειας. Δεδομένου ότι κάθε εκτυπωτής λειτουργεί με τα συγκεκριμένα υλικά του, πρέπει να χρησιμοποιείται το κατάλληλο υλικό, το οποίο πληροί τις απαιτήσεις για την κατασκευή των προτύπων χύτευσης. Πρέπει να επιλεγεί το βέλτιστο τεχνολογικό καθεστώς, συμπεριλαμβανομένου του πάχους της στρώσης. Πρέπει να αναπτυχθεί η στρατηγική εκτύπωσης - θέσεις και αριθμός των αντικειμένων. Προκαταρκτικές δοκιμές, βαθμονόμηση (καλιμπράρισμα) στους τρεις άξονες X, Y και Z του εκτυπωτή και αντιστάθμιση (compensation) (εάν χρειάζεται), πρέπει να γίνουν για να διασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια διαστάσεων. Τρισδιάστατη εκτύπωση, μετα-επεξεργασία (σε ορισμένες διαδικασίες) και τελική επεξεργασία επιφάνειας για ενίσχυση της ομαλότητας. Στο δεύτερο μέρος, δηλαδή για τις διαδικασίες χύτευσης είναι απαραίτητη: η επιλογή του πυροχώματος που είναι συμβατό με το υλικό του τρισδιάστατου τυπωμένου μοτίβου χύτευσης. Η θέρμανση του πυροχωμάτινου καλουπιού, με καθεστώς θερμοκρασίας συμβατό με το υλικό του τρισδιάστατου τυπωμένου προπλάσματος και του κράματος Co-Cr. Η χύτευση με το δεδομένο κράμα Co-Cr, τηρώντας τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.⁵²

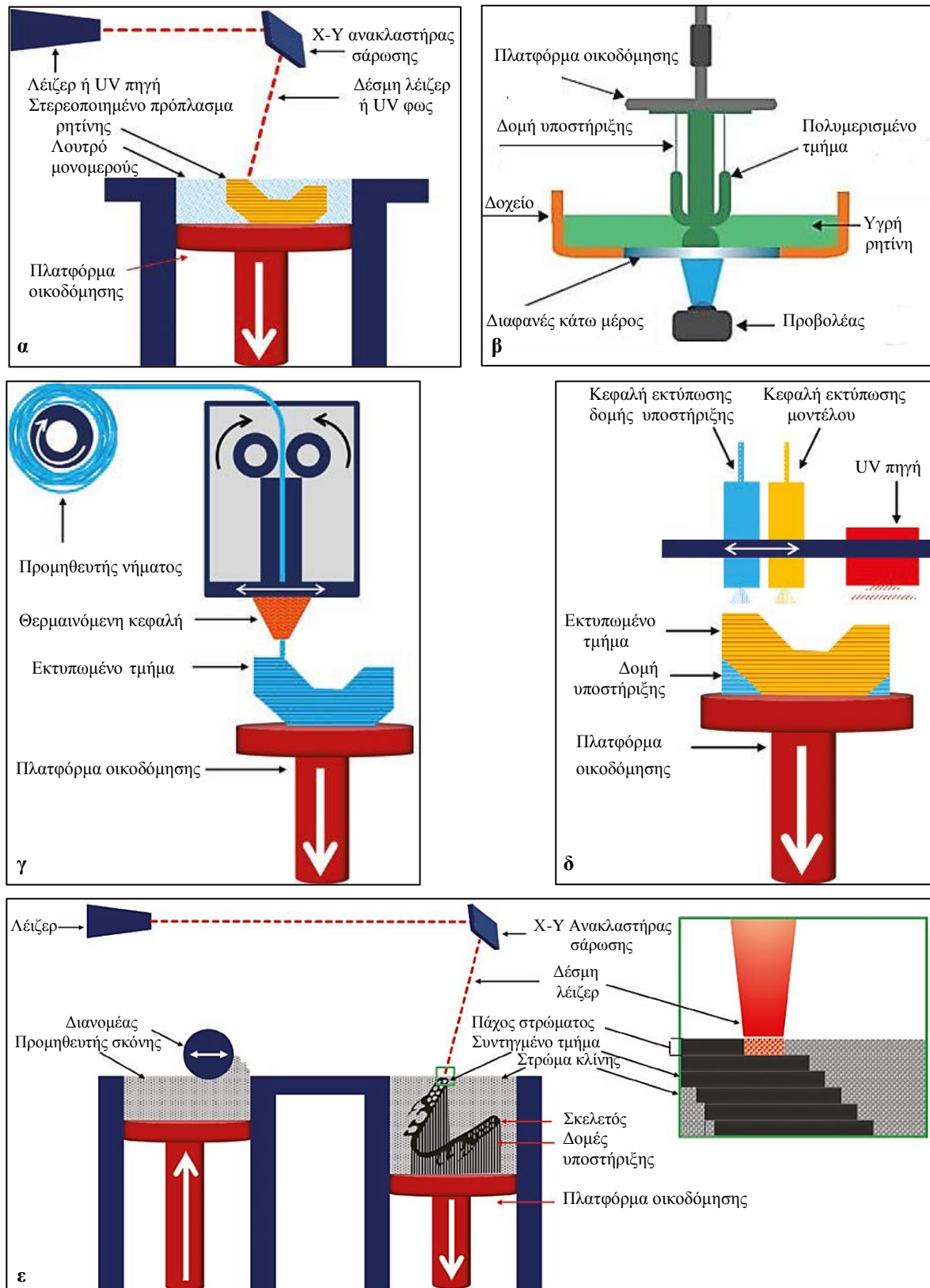
Το γεγονός ότι ένα από τα κυριότερα προβλήματα του SLM είναι η τραχύτητα της επιφάνειας που δημιουργεί με αποτέλεσμα να απαιτείται μετα-επεξεργασία με την κατασκευή, οδήγησε στην δημιουργία μιας σχετικά νέας μεθόδου κατασκευής την γνωστή ως



«υβριδική κατασκευή» ή «υβριδική επεξεργασία» (hybrid manufacturing or hybrid processing of repeated laser sintering and high-speed milling) η οποία ουσιαστικά αποτελεί ένα συνδυασμό SLM με MIL τα οποία πραγματοποιούνται ταυτόχρονα (HM ή SLM+MIL) προκειμένου να επιτευχθεί μια ομαλή επιφάνεια χωρίς να απαιτείται μετά από αυτή μετα-επεξεργασία. Στην ουσία υπάρχει μια πλατφόρμα μιας ενιαίας μηχανής η οποία ενσωματώνει την επαναλαμβανόμενη πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ και την υψηλής ταχύτητα κοπή (15.000/min) και στην οποία οι διαδικασίες κατασκευής έχουν ως εξής: α) συμπίεση-πολυστρωμάτωση μεταλλικής σκόνης πάχους 0,05 mm (ουσιαστικά είναι το τυπικό μέγεθος σωματιδίων που χρησιμοποιείται στο SLM) στην πλατφόρμα κατασκευής, β) σύντηξη της μεταλλικής σκόνης και συμπίεση και προμήθευση μεταλλικής σκόνης πάχους 0,05 mm για τον σχηματισμό του επόμενου στρώματος και πυροσυσσωμάτωση όλων των στρωμάτων. Τα βήματα 1 και 2 επαναλαμβάνονται 10 φορές έως ότου το πάχος φτάσει τα 0,5 mm όπου τότε πραγματοποιείται το στάδιο (3) δηλαδή η κοπή υψηλών ταχυτήτων των περιγραμμάτων. Η SLM και MIL επαναλαμβάνονται για την κατασκευή των στρωμάτων από κάτω προς τα πάνω και έτσι αυτό το μηχάνημα μπορεί να δημιουργήσει πολυστρωματικά στρώματα με πυροσυσσωμάτωση από λέιζερ και συνεχώς να τα κόβει σε υψηλή ταχύτητα, καθιστώντας δυνατή τόσο την υψηλή ακρίβεια όσο και τις λείες επιφάνειες χωρίς μετα-επεξεργασία. Η μέθοδος αυτή υποστηρίζεται ότι μπορεί να επιτύχει ομαλότερη επιφάνεια σε σχέση με την SLM, καλή ακρίβεια, και γενικά ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της αφαιρετικής και της προσθετικής μεθόδου κατασκευής. Ωστόσο, προς το παρόν οι βιβλιογραφικές αναφορές για αυτή τη μέθοδο είναι περιορισμένες (μονάχα δύο) και γενικώς η κατασκευή των σκελετών Μ.Ο. με αυτή τη μέθοδο έχει αμφισβητηθεί.³⁵

Η τεχνική της γαλβανοπλαστικής (galvanofforming), έχει δοκιμαστεί για τη κατασκευή διπλών στεφανών, επιτυγχάνοντας τη δημιουργία μεγάλης ακρίβειας, ανθεκτικότητας και με αντοχή στη θραύση. Μεταξύ της δευτερεύουσας και της πρωτεύουσας στεφάνης, υπάρχει πάντα ένα κενό (8-12 μm). Αυτός ο χώρος είναι γεμάτος με σάλιο, υπάρχει μια δύναμη συγκόλλησης μέσα (5-10 N) και η τριβή επιδρά θετικά. Οι γαλβανισμένες τηλεσκοπικές στεφάνες έχουν επίσης μια ομοιογενή δομή κατασκευασμένη από χρυσά κατιόντα που είναι σφιχτά διατεταγμένα.³⁶





Εικόνα 4-3 Απεικόνιση της διαδικασίας SLA (α), DLP (β), FDM (γ), Polyjet/Multijet (δ) και SLM (ε).^{33,48}



Πίνακας 4-1 Σύγκριση των συστημάτων 3DP.³³

3DP	Υλικά		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
	Μορφή	Τύπος		
SLA	Υγρή	Πολυμερή	Υψηλότερη ακρίβεια, ομαλή επιφάνεια, υψηλή πυκνότητα, υλικά «χαμηλού» κόστους	Υψηλό κόστος τεχνολογίας, μειωμένη αντοχή, απαιτεί δομές υποστήριξης, και απαιτεί μετά-επεξεργασία
DLP	Υγρή	Παρόμοια με το SLA	Μικρότερη σπατάλη υλικού, χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, ταχύτερο από το SLA	Υψηλό κόστος τεχνολογίας, μειωμένη αντοχή, απαιτεί δομές υποστήριξης, και απαιτεί μετά-επεξεργασία
Polyjet/ Multijet	Σκόνη	Κεριά, ρητίνες	Υψηλή ακρίβεια (29-32 μm), πολύ ομαλή επιφάνεια, ποικιλία υλικών και χρωμάτων, δεν απαιτεί μετά-επεξεργασία, τεχνολογία «μεσαίου» κόστους	Υψηλό κόστος υλικών, απαιτεί δομές υποστήριξης οι οποίες όμως λιώνουν στο φούρνο και σε ορισμένες περιπτώσεις αφαιρούνται με υδροπίδακα ή με το χέρι.
PBF (SLS/SLM)	Σκόνη	Co-Cr, πολυμερή	Υψηλή ακρίβεια ($\pm 20\mu\text{m}$), καλή αντοχή, υψηλή παραγωγικότητα, υλικά «χαμηλού» κόστους	Τεχνολογία υψηλού κόστους, τραχιές επιφάνειες, απαιτεί δομές υποστήριξης και μετά-επεξεργασία
FDM	Νήμα	Πολυμερή, κεριά	Χαμηλό κόστος, καλή αντοχή, και ποικιλία υλικών και χρωμάτων, δεν απαιτεί μετά-επεξεργασία	Χαμηλή ακρίβεια (± 127), και πυκνότητα, τραχιές επιφάνειες, και περιορίζεται σε θερμοπλαστικά υλικά, απαιτεί δομές υποστήριξης

4.2 Μεταεπεξεργασία και τελική επεξεργασία

4.2.1 Θερμικές κατεργασίες

Κάθε κράμα το οποίο έχει υποβληθεί σε μια ψυχρή κατεργασία, παρουσιάζει μόνιμες εσωτερικές τάσεις και έχει χάσει ένα μέρος της ελαστικότητας και της ελατότητας του. Τα κράματα αυτά μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, με θερμική κατεργασία τους, γνωστή ως «ανακρυστάλλωση ή ανόπτηση» του κράματος. Η ανακρυστάλλωση γίνεται με την υποβολή του κράματος σε μια ορισμένη θερμοκρασία, που καλείται θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης ή ανόπτησης του κράματος, και επιτυγχάνει την δημιουργία υπερλεπτόκοκκης δομής και εξάλειψης εσωτερικών τάσεων. Κατά την θερμική κατεργασία του κράματος, τα μετατοπισμένα και συνωστισμένα άτομα μετακινούνται σε νέες θέσεις και διαχέονται, σχηματίζοντας νέους κρυστάλλους ενώ συγχρόνως χαλαρώνουν οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύχθηκαν κατά την «ψυχρή» κατεργασία του κράματος. Κατά την θερμική κατεργασία ενός κράματος, το ύψος της θερμοκρασίας στην οποία υποβάλλεται αυτό και ο χρόνος παραμονής του στην θερμοκρασία αυτή (χρόνος ανόπτησης), έχουν μεγάλη σημασία και δίδονται στις προδιαγραφές των εμπορικών οίκων κατασκευής κάθε σκευάσματος. Αν το



κράμα υποβληθεί σε θερμοκρασία υψηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης ή αν θερμανθεί μεν στην θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας του (ήτοι την κανονική) πλην όμως για μακρύτερο χρονικό διάστημα τότε, τα άτομα του θα έρθουν σε στενότερη επαφή μεταξύ τους και θα σχηματίσουν μεγαλύτερους κόκκους (χονδρόκοκκος δομή) με αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές, μια σημαντική μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος.⁴ Ουσιαστικά με την εν ψυχρώ πλαστική παραμόρφωση ή ενδοτράχυνση, προκαλείται η παραμόρφωση των κόκκων, η δημιουργία ατελειών κρυσταλλικής δομής, η αύξηση εσωτερικών τάσεων και η μείωση αντοχής υπό προϋποθέσεις (δηλαδή αύξηση μεν της σκληρότητας και της αντοχής στην θραύση με διεύθυνση κάθετα στους παραμορφωμένους κόκκους αλλά μείωση αντοχής προς άλλες διευθύνσεις, διάβρωση, ψαθυρότητα κ.α.). Οι μέθοδοι για αποκατάσταση σε προηγούμενο επίπεδο είναι η ανόπτηση για ανακρυστάλλωση και η ανόπτηση για αποκατάσταση, που αποτελούν και τις κυριότερες θερμικές κατεργασίες.⁵³ Πιο αναλυτικά στοιχεία για τις δύο αυτές θερμικές κατεργασίες όπως και για άλλες που έχουν δοκιμαστεί για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. αναφέρονται παρακάτω:

- Ανόπτηση για ανακρυστάλλωση. Στην ουσία μετά από αυτή, το παραμορφωμένο κράμα διατηρεί μεν το σχήμα του αλλά παρουσιάζει τελείως διαφορετική κρυσταλλική δομή που μοιάζει με αυτή προ παραμόρφωσης με ομαλούς κόκκους. Πιο αναλυτικά, αν το ενδοτραχυμένο μέταλλο θερμανθεί στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης για ορισμένο χρόνο, θα εμφανιστούν στα όρια των παραμορφωμένων κόκκων νέοι-μικροσκοπικοί-κρύσταλλοι (φύτρα). Τα φύτρα αυτά με την πάροδο του χρόνου εξελίσσονται σε μικρούς κρυσταλλίτες οι οποίοι σιγά σιγά μεγαλώνουν για να φτάσουν στο τέλος στο μέγεθος ενός νέου κρύσταλλου με νέα όρια. Το σύνολο των νέων κρυστάλλων είναι ανεξάρτητο από τους παλιούς, παραμορφωμένους από την ενδοτράχυνση, κρυστάλλους του κράματος. Η δημιουργία φύτρων στα όρια των παραμορφωμένων κόκκων καθώς και η ανάπτυξή τους οφείλεται στο ότι οι παραμορφωμένοι κρύσταλλοι έχουν αποθηκευμένη περισσότερη μηχανική ενέργεια (εσωτερικές μικροτάσεις) από τους μη παραμορφωμένους μικροσκοπικούς ή υπομικροσκοπικούς κρυστάλλους οι οποίοι βρίσκονται στα όρια των κόκκων μεταξύ γειτονικών κρυστάλλων. Οι κρυσταλλίτες αυτοί αυξάνονται «απορροφώντας» τους μεγάλους μέχρι να αποκτήσουν όλοι οι κόκκοι την ίδια ενέργεια. Το γεγονός ότι η ανακρυστάλλωση δεν εμφανίζεται σε μέταλλα τα οποία δεν έχουν προηγουμένως υποστεί παραμόρφωση επιβεβαιώνει την παραπάνω άποψη. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η ανακρυστάλλωση καθώς και το μέγεθος των κόκκων ενός ενδοτραχυνθέντος κράματος είναι ανάλογο με την ένταση της πλαστικής παραμόρφωσης που έχει προηγηθεί. Όσο πιο έντονη παραμόρφωση έχει δημιουργηθεί τόσο πιο λεπτόκοκκο κράμα



δημιουργείται με τη συγκεκριμένη κατεργασία. Αν δηλαδή είναι επιθυμητό να παραχθεί ένα κράμα με πολύ λεπτούς κόκκους τότε θα πρέπει να παραμορφωθεί προηγουμένως έντονα, οπότε μετά την ανόπτηση αυτό θα αποκτήσει μικρόκοκκη μικρογραφική μορφή η οποία θα είναι ανεξάρτητη από τη μορφή που είχαν οι κόκκοι του κράματος πριν και μετά την ενδοτράχυνση του. Άρα θεωρητικά συμφέρει η έντονη παραμόρφωση. Αυτό όμως δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε σώματα με πολύπλοκα σχήματα όπως μια Μ.Ο. Στην περίπτωση της Μ.Ο η επιλογή είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και απότομη ψύξη. Οι νέοι κρύσταλλοι δεν είναι μακρόστενοι, αλλά κυταροειδείς και με σχεδόν ίσες διαστάσεις, χωρίς να αλλάξει η δομή τους, ενώ παράλληλα έχουν απαλλαγεί από τις εσωτερικές μικροτάσεις. Έτσι το μέταλλο έχει αποκτήσει καλύτερες ιδιότητες χωρίς τα μειονεκτήματα της ενδοτράχυνσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά, χωρίς να υπάρχει ο φόβος να σπάσει εύκολα. Στην περίπτωση που δημιουργηθεί χονδρόκοκη δομή είναι μη αντιστρεπτό.⁵³

- Ανόπτηση για αποκατάσταση. Έχει τα ίδια αποτελέσματα με την ανόπτηση για ανακρυστάλλωση όμως γίνεται σε μικρότερη θερμοκρασία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Πιο αναλυτικά, αν το ενδοτραχυμένο μέταλλο θερμανθεί στη θερμοκρασία αποκατάστασης τότε θα αυξηθεί η κινητικότητα των ατόμων του, και τα ενεργοποιημένα αυτά άτομα διαχέονται εύκολα μέσα στη μάζα του κράματος για να λάβουν θέσεις χαμηλότερης ενέργειας, ήγουν τα άτομα αλλάζουν θέσεις κοντά στα όρια των κρυστάλλων και καταλαμβάνουν θέσεις χαμηλότερης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό εξαφανίζονται οι εσωτερικές τάσεις και το μέταλλο «αποκαθίσταται» αποκτώντας ξανά την πλαστικότητα και την αρχική του σκληρότητα. Την ίδια σχεδόν στιγμή τα όρια των κόκκων μετακινούνται και με το χρόνο οι κόκκοι μεγαλώνουν. Ωστόσο, αν το κράμα μείνει για μεγάλο χρονικό διάστημα στη θερμοκρασία αποκατάστασης, οι κόκκοι μεγαλώνουν περισσότερο όσο επιτρέπει η θερμοκρασία και τότε το κράμα έχει «υπεραποκατασταθεί», δηλαδή έχει αποκτήσει τη μεγαλύτερη δυνατή πλαστικότητά του (γίνεται περισσότερο πλαστικό και λιγότερο σκληρό). Η υπεραποκατάσταση ενός κράματος δεν είναι πάντα επιθυμητή γιατί συνήθως δημιουργούνται μεγάλοι κόκκοι. Έτσι όταν είναι επιθυμητό το κράμα να έχει μικρή πλαστικότητα αλλά μεγάλη σκληρότητα και αντοχή για να αποφευχθεί η υπεραποκατάσταση, για ασφάλεια θα πρέπει το ενδοτραχυθέν κράμα να κρυσταλλωθεί σε μικρότερη θερμοκρασία από αυτή της αποκατάστασης για περισσότερο χρόνο. Με την κατεργασία αυτή η οποία ονομάζεται αποτατική ανόπτηση (recovery) απαλλάσσεται το κράμα από τις εσωτερικές τάσεις, αλλά παράλληλα διατηρεί τις καλές ιδιότητες που απέκτησε με την ενδοτράχυνση.⁵³



- Ανόπτηση για ομογενοποίηση. Για την αποφυγή της εμφάνισης μικροδιαφορισμού (χημική ανομοιογένεια) θα πρέπει το κράμα να κρυώσει πολύ αργά. Όμως η αργή ψύξη δίνει κράμα με χονδρούς κόκκους το οποίο είναι λιγότερο ανθεκτικό από τα λεπτόκοκκα κράματα. Έτσι, κατά τη χύτευση και προκειμένου να ληφθεί ένα λεπτόκοκκο κράμα, το χυτό ψύχεται απότομα μετά από μια σύντομη παραμονή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, και έτσι λαμβάνεται προϊόν λεπτόκοκκο μεν αλλά με έντονο μικροδιαφορισμό γεγονός που επηρεάζει τις ιδιότητες του κράματος. Για τη λήψη λοιπόν κράματος λεπτόκοκκού χωρίς μικροδιαφορισμό, μετά την ταχεία ψύξη του μπορεί να υποβληθεί σε ανόπτηση για ομογενοποίηση με θέρμανση του κάτω από τη θερμοκρασία τήξης (άρα υψηλή θερμοκρασία) για σύντομο χρονικό διάστημα. Έτσι δίνεται το περιθώριο στα στοιχεία του κράματος να διαχυθούν και να δημιουργηθεί περισσότερο ομοιογενές κράμα (ομοιογενείς κρύσταλλοι) χωρίς να αλλάξει το μέγεθος των κόκκων (με την προϋπόθεση της ανάλογης ψύξης, λεπτομέρειες που δίνονται από τους κατασκευαστές των σκευασμάτων).⁵³
- Σκλήρυνση εκ κατακρημνίσεως δια γήρανσης. Η κατεργασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε κράματα στα οποία με την ελάττωση της θερμοκρασίας τους εμφανίζεται και ελάττωση του βαθμού διαλυτότητας του ενός στοιχείου στο άλλο. Πιο αναλυτικά, σε ορισμένα κράματα (και κυρίως σε ορισμένα διμερή) δημιουργείται σε υψηλές θερμοκρασίες κάτω από τη γραμμή Solidus μια φάση δηλαδή μονοφασικό στερεό διάλυμα, το οποίο όμως στη θερμοκρασία του δωματίου-περιβάλλοντος μεταπίπτει σε διφασικό. Έτσι αν έχει εφαρμοστεί αργή ψύξη, οι 2 φάσεις ήτοι α και β, βρίσκονται σε ισορροπία, καθώς η διάχυση των ατόμων είναι πλήρης. Αντίθετα, αν έχει εφαρμοστεί ταχεία ψύξη τα άτομα της φάσης β δεν έχουν χρόνο να διαχυθούν ώστε να σχηματιστεί η φάση αυτή με αποτέλεσμα να υπάρχουν στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος άτομα της β-φάσης διαλυμένα μέσα στην α δηλαδή τότε η φάση α είναι υπερκορεσμένη σε άτομα της β στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, και έτσι το κράμα βρίσκεται σε μετασταθή (ασταθή) ισορροπία η οποία δεν μεταβάλλεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αν τώρα θερμανθεί το κράμα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από εκείνη του περιβάλλοντος, τότε αυξανόμενης της θερμοκρασίας θα αυξηθεί η κινητικότητα των ατόμων, τα οποία ξεπερνώντας το φράγμα της ενέργειας ενεργοποίησης κινούνται σε θέσεις τέτοιες, ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία μεταξύ των φάσεων α και β. Αν το κράμα μείνει για ορισμένο χρόνο στη θερμοκρασία αυτή και μετά ψυχθεί στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τότε αυτό θα έχει μεγαλύτερη σκληρότητα, και αυτό οφείλεται στο ότι κατά την παραμονή του κράματος στη θερμοκρασία αυτή η φάση-β κατακρημνίζεται με τη μορφή



υπομικροσκοπικών κρυσταλλιτών μέσα στη φάση-α. Αν ο χρόνος θέρμανσης είναι μεγάλος (υπεργήρανση), το κράμα οδηγείται σε κατάσταση ισορροπίας με μεγάλους κρυσταλλίτες της β-φάσης με τα αντίθετα αποτελέσματα. Πολλές φορές για την ανόπτηση αυτή αρκεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η βαθύτερη αιτία της σκλήρυνσης του κράματος δεν είναι μόνο η κατακρήμνιση της φάσης-β αλλά το γεγονός ότι οι υπομικροσκοπικοί κρυσταλλίτες της παρουσιάζουν τεράστια διασπορά εμποδίζοντας έτσι τη διακίνηση των διαταραχών της φάσης-α. Όταν οι κρυσταλλίτες της β-φάσης είναι μεγάλοι δεν παρατηρείται σκλήρυνση, γιατί μεταξύ τους υπάρχουν μεγάλα κενά. Εκτός από την αυξημένη σκληρότητα η εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της κατεργασίας αυτής, εμφανίζονται, όπως είναι φυσικό και ελάττωση της πλαστικότητας.⁵³

- Διαλυτοποίηση ή κατεργασία διάλυσης. Η κατεργασία αυτή έγκειται στη θέρμανση και παραμονή ενός κράματος σε κατάλληλη θερμοκρασία για αρκετό χρονικό διάστημα, στο οποίο ένα ή περισσότερα στοιχεία μπορούν να εισέλθουν (διάλυση) σε ένα στερεό διάλυμα, και στη συνέχεια ταχεία ψύξη ώστε να συγκρατηθούν αυτά τα συστατικά στο διάλυμα και να τα εμποδίσουν να καθιζάνουν.⁵³

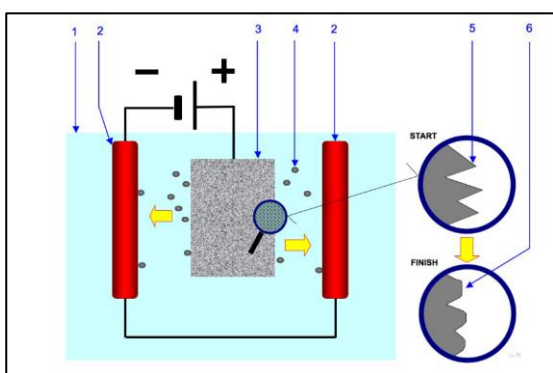
Στο ειδικό μέρος αναλύονται διάφορες κατεργασίες που έχουν δοκιμαστεί και τα αποτελέσματα που έχουν επιφέρει.

4.2.2 Τελική επεξεργασία

Από τα στάδια της τελικής επεξεργασίας αυτά που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η μηχανική λείανση, η ηλεκτροστίλβωση, και η τελική στίλβωση. Η μηχανική λείανση του σκελετού μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας δίσκους κοπής, τροχόλιθους, διαμάντια και φρέζες. Έπειτα, γίνεται στίλβωση του σκελετού της Μ.Ο., η οποία για να έχει επιτύχει πρέπει να έχει γίνει τέλεια λείανση του, και που περιλαμβάνει την ηλεκτροστίλβωση (ή αλλιώς ηλεκτρολυτική στίλβωση ή αρχική στίλβωση) και έπειτα τη τελική στίλβωση του.⁵⁴ Η ηλεκτροστίλβωση (Εικόνα 4-4) είναι μια επιφανειακή μέθοδος φινιρίσματος που χρησιμοποιεί την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, για την αφαίρεση υλικού από μια μεταλλική επιφάνεια με ανοδική διάλυση, για τον καθαρισμό και λείανση αδρών μεταλλικών επιφανειών ισοπεδώνοντας μικρο-κορυφές και κοιλάδες. Στον μηχανισμό ηλεκτρολύσεως, το υπόστρωμα-σκελετός (Co-Cr στο οποίο απαιτείται η ηλεκτρολυτική στιβάδα) που αποτελεί την άνοδο, συνδέεται με την κάθοδο (γενικά από ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό ή μόλυβδο) μέσω ενός διαλύματος ηλεκτρολύτη (πυκνό οξύ με υψηλό ιξώδες όπως θειικό οξύ, φωσφορικό οξύ, αιθυλενογλυκόλη, υδροχλωρικό οξύ και άλλες ουσίες) ελεγχόμενης θερμοκρασίας στο οποίο βυθίζεται. Η άνοδος συνδέεται με το θετικό και η κάθοδος με το



αρνητικό άκρο της τροφοδοσίας. Έτσι, όταν η σύνθεση του ηλεκτρολύτη είναι η κατάλληλη και η εκλογή της τάσης και της έντασης η ενδεδειγμένη, το ρεύμα διέρχεται από την άνοδο και στις κορυφές τραχύτητας, η ένταση ρεύματος είναι υψηλότερη, γεγονός που προκαλεί τη διάλυση του μετάλλου, και τα μεταλλικά ιόντα που απελευθερώνονται στο ηλεκτρολυτικό λουτρό φθάνουν στην κάθοδο και λαμβάνει χώρα η αντίδραση αναγωγής. Με αυτή λοιπόν τη μέθοδο, τα προϊόντα της ηλεκτρόλυσης εναποτίθενται στις κοιλάνσεις της αδρής μεταλλικής επιφάνειας, εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο την επιπλέον προσβολή αυτών των περιοχών και την ίδια ώρα οι προεξοχές της μεταλλικής επιφάνειας συνεχίζουν να προσβάλλονται και με τον ίδιο τρόπο αυτό το περίγραμμα της μεταλλικής επιφάνειας ομαλοποιείται, μειώνοντας τελικά την τραχύτητα της επιφάνειας του υποστρώματος, και έτσι μετά την ηλεκτροστίλβωση ο σκελετός αποκτά στιλπνή επιφάνεια.⁵⁵ Ακολουθεί όπως προαναφέρθηκε η τελική στίλβωση του όπου ξεκινά με ένα δίσκο ή έναν κύλινδρο από σκληρό ελαστικό του οποίου έχουν αμβλυνθεί οι γωνίες με ελαφρά προστριβή του στον ειδικό για το σκοπό αυτό λίθο και συνεχίζεται με διαφόρων ειδών βούρτσες με φυράματα και σαπούνια.⁴



Εικόνα 4-4 Διαδικασία ηλεκτροστίλβωσης: 1-ηλεκτρολύτης, 2-κάθοδος, 3-άνοδος – υπόστρωμα (σκελετός) προς στίλβωση, 4-σωματίδιο που κινείται από την άνοδο στην κάθοδο, 5-επιφάνεια πριν τη στίλβωση, 6-επιφάνεια μετά τη στίλβωση.⁵⁴

Η τέλεια λείανση και στίλβωση του σκελετού είναι πολύ σημαντική διότι: εμποδίζει την οξείδωση της εξωτερικής επιφάνειας του σκελετού μετά την τοποθέτηση του στην στοματική κοιλότητα του ασθενούς, επειδή η επιφάνεια του μετάλλου δεν είναι αδρή και έτσι δεν κατακρατούνται οδοντική μικροβιακή πλάκα, τρυγία και τροφές οι οποίες με την διάσπαση τους προκαλούν την οξείδωση του μετάλλου. Επιτρέπει στη γλώσσα και τους ιστούς απρόσκοπτη λειτουργία. Ο σκελετός είναι πιο ανθεκτικός στις καταπονήσεις και στη διάβρωση από τα στοματικά υγρά. Διευκολύνει την στοματική υγιεινή. Ο σκελετός διατηρεί την στίλβωση του γενικά και παραμένει στην κατάσταση αυτή, με την συνήθη καθημερινή φροντίδα του ασθενή.^{4,56,57} Επομένως, και σύμφωνα με στοιχεία που θα αναφερθούν στο ειδικό μέρος, η τελική επεξεργασία είναι απαραίτητη εκτός από την δημιουργία ομαλής και



λαμπερής επιφάνειας, και για τη διατήρηση ή την αναβάθμιση των μεταλλικών ιδιοτήτων των σκελετών.⁴

4.3 Υλικά κατασκευής σκελετού Μ.Ο.

Παλαιότερα οι βάσεις των Μ.Ο. κατασκευάζονταν από ακρυλική ρητίνη, με συρμάτινα ή χυτά άγκιστρα. Σήμερα η τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιείται και εφαρμόζεται μόνο για λόγους οικονομικούς και σε περιορισμένη έκταση. Ο σκελετός Μ.Ο. μπορεί να κατασκευαστεί είτε εξολοκλήρου ή τμήματα αυτού από μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά. Παρακάτω παρουσιάζονται τα ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά αυτών.³⁷

4.3.1 Μεταλλικά υλικά

Προτού αναφερθούν τα μεταλλικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη κατασκευή σκελετού Μ.Ο. κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένα γενικότερα στοιχεία.

Σήμερα, για τη κατασκευή του σκελετού χρησιμοποιούνται κυρίως διάφορα κράματα δεδομένου ότι από μόνο του ένα μεταλλικό στοιχείο σπάνια πληροί όλες τις μηχανικές και χημικές ιδιότητες που είναι θεμιτό να έχει το τελικό προϊόν. Με την κραματοποίηση μεταβάλλονται οι ιδιότητες των καθαρών μετάλλων και σχηματίζεται ένα προϊόν με νέες φυσικοχημικές ιδιότητες οι οποίες εξαρτώνται από την σύνθεση του κράματος και δεν αποτελούν τον μέσο όρο των μετάλλων που το αποτελούν αλλά είναι εντελώς διαφορετικές. Κράμα λοιπόν ονομάζεται ένα σώμα με μεταλλικές ιδιότητες, που αποτελείται από δύο ή περισσότερα συστατικά, από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Μεταλλικές ιδιότητες ονομάζονται οι ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα μέταλλα, οι βασικότερες από τις οποίες και οι οποίες χαρακτηρίζουν σχεδόν όλα τα μέταλλα είναι ότι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος βρίσκονται σε στέρεα κατάσταση με εξαίρεση τον υδράργυρο. Σε στέρεα κατάσταση διαθέτουν μεταλλική λάμψη και εμφανίζουν χαρακτηριστική κρυσταλλική δομή. Διαθέτουν μεγάλο ειδικό βάρος. Είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και του ηλεκτρισμού. Με τα οξέα σχηματίζουν άλατα και με το νερό υδροξείδιο ή οξείδια. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, η αγωγιμότητα τους ελαττώνεται. Έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή και πλαστικότητα και απαιτείται μεγάλη μηχανική ενέργεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να σπάσουν ή να στρεβλωθούν. Πλήρης και σαφής ορισμός του μετάλλου δεν υπάρχει και συνήθως αποδίδεται με βάση το σύνολο των ιδιοτήτων του όταν βρίσκεται σε στερεή κατάσταση. Τα κράματα που διαθέτουν υδράργυρο ονομάζονται αμαλγάματα. Ως κύριο στοιχείο ενός κράματος επιλέγεται εκείνο που διαθέτει τις καλύτερες ιδιότητες για το σκοπό που θα χρησιμοποιηθεί.³⁷



Η παλαιότερη ταξινόμηση των οδοντιατρικών κραμάτων έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές Νο 5 του 1965 της A.D.A. (American Dental Association). Τα κράματα αυτά ονομάστηκαν χρυσοκράματα λόγω του ότι περιλάμβαναν πολύτιμα μέταλλα σε ποσοστό άνω του 83 % και πάντως όχι λιγότερο του 75 %, με κύριο συστατικό τους το χρυσό. Αρχικά η ταξινόμηση των οδοντιατρικών κραμάτων έγινε με βάση τη σκληρότητα τους όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-2.⁷ Η επόμενη κατάταξη των οδοντιατρικών κραμάτων από την A.D.A έγινε το 1978 όπου τα κράματα με βάση τη περιεκτικότητα τους σε χρυσό κατατάχθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες: I) κράματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε χρυσό, II) κράματα με μειωμένη περιεκτικότητα σε χρυσό, III) κράματα ευγενών μετάλλων (χωρίς χρυσό, δηλαδή Pd-Ag και Pd-Cu-Ga, και IV) κράματα βασικών μετάλλων (μη ευγενή).⁹ Έπειτα στην τελευταία κατάταξη Νο 14 της A.D.A. το 1984, ανάλογα με το ποσοστό των περιεχόμενων ευγενών μετάλλων, διακρίνει τα οδοντιατρικά κράματα σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες και συγκεκριμένα σε: α) υψηλής πολυτιμότητας (περιεκτικότητα σε ευγενή μέταλλα > 60 % κ.β. και περιεκτικότητα σε Au > 40 % κ.β.) όπως τα Au-Pt-Pd τα Au-Pd-Ag και τα Au-Pd, β) πολύτιμα (περιεκτικότητα σε ευγενή μέταλλα 25-60 % κ.β.) όπως τα Pd-Ag τα Pd-Co-Ga και τα Pd-Ga, γ) κράματα με επικρατούντα τα βασικά μέταλλα (ενδεχομένως έχουν περιεκτικότητα σε ευγενή μέταλλα < 25 %, και έχουν περιεκτικότητα 75 % κ.β. ή περισσότερο σε βασικά μεταλλικά στοιχεία, ενώ το συνολικό ποσοστό Cr, Co, Ni δεν μπορεί να είναι κατώτερο του 85 % κ.β.) όπου στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κράματα Ni-Cr και τα κράματα Co-Cr, και δ) το Ti και τα κράματα του (ποσοστό Ti πάνω από 85 %).^{9,58}

Πίνακας 4-2 Ταξινόμηση των κραμάτων ανάλογα με τη σκληρότητα τους.⁷

Τύπος	Περιεκτικότητα σε χρυσό και πλατίνα (ελάχιστο όριο)	Σκληρότητα (Vickers)
I. Μαλακός	600	820
II. Μέσης σκληρότητας	64	94
III. Σκληρός	610	790
IV. Πολύ σκληρός	14	48
	625	910

Όπως έχει αναφερθεί τα κράματα Co-Cr, που αποτελεί και το θέμα της εργασίας, διαθέτουν ευρεία χρήση στην οδοντιατρική, ιδίως για τη κατασκευή σκελετών Μ.Ο. και αυτό κυρίως το οφείλουν στη χαμηλή πυκνότητα (μικρό ειδικό βάρος), στο υψηλό μέτρο ελαστικότητας (ακαμψία), στην αντίσταση στην αμαύρωση και στο χαμηλό τους κόστος. Επιπλέον, η αντοχή εφελκυσμού των κραμάτων Co-Cr είναι αρκετά μεγάλη (οφείλεται στην δομή των εξαγωγικών και πολύ κοντά ομαδοποιημένων πλεγμάτων).^{5,7,32,37}

Έτσι, αξίζει να αναφερθούν ορισμένες ιδιότητες που αφορούν το σκελετό Μ.Ο. ως προς τον ορισμό και τη σημασία τους. Από τις φυσικές ιδιότητες περιγράφεται το ειδικό



βάρος. Από τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων περιγράφονται είναι η αντοχή στον εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο αναλογίας, το όριο διαρροής, η εκατοστιαία επιμήκυνση, η σκληρότητα, και η αντίσταση στη κόπωση. Από τις θερμικές τους ιδιότητες, το θερμοκρασιακό διάστημα τήξης και η θερμική αγωγιμότητα. Οι χημικές και βιολογικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr, η διάβρωση και βιοσυμβατότητα, έχουν ιδιαίτερη σημασία, επειδή αφορούν την «ανοχή» των προσθετικών εργασιών από τον ασθενή και περιγράφονται στα επόμενα υποκεφάλαια.³⁷ Πιο αναλυτικά:

- **Ειδικό βάρος.** Το ειδικό βάρος εκφράζει τη σχέση του βάρους ενός σώματος ως προς το βάρος ενός άλλου σώματος ίσου όγκου που λαμβάνεται σαν πρότυπο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ειδικό βάρος τόσο βαρύτερος είναι ο σκελετός. Σημειώνεται, ότι το βάρος του κράματος στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι έγκυρο κριτήριο για την επιλογή ενός κράματος έναντι ενός άλλου επειδή μετά την τοποθέτηση μιας Μ.Ο., ο ασθενής σπάνια παρατηρεί το βάρος της αποκατάστασης. Ωστόσο, το ελαφρύτερο βάρος των κραμάτων παραμένει ένα πλεονέκτημα, και είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε προσθέσεις άνω γνάθου σημαντικής μάζας, όπως σε αμφοτερόπλευρα άπω επέκταση των σκελετών ή πλήρης κάλυψη της υπερώας για τη Μ.Ο. Το βάρος είναι ένας παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν πρέπει να ξεπεραστεί η δύναμη της βαρύτητας, έτσι ώστε οι παθητικοί συνήθως άμεσοι συγκρατητήρες να μην ενεργοποιούνται συνεχώς εις βάρος των δοντιών στήριξης.^{9,32,59} Πλην αυτού, το μικρό ειδικό βάρος σε συνδυασμό με το μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (ακαμψία), κάνουν δυνατή τη κατασκευή εργασιών λεπτότερων και ελαφρύτερων.⁶⁰ Το ειδικό βάρος δεν εξαρτάται από τις διαστάσεις του σώματος παρά μόνο από το υλικό από το οποίο αποτελείται το σώμα αλλά και από την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας g στον συγκεκριμένο τόπο.⁶⁰
- **Μέτρο ελαστικότητας.** Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young εκφράζει την αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση υπό δεδομένη τάση, μέσα στα όρια της ελαστικής περιοχής, και αποτελεί μέτρο της ακαμψίας ενός υλικού. Όσο υψηλότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού, τόσο πιο άκαμπτη είναι μια κατασκευή, δηλαδή τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση στην παραμόρφωση μέσα στην ελαστική περιοχή.^{5,37} Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας είναι επιθυμητό για όλα τα τμήματα του μεταλλικού σκελετού (καθώς απαιτούν ακαμψία όπως οι εφαιπτήρες), εκτός από τους συγκρατητικούς βραχίονες. Αυτό έτσι ώστε να είναι δυνατή η ανθεκτική διαμόρφωση των άκαμπτων τμημάτων του σκελετού σε λεπτές διατομές (πάχος), ενώ παράλληλα οι συγκρατητικοί βραχίονες να παρουσιάζουν ελαστικότητα ώστε να ξεπερνούν την μέγιστη περίμετρο των δοντιών-στηριγμάτων χωρίς κίνδυνο. Ο κίνδυνος που διατρέχει το άγκιστρο είναι η



κόπωση και το δόντι ο περιοδοντικός τραυματισμός. Ο λόγος για αυτό είναι όταν η ακαμψία των αγκίστρων υπερβαίνει εκείνη των δοντιών-στηριγμάτων, η συγκέντρωση υψηλών τάσεων συσσωρεύεται στη διεπαφή μετάλλου-ιστού με αποτέλεσμα τη θραύση του ασθενέστερου συστατικού, το οποίο είναι το δόντι σε αυτήν την περίπτωση. Έτσι, το μέτρο ελαστικότητας είναι καθοριστικό των τάσεων που ασκούνται σε ένα δόντι-στήριγμα όταν το ελαστικό τμήμα του αγκίστρου περνάει τη μέγιστη περίμετρο του δοντιού (άγκιστρο από κράμα με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας ασκεί μεγαλύτερη τάση αλλά και συγκράτηση).^{37,60} Λόγω του ότι απαιτείται διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας για τα άγκιστρα και το σκελετό, συχνά αυτά τα 2 τμήματα κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά ή/και τεχνικές.⁶⁰ Η μεγαλύτερη ακαμψία των κραμάτων Co-Cr μπορεί να φανεί επίσης χρήσιμη σε τμήματα μειωμένου πάχους στα οποία απαιτείται ναρθοκοποίηση (cross-arch stabilization), μειώνοντας έτσι τον μεγάλο όγκο-μέρος του σκελετού. Η μεγαλύτερη ακαμψία του είναι επίσης ένα πλεονέκτημα όταν το μεγαλύτερο βάθος εσοχής που μπορεί να βρεθεί σε ένα δόντι στηρίγματος είναι της τάξης των 0,05 ιντσών (= 0,127 cm).^{5,32,59} Το μέτρο ελαστικότητας, εξαρτάται από τους ατομικούς δεσμούς, και από τον αριθμό των δεσμών στην μονάδα του όγκου και είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε θερμική και μηχανική κατεργασία και εξαρτάται μόνο από τη σύνθεση του κράματος.³⁷

- Αντοχή στον εφελκυσμό ή αλλιώς μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό. Η ιδιότητα αυτή αφορά την αντοχή του μεταλλικού σκελετού των Μ.Ο. όταν αυτές παραμορφώνεται ελαστικά κατά την εφαρμογή των δυνάμεων μάσησης.³⁷ Στην πράξη η τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό ίσως να μην είναι απόλυτα ενδεικτική της αντοχής του υλικού, γιατί το κράμα σκελετού Μ.Ο. υφίστανται μόνιμη παραμόρφωση σε τάσεις μικρότερες από τη μέγιστη αντοχή στο εφελκυσμό.⁶⁰ Εξαρτάται μεταξύ άλλων από τη σύσταση του κράματος, τον τρόπο χύτευσης, το ποίον της φλόγας (οξειδωτική, αναγωγική ή ουδέτερη) προκειμένου για χύτευση με οξυακετυλενική φλόγα, τον τρόπο ψύξης της μήτρας, το σημείο προθέρμανσης της μήτρας, τον συνδυασμό θερμοκρασίας τηκόμενου μετάλλου και θερμοκρασίας μήτρας (καλουπιού) και τέλος από τον αριθμό των επανειλημμένων χυτεύσεων του κράματος.⁷
- Όριο – αναλογίας-ελαστικότητας-διαρροής. Το όριο ελαστικότητας (elastic limit) είναι όρος σχεδόν ταυτόσημος με το όριο διαρροής (yield strength) και το όριο αναλογίας (proportional limit). Η ιδιότητα αυτή μπορεί να έχει επίπτωση στην αντοχή του κύριου συνδετήρα της εργασίας και των αγκίστρων. Μόνιμη παραμόρφωση συνεπάγεται για τους μείζονες συνδετήρες απώλεια της ομοιόμορφης επαφής της εργασίας δεξιά-



αριστερά. Μόνιμη παραμόρφωση για τα άγκιστρα συνεπάγεται είτε απώλεια της συγκρατητικής τους δύναμης (διάνοιξη και απώλεια επαφής με το δόντι) είτε επιβολή ι-διαίτερων πιέσεων στο δόντι. Το όριο ελαστικότητας του ελατού ανοξειδωτού χάλυβα φτάνει το 1440 N/mm^2 και είναι το υψηλότερο από όλα τα μέταλλα που τοποθετούνται στο στόμα. Ακολουθούν τα κράματα χρυσού με όριο 720 N/mm^2 και τα κράματα χύτευσης Co-Cr με όριο 650 N/mm^2 . Τα μεγέθη αυτά δείχνουν ότι μόνον από κακή εργαστηριακή κατεργασία, ή κακή σχεδίαση ή κακούς χειρισμούς μπορεί να παραμορφωθεί ένα κράμα και όχι από ενδογενή αδυναμία. Παραμορφώσεις της εργασίας στο κύριο συνδετήρα και στα άγκιστρα συμβαίνουν συνήθως σε ατυχήματα, κυρίως κρούση.⁶⁰ Συνεπώς, επιθυμητό είναι υψηλό όριο αναλογίας ώστε να μην επέρχεται εύκολα πλαστική, μόνιμη παραμόρφωση.⁶⁰ Πιο αναλυτικά, όριο αναλογίας ορίζεται ως η μέγιστη τάση για την οποία υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ δύναμης και παραμόρφωσης (Νόμος Hooke). Το μέγεθος αυτό είναι σημαντικό διότι είναι η οριακή εκείνη τάση, κάτω από την οποία πρακτικά η κατασκευή επανέρχεται στην αρχική της θέση χωρίς να επέρχεται μόνιμη παραμόρφωσή της. Διαρροή ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται αύξηση της παραμόρφωσης ενός υλικού χωρίς σημαντική αύξηση της τάσης. Ως όριο διαρροής ορίζεται η τάση εκείνη κατά την οποία το υλικό αρχίζει να συμπεριφέρεται με πλαστικό τρόπο, δηλαδή η τάση στην οποία ξεκινάει η πλαστική παραμόρφωση ενός υλικού. Το μέτρο αυτό παίζει σπουδαίο ρόλο καθώς όσο υψηλότερη η τιμή του, τόσο λιγότερο είναι το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης στην κατασκευή.^{5,7,37,47} Το όριο αναλογίας εξαρτάται μεταξύ άλλων από, την σύνθεση, τον τρόπο τήξης, τον αριθμό επανατήξεων. Επιπλέον, το όριο διαρροής εξαρτάται, από πάρα πολλές παραμέτρους. Μεταξύ των οποίων η σύσταση του κράματος και κατά δεύτερον από τις συνθήκες χύτευσης και τις θερμικές κατεργασίες τις οποίες θα υποστεί το κράμα μετά την χύτευσή του.⁷

- Εκατοστιαία επιμήκυνση στη θραύση. Μέτρο της ολκιμότητας ενός κράματος αποτελεί ο καθορισμός της εκατοστιαίας επιμήκυνσης στη θραύση. Η ιδιότητα αυτή υποδηλώνει τη δυνατότητα ενός υλικού να παραμορφώνεται πλαστικά υπό τάση εφελκυσμού πριν από τη θραύση, δηλαδή την δυνατότητα να υποβληθεί σε διορθωτικές ενέργειες (πλαστική παραμόρφωση) χωρίς να σπάει και επίσης δίνει μια ένδειξη της κατεργασιμότητας ενός κράματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εκατοστιαίας επιμήκυνσης ενός υλικού, τόσο πιο μεγάλη πλαστική παραμόρφωση μπορεί να υποστεί αυτό. Δηλαδή η πλαστικότητα στις περισσότερες περιπτώσεις εκφράζεται με την ποσοστιαία επιμήκυνση του %. Αντίθετα, τα μέρη των Μ.Ο. που χαρακτηρίζονται από χαμηλή επιμήκυνση μπορούν να σπάσουν ευκολότερα από εκείνα με υψηλή επιμήκυνση. Αποτελεί σημαντικό



μέγεθος στις Μ.Ο. για την τυχόν προσαρμογή που χρειάζονται τα άγκιστρα πριν την αρχική τους εφαρμογή και μετέπειτα.^{7,37,60} Εξαρτάται μεταξύ άλλων, από τη σύσταση του κράματος, τη θερμοκρασία του τηγμένου μετάλλου, τη θερμοκρασία της μήτρας, το μικροπορώδες του χυτού, το μέγεθος των κόκκων, τη μέθοδο ψύξης, τον τρόπο θερμικής κατεργασίας και τέλος τις επανειλημμένες χυτεύσεις του κράματος.⁷

- Σκληρότητα. Η σκληρότητα εκφράζει την επιφανειακή αντίσταση την οποία προβάλλει ένα υλικό στη διείσδυση (χάραξη) ενός άλλου σκληρότερου αντικειμένου. Μία ένδειξη της σκληρότητας είναι η δυσκολία κατά τη στίλβωσή του καθώς και ο συσχετισμός με το όριο διαρροής του, καθιστώντας έτσι ένα κράμα με υψηλό όριο διαρροής δυσκολότερο να στίλβωθεί από ότι ένα με χαμηλότερο όριο διαρροής.^{7,60} Η μεγάλη σκληρότητα είναι ιδιότητα επιθυμητή, επειδή έτσι αποφεύγεται η δημιουργία χαραγών στο υλικό, η εναπόθεση τρυγίας και η δυσκολία διατήρησης καλής καθαριότητας, ενώ συμβάλει και στη διατήρηση της στιλπνότητας. Παράλληλα όμως δημιουργεί δυσκολίες στη λείανση και στίλβωση και γενικότερα η επεξεργασία είναι περισσότερο χρονοβόρα (ενώ απαιτείται ειδικός εξοπλισμός που επιβαρύνει το κόστος ένας κατασκευής), ενώ υπάρχει κίνδυνος φθοράς της αδαμαντίνης καθώς προστρίβεται πάνω σε αυτήν κατά την τοποθέτηση και απομάκρυνση της εργασίας αλλά και κατά τη λειτουργία με τους ανταγωνιστές.^{5,7,60} Η σκληρότητα μεταξύ άλλων, εξαρτάται από τη σύσταση του κράματος, τον τρόπο ψύξης και τον τρόπο χύτευσης και τις επανατήσεις.⁷
- Θερμοκρασιακό διάστημα τήξης. Καθώς ένα κράμα αποτελείται από περισσότερα από ένα στοιχεία, η τήξη του δεν είναι ακαριαία. Θερμοκρασιακό διάστημα τήξης είναι οι 2 θερμοκρασίες της αρχής (solidus) και της ολοκλήρωσης (liquidus) της τήξης ενός κράματος.⁶⁰ Γενικά ωστόσο η τήξη των μετάλλων ξεκινάει από τα όρια των κόκκων. Στα κράματα, η τήξη εξαρτάται από το είδος και αυτά μπορούν να παρουσιάσουν πλήρη ή μερική αναμιξιμότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε σε υγρή είτε σε στερεή φάση, ανάλογα με τα μέταλλα που θα χρησιμοποιηθούν.³⁷
- Αντοχή στη κόπωση. Κόπωση είναι η καταπόνηση μίας κατασκευής με την εφαρμογή επαναλαμβανόμενων και μεταβαλλόμενων φορτίων, τα οποία είναι μικρότερα από το όριο αναλογίας του υλικού κατασκευής. Γενικά αναφέρονται τρεις τύποι επαναλαμβανόμενων τάσεων, οι οποίοι είναι εξής. Ο πρώτος τύπος είναι η επαναλαμβανόμενη τάση με αναστροφή (α), όπου σε αυτήν τη μορφή κόπωσης η τάση αυξάνει, ελαττώνεται μέχρι το μηδέν και μετά αναστρέφεται αυξανόμενη και αυτό επαναλαμβάνεται για μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης. Ο δεύτερος τύπος είναι η επαναλαμβανόμενη τάση χωρίς αναστροφή (β), όπου η κόπωση γίνεται χωρίς την αναστροφή της τάσης φόρτισης και αυτή



η μορφή κόπωσης προσομοιάζει προς τη φόρτιση των προσθετικών εργασιών κατά τη μάσηση. Ο τρίτος τύπος είναι η ακανόνιστα μεταβαλλόμενη τάση (γ), και σε αυτήν τη μορφή φόρτισης η τάση φόρτισης αυξάνει, ελαττώνεται, αναστρέφεται ή παραμένει σταθερή, με έναν ακανόνιστο τρόπο.⁵⁴ Αυτά τα επαναλαμβανόμενα φορτία, αν και μικρά σε μέγεθος είναι δυνατόν να προκαλέσουν τη θραύση των σκελετών των Μ.Ο. με το μηχανισμό της έναρξης και διάδοσης μίας ρωγμής. Σύμφωνα με αυτόν το μηχανισμό οι ατέλειες της κατασκευής, που μπορούν να είναι είτε ατέλειες στη σχεδίαση, είτε εσωτερικές ατέλειες (εσωτερικοί πόροι), είτε εξωτερικές ατέλειες (εξωτερικοί πόροι ή ατέλειες στη στίλβωση), λειτουργούν σαν σημεία τοπικής συγκέντρωσης άρα και αύξησης των τάσεων, από όπου μπορεί να ξεκινήσει μία ρωγή η οποία μετά διαδίδεται μέσα στη δομή της κατασκευής και προκαλεί τη θραύση της. Τα τρία στάδια του μηχανισμού έναρξης και διάδοσης μιας ρωγμής είναι: έναρξη ρωγμής (1): Η παλινδρομική κάμψη προκαλεί την προς-πίσω κίνηση των μεταλλικών πλεγμάτων στα επίπεδα ολίσθησης και την δημιουργία εμβρυϊκών μικρορωγμών μεγέθους 10μ (χιλιοστών του χιλιοστού). Διάδοση ρωγμής (2): όταν η εμβρυϊκή μικρορωγή φθάσει στα όρια γειτονικού κόκκου επεκτείνεται μέσα στο υλικό. Θραύση: η ρωγή επεκτείνεται με μεγάλη ταχύτητα σε όλο το υλικό.⁴ Σαν όριο κόπωσης ορίζεται η επαναλαμβανόμενη τάση στην οποία υποβάλλεται το υλικό παρουσιάζει απεριόριστη αντοχή στην κόπωση. Το ίδιο ισχύει για κάθε τάση μικρότερη από το όριο κόπωσης. Σε υψηλές τάσεις κόπωσης η θραύση επέρχεται σε λίγους κύκλους φόρτισης ενώ για χαμηλές τάσεις η θραύση επέρχεται σε πολύ περισσότερους κύκλους φόρτισης. Εάν το υλικό υποβληθεί σε κόπωση κοντά στο όριο κόπωσης του υλικού, οι κύκλοι φόρτισης για να επέλθει η θραύση του είναι άπειροι δηλαδή το υλικό θεωρητικά δεν θραύεται. Σημειώνεται ότι κατά τη χρήση της Μ.Ο., η αναπτυσσόμενη τάση σε έναν μείζονα συνδετήρα είναι πολύ κάτω από το όριο κόπωσης του υλικού σε αντίθεση με την αναπτυσσόμενη τάση στον συγκρατητικό βραχίονα που είναι πολύ κοντά στο όριο κόπωσης του υλικού.⁴

- Θερμική αγωγιμότητα. Με τον όρο θερμική αγωγιμότητα εννοείται η ποσότητα της θερμότητας σε calories, η οποία διαπερνά ένα δοκίμιο υλικού πάχους 1 cm που έχει επιφάνεια 1 cm² σε 1 s, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επιφανειών του δοκιμίου είναι 1 °C. Η διάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού εξαρτάται από το πορώδες. Τα μεταλλικά υλικά στα οποία γενικώς η θερμότητα διαδίδεται εύκολα μέσα από τη μάζα τους είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας.³⁷
- Αντοχή στη διάβρωση. Διάβρωση καλείται κάθε ηλεκτροχημική ή χημική αλλοίωση στην επιφάνεια των μετάλλων ή των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού. Ανάλογα



με το βαθμό αλλοίωσης μπορεί να εμφανιστεί είτε ως κηλίδα, είτε ως αμαύρωση (θάμπωμα), μέχρι πλήρη αποσύνθεση. Προφανώς, η αντίσταση στη διάβρωση επρόκειτο για μια επιθυμητή ιδιότητα.⁵

Αφού λοιπόν αναφέρθηκαν ορισμένα γενικά στοιχεία για τα μεταλλικά υλικά, τα συνηθέστερα τώρα κράματα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του μεταλλικού σκελετού των Μ.Ο. είναι τα ευγενή και συγκεκριμένα τα κράματα χρυσού κατηγορίας IV και τα κράματα βασικών μετάλλων στα οποία περιλαμβάνονται τα κράματα Co-Cr, το Ti, τα κράματα Ti, και τα κράματα Ni-Cr. Τα κράματα Co-Cr αποτελούν τη συνηθέστερη, το Ti και τα κράματα Ti χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις, ενώ τα κράματα Ni-Cr τείνουν να παραχωρήσουν τη θέση τους στα Co-Cr για λόγους που αναλύονται παρακάτω.^{9,37,58} Πιο αναλυτικά στοιχεία για τα κράματα αυτά αναλύονται ακολούθως.

4.3.1.1 Κράματα με βάση το χρυσό.

Τα κράματα χρυσού χρησιμοποιήθηκαν ευρέως κατά το παρελθόν όμως σήμερα έχουν απομονωθεί λόγω του υψηλού κόστους και των μηχανικών τους ιδιοτήτων οι οποίες υστερούν έναντι των άλλων κραμάτων.⁷

Γενικά χρυσός είναι ένα μέταλλο που είναι γνωστό εδώ και εκατοντάδες χρόνια και αυτό οφείλεται στις ιδιότητές του, μεταξύ των οποίων είναι το ειδικό βάρος 19,3, το σημείο τήξης 1062 °C, το σημείο βρασμού 2600 °C, η ολκιμότητα και η πλαστικότητα, καθώς και η θερμική ή ηλεκτρική αγωγιμότητα του.³⁶

Ανάλογα με τις ιδιότητες, τη σύνθεση και το είδος εφαρμογής των κραμάτων στο εμπόριο κυκλοφορούν και κατατάσσονται σε 4 κατηγορίες που χαρακτηρίζονται με τους λατινικούς αριθμούς I, II, III και IV ή τα γράμματα A, B, C και D και αντιστοιχούν σε μαλακό, μέτριο, σκληρό και υπέρσκληρο κράμα αντίστοιχα. Τα κράματα κατηγοριών I, II και III χρησιμοποιούνται στην ακίνητη προσθετική ενώ για την κατασκευή μεταλλικού σκελετού Μ.Ο. χρησιμοποιούνται μόνο τα κράματα IV κατηγορίας καθώς μόνο αυτά πληρούν όλες τις προϋποθέσεις για την επιτυχία του μεταλλικού σκελετού όπως η αυξημένη αντοχή και η αποδοχή μικρών τάσεων.^{4,5,7}

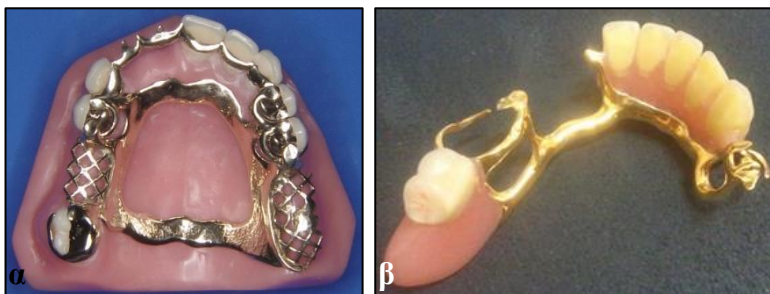
Όσο πιο μεγάλη είναι η περιεκτικότητα του κράματος σε χρυσό τόσο πιο μαλακό είναι αυτό επομένως και ακατάλληλο για χύτευση σκελετού Μ.Ο. Όταν η περιεκτικότητά σε χρυσό είναι μεγαλύτερη του 75 %, ή μικρότερη και περιέχει λευκόχρυσο ή μέταλλα της ομάδας λευκόχρυσου (Ir, Ru, Rh, Os και Pd), τα κράματα χρυσού θεωρούνται απρόσβλητα από τα υγρά του στόματος. Εφόσον ισχύουν τα ανωτέρω, από καθαρά βιολογική άποψη τα κράματα χρυσού είναι ιδανικά. Η τυπική σύνθεση επι της % κατά βάρος στο κράμα είναι:



66 % Au, 11-16 % Cu, 4-20 % Ag, 0-5 % Pd, 0-8,5 % Pt, και 1-2 % Zn. Η διακύμανση της σύνθεσης είναι 60-71,5 % Au, 11-16 % Cu, 4-20 % Ag, 0-5 % Pd, 0-8,5 % Pt και 1-2 % Zn. Όπως φαίνεται από τη διακύμανση της σύνθεσης, η περιεκτικότητα των κραμάτων σε ευγενή μέταλλα κυμαίνεται μεταξύ 75-90 %, πράγμα που τα κάνει ανθεκτικότητα στην οξείδωση.^{4,5,7}

Πιθανά σφάλματα τα οποία μπορούν να συμβούν κατά την διαδικασία της χύτευσης μεταλλικών σκελετών Μ.Ο. με κράματα χρυσού είναι η δημιουργία πορώδους χυτού που συνήθως οφείλεται σε λανθασμένη τοποθέτηση των αγωγών χύτευσης και προκαλεί μείωση της αντοχής των σκελετών. Επιπλέον η δημιουργία εύθραυστου χυτού σκελετού Μ.Ο. που μπορεί προέρχεται από μια σειρά λαθών κατά την τεχνική της χύτευσης, όπως για παράδειγμα από υπερθέρμανση του κράματος ή τη χρήση μολυσμένου κράματος από εύτηκτα ή παρόμοια βασικά μέταλλα (Hg, Mb, κ.α.).⁷

Ακόμη, από εργαστηριακή άποψη, στην περίπτωση των σκελετών Μ.Ο., μετά τη χύτευση των μεταλλικών στοιχείων, μπορεί να ακολουθήσει γαλβανισμός. Η διαδικασία γαλβανισμού ξεκινά αμέσως μετά την τοποθέτηση του μεταλλικού σκελετού σε διάλυμα θειώδους χρυσού και στη συνέχεια καλύπτεται με χρυσό (πάχους 10 μm). Η χρυσή επιφάνεια ταιριάζει πολύ καλά με τα μη ευγενή κράματα (Εικόνα 4-5 β).³⁶



Εικόνα 4-5 Σκελετός χρυσού (α),⁶⁰ και Μ.Ο. με σκελετό καλυμμένο με γαλβανισμένο χρυσό (β)³⁶.

4.3.1.2 Κράματα Co-Cr

Τα κράματα Co-Cr αποτελούν τα πλέον χρησιμοποιούμενα κράματα κατασκευής σκελετών Μ.Ο. Αν και η βάση αυτών των κραμάτων είναι το Co, επικράτησε διεθνώς η ονομασία Cr-Co αντί Co-Cr. Ωστόσο, επειδή ως γενικός κανόνας για την ονομασία των κραμάτων ισχύει ότι αναφέρεται πρώτο το όνομα του μετάλλου με τη μεγαλύτερη αναλογία (κυρίαρχο στοιχείο το Co) και στη συνέχεια του αμέσως επόμενου σε περιεκτικότητα (Cr), η ονομασία των κραμάτων αυτών ως Cr-Co θεωρείται αδόκιμη και για αυτό είναι προτιμότερο να μην χρησιμοποιείται καθώς μπορεί να οδηγήσει στην περίπτωση της εσφαλμένης ερμηνείας των κραμάτων. Συνεπώς, στην δοθείσα εργασία και σε όλη την έκταση της, τα κράματα αναγράφονται με τον ορθό τρόπο ονομασίας τους δηλαδή ως Co-Cr.^{4,9}



4.3.1.3 Κράματα Ni-Cr

Τα κράματα χύτευσης Ni-Cr, είναι σήμερα εμπορικά κράματα για την κατασκευή στεφανών και γεφυρών επειδή είναι αρκετά οικονομικά σε σχέση με τα χρυσοκράματα ενώ παρουσιάζουν παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με αυτά. Διαθέτουν επίσης δυσκαμψία, σχετικά υψηλό όριο διαρροής και μεγάλη σκληρότητα, όμως υστερούν έναντι των χρυσοκραμάτων σε ορισμένες ιδιότητες τους, οι οποίες βέβαια μπορούν να βελτιωθούν με διάφορες θερμικές κατεργασίες.⁷

Τα κράματα Ni-Cr, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή σκελετών, ιδίως για μεταλλοκεραμικές εργασίες, στην πραγματικότητα δεν χρησιμοποιούνται αλλά σταδιακά παραχωρούν τη θέση τους στα κράματα Co-Cr. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω της αύξησης του ρυθμού χρήσης των μεθόδων CAD/CAM (κοπή, πυροσυσσωμάτωση), όπου δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κράματα που περιέχουν Ni, και αφετέρου λόγω του ότι η χρήση του Ni επιδιώκεται να μειωθεί λόγω των αλλεργικών αντιδράσεων και της τοξικότητας στο σώμα κατά την ενδοστοματική του χρήση που έχουν παρατηρηθεί από αυτό. Μάλιστα πολλοί ασθενείς έχουν αλλεργία στο Νικέλιο, και έτσι σήμερα τα κράματα Co-Cr είναι η πιο κοινή εναλλακτική για αυτούς τους ασθενείς. Αυτός είναι και ο λόγος που για τα κράματα Ni-Cr γίνεται μια αναφορά στο γενικό μέρος, ενώ στο ειδικό μέρος στην ενότητα της σύγκρισης των υλικών δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση.^{37,61}

4.3.1.4 Τι και κράματα Τι

Προς το παρόν, η χρησιμοποίηση του τιτανίου για την κατασκευή σκελετών Μ.Ο. είναι περιορισμένη. Ωστόσο, ίσως αποτελεί το υλικό του μέλλοντος για ευρεία χρήση, γιατί υπερτερεί από άποψη βιοσυμβατότητας, εφόσον ξεπεραστούν τεχνικές δυσκολίες και τα προβλήματα που παρουσιάζει το υλικό ανάλογα με τη μέθοδο επεξεργασίας του.⁵

Οι φυσικές ιδιότητες του Τι είναι ποικίλες. Το Τι είναι μεταλλικό στοιχείο, με αριθμό 22 στο περιοδικό πίνακα το οποίο ανήκει στην IVb ομάδα. Σε συμπαγή μορφή είναι στιλπνό με χρώμα αργυρόλευκο και το φυσικό Τι αποτελεί μίγμα 5 σταθερών ισότοπων Ti46 (7,95 %), Ti47 (7,75 %), Ti48 (73,45 %), Ti49 (5,51 %), Ti50 (5,34 %). Επίσης έχει ανιχνευθεί σημαντικός αριθμός ραδιοϊσοτόπων. Το Τι έχει ατομικό βάρος 47,88 και ειδικό βάρος 4,51 gr/cm³ (δηλαδή είναι ένα από τα ελαφρότερα μέταλλα). Το σημείο τήξης του είναι 1688 °C (κατ' άλλους 1720 °C) και το σημείο εξάχνωσης του 3287 °C. Η σκληρότητα του Τι είναι 80-105 vickers (VHN), και εκείνη των χυτών του είναι σημαντικά μικρότερη των κραμάτων Co-Cr και ίσως επιτευχθεί αυξημένη σκληρότητα με τη χρήση κραμάτων Τι, όπως το Ti-6Al-4V (6 % αλουμίνιο – 4 % βανάδιο). Η θερμική αγωγιμότητα του είναι χαμηλή, ενώ



χαμηλός είναι και ο συντελεστής θερμικής διαστολής του ο οποίος είναι παρόμοιος με αυτόν της αδαμαντίνης ($9.6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$), ιδιότητα ιδιαίτερα ευνοϊκή καθώς η προσθετική εργασία από Ti συμπεριφέρεται παρόμοια με τους οδοντικούς ιστούς κατά τις θερμοκρασιακές μεταβολές εντός της στοματικής κοιλότητας. Μια ακόμη ιδιότητα του Ti είναι ακτινοδιαπερατότητα στις ακτίνες X, η οποία είναι σημαντική, όταν τα τοιχώματα των προσθετικών εργασιών έχουν μικρό πάχος (έως 1,6mm), όπου τότε με ακτινογραφία είναι δυνατόν να ανιχνευθούν τερηδονικές βλάβες στα όρια των αποκαταστάσεων. Παράλληλα βοηθάει στην έγκαιρη διαπίστωση ατελειών από την χύτευση πριν από την ολοκλήρωση της αποκατάστασης.^{4,5,7}

Εξίσου σημαντικές είναι και οι μηχανικές ιδιότητες του Ti. Το μέτρο ελαστικότητας του Ti είναι περίπου 100-120GPa, περίπου το ίδιο με αυτό των κραμάτων χρυσού τύπου IV και σημαντικά χαμηλότερο των κραμάτων Co-Cr. Η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι μετά από εν ψυχρώ παραμόρφωση 450MPa, ενώ μετά από χύτευση 850MPa. Η τελική επιμήκυνση κατά τη θραύση κυμαίνεται 15-20 %. Το Ti που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία έχει προσμίξεις από O, N, Fe, C, Si οι οποίες επηρεάζουν τις μηχανικές του ιδιότητες. Εξαιτίας των προσμίξεων αυτών αυξάνεται η μηχανική του αντοχή και ελαττώνεται η πλαστικότητα του. Κατά παρόμοιο τρόπο επηρεάζεται η θερμοκρασία αλλαγής της κρυσταλλικής δομής του, που τελικά πραγματοποιείται ανάμεσα σε θερμοκρασίες 865 °C και 920 °C (στους 882,5 °C μετατρέπεται σε β φάση).^{4,5,7}

Αξιοσημείωτο ρόλο έχουν και οι χημικές ιδιότητες του Ti το έφεραν τόσο μπροστά στην έρευνα και στην επικαιρότητα. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Ti είναι η εξαιρετική βιοσυμβατότητα του στον ανθρώπινο οργανισμό, που οφείλεται στη μεγάλη του αντοχή στη διάβρωση σε ένα μεγάλο αριθμών οξέων, σε αλκάλια, υδατικά διαλύματα και σε βιομηχανικά χημικά. Το CPTi είναι χημικά ενεργό στοιχείο μετάπτωσης. Μόλις έρθει σε επαφή με τον αέρα ή το νερό δημιουργείται μια στιβάδα οξειδίων στην επιφάνεια του Ti (TiO_2), η οποία το παθητικοποιεί. Το Ti έχει την δυνατότητα να απορροφά αέρια της ατμόσφαιρας και να σχηματίζει με αυτά ευαίσθητα αλλά ακατάλληλα και επιβλαβή οξείδια. Όταν η επιφάνεια του δεν είναι παθητικοποιημένη, η απορρόφηση αρχίζει ακόμα και σε συνήθεις θερμοκρασίες και αυξάνεται έντονα πάνω από τους 400 °C σχηματίζοντας στερεά διαλύματα και υδρίδιο του Ti (TiH , TiH_2). Το διοξείδιο του τιτανίου (τιτανία) είναι η σταθερότερη μορφή τιτανίου και η συχνότερα απαντώμενη. Στην άμορφη του κατάσταση είναι λευκή σκόνη, η οποία τήκεται στους 1560 °C. Το στρώμα (στοιβάδα) των οξειδίων αυτών έχει πάχος 2-5 nm, είναι πολύ σταθερά συνδεδεμένο με τα βαθύτερα στρώματα του μετάλλου. Προσδίδει στο μέταλλο μεγάλη ικανότητα αντίστασης στη διάβρωση μέσα στο στόμα



(προκαλούμενη συνήθως από το σάλιο ή το υγρό της ουλοδοντικής σχισμής). Έχει αντίσταση στα οξέα και στα χλωρίδια, αφού μόνο ισχυρά οξέα ή ισχυρά αλκαλικά διαλύματα μπορούν να τη διαλύσουν. Όσο πλησιάζει η θερμοκρασία προς την θερμοκρασία χύτευσης, αυξάνεται και το πάχος του στρώματος οξειδίων και συνεπώς επηρεάζεται η αντοχή του μετάλλου στο στοματικό περιβάλλον. Λόγω της ελάχιστης διάλυσης του Ti και του μικρού χρόνου ημιζωής του αποφεύγεται η συγκέντρωση του στα διάφορα όργανα. Το στρώμα όμως των οξειδίων δεν μπορεί να προφυλάξει το Ti, όταν βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση, από την επίδραση του O₂ της ατμόσφαιρας, για αυτό και η τήξη και η συγκόλληση του πρέπει να γίνεται σε συνθήκες κενού, αδρανούς αερίου. Η αντίσταση στη διάβρωση του Ti και των κραμάτων του θεωρείται αρκετά υψηλή και οφείλεται στη δημιουργία στρώματος προστατευτικών οξειδίων στην επιφάνεια, αν και έχει ανευρεθεί Ti στα μαλακά μόρια πλησίον εμφυτευμάτων.⁴

Το Ti βρίσκεται σε δύο αλλοτροπικές μορφές, ήτοι την εξαγωνική μέγιστης πυκνότητας (α -Ti) και την χωροκεντρωμένη κυβική δομή (β -Ti). Η β -φάση είναι σταθερή σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 882,5 °C, ενώ σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 882,5 °C μετατρέπεται πάλι σε α -φάση. Οι προσμίξεις καθώς και ορισμένα στοιχεία κραματοποίησης επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία μετάπτωσης. Τα κράματα τιτανίου που χρησιμοποιούνται στην οδοντιατρική υπάρχουν σε τρεις μορφές: την α φάση, β φάση και α - β φάση. Αυτοί οι τύποι προέρχονται το καθαρό τιτάνιο το οποίο θερμαίνεται, αναμιγνύεται με στοιχεία όπως αλουμίνιο και βανάδιο σε ορισμένες συγκεντρώσεις και στη συνέχεια ψύχεται. Αυτά τα πρόσθετα στοιχεία λέγεται ότι δρουν ως σταθεροποιητές της κατάστασης-φάσης. Το αλουμίνιο ονομάστηκε σταθεροποιητής κατάστασης α φάσης. Το αλουμίνιο χρησιμεύει για την αύξηση της αντοχής και τη μείωση του βάρους του κράματος. Το βανάδιο έχει ονομαστεί σταθεροποιητής β φάσης. Καθώς προστίθεται αλουμίνιο ή βανάδιο στο Ti, ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται από α φάση σε β φάση. Η επιθυμητή μορφή κράματος διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου με εμβάπτιση (quenching) του κράματος. Πάντως, η α φάση έχει καλή συμπεριφορά, ελατότητα και συγκολλητική ικανότητα σε υψηλές και σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά είναι δύσκολη η μορφοποίησή της. Η β φάση είναι ισχυρότερη από την α , αλλά είναι ψαθυρή. Η θερμοκρασία και ο χρόνος κατεργασίας καθορίζουν το ποσοστό και την κατανομή των φάσεων. Το Ti διατίθεται είτε σαν εμπορικά καθαρό τιτάνιο (CPTi) με βαθμό καθαρότητας 99,8-99,9%, είτε με την μορφή κραμάτων από τα οποία το πλέον γνωστό είναι το κράμα Ti6Al4V (90% Ti, 6% Al, 4% V). Η ταξινόμηση του τιτανίου δίνεται από την American Society for Testing and Materials ASTM. Όσον αφορά το



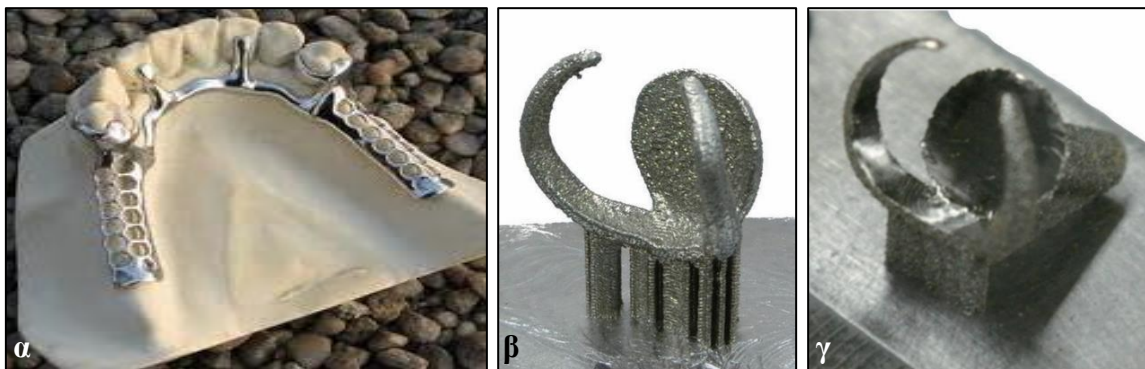
εμπορικά καθαρό τιτάνιο (CPTi) διακρίνεται σε 4 διαβαθμίσεις (Πίνακας 4-3) ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε ιχνοστοιχεία όπως το όπως το O, N, Fe, C, H.^{4,5,7,62}

Πίνακας 4-3 Βαθμοί για το CPTi.⁶²

Τύπος	Μέγιστο όριο ακαθαρσιών (κ.β. %)				
	N	Fe	O	C	H
ASTM βαθμό I	0,03	0,2	0,18	0,1	0,015
ASTM βαθμός II	0,03	0,3	0,25	0,1	0,015
ASTM βαθμός III	0,05	0,3	0,35	0,1	0,015
ASTM βαθμός IV	0,05	0,5	0,4	0,1	0,015

Το εμπορικά καθαρό τιτάνιο και το τιτάνιο σε κράματα που περιέχουν αλουμίνιο και βανάδιο ή παλλάδιο (Ti-OPd), θα πρέπει να θεωρούνται πιθανά μελλοντικά υλικά για Μ.Ο. Η πολυλειτουργικότητα-ευελιξία και η γνωστή βιοσυμβατότητα τους είναι πολλά υποσχόμενα. Ωστόσο, απαιτούνται μακροχρόνιες κλινικές δοκιμές για να επικυρωθεί η πιθανή χρησιμότητά τους.⁶²

Σημειώνεται ότι οι σκελετοί Ti μπορούν να κατασκευαστούν με CST, H-MIL και και HM (υβριδική επεξεργασία) (Εικόνα 4-6, Εικόνα 4-7).^{7,35}



Εικόνα 4-6 Σκελετός χύτευσης τιτανίου (α),⁷ συμβατικής AM (β), υβριδικής κατασκευής (γ).³⁵



Εικόνα 4-7 Πρότυπο σκελετού Ti Μ.Ο. μετά την I-MIL (α, β). Σκελετός Ti από H-MIL (γ). Σκελετός μετά από πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ όπου διακρίνεται το πρόβλημα της τραχείας επιφάνειας που δημιουργείται (δ).³⁵

4.3.2 Μη μεταλλικά υλικά

Τα υλικά και τα βάθη εσοχών τροποποιούν σημαντικά τη δύναμη συγκράτησης και την κατανομή τάσεων στο στήριγμα και στο άγκιστρο, και επιδρούν σε διαφορετικό βαθμό στην επιφάνεια του δοντιού. Άγκιστρα που κατασκευάζονται από άκαμπτα υλικά και με μεγαλύτερο βάθος εσοχών, παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκρατητική ικανότητα και ικανότητα παραμονής στη θέση τους, αλλά προκαλούν μεγαλύτερη τάση στη δομή τους και ενδεχομένως



μεγαλύτερη φθορά στην αδαμαντίνη των δοντιών στηριγμάτων κατά την ένθεση και απένθεση της οδοντοστοιχίας είναι πιθανή η δημιουργία εκδορών στην επιφάνεια της αδαμαντίνης. Εάν εμφανιστεί φθορά του στηρίγματος, αφενός η συγκράτηση επηρεάζεται και η δύναμη τείνει να μειώνεται, αφετέρου η αύξηση της τραχύτητα της επιφάνειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατακράτησης μικροβιακής πλάκας και κατά συνέπεια συμβάλει στην εμφάνιση περισσότερων περιοδοντικών βλαβών, τερηδόνας και καταγμάτων. Παράλληλα το στήριγμα καθίσταται πιο αδύναμο, χάνοντας την ικανότητα στήριξης της πρόσθεσης. Επομένως, υπάρχει ζήτηση για άγκιστρα με μεγαλύτερη ευκαμψία, μεγαλύτερη δύναμη συγκράτησης και μικρότερη συγκέντρωση τάσεων στα δόντια-στηρίγματα.⁶³

Η κατασκευή μιας αισθητικά ευχάριστης Μ.Ο. αποφεύγοντας παράλληλα την αντιαισθητική εμφάνιση των μεταλλικών αγκίστρων συχνά αποτελεί πρόκληση για τον οδοντίατρο και τον τεχνολόγο. Για παράδειγμα η χρήση μεταλλικών αγκίστρων στα πρόσθια δόντια μπορεί να προκαλέσει αισθητικά προβλήματα. Οι συμβατικές μέθοδοι για να ξεπεραστεί αυτό το αισθητικό δίλημμα περιλαμβάνουν τη βαφή των αγκίστρων με ρητίνη χρώματος δοντιών, τη χρήση γλωσσικών τοποθετημένων αγκίστρων, την εμπλοκή των εγγύς και όχι των άπω εσοχών, και τη χρήση αγκίστρων που πλησιάζουν τα ούλα. Εάν δεν είναι εφικτή η αποφυγή των αγκίστρων με τη χρήση συνδέσμων ακριβείας ορισμένοι σκελετοί θα είναι πάντα ορατοί. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση μη μεταλλικών υλικών ενδεχομένως είναι προτιμότερη και μπορεί να δώσει λύσεις σε τέτοιες περιπτώσεις.²⁰ Πλην αυτού υπάρχουν περιπτώσεις που παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σύνδεσμοι ακριβείας δεν προτιμώνται. Αυτό διότι παρόλο που οι ενδοκορωνικοί (ακρίβεια) και οι εξωκορωνικοί (ελαστικότητα) σύνδεσμοι ακριβείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς όφελος της αισθητικής, απαιτούν ευαίσθητες τεχνικές διαδικασίες που μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα εργαστηριακών σφαλμάτων. Επιπλέον οι σύνδεσμοι ακριβείας συνδέονται πάντα με στεφάνες, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία πιο επεμβατική από την άποψη της απομάκρυνσης οδοντικής ουσίας, συν του ότι αυξάνεται το κόστος της θεραπείας.⁶⁴

Με βάση τα παραπάνω και κυρίως λόγω των αισθητικών προβληματισμών και των δυσμενών επιδράσεων των μεταλλικών υλικών στους στοματικούς ιστούς (π.χ. γαλβανισμός, υπερευαισθησία, αλλεργικές αντιδράσεις) σε συνδυασμό με την εμφάνιση της ψηφιακής ροής εργασίας στο σχεδιασμό και την κατασκευή των σκελετών Μ.Ο. (ενδοστοματική σάρωση, τεχνολογία CAD-CAM, 3D εκτυπωτές υψηλής ακρίβειας), τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνιση τους στην κατασκευή σκελετού Μ.Ο. και νέα μη μεταλλικά υλικά, και συγκεκριμένα: α) τα κλασσικά θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται στις εύκαμπτες Μ.Ο. τα οποία καθίστανται εύκαμπτα ή χυτεύονται πάνω από μια συγκεκριμένη



θερμοκρασία και επιστρέφουν σε στερεά κατάσταση κατά την ψύξη: πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), νάιλον ή πολυαμίδιο (NY ή PA), πολυανθρακικό (PC), πολυεστέρας (PES), ρητίνη ακετάλης ή πολυοξυμεθυλένιο (POM), πολυπροπυλένιο (PP),⁶⁵ και μια ανώτερη κατηγορία ήτοι τα θερμοπλαστικά πολυμερή υψηλής απόδοσης: πολυαιθερακετόνη (PEEK) και η πολυαιθερακετόνηκετόνη (PEKK),⁶⁶ και το πολυμερές αρυλκετόνης (Ultaire® AKP),⁶⁷ και γ) ζirkονία.⁶⁸ Ακόμη, σε μια έρευνα αναφέρθηκαν τα θερμοσυμπιεζόμενα και τα θερμοελαστικά (versacrylic), ως άλλα υλικά (πιθανώς εντάσσονται στα κλασικά θερμοπλαστικά).^{69,70} Πάντως, ένα μειονέκτημα των πολυμερών υψηλής απόδοσης μπορεί να είναι η σχετική νεότητα τους και ως εκ τούτοι πολλοί οδοντίατροι μαθαίνουν ακόμη τον ρόλο των πολυμερών υψηλής απόδοσης, επομένως η χρήση τους δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένη. Εξαιτίας αυτού, πολλοί οδοντίατροι συγχέουν εσφαλμένα τα πολυμερή υψηλής απόδοσης με τα εύκαμπτα.

Όσον αφορά τα εύκαμπτα θερμοπλαστικά (Εικόνα 4-8) έχουν αναφερθεί τα εξής. Αρχικά όλα κατασκευάζονται με την τεχνική της θερμοσυμπίεσης (injection).⁶⁵

Το υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή εύκαμπτων Μ.Ο. είναι το πολυαμίδιο (Valplast, Flexiplast, Flexite, Flexite Plus, Sunflex, Lucitone FRS, Ultimate) και σημειώνεται ότι το νάιλον είναι ένα γενικό όνομα για τα πολυαμίδια. Αυτά τα πολυαμίδια παράγονται από τις αντιδράσεις συμπύκνωσης μεταξύ διαμίνης και διβασικού οξέος. Το νάιλον είναι ένα κρυσταλλικό πολυμερές.⁶⁵ Τα θερμοπλαστικά νάιλον είναι ημιδιαφανή υλικά που επιτρέπουν στον υποκείμενο ιστό να φαίνεται, με αποτέλεσμα εξαιρετική αισθητική ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή αγκίστρων νάιλον.⁶⁵ Το νάιλον παρουσιάζει υψηλή ευκαμψία, φυσική αντοχή, θερμότητα και χημική αντοχή. Μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί για να αυξήσει την ακαμψία και την αντοχή στη αποτριβή. Λόγω της εξαιρετικής ισορροπίας αντοχής, ολκιμότητας και αντοχής στη θερμότητα, το νάιλον είναι εξαιρετικός υποψήφιος για εφαρμογές αντικατάστασης μετάλλων. Το νάιλον χρησιμοποιείται κυρίως για Μ.Ο. βλεννογόνιας στήριξης. Η δυσκαμψία του το καθιστά ακατάλληλο για χρήση ως μασητικούς επαπτήρες ή στοιχεία οδοντοστοιχίας που πρέπει να είναι άκαμπτα. Επειδή είναι εύκαμπτο, δεν μπορεί να διατηρήσει την κατακόρυφη διάσταση όταν χρησιμοποιείται σε άμεσες μασητικές δυνάμεις. Η προσαρμογή και η στίλβωση είναι δύσκολη, αλλά παρέχει εξαιρετική αισθητική λόγω της ημιδιαφάνειας της. Το νάιλον ενδείκνυται ειδικά για ασθενείς αλλεργικούς στο μεθακρυλικό μεθυλεστέρα, όντας χωρίς μονομερές, ελαφρύ και αδιαπέραστο από τα στοματικά υγρά. Μπορεί επίσης να συνδυαστεί με μεταλλικό σκελετό.⁷¹



Η θερμοπλαστική ρητίνη ακετάλης είναι ένα υλικό με βάση το πολυοξυμεθυλένιο. Το πολυοξυμεθυλένιο (POM) πρόκειται για μια θερμοπλαστική ρητίνη που σχηματίζεται με πολυμερισμό της φορμαλδεΐδης. Το ομοπολυμερές POM είναι μια αλυσίδα εναλλασσόμενων ομάδων μεθυλίου που συνδέονται με ένα μόριο οξυγόνου. Η ακετάλη ως ομοπολυμερές έχει καλές βραχυπρόθεσμες μηχανικές ιδιότητες, αλλά ως συμπολυμερές έχει καλύτερη μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Η ρητίνη της ακετάλης είναι πολύ ισχυρή, αντέχει στη αποτριβή και τη θραύση και είναι αρκετά εύκαμπτη. Δείχνει επίσης υψηλή αντοχή στον ερπυσμό και υψηλή αντοχή στην κόπωση, και είναι υδρόφοβη πράγμα που σημαίνει ότι το υλικό δεν απορροφά νερό ή σάλιο. Είναι χωρίς μονομερή και προσφέρει μια ασφαλή εναλλακτική λύση για ασθενείς που είναι αλλεργικοί στις συμβατικές ρητίνες. Έχει λίγο ή καθόλου πορώδες, το οποίο μειώνει τη συσσώρευση βιολογικού υλικού όπως η πλάκα, και με τη σειρά του αντιστέκεται στη δυσοσμία και δυσχρωμίες. Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν ιδανικό για ορισμένους υλικό για άγκιστρα M.O., μονόπλευρες μερικές οδοντοστοιχίες (single-pressed unilateral partial dentures) και σκελετούς M.O. Οι ρητίνες ακετάλης αντιστέκονται στην μασητική αποτριβή και είναι κατάλληλες για τη διατήρηση της κάθετης διάστασης κατά τη διάρκεια προσωρινής αποκαταστατικής θεραπείας. Λόγω της βιοσυμβατότητας τους, θεωρήθηκαν ως υλικό σκελετού M.O. για ασθενείς με αλλεργικές αντιδράσεις σε σκελετούς Co-Cr. Το υλικό προωθήθηκε κυρίως με βάση την ανώτερη αισθητική, η οποία επέτρεψε στο άγκιστρο να ταιριάζει καλύτερα με το χρώμα του δοντιού στήριξης. Αν και ισχυρότερη, η ρητίνη ακετάλης δεν έχει τη φυσική διαφάνεια και ζωτικότητα του θερμοπλαστικού ακρυλικού και του πολυανθρακικού και αυτά τα υλικά μπορεί να προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα για βραχυπρόθεσμες προσωρινές αποκαταστάσεις.^{20,65,71}

Όσον αφορά τους πολυεστέρες (Estheshot bright Estheshot) σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία του κατασκευαστή, το EstheShot Bright έχει συντελεστή κάμψης 1490 MPa, κοντά σε αυτό των πολυαμιδίων, καθιστώντας το πιο μαλακό αλλά με αντίσταση στην κρούση οκτώ φορές μεγαλύτερη από εκείνη του EstheShot. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των πολυεστέρων είναι ότι συνδέονται καλά με τις αυτοπολυμεριζόμενες ρητίνες. Αυτό σημαίνει ότι η επισκευή, η προσθήκη χαμένων δοντιών και η ανακούφιση μπορούν να πραγματοποιηθούν στο οδοντιατρείο. Το EstheShot είναι μια ρητίνη πολυεστέρα που έχει το συμπολυμερές τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου ως κύριο συστατικό του.⁶⁵ Το EstheShot Bright έχει χαμηλότερο συντελεστή κάμψης από το EstheShot, και έχει αναπτυχθεί ως μια νέα πολυεστερική ρητίνη που συνδυάζει αντοχή και ευκαμψία. Και οι δύο έχουν εξαιρετική ασφάλεια, αισθητική εμφάνιση και λειτουργικότητα. Οι δοκιμές αντοχής σε διαμητικούς δεσμούς που συγκρίνουν το EstheShot και τις ακρυλικές ρητίνες έδειξαν ότι αυτό το προϊόν



έχει υψηλότερη αντοχή δεσμού από τις ρητίνες πολυαμιδίου, πολυανθρακικού ή ακετάλης. Αυτό θεωρείται ως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του EstheShot, και στην πράξη μπορεί εύκολα να επισκευαστεί με ρητίνες αυτοπολυμεριζόμενες. Οι δοκιμές τοποθέτησης έδειξαν επίσης καλύτερα αποτελέσματα από τις πολυαμιδικές ή πολυανθρακικές ρητίνες. Ακόμη, στην κλινική πρακτική, είναι πιο ευκολότερο να γυαλιστούν οι οδοντοστοιχίες πολυεστέρα.⁶⁵

Τα πολυανθρακικά (Reigning N, Reigning) είναι στην ουσία υλικά πολυεστέρων.⁷¹ Έχουν ανώτερη αντοχή σε κάμψη και στοιχεία κάμψης που είναι υψηλότερα από αυτά των πολυαμιδίων και πολυεστέρων. Σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία του κατασκευαστή, τα JET CARBO-S® και Reigning N® έχουν χαμηλότερα ελαστικά στοιχεία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε ασθενείς με μεγάλες εσοχές. Ο κίνδυνος κατάγματος σπάνια αναφέρεται και το υλικό έχει υψηλή αντοχή στις κρούσεις. Αν και η εφαρμογή τους είναι φτωχότερη από την EstheShot®, είναι καλύτερη από την Valplast®. Η σύνδεση τους με τις αυτοπολυμεριζόμενες ρητίνες είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο με αυτές των ακρυλικών ρητινών. Το χρώμα αλλάζει όταν εκτίθεται σε βαμμένα υλικά τροφίμων παρατηρείται ότι είναι παρόμοιο με τις ακρυλικές ρητίνες.¹¹¹ Έχουν καλή αντοχή σε θραύση και ευκαμψία, αλλά η αντοχή στην αποτριβή είναι χαμηλότερη από τις ρητίνες ακετάλης. Τα πολυανθρακικά έχουν μια φυσική φωτοδιαπερατότητα-διαφάνεια και λειαίνονται πολύ καλά, γεγονός τις καθιστά κατάλληλες για προσωρινές αποκαταστάσεις, αλλά δεν είναι κατάλληλες για σκελετούς Μ.Ο.⁷¹

Το θερμοπλαστικό ακρυλικό αποτελείται από πλήρως πολυμερισμένο ακρυλικό, με βασικό συστατικό να είναι το μεθυλ-μετακρυλικό, το ειδικό μείγμα πολυμερών που του δίνει την υψηλότερη βαθμολογία πρόσκρουσης από οποιοδήποτε ακρυλικό. Δεν είναι ελαστικό, αλλά η ευκαμψία του το καθιστά πρακτικά άθραυστο. Το υλικό έχει μακροπρόθεσμη σταθερότητα, η επιφανειακή του δομή είναι πυκνή και λεία. Λόγω της απουσίας υπολειπόμενου μονομερούς, η βιοσυμβατότητα του είναι πολύ καλή. Η οδοντοστοιχία έχει πολύ καλή μακροπρόθεσμη προσαρμοστικότητα επειδή η κατακράτηση νερού είναι περιορισμένη. Μπορεί να αναπηδήσει τέτοια οδοντοστοιχία από το πάτωμα χωρίς να σπάσει η βάση.⁷¹ Σημειώνεται ότι, ACRY-TONE είναι η μόνη ακρυλική ρητίνη που χρησιμοποιείται σήμερα για εύκαμπτες οδοντοστοιχίες. Αυτό το προϊόν χρησιμοποιεί μια ακρυλική ρητίνη που είναι πολύ πιο μαλακή από άλλες θερμοπλαστικές ρητίνες.⁶⁵

Για τους σκελετούς από πολυπροπυλένιο (Unigum), οι πληροφορίες είναι περιορισμένες.⁶⁵



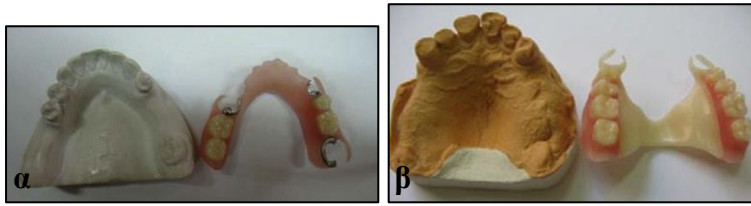
Το PEEK και PEKK ανήκουν στην οικογένεια πολυαρυλαιθεροαιθεροκετόνης (polyaryletheretherketone) (PAEKs) των πολυμερών υψηλής απόδοσης, αποτελούμενη από ένα αρωματικό σκελετό μοριακής αλυσίδα που διασυνδέεται με λειτουργικές ομάδες κετόνης και αιθέρα.⁷² Οι σκελετοί PEEK και PEKK μπορούν κατασκευαστούν είτε με κοπή είτε με θερμοσυμπίεση. Τόσο το PEKK όσο και το PEEK είναι λευκό-γκρι, ραδιο-διαυγή, άκαμπτα υλικά με καλή θερμική σταθερότητα έως τους 335,8 °C. Το PEKK παρουσιάστηκε πιο πρόσφατα και έχει 80 % υψηλότερη αντοχή σε θλίψη και καλύτερες ιδιότητες μακροχρόνιας κόπωσης από ότι το PEEK. Το PEEK έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή Μ.Ο. με ικανοποιητικά κλινικά αποτελέσματα, αλλά οι αναφορές σχετικά με το PEKK που υποστηρίζουν την κλινική χρήση του είναι περιορισμένες.⁶⁶ Το PEEK μπορεί να ληφθεί είτε σε σχεδόν άμορφη κατάσταση είτε σε ημι-κρυσταλλική (δηλαδή την άμορφη και την κρυσταλλική) κατάσταση ανάλογα με το ρυθμό ψύξης από τη λιωμένη κατάσταση. Παράγεται από την αντίδραση μεταξύ 4,4'-διφλουροβενζοφαινόνης και του δινατρίου άλατος της υδροκινόνης παρουσία διαλύτη όπως η διφαινυλοσουλφόνη στους 300°C.^{73,74} Το Ultaire® AKP (Εικόνα 4-9 ε, ζ) παράγεται από την εταιρεία Solvay Dental 360 και παρέχεται σε μορφή δίσκου (γνωστός ως δίσκος κοπής Dentivera™) σχεδιασμένος για κατασκευή με κοπή, και αυτό το υλικό ανήκει στην οικογένεια PAEKs. Ο σκελετός Ultaire™ AKP σχεδιάζεται ψηφιακά ελαφρώς παχύτερος του μετάλλου προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η Μ.Ο. έχει την κατάλληλη ακαμψία, στη συνέχεια πραγματοποιείται ξηρή (συνίσταται) ή υγρή κοπή του που διαρκεί περίπου 1,5-2 ώρες και τελικά κατασκευάζεται ένας σκελετός χωρίς μέταλλο. Η λείανση και στίλβωση του σκελετού πραγματοποιούνται εφόσον είναι απαραίτητες. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του αγκίστρου είναι διαφορετικός. Είναι μικρότερο και πιο παχύ, και είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένο ώστε να εισέρχεται (engage) στις υποσκαφές.⁷⁵

Η ζιρκόνια έχει επίσης δοκιμαστεί για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. και συγκεκριμένα η Ce-TZP/A που αποτελείται από μια μήτρα 10 % mol CeO₂ σταθεροποιημένης TZP που περιέχει 30 vol % Al₂O₃ ως δεύτερη φάση,^{23,76} και η Y-TZP, και οι 2 τύποι μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία CAD/CAM (Εικόνα 4-10).

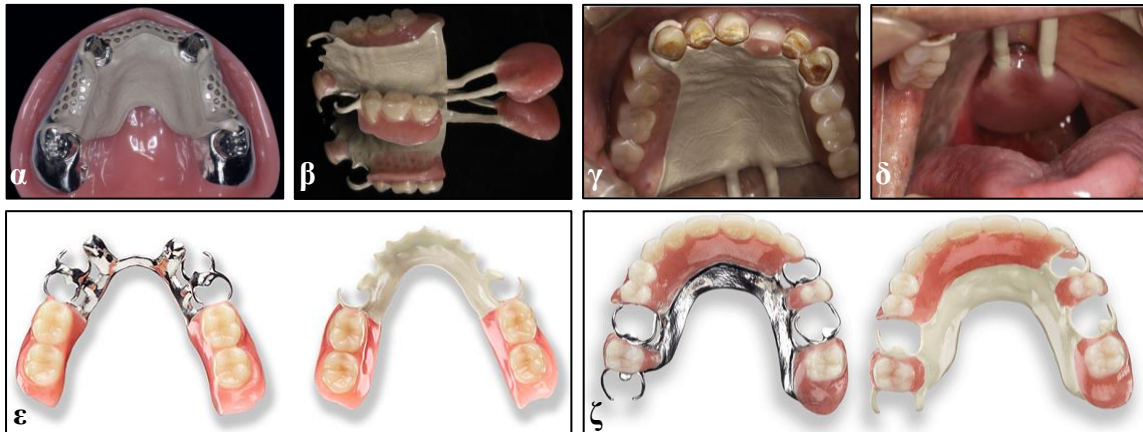
Γενικώς, τα κεραμικά μαζί με τα θερμοπλαστικά πολυμερή έχουν προσελκύσει ιδιαίτερη προσοχή λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους, της βελτιωμένης αισθητικής, της ελαστικής συμπεριφοράς, της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας, της ευελιξίας κατασκευής και της δυνατότητας βελτίωσης. Ωστόσο, η επιλογή και ο σχεδιασμός των νέων αυτών υλικών πρέπει να πραγματοποιείται μετά από πλήρη μελέτη των ιδιοτήτων και των περιορισμών κάθε υλικού, χρησιμοποιώντας την ανάλογη προσέγγιση κατά περίπτωση. Αν και απαιτούνται περισσότερες μελέτες για να χαρακτηριστεί πλήρως το φάσμα των εφαρμογών



τους, από τα θερμοπλαστικά πολυμερή τα PEEK και PEKK εμφανίζονται ως τα πλέον υποσχόμενα υποψήφια για την παραγωγή σκελετών Μ.Ο.⁷⁷



Εικόνα 4-8 Σκελετός από πολυαμίδιο που συνδυάζεται με κράμα (α), σκελετός και άγκιστρα από ρητίνη ακετάλης.⁷¹

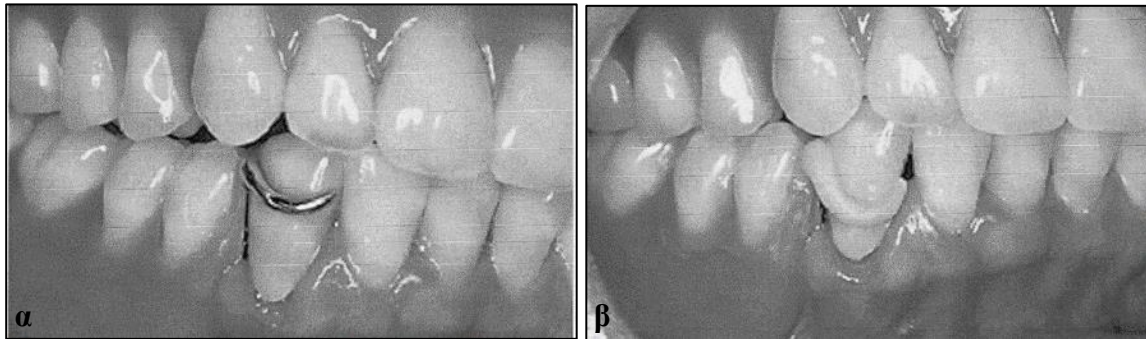


Εικόνα 4-9 Σκελετός από PEEK (α), κινητή πρόσθεση από PEKK (β) που περιλαμβάνει τον μείζονα συνδετήρα με τα άγκιστρα (γ) και τη ράβδο (rod) με το βολβό (bulb) (δ). Στις εικόνες ε και ζ διακρίνεται ο σκελετός Co-Cr στα αριστερά και στα δεξιά ο Ultaire® AKP.⁷⁵



Εικόνα 4-10 Σκελετός που κόπηκε από δίσκο Ce-TZP/A.²³

Επιπλέον, εκτός από τα θερμοπλαστικά υλικά και τη ζirkόνια, έχει δοκιμαστεί και η κάλυψη των βραχιόνων των αγκίστρων με ρητίνη χρώματος εκείνου των δοντιών για την αποφυγή της αντιαισθητικής εμφάνισης των αγκίστρων και τυχόν αλλεργικών αντιδράσεων από το κράμα. Μάλιστα, οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των σύνθετων ρητινών έχουν βελτιωθεί σημαντικά με την προσθήκη ινών υάλου (GFRC = Glass Fiber-Reinforced Composite), επιτρέποντας την κατασκευή αγκίστρων GFRC χωρίς μεταλλικό σκελετό (Εικόνα 4-11).⁷⁸ Ακόμη και με ανάλογη δράση έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα και θερμοπλαστικά πολυμερή ενισχυμένα με ίνες υάλου (GF RTP = Glass Fiber-Reinforced Thermoplastic Polymer).⁷⁹



Εικόνα 4-11 Άγκιστρο κατασκευασμένο από κράμα (α), άγκιστρο κατασκευασμένο από GFRC (β).⁷⁸

Πάντως, πολλά υλικά, πολυμερή και κράματα μετάλλων, έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή οδοντοστοιχιών. Κανένα από τα υλικά δεν πληροί όλες τις απαιτήσεις για τα μέρη της ιδανικής οδοντοστοιχίας.⁸⁰ Κατά την επιλογή υλικών, αυτό που ισχυρεί ότι οι βασικές γνώσεις δεν αλλάζουν. Μόνο οι μέθοδοι, οι διαδικασίες και οι ουσίες – με τις οποίες ο οδοντίατρος επηρεάζει το καλύτερο δυνατό τελικό αποτέλεσμα – αυτό είναι που αλλάζει. Η ευθύνη της απόφασης ανήκει ακόμη στον οδοντίατρο, ο οποίος πρέπει να αξιολογήσει όλους τους παράγοντες σε σχέση με τα επιθυμητά αποτελέσματα. Επομένως, σε κάθε περίπτωση, ο οδοντίατρος πρέπει να σταθμίσει τα σχετικά προβλήματα, να συγκρίνει και να αξιολογήσει τα χαρακτηριστικά διαφορετικών πιθανών υλικών και, στη συνέχεια, να λάβει μια απόφαση που οδηγεί στην παροχή της μεγαλύτερης δυνατής υπηρεσίας στον ασθενή.³²



Ειδικό μέρος



5.1 Σύνθεση των κραμάτων Co-Cr

Με βάση τις προδιαγραφές της Αμερικάνικης Οδοντιατρικής Ομοσπονδίας (ANSI/ADA) πρέπει να τηρούνται ορισμένες προδιαγραφές όσον αφορά τη σύνθεση των κραμάτων, έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για τον ασθενή χωρίς να προκαλούν προβλήματα υγείας, αλλά και να μπορούν να ανταποκριθούν στις μηχανικές καταπονήσεις του έτσι και αλλιώς δύσκολου στοματικού περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές Νο 14 της A.D.A (1984) και του ISO 6871-1: (1994), για τη σύνθεση των κραμάτων Co-Cr, το άθροισμα των στοιχείων Co, Cr και Ni δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο του 85 % κ.β., το Cr και Mo δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 25 και 4 % κ.β. αντίστοιχα και τα ευγενή μέταλλα (Au, Ir, Os, Pt, Rh, Ru) δεν πρέπει να ξεπερνούν το 25 % κ.β.^{9,45} Ακόμη, οι προδιαγραφές για μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε προσθετικές αποκαταστάσεις καθορίζονται στο ISO 22674: 2016. Ωστόσο, το πρότυπο ISO 22674 δεν αναγκάζει τους κατασκευαστές των κραμάτων να προσδιορίζουν το ακριβές ποσοστό των ιχνοστοιχείων στο κράμα, των οποίων το ποσοστό είναι λιγότερο από 1 % κατά βάρος με αποτέλεσμα να εμφανίζονται στη λίστα, αλλά σε ποσοστό «< 1 %». Ο παραγωγός κάθε κράματος δίνει πάντα μαζί με αυτό οδηγίες χρήσης που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες κατασκευής και τις σχετικές ιδιότητες των χυτών.⁹ Πρακτικά, τα κράματα Co-Cr δεν περιέχουν ευγενή μέταλλα. Επιπλέον, τα κράματα Co-Cr, όσον αφορά το Ni λόγω της αλλεργιογόνου δράσης του το περιέχουν σε μικρές ποσότητες ή καθόλου. Συνήθως τα κράματα αυτά πλην των Co και Cr, ως κύριο στοιχείο του κράματος περιέχουν το Mo (σπανιότερα το W), αλλά ορισμένα κράματα περιέχουν επίσης W, Si, Ru, Pd, Ga και Nb σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 1 %. Πάντως αυτό που ισχύει είναι ότι στη βασική σύνθεση, ο κάθε κατασκευαστής προσθέτει ένα ή περισσότερα επιπλέον στοιχεία (π.χ. Si, Mn, C, Fe, Sn, In, Ga, Zr, B, Nb, N, Al, Ta, Cu, Ti, κ.α.) που την τροποποιούν για την επίτευξη ενός επιθυμητού εύρους ιδιοτήτων. Μερικά από τα κράματα, κατά το παρελθόν, περιείχαν και μερικές ποσότητες Be που προσέδιδε στο κράμα λεπτόκοκκη υφή και χαμηλότερο σημείο τήξεως, το οποίο όμως πλέον έχει



αφαιρεθεί και αντικατασταθεί από Cu όμως καθώς το Be δημιουργεί τοξικότητα (κυρίως για τους εργαστηριακούς) και πιθανή καρκινογένεση.^{5,7,9,31,37}

Η χημική σύνθεση του κράματος επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες των κραμάτων, όπως στα CST την πυκνότητα, σκληρότητα, αντοχή σε κάμψη και αντοχή στη διάβρωση.^{9,45} Για το λόγο αυτό, η χημική σύνθεση όπως και οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr (αναλύονται σε επόμενη ενότητα) που προορίζονται για χύτευση και πυροσυσσωμάτωση, έχουν καταγραφεί στην παρούσα εργασία στο Παράρτημα Β σύμφωνα με τις πληροφορίες που αναφέρονται στις επίσημες ιστοσελίδες των κατασκευαστών. Σημειώνεται ότι, για τη τεχνική της χύτευσης, τα κράματα που επιλέχθηκαν αποτελούν κράματα αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο., ενώ για τη τεχνική της πυροσυσσωμάτωσης, η πλειοψηφία των κραμάτων που αναφέρονται αποτελεί μεταλλοκεραμικά ή άλλα κράματα, ήτοι κράματα όχι αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο., για τα οποία ωστόσο υπάρχει μεγάλος όγκος βιβλιογραφίας και τα οποία τα έχουν δοκιμάσει για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο. Αυτό διότι οι σκόνες κραμάτων αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο. είναι περιορισμένες.

Πριν από την εισαγωγή στο εμπόριο, τα κράματα μετάλλων πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις σχετικά με τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται από τα πρότυπα ISO. Η πιστοποίηση του κράματος μετάλλου προς πώληση προηγείται της δοκιμής των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του. Όλες αυτές οι δοκιμές εκτελούνται πριν από τη επεξεργασία των κραμάτων. Έτσι μετά την χύτευση, οι τιμές της σύνθεσης και ορισμένων ιδιοτήτων (π.χ. η αντοχή στη διάβρωση, σκληρότητα, η ολκιμότητα και η αντοχή) των κραμάτων μπορεί να διαφέρουν από τις τιμές που αναφέρονται από τον κατασκευαστή και αφορούν την μη χυτευμένη-ακατέργαστη κατάσταση. Αυτό αντικατοπτρίζει το αντίκτυπο της διαδικασίας χύτευσης στις ιδιότητες του κράματος, γεγονός που συνήθως αγνοείται από τους κατασκευαστές αυτών των υλικών στις μελέτες τους. Για παράδειγμα μελέτες του 2012 αναφέρουν ότι η αντοχή εφελκυσμού και όριο διαρροής στο CST κράμα είναι κάτω από την καθορισμένη τιμή του κατασκευαστή,⁸¹ ενώ στην άλλη αναφέρθηκε ότι η σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr που λήφθηκαν με χύτευση είναι σύμφωνες με εκείνες που ορίζονται από τον κατασκευαστή.⁸² Σε μελέτη του 2013 αναφέρθηκε ότι τα CST κράματα είναι διαφορετικά από τις δηλώσεις του κατασκευαστή.⁸³ Το 2015 σε άλλη μελέτη, μετά την κατασκευή κραμάτων Co-Cr βρήκαν ότι η σύνθεση ήταν ίδια με εκείνη που ανέφερε ο κατασκευαστής.⁸⁴ Μελέτη του 2017 ανέφερε ότι τα η σκληρότητα βρίσκεται στο εύρος των τιμών που δηλώνονται από τους κατασκευαστές των κραμάτων.⁸⁵ Το ίδιο ισχύει και για τα κράματα πυροσυσσωμάτωσης. Για παράδειγμα, σε μελέτη του 2017 αναφέρθηκε ότι, οι χημικές συνθέσεις που προκύπτουν μετά τις SLM και SLS διαφέρουν



από αυτές που υποδεικνύουν οι κατασκευαστές για τις σκόρες.⁸⁶ Πάντως, οι σκελετοί των κραμάτων Co-Cr από SLM είναι πιθανό να είναι πολύ πιο κοντά στις προδιαγραφές του κατασκευαστή από αυτές που παράγονται με τη μέθοδο CST, όπως αναλύεται σε επόμενη ενότητα.¹¹

Περιληπτικά γίνεται αναφορά στις ιδιότητες που προσδίδει στο κράμα καθένα από τα συνηθέστερα στοιχεία που περιέχει. Συγκεκριμένα:

- Το καθαρό Co, από μεταλλουργική άποψη, παρόλο που ως αλλοτροπικό στοιχείο έχει εδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (fcc) πάνω από περίπου 417°C και εξαγωνική κρυσταλλική δομή (hcp) κάτω από 417°C και επομένως μπορεί να υφίσταται μετασχηματισμό αλλοτροπικής φάσης από την υψηλής θερμοκρασίας φάση γ (fcc) στη χαμηλής θερμοκρασίας φάση ε (hcp), ωστόσο στα κράματα Co-Cr εισάγει την ασταθής fcc δομή η οποία διατηρείται (συνήθως) σε θερμοκρασία δωματίου, λόγω του χαμηλού ρυθμού αντίδρασης μετασχηματισμού fcc↔hcp. Η διατηρούμενη ασταθής δομή fcc πιστεύεται ότι σχετίζεται με ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των κραμάτων με βάση το Co, όπως το υψηλό όριο διαρροής, οι υψηλοί ρυθμοί σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, η περιορισμένη ζημιά από κόπωση κάτω από κυκλικές καταπονήσεις και η ικανότητα απορρόφησης τάσεων (μέσω του μετασχηματισμού από fcc σε hcp δομή). Η θερμοκρασία μετασχηματισμού είναι 417 °C για το καθαρό Co, αλλά για τα κράματα Co είναι υψηλότερη.^{9,61} Σημειώνεται, ότι στοιχεία όπως το Fe και Ni μπορούν να σταθεροποιήσουν την φάση γ ενώ στοιχεία όπως τα Cr και Mo την ε φάση.⁸⁷ Συνεπώς, το Co κυμαίνεται συνήθως σε ποσοστό από 60-65 κ.β. και επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.⁹ Συγκεκριμένα, αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή σε εφελκυσμό, και τη σκληρότητα του κράματος (περισσότερο από ότι το Ni).^{5,37,87}
- Το Cr είναι το δεύτερο κύριο στοιχείο του κράματος και αυξάνει την αντοχή λόγω του σχηματισμού καρβιδίου και της ισχυροποίησης στερεού διαλύματος που σχηματίζει με το Co. Τα M_7C_3 και $M_{23}C_6$ (όπου το M σημαίνει οποιοδήποτε μέταλλο) είναι γνωστά ως καρβίδια πλούσια σε Cr, αν και οι τύποι MC και M_6C έχουν επίσης ανιχνευθεί στα κράματα με βάση το Co. Ακόμη, ενισχύει την αντοχή στη διάβρωση και την οξειδωση και την αμαύρωση μέσω της επιφανειακής παθητικοποίησης του κράματος, για την οποία θεωρείται υπεύθυνο δημιουργώντας ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα οξειδίων, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η παθητική του συμπεριφορά. Γενικώς, το Cr είναι ένα από τα τρία πιο ανθεκτικά μέταλλα στη διάβρωση, μαζί με το Al και το Ti, και για το λόγο αυτό, τα κράματα Co-Cr παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση στη διάβρωση και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως όχι μόνο για τις κλασικές αποκαταστάσεις αλλά και σε



περιπτώσεις όπου ο ασθενής παρουσιάζει ξηροστομία ή αυξημένο κίνδυνο αλλεργίας. Η ιδανική περιεκτικότητα των κραμάτων σε Cr θεωρείται αυτή του 28-29 % κ.β. Γενικά η περιεκτικότητα σε Cr δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 30 % διότι η χύτευση του κράματος καθίσταται δύσκολη ενώ παράλληλα ευνοείται ο σχηματισμός μιας σκληρής και ψαθυρής φάσης, γνωστή ως «φάση σ» και είναι πλούσια σε Cr και η οποία μειώνει την αντίσταση στη διάβρωση λόγω της τοπικής εξάντλησης του από τα ιζήματα της φάσης σίγμα, ενώ παράλληλα το υλικό γίνεται εύθρυπτο. Επιπλέον, το ποσοστό Cr δεν θα πρέπει να είναι λιγότερο από 20 % διότι ελαττώνεται η απαιτούμενη σκληρότητα η αντίσταση στη διάβρωση και στην αμαύρωση.^{4,5,9,37,88}

- Τα Mo και το W προστίθενται για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των κραμάτων καθώς σχηματίζουν στερεά διαλύματα που αυξάνουν την αντοχή του κράματος (ισχυροποίηση στερεού διαλύματος). Αυτό καθώς, το Mo συμμετέχει στον σχηματισμό καρβιδίων που προάγουν την καταβύθιση καρβιδίων τύπου M_6C και MC και της διαμεταλλικής φάσης Co_3M (το M αντιπροσωπεύει ένα μεταλλικό στοιχείο).⁸⁸ Επιπλέον το Mo αυξάνει την αντίσταση στη διάβρωση λόγω του ότι συμβάλει στην παθητικοποίηση τους όσο και στην ελάττωση του μεγέθους των κόκκων.^{89,90} Συνήθως αυτά τα κράματα περιέχουν 5-7 % κ.β. Mo.⁹⁰ Το W παρέχει έχει την παρόμοια επίδραση στις ιδιότητες στο κράμα με αυτές του Mo και έτσι χρησιμοποιείται ορισμένες φορές αντί για Mo. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα κράματα Co-Cr σκληραίνονται κυρίως με σχηματισμό καρβιδίου, η περιεκτικότητα σε C είναι πρωταρχικής σημασίας.^{9,37}
- Το Nb επηρεάζει την ισχυροποίηση του διαλύματος, τον σχηματισμό διαμεταλλικών φάσεων και τα καρβίδια τύπου MC.⁸⁸
- Το Ni προστίθεται σε μικρό ή ελάχιστο ποσοστό και αυξάνει την ολκιμότητα του κράματος ενώ ταυτόχρονα ελαττώνει την αντοχή του. Ωστόσο λόγω της αλλεργιογόνου δράσης του σε μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού, υπάρχει πρόβλημα. Σήμερα κυκλοφορούν κράματα Co-Cr χωρίς Ni.⁵
- Το Si και το Mn προστίθεται σε πολύ μικρές ποσότητες από 1-1,5 % κ.β. Καθιστούν το κράμα εύτηκτο χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του και έτσι βελτιώνουν τη χυτευσιμότητα και τη ρευστότητα του τήγματος. Δρουν επίσης σαν αποξειδωτικά.^{4,37,88,89}
- Ο Fe και ο Sn, προστίθενται ως ιχνοστοιχεία με σκοπό τη δημιουργία επιφανειακών οξειδίων για την ενίσχυση του χημικού δεσμού μεταξύ κράματος και πορσελάνης και συνεπώς του μεταλλοκεραμικού δεσμού. Το In είναι το κατεξοχήν ιχνοστοιχείο το οποίο προστίθεται στα κράματα μεταλλοκεραμικής για την ενίσχυση του μεταλλοκεραμικού δεσμού. Το Ga και το Nb προστίθεται ως ιχνοστοιχεία με σκοπό τη δημιουργία

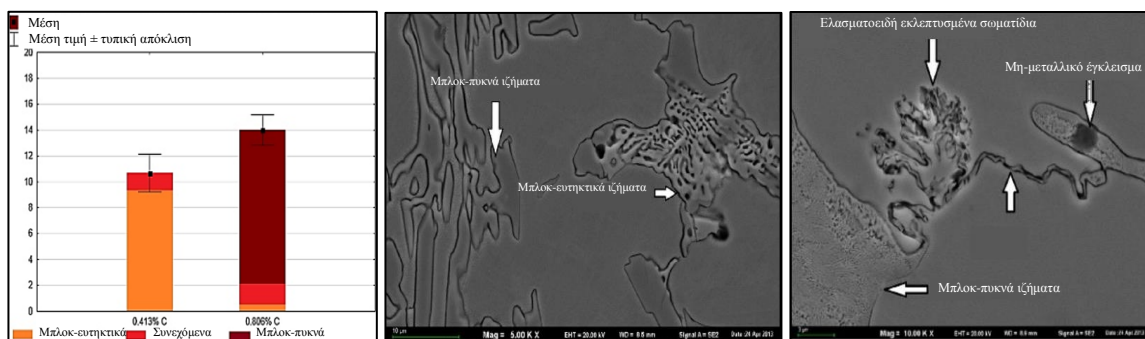


επιφανειακών οξειδίων για την δημιουργία ισχυρότερου μεταλλοκεραμικού δεσμού.³⁷

- Το N σε περιεκτικότητα 0,1 % με τη μορφή νιτριδίων των μετάλλων αυξάνει σημαντικά την ψαθυρότητα του κράματος.³⁷
- Το Ti αυξάνει την αντίσταση στη διάβρωση, και να καθορίσει μια μεγάλη καταβύθιση καρβιδίων Ti-Mo τόσο στη μεταλλική μήτρα όσο και στην ευτηκτική.⁹¹
- Ο C στο κράμα υπό μορφή καρβιδίων του Cr και του Mo συμβάλλει σημαντικά στη διαμόρφωση των μηχανικών ιδιοτήτων του και, και ιδιαίτερα στην πλαστικότητα, ακόμη και σε μικρές ποσότητες. Επιπλέον, έχειδειχθεί ότι υπάρχει μεγαλύτερο δυναμικό διάβρωσης για κράματα που περιέχουν λιγότερη ποσότητα άνθρακα.⁹² Γενικά τα κράματα έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε C και ο δείχνει ότι το ποσοστό του άνθρακα δεν πρέπει να είναι υψηλότερο από 1 %. Η σύγχυση δημιουργείται από το γεγονός ότι παρτίδες με διαφορετικά ποσοστά άνθρακα εμφανίζονται για τον ίδιο τύπο (5 κατά ISO 22674) κράματος.⁹³ Παλαιότερα στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί ότι, με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,3-1,0 % επιτυγχάνεται υψηλή αντοχή και αντοχή στον ερπυσμό (αντίσταση στη ροή του πλαστικού), ενώ όταν το ποσοστό του C αυξηθεί κατά 0,2 % πάνω από το επιθυμητό όριο αυξάνεται σημαντικά η σκληρότητα του κράματος το οποίο καθίσταται υπερβολικά εύθραυστο και ακατέργαστο και συνεπώς ακατάλληλο για χρήση, ενώ αντίθετα όταν το ποσοστό του C μειωθεί κατά 0,2 % κάτω από το επιθυμητό όριο μειώνεται σημαντικά το όριο διαρροής και η αντοχή του, σε βαθμό μη αποδεκτό.^{4,5} Ορισμένοι ερευνητές που μελέτησαν την επίδραση του ποσοστού άνθρακα (0,25-0,45 % C) στον αριθμό των ιζημάτων-τύπου μπλοκ, και παρατήρησαν ότι ο αριθμός των ιζημάτων-τύπου μπλοκ αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα.⁹³ Μια παρόμοια τάση παρατηρήθηκε, σε μια ακόμη μελέτη εξετάζοντας 2 κράματα CST ίδιας σύστασης με διαφορετική περιεκτικότητα όμως σε C [0,4 (η συνηθέστερη περιεκτικότητα σε κράματα-κράμα χαμηλής περιεκτικότητας σε C) και 0,8 (κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε C) κατά μάζα], οι οποίοι απέδειξαν ότι υπάρχει μια ισχυρή σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε άνθρακα και της μικροδομής του κράματος Co-Cr. Συγκεκριμένα, και τα 2 κράματα χαρακτηρίζονταν από χονδροκρυσταλλικές μικροδομές οι οποίες αποτελούνταν από τη μήτρα διαλύματος Co-β, τα ιζήματα καρβιδίου $M_{23}C_6$ στους διαδενδριτικούς χώρους καθώς και στα όρια των κρυσταλλινών, και το διάλυμα Co-α. Πλην των παραπάνω στην συγκεκριμένη μελέτη, μαζί με την αλλαγή του περιεχομένου άνθρακα στα χυτά, σημειώνεται μια ποιοτική και ποσοτική αλλαγή στη μικροδομή, και συγκεκριμένα η υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα αλλάζει τη φύση των καρβιδίων



δηλαδή από καρβίδια τύπου μπλοκ-ευτηκτικά (κυριαρχούν στα δείγματα χαμηλής περιεκτικότητας C) σε μπλοκ-πυκνά (κυριαρχούν στα δείγματα υψηλής περιεκτικότητας σε C) και αυξάνει το ποσοστό των ιζημάτων (Εικόνα 5-1). Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε άνθρακα επηρεάζει τις παραμέτρους κρυστάλλωσης του κράματος (συγκεκριμένα με αύξηση στη περιεκτικότητα στου άνθρακα, η θερμοκρασία τήξης μειώνεται και η θερμοκρασία στερεοποίησης αυξάνεται). Για τη συγκεκριμένη μελέτη, επιτεύχθηκε το εύρος 1635-1660 K. Αυτό το περιστατικό είναι πολύ δυσμενές, δεδομένου ότι χρησιμοποιώντας τη συνιστώμενη θερμοκρασία χύτευσης 1693 K για χύτευση του υλικού, το οποίο συνήθως έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 0,4 %, επιτυγχάνεται ένας χαμηλός βαθμός υπερθέρμανσης ο οποίος περιορίζει ή αποκλείει σημαντικά τη χυτευσιμότητα του κράματος.⁹³ Σε μια ακόμη μελέτη, στην οποία διερευνήθηκε η επίδραση των C και Si στα κράματα Co-Cr με N-ντόπινγκ (Co-32Cr-9W-Si-0,25N-C), παρατηρήθηκε ότι η καταβύθιση της διαμεταλλικής σ-φάσης η οποία συνέβη στις ενδοδενδριτικές περιοχές με διαφορισμό στερεοποίησης των Cr και W, αντικαταστάθηκε με $M_{23}C_6$ μέσω της προσθήκης άνθρακα, γεγονός το οποίο αύξησε σημαντικά την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό των κραμάτων και τη σκληρότητα χωρίς σοβαρή απώλεια ολκιμότητας, αν και το όριο διαρροής 0,2 % δεν άλλαξε. Η προσθήκη Si στα κράματα (μαζί με C), αντίθετα, προώθησε το σχηματισμό των ιζημάτων, που περιλάμβαναν M_6C και τη φάση σ, καθιστώντας τα κράματα ψαθυρά.⁹⁴



Εικόνα 5-1 Στο ραβδόγραμμα φαίνεται η επίδραση της ποσότητας άνθρακα στο ποσοστό των ιζημάτων στα χυτά κράματα Co-Cr, όπου αριστερά διακρίνεται το κράμα με περιεκτικότητα άνθρακα 0,4% και δεξιά εκείνο με 0,8%. Στα άλλα δύο σχήματα διακρίνονται ιζήματα κράματος χαμηλής περιεκτικότητας σε C στο αριστερό σχήμα και στο δεξί κράματα υψηλής.⁹³

Πλην των κραμάτων που χρησιμοποιούνται αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο., υπάρχουν και μεταλλοκεραμικά κράματα, τα οποία έχουν δοκιμασθεί και για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο., όπως το κράμα με εμπορική ονομασία Argeloy N.P. Special της εταιρείας Argen,⁹⁵ και το κράμα Wirocast της εταιρείας Bego⁹⁶. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθέσεις των μεταλλοκεραμικών κραμάτων είναι διαφορετικές από εκείνες των αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς. Συγκεκριμένα, περιέχουν περισσότερα στοιχεία W και ιχνοστοιχείων όπως

Nb και V τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και να μειώσουν τον γραμμικό συντελεστή θερμικής διαστολής. Από την άλλη τα κράματα Co-Cr αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο. περιέχουν περισσότερο Cr, Fe, Mn και C, που ενισχύουν την αντοχή, τη σκληρότητα και τη χυτευσιμότητα αλλά μειώνουν τη δυσθραυστότητα. Πάντως, έχει αναφερθεί ότι για την κατασκευή λεπτών χυτών σκελετών Μ.Ο., το όριο διαρροής 0,2 % των κραμάτων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 500 MPa και η επιμήκυνση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2 %, και επομένως η τιμή του ορίου διαρροής των χυτών Co-Cr μεταλλοκεραμικών κραμάτων είναι ανεπαρκής για την κατασκευή λεπτών Μ.Ο.⁹⁷

5.2 Δομή και ιδιότητες κραμάτων Co-Cr

5.2.1 Δομή

Τα κράματα Co-Cr (αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο.) που κατασκευάζονται με CST συνήθως παρουσιάζουν μια ανομοιογενή δομή. Συγκεκριμένα, η μικροδομή των CST κραμάτων Co-Cr παρατηρούμενη σε χαμηλή μεγέθυνση από οπτικό μικροσκόπιο, φαίνεται διφασική δηλαδή αποτελείται από δύο φάσεις: την δενδριτική (ωστενιτική μήτρα) η οποία βρίσκεται σε μεγαλύτερη ποσότητα και τη διαδενδριτική. Σημειώνεται, ότι η fcc- γ φάση σε ορισμένες μελέτες αναφέρεται ως fcc- α , ωστόσο και οι 2 χαρακτηρισμοί αφορούν την ίδια φάση.^{84,87,98,99,100,101,102} Παλαιότερες βιβλιογραφίες έχουν αναφέρει ότι η δενδριτική και διαδενδριτική φάση, αντιστοιχούν στους δύο τύπους στερεών διαλυμάτων του κράματος Co-Cr, οι οποίες διαφέρουν στη δομή (fcc- γ έναντι hcp- ϵ , αντίστοιχα) αλλά μόνο ελαφρώς στη σύνθεση.⁹⁸ Νεότερες μελέτες ωστόσο, αναφέρουν ότι τα κράματα Co-Cr αποτελούνται από τη πυρηνόμενη δενδριτική μήτρα fcc- γ , και άλλες φάσεις που υπάρχουν στους διαδενδριτικούς χώρους (δηλαδή δεν διευκρινίζεται αν η διαδενδριτική φάση αντιστοιχεί στην δομή hcp- ϵ).^{7,84,85,87,99-102} Μάλιστα, όσον αφορά τη σύνθεση των δύο φάσεων, σε μια από τις παλαιότερες αναφέρθηκε ότι οι δενδριτικές περιοχές είναι ελαφρώς πλούσιες σε Cr και φτωχές σε Co,⁸⁷ ενώ αντίθετα οι νεότερες μελέτες αναφέρουν ότι η ωστενιτική μήτρα αποτελεί ένα στερεό διάλυμα κυρίως των στοιχείων Mo και Cr σε Co,^{7,45,87} δηλαδή ότι το Co αποτελεί το στοιχείο με την υψηλότερη συγκέντρωση, για παράδειγμα σε μια μελέτη βρέθηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις Co και χαμηλότερες σε Si, Mo και Cr (Εικόνα 5-2 β - δ)¹⁰³ και σε μια ακόμη η σύνθεση της α -φάσης ήταν: 70,24 % Co, 24,97 % Cr, 3,58 % Mo, 0,83 % Mn και 0,40 % Si.¹⁰¹ Παρατηρώντας τη μικροδομή των CST κραμάτων Co-Cr σε υψηλότερη μεγέθυνση με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM), διαπιστώνεται ότι η φαινομενική διφασική μικροδομή που φαίνεται στο οπτικό μικροσκόπιο στην πραγματικότητα



αποτελείται από πολλές ακόμη φάσεις. Πιο αναλυτικά, η διαδενδριτική φάση έχει περιγραφεί ότι αποτελείται από μια φάση σχήματος-μπλοκ και μια ελασματοειδή-δομή, οι οποίες περαιτέρω αποτελούνται από τουλάχιστον δύο φάσεις. Έτσι, συνολικά από τις παρατηρήσεις οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, το κράμα Co-Cr αποτελείται από μια δενδριτική φάση-γ (στερεό διάλυμα πλούσιο σε Co) και ένα ενδοδενδριτικό μίγμα τεσσάρων φάσεων που περιέχει μια φάση-γ (πλούσια σε Co), μια φάση- $M_{23}C_6$ (πλούσια σε Cr), μια φάση- M_7C_6 και μια φάση-σ (πλούσια σε Cr και Mo).⁹⁸ Υπάρχει, ωστόσο, κάποια διαφωνία ως προς το κατά πόσον οι ενδοδενδριτικές φάσεις είναι στην πραγματικότητα καρβίδια, σ-φάση ή μια πολυφασική περιοχή.⁹⁸ Ορισμένοι ερευνητές πίστευαν ότι η διαδενδριτική φάση αποτελούσε καρβίδια, ενώ άλλοι ερευνητές ταυτοποίησαν την διαδενδριτική φάση ως σ-φάση. Στα κράματα χωρίς C έχει ταυτοποιηθεί η φάση-σ, και σε εκείνα με C έχει ταυτοποιηθεί η φάση καρβιδίων.⁹⁸ Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι η διαδενδριτική φάση ήταν καρβίδια $M_{23}C_6$ (όπου M: Co, Cr ή Mo) και φάση-σ. Σημειώνεται ότι η παρουσία των 2 αυτών φάσεων, έχει χαρακτηριστεί ως διπλή ευτηκτική περιοχή της φάσης $M_{23}C_6 + \sigma$.⁸⁵ Σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι, η ευτηκτική κρυστάλλωση, αποτελείται από α φάση και λεπτά καρβίδια $(Cr_{0,77}Co_{0,15}Mo_{0,08})_{23}C_6$ και CrC.¹⁰¹ Το 2017, οι Narowska-Sobieraj και Myszk⁴⁵ ανέφεραν ότι η μικροδομή (Εικόνα 5-3) 4 κραμάτων αποτελούνταν από ιζήματα καρβιδίων πιθανώς $Cr_{23}C_6$ στους διαδενδριτικούς χώρους της δενδριτικής φάσης γ. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-4, υπάρχει ένα καλά ορατό πολυστρωματικό-προσανατολισμένο-κρυσταλλογραφικό σύστημα ιζημάτων καρβιδίων, και ένα σαφές περίγραμμα του ορίου των κόκκων (αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε μεγέθυνση 50x στα κράματα Biosi F και Wironit extra-hard).⁴⁵ Το 2017, οι Szala και συν⁸⁵ συγκρίνοντας 3 CST κράματα ταυτοποίησαν την διαδενδριτική φάση ως καρβίδια $M_{23}C_6$ τύπου μπλοκ, μερικά από τα οποία είχαν ευτηκτικό χαρακτήρα. Η περιεκτικότητα σε Cr και Mo ήταν υψηλότερη στην περιοχή των ιζημάτων των καρβιδίων από την περιεκτικότητα σε Co, η ποσότητα του οποίου στα ιζήματα ήταν μικρότερη από την περιοχή της μήτρας. Παρότι και στα κράματα υπήρχε ο ίδιος τύπος καρβιδίου, μεγαλύτερη ποσότητα ιζημάτων βρέθηκε για τα κράματα με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα – δηλαδή δεν υπήρχαν ποιοτικές διαφορές αλλά υπήρχαν ποσοτικές (Εικόνα 5-5).⁸⁵ Το 2018, οι Baciu και συν⁹⁰ ανέφεραν τον σχηματισμό καρβιδίων $M_{23}C_6$ και M_3C_2 κατανεμημένων στην ωστενιτική μήτρα. Σημειώνεται ότι, το 2019 οι Beer-Lech και συν⁹³ ανέφεραν ότι σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, η κύρια δομή των CST κραμάτων Co-Cr, αποτελείται από μια χονδροκρυσταλλική μήτρα μετασταθούς διαλύματος β και σε αυτό υπάρχουν καρβίδια – κυρίως $M_{23}C_6$ ή καρβίδια και διαμεταλλικές φάσεις, ενώ η αναλογία του Co-α διαλύματος δεν υπερβαίνει το αρκετό τοις εκατό και δεν αποτελεί



αντικείμενο έρευνας. Ωστόσο στη μελέτη τους, ανίχνευσαν στα κράματα ότι η μικροδομή αποτελούνταν από τη μήτρα διαλύματος Co-β, τα ιζήματα καρβιδίου $M_{23}C_6$ στους διαδενδρικούς χώρους καθώς και στα όρια των κρυσταλλιτών, και το διάλυμα Co-α.⁹³

Όσον αφορά το μέγεθος των κόκκων, σε μια μελέτη δείχθηκε ότι και τα 4 CST κράματα που συγκρίθηκαν είχαν μια λεπτόκοκκη δενδριτική δομή, καθώς ο ρυθμός στερεοποίησης των κραμάτων κατά τη διάρκεια της CST ήταν σχετικά υψηλός και επομένως επηρέασε έντονα το σχηματισμό λεπτόκοκκης δενδριτικής μικροδομής και έτσι το μέγεθος των κόκκων ήταν συγκρίσιμο σε όλα τα εξεταζόμενα κράματα.⁴⁵ Σε άλλη μελέτη σύγκρισης 3 διαφορετικών CST κραμάτων, αναφέρθηκε ότι το Wironit Extrahard είχε πιο χονδροειδή δομή σε σχέση με τα κράματα Combilinium BSM 4 και I-MG.⁸⁵ Σε άλλη μελέτη έχει αναφερθεί ότι, τα CST κράματα Co-Cr αποτελούνται κυρίως από την παρουσία μεγάλων κόκκων. Η ανάλυση της μικροδομής του κράματος έχει δείξει ότι υπήρχαν μικρότεροι κόκκοι στα λεπτότερα μέρη και μεγαλύτεροι κόκκοι στα παχύτερα.⁵⁶ Χαρακτηριστικά έχει αναφερθεί ότι το μέγεθος ενός μεμονωμένου κόκκου στη CST μέθοδο μπορεί να προσεγγίσει τη διάμετρο ενός αγκίστρου M.O.¹¹ Οι μηχανικές ιδιότητες των χυτών κραμάτων επηρεάζονται αρνητικά από την τάση δημιουργίας χονδροειδούς κρυσταλλικής δομής, η οποία συσχετίζεται με τις χαμηλότερες φυσικομηχανικές, όπως αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε εφέλκυσμό, ευκαμψία, μειωμένη αντίσταση στη κόπωση, μειωμένο όριο διαρροής, μειωμένη σκληρότητα και μειωμένη ολκιμότητα.⁹³ Περισσότερα σχετικά με το μέγεθος των κόκκων αναφέρονται στην ενότητα «6.1.4 Ψύξη».

Όσον αφορά τα καρβίδια, σε παλαιότερες πειραματικές μελέτες της μεταλλογραφικής δομής των κραμάτων Co-Cr έχουν ανιχνευτεί τρεις τύποι καρβιδίων: τα σφαιρικά και διακοπτόμενα (σαν νησίδια) στα όρια των κόκκων, τα συνεχόμενα στα όρια των κόκκων, και οι σκοτεινές ευτηκτοειδείς περιοχές (μεγάλες συγκεντρώσεις καρβιδίων σε στρώματα) κατά μήκος των κόκκων και κοντά στα όρια αυτών. Η παρουσία ή η απουσία κάποιας από αυτές τις διευθετήσεις των καρβιδίων, έχει ένα ορισμένο αποτέλεσμα στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων (π.χ. τα σφαιρικά και διακοπτόμενα καρβίδια προσδίδουν στο κράμα υψηλότερες τιμές επιμήκυνσης, ενώ σκοτεινές ευτηκτοειδείς περιοχές δίνουν μικρότερη εκατοστιαία επιμήκυνση και χαμηλότερο όριο διαρροής). Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι η θερμοκρασία της μήτρας έχει μικρή επίδραση στην μεταλλογραφική δομή, ενώ υψηλές θερμοκρασίες χύτευσης έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία σφαιρικών, διακοπτόμενων καρβιδίων.^{4,7} Πάντως, έχει αναφερθεί ότι ο ασυνεχής σχηματισμός καρβιδίου στα όρια των κόκκων είναι προτιμότερος από τον συνεχή σχηματισμό καρβιδίου επειδή επιτρέπει κάποια ολίσθηση και μειώνει την ψαθυρότητα.⁶¹ Πλέον πολλές μελέτες έχουν αναφέρει ότι τα κράματα Co-Cr



αποτελούνται από μια δενδριτική μήτρα -fcc-με βάση το Co, με δευτερεύουσες φάσεις που καταβυθίζονται στα όρια των κόκκων και στις διαδενδριτικές ζώνες όπου η κύρια δευτερεύουσα φάση είναι ένα καρβίδιο $M_{23}C_6$. Στις διαδενδριτικές ζώνες, η γεωμετρία των καρβιδίων είναι συνήθως «νησίδας» (island), ωστόσο εντός των ορίων των κόκκων μπορούν να ενωθούν και να γίνουν «επιμήκη» (elongated). Υπάρχουν δύο τύποι μορφολογιών καρβιδίου: τα ελασματοειδή-καρβίδια (lamellar) που πιστεύεται ότι είναι το πιο επιβλαβή για τις μηχανικές ιδιότητες των χυτών τμημάτων και τα καρβίδια-μπλοκ (blocky) που είναι πιο επιθυμητά.¹⁰² Η φύση και η κατανομή αυτών των καρβιδίων εξαρτάται από τον τρόπο ψύξης και θερμικής κατεργασίας με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται και οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος του κράματος όπως αναλύεται διεξοδικότερα σε επόμενες ενότητες.⁷ Επιπρόσθετα, στην μικροδομή των CST κραμάτων Co-Cr, πέρα από τους δενδρίτες και τις διαδενδριτικές περιοχές μπορεί να εντοπιστούν εσωτερικές ατέλειες που μειώνουν τη μηχανική αντοχή των κραμάτων,⁹³ και στις οποίες περιλαμβάνονται: α) τα έγκλειστα (συνήθως οξειδία ή ξένα σώματα, σχετίζονται με την ύπαρξη οξυγόνου), β) οι πόροι (μπορεί να είναι δύο τύπων, τουτέστιν είτε έγκλειστα αερίων τα οποία μπορεί να έχουν σχέση για παράδειγμα με την απόσταση της φλόγας από το κράμα, είτε πόροι συρρίκνωσης λόγω της συστολής κατά την στερεοποίηση του κράματος),⁴ γ) οι ρωγμές,⁹³ και δ) τα ιζήματα καρβιδίων ή εύθραυστων διαμεταλλικών φάσεων⁹³ που προαναφέρθηκαν (αύξηση της περιεκτικότητας του κράματος σε C πάνω από το 0,3 % προκαλεί μείωση της αντοχής και της ολκιμότητάς του, το κράμα γίνεται εξαιρετικά ψαθυρό, ενώ μεγάλα καρβίδια στα όρια των κόκκων υποβοηθούν τη θραύση) και γενικότερα ο διαφορισμός της χημικής σύνθεσης. Πιο αναλυτικά:

- Σε μελέτη σύγκρισης 4 CST κραμάτων Co-Cr δείχθηκε ότι όλα τα εμφάνισαν κάποιο βαθμό μικροπορώδους (Εικόνα 5-3), ο οποίος έλαβε την υψηλότερη τιμή στα κράματα Biosil F και Remanium GM 800+, ενώ ακολούθησε το Remanium star και τελευταίο το Wironit Extrahard το οποίο είχε το χαμηλότερο πορώδες. Στο κράμα Biosil F το μικροπορώδες εμφανίστηκε κυρίως στα διαδενδριτικά όρια, ενώ για το κράμα Remanium Star υπήρχε ομοιόμορφη κατανομή των πόρων που προέκυψαν.⁴⁵ Σε άλλη μελέτη, αναφέρθηκε ότι και τα 3 CST κράματα που συγκρίθηκαν παρουσίασαν υψηλή ποιότητα, χωρίς να υπάρχει μεταβολή διαστάσεων και ελαττώματα χύτευσης (όπως κοιλότητες συστολής, πόροι, βοθρία, χτυπήματα ή ρωγμές).⁸⁵ Μεταξύ των πόρων, το πιο σημαντικό είναι το ενδοδενδριτικό μικροπορώδες λόγω συστολής, όπου κατά τη διάρκεια του σχηματισμού των δενδριτών, οι διαδενδριτικές ζώνες (spaces) απομονώνονται από το τήγμα έτσι ώστε όταν το κράμα σε αυτές στερεοποιηθεί, η προκύπτουσα συστολή δεν μπορεί αντλήσει κράμα από το τήγμα και σχηματίζονται διαδενδριτικοί πόροι (Εικόνα 5-6). Η



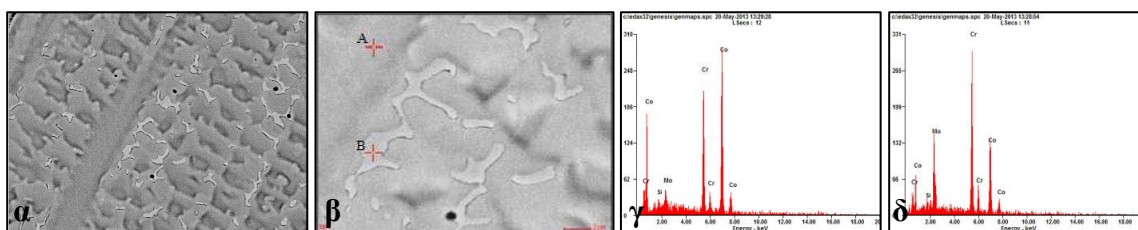
μικροδομή στερείται μιας σαφώς καθορισμένης δομής κόκκων που αποτελείται από σχε- τικά λίγους μεγάλους κρυστάλλους με κάθε κρύσταλλο να σχηματίζει έναν απλό δεν- δρίτη. Αυτό το ενδοδενδριτικό μικροπορώδες έχει βρεθεί να είναι υπεύθυνο για την αλ- λαγή της αντοχής εφελκυσμού, της αντοχής σε κρούση και της ολκιμότητας των κραμά- των Co-Cr.⁹

- Ως αποτέλεσμα των δομικών και θερμικών τάσεων που υπάρχουν στο κράμα, μπορεί να προκύψουν μικρορωγμές, προκαλώντας πτώση της αντοχής του υλικού. Σε μια με- λέτη δείχθηκε ότι πραγματοποιήθηκε διάδοση των ρωγμών στους διαδενδριτικούς χώ- ρους (Εικόνα 5-7).
- Τα ιζήματα στη μήτρα (Εικόνα 5-8) είναι μεγάλης σημασίας για τη βελτίωση της αντο- χής των CST κραμάτων Co-Cr.¹⁰⁴ Αρκετά ιζήματα καρβιδίων, συμπεριλαμβανομένων των MC, M₆C, M₇C₃, M₂₃C₆ και M₁₂C-M₆C έχουν ανιχνευθεί στα κράματα Co-Cr.^{9,104} Τόσο η σ-φάση όσο και το καρβίδιο M₂₃C₆ είναι σκληρότερα από την περιβάλλουσα γ- φάση και έτσι ενισχύεται πιθανώς το κράμα. Ωστόσο, το γεγονός ότι το κλάσμα όγκου της σ-φάσης συνήθως δεν είναι πολύ υψηλό με το γεγονός ότι η φάση-σ είναι σκληρή και ψαθυρή μειώνοντας την ολκιμότητα και γενικώς δρώντας δυσμενώς στις ιδιότητες του κράματος,¹⁰⁴⁻¹⁰⁶ καθιστούν την καθίζηση της σ-φάσης ως μη αποτελεσματική για την ενίσχυση της αντοχής του κράματος και επομένως και γενικά πρέπει να αποφεύγε- ται.¹⁰⁴ Ο σχηματισμός καρβιδίων ενισχύοντας το φαινόμενο σκλήρυνσης αποτελεί τον κύριο μηχανισμό ενίσχυσης της αντοχής (απόλυτης και προσωρινής στις υψηλές θερμο- κρασίες) των κραμάτων Co-Cr. Έχει αναφερθεί ότι, το καρβίδιο M₂₃C₆ αποτελεί μια φάση ενίσχυσης, και τον λόγο για τον οποίο τα CST κράματα μπορούν να εμφανίσουν υψηλές αντοχές παρά την χονδροειδή μικροδομή των γ-κόκκων. Εντούτοις, δεν πρέπει να προστίθεται πολύς άνθρακας στα κράματα¹⁰⁴ καθώς τα ιζήματα καρβιδίων μπορούν να αποτελέσουν πυρήνες μικρορωγμών τόσο εντός του όγκου τους όσο και στο όριο φάσης καρβιδίου/μήτρας και μειώνουν: επικίνδυνα την ολκιμότητα (τα καρβίδια που προκαλούν την ευθραυστότητα των κραμάτων είναι τα συνεχή καρβίδια στα όρια των κρυσταλλιτών καθώς επίσης και τα ελασματοειδή καρβίδια⁹³), την αντοχή σε κρούση και τη δυσθραυστότητα θραύσης (ιδιαίτερα όταν υπάρχει ένα συνεχές φιλμ καρβιδίων στα όρια των κόκκων συνοδευόμενο επιπλέον από την εμφάνιση κυτταρικών ιζημάτων), την αντοχή στη διάβρωση και επηρεάζουν τη σκληρότητα.^{98,104,102} Πλην των ιζημάτων καρβιδίων και φάσης-σίγμα, μπορεί να υπάρχουν επίσης ιζήματα (δημιουργούνται λόγω ευτηκτικής αντίδρασης ή απλά με κατακρήμνιση) νιτριδίων όπως τα π (M₂T₃X όπου X = C, N) ως μηχανισμός ενίσχυσης της αντοχής με παράλληλη διατήρηση της

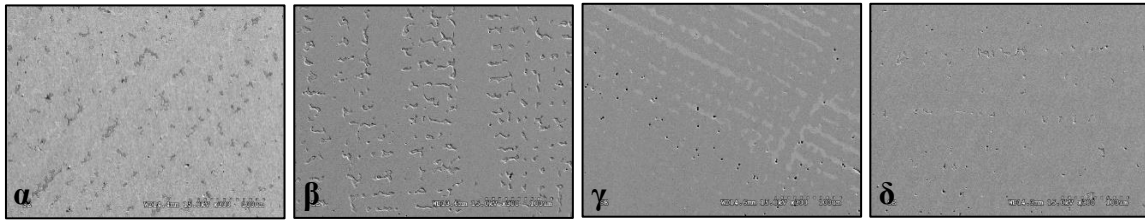


ολκιμότητας, αν και αυτά έχουν εντοπιστεί σε κράματα που πληρούν το πρότυπο ASTM F75, δηλαδή για εμφυτεύματα, ωστόσο το συμπέρασμα αυτό αναφέρεται σε εργασίες διερεύνησης κραμάτων Co-Cr για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο.¹⁰⁴ Πάντως είναι γνωστό ότι τα CST υλικά χαρακτηρίζονται από τον μικροδιαφορισμό της χημικής σύνθεσης και την ανομοιογένεια.¹⁰⁷ Ωστόσο, σε μελέτη σύγκρισης 4 CST κραμάτων δείχθηκε ότι όλα είχαν μια δομή μη ομοιογενούς ωστενίτη με χημικό μικροδιαφορισμό, αλλά η πιο ομοιογενής δομή είχε ένα εκ των τεσσάρων κραμάτων το οποίο δεν περιείχε Mo αλλά W. Το στοιχείο που είναι πιο ευαίσθητο στον διαφορισμό στις διαδενδριτικές περιοχές είναι το Cr, ακολουθούμενο από το Mo.^{45,107} Το W παρόλο που παρατηρήθηκε ότι μειώνει τον δενδριτικό διαφορισμό, σε καμία περίπτωση αυτό το στοιχείο δεν μπορεί να θεωρηθεί υποκατάστατο του Mo, κυρίως διότι η απουσία του Mo και ακόμη αν η περιεκτικότητα σε W είναι υψηλή (> 8 %) οδηγεί σε σημαντική επιδείνωση των ιδιοτήτων των κραμάτων Co-Cr.⁴⁵

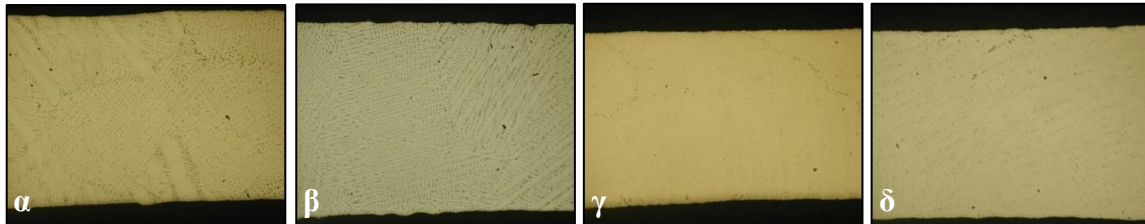
Επομένως, μαζί με την ισχυροποίηση στερεού διαλύματος που υπάρχει στα CST κράματα Co-Cr,⁹ η ρύθμιση της μικροδομής τους με σκοπό την ενίσχυση των ιδιοτήτων μπορεί να επιτευχθεί με την βελτιστοποίηση της σύνθεσης του κράματος, της μεθόδου επένδυσης και των συνθήκων χύτευσης (θερμοκρασία τήξης, ρυθμός ψύξης που έχει παρόμοιο ρόλο με τη χημική σύνθεση καθώς η θερμική επεξεργασία έχει χρησιμοποιηθεί συνήθως στα κράματα Co-Cr για να τροποποιήσει τις πιθανές αντιδράσεις καταβύθισης καρβιδίου, έλεγχος ιζημάτων κ.α.), τη μείωση του μεγέθους κόκκων ή δενδριτών (αυξάνει την μηχανική αντοχή και την ολκιμότητα), χρήση των ιζημάτων και άλλων στρατηγικών ενίσχυσης όπως η ενίσχυση του αζώτου δηλαδή η νανοκαταβύθιση νιτριδίων που περιέχουν χρώμιο, η οποία διατηρεί την ολκιμότητα του κράματος.^{104,108}



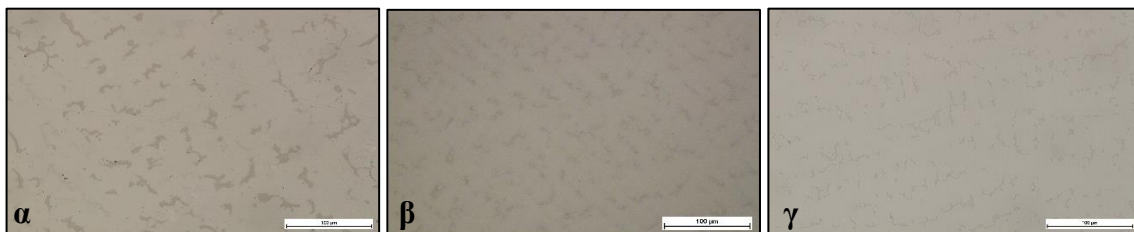
Εικόνα 5-2 Η μικροδομή του κράματος Modiral S - SEM, επιταχυνόμενη τάση 20 kV, μεγέθυνση 5000x. Η δομή του κράματος Modiral S (β) στο SEM, διάγραμμα φασματοσκοπίας ακτίνων X διασποράς ενέργειας στο σημείο A-δενδριτική φάση (γ) και στο σημείο B-διαδενδριτική φάση (δ).⁸⁴



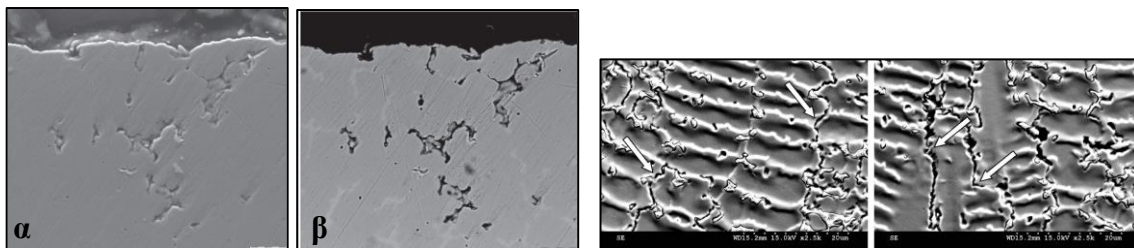
Εικόνα 5-3 Μικροδομή (SEM, 300x) διατομής χυτών κραμάτων από κράμα: α) Biosil F, β) Wironit Extra hard, γ) Remanium GM 800+ και δ) Remanium Star.⁴⁵



Εικόνα 5-4 Μακροδομή (50x) της διατομής των δειγμάτων χύτευσης από κράμα α) Biosil F, β) Wironit Extrahard, γ) Remanium GM 800+ και δ) Remanium Star.⁴⁵

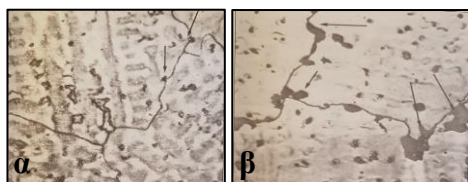


Εικόνα 5-5 Μικροδομή (100x) των κραμάτων Wironit extra-hard (α), Combilinium BSM 4 (β), I-MG (γ).⁸⁵



Εικόνα 5-6 Εικόνες μεγάλης ευκρίνειας δευτερογενών (α) και πισωσκεδαζομένων (β) ηλεκτρονίων. Επιφανειακό (α) και εσωτερικό ενδοδενδριτικό πορώδες (β) που σχηματίζεται κατά τη στερεοποίηση ενός κράματος Co-Cr όπου διακρίνεται ότι οι πόροι ακολουθούν το σχήμα και την κατανομή της λευκής πλούσιας σε Mo φάσης.⁹

Εικόνα 5-7 Μικροδομή CST κράματος Co-Cr που διακρίνονται με τα βέλη οι ρωγμές στη δενδριτική δομή. Επίσης είναι δυνατόν να παρατηρηθούν οι περιοχές μεταξύ των βραχιόνων των δενδριτών, των λεγόμενων διαδενδριτικών χώρων, όπου κατακρημνίζονται οι φάσεις καρβιδίου.¹⁰⁷



Εικόνα 5-8 Η συνεχής γραμμή είναι το όριο μεταξύ των κόκκων όπου παρατηρούνται σφαιρικά καρβίδια και η απουσία ευτηκτοειδών περιοχών(α). Σκοτεινές ευτηκτοειδείς περιοχές στα όρια των κόκκων (β).⁷

Το 2012, οι Baciu και συν¹⁰⁹ χρησιμοποιώντας 2 κράματα Co-Cr-Mo πραγματοποίησαν έρευνα με στόχο την όσο το δυνατόν πληρέστερη κατανόηση τους ακολουθώντας κυρίως τον χαρακτηρισμό τους από δομική άποψη, και επισήμαναν τα εξής:



- Οι χημικοί συνδυασμοί που πραγματοποιούνται μεταξύ των κύριων συστατικών των κραμάτων Co-Cr-Mo κατά τη διάρκεια της χύτευσης, επιτρέπουν την απόκτηση, κραμάτων των οποίων οι φυσικές, μηχανικές, τεχνολογικές ιδιότητες και οι ιδιότητες χρήσης μπορούν να αξιολογηθούν μέσω της ανάλυσης των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων ισορροπίας. Αυτοί οι χημικοί συνδυασμοί μπορεί να έχουν τον χαρακτήρα ορισμένων αναλλοίωτων αντιδράσεων (ευτηκτική, περιτηκτική, ευτηκτοειδής, περιτηκτοειδής), αντιδράσεων παραλλαγής της αμοιβαίας διαλυτότητας των στερεών συστατικών κλπ. στα διαγράμματα ισορροπίας.
- Τα τριμερή κράματα Co-Cr-Mo μπορούν να αναλυθούν μέσω των διαγραμμάτων δυαδικής ισορροπίας Co-Cr (Εικόνα 5-9 α), Cr-Mo (Εικόνα 5-9 β) και Mo-Co (Εικόνα 5-9 γ) ή μέσω των ισοθερμικών τμημάτων του τριμερούς διαγράμματος. Ο ρόλος των χημικών στοιχείων του κράματος στον σχηματισμό δομικών συστατικών, θα αντιπροσωπεύεται από το γεγονός ότι η παρουσία του Mo που συνδυάζεται με το Cr θα δημιουργήσει τις συνθήκες για το σχηματισμό διαμεταλλικών φάσεων, ενώ το Cr θα παρέχει την αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες αυτών των κραμάτων. Από τη μεταλλογραφική άποψη, τα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων εμφανίζονται υπό τη μορφή φάσεων και συστατικών στη μικροδομή κάθε κράματος. Κατά συνέπεια, με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία, μπορεί κανείς να επισημάνει φάσεις στερεού τύπου διαλύματος και διαμεταλλικών ενώσεων, καθώς και συστατικά ευτηκτικού, περιτηκτικού, ευτηκτοειδούς, περιτηκτοειδούς τύπου κλπ.
- Η ανάλυση των διαγραμμάτων δυαδικής ισορροπίας του τριμερούς συστήματος Co-Cr-Mo, δείχνει ότι στην περίπτωση των κραμάτων Co-Cr (Εικόνα 5-9 α), παρατηρείται ότι η βασική μεταλλική μάζα αποτελείται από ένα στερεό διάλυμα γ (τύπου κράματος ωστενίτη) πλούσιο σε κοβάλτιο (ελάχιστο 50 %) και με ένα δίκτυο κρυστάλλων fcc, όπου εμφανίζονται πολλά καρβίδια με διεργασίες καθίζησης σε στερεά κατάσταση με αποτέλεσμα σκλήρυνσης για την ωστενιτική μήτρα, που προκύπτουν από τις αμετάβλητες αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτά τα κράματα. Τα κύρια καρβίδια είναι τύπου $M_{23}C_6$, αλλά εντοπίστηκαν επίσης καρβίδια MC, M_3C_2 , M_6C M_7C_3 (Μέταλλο_xΆνθρακα_y). Η καταβύθιση και η μορφολογία των καρβιδίων προσδιορίζονται από τη διαλυτότητά τους σε κοβάλτιο.
- Το $M_{23}C_6$ μπορεί επίσης να καθιζάνει υπό τη μορφή πολύ λεπτών σωματιδίων λαμβάνοντας έτσι μια υπερβολική σκλήρυνση της μεταλλικής μάζας και τη βάση και τη μείωση της πλαστικότητάς της.



- Μετά από αυτούς τους δευτερεύοντες μετασχηματισμούς, μπορεί να παρατηρηθεί ο σχηματισμός δύο ενδιάμεσων ενώσεων με ανομοιογενή τήξη: σίγμα σ και ε φάσεις (Co).
- Οι ενδιάμεσες φάσεις Co_9Mo_2 (ε), Co_3Mo , Co_7Mo_6 (μ) και σ-φάση υπάρχουν σε κράματα Co-Mo (Εικόνα 5-9 γ). Οι φάσεις σ και μ προκύπτουν από τις περιτηκτικές αντιδράσεις



και



Η ευτηκτική αντίδραση αυτών των κραμάτων είναι



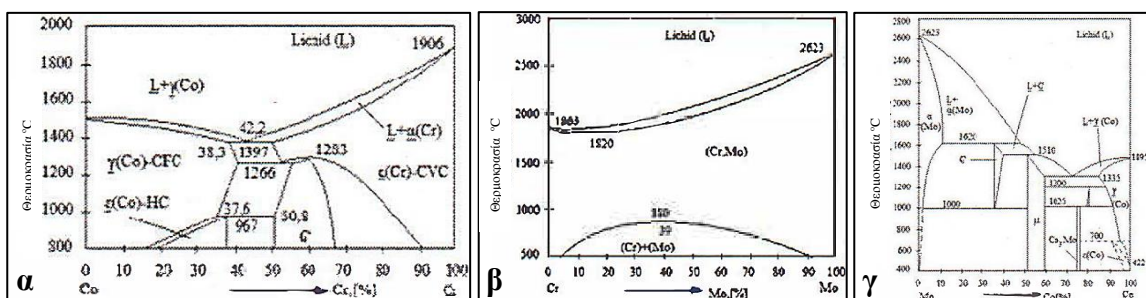
Και στο τέλος των τριών περιτηκτοειδών αντιδράσεων, αποκτώνται τα Co_9Mo_2 , Co_3Mo καρβίδια και ε φάση, σύμφωνα με τις αμετάβλητες αντιδράσεις.



Οι 2 φάσεις Co_9Mo_2 και σ διατηρούν τις ευτηκτοειδείς διασπάσεις



- Δεδομένου ότι τα Cr και Mo έχουν ισομορφικά κρυσταλλικά δίκτυα, θα σχηματίσουν ένα κράμα στερεού διαλύματος α (Co, Cr), σύμφωνα με το διάγραμμα ισορροπίας, με την αμοιβαία διαλυτότητα των συστατικών και τον σχηματισμό ενός ελάχιστου σημείου σε 12,5 % Mo και 1820 ° C (Εικόνα 5-9). Ενδέχεται να παρατηρηθεί η απουσία αναμιξιμότητας σε στερεή κατάσταση κάτω από τους 880 °C.¹⁰⁹



Εικόνα 5-9 Διάγραμμα ισορροπίας του συστήματος κραμάτων Co-Cr (α), Cr-Mo (β), Mo-Co (γ) (* * * Co-Cr). Διάγραμμα φάσης.¹⁰⁹

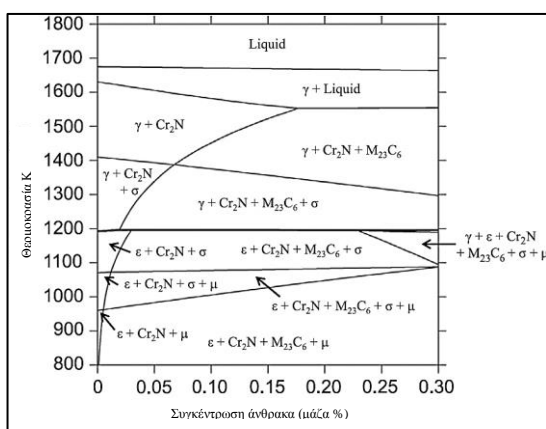
Το 2015, οι Yamanaka και συν¹⁰⁴ προσπάθησαν να εξηγήσουν την συμπεριφορά καθίζησης ενός κράματος κατά τη χύτευση μεταξύ άλλων με βάση το διάγραμμα ισορροπίας (Εικόνα 5-10). Με βάση το διάγραμμα φάσεων: η γ-φάση είναι σταθερή σε υψηλές



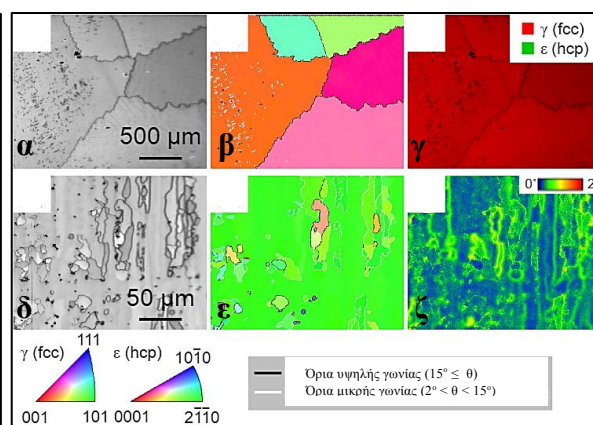
θερμοκρασίες ($\geq 1173\text{K}$, μεγαλύτερη από $\sim 1200\text{K}$), η μήτρα (φάση-ισορροπίας) θερμοκρασίας-δωματίου αποτελείται από την ϵ -φάση ($< 1173\text{K}$), και η φάση- σ και η φάση- Cr_2N συνυπάρχουν σε θερμοκρασίες $1200\text{-}1300\text{K}$. Η αύξηση της συγκέντρωσης άνθρακα επιβραδύνει τον σχηματισμό της σ -φάσης. Αντίθετα, το καρβίδιο M_{23}C_6 σχηματίζεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις άνθρακα. Η μ -φάση, η οποία είναι πλούσια σε Mo, εμφανίζεται στην περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας.^{104,108} Στα αποτελέσματα της μελέτης τους διαπίστωσαν ότι τα CST κράματα Co-Cr παρουσίασαν τρία είδη φάσεων με διαφορετικές συγκεντρώσεις Co, Cr και Mo, και συγκεκριμένα: τους πλούσιους σε Co κόκκους με μέσο μέγεθος ολίγων χιλιοστών (πιθανόν λόγω αργής ψύξης του κράματος) που αντιστοιχούσαν στην χονδροειδή fcc γ -φάση της δενδριτικής δομής, και ιζήματα σ -φάσης και καρβιδίων M_{23}C_6 τα οποία συνυπήρχαν στις διαδενδριτικές περιοχές, ήταν ευθυγραμμισμένα παράλληλα μεταξύ τους, είχαν διάμετρο αρκετών μικρομέτρων και ήταν πλούσια σε Cr, Mo, Si και C. Επισημάναν ότι δεν εντοπίστηκε ϵ -φάση, η οποία συνήθως παρατηρείται σε κράματα Co-Cr ως μαρτενσιτική φάση που σχηματίζεται μετά από απόσβεση από θερμοκρασίες στις οποίες η γ -φάση είναι σταθερή, πλαστική παραμόρφωση και μια ισοθερμική θερμική επεξεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας η ϵ -φάση είναι θερμοδυναμικά σταθερή ($< 1173\text{K}$). Η σταθεροποίηση της γ -φάσης πιθανόν οφειλόταν, αφενός στην προσθήκη N (Cr_2N) το οποίο καθιζάνοντας καταστέλλει τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, και αφετέρου στον C. Μια αντίδραση μεταξύ φάσης σ και του C είναι πιθανώς υπεύθυνη για το καρβίδιο M_{23}C_6 , αν και σαν αντίδραση δεν συνέβη στην συγκεκριμένη έρευνα παρά την αργή ψύξη (εκτεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες). Αυτή η υπόθεση βασίζεται στο αποτέλεσμα μιας μελέτης στην οποία αναφέρθηκε ότι κατά τη ψύξη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 1423K , το καρβίδιο M_{23}C_6 κατακρημνίζεται από την σκληρή και ψαθυρή σ -φάση σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση: $\sigma + \text{C} \rightarrow \text{M}_{23}\text{C}_6$. Έτσι, αυξημένη συγκέντρωση άνθρακα θα οδηγούσε σε μετάβαση από τη διαμεταλλική σ -φάση στο καρβίδιο M_{23}C_6 . Ωστόσο, η αντίδραση αυτή πρέπει να ολοκληρωθεί για την λήψη χυτών υψηλής αντοχής πράγμα που δεν συμβαίνει κατά τη διάρκεια της πραγματικής χύτευσης. Δεδομένου ότι τα ιζήματα ελασματοειδή-τύπου εμφανίζονται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 1262K , ο σχηματισμός μικροδομής του διερευνηθέντος κράματος πιθανότατα θα συμβεί σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (δηλαδή, εκείνες υψηλότερες από $\sim 1273\text{K}$). Σημειώνεται ότι η φάση μ , της οποίας ο σχηματισμός προέβλεπε το διάγραμμα ισορροπίας, δεν παρατηρήθηκε πειραματικά στα κράματα Co-Cr. Ακόμη, τα καρβίδια ή τα νιτρίδια της μη ισορροπίας δεν παρατηρήθηκαν σε αυτήν τη μελέτη.¹⁰⁴ Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 5-11, μια πολύ χονδροειδής δενδριτική μικροδομή μπορεί να φανεί. Η μικροδομή αποτελούσε κυρίως την γ -φάση (Εικόνα 5-11 γ). Παρατηρήθηκαν



επίσης ακανόνιστα όρια κόκκων, ενώ δεν υπήρχαν διδυμίες ανόπτησης (Εικόνα 5-11 α, β). Οι χάρτες EBSD υψηλής μεγέθυνσης του δείγματος as-cast φαίνονται στην Εικόνα 5-11 δ-στ. Δεν αναγνωρίστηκε ε-φάση. Επομένως, ο αντίστοιχος χάρτης φάσεων δεν εμφανίζεται εδώ. Ο χάρτης ποιότητας εικόνας, που φαίνεται στην Εικόνα 5-11 δ, αποκαλύπτει έναν κόκκο γ με περιοδικά καταβυθισμένα σωματίδια (που αντιπροσωπεύονται σε μαύρο). Μπορεί να φανεί ότι τα όρια χαμηλής γωνίας αναπτύχθηκαν εντός του κόκκου γ (Εικόνα 5-11 ε). Αυτά τα όρια χαμηλής γωνίας είναι επίσης ορατά στην Εικόνα 5-11 δ, λόγω του γεγονότος ότι οι τιμές ποιότητας εικόνας είναι χαμηλές σε τέτοιες περιοχές. Είναι ενδιαφέρον ότι ένας υψηλότερος βαθμός KAM (Εικόνα 5-11 ζ), δηλαδή τοπικών τάσεων, παρατηρήθηκαν γύρω από τέτοια όρια, ενώ οι ενδοκοκκικές περιοχές εμφάνισαν χαμηλότερες τιμές KAM. Έτσι, είναι πιθανό αυτά τα όρια χαμηλής γωνίας να σχηματίζονται λόγω της πρόσκρουσης των δενδριτών με παρόμοιους κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς στις τελικές περιοχές στερεοποίησης (δηλαδή στις διαδενδριτικές περιοχές).¹⁰⁴



Εικόνα 5-10 Διάγραμμα φάσεων ενός κράματος Co-29Cr-6Mo-0.2N – Xc (μάζα%, $0 \leq x \leq 0,3$).¹⁰⁴



Εικόνα 5-11 Χάρτης EBSD: ποιότητας εικόνας (α), IPF (β), φάσεων (γ) του κράματος Co-Cr. Οι εικόνες δ, ε αντιστοιχούν στις α και β αλλά είναι σε μεγέθυνση, και η εικόνα ζ αντιστοιχεί στην. Οι μαύρες και λευκές γραμμές στο IPF υποδηλώνουν όρια υψηλής γωνίας με διαφορετικούς προσανατολισμούς μεγαλύτερους των 15° και τα όρια μικρής γωνίας με διαφορετικούς προσανατολισμούς $2-15^\circ$, αντίστοιχα.¹⁰⁴

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του SLM σε σύγκριση με την CST, είναι η ικανότητα παραγωγής σκελετών που οι μικροδομές τους είναι πιο ομοιογενείς, πιο λεπτόκοκκες και με μειωμένο αριθμό ελαττωμάτων.^{11,31,99,106} Ακολούθως, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στοιχεία μέσα από τα οποία έχει προκύψει αυτό το συμπέρασμα.

Γενικώς, η διαδικασία SLM χαρακτηρίζεται από ταχεία τοπική θέρμανση και ψύξη του υλικού. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, χρησιμοποιείται μια ακτίνα λέιζερ υψηλής ενέργειας για την ακτινοβολήση των σκονών κράματος, οι οποίες απορροφούν την ενέργεια μέσω της σύζευξης όγκου (bulk coupling) ή της σύζευξης σκόνης (powder

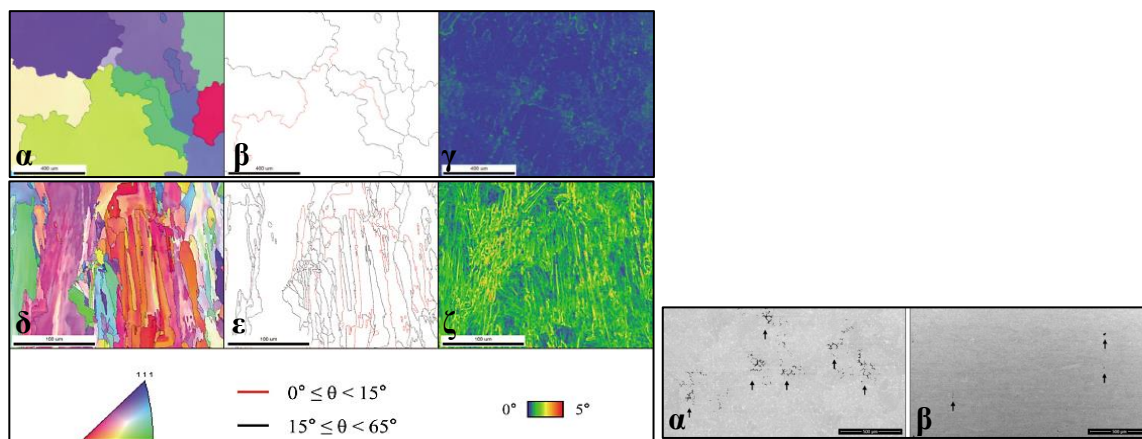


coupling). Κατά συνέπεια, υψηλές θερμοκρασίες και ρυθμοί ψύξης δημιουργούνται μέσα στη λιωμένη δεξαμενή. Σε ένα δυαδικό σύστημα Co-Cr, η φάση fcc έχει χαμηλή ενέργεια, G , ενώ η φάση hcp είναι θερμοδυναμικά σταθερή σε θερμοκρασία δωματίου. Ωστόσο, στα κράματα Co-Cr από SLM, το μεγαλύτερο μέρος της φάσης fcc διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου λόγω της διαδικασίας ταχείας ψύξης. Κατά συνέπεια, αυξάνεται το όριο στερεού διαλύματος των στοιχείων κράματος, μειώνοντας έτσι τα ιζήματα και τον δενδριτικό διαφορισμό, διατηρώντας παράλληλα τον υπερκορεσμό. Αυτό οδηγεί στο αποτέλεσμα ισχυροποίησης στερεού διαλύματος και στο αποτέλεσμα ισχυροποίησης δεύτερης φάσης. Επομένως, τα κράματα SLM Co-Cr εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή, σκληρότητα και ολκιμότητα από τα CST κράματα Co-Cr λόγω των υψηλότερων: κλασμάτων fcc φάσης, και ορίων στερεού διαλύματος. Πάντως αρκετές μελέτες που έχουν εντοπίσει την hcp-ε συμφωνούν ότι η αναλογία της σε σχέση με την fcc- γ είναι χαμηλή, και επιπλέον σε αρκετές μελέτες που έχουν εντοπιστεί ιζήματα η αναλογία τους είναι χαμηλή σε σχέση με εκείνα που εντοπίζονται στη CST.¹¹⁰ Ακολούθως, αναφέρονται πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα ορισμένων ερευνών. Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι τα κράματα Co-Cr από SLM αποδίδουν μια διφασική δομή: τη μήτρα- γ και τα ιζήματα φάσης- σ .¹¹¹ Σε άλλες έρευνες, τα κράματα Co-Cr παρουσίασαν μια μονοφασική δομή,^{9,105} εξαλείφοντας την παρουσία δευτέρων φάσεων που υπάρχουν στη μέθοδο CST και τις πιθανές συνέπειες της γαλβανικής σύζευξης (coupling) μέσα στις φάσεις του κράματος.⁹ Άλλοι ερευνητές έχουν αναφέρει ότι τα SLM κράματα είχαν κυρίως τη φάση fcc- γ και σε μικρότερο βαθμό την hcp-ε.⁸⁸

Το μικρότερο μέγεθος κόκκων των κραμάτων SLM Co-Cr σχετίζεται στενά με τον ρυθμό πυρήνωσης (I) και καθορίζεται από τον ρυθμό υποψύξης- ΔT (undercooling), ήτοι λόγω του μεγαλύτερου ΔT που παράγει η τεχνική SLM συγκριτικά με τη CST, τα κράματα SLM Co-Cr διαθέτουν λεπτότερο μέγεθος κόκκων.¹¹⁰ Σημαντική είναι και η συνεισφορά του μικρού αρχικού μεγέθους της σκόνης (μέση διάμετρο $\sim 20 \mu\text{m}$), στο μικρότερο μέγεθος κόκκων. Από την άλλη πλευρά, στη μέθοδο CST, μέσα στην δεξαμενή του τήγματος του κράματος σχηματίζονται μεγαλύτεροι κόκκοι γύρω από τους μικροσκοπικούς πυρήνες οι οποίοι αναπτύσσονται έως ότου τα όρια των κόκκων συναντηθούν σε στερεά κατάσταση και ως αποτέλεσμα αυτού οι δενδριτικές δομές μπορεί να είναι πολύ μεγάλες.¹¹ Η εκλέπτυνση των κόκκων είναι ένας σημαντικός παράγοντας του SLM που βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων, ενισχύοντας όχι μόνο την αντοχή αλλά και την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων. Τα όρια των κόκκων (Grain Boundaries-GBs) λειτουργούν ως εμπόδιο στη διάδοση ρωγμών. Με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων, η περιοχή του GB αυξάνεται, αυξάνοντας έτσι την επίδραση της ενίσχυσης των κόκκων και



βελτιώνοντας περαιτέρω τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων. Όπως φαίνεται Εικόνα 5-12, η περιοχή GB του κράματος SLM (Εικόνα 5-12 δ, ε) είναι μεγαλύτερη από αυτή του χυτού (Εικόνα 5-12 α, β).¹¹⁰ Επιπλέον, επειδή η απόσταση πρωτογενών δενδριτών (primary dendrite spacing) στη λεπτόκοκκη μικροδομή των SLM Co-Cr κραμάτων είναι σημαντικά μικρότερη (2,5 μm) σε σύγκριση με εκείνη των CST, η εκλέπτυνση των κόκκων μειώνει το μήκος ολίσθησης (slip length) στο κράμα, βελτιώνοντας έτσι την αντοχή του κράματος (Εικόνα 5-13 β).¹¹⁰ Χαρακτηριστικά αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα της διαφοράς μεγέθους των κόκκων μεταξύ των δύο τεχνικών. Το 2013, οι Takaichi και συν¹¹¹ με τη διαφορά ότι ανέφεραν μέγεθος κόκκων για το SLM 3 μm και μήκος 50 μm , συμφωνούν με το αποτέλεσμα των Yager.^{105,111} Το 2015, οι Yager και συν¹⁰⁵ διαπίστωσαν ότι τα άγκιστρα Co-Cr που παράγονται από SLM έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος κόκκων (~ 5-80 μm) σε σύγκριση με τα CST (~ 200-300 μm), το οποίο αντισταθμίζει την έλλειψη του φαινομένου σκλήρυνσης από ιζήματα που υπάρχει στα CST.¹⁰⁵ Άλλοι ερευνητές παρατήρησαν στηλοειδείς κόκκους με μέσο μήκος 55 μm και ύψος 22 μm στα κράματα Co-Cr από SLM.¹¹⁰ Επιπλέον τα ιζήματα (στις μελέτες που έχουν εντοπιστεί) έχουν μικρό μέγεθος σε αντίθεση με τη τεχνική CST όπου το μέγεθος τους είναι μεγάλο.¹¹⁰



Εικόνα 5-12 Δεδομένα EBSD από CST και SLM κράματα Co-Cr. Χάρτης: IPF (α), GBs (β) και KAM (γ) CST κράματος, (δ) χάρτης IPF, (ε) χάρτης GB, (ζ) Χάρτης KAM του κράματος SLM Co-Cr.¹¹⁰ **Εικόνα 5-13** BSE εικόνες στιλβωμένων κραμάτων Co-Cr όπου με βέλη φαίνεται το μικροπορώδες στη μέθοδο CST (α), και SLM (β).¹¹⁰

Στο SLM, δημιουργείται ένας εξαιρετικά υψηλός ρυθμός ψύξης για να εξασφαλιστεί η ταχεία στερεοποίηση, με αποτέλεσμα συγκεκριμένες μικροδομές και υφές. Ένα από τα ζητήματα που αντιμετωπίζει η μέθοδος SLM είναι η ανισότροπη μικροδομή.^{112,19,110} Αυτό διότι ο προσανατολισμός των κόκκων, των ιζημάτων, και των MPBs εξαρτάται από την γωνία του δείγματος σε σχέση με τη κατεύθυνση κατασκευής, και ως εκ τούτου μπορεί να επηρεάσει την ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων.^{88,110,113} Λόγω της σχετικά χαμηλής αντοχής των MPBs σε σύγκριση με εκείνη των GBs, η ολίσθηση συμβαίνει κατά προτίμηση



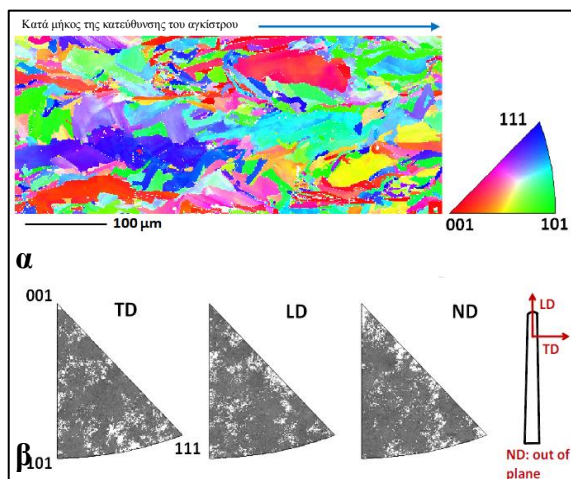
κατά μήκος των ορίων λιωμένης δεξαμενής.¹¹⁰ Επιπρόσθετα, η κατεύθυνση της γωνίας κατασκευής σε σχέση με το μοτίβο σύντηξης λέιζερ επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος (Εικόνα 5-14 β).¹¹⁴ Τα στοιχεία αυτά, αναλύονται στην ενότητα 6.2. Έτσι, λόγω της ανισοτροπίας, η μικροδομή, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες, η υφή και η συγκέντρωση υπολειμματικών τάσεων εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της κατασκευής.¹¹⁰ Ακολουθως, αναφέρονται τα αποτελέσματα 3 μελετών που σύγκριναν τη μικροδομή των SLM με τα CST κράματα, ενώ περισσότερες πληροφορίες για τα κράματα SLM θα δοθούν στην ενότητα της θερμικής κατεργασίας όπου αναφέρονται πληροφορίες στην κατάσταση as-built σε σχέση με την heat-treated.

Η εξέταση του προσανατολισμού και της υφής της μικροδομής στα δείγματα SLM Co-Cr, το 2013 στη μελέτη των Takaichi και συν¹¹¹, αποκάλυψε ότι τα κράματα εμφάνισαν την μήτρα γ η οποία αποτελούσε επίμηκους στηλοειδείς κόκκους με έντονο προτιμησιακό/ $\langle 001 \rangle$ προσανατολισμό και έντονη υφή που διαχωρίζονται από λεπτά στρώματα δευτέρας φάσης (σ) πλούσια σε Cr και Mo στα όρια των κόκκων. Οι επίμηκεις στηλοειδείς κόκκοι αποτελούνταν από λεπτούς κυτταρικούς δενδρίτες οι οποίοι ήταν παράλληλοι προς την κατεύθυνση κατασκευής και είχαν μέση διάμετρο $\sim 2,7 \mu\text{m}$.^{105,111} Αυτό διαφέρει σημαντικά από τη μικροδομή που ελήφθησε το 2015 από τους Yager και συν¹⁰⁵ και η οποία φαίνεται στην Εικόνα 5-14, και στην οποία παρατηρούνται μικροί αλλά κάπως επιμήκεις κόκκοι, με τυχαίο προσανατολισμό. Μερικές από τις μεγαλύτερες μάζες κόκκων περιέχουν πολλαπλά όρια υποκόκκων μικρής γωνίας και η δομή του κόκκου φαίνεται με ασθενή ή χωρίς υφή (μορφολογία) σε όλες τις κατευθύνσεις του δείγματος (Εικόνα 5-14 β, Εικόνα 5-15), ενώ σημειώνεται ότι ακόμη και οι κόκκοι που παρουσιάζουν ασθενή υφή, επίσης φαίνεται να μην έχουν συγκεκριμένη μορφολογία. Δεν παρατηρήθηκε δεύτερη φάση στις έρευνες του EBSD, όπως προαναφερθηκε εξάλλου (μονοφασική δομή, Εικόνα 5-16). Σημειώνεται σε αντίθεση με τα SLM, τα ιζήματα φάσης- σ των CST δειγμάτων ήταν διατεταγμένα σε διάφορες συγκεκριμένες κατευθύνσεις.¹⁰⁵ Το 2016, οι Kajima και συν¹¹⁵ ανέφεραν πως σε χαμηλή μεγέθυνση η μικροδομή των SLM κραμάτων αποτελούνταν (Εικόνα 5-17 α-γ) στις 0° από επιμήκη και στις 90° κατεύθυνσης κατασκευής σε σχήμα τόξου, MPBs. Σε υψηλότερη μεγέθυνση (Εικόνα 5-17 δ-ζ) πολλοί λεπτοί κυτταρικοί δενδρίτες με διάμετρο περίπου $0,5 \mu\text{m}$ παρατηρήθηκαν στις 0° , ενώ στις 90° ή 45° βρέθηκαν λεπτές στήλες με διάμετρο περίπου $0,5 \mu\text{m}$, επιμήκεις κατά μήκος της κατεύθυνσης κατασκευής. Σε χαμηλότερη μεγέθυνση των 90° (Εικόνα 5-17 η-ι) παρατηρήθηκαν MPBs, που είναι τυπικά της διαδικασίας SLM, ενώ σημειώνεται ότι η μικροδομή των δειγμάτων SLM ήταν αρκετά διαφορετική από εκείνη των CST η οποία αποτελούνταν από

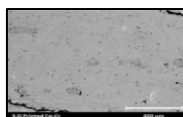


χονδροειδείς δενδρίτες με ορατά ιζήματα στις διαδενδριτικές περιοχές. Σημειώνεται, ότι οι κόκκοι 0° έδειξαν προτιμησιακό προσανατολισμό κοντά στον $\langle 001 \rangle$ προσανατολισμό της γ φάσης κατά την κανονική κατεύθυνση προς την επιφάνεια του σπασίματος, ενώ αντιθέτως οι κόκκοι των 45° και 90° δεν έδειξαν σημαντικό προτιμησιακό προσανατολισμό.¹¹⁵

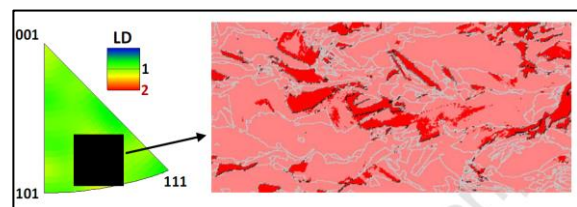
Οι διαφορές στις παραμέτρους κατασκευής έχουν αναγνωριστεί ως η πιθανή αιτία των διαφορών στη μικροδομή των κραμάτων Co-Cr που παράγονται από SLM.¹⁰⁵ Οι πρώτοι συγγραφείς της προηγούμενης παραγράφου, δήλωσαν ότι υπήρχε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των λειτουργικών παραμέτρων όπως ισχύς λέιζερ, το πάχος σάρωσης, το διάστημα σάρωσης και ο ρυθμός σάρωσης και του πορώδους, της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων του SLM κράματος.¹¹¹ Αντίστοιχα, οι δεύτεροι διαπίστωσαν ότι σε χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, σχηματίζονται μικροί κόκκοι χωρίς προτιμώμενους προσανατολισμούς, ενώ σε υψηλές ενεργειακές πυκνότητες, σχηματίζονται μεγάλοι κόκκοι με ισχυρή υφή κατά μήκος της κατεύθυνσης κίνησης του λέιζερ λόγω μιας μεγάλης θερμικής κλίσης που εμφανίζεται καθώς το λέιζερ κινείται πάνω από το δείγμα.¹⁰⁵ Επίσης, οι μικρότεροι δενδρίτες σε κράματα Co-Cr που παράγονται από SLM έχουν συνδεθεί με υψηλότερους ρυθμούς ψύξης σε συστήματα SLM που χρησιμοποιούν λέιζερ ιών σε σύγκριση με τα λέιζερ CO₂. Πάντως, οι λεπτόκοκκες κυτταρικές- ή στηλοειδείς-δενδριτικές (fine cellular- or columnar-dendritic) δομές των δειγμάτων SLM σε σύγκριση με τα CST δρουν ως εμπόδια στην κίνηση των εκτοπίσεων και μπορεί να αυξήσουν την αντοχή εφελκυσμού των κραμάτων SLM Co-Cr.¹¹⁰



Εικόνα 5-14 Χάρτης EBSD του δείγματος SLM Co-Cr: α) χάρτης προσανατολισμού με κωδικοποίηση χρώματος κατά μήκος του δείγματος (διαμήκης κατεύθυνση, LD) και β) IPF που φαίνεται η κατανομή προσανατολισμού στην εγκάρσια κατεύθυνση (TD), διαμήκης κατεύθυνση (LD) και κανονική κατεύθυνση (ND). Μόνο ένας ασθενής προτιμώμενος προσανατολισμός παρατηρείται σε οποιαδήποτε από τις κατευθύνσεις του δείγματος.¹⁰⁵

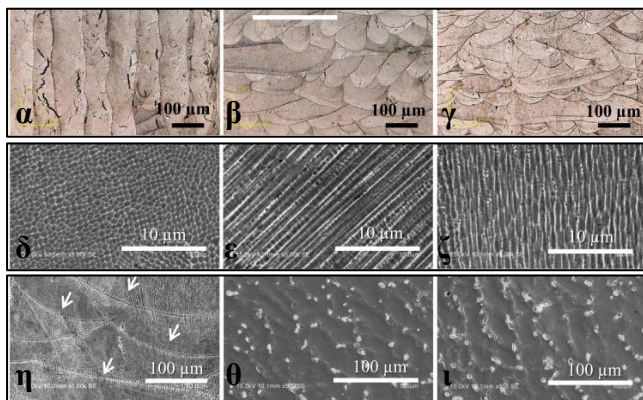


Εικόνα 5-16 BSE μονοφασικής δομής ενός SLM κράματος Co-Cr.¹⁰⁵



Εικόνα 5-15 IPF της έντασης του περιγράμματος του SLM κράματος Co-Cr στην κατεύθυνση κατά μήκος του αγκίστρου (LD), που αντιστοιχεί στην προηγούμενη μεσαία εικόνα β. Ενώ κάποια υφή είναι εμφανής, είναι πολύ ασθενής (μέγιστο 1,7, όπου το 1 είναι τυχαία υφή). Το σχήμα στα δεξιά επισημαίνει (με κόκκινο χρώμα) τους κόκκους που φαίνονται στην προηγούμενη πρώτη εικόνα β με προσανατολισμούς κατά μήκος της περιοχής υψηλότερης έντασης που φαίνεται στον αντίστροφο πόλο. Επομένως, αυτοί οι κόκκοι δεν φαίνεται να έχουν συγκεκριμένη μορφολογία.¹⁰⁵





Εικόνα 5-17 Μικροδομές κράματος των δειγμάτων SLM και των δειγμάτων CST. Εικόνες CLSM των (α) 0°, (β) 45° και (γ) 90°. Εικόνες SEM των (δ) 0°, (ε) 45° και (ζ) 90°, (η) 90°: προβολές χαμηλότερης μεγέθυνσης των (ζ), (θ) CST σκόνης και (ι) CST κυλίνδρου. Τα βέλη δείχνουν τα τετηγμένα όρια της δεξαμενής.¹¹⁵

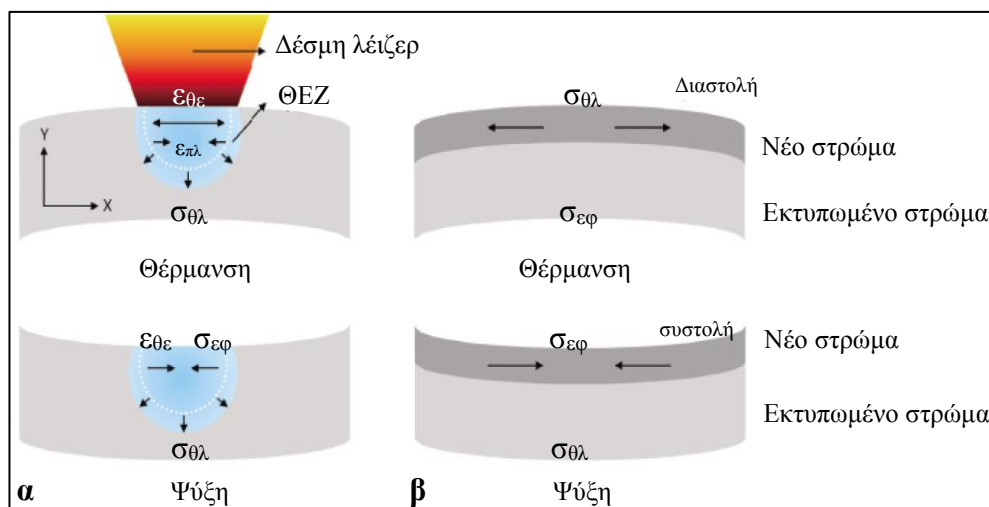
Πάντως, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας SLM, εμφανίζονται μοναδικές μικροδομές που μοιάζουν με «κλίμακες ψαριών» με βάση τις τετηγμένες δεξαμενές και τις στοιβές στρώσεων κάθε διαδρομής λέιζερ. Υπό υψηλή μεγέθυνση, σε πολλές μελέτες έχει αναφερθεί ότι παρατηρούνται, οι λεπτόκοκκες μικροδομές ως «κλίμακες ψαριών», και πολλοί στηλοειδείς κόκκοι που αναπτύσσονται κάθετα προς τα κυκλικά MPBs σχήματος τόξου.^{88,110,111,116} Επίσης, σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι, διασυνδεδεμένοι επιμήκεις κόκκοι με διαφορετικές κατευθύνσεις παρατηρούνται στις δενδριτικές δομές και η «γραμμική συγκόλλησης» και η τριδιάστατη υφή αυτών των κόκκων, που είναι παρόμοια με εκείνα των κοινών υφασμάτων (weaved fabrics) μπορεί να βελτιώσει την αντοχή του κράματος. Η στηλοειδής-κυτταρική ανάπτυξη των κόκκων σχετίζεται με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας.¹¹⁰

Στην τεχνική SLM, είναι θεωρητικά αποδεκτό ότι τα κράματα μπορούν να παραχθούν με σχεδόν έως και με 100% ονομαστική πυκνότητα.¹¹ Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα κράματα SLM παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με τα χυτά κράματα Co-Cr (Εικόνα 5-13).¹¹⁰ Για παράδειγμα, ερευνητές το 2007, εξασφάλισαν 99,9% πυκνότητα χρησιμοποιώντας βελτιστοποιημένο τεχνολογικό καθεστώς για το κράμα SLM Co-Cr.⁵² Άλλοι ερευνητές το 2011 εντόπισαν πορώδες λιγότερο από 1% για τα κράματα από SLM. Ερευνητές το 2019, εντόπισαν ελάχιστο πορώδες σε CST και SLM άγκιστρα.¹¹⁷ Πάντως, ο σχηματισμός πόρων στην τεχνική SLM εξαρτάται από την LED ή E_v (Laser Energy Density / Volume Energy Density = Ενεργειακή Πυκνότητα Λέιζερ / Ενεργειακή Πυκνότητα Όγκου), την E_i (Input Energy = Ενέργεια Εισόδου) και τις επιμέρους παραμέτρους αυτών,⁵² όπως αναλύεται σε επόμενη ενότητα, και έτσι μπορεί να ληφθούν από πορώδη μέχρι πυκνά κράματα¹¹⁸.

Μια παράμετρος που ονομάζεται «Kernel Average Misorientation (KAM)» υποδεικνύει κυρίως την παραμόρφωση του μικροσκοπικού πλέγματος, και χρησιμοποιώντας τη μπορεί να υπολογισθεί έμμεσα η κατανομή των υπολειπόμενων τάσεων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-12 γ, η τιμή KAM του κράματος SLM Co-Cr (Εικόνα 5-12 ζ) είναι υψηλότερη από αυτήν του CST κράματος Co-Cr, υποδεικνύοντας υψηλή κατανομή

υπολειμματικών τάσεων στο κράμα SLM Co-Cr. Η συσσώρευση μιας τόσο μεγάλης ποσότητας υπολειπόμενων τάσεων μπορεί να αποδοθεί στην ταχεία θέρμανση και ψύξη του SLM, το οποίο μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τις μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, λόγω της διαδικασίας διαστρωμάτωσης στρώμα-στρώμα στο SLM, υπάρχει μια σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του στρώματος που είχε εκτυπωθεί προηγουμένως και του στρώματος που έχει αποτεθεί πρόσφατα, και αυτή η διαφορά είναι ένας από τους παράγοντες που προκαλούν υπολειμματικές τάσεις. Ο μηχανισμός διαβάθμισης της θερμοκρασίας ή η ψύξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξηγήσουν τη δημιουργία υπολειμματικών τάσεων (Εικόνα 5-18). Για παράδειγμα, υπό την προϋπόθεση ότι τα υλικά είναι αρκετά λιωμένα και συμβαίνουν μεταλλουργικές συνδέσεις μεταξύ των στρωμάτων, οι τάσεις παραμένουν στο υλικό και σχηματίζονται υπολειμματικές τάσεις. Σε μια διαδικασία που βασίζεται σε λέιζερ, ένας πολύ υψηλός ρυθμός ψύξης της τάξης των 10^3 - 10^8 K/s σχηματίζει μια απότομη θερμική κλίση, με αποτέλεσμα υψηλές υπολειμματικές τάσεις, οι οποίες είναι κοντά στο όριο διαρροής του υλικού. Όταν οι υπολειμματικές τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής, η θερμότητα διατηρείται στο υλικό με τη μορφή υπολειμματικών τάσεων ακόμη και μετά την πλήρη απομάκρυνση της θερμότητας. Κατά συνέπεια, αυτό οδηγεί σε στρεβλώσεις όπως κάμψη, στρέβλωση, σχηματισμός πόρων, ρωγμές, αποκόλληση και πλαστική παραμόρφωση, υπονομεύοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, τα πρόωρα κατάγματα μπορούν να εμφανιστούν ακόμη και σε χαμηλά φορτία κυκλικής φόρτισης λόγω της μειωμένης αντοχής κόπωσης. Κατά συνέπεια, αυτά τα προβλήματα περιορίζουν την άμεση εφαρμογή των τμημάτων SLM μετά την κατασκευή τους. Έτσι, έχουν εισαχθεί μέθοδοι όπως η προθέρμανση σκόνης και της βάσης της πλάκας, μια ειδική στρατηγική γνωστή ως «στρατηγική σάρωσης νησιών» (island scanning strategy), η εκ νέου σάρωση και η θερμική επεξεργασία για τη μείωση των υπολειμματικών τάσεων των κραμάτων SLM Co-Cr. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, η θερμική επεξεργασία είναι η πιο οικονομική και αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση των υπολειπόμενων τάσεων. Η θερμική επεξεργασία επιτρέπει την πλήρη απομάκρυνση των υπολειπόμενων τάσεων στο κράμα, διασφαλίζοντας παράλληλα τον σχηματισμό ομοιογενών μικροδομών, βελτιώνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων.¹¹⁰ Πιο εκτενής αναφορά γίνεται σε ειδική ενότητα.

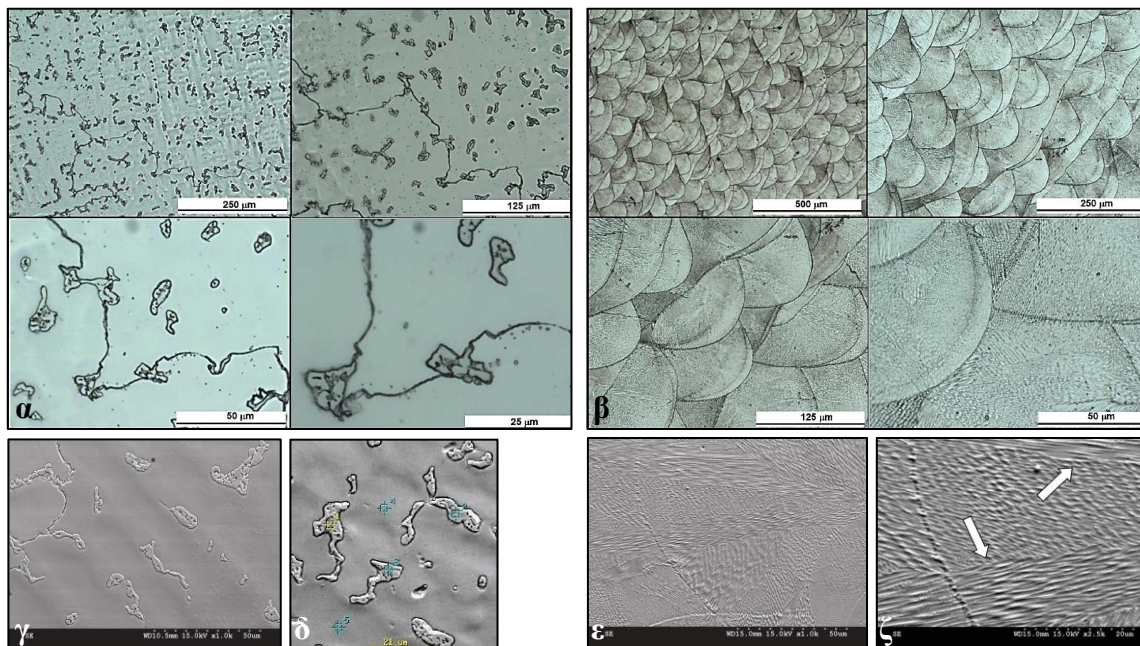




Εικόνα 5-18 Μηχανισμός κλίσης θερμοκρασίας. Υπολειμματική τάση (α) με βάση τη θέρμανση και την ψύξη ($\epsilon_{\theta\epsilon}$: θερμική παραμόρφωση, $\epsilon_{\pi\lambda}$: πλαστική παραμόρφωση, $\sigma_{\theta\lambda}$: θλιπτική τάση, $\sigma_{\epsilon\phi}$: τάση εφελκυσμού). Υπολειμματική τάση (β) στη σύνδεση με το στερεοποιημένο στρώμα.¹¹⁰

Το 2014 οι Puskar και συν¹⁰⁶ ανέφεραν ότι τα κράματα DMLS παρουσιάζουν πιο λεπτόκοκκη και ομοιογενή δομή από τα CST, αποτελούμενη από κρυστάλλους και διαμεταλλικές ενώσεις, ενώ ευδιάκριτες είναι και μορφές κυκλικών ορίων και κυμάτων σε σχήμα τόξου οι οποίες αντιστοιχούν σε ίχνη σάρωσης με λέιζερ ή στις λεγόμενες δεξαμενές τήξης και φαίνεται να είναι όλες προσανατολισμένες προς την ίδια κατεύθυνση. Μια ομάδα ερευνητών διαπίστωσε ότι η ομοιογενής μικροδομή των DMLS κραμάτων αποτελείται από φάσεις γ και ϵ . Η φάση ϵ σχηματίστηκε από τον αθερμικό μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και κατανεμήθηκε ως δίκτυο λεπτών ελασμάτων εντός της γ φάσης.⁵² Το 2020, οι Augustyn-Nadzieja και συν¹⁰⁷ απέδειξαν ότι, τα δείγματα C-CST και DMLS είχαν μια δενδριτική δομή. Πιο αναλυτικά, τα δείγματα C-CST (Εικόνα 5-19 α, γ, δ), είχαν τη μήτρα-κόκκοι (δενδρίτες) αποτελούμενη από διάλυμα Cr και Mo σε Co, ενώ ιζήματα φάσεων καρβιδίου υπήρχαν στις διαδενδριτικές περιοχές, που προέκυψαν από τον χημικό διαφορισμό των Mo και Cr (δηλαδή υπήρχε διαφορισμός της χημικής σύνθεσης). Η δενδριτική δομή είναι ιδίως εμφανής σε χαμηλή μεγέθυνση στην Εικόνα 5-19 α πάνω αριστερά. Η μικροδομή των δειγμάτων που ελήφθησαν με τη μέθοδο DMLS, έμοιαζε με «κλίμακες ψαριών» υπό χαμηλή μεγέθυνση και σε αυτή διακρίνονταν τα ίχνη της διασταυρούμενης δέσμης λέιζερ (Εικόνα 5-19 β, ε, ζ), ενώ ουσιαστικά χαρακτηρίστηκε από λεπτούς κόκκους (Εικόνα 5-19 δ) με πολυκατευθυντική κρυστάλλωση (Εικόνα 5-19 ζ), με τα όρια των κόκκων να παρουσιάζουν γεωμετρική ποικιλομορφία (Εικόνα 5-19 ε, ζ), ενώ επίσης παρατηρήθηκε το φαινόμενο της επιταξιακής ανάπτυξης των δενδριτών (δηλαδή η ανάπτυξη του ήδη υπάρχοντος κρυστάλλου μέσω των διαδοχικών λιωμένων στρωμάτων), και επιπλέον σημειώνεται ότι υπήρχε

ομοιογένεια της χημικής σύνθεσης. Οι άξονες δενδρίτη που σχηματίζονται στη μικροδομή ακολουθούν την κατεύθυνση απομάκρυνσης θερμότητας κατά τη διαδικασία κρυστάλλωσης και οι δενδρίτες διατηρούν τις κατευθύνσεις τους και διατρέχουν τα όρια των κόκκων (ε, ζ). Οι κύριοι άξονες δενδρίτη είναι μακριοί και όχι πολύ διακλαδισμένοι, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κατευθυντική κρυστάλλωση προχωρά με υψηλό ρυθμό.¹⁰⁷



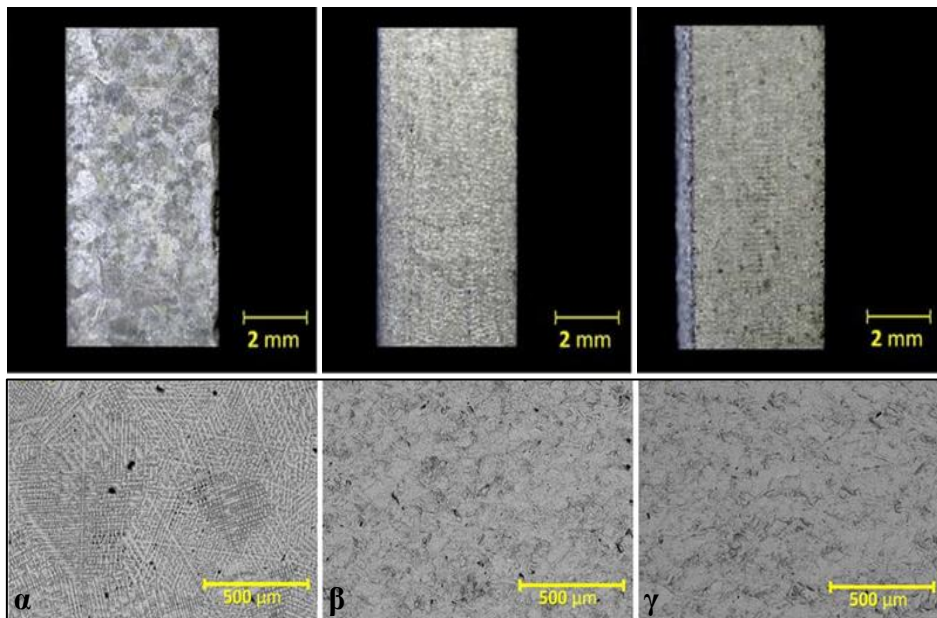
Εικόνα 5-19 Μικροδομή υπό μικροσκόπιο σε χαμηλή μεγέθυνση (α, β) και υψηλότερη με SEM (γ-ζ), των κραμάτων Co-Cr από CST (α, γ, δ) και DMLS (β, ε, ζ).¹⁰⁷

Η τεχνολογία SLM, αναπτύχθηκε μετά την τεχνολογία SLS, και ένας από τους λόγους είναι ότι αντικείμενα που κατασκευάζονταν με μερική τήξη χαρακτηρίζονταν από υψηλό πορώδες. Συγκεκριμένα έχει δειχθεί ότι τα αντικείμενα μερικής τήξης, αρχικά παρουσιάζουν σημειακές μόνο επαφές μεταξύ των σωματιδίων, και κατά τη διάρκεια της θέρμανσης με λέιζερ, διάφοροι μηχανισμοί πυροσυσσωμάτωσης και αναδιάταξης προκαλούν την σύνδεση και πύκνωση (densification) της σκόνης. Πάντως, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία μερικής τήξης, γενικά δεν είναι δυνατή η πλήρης εξάλειψη του πορώδους, καθώς προκύπτουν απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων σε υψηλή αναλογία του υγρού συνδετικού τμήματος,¹¹⁹ και λόγω του φαινομένου δημιουργίας σφαιρών (balling phenomenon) το οποίο αναλύεται σε επόμενη ενότητα.¹¹⁰ Επιπρόσθετα, από αρκετές μελέτες έχει δειχθεί ότι πυκνότητα των κραμάτων DMLS είναι υψηλότερη από ότι εκείνη των κραμάτων CST περίπου κατά 4,5 % κατά μέσο όρο.¹⁰⁶ Ακόμη, ορισμένοι ερευνητές που διερεύνησαν μεταξύ άλλων και το πορώδες, ανέφεραν ότι η ομοιογένεια στη μικροδομή και το πορώδες και το μικρότερο μέγεθος κρυστάλλων και κόκκων των κραμάτων SLS και DMLS έχουν θετική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες και τις ιδιότητες κόπωσης και τα καθιστούν καταλληλότερα στην κατασκευή σκελετού Μ.Ο. από τα κράματα CST. Πιο αναλυτικά, η fcc φάση υπήρχε



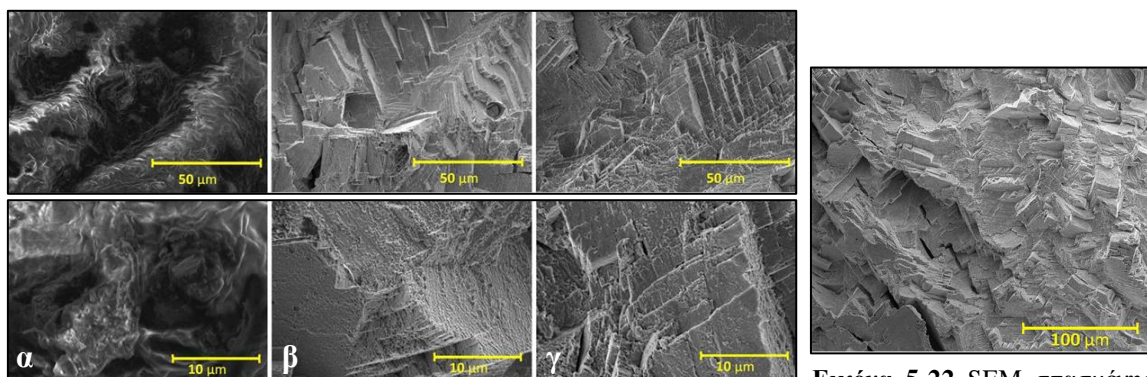
σε όλες τις ομάδες ωστόσο, τα κράματα SLS εμφάνισαν μια επιπλέον την hcp Co-Mo που δεν υπήρχε στις άλλες ομάδες. Αυτό θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα του μετασχηματισμού φάσης από fcc σε hcp φάση κατά τη διάρκεια της ταχείας ψύξης της διαδικασίας σύντηξης με λέιζερ, καθώς σε αντίθεση με τη μέθοδο DMLS η μεταλλική σκόνη κραμάτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία με τη μέθοδο SLS εκτίθεται σε θερμοκρασίες κάτω από τη φάση μετάβασης. Προηγούμενες μελέτες ανέφεραν ότι η παρατηρούμενη φάση (hcp) επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων και βελτιώνει την αντοχή τους, την αντοχή στη αποτριβή και τη σκληρότητα.²¹² Το μέγεθος κρυστάλλων των κραμάτων CST (16,3±2,2 nm) και DMLS (16,2±2,1 nm) ήταν παρόμοιο, αλλά μεγαλύτερο από εκείνο και των κραμάτων SLS (14,6±1,1 nm) ($p < 0,05$). Οι γυαλισμένες επιφάνειες των κραμάτων CST (Εικόνα 5-20) αποκάλυψαν μεγάλους κόκκους με διαφορετικά όρια κόκκων μέσα στην επιφάνεια ενώ εκείνες των κραμάτων SLS και DMLS παρουσίασαν μια εκλεπτυσμένη εμφάνιση μικροδομής. Επιπρόσθετα, αν και το πορώδες των κραμάτων CST ήταν ελαφρώς χαμηλότερο από αυτό των κραμάτων SLS (συνολικοί πόροι 4610±693, 5507±573 αντίστοιχα και για το DMLS 5522±644), η πλειονότητα των πόρων στα κράματα SLS ήταν κλειστοί, ενώ το ποσοστό ανοικτού πορώδους ήταν παρόμοιο σε όλα τα κράματα. Είναι γνωστό ότι τα ανοικτά πορώδη στην επιφάνεια μπορούν να αποτελέσουν θέσεις για έναρξη ρωγμών και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν την αντίσταση στην κόπωση των κραμάτων. Συνεπώς, το γεγονός ότι το κλειστό πορώδες επηρεάζει την αντίσταση στη κόπωση λιγότερο από ότι το ανοικτό μπορεί να είναι ο λόγος για τον σχετικά χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας των κραμάτων SLS σε αυτή τη μελέτη. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματά έδειξαν ότι το πορώδες στα κράματα SLS και DMLS ήταν περισσότερο ισοτροπικό από ότι στην ομάδα CST, και αυτό δείχνει ότι τα πορώδη στα κράματα SLS και DMLS είναι πιο προσανατολισμένα για τον ίδιο όγκο από ό, τι στα κράματα CST.⁵¹ Οι Schweiger και συν¹¹⁸ (2020) εντόπισαν στα DMLS άγκιστρα υψηλότερη συχνότητα (1059 και 787 πόρων στην ομάδα DMLS και AM+CST αντίστοιχα, $p < 0,001$) αλλά πιο ομοιογενές μέγεθος και κατανομή και σημαντικά μικρότερο μέσο ($p = 0,009$) και συνολικό όγκο ($p < 0,001$) εσωτερικών πόρων σε σχέση με τα CST άγκιστρα. Σημειώνεται, ότι οι πορώδεις χυτοί σκελετοί οφείλονται κυρίως στη συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης και της πίεσης που προκαλείται από διαλυμένα αέρια, παρουσιάζοντας μια ετερογενή κατανομή ελαττωμάτων.¹¹⁸





Εικόνα 5-20 Οπτικό μικροσκόπιο (άνω οριζόντια) και SEM (κάτω οριζόντια) στις στιλβωμένες επιφάνειες των κραμάτων CST (α), SLS (β) και DMLS (γ).⁵¹

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υψηλή ομοιογένεια των ψηφιακών κραμάτων επιβεβαιώνεται και μέσα από την παρατήρηση των επιφανειών θραύσης τους. Στην Εικόνα 5-21 παρατηρούνται οι διαφορές στις επιφάνειες θραύσης των κραμάτων CST, SLS και DMLS. Ως αποτέλεσμα της ομοιογενούς μικροδομής των κραμάτων SLS και DMLS παρατηρούνται ρωγμές τύπου σφήνας και οργανωμένες διαδρομές θραύσης, σε αντίθεση με τα κράματα CST που εμφανίζουν μη-οργανωμένες διαδρομές θραύσης. Σημειώνεται ότι η ύπαρξη ομοιογενούς μικροδομής είναι επωφελής, μεταξύ άλλων, για τη μείωση των αστοχιών των αγκίστρων Μ.Ο. επειδή προωθεί την ομοιογενή παραμόρφωση ολίσθησης, η οποία με τη σειρά της μειώνει τις υπολειπόμενες τάσεις, και τις συγκεντρώσεις τάσεων, σε αντίθεση με τη μη ομοιογενή μικροδομή που παρατηρείται στα δείγματα CST.⁵¹ Αντίστοιχα στην Εικόνα 5-22 φαίνονται τα αποτελέσματα από μια άλλη μελέτη, όπου διακρίνεται η θραυσθείσα επιφάνεια ενός κράματος Co-Cr που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με SLM, και στην οποία και εδώ διακρίνεται μια ομοιογενή και οργανωμένη διαδρομή θραύσης.⁴⁷



Εικόνα 5-21 Αντιπροσωπευτική μικρογραφία SEM στις σπασμένες επιφάνειες των CST (α), SLS (β) και DMLS (γ) Co-Cr κραμάτων με μεγέθυνση 2500 x και 10.000 x.⁵¹

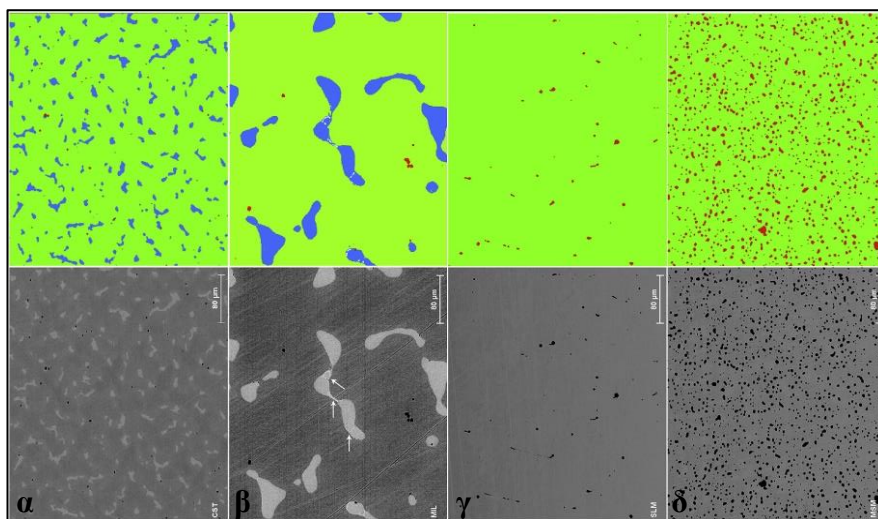
Εικόνα 5-22 SEM σπασμένης SLM επιφάνειας ενός κράματος Co-Cr.⁴⁷



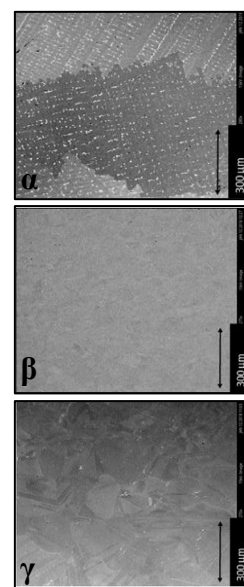
Μελέτες σύγκρισης μεταλλοκεραμικών κραμάτων έχουν δείξει τα εξής. Το 2016, οι Kim και συν⁶¹ εντόπισαν σε όλες τις ομάδες των κραμάτων Co-Cr την μήτρα γ (Co-fcc), και αναλυτικότερα: στην SLM εντοπίστηκε μόνο αυτή με λεπτούς κόκκους, στις ομάδες CST και H-MIL εντοπίστηκαν μαζί με τη μήτρα (τυπικοί δενδριτικοί κόκκοι) δύο ενδομεταλλικές φάσεις που υποτίθεται ότι ήταν οι φάσεις ϵ (W-hcp) και γ (Nb-fcc) και οι οποίες κατακρημνίστηκαν κατά μήκος των ορίων των κόκκων, και στην ομάδα S-MIL ανιχνεύθηκαν καρβίδια $M_{23}C_6$ ($M = Cr, Co, Mo$) στις περιοχές ορίων των κόκκων καθώς επίσης και ένα μικρό τμήμα μιας φάσης ϵ (hcp) με βάση το Co μαζί με μια φάση γ (fcc) με βάση το Co. Σε όλες τις ομάδες υπήρχε επιπλέον η συμπερίληψη Si, ενώ η στοιχειακή κατανομή του C ανιχνεύθηκε μόνο στην ομάδα S-MIL. Η ομάδα H-MIL (περίπου 4000 μ m) έδειξε ένα σημαντικά μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων από την ομάδα CST (περίπου 1500 μ m), και από τις ομάδες SLM και S-MIL που παρουσίασαν λεπτούς κόκκους με παρόμοιο μέγεθος (περίπου 30 έναντι 35 μ m, αντίστοιχα) που αναγνωρίστηκαν από μια αντίθεση ασθενούς προσανατολισμού και επιπλέον, η ομάδα S-MIL είχε σημαντικό αριθμό διδύμων κρυσταλλικών επιπέδων μέσα στη φάση μήτρας.⁶¹ Οι Al Jabbari και συν¹²⁰ (2019) συγκρίνοντας κράματα Co-Cr που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας CST, H-MIL, SLM, S-MIL ανέφεραν ότι συντίθενται από διαφορετικές φάσεις (Εικόνα 5-23). Τα δείγματα CST συντίθενται από 2 φάσεις, με μια διασπαρμένη 2^η φάση που καταλαμβάνει τους ενδοδενδριτικούς χώρους με υψηλότερο μέσο ατομικό αριθμό από την κύρια φάση και κυρίως πλούσια σε Mo και λιγότερο σε Cr και χωρίς Co. Λόγω της διαφορετικής σύνθεσης και της κρυσταλλικής δομής ο σχηματισμός αυτής της ογκώδους φάσης θεωρείται ανεπιθύμητος επειδή αυξάνει την ψαθυρότητα και επιδεινώνει την αντίσταση στην διάβρωση του κράματος απομακρύνοντας το Mo από το στερεό διάλυμα. Τα δείγματα MIL συντίθενται από 3 φάσεις, με μια 2^η φάση με μεγαλύτερο μέσο ατομικό αριθμό αντίστοιχο της μήτρας, παρόμοια με εκείνη του CST αλλά με περισσότερη ογκώδη μορφολογία, κυρίως πλούσια σε Mo και λιγότερο σε Cr και μια 3^η φάση ακόμη μεταξύ 1^{ης} - 2^{ης}, με περισσότερο Mo εξαντλημένη από Cr συγκριτικά με το περιεχόμενο της μήτρας και η οποία προωθεί την περαιτέρω εξάντληση του Mo στη μήτρα, γεγονός που προκαλεί μείωση στην αντίσταση διάβρωσης. Το Mo προστίθεται επίσης στα κράματα Co-Cr για να επιτευχθεί μια πιο λεπτόκοκκη δομή, ενισχύοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Αυτό το ευνοϊκό αποτέλεσμα ελαττώνεται όταν το Mo είναι διασκορπισμένο σε ενώσεις-περιοχές πλούσιες σε Mo αντί να διασκορπισμένο στη μήτρα. Τα δείγματα από SLM και MIL συντίθενται από 1 φάση (σε άλλη έρευνα αναφέρεται ότι το SLM υπάρχει και μεγαλύτερη διασπορά σωματιδίων δεύτερης φάσης⁵⁰), γεγονός που συνεπάγεται μια τελείως διαφορετική στερεοποίηση και μια πιο ομοιογενή κατανομή των στοιχείων κράματος σε



σχέση με τις τεχνικές MIL και CST. Δεν εντοπίστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των 4 μεθόδων κατασκευής στη στοιχειακή σύνθεση συμπεριλαμβανομένου του περιεχομένου C.¹²⁰ Οι Padrós και συν¹²¹ (2020), στην μελέτη τους, (Εικόνα 5-24) για την τεχνική H-MIL παρατήρησαν ομοιογενή δομή με ισοαξονικούς κόκκους με διδυμία (αυτή η μικροδομή είναι χαρακτηριστική της κατάστασης ανόπτησης χωρίς υπολειμματική τάση που ευνοεί την αντοχή στη διάβρωση), για την τεχνική SLM παρατήρησαν κόκκους χωρίς διδυμία (μπορεί να είναι ενδεικτικοί της έλλειψης υπολειμματικών τάσεων). Σε υψηλότερη μεγέθυνση αυτής της μικροδομής, πλούσια ιζήματα σε Cr, W και Nb αποκαλύφθηκαν. Αυτή η χημική ετερογένεια είναι πιο επιρρεπής στη διάβρωση. Τα δείγματα CST έδειξαν την τυπική δενδριτική μικροδομή με την παρουσία μιας μεγάλης ποσότητας ιζημάτων πλούσιων σε Cr, W και Nb, τόσο στα όρια των κόκκων όσο και στους κόκκους. Η μικροδομική ανάλυση αντικατοπτρίζει επίσης ένα χονδροκρυσταλλικό μέγεθος κόκκων στα χυτά δείγματα, των οποίων οι κόκκοι αντιπροσωπεύονται σε κλίμακα του γκρι ως συνάρτηση του κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού τους.¹²¹



Εικόνα 5-23 Η κάτω οριζόντια στήλη επιδεικνύει την μικροδομή δειγμάτων (α) CST, (β) H-MIL, (γ) SLM και (δ) S-MIL. Παρατηρείται διασπορά μιας δεύτερης φάσης στα CST και H-MIL δείγματα και η απουσία μιας τέτοιας φάσης στα δείγματα SLM και S-MIL. Μια τρίτη φάση ανιχνεύεται επίσης στην S-MIL (υποδεικνύεται με βέλη). Η άνω οριζόντια στήλη επιδεικνύει τις ίδιες εικόνες κατόπιν επεξεργασίας τους όπου η κύρια φάση φαίνεται με πράσινο χρώμα, οι διεσπαρμένες φάσεις με μπλε και άσπρο, και οι άσπροι πόροι με κόκκινο.¹²⁰

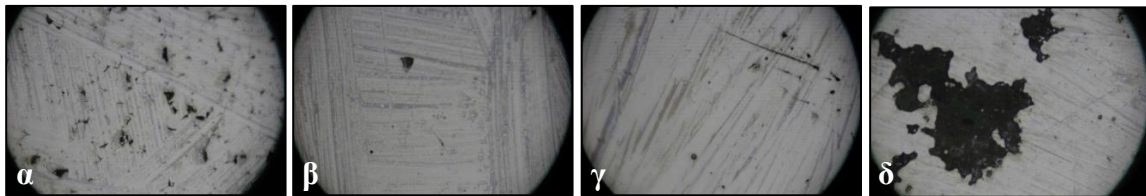


Εικόνα 5-24 Μικρογραφίες SEM (300 x) μικροδομών (α) CST, (β) SLM και (γ) H-MIL.¹²¹

Ορισμένοι ερευνητές, ανέφεραν ότι ο σχηματισμός μικροδομικών ελαττωμάτων (Εικόνα 5-25) μπορεί να ελεγχθεί καλύτερα και να αποφευχθεί στις μεθόδους SLM και H-MIL, σε σχέση με τις τεχνικές CST και SLS (μόνο τα κράματα της μεθόδου CST είναι αμιγώς μεταλλοκεραμικά). Αυτό προέκυψε από το γεγονός ότι εντός των κραμάτων SLS παρατηρήθηκαν μεμονωμένα ή διασυνδεδεμένα κενά με μεγέθη έως 45 µm, προερχόμενα από σκληρά συσσωματώματα ή ανεπαρκής «πακετάρισμα» των σωματιδίων της σκόνης πριν



από τη σύντηξη. Η επιφάνεια των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με CST περιείχε οπές με αυλακώσεις ως αποτέλεσμα ημιτελούς τήξης, με διαστάσεις μεταξύ 20 και 350 μm . Στα δείγματα H-MIL εντοπίστηκαν αφενός χαραγές που πιθανώς προκλήθηκαν κατά τη διαδικασία του τελικού φρεζαρίσματος και μερικά μικρά κενά μεγέθους έως 20 μm . Τα SLM δείγματα είχαν την καλύτερη μικροδομή, με τα λιγότερα κενά διαστάσεων έως 25 μm .⁴⁶ Σύμφωνα με άλλους ερευνητές, τυχαία διασπορά μικρών σφαιρικών πόρων εντοπίζεται και στις μεθόδους H-MIL, SLM, και CST, κυρίως όμως και μεγαλύτερου βήθους μόνο στα χυτά δείγματα κεντρικά.¹²² Κατά άλλους διάχυτη και σημαντικά υψηλότερη κατανομή των πόρων παρουσιάζεται στην S-MIL που αποδίδεται στην επικάλυψη (necking) της μεταλλικής σκόνης κατά τη διάρκεια της σύντηξης και στην πιθανή παραμονή οργανικού συνδετικού υλικού, ενώ κατά άλλους η ομάδα CST έχει εσωτερικές ατέλειες και πόρους, σε σύγκριση με τις SLM, H-MIL, S-MIL που δεν έχουν.^{50,120,123} Σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι, μεταξύ των τεχνικών SLM, CST, H-MIL η παρουσία μικροπορώδους και μάλιστα διάσπαρτου εντοπίστηκε μόνο στα CST.³⁷



Εικόνα 5-25 Μικροδομικά ελαττώματα που παρατηρούνται με οπτικό μικροσκόπιο σε καλά στιλβωμένες επιφάνειες του κράματος Co-Cr που κατασκευάστηκε με: SLS (α), SLM (β), H-MIL (γ) και CST (δ).⁴⁶

Τα δίδυμα κρυσταλλικά επίπεδα (twin boundaries), ένα ειδικό είδος συνεκτικού ορίου με χαμηλή ενέργεια, συμβάλλουν σε πολλές υλικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της διεπιφανειακής ενέργειας, της οριακής διάχυσης και της οριακής κινητικότητας. Η διδυμιακή παραμόρφωση παρατηρείται συχνά σε πολλά μέταλλα fcc ή hcp όταν παραμορφώνονται σε χαμηλές θερμοκρασίες ή/και σε υψηλούς ρυθμούς καταπόνησης, συνθήκες που καταστέλλουν την κίνηση εκτοπίσεων. Τα δίδυμα κρυσταλλικά επίπεδα μπορεί να είναι αποτελεσματικά στον αποκλεισμό των κινήσεων μετατόπισης από έναν κόκκο στον άλλο, χρησιμεύοντας ως φράγματα, παρόμοια με τα συμβατικά όρια κόκκων. Φαίνεται ότι τα δίδυμα κρυσταλλικά επίπεδα σχηματίζονται για να ανακουφίσουν την τάση κατά τον μετασχηματισμό fcc \rightarrow hcp αμέσως μετά την ψύξη μετά τη σύντηξη, συμβάλλοντας έτσι στις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου κράματος.⁶¹

5.2.2 Ιδιότητες

5.2.2.1 Επιφανειακές

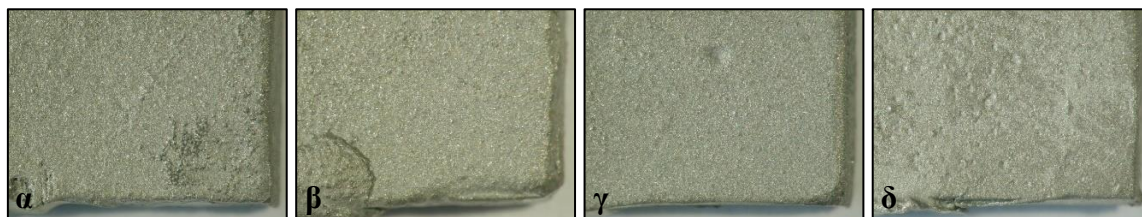
Η ποιότητα (μορφολογία και τραχύτητα), δομή και σύνθεση της επιφάνειας των κραμάτων Co-Cr αποτελεί πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, επειδή μπορεί να επηρεάσει άμεσα ή έμμεσα την πρόσφυση των μικροοργανισμών (για να συμβεί μικροβιακή πρόσφυση είναι απαραίτητη μια ελάχιστη τραχύτητα 0,2 μm), την βιοσυμβατότητα, τη διάβρωση και την αντίσταση στη κόπωση.^{11,57,124–126}

Η επιφάνεια των CST κραμάτων μπορεί να αποτελείται από εξωτερικές μεταλλικές προεξοχές, μικρές ατέλειες και ήπιο πορώδες (Εικόνα 5-26).⁴⁵ Η τραχύτητα της επιφάνειας των CST κραμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό, τόσο από την επιφανειακή κατάσταση του κράματος αμέσως μετά τη χύτευση (as-cast) όσο και από την κατεργασία του μετά τη χύτευση.¹²⁶

Μελέτες έχουν δείξει ότι η τραχύτητα (περίπου λιγότερο από 100 μm) της επιφάνειας σκελετών και αγκίστρων που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SLM κράματος Co-Cr^{112,115,127} (και άλλες μελέτες που αφορούν το τιτάνιο) δεν είναι ανώτερη από εκείνη που αποκτάται μέσω της CST, εκτός από μία η οποία όμως αφορά το κράμα Ti-6Al-4V.¹⁹ Η τραχύτητα της επιφάνειας του σκελετού SLM επηρεάζεται κυρίως από το «φαινόμενο της κλίμακας (stair-step effect)» το οποίο είναι ένα τυπικό μειονέκτημα των τεχνικών AM που οφείλεται στην ίδια τη φύση της τεχνολογίας αυτής, και το φαινόμενο αυτό επηρεάζει όλες τις επιφάνειες ιδιαίτερα τις κεκλιμένες και τις καμπύλες με αποτέλεσμα να μειώνει την ποιότητα της επιφανειακής μορφολογίας, την ακρίβεια και την εφαρμογή του σκελετού (ο σκελετός SLM δεν εφαρμόζει στα δόντια-στηρίγματα και για το λόγο αυτό καθίσταται η μεταεπεξεργασία απαραίτητη). Η τραχύτητα των σκελετών PBF εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως από τις παραμέτρους επεξεργασίας, τη θέση και τον προσανατολισμό κατασκευής και την επιλογή των στηριγμάτων (supports), και τη τελική επεξεργασία.⁸⁸ Η επιφανειακή τραχύτητα στην τεχνική υβριδικής επεξεργασίας (HM) ($R_a = 0,8 \mu\text{m}$) είναι ανώτερη από εκείνη της CST ή SLM ($R_a = 6,4$), και αυτό σε μια μελέτη αποδόθηκε στο γεγονός ότι η HM πραγματοποιήθηκε με πολυστρωματική σύντηξη με 50 μm μέγεθος σωματιδίων και οι στρώσεις επιφανειών κόπηκαν αφού το πολυστρωματικό στρώμα έφτασε τα 500 μm με αποτέλεσμα την λήψη μιας επιφάνειας παρόμοιας με τη συμβατική επιφάνεια κοπής, και ως εκ τούτου η τραχύτητα της HM εξαρτάται από τη φρέζα.^{112,127} Στον Πίνακα 5-1 όπου πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ των μεθόδων φαίνεται ότι η τραχύτητα της επιφάνειας (R_a) των SLM εφραπτήρων είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη που παράγεται με τη



μέθοδο CST ($P < 0,05$), ενώ δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην Ra του βραχίονα αγκίστρου ($P > 0,05$) μεταξύ τους. Επιπλέον, η Ra των βραχιόνων και των εραπτήρων των αγκίστρων που παράγονται με HM είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της CST ($P < 0,05$).¹⁹ Η τραχύτητα στην AM+CST είναι μεγαλύτερη από εκείνη του C-CST αλλά μικρότερη από εκείνη του SLM.⁵²



Εικόνα 5-26 Απεικόνιση χαμηλής μεγέθυνσης (16 x) της επιφάνειας του δείγματος as-cast από κράμα: α) Biosil F, β) Wironit Extra hard, γ) Remanium GM 800+, δ) Remanium Star.⁴⁵

Πίνακας 5-1 Επιφανειακή τραχύτητα: Ra (μm) των σκελετών Μ.Ο. από κράματα Co-Cr.^{19,112,115,127,128}

Τμήμα	Άρθρα	SLM						SLM + MIL		CST		ν
		Κάθετα ^α		45 βαθμούς ^β		Οριζόντια ^γ		μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	
		μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ					
Βραχίονας αγκίστρου	51	18.2	0.3	13.7	0.4	10.2	0.3	-	-	10.2	0.4	5
	93	3.0	0.1	2.6	0.04	2.4	0.2	-	-	-	-	5
	Ομαδ.	10.6	8.0	8.2	5.8	6.3	4.1			10.2	0.4	
Εραπτήρας	190	-	-	5.5	1.1	-	-	0.6	0.2	2.4	0.8	5
	189	-	-	4.9	0.8	-	-	0.6	0.2	2.5	0.9	5
	Ομαδ.			5.2	1.0			0.6	0.2	2.5	0.8	

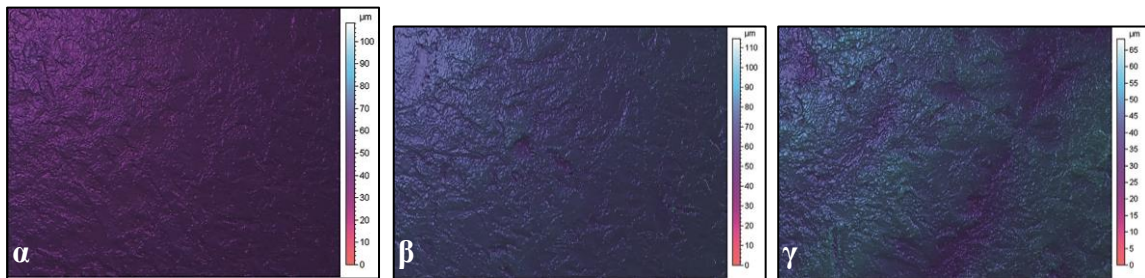
Η κατεύθυνση του βραχίονα του αγκίστρου με την πλατφόρμα κατασκευής: ^α κάθετα = 0° ως προς τη κατεύθυνση κατασκευής, ^β 45°, ^γ οριζόντια = 90°.

Ομαδ.: ομαδοποίηση.

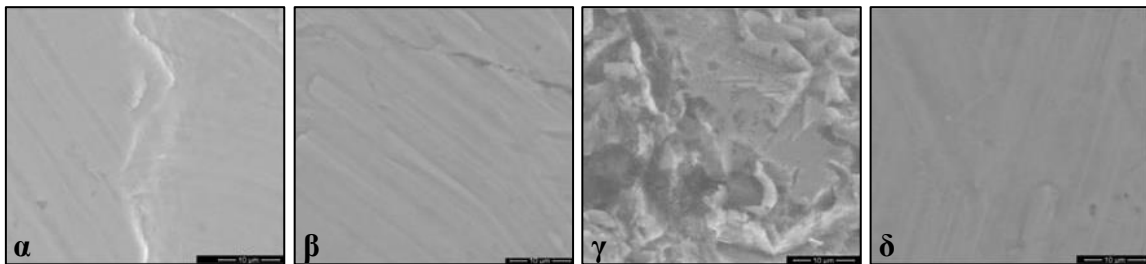
Τα DMLS κράματα Co-Cr έχουν την τραχύτερη επιφάνεια, ενώ κατά φθίνουσα σειρά ακολουθούν εκείνα των τεχνικών H-MIL και I-MIL (αμιγώς μεταλλοκεραμικό) (σκληρή και έμμεση κοπή) (Εικόνα 5-27).¹²⁹ Μια ομάδα ερευνητών, συγκρίνοντας 4 κράματα Co-Cr τα οποία κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας CST (αμιγώς μεταλλοκεραμικό), H-MIL, SLS και SLM, έδειξαν ότι, ακόμα και αν η διαφορά μεταξύ των χημικών συνθέσεων των Co-Cr κραμάτων που χρησιμοποιούνται στις διαφορετικές τεχνολογίες κατασκευής είναι μικρή, τα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά των Co-Cr αυτών κραμάτων είναι διαφορετικά (Εικόνα 5-28). Η τραχύτητα από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη βρέθηκε για τις τεχνικές SLM, CST, SLS και H-MIL (Εικόνα 5-29), και γενικώς η H-MIL παρουσίασε τα καλύτερα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Σημειώθηκε, ότι τα έμμεσα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών SLS και SLM συνοδεύονται από πορώδη που προέκυψαν μετά την απόθεση της λεπτής μεταλλικής σκόνης, ειδικά για τη μέθοδο SLM.⁸⁶ Άλλοι ερευνητές, μελετώντας μεταλλοκεραμικές πλάκες Co-Cr έδειξαν ότι μεταξύ των τεχνικών H-MIL, S-MIL, SLM, CST, η τραχύτερη επιφάνεια προκύπτει για τις τεχνικές CST και H-MIL (δεν προκύπτει συμπέρασμα για το εάν η CST ή H-MIL δημιουργεί τη μεγαλύτερη τραχύτητα καθώς

ανάλογα με την παράμετρο τραχύτητας που χρησιμοποιείται τα αποτελέσματα είναι αντιφατικά) ενώ η τραχύτητα είναι ίδια για τις τεχνικές SLM και S-MIL.¹³⁰

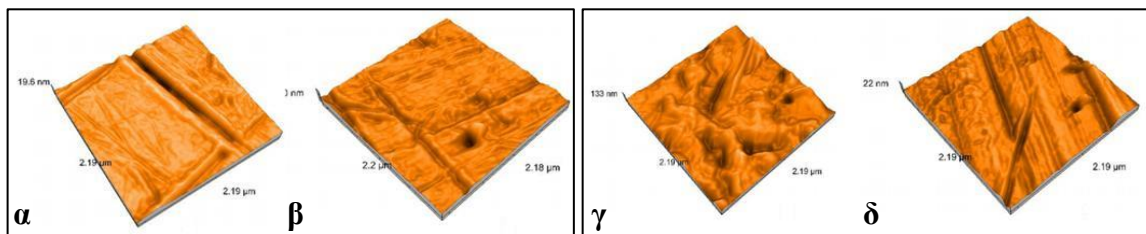
Όσον αφορά τη σύνθεση της επιφάνειας, στα κράματα Co-Cr που λαμβάνονται με τη μέθοδο CST, η συνολική αναλογία των στοιχείων στην επιφάνεια του κράματος και το γενικό περιεχόμενο του υλικού, δεν είναι παρόμοια. Επιπλέον, η κατανομή των στοιχείων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του υλικού, μπορεί επίσης να είναι διαφορετική. Ωστόσο, σε μια μελέτη όπου εξετάστηκαν διάφορα δείγματα PBF σε διάφορους τύπους συσκευών δείχθηκε ότι τα ποσοστά των στοιχείων στην επιφάνεια των δειγμάτων είναι σχεδόν τα ίδια με τις αναλογίες στοιχείων στο περιεχόμενο του κράματος.⁹²



Εικόνα 5-27 Επιφανειακή μικροδομή (μεγέθυνση 50 x) των κραμάτων Co-Cr που κατασκευάστηκαν με: MIL+CST (α), H-MIL (β), SLM (γ), όπου διακρίνεται ότι τα SLM δείγματα παρουσιάζουν αύλακες και κορυφές ενώ τα άλλα δύο δείγματα έχουν πιο ομοιογενή μικροδομή.¹²⁹



Εικόνα 5-28 SEM (6000 x) εικόνες των κραμάτων H-MIL (α), SLS (β), SLM (γ) και CST (δ).⁸⁶



Εικόνα 5-29 AFM εικόνες των κραμάτων H-MIL (α), SLS (β), SLM (γ) και CST (δ).⁸⁶

5.2.2.2 Χυτευσιμότητα

Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες για την επιλογή ενός κράματος για χύτευση είναι η χυτευσιμότητα, δηλαδή η ικανότητα χύτευσης ή ροής και πλήρωσης του πυροχωμάτινου καλουπιού στη θερμοκρασία τήξης του.¹³¹ Τα κράματα βασικών μετάλλων είναι δύσκολο να χυτευθούν.¹³¹ Ωστόσο, πρόσφατη (2017) μελέτη σε 4 διαφορετικά κράματα αναφέρει ότι όλα τα CST κράματα χαρακτηρίστηκαν από πολύ υψηλή χυτευσιμότητα.⁴⁵



5.2.2.3 Μηχανικές ιδιότητες, αντοχή στη κόπωση και σκληρότητα

Οι συνιστώμενες μηχανικές ιδιότητες για τα κράματα Co-Cr από M.O. αντικατοπτρίζονται στο ISO 22674.¹³²

Γενικώς, οι σκελετοί M.O. από κράματα Co-Cr λόγω της μεγαλύτερης ομοιογένειας της μικροδομής, της ικανότητας τους να παράγουν σχεδόν 100 % πυκνότητα, της χρήσης λεπτών σωματιδίων κράματος που καθιστούν το μέγεθος της μεταλλογραφικής δομής μικροσκοπικό, έχουν δείξει πολύ υψηλές και ανώτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες στη τεχνική SLM σε σχέση με τη CST^{11,25,96,112,133} Ορισμένοι ερευνητές απέδειξαν ότι τα SLM κράματα Co-Cr έχουν καλύτερες ιδιότητες εφελκυσμού από τα CST. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές μέγιστης τάσης (N), παραμόρφωσης στη μέγιστη τάση, αντοχής (work) σε μέγιστη τάση, ακαμψίας, τάσης στη θραύση, παραμόρφωσης στη θραύση, και αντοχή πριν τη θραύση βρέθηκαν ότι ήταν για το CST και SLM αντίστοιχα: 6438,7±200,5 N και 9585,9±42,4 N, 1,8±0,6 mm και 2,9±0,3 mm, 7,4±3,4 J και 19,9±1,4 J, 12011000±209520 Pa και 13353000±983290 Pa, 643,8±20,1 και 958,6±4,3 N, 1,9±0,6 mm και 3,1±0,3 mm, 7,8±3,4 J και 20,3±1,4 J.¹¹ Άλλοι ερευνητές εντόπισαν περισσότερο από 1,5 φορές μεγαλύτερη αντοχή εφελκυσμού στα δείγματα SLM σε σύγκριση με τα CST (1363-1472 MPa και 900 MPa, αντίστοιχα).⁵⁹ Μια ακόμη, ομάδα ερευνητών για την SLM βρήκαν υψηλότερο όριο διαρροής 0,2 %, μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό και επιμήκυνση σε σύγκριση με το κράμα as-cast.¹¹¹ Διαφορετικοί ερευνητές, έδειξαν ότι άγκιστρα από SLM και CST εμφανίζουν παρόμοιο όριο διαρροής (17,9 και 17,1 αντίστοιχα) και όριο αναλογίας, και αν και οι 2 ιδιότητες είναι ελαφρώς καλύτερες στην SLM ωστόσο θα πρέπει να διεξαχθούν πρόσθετες μελέτες για να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση που εμφανίστηκε και για τις 2 ιδιότητες μεταξύ των SLM κραμάτων η οποία ήταν υψηλότερη εκείνης των CST προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απροσδόκητες αστοχίες.¹⁰⁵ Ακόμη, έχει αναφερθεί ότι τα μεταλλικά μέρη κατασκευασμένα με τη χρήση SLM πέρα από τη βελτίωση στο όριο διαρροής και στην αντοχή σε εφελκυσμό, παρουσιάζουν και βελτιωμένη αντοχή σε κάμψη,¹¹³ αν και αυτό το εύρημα έχει αναφερθεί γενικώς στη βιβλιογραφία και δεν εντοπίστηκε μελέτη που να αφορά τα κράματα Co-Cr που να το επιβεβαιώνει.

Το μέτρο ελαστικότητας των άγκιστρων Co-Cr με CST είναι 220 GPa και με HM 180 GPa.¹¹² Ορισμένοι ερευνητές απέδειξαν ότι τα κράματα που κατασκευάζονται με SLS και DMLS παρουσιάζουν καλύτερες ($p < 0,05$) μηχανικές ιδιότητες πιθανόν λόγω της καλύτερης ομοιογένειας της μικροδομής και του μικρότερου μεγέθους κόκκων. Πιο αναλυτικά, έδειξαν ότι τα SLS κράματα έχουν σημαντικά χαμηλότερο συντελεστή ελαστικότητας (202±16 GPa), δηλαδή είναι πιο εύκαμπτα, από τα κράματα CST (229±7 GPa) και DMLS



(225±10 GPa), ο οποίος μάλιστα είναι πιο κοντά στο δόντι (80-94 GPa), και επομένως τα κράματα SLS θα ήταν πιο ευνοϊκά για την κατασκευή των αγκίστρων των Μ.Ο., αλλά λιγότερο ευνοϊκά από τα κράματα DMLS και CST για την κατασκευή των άλλων τμημάτων της Μ.Ο., όπως οι εφαπτήρες και οι συνδετήρες. Επιπλέον, το όριο διαρροής σε κάμψη των κραμάτων SLS και DMLS (1626±118 και 1685±109 MPa, αντίστοιχα) ήταν σημαντικά υψηλότερο από εκείνο των κραμάτων CST (1462±142 MPa). Επιπλέον, η αντοχή σε κάμψη και η δυσθραυστότητα θραύσης της ομάδας SLS (2837±97 MPa και 61,2±2,1 1 MPa x m^{1/2}) ήταν σημαντικά υψηλότερα από εκείνα των ομάδων CST (2647±208 MPa και 57,1±4,5 MPa x m^{1/2}) και DMLS (2602±106 MPa και 56,1±2,3 1 MPa x m^{1/2}). Σημειώθηκε, ότι η επεξεργασία του κράματος Co-Cr με τη μέθοδο DMLS συνεπάγεται πλήρη τήξη μέρους της μεταλλικής σκόνης που την καθιστά πιο κοντά στη μέθοδο χύτευσης από τη μέθοδο SLS. Αυτό μπορεί να είναι ο λόγος της ομοιότητας των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των κραμάτων DMLS και CST. Γενικά, τα κράματα SLS έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες για σκελετούς Μ.Ο. από άλλα κράματα όσον αφορά την ελαστικότητα και την αντοχή, και αυτό μπορεί να σχετίζεται με το πορώδες και τη μικροδομή τους.⁵¹

Το όριο διαρροής 0,2 % (λόγω του μικρού μεγέθους κόκκων στη διαδικασία SLM¹⁴) και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό των κραμάτων Co-Cr που παρασκευάζονται με SLM είναι ανώτερα από εκείνα της CST, ακόμη και για τα κράματα Co-Cr που αναπτύχθηκαν για μεταλλοκεραμικές αποκαταστάσεις⁹⁷ σε βαθμό ώστε να παρουσιάζουν επαρκή μηχανική αντοχή για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. με άγκιστρα.^{19,35} Πάντως, μελέτες σε μεταλλοκεραμικά κράματα έδειξαν τα εξής. Σε μια μελέτη του 2016, ανέφεραν ότι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες με φθίνουσα σειρά παρουσιάζει η SLM (ανώτερες μηχανικές ιδιότητες), η S-MIL (αν και κατώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με την SLM είναι σχεδόν συγκρίσιμες), CST και H-MIL. Πιο αναλυτικά, το υψηλότερο όριο διαρροής των κραμάτων Co-Cr βρέθηκε στην ομάδα SLM (580±50 MPa), ακολουθούμενη από τη CST (540±20 MPa), S-MIL (510±20 MPa) και H-MIL (480±20 MPa), οι τιμές εκατοστιαίας επιμήκυνσης ήταν υψηλότερες στην ομάδα SLM (32±2 %) και στις ομάδες S-MIL (27±2 %) σε σύγκριση με τις ομάδες των CST (10±2 %) και των H-MIL (2,3±0,7 %). Τα δείγματα με S-MIL έλαβαν το υψηλότερο μέσο μέτρο ελαστικότητας (270±30 GPa), ακολουθούμενο από τα CST (260±20 GPa), H-MIL (230±40 GPa) και SLM (200±10 GPa) δείγματα.⁶¹ Σε μια μελέτη του 2018, δείχθηκε ότι η ομάδα SLM παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις CST και H-MIL. Αυτό καθώς, παρότι οι τιμές μέτρου ελαστικότητας ήταν σχεδόν παρόμοιες μεταξύ των 3 ομάδων, οι αντοχές των δειγμάτων SLM ήταν περίπου 50 % υψηλότερες από εκείνες των δειγμάτων CST και CNC και πιο αναλυτικά η ομάδα SLM έλαβε το υψηλότερο



όριο διαρροής 0,2 % (790 ± 11 MPa) ακολουθούμενη από τη CST (520 ± 30 MPa) και H-MIL (495 ± 20 MPa), την υψηλότερη μέγιστη αντοχή εφελκυσμού (1072 ± 18 MPa) ακολουθούμενη από τις ομάδες CST (658 ± 44 MPa) και H-MIL (638 ± 25 MPa), το υψηλότερο ποσοστό επιμήκυνσης ($12,7 \pm 1,9$ %) ακολουθούμενο από τις ομάδες H-MIL ($11,1 \pm 1,0$ %) και CST ($8,0 \pm 0,4$ %). Στατιστικά σημαντικές διαφορές διαπιστώθηκαν στην μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και στο όριο διαρροής 0,2 % μεταξύ της ομάδας SLM και των ομάδων CNC και CST ($P < .05$), και όχι μεταξύ των 2 τελευταίων ομάδων ($P > 0,05$). Επιπλέον, η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα των δειγμάτων SLM ήταν καλύτερη από αυτή των άλλων 2 ομάδων, χωρίς να υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των 2 τελευταίων (αν και τα δείγματα H-MIL εμφάνισαν μια σχετικά καλύτερη ολκιμότητα και δυσθραυστότητα σε σύγκριση με τα CST).¹³⁴ Σε άλλη μελέτη του 2018, δείχθηκε ότι τα κράματα SLM έλαβαν τις στατιστικά υψηλότερες τιμές ορίου διαρροής 0,2 % (783 ± 15 MPa), μέγιστης αντοχής στον εφελκυσμό (1158 ± 10 MPa) και επιμήκυνσης στη θραύση (13 ± 1 %) σε σύγκριση με τα δείγματα CST (581 ± 16 , 783 ± 32 , 12 ± 2) και H-MIL (672 ± 4 , 1069 ± 10 , 10 ± 1), ωστόσο η H-MIL ομάδα απέκτησε τον υψηλότερο συντελεστή Young (H-MIL: 253 ± 14 , CST: 188 ± 19 , SLM: 195 ± 15 GPa, χωρίς στατιστικά σημαντική διαφορά των 2 τελευταίων).⁵⁰ Σε διπλωματική του 2019 μεταλλοκεραμικών κραμάτων, δείχθηκε ότι η αντοχή στον εφελκυσμό και η εκατοστιαία επιμήκυνση στην τεχνική SLM, είναι μεγαλύτερες από ότι στη CST, και το μέτρο ελαστικότητας είναι παρόμοιο για τις τεχνικές CST, H-MIL, S-MIL, DMLS ($229,8 \pm 25,4$, $216,8 \pm 21,9$, $251,8 \pm 19,9$, και $228,3 \pm 20,1$ GPa αντίστοιχα).³⁷ Το 2019, οι Al Jabbari και συν¹²⁰ ανέφεραν ότι ο ελαστικός δείκτης (ηπ) δείχνει σημαντικές διαφορές μεταξύ όλων των ομάδων, με τη CST να δείχνει τις χαμηλότερες, ενώ ακολούθησαν οι H-MIL, S-MIL και SLM (16,2 %, 17,8 %, 19,4 %, 21,1 %, αντίστοιχα). Όσο υψηλότερος είναι ο ελαστικός δείκτης τόσο πιο ψαθυρό είναι το υλικό και έτσι το SLM είναι ψαθυρότερο από όλες τις άλλες ομάδες πιθανώς λόγω της παρουσίας υπολειπόμενων τάσεων. Επιπλέον, στο SLM υπάρχουν οι υψηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας (271 GPa) σε στατιστικό σημαντικό βαθμό, ακολουθούμενο από το S-MIL (252 GPa), H-MIL (223 GPa) και CST (217 GPa), χωρίς στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της 2^{ης} μεθόδου με τη 1^η και τη 3^η.¹²⁰

Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες αποτελεί η αντοχή στην κόπωση. Η θραύση ενός σκελετού συνήθως μπορεί να προκληθεί από περιοχές συγκέντρωσης τάσεων οι οποίες οδηγούν στο φαινόμενο της κόπωσης. Τέτοιες περιοχές μπορεί να είναι μεταξύ άλλων περιοχές κακής σχεδίασης, εσωτερικές ατέλειες (πόροι, έγκλειστα κ.α.), γωνίες που δημιουργούνται κατά τη ρύθμιση του αγκίστρου με πένσα ή αιχμηρές γωνίες που εισάγονται κατά την ένωση του συγκρατητικού βραχίονα, υψηλή τραχύτητα και ανωμαλίες (γρατζουνιές



κ.α.) της επιφάνειας που δρουν ως παράγοντες αύξησης τάσεων και συχνότερα γίνονται οι τόποι έναρξης ρωγμών κόπωσης.^{4,78} Η αντοχή του σκελετού στην κόπωση πέρα από τους προαναφερθέντες παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση των τάσεων, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως από την μεταλλογραφική δομή.⁷⁸ Πάντως, έχει δειχθεί ότι η αντοχή στην κόπωση των σκελετών κράματος Co-Cr που παράγονται από SLM είναι μεγαλύτερη στη μέθοδο SLM από ότι στη CST, και εξαρτάται κυρίως από τον προσανατολισμό των δειγμάτων σε σχέση με την κατεύθυνση κατασκευής.^{51,118,127,135} Ορισμένοι ερευνητές, παρατήρησαν ότι τα κράματα των τεχνικών DMLS και SLS παρουσίασαν υψηλότερη αντίσταση στην κόπωση από τα δείγματα CST μετά από 6.000 κύκλους που προσομοιώνουν την εισαγωγή και την αφαίρεση των οδοντοστοιχιών από το στόμα για 5 χρόνια. Επιπλέον, οι δοκιμές αντοχής στην κόπωση των ομάδων SLS και DMLS έδειξαν ότι διατήρησαν το 91,1 % και το 89,6 % της αρχικής τους δύναμης, αντίστοιχα, σε παραμόρφωση 0,2 mm, ενώ η ομάδα CST διατήρησε μόνο το 25,4 % αυτής δηλαδή είχε υποστεί δραματική παραμόρφωση. Παρόμοια συμπεριφορά αντοχής στην κόπωση καταγράφηκε στην 0,1 mm παραμόρφωση για όλες τις ομάδες. Άρα, το μέσο ποσοστό επιβίωσης των SLS και DMLS σκελετών Μ.Ο. θα ήταν πολύ υψηλότερο από αυτό των σκελετών CST (5,5 χρόνια). Η υψηλή αντίσταση στην κόπωση των κραμάτων SLS και DMLS αποδίδεται στην υψηλή αντοχή του ορίου διαρροής που επιτρέπει υψηλότερη αντοχή σε πλαστική παραμόρφωση σε σύγκριση με τα κράματα CST. Η υψηλή αντοχή σε κάμψη και αντοχή στην κόπωση των 2 αυτών κραμάτων μπορεί να αποδοθεί στην κρυσταλλικότητά τους και στην ομοιογενή μικροδομή τους.⁵¹ Άλλοι ερευνητές, συμπέραναν ότι τα άγκιστρα που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας DMLS είναι πιο εύκαμπτα και ως εκ τούτου λιγότερο επιρρεπή σε κυκλική κόπωση συγκριτικά με τα CST, καθώς μετά από 65.000 κύκλους γήρανσης απέδειξαν ότι η μακροχρόνια επιβίωση άγκιστρων ήταν σημαντικά υψηλότερη στην τεχνική DMLS (93,8 %) από ό,τι για την ομάδα CST (43,8 %), αν και το πρώτο κάταγμα συνέβη μετά από περισσότερα από 20 χρόνια προσομοίωσης και επομένως ανέφεραν ότι οι δύο τεχνολογίες είναι αξιόπιστες όσον αφορά τη μακροχρόνια συντήρηση.¹¹⁸ Περισσότερα, για την αντίσταση στη κόπωση αναφέρονται σε επόμενες ενότητες.

Σε μια μελέτη, μετρήσεις σκληρότητας μεταξύ 4 CST κραμάτων Co-Cr έδειξαν μικρές διαφορές μεταξύ τους και συγκεκριμένα η σκληρότητα κατά φθίνουσα τιμή βρέθηκε να είναι στα κράματα Remanium GM 800+, Wironit Extrahard, Biosil F, Remanium Star. Η χαμηλότερη σκληρότητα του Remanium Star μπορεί να οφείλεται στην παρουσία πολλών μικροπόρων, αλλά πρωταρχικός λόγος φαίνεται να είναι η απουσία ιζημάτων σχηματισμού Μο υπεύθυνων για τη διαδικασία σκλήρυνσης του κράματος. Η σχέση μεταξύ πορώδους



κράματος και σκληρότητας είναι πολύ γνωστή όπως γνωστή είναι και η επίδραση του W στη σκληρότητα των κραμάτων. Έχει βρεθεί ότι το W παρουσία Mo αυξάνει τη σκληρότητα των κραμάτων, αλλά όταν απουσιάζει το Mo, ακόμη και μεγάλες ποσότητες βαναδίου που εισάγονται στα κράματα Co-Cr μειώνουν το επίπεδο σκληρότητάς τους.⁴⁵ Σε άλλη μελέτη δείχθηκε ότι, το κράμα Co-Cr έχει στατιστικά σημαντικά υψηλότερη επιφανειακή σκληρότητα ($439,8 \pm 7,8$) από το κράμα Co-Cr-Mo-Ni ($421,1 \pm 6,4$) λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε Co και Cr και του ότι δεν περιέχει Ni, η προσθήκη του οποίου θα μπορούσε να βελτιώσει την ολκιμότητα του κράματος, αλλά κατά συνέπεια να μειώσει τη σκληρότητα.¹³⁶

Στην τεχνική DMLS τα ε-ελάσματα που αναπτύσσονται στα $\{111\}$ γ επίπεδα περιορίζουν την ολίσθηση εκτοπίσεων στη φάση γ (fcc) αυξάνοντας τη σκληρότητα (47 HRC), συγκριτικά με τη μέθοδο C-CST (25-35 HRC).⁵² Ορισμένοι ερευνητές, απέδειξαν ότι τα δύο κράματα, SLS και DMLS είναι σημαντικά ($p < 0,05$) σκληρότερα (453 ± 9 και 477 ± 14 HV, αντίστοιχα) από το κράμα CST (390 ± 11 HV). Υψηλές τιμές σκληρότητας είναι επιθυμητές στις Μ.Ο. για την εξασφάλιση της αντοχής στο γρατζούνισμα του κράματος. Ωστόσο, και τα 3 κράματα που δοκιμάστηκαν σε αυτή τη μελέτη ήταν σκληρότερα από την αδαμαντίνη των δοντιών και αυτό θα μπορούσε να βλάψει τα δόντια κατά την εισαγωγή και την αφαίρεση των Μ.Ο. στο στόμα. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του πιθανού προβλήματος είναι η χρήση μεταλλικών κραμάτων με κατάλληλο συντελεστή ελαστικότητας, καθώς η τριβή εξαρτάται από τη δύναμη που ασκείται από το άγκιστρο στο δόντι. Κατά συνέπεια, ο χαμηλότερος συντελεστής ελαστικότητας του κράματος SLS όπως αναφέρθηκε παραπάνω θα μπορούσε να ανακουφίσει την αρνητική συνέπεια της υψηλής σκληρότητας των κραμάτων Co-Cr.⁵¹ Σε άλλη μελέτη δείχθηκε ότι, τα δείγματα που ελήφθησαν από την DMLS (477 HV10) χαρακτηρίστηκαν από μεγαλύτερη μέση σκληρότητα από τα CST (366 HV10). Μάλιστα τα δείγματα των κραμάτων Co-Cr που λήφθηκαν με τη μέθοδο C-CST εμφάνισαν διαφοροποιημένη σκληρότητα με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται στην κεντρική περιοχή, στο επίπεδο των 340-350 HV10, ενώ στις άκρες τους οι τιμές έφτασαν τα 360-370 HV10. Αυτό το φαινόμενο συνδέεται με την κρυστάλλωση και την αφαίρεση θερμότητας, την δενδριτική μικροδομή και την έλλειψη χημικής ομοιογένειας του CST κράματος. Στα DMLS οι τιμές σκληρότητας επηρεάστηκαν άμεσα από την λεπτόκοκκη και πιο ομοιογενή μικροδομή του εξεταζόμενου υλικού.¹⁰⁷

Μελέτες σε μεταλλοκεραμικά κράματα έχουν δείξει τα εξής. Οι Rogojan και συν⁴⁶ (2017) έδειξαν ότι οι μεταλλικές πλάκες που λαμβάνονται με SLS/SLM χαρακτηρίζονται από αυξημένη σκληρότητα, ανάλογα επίσης με την επεξεργασία της επιφάνειας [μετά τη στίλβωση η σκληρότητα ήταν κατά φθίνουσα σειρά στο SLM (478 HV), SLS (431 HV), H-



MIL (230 HV) και CST (215 HV)].⁴⁶ Οι Han και συν⁵⁰ (2018) βρήκαν ότι η SLM αποδίδει μεγαλύτερη σκληρότητα (399 ± 24 HV10) από ότι η H-MIL (353 ± 6 HV10) και CST (303 ± 15 HV10).⁵⁰ Οι Zhou και συν¹³⁴ (2018) έδειξαν ότι υψηλότερες μέσες τιμές μικροσκληρότητας παρουσιάζει η SLM ($475,3-10,2$ HV10) ξεπερνώντας εκείνες των δειγμάτων H-MIL ($325,2 \pm 17,8$ HV10) και CST ($323,7 \pm 27,2$ HV10) κατά περίπου 40 %, χωρίς στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των 2 τελευταίων. Οι Al Jabari και συν¹²⁰ (2019) ανέφεραν ότι μεγαλύτερη σκληρότητα παρατηρείται κατά σειρά από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη στην SLM (3453 N/mm²) λόγω σύντηξης που μειώνει το πορώδες και παρέχει πολύ περισσότερο λεπτόκοκκη δομή και λόγω υπολειπόμενων τάσεων, H-MIL (2795 N/mm²), CST (2827 N/mm²) και S-MIL (2459 N/mm²) πιθανόν λόγω πορώδους, με μη στατιστικά σημαντική διαφορά μόνο μεταξύ H-MIL και CST.

5.2.2.4 Βιοσυμβατότητα

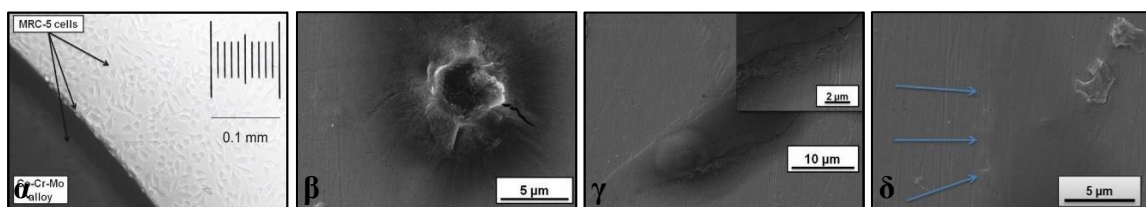
Η βιοσυμβατότητα αποτελεί την πιο σημαντική απαίτηση μεταξύ όλων των ιδιοτήτων των κραμάτων Co-Cr, διότι τα κράματα αυτά βρίσκονται σε μακροχρόνια στενή επαφή με τους ζώντες στοματικούς ιστούς.^{37,137}

Παλαιότερες κλινικές έρευνες (1977-2000) που έχουν πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση των in vivo συνεπειών των M.O. των CST κραμάτων Co-Cr, εξέτασαν παράγοντες όπως η πλάκα, η ουλίτιδα, η υφίζηση των ούλων και η τερηδόνα των ριζών και των στεφανών, και ανέφεραν ότι μερικοί ασθενείς έδειξαν υψηλό ενώ άλλοι χαμηλό επιπολασμό πλάκας και ουλίτιδας, αν και σχετικά με την ουλίτιδα έχει βρεθεί ο ίδιος υψηλός βαθμός ουλίτιδας μεταξύ ασθενών που φορούσαν M.O. και ασθενών που δεν φορούσαν. Ωστόσο, όλες φαίνονταν να συμφωνούν ότι οι τακτικοί περιοδοντικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι για τους χρήστες M.O. για την ελαχιστοποίηση της ουλίτιδας.⁹

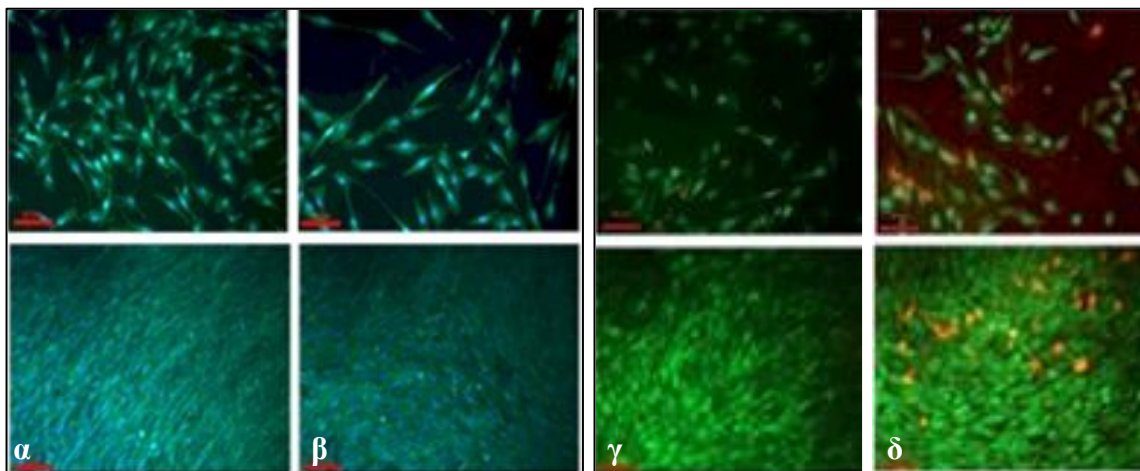
Παρότι, οι σύγχρονες μελέτες για τον έλεγχο της βιοσυμβατότητας σε CST κράματα Co-Cr αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς M.O. είναι περιορισμένες, η μελέτη των Dimiό και συν⁸⁷ (2015) φαίνεται να συμφωνεί με όλες τις προηγούμενες και απέδειξε ότι τα CST κράματα Co-Cr δεν παρουσιάζουν κυτταροτοξική επίδραση ούτε στα ανθρώπινα (MRC-5) ούτε στα ζωικά (L929) κύτταρα ινοβλαστών. Αυτό διότι, αφενός δεν απελευθέρωσαν επιβλαβή στοιχεία σε συγκεντρώσεις αρκετά υψηλές ώστε να έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις, και αφετέρου διότι τα κύτταρα ινοβλαστών έδειξαν εξαιρετική πρόσφυση και εξάπλωση στην επιφάνεια των κραμάτων (Εικόνα 5-30 α-δ), ενώ παράλληλα η ογκώδης φύση των κυττάρων έδειξε ότι τα κύτταρα ήταν μεταβολικά ενεργά και έτσι αποδείχθηκε η βιοσυμβατότητα του κράματος (Εικόνα 5-30 β-δ).⁸⁷ Άλλοι ερευνητές, συγκρίνοντας CST κράματα Co-Cr και



Ti₆Al₄V (ομάδα ελέγχου) τα οποία αποστειρώθηκαν, εμβυθίστηκαν σε μέσο καλλιέργειας ανθρώπινων κυττάρων που μοιάζουν με οστεοοβλάστες (κύτταρα οστεοσαρκώματος MG63) και παρατηρήθηκαν στις 3 και 6 ημέρες, έδειξαν ότι αφενός η κυτταρική δραστηριότητα αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου υποδεικνύοντας ότι τα κράματα Co-Cr υποστηρίζουν τόσο την προσκόλληση όσο και ανάπτυξη των κυττάρων (Εικόνα 5-31α) καθώς τα κύτταρα που προσκολλήθηκαν στο υλικό μετά από 6 ημέρες είχαν μια ασαφή εμφάνιση, έγιναν πυκνότερα και υπήρχε επαφή κυττάρου-κυττάρου (εμφάνιση συρροής) που υποδεικνύει ένα φαινόμενο κυτταρικής πρόσφυσης δηλαδή ισχυρή επαφή με την επιφάνεια. Μετά τη δοκιμή κυτταροτοξικότητας (Εικόνα 5-31 β), αν και τα κράματα Co-Cr επηρέασαν την βιωσιμότητα των κυττάρων καθώς παρατηρήθηκε μια μέτρια κυτταρική νέκρωση, εντούτοις οι ερευνητές επισήμαναν ότι τα κράματα δεν ήταν τοξικά για τα ανθρώπινα κύτταρα.¹³⁸ Ένα σημάδι της υψηλής βιοσυμβατότητας είναι ότι, η μικροβιακή πλάκα και η προσκόλληση πρωτεϊνών των σιελογόνων αδένων είναι παρόμοια στον υδροξυαπατίτη σε σύγκριση με τα CST κράματα Co-Cr. Πιο συγκεκριμένα, οι ορισμένοι ερευνητές, έδειξαν ότι μεταξύ των δύο υλικών, η α- και β-ποικιλότητα της «κολλητικής» χλωρίδας είναι παρόμοια, και τα βακτηριακά είδη που προσκολλώνται εύκολα στα υλικά είναι τα *Streptococcus sp. oral taxon 058*, *Neisseria mucosa*, *Gemella haemolysans*, και τα *Rothia dentocariosa*. Ανεξάρτητα από το υλικό, οι κορυφές ή κηλίδες των συνδεδεμένων πρωτεϊνών σιέλου έχουν παρόμοια σχήματα, που περιέχουν λειτουργικές πρωτεΐνες όπως υποδοχείς αγκύρωσης για πρώιμους α-ποικιστές. Σημειώνεται ότι σε παλαιότερη μελέτη, των ίδιων ερευνητών, σύγκρισης μεταξύ των μεταλλικών υλικών (Co-Cr, CPTi, κράμα Ti, Ag-Pd-Au, Au-Cu-Pt), διαφορές εντοπίστηκαν μεταξύ τους όχι μόνο στην ποσότητα αλλά και στα μικροβιακά είδη του βιοφίλμ που σχημάτισαν στο σάλιο.¹³⁹



Εικόνα 5-30 Κύτταρα MRC-5 σε επαφή με την επιφάνεια του κράματος (α), SEM μικρογραφίες που δείχνουν τα MRC-5 κύτταρα συνδεδεμένα στην επιφάνεια του κράματος: β) στρογγυλά κύτταρα, γ) επιμήκη κύτταρα, δ) μεγεθυμένη περιοχή από (γ) και ε) πρόσφυση κυττάρων στην επιφάνεια.⁸⁷



Εικόνα 5-31 Εικόνες μικροσκοπίας φθορισμού όπου φαίνεται ο πολλαπλασιασμός-ανάπτυξη (α) ανθρωπίνων κυττάρων [κυτταροσκελετική ακτίνη – πράσινο χρωματισμός, πυρήνες (ουσία αντίθεσης Hoechst) - μπλε χρωματισμός] μετά από 3 ημέρες (άνω οριζόντια στήλη) και μετά από 6 ημέρες (κάτω οριζόντια στήλη) στην επιφάνεια των κραμάτων Ti-6Al-4V (αριστερή κάθετη στήλη) και Co-Cr (δεξιά κάθετη στήλη). Στην εικόνα β φαίνονται οι αντίστοιχες εικόνες μετά από δοκιμές κυτταροτοξικότητας όπου διακρίνονται τα νεκρά κύτταρα - χρωματισμένα σε κόκκινο και τα βιώσιμα κύτταρα – χρωματισμένα σε πράσινο.¹³⁸

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι παρόλο που όλες οι μελέτες των κραμάτων Co-Cr αμιγώς για κλασικούς σκελετούς Μ.Ο. αναφέρουν ότι δεν παρουσιάζουν κυτταροτοξικότητα, ωστόσο όπως επισημαίνουν και οι ίδιοι ερευνητές⁸⁷ υπάρχουν άρθρα στην εποχή που υπογραμμίζουν την κυτταροτοξικότητα των στοιχείων Cr και Co, όπως εκείνο μιας ομάδας ερευνητών το 2006 το οποίο βέβαια μελέτησε μη οδοντιατρικές κατασκευές, ωστόσο τα αποτελέσματα του κατέδειξαν ότι τα ιόντα Cr^{3+} (0-150 ppm) και Co^{2+} (0-10 ppm) έχουν κυτταροτοξική επίδραση σε κύτταρα MG63 και επιπλέον η μικροσκοπική ανάλυση έδειξε αλλαγές στο σχήμα, το μέγεθος και τον αριθμό των κυττάρων, ενώ το Co^{2+} είχε μεγαλύτερη επίδραση σε αυτές τις παραμέτρους από το Cr^{3+} .⁸⁷ Ακόμη, σε άλλες μελέτες έχει αναφερθεί ότι το Co το οποίο αποτελεί το κύριο στοιχείο που απελευθερώνεται από το κράμα Co-Cr: α) σε χαμηλές συγκεντρώσεις αναστέλλει την ανάπτυξη ινοβλαστών εκδηλώνοντας την τοξικότητα του, β) συμβάλλει σε γενετοξική βλάβη στα λεμφοκύτταρα και τα αποφλοιωμένα ρινικά κύτταρα, γ) οδηγεί σε απόπτωση των κυττάρων δ) και είναι πιθανώς καρκινογόνο.⁹⁹

Όπως φαίνεται παραπάνω, τα κράματα Co-Cr είναι βιοσυμβατά, και ένας από τους λόγους είναι ότι το ποσοστό έκλυσης των στοιχείων Co και Cr σε μελέτες διάβρωσης των κραμάτων για μερικές μέρες, ανεξαρτήτως τεχνικής κατασκευής όπως αναλύεται καλύτερα παρακάτω είναι σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο τα στοιχεία Co και Cr φαίνεται από ορισμένες έρευνες να μην είναι προς όφελος της βιοσυμβατότητας. Τα στοιχεία των Co και Cr μπορεί να ενσωματώνονται στον μεταβολισμό των κυττάρων, με το



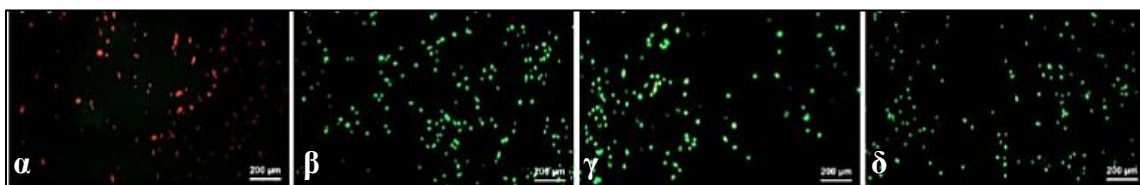
οξειδωτικό στρες παίζει κρίσιμο ρόλο. Το σάλιο απεκκρίνεται συνεχώς και καταπίνεται εντός της στοματικής κοιλότητας, έτσι τα απελευθερούμενα ιόντα ταξιδεύουν περαιτέρω μέσω του πεπτικού συστήματος. Καθώς αυτά τα ιόντα διέρχονται από το επιθηλιακό φράγμα στα έντερα, είναι πιθανό να επηρεάσουν άλλα όργανα και να έχουν συστηματική επίδραση. Συνεπώς, και αν και υπάρχουν ενδείξεις ότι το στρώμα παθητικού οξειδίου αυξάνει την παθητικότητα με την πάροδο του χρόνου, το ερώτημα που προκύπτει είναι η ποσότητα των Co, Cr και Mo που απελευθερώνεται και καταπίνεται από έναν ασθενή που φορά σκελετό Μ.Ο. για 5-10 χρόνια. Από αυτή την άποψη, τα αποτελέσματα της πολύ χαμηλότερης έκλυσης ιόντων από τα κράματα DMLS που παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα μπορεί να έχουν μεγαλύτερη σημασία. Αυτό το ζήτημα θα μπορούσε να εξεταστεί από μελλοντικές έρευνες.¹⁴⁰

Στη σύγκριση αρκετών σύγχρονων μελετών κραμάτων μεταξύ των τεχνικών CST και SLM, όλες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα κράματα Co-Cr που παράγονται από την SLM έχουν καλύτερη ή συγκρίσιμη βιοσυμβατότητα σε σχέση με τα CST. Οι δοκιμές κυτταροτοξικότητας των SLM κραμάτων έχουν δείξει ότι τα κράματα Co-Cr είναι μη κυτταροτοξικά, μη ερεθιστικά και θεωρούνται ασφαλείς τόσο για τους στοματικούς ιστούς όσο και για το σώμα στο σύνολό του.^{11,99,133,141} Πιο αναλυτικά, οι ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιώντας μια κυτταρική σειρά ινοβλαστών ποντικού (L929) έδειξαν ελαφρώς χαμηλότερο κυτταρικό πολλαπλασιασμό για το SLM χωρίς όμως μόνιμη βλάβη στη λειτουργία των κυττάρων. Η βιωσιμότητα ήταν πολύ υψηλότερη από το 50 % μετά από όλες τις περιόδους έκλυσης και για τα 2 κράματα. Ωστόσο, αυτές οι τιμές μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα, βελτιστοποιώντας ορισμένες πτυχές που μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στις ιδιότητες των υλικών, όπως το πορώδες.¹³³ Διαφορετικοί ερευνητές, έδειξαν ότι, κύτταρα (ινοβλαστών 3T3 ποντικού) που εκτέθηκαν σε δείγματα SLM και CST, παρουσίασαν φυσιολογική κυτταρική μορφολογία ωστόσο ο πολλαπλασιασμός τους στα δείγματα SLM ήταν υψηλότερος.⁹⁹ Άλλοι ερευνητές, έδειξαν παρόμοιο κυτταρικό (κυτταρική σειρά MRC-5) πολλαπλασιασμό μεταξύ των 2 τεχνικών (στις 1 και 7 ημέρες) αν και ελαφρώς καλύτερο αποτέλεσμα για το κράμα DMLS το οποίο δεν έδειξε σημαντική ζημιά στη λειτουργία των κυττάρων (δεν υπήρχε λύση της μεμβράνης). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν υποδηλώνουν ότι και τα δύο κράματα δεν απελευθερώνουν επιβλαβές υλικό που θα μπορούσε να προκαλέσει κυτταροτοξικότητα.¹⁴¹ Επιπλέον, σε άλλη μελέτη¹⁴⁰ η δοκιμή HET-CAM έδειξε ότι τα



κράματα είναι μη ερεθιστικά χωρίς ενδείξεις αιμορραγίας, πήξης ή αγγειακής λύσης στο SLM, με ορισμένα να είναι ελαφρώς ερεθιστικά, ενώ σε αρκετές άλλες μελέτες έχει δείχθει ότι είναι μη ερεθιστικά.¹¹

Ορισμένοι ερευνητές, εκτείθοντας κράματα Co-Cr σε ανθρώπινα επιθηλιακά κύτταρα ούλων για 1, 2 και 7 ημέρες, απέδειξαν ότι τα κράματα των μεθόδων SLS, DMLS παρουσιάζουν παρόμοια βιοσυμβατότητα με τα CST, και όλα είναι βιοσυμβατά, καθώς δείχθηκε ότι στα SLS και CST η βιωσιμότητα των κυττάρων ήταν συγκρίσιμη στις δύο ομάδες την 1η ημέρα, ωστόσο, ο ρυθμός πολλαπλασιασμού των κυττάρων που εκτέθηκαν στα κράματα SLS και CST μειώθηκε με την πάροδο του χρόνου σε σύγκριση με τα κύτταρα που δεν εκτέθηκαν στα κράματα Co-Cr (Εικόνα 5-32) και αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι το απελευθερούμενο Co αναστέλλει την ανάπτυξη των κυττάρων. Ωστόσο, οι προσδιορισμοί κυτταροτοξικότητας αποκάλυψαν ότι τα κύτταρα που εκτέθηκαν στα κράματα SLS και CST συμπεριφέρθηκαν παρόμοια με τα κύτταρα που δεν εκτέθηκαν σε κράματα Co-Cr.⁵¹

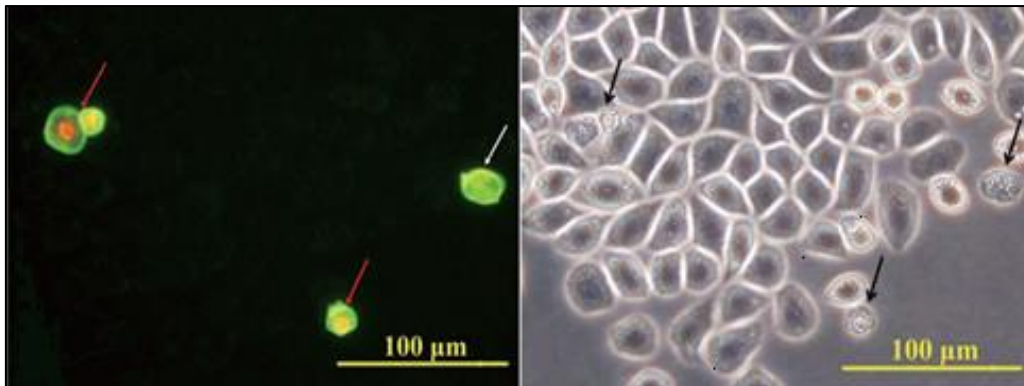


Εικόνα 5-32 Κύτταρα χωρίς έκθεση σε κράμα (β – θετική ομάδα ελέγχου), ζωντανά/νεκρά κύτταρα μετά από επώαση 24 ωρών για τα κράματα CST (γ) και SLS (δ) που δείχνουν μεγαλύτερο αριθμό ζωντανών κυττάρων (πράσινο) σε σύγκριση με τα νεκρά κύτταρα (κόκκινο) στην αρνητική ομάδα ελέγχου (α).⁵¹

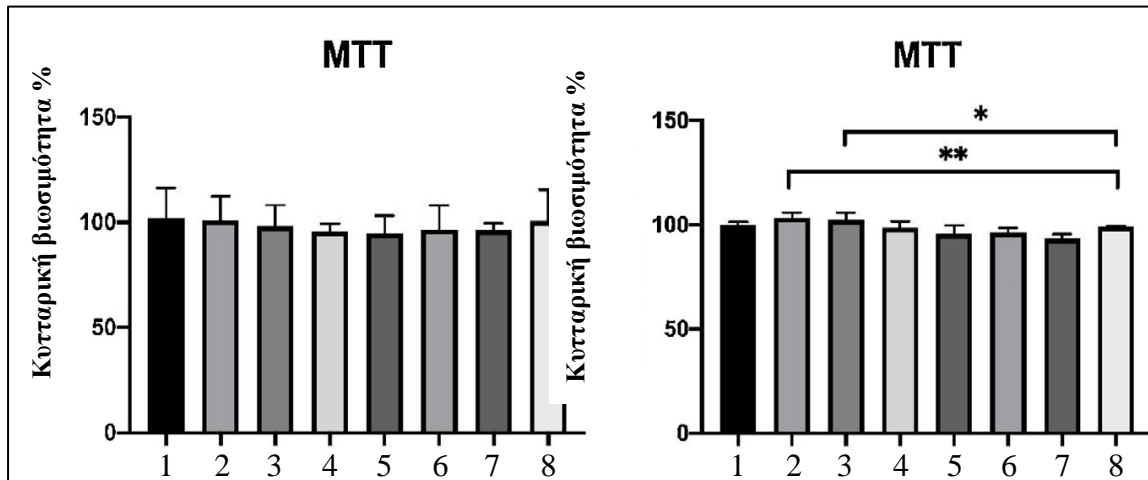
Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθούν 3 μελέτες που αφορούν μεταλλοκεραμικά κράματα Co-Cr. Μια μελέτη έδειξε φτωχή βιοσυμβατότητα των κραμάτων Co-Cr. Πιο αναλυτικά, ορισμένοι ερευνητές μελέτησαν τους τρόπους και τον μηχανισμό που επέρχεται ο κυτταρικός θάνατος των κυττάρων L929 από την επίδραση τους με τα υγρά έκλυσης των CST κραμάτων Co-Cr, για 48 και 72 ώρες. Το υψηλότερο επίπεδο Κασπάσης 3 και Κασπάσης 9 mRNA στις 72 ώρες σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ανάλυσης FCM (Εικόνα 5-33) που έδειξαν μεταβολή στην κυτταρική μορφολογία, κατέδειξαν ότι τα κράματα Co-Cr είχαν αποπτωτική επίδραση στα κύτταρα [ο κύριος τρόπος κυτταρικού θανάτου ήταν η χρονοεξαρτώμενη πρόωρη απόπτωση μέσω της ενδογενούς οδού και όχι η νέκρωση/όψιμη απόπτωση ($p < 0,05$)], παρουσιάζοντας φτωχή βιοσυμβατότητα. Υπάρχουν δύο θεωρίες σχετικά με τις πιθανές αιτίες των ενεργοποιήσεων της Κασπάσης 9 και Κασπάσης 3. Η πρώτη είναι η βλάβη του DNA που προκαλείται από τα Co και Cr και η δεύτερη είναι οι αντιδράσεις μείωσης στα υγρά απελευθέρωσης των μεταλλικών ιόντων του κράματος. Σημειώθηκε ωστόσο ότι η βιοσυμβατότητα μπορεί να είναι βελτιωμένη όσο ελέγχεται το αποπτωτικό αποτέλεσμα, ενώ η ρύθμιση μέσω της εσωτερικής οδού θα μπορούσε να είναι μια πολύτιμη ερευνητική κατεύθυνση για τη βελτίωση της βιοσυμβατότητας των οδοντικών κραμάτων,



ώστε να επιδεικνύουν εξαιρετικές επιδόσεις.¹⁴² Άλλοι ερευνητές, ανέφεραν ότι από τα απελευθερούμενα στοιχεία των κραμάτων Co-Cr, μόνο τα Zn και Co σε συγκεντρώσεις 250 μm και άνω εμφάνισαν κυτταροτοξική επίδραση στα κύτταρα THP-1. Δεν παρατηρήθηκε αυξημένη απώλεια βιωσιμότητας κατά την προσθήκη άλλων στοιχείων που απελευθερώθηκαν στο μείγμα έκθεσης. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχουν κάποιες αλληλεπιδράσεις με τα κύτταρα, και το κυτταροτοξικό δυναμικό αυτών των στοιχείων δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως.¹⁴³ Σε μια μελέτη διαφορετικών ερευνητών, όπου εξετάστηκαν 5 μεταλλοκεραμικά κράματα Co-Cr εκ των οποίων 2 ήταν CST κράματα, το ένα H-MIL, το ένα SLM και το άλλο S-MIL και πλην αυτών των 5 ως ομάδες ελέγχου-σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν 1MIL CPTi4 και 1 MIL Ti6Al4V, συμπέραναν ότι ανεξάρτητα από την κυτταρική σειρά (L929 και BEAS-2B) κανένα από τα υλικά που δοκιμάστηκαν δεν μπορούσε να χαρακτηριστεί ως κυτταροτοξικό σύμφωνα με το ISO 10993-5: 2009 (Εικόνα 5-34). Ωστόσο, σε αντίθεση με προηγούμενη μελέτη που προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα έδειξαν μια ελαφρώς υψηλότερη κυτταροτοξική επίδραση στα επιθηλιακά κύτταρα (BEAS-2B) που εκτέθηκαν σε Ti6Al4V σε σύγκριση με τα χυτά δείγματα Co-Cr ($p < 0,05$). Επίσης, υπήρχε μια επίδραση στη μορφολογία των κυττάρων παρουσιάζοντας πιο στρογγυλεμένα κυτταρικά σχήματα για όλα τα υλικά που δοκιμάστηκαν.¹³⁰



Εικόνα 5-33 FCM όπου παρουσιάζεται η κυτταρική μορφολογία που επηρεάζεται από τα κράματα υπό φθορίζουσα όραση (αριστερά). Το λευκό βέλος υποδεικνύει πρώιμα αποπτωτικά κύτταρα (FITC + / PI -) και τα κόκκινα βέλη υποδεικνύουν τα όψιμα αποπτωτικά/νεκρωτικά κύτταρα (FITC + / PI +). Κυτταρική μορφολογία υπό φυσιολογική όραση της ίδιας περιοχής (δεξιά), όπου τα πρώιμα αποπτωτικά κύτταρα εμφανίζονται με τη χαρακτηριστική «φουσκάλα» μεμβράνης, συρρίκνωση κυττάρων και πυρηνική συμπίκνωση, και εντωμεταξύ το νεκρωτικό/όψιμο αποπτωτικό κύτταρο παρουσιάζει την απώλεια της ακεραιότητας της κυτταρικής μεμβράνης.¹⁴²



Εικόνα 5-34 Γράφημα που δείχνει την κυτταρική βιωσιμότητα για τις τεχνικές κατασκευής: 1 = ομάδα ελέγχου, 2 = 1^ο κράμα CST Co-Cr, 3 = 2^ο κράμα CST Co-Cr, 4 = H-MIL Co-Cr, 5 = SLM Co-Cr, 6 = S-MIL Co-Cr, 7 = MIL CPTi4 και 8 = MIL Ti6Al4V.¹³⁰

Σημειώνεται ότι, η κυτταροτοξικότητα των απελευθερούμενων ιόντων των κραμάτων θεωρείται συχνά ως η πρώτη εκδήλωση κακής βιοσυμβατότητας οδηγώντας έτσι σε κυτταρικό θάνατο με τη μορφή απόπτωσης ή νέκρωσης των κυττάρων, και μπορεί να προκαλέσει χρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στους γύρω ιστούς και στα κύτταρα όπως μερικοί αποχρωματισμοί των ούλων και υπερευαισθησία. Η απόπτωση ελέγχεται αυστηρά από δύο μεγάλα μονοπάτια, εξωγενή και ενδογενή-εγγενή. Η εξωγενής οδός ενεργοποιείται από υποδοχείς της κυτταρικής επιφάνειας όπως η οικογένεια του παράγοντα νέκρωσης όγκου (TNF- α), ενώ η εγγενής οδός περιλαμβάνει την οδό των μιτοχονδρίων. Η ενεργοποίηση της Κασπάσης δραματίζει κρίσιμο ρόλο στην εκτέλεση της απόπτωσης και η Κασπάση 3 είναι η κύρια ενεργή μορφή στην απόπτωση. Επιπλέον, η Κασπάση 9 είναι ο εκκινητής της Κασπάσης της ενδογενούς οδού.¹⁴²

Σημειώνεται, ότι η βιοσυμβατότητα στην SLM μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα: α) με τις χρησιμοποιούμενες παραμέτρους επεξεργασίας οι οποίες μπορεί να μεταβάλλουν τις επιφανειακές ιδιότητες και συνεπώς να οδηγήσουν σε αλλαγές στην απελευθέρωση ιόντων και έτσι απαιτούν ξεχωριστές μελέτες βιοσυμβατότητας, β) την τελική επεξεργασία της επιφάνειας που ακόμη πραγματοποιείται με χειροκίνητο τρόπο, γ) την τραχύτητα της επιφάνειας η οποία μπορεί να αυξήσει την κατακράτηση της πλάκας οδηγώντας στο σχηματισμό



όξινων μικροπεδίων που θα μπορούσαν να αλλάξουν δυσμενώς την απελευθέρωση των μεταλλικών ιόντων.⁸⁶

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι η βιοσυμβατότητα ενός υλικού εξετάζεται όχι μόνο με κλινικές, επιδημιολογικές και *in vitro* μελέτες, αλλά και από μελέτες αντοχής στη διάβρωση. Έτσι κατά την αξιολόγηση της βιοσυμβατότητας τα δεδομένα διάβρωσης αποτελούν ένα χρήσιμο συμπλήρωμα των μελετών βιοσυμβατότητας. Αυτό διότι αν ένα οδοντιατρικό κράμα διαβρώνεται εύκολα, θα απελευθερώσει μεγαλύτερο αριθμό μεταλλικών ιόντων (προϊόντα διάβρωσης) στη στοματική κοιλότητα τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν τη βιοσυμβατότητα των οδοντικών κραμάτων αυξάνοντας τον ρίσκο για ανεπιθύμητες ενέργειες στον οργανισμό μεταξύ των οποίων είναι οι δυσάρεστες γεύσεις, τοπικές αντιδράσεις φλεγμονής του περιβάλλοντος ιστού (ερεθισμοί) και οι συστηματικές αντιδράσεις (π.χ. αλλεργικές αντιδράσεις).^{5,37,137}

5.2.2.5 Αντοχή στη διάβρωση

Η διάβρωση είναι μια διαδικασία μείωσης της οξειδωσης που επηρεάζει ένα υλικό σε μια χημική ή ηλεκτροχημική διαδικασία. Η ξηρή διάβρωση εμφανίζεται όταν μια μεταλλική επιφάνεια αντιδρά με ατμοσφαιρικό οξυγόνο για να δημιουργήσει ένα λεπτό στρώμα οξειδίου στην μεταλλική επιφάνεια. Εκτός από το χρυσό και λίγες άλλες εξαιρέσεις, τα περισσότερα μέταλλα σχηματίζουν ένα λεπτό επιφανειακό οξείδιο το οποίο είναι χημικά σταθερό και το οποίο μπορεί, ή όχι, να αποτελεί εμπόδιο στην περαιτέρω οξειδωση του υποκείμενου μετάλλου. Στο υγρό περιβάλλον της στοματικής κοιλότητας όπου λειτουργούν οδοντικές αποκαταστάσεις, η ηλεκτροχημική διάβρωση ή η γαλβανική διάβρωση είναι πολύ πιο συχνή. Ηλεκτροχημική διάβρωση λαμβάνει χώρα όταν ένα μέταλλο τοποθετείται σε ένα διάλυμα (ή ηλεκτρολύτη) και λαμβάνει χώρα αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του διαλύματος. Αυτός ο τύπος διάβρωσης μπορεί να λάβει χώρα σε σχεδόν οποιοδήποτε διάλυμα, αλλά είναι ιδιαίτερα έντονος σε όξινα περιβάλλοντα, ενώ επιταχύνεται από την παρουσία ιόντων χλωρίου που μπορεί να υπάρχουν στην στοματική κοιλότητα. Άλλοι παράγοντες επιτάχυνσης περιλαμβάνουν την παρουσία διαφορετικών κραμάτων που μπορούν να σχηματίσουν κύτταρα σαν μπαταρίες σε όλο το υγρό που τα συνδέει, και τοπικές διακυμάνσεις στη χημεία επιφανείας ή στη χημεία ηλεκτρολυτών (π.χ. έλλειψη οξυγόνου μέσα σε ρωγμές και κοιλότητες).⁹⁹

Τα μεταλλικά ιόντα απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών διάβρωσης. Τα απελευθερωμένα ιόντα θα μπορούσαν τελικά να κορέσουν το διάλυμα, αλλά στην στοματική κοιλότητα ξεπλένονται συνεχώς από τρόφιμα, σάλιο και άλλα υγρά, και



έτσι η διαδικασία διάβρωσης συνεχίζεται.¹⁴⁰ Τα κράματα που εισάγονται στο στοματικό περιβάλλον πρέπει να έχουν την χαμηλότερη απελευθέρωση μεταλλικών ιόντων καθώς η μακροχρόνια εκτεταμένη απελευθέρωση τους μπορεί να προκαλέσει κυτταροτοξικότητα, γενοτοξικότητα, υπερευαισθησία και δυσμενείς επιδράσεις στους ιστούς όπως ουλίτιδα.⁹⁹

Σε γενικές γραμμές η αντίσταση στη διάβρωση και στην οξείδωση των κραμάτων Co-Cr είναι εξαιρετική. Τα κράματα Co-Cr, και ιδίως τα CST που παρουσιάζουν μια ανομοιογενή δομή, εξασφαλίζουν την σταθερότητα τους στο στοματικό περιβάλλον χάρη στην παθητικοποίηση. Η αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων Co-Cr οφείλεται στην παθητικοποίηση, ήγουν στο σχηματισμό ενός αυθόρμητου (βιολογικός φραγμός) παθητικού στρώματος οξειδίων στις επιφάνειες τους, στον αέρα ή σε ηλεκτρολύτες σε ανοιχτό κύκλωμα το οποίο μειώνει τον ρυθμό εξέλιξης της διάβρωσης ήτοι τη ροή των απελευθερούμενων ιόντων (ενεργεί ως εμπόδιο στη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ του κράματος και του σάλιου), και συνεπώς η αντοχή αυτή εξαρτάται από τη σύνθεση, τη δομή και τις ιδιότητες του λεπτού αυτού παθητικού φιλμ οξειδίου. Ακόμη, η βιοσυμβατότητα των μετάλλων και των κραμάτων είναι συνέπεια της παρουσίας της επιφανειακής στιβάδας οξειδίου. Οι χημικές ιδιότητες και συνεπώς οι χημικές διεργασίες διεπαφής καθορίζονται ακριβώς από αυτό το στρώμα οξειδίου και όχι από το ίδιο το μέταλλο.^{37,57,125,144}

Ουσιαστικά, υπό φυσιολογικές συνθήκες τα ιόντα που απελευθερώνονται από τα κράματα αλληλεπιδρούν με τα ιόντα από το σάλιο για να σχηματίσουν την παθητική μεμβράνη. Σε επιθετικό ωστόσο στοματικό περιβάλλον (π.χ. pH 3), τα ιόντα του σάλιου θα μπορούσαν να αντιδράσουν με τα επιφανειακά στοιχεία αλλάζοντας ή προκαλώντας ελαττώματα στα στρώματα παθητικών οξειδίων των κραμάτων. Για παράδειγμα, η διακύμανση του pH του σάλιου στην περίπτωση πορωδών υλικών θέτει σε κίνδυνο την παθητική μεμβράνη οξειδίων με διάσπαση, οδηγώντας σε μια μη ομοιόμορφη διαδικασία διάβρωσης (η πυκνότητα των κρατήρων και το βάθος των οπών αυξάνουν την διάβρωση, πιθανώς επειδή η συσσώρευση ιόντων από τεχνητό σάλιο στους πόρους προκαλεί τη διάσπαση της παθητικής ταινίας η οποία με τη σειρά της επιταχύνει τα φαινόμενα διάβρωσης).^{5,37,137}

Το στρώμα παθητικών οξειδίων αποτελείται κυρίως από Cr₂O₃ (περίπου 90 %), με δευτερεύοντα συστατικά το Mo και το Ni (εφόσον περιέχεται στο κράμα). Υπό φυσιολογικές συνθήκες, το Cr στα Co-Cr παρουσία αέρα, σχηματίζει αυθόρμητα ένα προστατευτικό στρώμα παθητικού οξειδίου του Cr₂O₃, σύμφωνα με την αντίδραση: $\text{Cr} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$. Επίσης, σε δυναμικά πιο θετικά από 0,8 V, μπορούν να σχηματιστούν διαλυτά είδη Cr σύμφωνα με την εξής αντίδραση: $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CrO}_4^{2-} + 10 \text{H}^+ + 6 \text{e}^-$.¹³⁶



Το πάχος του παθητικού στρώματος οξειδίων είναι 1-4 nm. Παρόλο που στις ερευνητικές μελέτες υπάρχουν ενδείξεις ότι το πάχος του φιλμ παθητικού οξειδίου αυξάνεται και αυξάνει έτσι την παθητικότητα με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζεται από τη διακύμανση και τη μεταβλητότητα του pH του σάλιου σε συνάρτηση με την ποιότητα των τροφίμων και των υγρών που λαμβάνονται (όξινα τρόφιμα και ποτά, συμπληρώματα διατροφής, πόσιμο νερό ή τσάι) ή από τη χρήση οδοντόκρεμων και στοματοπλυμάτων που αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν το pH. Ανεξάρτητα από τη διατροφική ικανότητα του πληθυσμού που μπορεί να αλλάξει την τιμή pH του σάλιου, ο ρυθμός διάβρωσης είναι κάτω από 1 $\mu\text{m}/\text{έτος}$ στην περίπτωση του κράματος Co-Cr, αποδεικνύοντας ότι αυτό το κράμα είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και συνιστάται για την επιτυχή θεραπεία ασθενών με μεταλλικούς σκελετούς.¹⁰⁰ Το στρώμα παθητικοποίησης μπορεί να απομακρυνθεί κατά τη διάρκεια της κανονικής χρήσης, επιτρέποντας έτσι την απελευθέρωση στοιχείων.¹⁴³

Σημειώνεται συχνά θεωρείται ότι υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση της ποσότητας απελευθερούμενων ιόντων και του βαθμού διάβρωσης ενός υλικού. Ωστόσο παρόλο που κάποια υλικά υφίστανται περισσότερη διάβρωση, λιγότερα ιόντα εκλύονται, και αυτό οφείλεται στα προϊόντα διάβρωσης που προσεγγίζουν την μεταλλική επιφάνεια και σχηματίζουν ένα αδρανές στρώμα. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση της αντίστασης στη διάβρωση υλικών με διαφορετικές περιεκτικότητες και μικροδομές δεν είναι ακριβής, εάν εκτιμάται η έκπλυση ιόντων μόνο σε ένα μέσο.¹⁴⁵

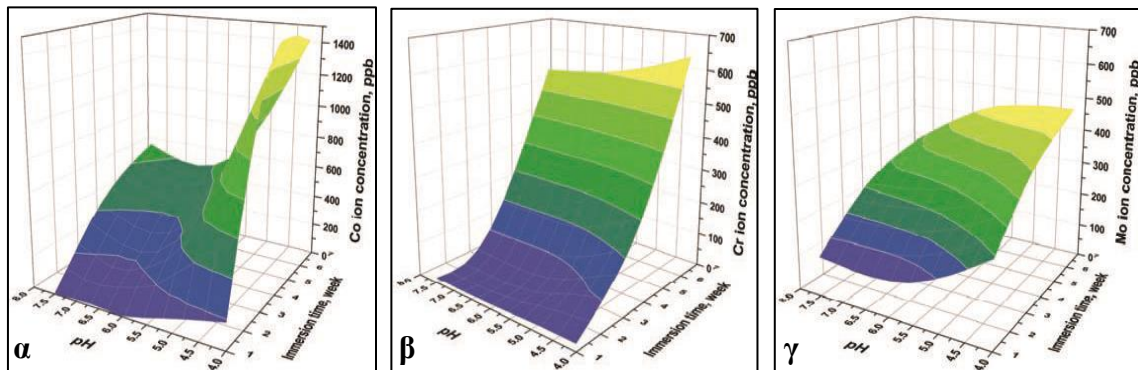
Αρκετές μελέτες έχουν εξετάσει την αντίσταση στη διάβρωση CST κραμάτων Co-Cr αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο. Ορισμένοι ερευνητές εξέτασαν τη συμπεριφορά ενός CST κράματος Co-Cr στο τεχνητό σάλιο στους για 7 ημέρες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ποσότητες των απελευθερωμένων στοιχείων Co, Cr και Mo ήταν πολύ κάτω από τα επιτρεπόμενα επίπεδα.⁸⁷ Διαφορετικοί ερευνητές, μελετώντας τη συμπεριφορά διάβρωσης των CST κραμάτων Co-Cr, αφού βυθίστηκαν σε 4 περιβάλλοντα προσομοίωσης σωματικών υγρών με διαφορετικά pH (τεχνητό σάλιο Fusayama-Meyer, διαλύματα Hank's και Ringer, κιτρικό οξύ), ανέφεραν ότι το κράμα παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε αυτά και είναι πολύ ευαίσθητο στη τοπική διάβρωση (μικροδιάβρωση) στο διάλυμα του Hank, ακόμη και μετά από τις πρώτες ώρες της βύθισης.¹⁴⁴ Άλλοι ερευνητές, στην έρευνα τους σε CST κράματα Co-Cr, βρήκαν ότι το υψηλότερο ποσοστό απελευθέρωσης ιόντων μεταξύ των Co, Cr και Mo μετά από εμβάπτιση για 7 εβδομάδες σε τεχνητό σάλιο (Εικόνα 5-35), ήταν για τα ιόντα Co των οποίων όμως οι ποσότητες απελευθέρωσης ήταν αρκετά μικρές (100 φορές χαμηλότερες από εκείνες που αναφέρει το πρότυπο ISO 22674). Οι συγκεντρώσεις των Cr και Mo δεν διέφεραν δραστικά στο κράμα, δηλαδή οι ποσότητες απελευθέρωσης ήταν πολύ



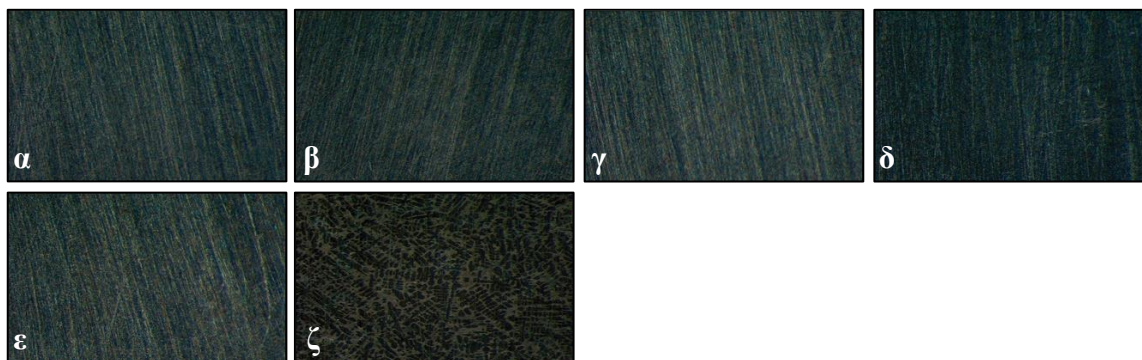
μικρές. Επομένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις των απελευθερωμένων μεταλλικών ιόντων δεν αντανακλούν το περιεχόμενο βάρους τους στο κράμα. Παρομοίως, άλλοι ερευνητές διερεύνησαν την απελευθέρωση ιόντων σε κράμα Co-Cr και έδειξαν ότι η τιμή pH του διαλύματος δοκιμής επηρέασε σημαντικά την απελευθέρωση ιόντων Co, αλλά όχι την απελευθέρωση ιόντων Cr.⁸⁷ Το 2015, οι Beer-Lech και Sugowska¹³⁵ απέδειξαν ότι τα CST κράματα Co-Cr έχουν υψηλή αντοχή στην ηλεκτροχημική διάβρωση σε τεχνητό σάλιο καθώς έχουν πολύ καλή παθητική ικανότητα που εκφράζεται από την ευρεία παθητική περιοχή και τη χαμηλή πυκνότητα ρεύματος στην παθητική κατάσταση. Το 2016, οι Qian και συν¹³⁶, μετά την εμβύθιση για 7 ημέρες σε τεχνητό σάλιο με pH 5 και 2,5 των CST κραμάτων Co-Cr-Mo και Co-Cr-Mo-Ni επισήμαναν ότι το κράμα Co-Cr-Mo είναι πιο σταθερό και ανθεκτικό στη διάβρωση σε σύγκριση με το κράμα Co-Cr-Mo-Ni για οποιαδήποτε τιμή pH λόγω της αυξημένης αντίστασης του στρώματος οξειδίου. Μάλιστα, αν και σε pH 2,5 και τα δύο κράματα είχαν μειωμένη αντίσταση στη διάβρωση, ωστόσο δεν βρέθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην αντίσταση στη διάβρωση για τα κράματα Co-Cr-Mo μεταξύ των περιβαλλόντων pH 5,0 και 2,5, ενώ για τα κράματα Co-Cr-Mo-Ni η αντίσταση διάβρωσης μειώθηκε σε στατιστικά σημαντικό επίπεδο από το pH 5,0 σε σύγκριση με το pH 2,5 ($P < 0,05$). Ως γνωστόν, το περιβάλλον χαμηλού pH μπορεί να αντιδράσει με τα επιφανειακά στοιχεία, αλλάζοντας ή προκαλώντας ελαττώματα στα στρώματα οξειδίου των κραμάτων, ωστόσο στη συγκεκριμένη μελέτη, στο pH 2,5 το επιφανειακό στρώμα οξειδίου του κράματος Co-Cr-Mo διατήρησε σταθερή αντίσταση, ενώ εκείνο του κράματος Co-Cr-Mo-Ni έγινε σημαντικά ασταθές ή ελαττωματικό. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε Ni του κράματος Co-Cr-Mo-Ni ενδέχεται να επηρέασε την αντοχή στη διάβρωση, καθώς το στρώμα οξειδίου στην μεταλλική επιφάνεια ενδέχεται να υποστεί ζημιά με την απελευθέρωση του Ni, μειώνοντας την αντίσταση στη διάβρωση, συν του ότι με την μειωμένη αντίσταση στη διάβρωση, η απελευθερούμενη ποσότητα του Ni θα αυξηθεί προκαλώντας περαιτέρω μειώσεις στην τιμή του pH οι οποίες επιταχύνουν τη διαδικασία διάβρωσης. Στην Εικόνα 5-36 φαίνεται η μεταβολή της μικροδομής της επιφάνειας των κραμάτων πριν και μετά τη δοκιμή διάβρωσης.¹³⁶ Σε άλλη μελέτη του 2018, διερευνήθηκαν οι δομικές μεταβολές στην επιφάνεια ενός CST κράματος Co-Cr μετά τη δοκιμή διάβρωσης σε διάλυμα τεχνητού σάλιου afnor με pH 6,7. Παρατηρήθηκε ότι το κράμα διαβρώθηκε πιο έντονα στη φάση της μεταλλικής μήτρας σχηματίζοντας μια στρώση οξειδίου 2-3 μm και επίσης στην δενδριτική φάση σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα οξειδίου. Μετά τη στίλβωση, το κράμα Co-Cr έδειξε μια επιφάνεια με μικρές μεταβολές μεταξύ των φάσεων αλλά με μεταβολές που έγιναν πιο έντονες μετά τη δοκιμή ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Δηλαδή, τα πειραματικά



αποτελέσματα δείχνουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών των αρχικών χημικών συνθέσεων και εκείνων που καταγράφηκαν μετά την εκτέλεση των ηλεκτροχημικών δοκιμών διάβρωσης. Όσον αφορά το ποσοστό, σε σύγκριση με την αρχική επιφάνεια, το Cr διατήρησε το ποσοστό μάζας του, τα στοιχεία Co και Mo έχασαν μέρος του αρχικού ποσοστού μάζας τους, ενώ άλλα όπως το Si αύξησαν το ποσοστό μάζας τους, γεγονός που δείχνει μια διάβρωση των στοιχείων Co και Mo και καλύτερη αντίσταση του Si. Για να αντισταθμιστεί το χαμένο ποσοστό Co και Mo, το O εμφανίστηκε σε υψηλό ποσοστό, ενώ τα C και P εμφανίστηκαν σε ορισμένες περιοχές. Εκτός από τις διακυμάνσεις ποσοστιαίων ποσοτήτων διαφορετικών χημικών στοιχείων, μπορεί επίσης να παρατηρηθούν οι τάσεις μετανάστευσης τους μεταξύ των ορίων και του κέντρου των κρυσταλλικών κόκκων. Πιο αναλυτικά, το Co μεταναστεύει προς το κέντρο των κόκκων στερεού διαλύματος, ενώ τα στοιχεία Cr και Mo μεταναστεύουν στα όρια τους και έχουν ομοιογενή ποσοτική κατανομή. Συνεπώς, το κράμα Co-Cr έχει συμπεριφορά στην ηλεκτροχημική διάβρωση σε τεχνητό σάλιο γενικευμένου τύπου και κατά προτίμηση σε φάσεις, με οξείδωση σε ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού και τον σχηματισμό ενός επιφανειακού στρώματος διάβρωσης στη φάση τύπου μήτρας.⁹⁰



Εικόνα 5-35 Συγκεντρώσεις των ιόντων Co (α), Cr (β) και Mo (γ) που απελευθερώθηκαν σε τεχνητό σάλιο. Παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση των ιόντων με την αύξηση του χρόνου εμβάπτισης, αύξηση των ιόντων με την μείωση του του pH, και η πιο έντονη επίδραση της τιμής pH του τεχνητού σάλιου στην απελευθέρωση μεταλλικού ιόντος θα μπορούσε να παρατηρηθεί στην περίπτωση του Co μετά από 6 εβδομάδες βύθισης.⁸⁷

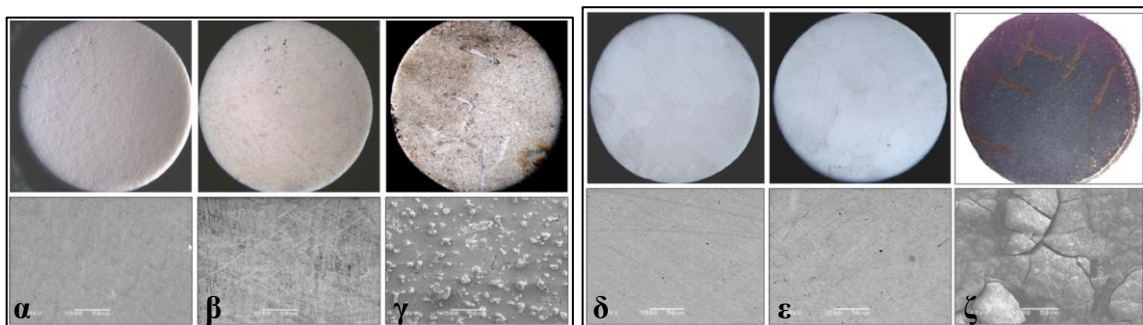


Εικόνα 5-36 Εικόνες μικροσκοπίου (μεγέθυνση $\times 100$) κραμάτων Co-Cr-Mo και Co-Cr-Mo-Ni: κράμα Co-Cr-Mo πριν από τη δοκιμή βύθισης (α), κράμα Co-Cr-Mo-Ni πριν από τη δοκιμή βύθισης (β), κράμα Co-Cr-Mo μετά από αυτή σε διάλυμα pH 5,0 (γ), κράμα Co-Cr-Mo-Ni μετά από εμφύπτιση 7 ημερών στο τεχνητό σάλιο σε pH 5,0 (δ), κράμα Co-Cr-Mo μετά από εμφύπτιση 7 ημερών στο τεχνητό σάλιο σε pH 2,5 (ε), κράμα Co-Cr-Mo-Ni μετά από εμφύπτιση 7 ημερών στο τεχνητό σάλιο σε pH 2,5 (ζ). Όπως φαίνεται, πριν από τη βύθιση και τα δύο κράματα εμφάνισαν διευθετησείς ευθείας γραμμής στις επιφάνειες (α, β) ενώ μετά τη βύθιση στο διάλυμα σε pH 5,0, δεν βρέθηκαν αξιοσημειώτες αλλαγές στα 2 κράματα (γ, δ). Σε pH 2,5, μια δενδριτική μικροδομή με μεγάλη μεταβολή παρατηρήθηκε στο κράμα Co-Cr-Mo-Ni (ε, ζ).¹³⁶

Οι Μ.Ο. απαιτούν ειδικό καθαρισμό υγιεινής και ο συνδυασμός βουρτσίσματος με εμφύπτιση σε χημικά διαλύματα αποτελεί την πιο συνιστώμενη μέθοδος για τον έλεγχο του βιοφίλμ. Η επιλογή του σωστού καθαριστικού του μεταλλικού σκελετού της Μ.Ο. αποτελεί πρόκληση για τον οδοντίατρο, ενώ παράλληλα επηρεάζει τον τεχνίτη στην κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού έναντι στα διάφορα καθαριστικά επιλογής του οδοντίατρο. Έχει αποδειχθεί ότι διαλύματα καθαριστικών που περιέχουν π.χ. υποχλωριώδη μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση, χρώση και ακόμη και απώλεια φυσικών ιδιοτήτων.¹²⁴ Βασιζόμενοι στο σκεπτικό αυτό, το 2011 οι Felirucci και συν¹⁴⁶ κατασκεύασαν δίσκους 2 χυτών κραμάτων Co-Cr παρόμοιας σύνθεσης και μετά από εμφύπτιση τους για 180 ημέρες σε 6 διαφορετικά διαλύματα καθαριστικών: υποχλωριώδες νάτριο 0,05 % (NaOCl), αναβράζοντα δισκία με βάση το υπερβορικό νάτριο (Corega Tabs και Polident), ένα δισκίο με βάση το κιτρικό οξύ (Medical Interporous), και τα διαλύματα Periogard και CeraCol, και σε απεσταγμένο νερό που χρησιμοποιήθηκε ως ομάδα ελέγχου, διερεύνησαν την επίδραση των καθαριστικών στην επιφάνεια των κραμάτων. Στην τρέχουσα μελέτη, δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ των κραμάτων και μεταξύ των καθαριστικών. Ωστόσο η χρήση δισκίων υποχλωριώδους νατρίου 0,05 % και κιτρικού οξέος προκάλεσε επιβλαβείς επιπτώσεις στην επιφάνεια των μεταλλικών τμημάτων του σκελετού της Μ.Ο., όπως αμαυρώσεις και εστιασμένη διάβρωση. Η ανάλυση EDS αποκάλυψε την παρουσία οξυγόνου για τα δείγματα που ήρθαν σε επαφή με τα 2 αυτά διαλύματα, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει ότι τα δύο διαλύματα προώθησαν την οξειδωτική διαδικασία των επιφανειών, οδηγώντας έτσι σε εστιασμένη διάβρωση. Μεγαλύτερο οξειδωτικό αποτέλεσμα είχε το NaOCl. Αν και αυτά τα διαλύματα δεν προκάλεσαν σημαντική αλλαγή τραχύτητας στα κράματα κοβαλτίου-χρωμίου, ενδέχεται να μην ενδείκνυνται για τον καθαρισμό της Μ.Ο. Αντίθετα, τα υπόλοιπα καθαριστικά αποδείχθηκαν



κατάλληλα για τον καθαρισμό δεδομένου ότι δεν παρατηρήθηκε παρουσία αμαυρώσεων στις επιφάνειες των κραμάτων που ήρθαν σε επαφή με αυτά.¹⁴⁶ Σε άλλη έρευνα, το 2017 οι Borsa και συν¹²⁴ κατασκεύασαν κυλίνδρους 2 χυτών κραμάτων Co-Cr και μετά από εμβύθιση τους σε 5 διαφορετικά διαλύματα καθαριστικών: 0,05 % υποχλωριώδες νάτριο, 4,2 % οξικό οξύ, 0,05 % σαλικυλικό νάτριο, υπερβορικό νάτριο (Corega Tabs®) και 0,2 % υπεροξικό οξύ και σε απεσταγμένο νερό που χρησιμοποιήθηκε ως ομάδα ελέγχου, διερεύνησαν τις επιφανειακές αλλαγές τους. Όσον αφορά τη σύγκριση καθαριστικών, με εξαίρεση το διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου 0,05 % το οποίο προκάλεσε σημαντικές επιφανειακές αλλαγές δηλαδή τη δημιουργία μεγαλύτερης διάβρωσης, τα άλλα διαλύματα δεν παρουσίασαν τέτοια ορατά επιβλαβή αποτελέσματα στα κράματα. Μετά από τις 90 εμβάπτισεις, και τα δύο κράματα παρουσίασαν μη στατιστικά σημαντικές (παρόμοιες) αλλαγές στην επιφάνεια, δηλαδή είχαν παρόμοια επιδείνωση τραχύτητας) σε διαφορετικά καθαριστικά, αν και μεγαλύτερη ήταν στο GM 800 (πιθανόν λόγω του ότι περιείχε Fe και W στη σύνθεσή του, καθώς η παρουσία διαφόρων μετάλλων στο κράμα μπορεί να τροποποιήσει αντοχή στη διάβρωση και να αυξήσει την ταχύτητα θαμπώματος (etching) δηλαδή της διάβρωσης του ανώτερου στρώματος). Ωστόσο, μεταξύ του χρόνου μετά την 1^η εμβάπτιση και του χρόνου μετά τις 90 εμβάπτισεις, το κράμα GM 800, παρουσίασε στατιστικά σημαντική διαφορά στις μεταβολές τραχύτητας όταν βυθίστηκε σε υποχλωριώδες νάτριο 0,05 %, το οποίο παρουσίασε την ενδεικτική εικόνα αποσύνδεσης επιφανειακών πλακών οξειδωσίας (Εικόνα 5-37).¹²⁴



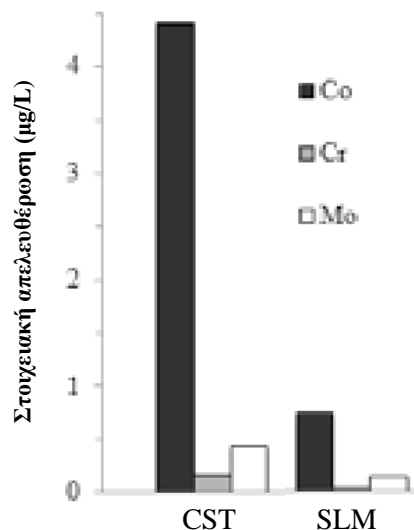
Εικόνα 5-37 Δείγμα κράματος Degudent (α-γ) και GM 800 (δ-ζ), βυθισμένα σε διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου 0,05% σε πειραματικούς χρόνους: πριν την εμβάπτιση (α και δ, αντίστοιχα), μετά την πρώτη εμβάπτιση (β και ε, αντίστοιχα) και μετά από 90 εμβάπτισεις (γ και ζ, αντίστοιχα). Πάνω οριζόντια είναι οι εικόνες στερεομικροσκοπίου (μεγέθυνση 8,5 x) και κάτω οριζόντια είναι εικόνες SEM (μεγέθυνση 500 x). Στον πειραματικό χρόνο «β και ε» το κάθε κράμα δείχνει μικρή αλλαγή στη φωτεινότητα της επιφάνειας, ενώ στον χρόνο «γ και ζ» κάθε κράμα δείχνει μια εκτεταμένη χρώση στην επιφάνεια.¹²⁴

Ορισμένοι ερευνητές μετά από εμβάπτιση για 30 min σε HCl με pH 2, NaOH με pH 10 και KCl με pH 6,5-7, ανέφεραν ότι στο ουδέτερο διάλυμα δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην ηλεκτροχημική συμπεριφορά κατά τη σύγκριση των μεθόδων SLS και SLM, ενώ στις διακυμάνσεις του pH καλύτερη απόδοση είχαν τα δείγματα SLS. Από θερμοδυναμική άποψη, όλα τα κράματα θα μπορούσαν να σχηματίσουν μια παθητική

μεμβράνη, ωστόσο το όξινο περιβάλλον οδηγεί σε ένα λεπτότερο παθητικό φιλμ οξειδίου. Κατά τη διάρκεια της εμβάπτισης, η τάση διάβρωσης των υλικών μειώθηκε λόγω της επαφής με το διάλυμα και αυτό μπορεί συνήθως να αποδοθεί στην πάχυνση του παθητικού φιλμ, το οποίο γίνεται πιο προστατευτικό, ενώ μετά από 30 min βύθισης, όλα τα κράματα έτειναν να επιτύχουν σταθερή κατάσταση.¹²³

Αρκετές μελέτες που πραγματοποίησαν δοκιμές διάβρωσης έχουν δείξει ότι τα κράματα SLM έχουν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση και χαμηλότερες εκλύσεις ιόντων σε σχέση με τα CST κράματα [μια μελέτη το 2007: έως και 14 ημέρες σε χλωριούχο νάτριο και γαλακτικό οξύ 0,1 mol/l το καθένα με τιμή pH 2,3,¹⁰⁶ άλλη το 2012: έως και 7 ημέρες σε τεχνητό σάλιο με pH 7,⁹⁹ άλλη το 2012: έως και 7 ημέρες σε τεχνητό σάλιο με pH 2,3,¹⁰⁶ άλλη το 2013: έως και 30 ημέρες σε 1 % κατά βάρος διάλυμα γαλακτικού οξέος με pH 2,3,¹⁴⁷ άλλη το 2013: έως και 42 ημέρες σε τεχνητό σάλιο με pH 2,3, άλλη το 2014: έως 24 ώρες σε τεχνητό σάλιο με pH 2,5,¹³⁰ άλλη το 2015: έως και 30 ημέρες σε τεχνητό σάλιο με pH όξινο (2,3) - ουδέτερο (6,8)-ενδιάμεσο pH (4,5),¹⁰⁶], αν και η μετρούμενη ποσότητα των απελευθερωμένων ιόντων δείχνει ότι και οι δύο τεχνικές είναι ασφαλείς για χρήση στη στοματική κοιλότητα δεδομένου ότι οι εκλύσεις ιόντων που εμφανίζουν είναι κάτω από το ανώτερο όριο των 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ εντός $7\pm 0,1$ ημερών που ορίζει το ISO 10271.^{11,19,99,106,130,133,145} Άλλοι ερευνητές, μελετώντας τις τάσεις διάβρωσης των κραμάτων Co-Cr μετά από 42 ημέρες σε τεχνητό σάλιο, έδειξαν ότι τα κράματα Co-Cr που παρήχθησαν SLM είχαν καλύτερη απόδοση από τα CST κράματα.¹¹ Ορισμένοι ερευνητές παρά την μικρότερη απελευθέρωση ιόντων στο SLM ανέφεραν ότι σχεδόν δεν ανιχνεύθηκε διαφορά μετά από δύο εβδομάδες μεταξύ τους, έχοντας συγκεντρώσεις κάτω από το όριο ανίχνευσης της μεθόδου ανάλυσης.¹³³ Άλλοι ερευνητές, μετά τη βύθιση των κραμάτων σε τεχνητό σάλιο για 7 ημέρες, έδειξαν ότι οι απελευθερώσεις των Co (περίπου τέσσερις φορές χαμηλότερη) και Mo ήταν σημαντικά χαμηλότερες στην ομάδα SLM σε σύγκριση με τις αντίστοιχες της ομάδας CST.⁹⁹ Πάντως και στις 2 μεθόδους το κύριο ιόν που απελευθερώνεται είναι το Co.¹³³ Στην Εικόνα 5-38, διακρίνονται τα κυρίαρχα στοιχεία που απελευθερώνονται από τα κράματα Co-Cr, τα οποία φαίνεται να συμφωνούν και με νεότερα δεδομένα.





Εικόνα 5-38 Στοιχειακή απελευθέρωση Co-Cr σε τεχνητό σάλιο μετά από 42 ημέρες όπου διακρίνονται οι διαφορές CST και SLM για κάθε στοιχείο.¹¹

Οι Alageel και συν⁵¹ (2018) εμβυθίζοντας κράματα σε τεχνητό σάλιο ανέφεραν ότι τα CST και SLS απελευθέρωσαν Co, Cr και Mo και σε σύγκριση με τα άλλα στοιχεία, η απελευθέρωση του Co βρέθηκε να είναι σχετικά πολύ υψηλότερη και από τα δύο κράματα, και αυτό πιθανώς οφειλόταν στο γεγονός ότι το Co είναι το κύριο στοιχείο (64 %) στη σύνθεση των κραμάτων Co-Cr. Παρόλο που τα κράματα SLS απελευθέρωσαν υψηλότερη ποσότητα Co από τα κράματα CST, η ποσότητα Co που απελευθερώθηκε και από τα δύο κράματα ήταν ασφαλής και πολύ χαμηλότερη από την συνιστώμενη ημερήσια πρόσληψη τροφής.⁵¹

Το 2015, οι Holm και συν¹⁴⁰ μετά από δοκιμές διάβρωσης κραμάτων Co-Cr με H-MIL, SLM, και CST για έως και 7 ημέρες με εμβάπτιση σε διάλυμα MEM (Minimum Essential Medium, με άλατα με άλατα Earle's, που περιέχει 2 mmol L⁻¹ L-γλουταμίνη) με pH 7 και NaCl με 1 % γαλακτικό οξύ με pH 2,3 έδειξαν ότι σε γενικές γραμμές όλα τα κράματα είχαν χαμηλή απελευθέρωση στοιχείων.¹⁴⁰ Πάντως, στην SLM και H-MIL η απελευθέρωση ιόντων Co (κυρίως) και Mo από το κράμα είναι μικρότερη συγκριτικά με τη CST ενώ δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στην απελευθέρωση ιόντων Cr μεταξύ τους.^{99,120,135,148,149} Το 2015, οι Tuna και συν¹⁴⁵ απέδειξαν ότι τα κράματα Co-Cr που παράγονται με DMLS εμφανίζουν παρόμοια αντοχή στη διάβρωση και απελευθέρωση ιόντων με εκείνα της τεχνικής MIL, ενώ και οι 2 τεχνικές εμφανίζουν σημαντικά καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση και μικρότερη απελευθέρωση ιόντων από τη μέθοδο CST καθώς παράγουν περισσότερο ομοιογενείς μικροδομές. Κράματα που έχουν μονοφασικές δομές, όπως συμβαίνει στο SLM μεγαλύτερη αντίσταση στη διάβρωση, καθώς η γαλβανική διάβρωση μπορεί να συμβεί σε πολυφασικές δομές (CST).¹⁴⁵ Όσον αφορά τη σύγκριση των



λοιπών τεχνικών σε μεταλλοκεραμικά κράματα έχουν δειχθεί τα εξής. Αντίθετα, το 2018 οι Costea και συν¹⁵⁰ μετά από δοκιμή διάβρωσης σε έως και 15 λεπτά σε τεχνητό σάλιο 3,5 % χλωριούχου νατρίου, έδειξαν ότι η αντίσταση στη διάβρωση είναι μικρότερη στη MIL σε σχέση με τη CST και επισήμαναν ότι σχηματίζονται δύο στρώματα στην επιφάνεια των κραμάτων, εκ των οποίων το ένα είναι περισσότερο πορώδες (ευνοείται στο MIL) και το άλλο είναι συμπαγές με παθητικό αποτέλεσμα (ευνοείται στη CST και οδηγεί σε μεγαλύτερη προστασία και συνεπώς μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση). Άλλοι ερευνητές το 2020 μετά από δοκιμή σε διάλυμα όπου αναμειχθηκε γαλακτικό οξύ 0,1 mol/ με χλωριούχο νάτριο 0,1 mol/l με pH 2,3, έδειξαν ότι η υψηλότερη απελευθέρωση ιόντων υπάρχει στη μέθοδο CST, έπειτα στη μέθοδο MIL, ενώ οι τεχνικές S-MIL και SLM παρουσιάζουν χαμηλότερη απελευθέρωση συγκριτικά με τις CST και MIL χωρίς όμως να επισημαίνεται το ποσοστό απελευθέρωσης όπου λόγω πολύ χαμηλής τιμής του και δεν αναφέρεται αν υπάρχει διαφορά μεταξύ τους. Τα στοιχεία που εκλύθηκαν ήταν το Co το οποίο απελευθερώθηκε και στη τεχνική MIL και στη CST όμως η μεγαλύτερη απελευθέρωση ήταν για τη CST, τα ιόντα Cr που απελευθερώθηκαν μόνο στη MIL, και τα ιόντα Si που απελευθερώθηκαν και για τις 2 τεχνικές. Κανένα από τα υλικά δεν απελευθέρωσαν Pb, Cd, Ni ή Be, τα οποία θεωρούνται επιβλαβή στοιχεία. Σημειώνεται ότι, Al και σε ορισμένες περιπτώσεις ιόντα V απελευθερώθηκαν για όλες τις τεχνικές.¹³⁰ Το 2020, οι Padrós και συν¹²¹ μετά την εμβάπτιση σε τεχνητό σάλιο των κραμάτων Co-Cr από MIL, CST και SLM, έδειξαν ότι η καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση και η χαμηλότερη απελευθέρωση ιόντων των κραμάτων Co-Cr ήταν για τη MIL, έπειτα για την SLM, με τελευταία την CST. Τα κράματα MIL παρουσίασαν καλύτερα αποτελέσματα λόγω του ότι αποτελούνταν από μια μόνο ομοιογενή φάση, ενώ σημειώνεται η ελαφρά μείωση που παρουσίασαν οφείλεται στη δημιουργία υπολειμματικής τάσης που προκαλείται από τη διαδικασία κατεργασίας στην επιφάνεια, η οποία μπορεί να ενισχύσει την επιφανειακή χημική αντιδραστικότητα κατά τη διάρκεια της δοκιμής διάβρωσης. Αυτή η μείωση του δυναμικού διάβρωσης θα μπορούσε να ανακτηθεί με θερμική επεξεργασία στους 400 °C για 30 λεπτά για να εξαλειφθούν οι τάσεις. Τα CST δείγματα έδειξαν υψηλότερα ποσοστά διάβρωσης και επίπεδα απελευθέρωσης ιόντων και αυτό συνδέεται με τις εσωτερικές ατέλειες. Από αυτή την άποψη τόσο τα CST όσο και τα SLM δείγματα έχουν ελαττώματα όπως πόρους, εσωτερική συστολή, καθώς και μικροδιαφορισμούς με τη μορφή ιζημάτων, και αυτά τα είδη ελαττωμάτων προωθούν την εμφάνιση μικρο-γαλβανικών μηχανισμών διάβρωσης, ενεργώντας ως επιταχυντές διάβρωσης. Οι διεργασίες τήξης στα SLM και CST δείγματα είχαν ως αποτέλεσμα την παρουσία ιζημάτων πλούσιων σε Cr, W και Nb που είναι επιζήμια για την αντοχή στη διάβρωση. Αυτά τα ιζήματα προκαλούν μείωση της



περιεκτικότητας σε Cr στην επιφάνεια. Είναι πολύ γνωστό ότι η αντοχή στη διάβρωση αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε Cr με το σχηματισμό οξειδίου χρωμίου στην επιφάνεια που αυξάνει την παθητικοποίηση. Κατά συνέπεια, η μείωση του Cr προκαλεί αύξηση της διάβρωσης και της απελευθέρωσης ιόντων.¹²¹

Για τα κράματα PBF υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους επιδεικνύουν αυξημένη αντοχή στη διάβρωση συγκριτικά με τα CST, μεταξύ των οποίων είναι: α) η υψηλότερη πυκνότητα (λιγότεροι πόροι – πιο συμπαγής δομή), η μεγαλύτερη ομοιογένεια (ακόμη και μονοφασικές δομές) και η περισσότερη λεπτόκοκκη μικροδομή, β) το γεγονός ότι αποτελεί πιο ελεγχόμενη διαδικασία, γ) και η προσθήκη βολφραμίου στις σκόνες το οποίο είναι γνωστό ότι βελτιώνει τις ιδιότητες διάβρωσης των κραμάτων Co-Cr και μειώνει τις διαμεταλλικές περιοχές με έλλειψη χρωμίου.¹⁰⁶

Η αντίσταση στη διάβρωση όπως είναι φανερό εξαρτάται από τη μέθοδο κατασκευής και μάλιστα έχειδειχθεί ότι μπορεί να διαφέρει και μεταξύ των δειγμάτων που κατασκευάζονται με την ίδια μέθοδο και αυτό πιθανώς σχετίζεται με το ότι η διαδικασία διάβρωσης είναι πολύπλοκη και η απελευθέρωση ιόντων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες,¹⁴⁵ μερικοί από τους οποίους είναι οι εξής:

➤ Από το ίδιο το κράμα:

- Τύπος.¹⁴⁵
- Χημική σύνθεση. Η αντοχή στη διάβρωση ενός κράματος Co-Cr αυξάνεται καθώς το ποσοστό του Cr φτάνει το 25 %, λόγω της επίδρασης της στρώσης οξειδίου Cr που καλύπτει την επιφάνεια του. Με το σχηματισμό της ενδιάμεσης ένωσης Co_3Mo (hcp),⁹² το Mo βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση. Το Mo δρα επίσης ως ενισχυτικό στερεού διαλύματος. Γενικώς, η περιεκτικότητα σε Cr και Mo βελτιώνουν την αντοχή στα οξέα, παρέχουν καλή αντοχή στη μικροδιάβρωση και την διάβρωση των κοιλοτήτων σε όξινα και ουδέτερα περιβάλλοντα και υψηλή αντοχή στη καταπόνηση και στη κόπωση από διάβρωση. Ορισμένοι ερευνητές έδειξαν ότι η αντίσταση στη διάβρωση ενός CST κράματος Co-Cr-Mo ήταν υψηλότερη από ότι στην περίπτωση ενός κράματος Co-Cr-Ti, επειδή η σταθερότητα του φιλμ παθητικού οξειδίου που υπάρχει στην επιφάνεια Co-Cr-Mo ήταν υψηλότερη. Επίσης το W, ως μια διαμεταλλική ένωση, βοηθά στη μείωση του σχηματισμού ζωνών εξαντλημένων σε Cr και αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση. Το Nb από μελέτες σε άλλα κράματα φαίνεται να αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση.^{87,92,143–145,150,151}
- Στοιχειακή κατανομή στο υλικό, και επηρεάζεται έντονα από τον διαχωρισμό των στοιχείων κράματος στη μικροδομή. Στην περίπτωση που υπάρχουν μικροδομικές



ετερογένειες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως σημεία εκκίνησης για προτιμησιακή διάβρωση.⁹²

- Χαρακτηριστικά της επιφανείας. Η παρουσία κοιλοτήτων και ακαθαρσιών στην επιφάνεια μπορεί να ενισχύσει τη διάβρωση).^{135,140,151}
- Μίκρο και μάκρο – δομή. Ένα πολυφασικό κράμα είναι πιο επιρρεπές στη διάβρωση.^{135,140,151} Ακόμη, τα ελαττώματα (π.χ. χύτευση) που εμφανίζονται στη δομή καθιστούν δύσκολη την ομοιόμορφη εναπόθεση του παθητικού στρώματος και αποτελούν αίτιο αυξημένης διάβρωσης. Το πορώδες προκαλεί μικροδιάβρωση (pitting corrosion) και διάβρωση κοιλοτήτων (crevice corrosion) και αυξάνει την ευαισθησία στη διάβρωση σε ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού.⁹² Επίσης, οι διαδενδριτικοί μικροδιαφορισμοί σε μορφή μπλοκ, δεν καλύπτονται με στρώμα οξειδίου λόγω διαφοράς δυναμικού, και μπορεί να ξεκινήσουν την εμφάνιση μικροδιάβρωσης (corrosion pits).¹³⁵
- Παράμετροι επεξεργασίας, όπως για τη χύτευση η αντίσταση εξαρτάται από: τους αριθμούς επαναχύτευσης,¹⁵¹ τη θερμοκρασία χύτευσης, την ταχύτητα της μηχανής χύτευσης και τον χρόνο ψύξης. Ακόμη, τα χυτά που γίνονται χρησιμοποιώντας τη φυγοκεντρική μέθοδο χύτευσης εμφανίζουν υψηλότερη ανθεκτικότητα του παθητικού στρώματος που εκφράζεται με το χαμηλότερο ρεύμα στην παθητική κατάσταση από ότι τα χυτά που γίνονται με τη μέθοδο πίεσης-κενού.¹³⁵
- Τελική επεξεργασία κράματος. Ερευνητές το 2011 έδειξαν ότι, τα κράματα που επεξεργάζονται μόνο με ηλεκτροστύλωση παρουσιάζουν καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση από εκείνα που στύλβονται μόνο με χειροκίνητο τρόπο.¹¹ Σε άλλη μελέτη, μετά τη δοκιμή διάβρωσης, με εμβάπτιση για 30 ημέρες σε σάλιο και σε διάλυμα εμβάπτισης πλάκας δειγμάτων κράματος CST Co-Cr που είχαν υποστεί μόνο ηλεκτροστύλωση και όχι περαιτέρω μηχανική κατεργασία δείχθηκε ότι, μερικοί κρυσταλλίτες διαλύθηκαν αλλά εμφανίστηκαν μερικές νέες φάσεις (πυκνή διασπορά πολύ μικρών κρυσταλλιτών) οι οποίες ήταν αποτέλεσμα διάβρωσης – κυρίως διάλυσης μετάλλων και σχηματισμού άλατος. Η παρουσία ορισμένων στοιχείων από το διάλυμα διάβρωσης καταγράφηκε επίσης στην επιφάνεια του κράματος. Πιο αναλυτικά, μετά από εμβάπτιση στο σάλιο, πολλοί μικροί σχηματισμοί που μοιάζουν με κόκκους φάνηκαν σε ίδια μέρη ή σε ολόκληρη την επιφάνεια. Το SEM με EDS έδειξε κορυφές κύριων στοιχείων που συνθέτουν το κράμα, όπως Co, Cr, Si, Mn και C, αλλά έδειξε επίσης κορυφές P, O, S και Ti. Το Ti πιθανότατα προστίθεται στο κράμα σε πολύ μικρές ποσότητες από τον κατασκευαστή και η αιχμή O είναι πιθανώς



από το Cr_2O_3 (στρώμα οξειδίου), το οποίο έχει πάχος μόνο μερικά νανόμετρα και αποτρέπει τις διαδικασίες διάβρωσης. Η κορυφή του φωσφόρου αποδόθηκε στο φωσφορικό ανιόν από φωσφορικό διογκωτικό του διαλύματος εμφάνισης (σάλιο, pH 6) και πιθανό σχηματισμό φωσφορικού άλατος με τα μέταλλα της επιφάνειας. Η κορυφή του θείου αποδόθηκε στα ανιόντα από διάλυμα στίλβωσης ηλεκτρολυτών το οποίο περιέχει 10 % θειικό οξύ. Δεν είναι γνωστό εάν σχηματίστηκαν άλατα με τα μέταλλα στην επιφάνεια, ή εάν τα μεταλλικά ιόντα απελευθερώθηκαν πρώτα από το κράμα και στη συνέχεια καθίζησαν, κάτι που είναι λιγότερο πιθανό (τα δείγματα καθαρίστηκαν και υποβλήθηκαν σε υπέρηχο σωστά). Όσον αφορά την εμφύθιση σε διάλυμα εμφάνισης πλάκας, μετά από αυτή, μπορεί επίσης να φανεί καθαρά νέος σχηματισμός τύπου κόκκου. Μπορούν να παρατηρηθούν κορυφές κύριων στοιχείων που συνθέτουν το κράμα όπως Co, Cr, Si, Mo, Mn και C. Επιπλέον, εμφανίστηκαν επίσης κορυφές K, O και Cl. Η αιχμή O οφείλεται πιθανώς στο Cr_2O_3 , ενώ το K, το Na και Cl προέρχονται πιθανώς από τα ρυθμιστικά ανιόντα στην πλάκα. Δεν είναι γνωστό εάν νέες δομές στην επιφάνεια είναι χημικά άλατα που σχηματίζονται με επιφανειακά μέταλλα, ή καθιζήσεις ή κάτι άλλο, και θα αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω μελέτης. Πιθανόν οι μικροί κόκκοι αντιπροσωπεύουν άλατα, και αυτό υποδηλώνει περαιτέρω ότι η στιβάδα του Cr_2O_3 σπάστηκε κατά τη διάρκεια της εμφύθισης επιτρέποντας το σχηματισμό άλατος.⁹⁸

- Η οξείδωση (αρχική προθέρμανση) και η στίλβωση της επιφάνειας των δειγμάτων πριν από τη δοκιμή εμφάνισης αποτελεί μέρος της τακτικής τεχνικής διαδικασίας κατά την παραγωγή μεταλλοκεραμικών αποκαταστάσεων καθώς η θερμική επεξεργασία είναι ζωτικής σημασίας για τις ιδιότητες ένωσης πορσελάνης-μετάλλου, αλλά η τροποποιημένη επιφάνεια είναι επίσης υπεύθυνη για αυξημένη απελευθέρωση στοιχείων, για αυτό συνιστάται η στίλβωση της επιφάνειας για την αφαίρεση αυτών των στοιχείων. Περισσότερα μεταλλικά ιόντα απελευθερώνονται από την επιφάνεια όταν υπολείμματα της στιβάδας οξειδίου παραμένουν στην επιφάνεια.^{140,152}
- Το μέσο απελευθέρωσης ή το βιολογικό περιβάλλον, και συγκεκριμένα όσο μειώνεται η οξύτητα (pH) και όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής σε αυτό τόσο αυξάνεται η ολική απελευθέρωση ιόντων και στις 2 μεθόδους και συνεπώς τόσο αυξάνεται η διαφορά απελευθέρωσης μεταξύ των δύο τεχνικών κατασκευής.¹⁴⁰ Για παράδειγμα, ορισμένοι ερευνητές απέδειξαν ότι η μεταβολή pH από 6,8 σε 2,3, για το CST κράμα οδηγεί σε αύξηση της απελευθέρωσης 3-45 φορές για το Co, 3-15 φορές για το Cr και έως 13 φορές για το Mo, ενώ για το κράμα DMLS οδηγεί σε 8-25 φορές για Co, έως 18 φορές για Cr και 1,8-



2,8 φορές για το Μο.^{11,106} Άλλοι παράγοντες που αφορούν το μέσο είναι η θερμοκρασία και η ταχύτητα του διαλύματος καθώς και η παρουσία αναστολέων αν υπάρχουν. Μέσα απελευθέρωσης ιόντων όπως το MEM (Minimum Essential Medium), το τεχνητό σάλιο, το γαλακτικό οξύ, ή συνδυασμός γαλακτικού οξέος και αλατούχου διαλύματος όπως NaCl χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων για δοκιμές απελευθέρωσης στοιχείων. Το MEM χρησιμοποιείται για απελευθέρωση σε δοκιμές τοξικότητας σε κυτταρικές σειρές, ενώ το γαλακτικό οξύ είναι τοξικό για τα κύτταρα λόγω του χαμηλού pH του.^{130,140} Ορισμένοι ερευνητές εμβυθίζοντας κράματα Co-Cr σε διαλύματα τεχνητού σάλιου, οξινισμένου τεχνητού σάλιου και απιονισμένου νερού για 30 ημέρες ανέφεραν τα εξής. Τα κράματα Co-Cr είχαν επαρκή αντίσταση στη διάβρωση σε όλα τα διαλύματα με τη μεγαλύτερη διαφορά στην αντίσταση στη διάβρωση στο τεχνητό σάλιο. Δεν υπήρχαν μεταβολές φάσεων σε επαφή με τα διάφορα διαλύματα. Επιπλέον, δεν υπήρχε διαφορά στη σκληρότητα κατά τη σύγκριση του ίδιου κράματος σε διαφορετικά μέσα, γεγονός που σημαίνει ότι το μέσο δεν είχε καμία επίδραση στην σκληρότητα της επιφάνειας των κραμάτων.¹⁰⁰

- Ο συνδυασμός υλικών. Συγκεκριμένα, η απελευθέρωση μειώνεται όταν τα κράματα Co-Cr συνδυάζονται με βαθμό 4 CPTi, καθώς το τιτάνιο φαίνεται να παθητικοποιεί τα κράματα Co-Cr.¹³⁰
- Η συγκλεισιακή φόρτιση, η οποία οδηγεί σε μηχανική αποτριβή και διάβρωση.¹⁵² Έχει δειχθεί σε χυτά κράματα ότι παρουσιάζουν χαμηλά επίπεδα απελευθέρωσης ιόντων μετάλλων τόσο σε δοκιμές στατικής όσο και δυναμικής διάβρωσης και η δυναμική φόρτιση δεν αυξάνει την απελευθέρωση ιόντων μετάλλων σε σύγκριση με τη δοκιμή στατικής διάβρωσης. Για περαιτέρω μελέτες διάβρωσης, θα ήταν ιδανικό να εφαρμοστούν βελτιωμένες μέθοδοι δυναμικής φόρτισης που προσομοιώνουν καλύτερα τις στοματικές συνθήκες (π.χ. πλευρικές διαδρομές) και μάλιστα με ένα υψηλότερο μέγεθος δείγματος.¹⁴³

5.2.2.6 Ακρίβεια και εφαρμογή σκελετού

Γενικά ισχύει ότι, οι σκελετοί Μ.Ο. πρέπει να καλύπτουν εμβιομηχανικές και λειτουργικές ανάγκες. Η ανεπαρκής εφαρμογή μεταξύ άλλων μπορεί να προωθήσει την κινητικότητα και την επιβάρυνση των δοντιών, να οδηγήσει σε πόνο και δυσφορία και για αυτό αποτελεί και τον κύριο λόγο για τον οποίο δεν χρησιμοποιούνται πολλές Μ.Ο. από τους ασθενείς. Σημειώνεται σε ότι με την κακή εφαρμογή αυξάνεται το κόστος του εργαστηρίου και του οδοντιάτρου και του χρόνου θεραπείας.³¹



Θεωρητικά, για να επιτευχθεί η βέλτιστη παθητική εφαρμογή και συνεπώς η λειτουργική σταθερότητα της Μ.Ο., ο σκελετός θα πρέπει να εφαρμόζει σε τουλάχιστον τρεις περιοχές των δοντιών-στηριγμάτων που αντιστοιχούν στην υποδοχή του μασητικού εφαιτήρα, στο άκρο του συγκρατητικού βραχίονα και στον βραχίονα αντιστήριξης.²⁹

Όλες οι τεχνικές κατασκευής αποδίδουν σκελετούς με αποδεκτή εφαρμογή. Πιο αναλυτικά στοιχεία σύγκρισης μεταξύ των μεθόδων παρουσιάζονται παρακάτω.³¹

Διάφορες μελέτες που έχουν εξετάσει την πιστότητα των σκελετών που κατασκευάστηκαν από SLM ή με CST (διερευνώντας το εύρος αποκλίσεων σε σχέση με τα δεδομένα σχεδίασης, γνωστή ως μέθοδος επικάλυψης) ανέφεραν ότι το SLM αποδίδει σκελετούς με μεγαλύτερη ακρίβεια.¹⁹ Επιπλέον, μελέτες σύγκρισης της ακρίβειας αγκίστρων Co-Cr με SLS, H-MIL, AM+CST έχουν δείξει ότι η ακρίβεια είναι μεγαλύτερη για το SLS, ενώ ακολουθεί το H-MIL, με τελευταίο το AM+CST. Δηλαδή, τις μικρότερες τιμές απόκλισης παρουσιάζει το SLS και το SLM γεγονός που υποδεικνύει ότι από την άποψη της ακρίβειας και της αναπαραγωγιμότητας αυτά τα δύο είναι εξαιρετικά για την κατασκευή αγκίστρων.^{30,34} Ακόμη, σε άλλη έρευνα δείχθηκε ότι τα κράματα που κατασκευάζονται με SLS και DMLS είναι κατά 8 φορές (και οι 2 τεχνικές) μεγαλύτερης ακρίβειας και 8 και 3,5 φορές μεγαλύτερης πιστότητας από τα κράματα που κατασκευάζονται με CST (η διαφορά στην πιστότητα οφείλεται στο μειωμένο αριθμό συσσωρευμένων σφαλμάτων τα οποία εμφανίζονται στα διάφορα στάδια κατά τη διαδικασία χύτευσης, ενώ η διαφορά στη ακρίβεια μεταξύ DMLS και SLS θα μπορούσε πιθανότατα να σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του συστήματος καθώς μόνο το SLS χρησιμοποιεί έναν κύλινδρο για να συμπιέσει τη σκόνη).⁵¹ Κατά άλλους, η ανάπτυξη της ακρίβειας για την προσθετική μέθοδο εκτιμάται θετική αλλά εξακολουθεί να είναι χαμηλότερη από αυτήν της αφαιρετικής κατασκευής.^{47,118} Για την μέθοδο HM υποστηρίζεται ότι μπορεί να κατασκευαστεί σκελετός με μεγαλύτερη ακρίβεια παρά με τη χρήση μόνο της σύντηξης λέιζερ ή της MIL. Ωστόσο δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι η ακρίβεια στην HM όπως και στη MIL, εξαρτάται από το μέγεθος του εργαλείου κοπής και έτσι έχειδειχθεί ότι η ακρίβεια για παράδειγμα στους εφαιτήρες είναι χειρότερη από το CST κράμα επειδή η γωνία μεταξύ του εφαιτήρα και του σώματος είναι λίγο απότομη, με αποτέλεσμα στην κοπή να μην μπορεί να κοπεί με πιστότητα. Για αυτό α) οι οξείες γωνίες θα πρέπει να αποστρογγυλεύονται για να προετοιμαστεί η θέση του μασητικού εφαιτήρα, πρέπει να επιλέγονται μικρότερη διάμετρος φρεζών και γ) πρέπει να υπάρχει ανακούφιση στην περιοχή της οξείας γωνίας σύμφωνα με το μέγεθος της φρέζας.¹¹²

Επιπλέον, η ακρίβεια εφαρμογής διαφέρει σε κάθε μέθοδο κατασκευής ανάλογα με το συγκεκριμένο τμήμα σκελετού της Μ.Ο. που εξετάζεται και υπάρχουν κενά σε διαφορετικές



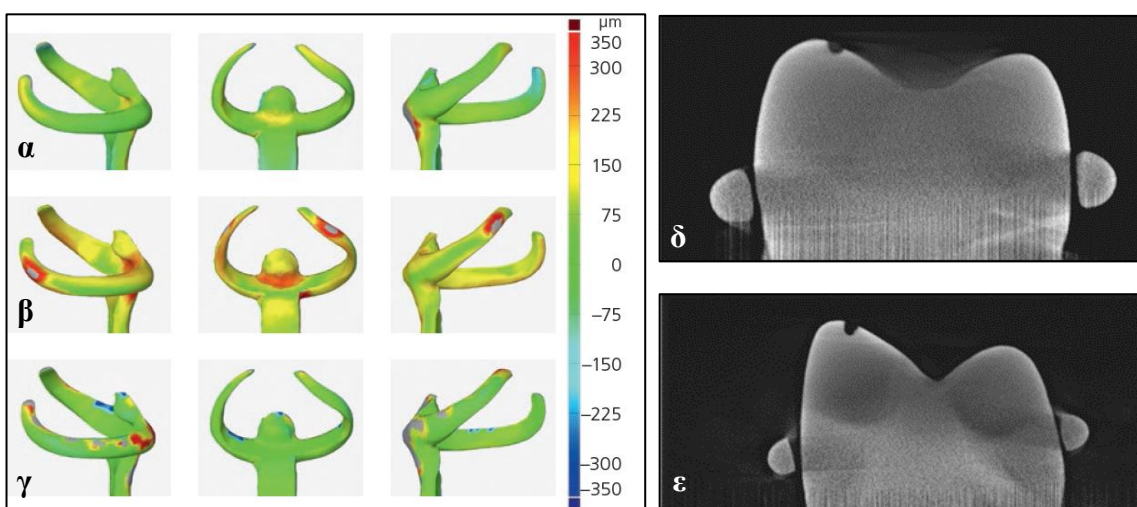
κατευθύνσεις σε σχέση με τα δεδομένα σχεδίασης.^{30,34} Για παράδειγμα, σε μια μελέτη του 2019 σύγκρισης των διαφόρων τμημάτων των αγκίστρων που κατασκευάστηκαν με SLS, AM+CST, H-MIL, στατιστικά σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν στα άκρα των αγκίστρων, στο κέντρο του βραχίονα, και στον ώμο και των δύο πλευρών των βραχιόνων του αγκίστρου και του εφαπτήρα (Εικόνα 5-39). Αναλυτικότερα, για τα άκρα των αγκίστρων, τα δεδομένα κατασκευής για το άγκιστρο AM+CST περιείχαν κενά στην εξωτερική κατεύθυνση από τα δεδομένα σχεδίασης. Εξαιτίας αυτού, είναι πιθανό ότι με τη μέθοδο AM+CST, η παραμόρφωση του προπλάσματος και η συστολή χύτευσης να προκάλεσε την εξάπλωση του άκρου. Οι αποκλίσεις ήταν συνολικά μεγάλες για το άγκιστρο H-MIL και το ενδοτερταμοριακό εύρος (interquartile range) ήταν επίσης μεγάλο, γεγονός που υποδηλώνει ότι το μέγεθος των φρεζών που χρησιμοποιούνται για την κοπή επηρεάζει το αποτέλεσμα. Επιπλέον, οι αιχμηρές άκρες του ορίου μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του εφαπτήρα και του σώματος του αγκίστρου δεν μπορούσαν να κοπούν ακριβώς. Για το άγκιστρο SLS, οι αποκλίσεις ήταν μικρές, όπως υποδεικνύονται συγκεκριμένα από τους εφαπτήρες. Το ενδοτερταμοριακό εύρος ήταν επίσης μικρό, με αποτέλεσμα την εξαιρετική ακρίβεια κατασκευής και αναπαραγωγιμότητα. Ωστόσο, παρατηρήθηκαν κενά σε διάφορες κατευθύνσεις. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα επηρεάστηκαν από την κατεύθυνση του SLS, τον όγκο του υλικού υποστήριξης ή άλλους παράγοντες και θα χρειαζόταν περαιτέρω έρευνα σχετικά με αυτήν την πτυχή. Σημειώνεται ότι όλες οι διαφορετικές τιμές για το διάστημα μεταξύ του εφαπτήρα και της υποδοχής του σε αυτή τη μελέτη ήταν σχεδόν εντός του εύρους 193 ± 203 μm , το οποίο έχει επιβεβαιωθεί και από παλαιότερη μελέτη.³⁴ Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί μια μελέτη του 2020, στην οποία συγκρίθηκε η ακρίβεια των σκελετών M.O. Co-Cr κάτω γνάθου που αποτελούνταν από γλωσσική δοκό, έναν έμμεσο συγκρατητήρα (εφαπτήρα), ένα άγκιστρο RPI, ένα Akers, και ένα δακτυλοειδές, τους οποίους κατασκεύασαν με AM (ProJet)+CST και με SLS. Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν στους εφαπτήρες, τις όμορες πλάκες, τους συνδετήρες και τους βραχίονες των αγκίστρων. Όσον αφορά τους εφαπτήρες, παρατηρήθηκε πλάγια και μεσαία μετατόπιση στο σκελετό των δύο τύπων σε σχέση με τα δεδομένα σχεδίασης. Σημειώνεται ότι άλλοι ερευνητές ανέφεραν το μέσο διάστημα μεταξύ του εφαπτήρα και της αντίστοιχης υποδοχής του σε CST μεταλλικές οδοντοστοιχίες ως 173–215 mm και μια ακόμη ομάδα ερευνητών ανέφερε την ίδια τιμή με 193 ± 203 mm (εύρος, 0–828 mm). Πάντως, οι αποκλίσεις στους εφαπτήρες σκελετών που κατασκευάστηκαν στην μελέτη αυτή ήταν εντός αυτού του εύρους για τις τεχνικές AM+CST και SLS. Ωστόσο, καθώς παρατηρήθηκε πλάγια και μεσαία μετατόπιση των εφαπτήρων στους σκελετούς σε σχέση με τα δεδομένα σχεδιασμού



ανάλογα με το σημείο μέτρησης, κάθε τοποθεσία θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά κατά τη στιγμή της δοκιμής του σκελετού στο εκμαγείο για την εντόπιση οτιδήποτε μπορεί να αποτρέψει την πλήρη ευθυγράμμιση-εφαρμογή μεταξύ του εφαπτήρα και της υποδοχής του. Όσον αφορά τις όμορες πλάκες, ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν απόκλιση 70,37-152,5 mm στις όμορες πλάκες σε ένα σκελετό που κατασκευάστηκε με AM+CST. Παρόμοιες τιμές ακρίβειας ελήφθησαν στην μελέτη αυτή στις όμορες πλάκες για το σκελετό AM+CST, η οποία τείνει να είναι κατώτερη στις όμορες πλάκες από τη τεχνική SLS. Ωστόσο, το ύψος της ασυμφωνίας διέφερε πολύ ανάλογα με την περιοχή. Επομένως, η ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί από το εάν η δομή της όμορης πλάκας είναι ανεξάρτητη από το ή συνδέεται με το βραχίονα και τον εφαπτήρα του αγκίστρου. Στο βραχίονα του αγκίστρου, παρατηρήθηκε πλευρική μετατόπιση στα άκρα του Akers και του δακτυλιοειδούς για το σκελετό AM+CST. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί σε μια άλλη μελέτη μεμονωμένων χωρίς σκελετό αγκίστρων Akers που κατασκευάστηκαν με AM+CST. Αντίθετα, η μεσαία μετατόπιση παρατηρήθηκε στο άκρο του αγκίστρου RPI για το σκελετό AM+CST, η αντίθετη κατεύθυνση μετατόπισης με τα Akers άγκιστρα. Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν διαφορετικές ακρίβειες στα άκρα των δακτυλιοειδών και Akers αγκίστρων και των άκρων, με τα άκρα των Akers αγκίστρων να είναι τοποθετημένα σε μικρότερες και εκείνες των δακτυλιοειδών σε μεγαλύτερες τιμές από τις προδιαγραφόμενες. Τα παρόντα ευρήματα υποδηλώνουν ότι τα αποτελέσματα της παραμόρφωσης του μοτίβου χύτευσης και της συστολής στη μετατόπιση των άκρων διαφέρουν ανάλογα με τη μορφή του βραχίονα του αγκίστρου. Παρόλο που η συνολική ακρίβεια τείνει να είναι καλύτερη για τον βραχίονα αγκίστρου του σκελετού SLS σε σύγκριση με αυτό του σκελετού AM+CST, παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις στο κέντρο του δακτυλιοειδούς και των βραχιόνων αγκίστρου RPI. Δεδομένου ότι τα μακριά, λεπτά άγκιστρα μπορεί να είναι ευαίσθητα στην ίδια παραμόρφωση με τη γλωσσική δοκό, πρέπει να δίνεται προσοχή κατά τη χρήση του SLS. Όσον αφορά τους συνδετήρες, παρατηρήθηκαν μεγάλες πλάγιες αποκλίσεις στην περιοχή σύνδεσης της γλωσσικής δοκού στην υποκείμενη των δοντιών πλευρά για το σκελετό AM+CST, περιοχή η ταιριάζει με την θέση σύνδεσης μεταξύ του προπλάσματος χύτευσης και της μπάρας ενίσχυσης, η οποία ενδέχεται να προκαλέσει τοπική συστολή χύτευσης στην σύνδεση. Επομένως, όταν μια ράβδος ενίσχυσης τοποθετείται στο πρόπλασμα χύτευσης, είτε θα πρέπει να προστεθεί στο πλέγμα συγκράτησης, το οποίο δεν επηρεάζει το ύψος του πλαισίου, είτε θα πρέπει να προστεθεί μια δεξαμενή στη ράβδο ενίσχυσης. Αντίθετα, παρατηρήθηκαν μεγάλες, εντοπισμένες αποκλίσεις στο κέντρο της γλωσσικής ράβδου για το σκελετό SLS, πιθανώς λόγω παραμόρφωσης «λυγισμού» που δημιουργήθηκε κατά τη διάρκεια του SLS. Καθώς αυτό το είδος υπολειμματικής πίεσης



επηρεάζει όχι μόνο την εφαρμογή αλλά και την αντοχή, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση σχετικά με τις συνθήκες σύντηξης. Η πρόσφατη προσοχή έχει επικεντρωθεί σε προσομοιώσεις για την πρόβλεψη παραμόρφωσης και υπολειπόμενων τάσεων κατά τη διάρκεια του SLS με τη χρήση μηχανικής με τη βοήθεια υπολογιστή (CAE). Σημειώνεται, ότι στη συγκεκριμένη μελέτη μεταξύ των άλλων περιορισμών χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο ένα σχέδιο σχεδίασης για μερικής νωδότητα κάτω γνάθου, ωστόσο η διαμόρφωση του κύριου συνδετήρα, για την οποία η ακρίβεια ήταν ένα ζήτημα στο σκελετό SLS είναι πολύ διαφορετική στην άνω γνάθο και ο βαθμός διακύμανσης αποτελεί την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.³⁰



Εικόνα 5-39 Έγχρωμος χάρτης των αγκίστρων Co-Cr μετά από AM+CST (α), MIL (β), SLS (γ) όπου διακρίνονται οι διαφορές στην ακρίβεια μεταξύ σχεδίασης και τελικής κατασκευής. Το μπλε υποδηλώνει κίνηση του αγκίστρου μακριά από το δόντι, το κίτρινο προς κόκκινο δείχνει κίνηση του αγκίστρου προς το δόντι και το πράσινο δείχνει ελάχιστη παραμόρφωση.³⁴ Micro-CT εικόνες για ανάλυση του διακένου στο δόντι 16 (ε) και 14 (δ) στην περιοχή της εσοχής που αντιπροσωπεύει το άκρο του συγκρατητικού βραχίονα.²⁹

Παρά λοιπόν την υψηλότερη ακρίβεια των SLM και SLS τεχνικών, στις περισσότερες μελέτες έχει δειχθεί ότι η συνολική εφαρμογή των σκελετών και των αγκίστρων κράματος Co-Cr (η οποία αξιολογήθηκε μετρώντας την απόσταση διακένου μεταξύ του σκελετού και του εκμαγείου) είναι χειρότερη για τη μέθοδο SLM^{112,127,153,154} (η μέση εφαρμογή κυμαίνεται από 50-380 μm) σε σχέση με τη χύτευση (μέσες τιμές συμβατικής χύτευσης 193±203 μm, 69-387 μm), παρόμοια (αν και ελαφρώς καλύτερη στο SLM) σε μία μελέτη του 2019²⁴⁶ (όταν συγκρίθηκε η μέτρηση του κενού και των τεσσάρων δοντιών μεταξύ των τεχνικών SLM και C-CST διαπιστώθηκε ότι στα δύο δόντια είχε σημαντικά καλύτερη εφαρμογή η τεχνική SLM ενώ στο τρίτο δόντι η τεχνική C-CST και στο τέταρτο ήταν η εφαρμογή ήταν παρόμοια), συγκρίσιμη και καλύτερη σε μία μελέτη η οποία όμως αφορούσε κράμα Ti-6Al-4V.¹⁹

Η κατασκευή Μ.Ο. των AM+CST και C-CST εξακολουθεί να βασίζεται στην παραδοσιακή χύτευση κεριού ή ρητίνης, και ως γνωστόν η ακρίβεια στη χύτευση είναι δύσκολο



να επιτευχθεί όσον αφορά το μέγεθος και το σχήμα λόγω των μεταβολών διαστάσεων του πυροχώματος, της συστολής στερεοποίησης των μεταλλικών κραμάτων και της παραμόρφωσης του μοτίβου κεριού. Η μέθοδος C-CST πρόκειται για μια μη αυτοματοποιημένη διαδικασία η οποία εξαρτάται από την εμπειρία ενός οδοντοτεχνίτη αλλά επίσης λόγω των πολλαπλών σταδίων αυξάνει τους παράγοντες που μπορούν να ενσωματώσουν πολλαπλά σφάλματα σε κάθε στάδιο και σε συνδυασμό με την συστολή και χαλάρωση των τάσεων του κεριού που είθισται να εμφανίζεται 30 min μετά τη διαμόρφωση του ομοιώματος και την υψηλή διαστολή πήξης του πυροχώματος, συχνά επηρεάζεται η τελική εφαρμογή της πρόθεσης οδηγώντας σε απόκλιση. Ωστόσο, παλαιότερες μελέτες αναφέρουν ότι μεταξύ των τεχνικών κατασκευής CST, η μέθοδος AM+CST (συνδυασμός προσθετικής κατασκευής και χύτευσης) αναμένεται να προσδίδει ίση ή καλύτερη εφαρμογή από τη μέθοδο C-CST (συμβατική χύτευση), λόγω της μικρότερης ανθρώπινης παρέμβασης, της αυτοματοποίησης ορισμένων σταδίων κατασκευής, της αποφυγής των περιορισμών του κηρού, και της ανώτερης ακρίβειας της ψηφιακής αποτύπωσης στην μέθοδο AM+CST.^{28,118} Ωστόσο, πλέον αυτή η πεποίθηση έχει απορριφθεί, καθώς το 2019 οι Songwatcharaporn και συν²⁹ απέδειξαν ότι οι τα άκρα των συγκρατητικών αγκίστρων M.O. που κατασκευάζονται με C-CST δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά ως προς την ακρίβεια εφαρμογής από εκείνους που κατασκευάζονται με ενδοστοματική σάρωση-AM (PolyJet ρητίνης)+CST, ενώ οι σκελετοί και των δύο αυτών μεθόδων παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά καλύτερη ακρίβεια εφαρμογής (μικρότερα κενά) από αυτούς που κατασκευάζονται με τη χρήση εργαστηριακού σαρωτή εκμαγείου-AM (PolyJet ρητίνης)+CST. Σημειώνεται, ότι κενά μεταξύ των άκρων των συγκρατητικών βραχιόνων και των δοντιών υπήρχαν και στις τρεις ομάδες. Στην παρούσα μελέτη, τα μέσα πλάτη διακένου των δύο AM+CST μεθόδων κυμαίνονταν από 117-181 μm ενώ τα μέσα πλάτη διακένου των C-CST από 108-114 μm, αποτελέσματα τα οποία ήταν συνεπή με αυτά που ανέφεραν και οι παλαιότεροι ερευνητές¹⁵⁵ [μέσο πλάτος διακένου εργαστηριακή σάρωση εκμαγείου-AM (ProJet ρητίνης)+CST ομάδας 162,33±131,2 μm]. Άλλοι ερευνητές, ανέφεραν το μέσο οριζόντιο και κατακόρυφο πλάτος διακένου των συγκρατητικών αγκίστρων που κατασκευάστηκαν με AM (InkJet κεριού)+CST ήταν 323±188 μm και 112±60 μm αντίστοιχα, ενώ η μέση τιμή οριζόντια και κάθετη απόκλιση της C-CST τεχνικής ήταν 133±59 μm και 74±25 μm, αντίστοιχα.¹⁵⁴ Το 2019, οι Maryod και συν²⁸ απέδειξαν ότι η συγκράτηση των αγκίστρων Co-Cr της μεθόδου AM (SLA ρητίνης)+CST είναι υψηλότερη σε στατιστικά σημαντικό βαθμό σε σχέση με τη C-CST μετά από πρώτο και τρίτο μήνα παρακολούθησης. Σημειώνεται επίσης ότι υπήρξε σημαντική διαφορά μεταξύ διαφορετικών διαστημάτων στη συμβατική μέθοδο (τιμή P < 0,05) ενώ στην AM+CST



υπήρχε μη σημαντική διαφορετική μεταξύ των διαστημάτων. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν σύμφωνα με μια ακόμη παλαιότερη μελέτη, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ακριβώς η ίδια μέθοδος παραγωγής και αφού εξετάστηκε η ποιότητα της εφαρμογής τόσο του προπλάσματος SLA όσο και του χυτού (AM+CST) σκελετού στο εκμαγείο διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή είναι εξαιρετική.²⁸

Σε μια μελέτη του αναφέρθηκε ότι σκελετός Μ.Ο. από MIL Co-Cr ή Ti εφαρμόζει πλήρως στους ιστούς ενισχύοντας τη συγκράτηση, τη σταθερότητα και την ομοιόμορφη μεταφορά φορτίων στον ιστό, προκαλώντας λιγότερες παρεμβολές στο στοματικό βλεννογόνο.²⁸ Γενικώς από την βιβλιογραφική αναζήτηση, δεν βρέθηκε μελέτη που να έχει κατασκευάσει ολόκληρο σκελετό με άγκιστρα από Co-Cr με MIL. Ωστόσο, ορισμένοι ερευνητές, κατασκευάζοντας πανομοιότυπος σκελετούς από διαφορετικά υλικά (μόνο για το SLM χρησιμοποιήθηκε Co-Cr) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η καλύτερη εφαρμογή επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιηθεί H-MIL ενώ ακολουθεί κατά φθίνουσα σειρά η I-MIL με συγκρίσιμα αποτελέσματα με την C-CST, η AM+CST (ελαφρώς χειρότερη σε σχέση με τη C-CST) και η SLM (η χειρότερη) και μάλιστα οι 2 τελευταίες θεωρήθηκαν ακατάλληλες για κλινική χρήση.¹⁵⁴

Στον Πίνακα 5-2 πραγματοποιείται μια σύγκριση της εφαρμογής που επιτυγχάνεται μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών κατασκευής. Η μετα-ανάλυση αποκαλύπτει ότι παρά του ότι η SLM παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη συνολική εφαρμογή ($P < 0,05$) σε σχέση με τη CST όπως προαναφέρθηκε, εντούτοις παρατηρείται μη σημαντική διαφορά στην εφαρμογή μεταξύ της μεθόδου SLM και της μεθόδου χύτευσης για τους εφαπτήρες και τους μείζονες συνδετήρες Co-Cr ($P > 0,05$). Επιπλέον, η εφαρμογή των βραχιόνων του αγκίστρου Akers είναι σημαντικά διαφορετική ($P < 0,05$) μεταξύ των υβριδικών μεθόδων επεξεργασίας (SLM+MIL) και των τεχνικών χύτευσης, αλλά αυτή του εφαπτήρα δεν είναι ($P > 0,05$).¹⁹



Πίνακα 5-2 Μέσες τιμές διάκενων σκελετών Μ.Ο. κράματος Co-Cr διαφόρων τεχνικών κατασκευής από μια ανασκόπηση 8 διαφορετικών άρθρων.¹⁹

Τμήμα	Άρθρα	Δείγματα	SLM		SLM + MIL		RP + CST		MIL + CST		CST		ν
			μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	μέση	ΤΠ	
Εφαπτήρας	1	ΣΚ	174	117	-	-	-	-	-	-	108	84	15
	2	ΣΚ	365	205	-	-	323	188	117	34	133	59	3
	3	ΣΚ	272	174	-	-	-	-	-	-	280	175	15
	ομάδ.		236	161			323	188	117	34	188	155	
	4	ΑΚ	-	-	167	2	-	-	-	-	124	5	5
	5 ^α	ΑΚ	-	-	173	129	-	-	-	-	135	88	5
	5 ^β	ΑΚ	-	-	75	24	-	-	-	-	-	-	5
	ομάδ.				138	84					130	59	
	6	ΑΚ	27	3	-	-	-	-	-	-	43	36	5
	Βραχίονας αγκίστρου	4	ΑΚ	-	-	63	5	-	-	-	-	53	2
5 ^α		ΑΚ	-	-	64	30	-	-	-	-	57	25	5
5 ^β		ΑΚ	-	-	70	17	-	-	-	-	-	-	5
ομάδ.					66	19					55	17	
6		ΑΚ	146	4	-	-	-	-	-	-	35	15	5
Μείζονας συνδετήρας	7	ΣΚ	-	-	-	-	-	-	-	-	131	87	15
	8 ^γ	ΣΚ	290	20	-	-	-	-	-	-	170	20	3
	8 ^δ	ΣΚ	330	10	-	-	-	-	-	-	150	20	3
	8 ^ε	ΣΚ	250	10	-	-	-	-	-	-	280	20	3
	8 ^ς	ΣΚ	150	20	-	-	-	-	-	-	140	10	3
	ομάδ.		255	71							155	80	
Συνολικά	7 ^η	ΣΚ	150	13	-	-	-	-	-	-	27	40	10
	7 ^η	ΣΚ	160	20	-	-	-	-	-	-	-	-	10
	ομάδ.		155	17							27	40	

ΣΚ: σκελετός, ΑΚ: Akers άγκιστρο, ομάδ.: ομαδοποίηση (pooled), ΤΠ: τυπική απόκλιση.

^α χωρίς ανακούφιση, ^β με ανακούφιση, ^γ Kennedy τάξη I, ^δ Kennedy τάξη III τροποποίηση 1, ^ε Kennedy class I τροποποίηση 1, ^ς Kennedy τάξη IV, ^η ενδοστοματικός σαρωτής, ^θ εργαστηριακός σαρωτής.

Σημειώνεται ότι οι αριθμοί των άρθρων (1-8) δεν αντιστοιχούν στους αριθμούς των άρθρων της βιβλιογραφίας δεδομένου ότι αυτός ο πίνακας προέρχεται από ανασκόπηση απλώς η αριθμηση αυτή χρησιμοποιείται για να καταδείξει τα όμοια και διαφορετικά άρθρα που συγκρίνονται. Παραπάνω πληροφορίες για την αντιστοίχιση των τιμών αυτών μπορεί να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία ¹⁹ της παρούσης εργασίας.

Αξίζει να αναφερθούν και ορισμένα στοιχεία που αφορούν την οριακή αλλά και εσωτερική εφαρμογή στεφανών κράματος Co-Cr, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής. Αρκετές μελέτες σε στεφάνες, έχουν δείξει ότι το κατακόρυφο οριακό διάκενο αυξάνει προοδευτικά στις μεθόδους DMLS (ελάχιστο), AM+CST και C-CST. Το εσωτερικό διάκενο αυξάνει προοδευτικά στις μεθόδους AM+CST (ελάχιστο), C-CST, DMLS (πιθανόν διότι το σύστημα σάρωσης έχει τον περιορισμό της πεπερασμένης ανάλυσης, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ακμές που είναι ελαφρώς στρογγυλεμένες οι οποίες μετασχηματίζονται μέσω ενός αλγορίθμου λογισμικού CAD σε μια ομαλή και συνεχή επιφάνεια με αποτέλεσμα εσωτερική απόκλιση. Αν και η παραμόρφωση κάθε στρώματος είναι ελάχιστη, το σφάλμα είναι συσσωρευμένο για όλα τα στρώματα και είναι σημαντικό. Ακόμη, η ακρίβεια επηρεάζεται και από τη διάσταση της δέσμης λέιζερ, που θα μπορούσε να συμβάλει σε εσωτερική απόκλιση). Στατιστικά σημαντική διαφορά υπάρχει στο οριακό και εσωτερικό διάκενο μεταξύ C-CST και DMLS και μεταξύ AM+CST και DMLS αλλά δεν υπάρχει μεταξύ των C-CST και AM+CST. Και στις τρεις μεθόδους το οριακό και εσωτερικό κενό είναι κλινικά αποδεκτό,



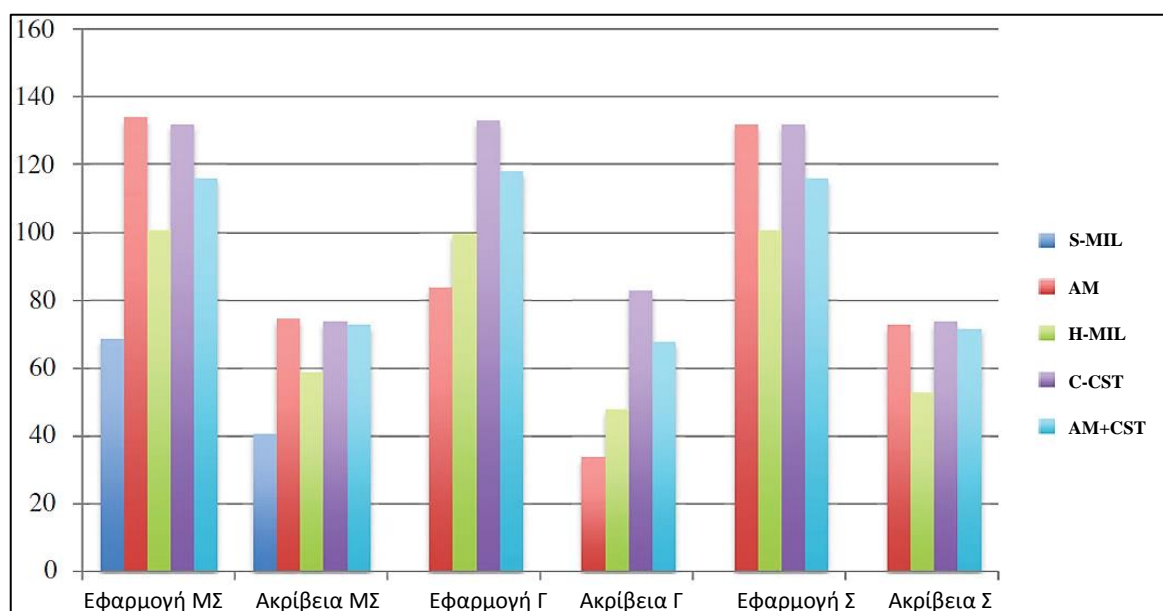
ωστόσο το DMLS πλεονεκτεί έναντι των άλλων δύο τεχνικών καθώς παρουσιάζει ελάχιστο κενό οριακά, εξαλείφονται ευαίσθητες διαδικασίες και η πιθανότητα σφαλμάτων χύτευσης, υπάρχει πλήρης έλεγχος στο σκελετό, στον σχεδιασμό, στην οριακή τοποθέτηση, στην διατήρηση χώρου της κονιάς, συν του ότι η σύνθεση του κράματος Co-Cr έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Mo και έτσι η πυροσυσσωμάτωση διευκολύνεται από την απουσία τέτοιων πυρίμαχων μετάλλων που έχουν υψηλότερο εύρος τήξης από ότι το Co και το Cr και τοιουτοτρόπως αποφεύγεται η τήξη του κράματος σε υψηλότερη από του εύρους του θερμοκρασία πράγμα που προκαλεί απώλεια των εύτηκτων συστατικών του καθιστώντας το πιο ιξώδες.^{129,156,157} Κατά άλλους πιστεύεται ότι η DMLS έχει ελάχιστη εσωτερική απόκλιση και υψηλότερη οριακή απόκλιση από ότι η I-MIL.⁴⁹ Εν αντιθέσει οι James και συν¹⁵⁸ (2020) υποστηρίζουν ότι η οριακή απόκλιση αν και κλινικά αποδεκτή σε όλες τις μεθόδους, εμφανίζεται κατά αύξουσα σειρά στην μέθοδο C-CST, στην SLM και τέλος στη MIL, και λόγω της υπεροχής της C-CST απαιτείται εκσυγχρονισμός των ψηφιακών μεθόδων.¹⁵⁸ Τα πορίσματα άλλης ερευνητικής ομάδας υποδεικνύουν ότι οι αποκλίσεις στο όριο αλλά και στον αυχένα των χυτών κραμάτων είναι παρόμοιες με εκείνες του MIL και καλύτερες από εκείνες του μSLA. Οι εσωτερικές και οριακές αποκλίσεις κραμάτων από CST, MIL, μSLA και DMLS είναι κλινικά αποδεκτές αλλά ίσως απαιτούνται περαιτέρω βελτιώσεις στις τεχνικές μSLA και DMLS πριν από την κλινική εφαρμογή.¹⁵⁹ Σε άλλες μελέτες αναφέρεται ότι, σε στεφάνες έχει παρατηρηθεί ότι καλύτερη εσωτερική και οριακή εφαρμογή τους παρουσιάζεται στη DMLS, ακολουθούμενη κατά φθίνουσα σειρά από την I-MIL, την C-CST και την H-MIL. Σημαντική διαφορά ανακύπτει μεταξύ DMLS-υπόλοιπων μεθόδων ενώ δεν παρατηρείται μεταξύ H-MIL και IMIL. Στις 4 μεθόδους καλύτερη εφαρμογή παρουσιάζεται κατά μήκος των αξονικών τοιχωμάτων και στο βαθύτερο μέρος τοξοειδούς παρασκευής, ενώ μεγαλύτερες τιμές απόκλισης παρατηρούνται μασητικά. Όλες οι τιμές βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων.^{129,160} Σε άλλη μελέτη, οι μέσες τιμές οριακών κενών στεφάνων κατασκευασμένων από ήταν κατά αύξουσα σειρά AM+CST, SLS και MIL, με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις να εντοπίζονται γλωσσικά. Αν και οι τιμές είναι κλινικά αποδεκτές και για τις τρεις μεθόδους διαπιστώθηκε ότι, η συμβατική μέθοδος έχει καλύτερη ακρίβεια στο οριακό κενό από ότι η AM+CST και το CAD/CAM, με την τελευταία να υστερεί συγκριτικά με την δεύτερη.¹⁶¹ Γενικώς την 3DP, τα οριακά κενά του οποίου οφείλονται σε ορισμένες διαταραχές του μεταλλικού σκελετού σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνει την δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών προσθέσεων ταυτόχρονα με ελάχιστη ποσότητα υλικού και με περισσότερη ακρίβεια από ότι το MIL. Όσον αφορά την οριακή και εσωτερική απόκλιση της 3DP, αν και κλινικά αποδεκτή (< 120μm) χρειάζεται βελτιώσεις.^{155,162} Οι Huang και συν¹⁶³ (2015)



ανέφεραν ότι η οριακή εφαρμογή μεταλλοκεραμικών στεφανών C-CST είναι δυσχερέστερη συγκριτικά με την SLM, λόγω του σχηματισμού ενός παχύτερου στρώματος οξειδίου στην χυτή επιφάνεια. Οι στεφάνες του SLM δεν διαφέρουν σημαντικά στην αξονική εφαρμογή (αν και τα μέσα πλάτη αξονικού διακένου του SLM είναι χαμηλότερα από εκείνα της χύτευσης) αλλά είναι λιγότερο ακριβείς στην εφαρμογή μασητικά (το μέσο εύρος μασητικού κενού στο SLM είναι μεγαλύτερο από την συμβατική μέθοδο πιθανόν διότι η εσώκλειστη ελεύθερη σκόνη τήκεται από την περιβάλλουσα θερμότητα κατά τη διάρκεια της κατασκευής, οδηγώντας έτσι σε κακή εφαρμογή μικρών και πολύπλοκων κατασκευών). Ωστόσο η οριακή και εσωτερική εφαρμογή των μεταλλοκεραμικών στεφανών είναι κλινικά αποδεκτή.¹⁶³ Ορισμένοι ερευνητές, έδειξαν ότι μεταλλοκεραμικές στεφάνες C-CST και MIL έχουν παρόμοιο οριακό κενό εντός του εύρους κλινικής αποδοχής. Στα αξονικά τοιχώματα δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους, σε αντίθεση με τη μασητική επιφάνεια και την αξονικόμασητική περιοχή όπου η MIL υστερεί παρουσιάζοντας υψηλότερες τιμές διάκενου.¹⁶⁴ Άλλοι ερευνητές, έδειξαν ότι μεταξύ μεταλλοκεραμικών στεφανών χύτευσης, SLM με μικρούς και SLM με μεγάλους πόρους, πριν από την κεραμική επίστρωση οι δύο ομάδες SLM παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές οριακής απόκλισης μεταξύ τους όμως σημαντικά μεγαλύτερες και μεγαλύτερη ποσότητα πορώδους (ειδικότερα στο SLM μεγάλων πόρων) από την ομάδα AM+CST, ενώ μετά κεραμική επίστρωση μόνο οι στεφάνες SLM μεγάλων πόρων εμφανίζουν σημαντική αύξηση στην οριακή εφαρμογή και σημαντική μείωση του πορώδους. Δηλαδή, το ευμεγέθης εσωτερικό πορώδες στα κράματα Co-Cr επηρεάζει την οριακή εφαρμογή των μεταλλοκεραμικών στεφανών. Μολαταύτα, όλες οι τιμές οριακής απόκλισης είναι χαμηλότερες από το αποδεκτό εύρος ακόμη και μετά την εφαρμογή του κεραμικού υλικού επικάλυψης. Πάντως, γενικά η εφαρμογή δύναται να υποβαθμιστεί κατά τη διάρκεια των κύκλων όπτησης του κεραμικού υλικού, ανάλογα με τη σχεδίαση του σκελετού, τον τύπο κράματος, την κεραμική συρρίκνωση κατά τη διάρκεια της όπτησης και τη διαφορά συντελεστή θερμικής διαστολής κεραμικού-κράματος.¹⁶⁵ Άλλοι ερευνητές, στην ανασκόπηση τους σχετικά με την ακρίβεια εφαρμογής των ακίνητων αποκαταστάσεων ανέφεραν ότι οι τεχνικές I-MIL, H-MIL και AM δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές στις τιμές εφαρμογής για το οριακό διάκενο: 84 mm, 76 mm και 69 mm, αντίστοιχα, και ότι η ακρίβεια για τις ίδιες τεχνικές είναι 37 mm, 75 mm και 28 mm αντίστοιχα. Δηλαδή, καμία τεχνική κατασκευής δεν είναι ανώτερη από τις άλλες όσον αφορά την ακρίβεια τόσο για μεμονωμένες στεφάνες όσο και για γέφυρες. Όμως, η ποικιλία στις παραμέτρους καθιστά προβληματική την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την τεχνική κατασκευής. Είναι ενδιαφέρον ότι όλες οι τεχνικές, εκτός από την AM+CST, παρουσιάζουν εφαρμογή εντός 100 mm και



επομένως, θα θεωρούνταν κλινικά αποδεκτές σύμφωνα με προηγούμενες δημοσιεύσεις. Ωστόσο, για το εσωτερικό και το συνολικό διάκενο, τα 120 mm θεωρήθηκαν κλινικά αποδεκτά και επομένως τα AM, C-CST και AM+CST θα μπορούσαν να θεωρηθούν κλινικά μη αποδεκτά σε αυτές τις περιοχές. Η ακρίβεια των AM+CST έχει αποδειχθεί ότι αποκλίνει από τις σχεδιασμένες διαστάσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να εξηγήσουν τα αποτελέσματα AM+CST. Συνεπώς, δεν μπορεί να συναχθεί σαφές συμπέρασμα σχετικά με την ανωτερότητα μιας συγκεκριμένης τεχνικής. Μια σύγκριση οριακής απόκλισης φαίνεται στην Εικόνα 5-40.¹⁶⁶



Εικόνα 5-40 Συνολική απόκλιση εφαρμογής και ακρίβειας μεμονωμένων στεφάνων (ΜΣ), γεφυρών (Γ), και συνδυασμού (Σ), χωρισμένα ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής.¹⁶⁶

Στο σημείο αυτό, άξιο αναφοράς κρίνεται να φερθούν ορισμένοι κρίσιμοι παράμετροι που επηρεάζουν την εφαρμογή του σκελετού σε κάθε μέθοδο κατασκευής. Στην τεχνική AM+CST οι παράγοντες που έχουν καθοριστικό ρόλο είναι: α) η ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης AM μηχανής, β) το πάχος των στρώσεων υγρών φωτοπολυμεριζόμενων υλικών (για αυτά τα 3 περισσότερες πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο γενικό μέρος) γ) η διαδικασία μετά την εκτύπωση, δ) ο τύπος πυροχώματος που χρησιμοποιείται [μάλιστα τα τελευταία χρόνια έχουν κυκλοφορήσει νέα πυροχώματα φωσφορικού τύπου ειδικά σχεδιασμένα για χύτευση προπλάσμάτων της μεθόδου AM+CST, όπως το πυρόχωμα Cadvest (Nobilium, NY, USA), ωστόσο οι μελέτες αυτών των ειδικών πυροχωμάτων σε σχέση με την ποιότητα και την ακρίβεια των σκελετών Μ.Ο. δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί πλήρως στη βιβλιογραφία), ε) η προσθήκη ράβδων ενίσχυσης στο στάδιο σχεδίασης πριν την έναρξη της 3DP για την αποφυγή παραμόρφωσης του προπλάσματος ρητίνης λόγω της συστολής της οι οποίες μετά την χύτευση αφαιρούνται, ζ) την γρήγορη επένδυση του προπλάσματος



με πυρόχωμα για την αποφυγή της παραμόρφωσης τους υλικού η οποία εμφανίζεται καθώς το υλικό πολυμερίζεται συνήθως από υπεριώδες φως (UV). Επιπλέον, η ακρίβεια διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το σχήμα, τη γεωμετρία, το μέγεθος και τον προσανατολισμό των αρχικών μοντέλων. Μια ομάδα ερευνητών ανέφερε ότι τα τυπωμένα προπλάσματα ρητίνης που έγιναν από AM (polyjet) τείνουν να είναι 0,71 % ελαφρώς μεγαλύτερα από τα αρχικά μοντέλα τόσο σε γραμμική όσο και σε ογκομετρική μέτρηση.^{29,30,129,156,157}

Στην τεχνική DMLS οι παράμετροι που έχουν κρίσιμο ρόλο είναι: α) ο προσανατολισμός κατασκευής¹⁹, β) μικρότερο μέγεθος κηλίδας λέιζερ που επαρκεί για τη τήξη της μεταλλικής σκόνης μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια, γ) και η υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης, συνοδευόμενη από μικρότερο βάθος κλίνης σκόνης, μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.¹⁶⁷

Ωστόσο, ανεξάρτητα από την τεχνική κατασκευής υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την τελική εφαρμογή του σκελετού. Ένας από τους πιο σημαντικούς είναι οι διαδικασίες φινιρίσματος και στίλβωσης για την εσωτερική επιφάνεια του σκελετού, ιδίως στους εφαπτήρες. Ομοίως, έχει αναφερθεί ότι ο έλεγχος των διαδικασιών φινιρίσματος και στίλβωσης θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια εφαρμογής και ότι το υπερβολικό φινιρίσμα χρησιμοποιώντας λίθους μπορεί να οδηγήσει σε περιττή απομάκρυνση του μετάλλου από την εσωτερική επιφάνεια. Ορισμένοι ερευνητές πρότειναν τη χρήση αμμοβολής και συντηρητικής στίλβωσης για τη μείωση την επίδρασης στην εφαρμογή. Άλλοι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν την τελική εφαρμογή του σκελετού είναι η κακή προετοιμασία του στόματος, το ανακριβές εκμαγείο και τα ελαττώματα στη διαδικασία αναπαραγωγής του. Επιπλέον, το υλικό Co-Cr που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σκελετού είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην τελική ακρίβεια εφαρμογής. Αναφέρθηκε ότι τα κράματα μετάλλου βάσης υψηλής τήξης έχουν συστολή στερεοποίησης μεγαλύτερη από τα κράματα χρυσού και επομένως, η συρρίκνωση του κράματος Co-Cr κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου αναμένεται να θέσει σε κίνδυνο την επιθυμητή εφαρμογή.¹⁶⁸ Επιπρόσθετα, η ψηφιακή μέθοδος αποτύπωσης με τη χρήση ενδοστοματικού σαρωτή πλεονεκτεί σε σχέση με την χρήση εργαστηριακού σαρωτή τουλάχιστον για τις μεθόδους SLM και AM+CST, και η χρήση εργαστηριακού σαρωτή αποτύπωσης είναι καλύτερη από τη συμβατική τεχνικής αποτύπωση όσον αφορά την πιστότητα την ακρίβεια και την εφαρμογή. Και οι δύο ψηφιακές μέθοδοι εντυπώσεων διαθέτουν πιστότητα και ακρίβεια που δεν είναι δυνατή με τη χρήση ελαστομερών υλικών εντύπωσης. Ωστόσο, οι ενδοστοματικοί σαρωτές έχουν και αυτοί τους περιορισμούς τους σε εκτεταμένες περιοχές. Επιπλέον, η ακρίβεια της ενδοστοματικής σάρωσης πιθανώς επηρεάζεται από την ικανότητα

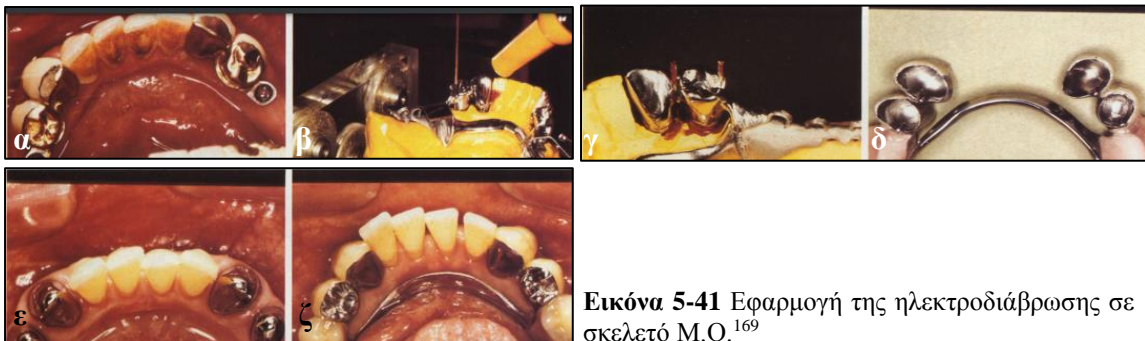


του χειριστή, την απόδοση του εξοπλισμού, το περιβάλλον σάρωσης, τις διαδικασίες σάρωσης, τη θέση της κάμερας κατά τη σάρωση και τον αριθμό των σαρώσεων. Έτσι, η ακρίβεια υπό κλινικές συνθήκες μπορεί να είναι διαφορετική σύμφωνα με τη μεθοδολογία που εφαρμόζεται.^{2,31} Επιπλέον, η εφαρμογή ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος της ψηφιακής ανακούφισης, τα σχέδια ελαττωμάτων οδοντοστοιχίας και το μήκος έκτασης νωδής περιοχής (π.χ. σε μια μελέτη¹⁶⁸ αναφέρθηκε ότι ένας σκελετός που εφαρμόζε σε μια μεγάλη και μια μικρή νωδή περιοχή, τότε στη C-CST η εφαρμογή ήταν παρόμοια ενώ στο SLM η εφαρμογή στη μεγάλης έκτασης νωδή περιοχή ήταν σημαντικά καλύτερη από τη μικρή).¹⁹

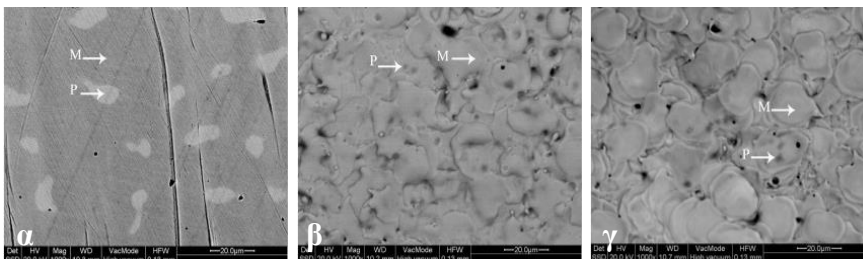
Στο σημείο αυτό κρίνεται ενδιαφέρον να αναφερθεί μια μέθοδος βελτίωσης της εφαρμογής που έχει δοκιμαστεί σε μη κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. (Εικόνα 5-41),¹⁶⁹ την ηλεκτροδιάβρωση. Η μέθοδος αυτή δοκιμάστηκε στο παρελθόν για Μ.Ο., ωστόσο πλέον οι περισσότερες έρευνες σχετικά με τη μέθοδο αυτή αφορούν επιεμφυτευματικές αποκαταστάσεις. Δεδομένου ότι το κράμα που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της ηλεκτροδιάβρωσης συνήθως είναι συγκεκριμένο και ενδείκνυνται και για τη κατασκευή μη κλασσικού σκελετού Μ.Ο. μια αναφορά θα ήταν ωφέλιμη. Η ηλεκτροδιάβρωση αποτελεί μια διαδικασία με την οποία, ένα ηλεκτρικά αγώγιμο κατεργαζόμενο τεμάχιο (μέταλλο) διαμορφώνεται με ακρίβεια σε ένα επιθυμητό σχήμα με διάβρωση (αφαίρεση μετάλλου), που δημιουργείται, χρησιμοποιώντας επακριβώς ελεγχόμενη ηλεκτρική εκκένωση (σπινθήρες ηλεκτρικού ρεύματος δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα), που ελέγχεται μέσω δύο αγώγιμων αντικειμένων (ηλεκτρόδια) βυθισμένων σε υγρό μέσο, για την τήξη και την εξάτμιση του προς αποβολή υλικού. Το ένα ηλεκτρόδιο ονομάζεται ηλεκτρόδιο εργαλείου (tool electrode) ή εργαλείο, ενώ το άλλο ονομάζεται ηλεκτρόδιο τεμαχίου εργασίας (workpiece electrode) ή τεμάχιο εργασίας. Το υγρό μέσο ονομάζεται διηλεκτρικό υγρό και έχει το ρόλο του μονωτικού μέσου μεταξύ του ηλεκτροδίου του εργαλείου και του τεμαχίου. Παρά τα διάφορα οφέλη της ηλεκτροδιάβρωσης που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, σημαντικό μειονέκτημα της αποτελεί η πρόκληση μορφολογικών και στοιχειακών αλλαγών στην επιφάνεια των κραμάτων Co-Cr. Όσον αφορά τις μορφολογικές διαφορές (Εικόνα 5-42), έχει δειχθεί ότι ενώ τα κράματα Co-Cr που κατεργάζονται με συμβατικό τρόπο παρουσιάζουν παράλληλες γρατσουνιές (σχετίζονται με την επιφανειακή λείανση και τη στίλβωση με τις φρέζες), ενώ τα ηλεκτροδιαβρωμένα παρουσιάζουν αυξημένη τραχύτητα με χαρακτηριστικές επικαλυπτόμενες ακανόνιστες σχεδόν κυκλικές κοιλάδες. Όσον αφορά τις αλλαγές στη στοιχειακή σύνθεση, έχει παρατηρηθεί η πρόσληψη C και Cu σε περίπτωση χρήσης ηλεκτροδίων Cu, και η πρόσληψη C και Ti μετά από επεξεργασία με ηλεκτρόδια Ti. Η σημαντική πρόσληψη C εξηγείται από την αποσύνθεση της κηροζίνης η οποία χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό υγρό, ενώ η



αύξηση του Cu σχετίζεται με την αποσύνθεση των ηλεκτροδίων Cu κατά τη διάρκεια της ηλεκτροδιάβρωσης. Ακόμη, παρατηρείται μετά την ηλεκτροδιάβρωση άνιση κατανομή των C, Co, Cr στα ηλεκτροδιαβρωμένα κράματα, και αυτό μπορεί να σχετίζεται με το σχηματισμό καρβιδίων στην επιφάνεια μετά τη διεξαγωγή της. Πράγματι μελέτες έχουν δείξει ότι ο C διατηρείται στην επιφάνεια των κραμάτων Co-Cr σχηματίζοντας το καρβίδιο Cr₇C, ενώ η κατάσταση του Cu παραμένει άγνωστη. Μελέτες έχουν δείξει μια μικτή εικόνα για την επίδραση των ηλεκτροδίων Cu στις ηλεκτροχημικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr σε σύγκριση με τους συμβατικά κατεργασμένους σκελετούς. Ωστόσο, τόσο οι επιφανειακές όσο και οι στοιχειακές μεταβολές ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες των κατεργασμένων κραμάτων. Μια επιφάνεια με κοιλάδες και βαθιές ρωγμές μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στις ρωγμές, ενώ η παρουσία καρβιδίων και οξειδίων Cu μπορεί να διακόψει τη συνοχή του στρώματος οξειδίου, διακυβεύοντας την προστατευτική του δράση. Στην πλέον πρόσφατη μελέτη δείχθηκε ότι η στοιχειακή τροποποίηση της επιφάνειας με τη χρήση ηλεκτροδίου Ti έχει ευεργετική επίδραση στην αντίσταση στη διάβρωση, μετριάζοντας έτσι την υποβάθμιση των ηλεκτροχημικών ιδιοτήτων που προκαλεί η χρήση ηλεκτροδίων Cu.¹⁷⁰



Εικόνα 5-41 Εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης σε σκελετό Μ.Ο.¹⁶⁹



Εικόνα 5-42 Εικόνες οπισθοκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (1000 x) από τις ομάδες που υπέστησαν συμβατική κατεργασία (α), ηλεκτροδιάβρωση με ηλεκτρόδιο Cu (β) και Ti (γ), όπου M = μήτρα και P = δεύτερη φάση.¹⁷⁰

5.2.2.7 Συγκρατητική δύναμη

Οι έρευνες που ασχολούνται με τη συγκρατητική δύναμη των αγκίστρων Μ.Ο. παράγουν γενικά ετερογενή αποτελέσματα, και αυτό οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές πειραματικές ρυθμίσεις σχετικά με τον τύπο και τη γεωμετρία των αγκίστρων ή του υλικού των εκμαγείων (π.χ. έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές δοκιμές σε εκμαγεία από Co-Cr). Είναι επομένως λιγότερο σημαντικό οι τιμές απόλυτης συγκρατητικής δύναμης, αλλά σημαντικό είναι το πώς μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Σημειώνεται, ότι μια επαρκής δύναμη συγκράτησης για ένα άγκιστρο Μ.Ο. θεωρούνται περίπου τα 5 N, και τα άγκιστρα δεν θα πρέπει να έχουν μικρότερη δύναμη συγκράτησης (ήτοι κατώτατο όριο 5 N).¹¹⁸

Ορισμένοι ερευνητές δοκίμασαν τις δυνάμεις συγκράτησης των C-CST αγκίστρων Akers σε γομφίους και προγομφίους, και οι τιμές των δειγμάτων κράματος Co-Cr μειώθηκαν από $5,6 \pm 0,04$ N σε $2,6 \pm 0,33$ N στους γομφίους και από $6,15 \pm 0,15$ N σε $2,8 \pm 0,29$ N στους προγομφίους μετά από μόνο 3 χρόνια προσομοίωσης γήρανσης. Ωστόσο, δεν βρέθηκε καμία μείωση σε έως και 10 χρόνια προσομοιωμένης γήρανσης. Αυτό είναι και πάλι σύμφωνο με άλλους ερευνητές που βρήκαν ελαφρώς αυξανόμενες τιμές συγκρατητικής δύναμης σε C-CST Co-Cr διπλών επιπεδίων αγκίστρων σε πάνω από 5 χρόνια κυκλικής φόρτισης.¹¹⁸

Μεταξύ των μεθόδων κατασκευής, μικρότερες αρχικές δυνάμεις συγκράτησης παρατηρούνται συνήθως στα CST άγκιστρα, τα οποία μάλιστα τείνουν να χάνουν περισσότερο από τη συγκρατητική τους δύναμη με την πάροδο του χρόνου.¹¹⁸ Πιο αναλυτικά στοιχεία μεταξύ των μεθόδων παρουσιάζονται ακολούθως.

Το 2012, οι Tannous και συν⁷² παρατήρησαν μια παρόμοια αρχική αύξηση δύναμης για το Co-Cr στη μελέτη τους, όμως οι αρχικές και τελικές συγκρατητικές δυνάμεις ήταν παρόμοιες (μικρή μείωση αρχικής δύναμης) στο τέλος των 15.000 κύκλων, ωστόσο η μη μείωση της δύναμης αποδόθηκε στη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της δοκιμής. Το 2014 ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν απώλεια αρχικής συγκράτησης 29,9 % για τα CST άγκιστρα Co-Cr μετά από 15.000 κύκλους κόπωσης παρόμοια με τη μείωση 23 % που σημειώθηκε σε μελέτη⁶⁷ του 2019 για 15.000 κύκλους κόπωσης και αυτή. Πιο αναλυτικά, σε αυτή τη μελέτη τα άγκιστρα Co-Cr, είχαν μια αρχική απότομη αύξηση δύναμης συγκράτησης στους πρώτους 100 κύκλους που ακολουθείται από μια σταδιακή μείωση της δύναμης συγκράτησης. Η αρχική αύξηση θα μπορούσε να αποδοθεί στην σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, ήτοι καθώς το Co-Cr παραμορφώνεται πλαστικά μέσω επανειλημμένης εμπλοκής του στις εσοχές, εμφανίζονται εκτοπίσεις (dislocations) με το μέταλλο και δημιουργούνται επιπλέον εκτοπίσεις. Όσο περισσότερες οι εκτοπίσεις μέσα σε ένα υλικό, τόσο



περισσότερο θα αλληλοεπιδράσουν και θα κολλήσουν (pinned) ή θα μπερδευτούν, μειώνοντας την κινητικότητά τους οδηγώντας τελικά σε ενίσχυση του υλικού Co-Cr, με συνεχή μείωση της ολκιμότητας του. Μεγαλύτερη ανάλυση του φαινομένου αυτού υπάρχει στην ενότητα 9.4.1.⁶⁷

Το 2017, οι Nakata και συν¹²⁷ απέδειξαν ότι οι δυνάμεις συγκράτησης των HM αγκίστρων Co-Cr είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές των C-CST αγκίστρων, καθώς ενώ οι αρχικές τιμές συγκρατητικής δύναμης των C-CST και HM αγκίστρων είναι παρόμοιες (12,9±3,5 N και 12,3±2,6 N, αντίστοιχα), οι δυνάμεις συγκράτησης των C-CST αγκίστρων μειώνονται σημαντικά μετά από τους 2.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης ενώ τα HM άγκιστρα παρουσιάζουν σταθερή ή ελαφρά μείωση από 1.000 σε 10.000 κύκλους ένθεσης/αφαίρεσης.

Το 2018, οι Torii και συν¹¹² απέδειξαν ότι οι αρχικές δυνάμεις συγκράτησης αγκίστρων HM (υβριδική επεξεργασία) τα οποία έχουν ανακούφιση στην επιφάνεια εφαρμογής τους (16,1±0,8 N) είναι παρόμοιες με εκείνες των αγκίστρων HM που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία (21,5±5,3 N) και σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες των C-CST (12,9±3,5 N) και HM αγκίστρων χωρίς ανακούφιση (12,3±2,6 N). Οι τιμές των ομάδων αγκίστρων CAM μειώθηκαν κατά 14,3 σε 30,8 % μετά από 10.000 κύκλους γήρανσης, ενώ τα δείγματα των CST μειώθηκαν κατά 41,1 % της συγκρατητικής απόδοσής τους. Αν και τα CST άγκιστρα μέχρι τους 2.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης έδειξαν σημαντική μείωση της συγκρατητικής δύναμης, τα HM άγκιστρα έδειξαν σταθερή ή ελαφριά μείωση, ενώ μετά τους 10.000 κύκλους υπήρχε μείωση στα CST κατά 41,1 % (7,6 N), στα HM χωρίς ανακούφιση 27,6 % (8,9), στο SLM 30,5 % (11,2), στο HM με ανακούφιση 14,3 % (13,76), HM με θερμική κατεργασία 30,8 % (14,9). Μάλιστα, η θερμική κατεργασία στην τεχνική HM αυξάνει την δύναμη συγκράτησης λόγω της μικρής παραμόρφωσης και της αύξησης του συντελεστή ελαστικότητας.¹¹²

Οι Schweiger και συν¹¹⁸ (2020) απέδειξαν ότι οι συγκρατητικές δυνάμεις οι οποίες αρχικά είναι παρόμοιες για τις μεθόδους AM+CST και DMLS (13,57±2,88 N και 15,74±2,76 N αντίστοιχα), σχετικά σταθερές και για τις δύο για έως και 10.000 κύκλους (10 χρόνια) ενώ μειώνονται μετά από 65.000 κύκλους γήρανσης (65 χρόνια) κατά 52,76 % (σημαντικά) για την τεχνική AM+CST (6,41±1,29 N) και κατά 21,98 % (μη σημαντικά) για την μέθοδο DMLS (12,28±4,79 N). Σημειώνεται ότι, η ανώτερη δομική ομοιογένεια μπορεί να είναι μια εξήγηση για τις μικρότερες τυπικές αποκλίσεις που βρέθηκαν στις περισσότερες από τις τιμές συγκρατητικής δύναμης της ομάδας DMLS.¹¹⁸



Οι Mutschler και συν⁴¹ (2020) κατασκεύασαν άγκιστρα από κράμα Co-Cr με DMLM και με CST (I-MIL) και σύγκριναν τη δύναμη συγκράτησης μετά από 9.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης (αντιστοιχούν σε 6 χρόνια). Στα δείγματα CST παρατηρήθηκε, μια σταθερή μείωση 6 % από την αρχική δύναμη συγκράτησης (αρχική = $4,86 \pm 0,077$ N, τελική = $4,57 \pm 0,037$ N) και αύξηση 4 % στα δείγματα DMLM (αρχική = $5,69 \pm 0,078$ N, τελική = $5,92 \pm 0,077$ N), δηλαδή, τα άγκιστρα DMLM παρουσίασαν κατά 20 % μεγαλύτερη δύναμη συγκράτησης από ότι τα MIL+CST. Παρόλο που σε προσομοίωση 6 χρόνων και οι 2 τεχνικές είχαν αποδεκτά επίπεδα συγκράτησης, οι διαφορές μεταξύ τους ήταν στατιστικά σημαντικές ($p < 0,0001$) και αυτό μπορεί να αποδοθεί σε μεταβολές στις συνθέσεις και τη μικροδομή των κραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στη DMLM οι περιοχές ψύχονται γρηγορότερα και έτσι οδηγούν σε πιο λεπτόκοκκη δομή, και ως γνωστόν η αντοχή των μεταλλικών υλικών είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος των κόκκων, για αυτό οι υψηλότερες δυνάμεις συγκράτησης βρίσκονται στην ομάδα DMLM. Επιπλέον, μηχανικά, σύμφωνα με μια παλαιότερη μελέτη του 2014 ένα κράμα Co-Cr που υποβλήθηκε σε επεξεργασία από DMLM φτάνει υψηλότερο όριο διαρροής ($884,37 \pm 8,96$ MPa > $758,73 \pm 30,94$ MPa) από ένα χυτευμένο κράμα και μπορεί επομένως να υποβληθεί σε μεγαλύτερη τάση έως ότου συμβεί πλαστική παραμόρφωση. Αυτό συμβαδίζει με τις διαπιστώσεις της παρούσας μελέτης για σημαντικά υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού στη DMLM ($1307,50 \pm 10,65$ MPa) από ό, τι στη MIL+CST ($758,73 \pm 25,85$ MPa), καθώς και με τα ευρήματα μιας μελέτης του 2018. Οι ερευνητές συμπεράναν, ότι ακόμα και αν αυτές οι αποκλίσεις δεν έχουν κλινική σημασία, περαιτέρω μελέτες και εφαρμογές θα πρέπει να διερευνήσουν τη συμπεριφορά κόπωσης των DMLM Co-Cr κραμάτων, προκειμένου να είναι σε θέση να εγγυηθούν την αναπαραγωγικότητα και τη μακροχρόνια συμπεριφορά τους στη κατασκευή σκελετών Μ.Ο.⁴¹

Σημειώνεται ότι, η δύναμη συγκράτησης των αγκίστρων Μ.Ο. επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες πέρα από την τεχνική κατασκευής. Υπαγορεύεται από το σχήμα των δοντιών (βάθος εσοχής) και το σχεδιασμό των αγκίστρων και συγκεκριμένα, αυξάνεται με την αυξανόμενη διατομή του βραχίονα συγκράτησης ή/και με την μείωση του μήκους του βραχίονα συγκράτησης ή/και με την αύξηση του βάθους εσοχής ή/και με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού κατασκευής.^{72,118}

Όσον αφορά τη συγκρατητική δύναμη διπλών στεφανών έχουν αναφερθεί τα εξής. Ορισμένοι ερευνητές, διερεύνησαν τους συντελεστές στατικής τριβής των κραμάτων CST Co-Cr και του χρυσού για την εφαρμογή τους στη κατασκευή κωνικών στεφανών, και παρατήρησαν ότι ήταν χαμηλότεροι για τα κράματα Co-Cr. Ο συντελεστής στατικής τριβής του κράματος χρυσού μειώθηκε κατά την απόπτηση στους 85° C στον αέρα εξαιτίας του



σηματισμού ενός στρώματος οξειδίου και αποκαταστάθηκε με την επαναστίλβωση, ενώ του κράματος Co-Cr ήταν σταθερός ανεξάρτητα από την ανόπτηση. Η μείωση στην γωνία κωνικότητας του κράματος Co-Cr θα πρέπει να είναι μικρότερη.¹⁷¹ Το 2013 οι Özyemişci-Cebeci, κατασκεύασαν τηλεσκοπικές στεφάνες από CST Co-Cr και αφού αφαίρεσαν ορισμένο πάχος από την εσωτερική επιφάνεια της δευτερεύουσας στεφάνης για προσομοίωση της αποτριβής, εφάρμοσαν 2 διαφορετικά βερνίκια τριβής (Friction-Fit-System - FGP, Servo-Dental - SD) και μια μέθοδο γαλβανοπλαστικής στη συγκράτηση των τηλεσκοπικών στεφανών. Παρατήρησαν ότι και οι 3 μέθοδοι αύξησαν σε στατιστικά σημαντικό βαθμό ($P < .01$) τη δύναμη συγκράτησης με την ομάδα FGP να παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές συγκράτησης ενώ ακολούθησαν η SD, και η ομάδα της γαλβανοπλαστικής. Πιο αναλυτικά, οι μέσες δυνάμεις συγκράτησης αυξήθηκαν από, 3,6 N σε 9,8 N για την ομάδα FGP, 3,6 N σε 4,6 N για την ομάδα SD και από 3,7 N σε 6,0 N για την ομάδα της γαλβανοπλαστικής. Η ομάδα FGP ήταν σημαντικά διαφορετική από την ομάδα SD και την ομάδα γαλβανοπλαστικής ($P < .05$) και δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά μεταξύ της ομάδας SD και της ομάδας γαλβανοπλαστικής. Οι μέσες τιμές τυπικής απόκλισης των δυνάμεων συγκράτησης για την ομάδα FGP πριν, FGP μετά, SD πριν, SD μετά, γαλβανοπλαστική πριν και γαλβανοπλαστική μετά είναι 0,5, 2,7, 0,6, 1,3, 0,8, 2,3, αντίστοιχα.¹⁷² Το 2015 οι Wagner και συν¹⁷³ προσπάθησαν να διερευνήσουν τις δυνάμεις συγκράτησης των δευτερευόντων στεφανών από κράμα Co-Cr που κατασκευάστηκαν με, S-MIL, CST και γαλβανοπλαστική, και με διαφορετικές κωνικές γωνίες (0° , 1° , 2°). Τα αποτελέσματα όσον αφορά τις δευτερεύουσες στεφάνες έδειξαν ότι, σε γωνία 1° οι δευτερεύουσες στεφάνες δεν επηρεάστηκαν, ενώ σε γωνίες 0° και 2° οι δευτερεύουσες στεφάνες γαλβανοπλαστικής εμφάνισαν σημαντικά χαμηλότερες δυνάμεις συγκράτησης σε σύγκριση με τις ομάδες CST και S-MIL. Επιπρόσθετα, σε γωνία 0° οι δευτερεύουσες στεφάνες S-MIL παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερες τιμές από αυτές της CST. Συνεπώς, οι διπλές στεφάνες, που παράγονται με νέες μεθόδους κατασκευής από κράματα Co-Cr, δηλαδή S-MIL, έδειξαν αξιόπιστες τιμές λαμβάνοντας υπόψη τις δυνάμεις συγκράτησης σε σύγκριση με τις δευτερεύουσες στεφάνες CST και τις δευτερεύουσες στεφάνες γαλβανοπλαστικής. Οι τιμές δύναμης συγκράτησης των δευτερευουσών στεφανών γαλβανοπλαστικής επιβεβαίωσαν την κλινική χρήση τους για κωνικές στεφάνες καθώς και τηλεσκοπικές στεφάνες. Ωστόσο, περαιτέρω έρευνες σχετικά με τον έλεγχο κόπωσης και τη θερμομηχανική φόρτιση θα είναι επωφελείς για την αναγνώριση της μακροπρόθεσμης τάσης της νέας μεθόδου παραγωγής Co-Cr, ιδίως με το εύρος κλίσης που κυμαίνεται από 0° έως 2° , που συνιστάται για κλινική χρήση.¹⁷³ Το 2016, οι Stock και συν¹⁷⁴ κατασκεύασαν πρωτεύουσες στεφάνες από PEEK και δευτερεύουσες στεφάνες από S-MIL



Co-Cr, ζirkόνια και γαλβανοπλαστική με 3 διαφορετικές γωνίες (0, 1, 2), και μετά από έρευνα τους διαπίστωσαν ότι η δύναμη συγκράτησης κυμαίνονταν μεταξύ 9,6 και 38,2 N. Όσον αφορά τις στεφάνες 0°, 1° και 2°, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ Co-Cr και ZrO₂ ($p > 0,141$). Στις 0° κωνικότητα, δεν βρέθηκαν διαφορές στις δυνάμεις συγκράτησης μεταξύ των 3 στεφανών ($p = 0,075$), ενώ στις 1° και 2° κωνικότητα, παρατηρήθηκε χαμηλότερη δύναμη συγκράτησης για τις γαλβανικές στεφάνες ($p < 0,009$, $p < 0,001$, αντίστοιχα) συγκριτικά με τις άλλες δύο. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί από τη διαδικασία παραγωγής, ήτοι η άμεση παραγωγή γαλβανικών στεφανών με τη διαδικασία γαλβανοπλαστικής εξασφάλισε τη βέλτιστη εφαρμογή και δεν χρειάστηκε χειροκίνητη μετα-επεξεργασία, ενώ σε αντίθεση για την επεξεργασία των Co-Cr και ZrO₂, οι δίσκοι κόπηκαν υπό ξηρές συνθήκες και συντήχθηκαν πρώτα και στη συνέχεια απαιτούσαν μια προσαρμογή δύναμης συγκράτησης με το χέρι, η οποία συνεπαγόταν κάποιες λιγότερο προβλέψιμες τιμές δύναμης συγκράτησης σε σύγκριση με τις γαλβανικές στεφάνες. Μπορεί να υποθεθεί ότι η διακύμανση στα αποτελέσματα δεν σχετίζεται μόνο με το υλικό, αλλά επίσης σχετίζεται ιδιαίτερα με τις τεχνικές κατασκευής. Η αμμοβολή των κραμάτων Co-Cr και της ZrO₂ επηρεάζει την τραχύτητα των επιφανειών. Η τραχιά επιφάνεια, η τριβή και η σφήνα θα μπορούσαν να είναι μια εξήγηση για τις υψηλότερες τιμές δύναμης συγκράτησης των Co-Cr και ZrO₂ σε σύγκριση με τις γαλβανικές.¹⁷⁴ Το 2018, οι Zierden και συν¹⁷⁵ συγκρίνοντας τηλεσκοπικές Μ.Ο. από πολύτιμα και μη πολύτιμα κράματα, παρατήρησαν ότι ο τύπος κράματος δεν έχει επίδραση στα ποσοστά επιβίωσης των τηλεσκοπικών Μ.Ο. αλλά επιδρά στην μακροχρόνια επιβίωση των δοντιών στηριγμάτων. Διαφορές υπήρχαν επίσης στη συντήρηση μεταξύ των 2 κραμάτων των τηλεσκοπικών Μ.Ο., ήτοι εκείνες των μη πολύτιμων χρειαζόνταν σημαντικά νωρίτερα συντήρηση από εκείνες των πολύτιμων, αν και η συντήρηση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον οδοντίατρο και συνεπώς δεν υπάρχει κάποιο επιπλέον κόστος (η χρήση μη πολύτιμων έναντι των πολύτιμων εξοικονομεί σχεδόν το 40 % κόστους.¹⁷⁵ Το 2018, οι Arnold και συν¹⁷⁶ κατασκεύασαν 6 ομάδες ζευγών διπλών στεφανών: ομάδα Α (τηλεσκοπικές στεφάνες 0° από Au-Ag-Pt), ομάδα Β [τηλεσκοπικές στεφάνες 0° από CST Co-Cr], ομάδα Γ (πρωτεύουσα στεφάνη από ζirkόνια και δευτερεύουσα από γαλβανοχρυσό 2°), ομάδα Δ [στεφάνες με κοχλίες τριβής (friction pins) 2° από Co-Cr CST), ομάδα Ε [(πρωτεύουσα στεφάνη από ζirkόνια και δευτερεύουσα από CST Co-Cr], ομάδα Ζ (κωνικές στεφάνες 6° Au-Ag-Pt), και σύγκριναν τις συγκρατητικές συμπεριφορές των διπλών στεφανών (με διαφορετικά σχέδια και συνθέσεις) πριν και μετά την τεχνητή γήρανση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, πριν τη γήρανση τα δείγματα στην ομάδα Δ (13,9 N), Β (12,5 N) και Ε (12,2 N) παρουσίασαν τις υψηλότερες δυνάμεις συγκράτησης ενώ οι



δυνάμεις συγκράτησης στις ομάδες A (9,6 N), Γ (7,4 N) και Z (6,0 N) ήταν στατιστικά σημαντικά χαμηλότερες από αυτές των άλλων ομάδων ($p < 0,05$). Μετά την τεχνητή γήρανση, οι διπλές στεφάνες με πρόσθετα στοιχεία συγκράτησης παρουσίασαν τις υψηλότερες δυνάμεις συγκράτησης. Οι μεγαλύτερες απώλειες δύναμης συγκράτησης ήταν εμφανείς στις ομάδες A (70 %), B (64 %), Γ (39 %) και Z (47 %). Το συμπέρασμα ήταν ότι οι διπλές στεφάνες με διαφορετικά σχέδια και κατασκευασμένες από διαφορετικά υλικά παρουσιάζουν διαφορετικές δυνάμεις συγκράτησης και διαφορετική μακροχρόνια συγκρατητική συμπεριφορά. Οι υψηλότερες απώλειες δύναμης συγκράτησης ήταν εμφανείς σε διπλές στεφάνες με πιο εκτεταμένη επιφάνεια επαφής, όπως οι τηλεσκοπικές στεφάνες.¹⁷⁶ Το 2020, οι Arnold και συν¹⁷⁷ κατασκεύασαν τηλεσκοπικές στεφάνες (0°) εκ των οποίων οι δευτερεύουσες στεφάνες κατασκευάστηκαν από κράματα Co-Cr με τη μέθοδο C-CST και οι πρωτεύουσες από Au-Ag-Pt (ομάδα A), τηλεσκοπικές στεφάνες από κράματα Co-Cr (ομάδα B) με τη μέθοδο C-CST, τηλεσκοπικές στεφάνες από κράματα Co-Cr με τη μέθοδο MIL (ομάδα Γ), και αξιολόγησαν τις δυνάμεις συγκράτησης πριν και μετά τη τεχνητή γήρανση και μετά την αξονική και μη-αξονική φόρτιση. Πριν και μετά τη τεχνητή γήρανση τα δείγματα της ομάδα Γ παρουσίασαν δυνάμεις συγκράτησης 16,2 N, και 13,6 N αντίστοιχα και γενικώς παρουσίασαν τις υψηλότερες δυνάμεις συγκράτησης, από τα δείγματα της ομάδας B 12,5 N και 2,9 N αντίστοιχα, και τα δείγματα της ομάδας A 9,6 N και 2,9 N αντίστοιχα. Η διαφορά στη δύναμη συγκράτησης μεταξύ των ομάδων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$) σε όλους τους χρόνους μέτρησης. Συνεπώς, οι δυνάμεις συγκράτησης των συστημάτων διπλής στεφάνης εξαρτώνται από τον επιλεγμένο συνδυασμό υλικών καθώς και από τη διαδικασία κατασκευής, αφού οι διαφορετικά κατασκευασμένες τηλεσκοπικές στεφάνες με περίπου πανομοιότυπα σχέδια και υλικά παρουσίασαν διαφορετικές δυνάμεις συγκράτησης και διαφορετική μακροχρόνια συγκρατητική συμπεριφορά. Σε μια βελτιστοποιημένη διαδικασία κοπής, οι MIL διπλές στεφάνες κραμάτων Co-Cr έδειξαν τις υψηλότερες δυνάμεις συγκράτησης με μια συγκριτικά συνεχή συμπεριφορά δύναμης συγκράτησης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αποτριβής. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη καλύτερη εφαρμογή με ένα κατά συνέπεια στενότερο διάκενο άρθρωσης μεταξύ των στεφανών και ένα συγκριτικά ευρύτερο μασητικό διάκενο μεταξύ των πρωτευουσών και δευτερευουσών στεφανών. Οι C-CST πανομοιότυπες διπλές στεφάνες με συγκρίσιμη σύνθεση του κράματος που χρησιμοποιήθηκε έδειξαν χαμηλότερες δυνάμεις συγκράτησης με σημαντική απώλεια δύναμης συγκράτησης.¹⁷⁷

Σημειώνεται ότι, στις διπλές στεφάνες η συγκρατητική δύναμη επηρεάζεται από την πίεση στις επιφάνειες επαφής, τη γωνία κωνικότητας, το συντελεστή στατική τριβής, τη



μορφολογία της εξωτερικής επιφάνειας της πρωτεύουσας στεφάνης και της εσωτερικής επιφάνειας της δευτερεύουσας στεφάνης, το πάχος δευτερεύουσας στεφάνης, το ύψος της πρωτεύουσας στεφάνης, και τη διάμετρο πρωτεύουσας στεφάνης και από τις συνθέσεις υλικών επηρεάζουν τη συγκρατητική συμπεριφορά των διπλών στεφανών.^{171,177}

5.2.2.8 Μεταλλοκεραμικός δεσμός

Ο μεταλλοκεραμικός δεσμός αφορά κατά κανόνα ακίνητες αποκαταστάσεις, ωστόσο επειδή στον τομέα των Μ.Ο. υπάρχουν και οι Μ.Ο. με διπλές στεφάνες από τις οποίες οι δευτερεύουσες στεφάνες της Μ.Ο. μπορούν να κατασκευαστούν από κράμα Co-Cr και στην συνέχεια να επενδυθούν με πορσελάνη, ή ακόμη και συνδυασμένες κατασκευές, για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια σύντομη αναφορά στο μεταλλοκεραμικό δεσμό των κραμάτων Co-Cr. Από πολλές έρευνες, έχει δειχθεί ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην αντοχή μεταλλοκεραμικού δεσμού μεταξύ των μεθόδων κατασκευής και γενικώς θεωρείται ικανοποιητικός καθώς οι τιμές του καλύπτουν τα κατώτερα επιτρεπτά όρια αντοχής των 25 MPa που ορίζει το ISO 9693 (ή κατά άλλους 51MPa-in vitro), όμως ευνοούνται ελαφρώς τα αποτελέσματα της ομάδας με το μεταλλικό υπόστρωμα MIL, ενώ ακολουθούν οι ομάδες με μεθόδους κατασκευής CST, DMLS/SLM και SMIL. Η παρόμοια αντοχή μεταλλοκεραμικού δεσμού επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι σε μια έρευνα όλα τα μεταλλοκεραμικά δοκίμια για κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους παρουσίασαν συνεκτικού τύπου θραύση (συνεκτικού τύπου είναι όταν το ποσοστό παραμονής στοιχείων του κεραμικού υλικού και του συγκολλητικού παράγοντα στην συνολική θραυσθείσα επιφάνεια του κράματος υπερέβαινε το 50 %, ενώ αντίθετα συγκολλητικού τύπου θα ήταν εάν ήταν μικρότερο από 50 % και γενικώς στην έννοια συγκολλητικού τύπου αστοχίας συμπεριλαμβάνεται η παραμονή των στοιχείων του μεταλλικού υποστρώματος). Αντίθετα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε παλαιότερη μελέτη όπου χρησιμοποιήθηκε όμως διαφορετική τεχνική ελέγχου μεταλλοκεραμικού δεσμού, και παρόλο που η SLS έδωσε μεγαλύτερη αν και μη στατιστικά σημαντική αντοχή μεταλλοκεραμικού δεσμού σε σχέση με τη CST, ωστόσο διαπιστώθηκε μικτός τύπος αστοχίας στα δοκίμια κατασκευασμένα με την τεχνική CST, ενώ στα δοκίμια κατασκευασμένα με την τεχνική SLS τα μισά δοκίμια παρουσίασαν μικτού τύπου αστοχία και τα άλλα μισά συγκολλητικού τύπου αστοχία. Σε άλλη μελέτη αναφέρεται ότι, στη CST η θραύση μπορεί να είναι μικτή δηλαδή συγκολλητική στη διεπιφάνεια και συνεκτική με υπολείμματα πορσελάνης επί της επιφάνειας θραύσης, ενώ στο SLM η θραύση είναι εντελώς ή σχεδόν εξολοκλήρου συγκολλητική στη πορσελάνη. Η συγκολλητική θραύση εντός της πορσελάνης είναι ο πλέον επιθυμητός τρόπος θραύσης σύνδεσης, υποδεικνύοντας έναν ισχυρό δεσμό



μεταξύ του στρώματος οξειδίου και του μετάλλου και του κεραμικού υλικού. Έτσι, η SLM δεν υποβαθμίζει σημαντικά την αντοχή του μεταλλοκεραμικού δεσμού. Οι τιμές αντοχής μεταλλοκεραμικού δεσμού που ανέφεραν: α) ερευνητές το 2012 ήταν για την SLM και CST 44 ± 5 MPa και 43 ± 4 MPa αντίστοιχα, β) ερευνητές το 2013 ήταν για την SLM και CST $31,62 \pm 2,34$ MPa και $33,45 \pm 2,34$ MPa αντίστοιχα, γ) ερευνητές το 2014 ήταν για την SLS και CST τιμές $50,60$ MPa και $46,29$ MPa αντίστοιχα, δ) ερευνητές το 2014 ήταν για την τεχνική SLM $55,78 \pm 3,02$ MPa και για την τεχνική CST $54,17 \pm 4,96$ MPa, ε) άλλοι ερευνητές το 2014 ήταν για την SLM $30,94 \pm 5,98$ MPa και για τη τεχνική CST τιμές $33,11 \pm 4,98$ MPa, ζ) η μουχαταρίδη³⁷ το 2019 για τις τεχνικές CST, MIL, S-MIL και DMLS ήταν $44,8 \pm 7,9$ MPa, $48,4 \pm 4,5$ MPa, $44,1 \pm 9,4$ MPa και $44,5 \pm 8,7$ MPa αντίστοιχα.³⁷ Η αντοχή λοιπόν του μεταλλοκεραμικού δεσμού είναι ανεξάρτητη από την μέθοδο κατασκευής, ωστόσο έχει δειχθεί ότι κράματα Co-Cr παραγόμενα από MIL και SLM εμφανίζουν καλύτερη προσκόλληση με τη πορσελάνη σε σχέση με τη CST μέθοδο. Ο μεταλλοκεραμικός δεσμός εξαρτάται από την αμμοβόληση με οξείδια αλουμινίου και το στρώμα οξειδίου που παράγεται κατά τη διάρκεια της όπτησης και το οποίο αν απουσιάζει ή είναι πολύ λεπτό ή πολύ παχύ ή αποσπάται, εξασθενεί πρόσφυση του στρώματος αδιαφάνειας. Οφείλεται στη μικρομηχανική συγκράτηση, διαμοριακούς δεσμούς Van der Waals, στις θλιπτικές τάσεις λόγω διαφοράς συντελεστή θερμικής διαστολής και κυρίως στους χημικούς δεσμούς μεταξύ μεταλλικών οξειδίων. Ο χημικός δεσμός μπορεί να αλλάξει όταν σχηματίζεται μια στιβάδα οξειδίου στην επιφάνεια του. Έτσι, για να κατανοηθεί η χημική σύνδεση με ένα κράμα, πρέπει να μελετηθεί η μορφολογία του, το στρώμα οξειδίου, το βέλτιστο πάχος του οποίου απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση, και η μεταλλοκεραμική διεπαφή. Οι μορφολογίες επιφάνειας και η φύση των επιφανειακών οξειδίων των κραμάτων CST, MIL και SLM είναι παρόμοιες (με αποτέλεσμα παρόμοιους μηχανικούς και χημικούς δεσμούς), ενώ οι μεταλλουργικές δομές είναι διαφορετικές ακόμη και σε παρόμοια σύνθεση και δεν διαφέρουν μετά την όπτηση της πορσελάνης. Οι 3 ομάδες των κραμάτων Co-Cr έχουν παρόμοια επιφανειακά οξείδια κατά τη διάρκεια του ίδιου σταδίου προετοιμασίας και μεταβάλλονται παρόμοια με την εξέλιξη προετοιμασίας. Μετά από θερμική επεξεργασία, η συγκέντρωση O και Cr και των 3 ομάδων αυξάνεται απότομα και είναι παρόμοια, υποδηλώνοντας τον σχηματισμό οξειδίων στην επιφάνεια. Μια διαδοχική στρώση οξειδίου Cr_2O_3 μπορεί να σχηματιστεί όταν η περιεκτικότητα Cr σε ένα κράμα φτάσει το 20 %. Με τα κράματα Co-Cr, μεταναστεύουν κυρίως οξείδια χρωμίου στο κεραμικό στρώμα και σχηματίζουν χημικούς δεσμούς. Μετά από την όπτηση αδιαφανούς πορσελάνης, η συγκέντρωση O δεν αυξάνεται αισθητά, υποδηλώνοντας ότι τα



κράματα έχουν οξειδωθεί μόνο ελαφρώς και ότι τα χαρακτηριστικά οξείδωσης των 3 κραμάτων είναι παρόμοια.^{50,122,135,178}

5.2.2.9 Άλλες ιδιότητες

Κλινικές μελέτες έχουν δείξει ότι η υψηλή ακρίβεια και η ποιότητα των κραμάτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία με SLM μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των σκελετών και συνεπώς να αυξήσει την ικανοποίηση των ασθενών με τις οδοντοστοιχίες τους έναντι της CST.¹¹ Ακόμη, ασθενείς έχουν αναφέρει ότι είναι πιο ικανοποιημένοι με σκελετούς Μ.Ο. που κατασκευάστηκαν με SLS από ότι με CST, με το μεγαλύτερο μέγεθος εφέ να καταγράφεται για τη σταθερότητα, ακολουθούμενη από την ικανότητα και αποτελεσματικότητα μάσησης (μπορεί να εξηγηθεί από τη σταθερότητα, η οποία σημείωσε επίσης σημαντικά υψηλότερη τιμή για τη μέθοδο SLS σε σύγκριση με τη CST), τη γενική ικανοποίηση (θα μπορούσε να σχετίζεται με τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, την μεγαλύτερη σκληρότητα και πυκνότητα των SLS σε σχέση με τα CST κράματα Co-Cr, καθώς αυτές οι ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη πιστότητα μπορούν να βελτιώσουν τη συγκράτηση του αγκίστρου και τη σταθερότητα, η οποία είναι γνωστό ότι αυξάνει σημαντικά τη συνολική ικανοποίηση και άνεση του ασθενούς) και την ικανότητα ομιλίας (οφείλεται πιθανότατα στην καλύτερη σταθερότητα και συγκράτηση που παρέχει το SLS). Επιπλέον, οι συμμετέχοντες με τη χρήση SLS ανέφεραν μεγαλύτερη ικανότητα καθαρισμού σε σύγκριση με τη CST, και μια πιθανή εξήγηση είναι ότι η τεχνολογία SLS παράγει μεγαλύτερη πιστότητα εφαρμογής που μπορεί να μειώσουν τη συσσώρευση τροφής κάτω από τις προθέσεις. Όσον αφορά την αισθητική, δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στην ικανοποίηση των συμμετεχόντων. Πλην αυτών, ο βαθμός ικανοποίησης των ασθενών με σκελετούς Μ.Ο. από SLS αυξήθηκε σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, ενώ ήταν αντιφατικός στη CST. Αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι οι συμμετέχοντες είχαν μια ευκολότερη περίοδο προσαρμογής χρησιμοποιώντας SLS σκελετούς Μ.Ο. Η σταδιακή μείωση της ικανοποίησης με τους σκελετούς CST μπορεί να σχετίζεται με την κόπωση των CST αγκίστρων με την πάροδο του χρόνου, η οποία επηρεάζει τη συγκράτηση επηρεάζοντας έτσι τη γενική ικανοποίηση, ενώ η συμπεριφορά κόπωσης των αγκίστρων SLS αναμένεται να είναι καλύτερη σε σχέση με τη CST. Επιπρόσθετα, το πιο συχνό παράπονο σχετικά με τις προθέσεις είναι η ακρίβεια εφαρμογής και η συγκράτηση, ακολουθούμενο από έλκος της γλώσσας ή ουλίτιδα και προβλήματα μάσησης. Οι ασθενείς ανέφεραν λιγότερα παράπονα, ιδίως αυτά που σχετίζονται με τη χαλάρωση της οδοντοστοιχίας όταν χρησιμοποιήθηκε SLS.¹⁷⁹



Τα μειονεκτήματα της διαδικασίας MIL συγκριτικά με τις PBF (Σύντηξη Σκόνης Σε Κλίνη) και HM είναι ότι δεν είναι εύκολο να κατασκευαστούν πολύπλοκα σχήματα (π.χ. ελεύθερες καμπύλες, εσοχές, κοίλες κατασκευές), απορρίπτονται μεγάλες ποσότητες περισσειας υλικού μετά την κοπή και η ακρίβεια εξαρτάται από τα εργαλεία κοπής και έτσι επιδεινώνεται όταν αυτά φθαρούν συν του ότι τυχόν λεπτομέρειες επιφάνειας μικρότερης διαμέτρου του εργαλείου κοπής θα χαθούν.^{47,112} Ακόμη στη MIL:

- Απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επεξεργασίας.¹¹² Η διαδικασία HM είναι εντελώς αυτόματη, και επίσης πολλοί σκελετοί μπορούν να κατασκευαστούν ταυτόχρονα.¹¹² Η τεχνική SLM είναι ημι-αυτόματη εξαλείφοντας πολλά στάδια κατασκευής αν και υπάρχουν ακόμα πολλά στάδια που εξαρτώνται από τις ανθρώπινες δεξιότητες όπως η λειτουργία του λογισμικού CAD και CAM, η αφαίρεση των δομών υποστήριξης και η τελική επεξεργασία. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέσος όρος (διάστημα εμπιστοσύνης 95 %) του συντελεστή διακύμανσης για την εφαρμογή των εφαπτήρων του σκελετού είναι 0,67 (0,39-0,96) στο CST και 0,50 (0,08-0,91) στις μεθόδους SLM.¹⁹ Λόγω της αποφυγής ορισμένων σταδίων το SLM προσφέρει επίσης μειωμένη εργασία και σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ταυτόχρονης κατασκευής πολλαπλών σκελετών Μ.Ο. στην ίδια πλατφόρμα κατασκευής αυξάνεται η ταχύτητα κατασκευής σε σύγκριση με την τεχνική CST (C-CST και AM+CST, και μάλιστα η AM+CST είναι πιο γρήγορη από ότι η C-CST) και συνεπώς η παραγωγικότητα καθίσταται υψηλή. Παρόλο που η ταχύτητα παραγωγής των σκελετών στο SLM είναι ανάλογη με το μέγεθος τους, καθώς και άλλες παραμέτρους επεξεργασίας συνήθως διαρκεί λιγότερο από 12 ώρες και πιο συγκεκριμένα έχει αναφερθεί ότι απαιτούνται περίπου 30 min για την κατασκευή ενός κλασσικού σκελετού Μ.Ο.¹¹ Ο σκελετός Μ.Ο. κατασκευάζεται παραδοσιακά με χύτευση του κέρινου προπλάσματος στο πυρόχωμα και μολονότι έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα συνεχίζει να αποτελεί μια πολύπλοκη, επιρρεπή σε σφάλματα και χρονοβόρα διαδικασία.⁴⁷ Από την άλλη πλευρά οι περισσότερες μέθοδοι SLM απαιτούν μεγάλο χρόνο μετα-επεξεργασίας των σκελετών μετά την κατασκευή τους, καθώς συνήθως μετά τη κατασκευή απαιτούν επιπλέον διαδικασίες (3 διαδικασίες μετα-επεξεργασίας) σε σχέση με τη CST μέθοδο για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους, και τέλος απαιτούν τελική επεξεργασία η οποία όμως δεν διαφέρει σαν μεθοδολογία από τη μέθοδο CST.^{11,47} Αξίζει να αναφερθεί ότι παρόλο που και οι τεχνικές SLM και CST απαιτούν φινίρισμα το οποίο εξαρτάται από τις δεξιότητες του τεχνολόγου, οι σκελετοί που παράγονται από SLM προσφέρουν περισσότερο προβλέψιμα κλινικά αποτελέσματα καθώς αυτή η διαδικασία ελέγχεται ψηφιακά και έτσι προσφέρει μια τυποποίηση στην κατασκευή, και με το τρόπο αυτό οι



σκελετοί κραμάτων Co-Cr από την SLM είναι πιθανό να είναι πολύ πιο κοντά στις προδιαγραφές του κατασκευαστή από αυτές που παράγονται με τη μέθοδο CST.¹¹

- Υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης.^{47,61} Στην HM το κόστος είναι σχετικά χαμηλό και είναι οικονομικά αποδοτικότερη από τη κοπή και σύντηξη μεμονομένα.¹¹² Το κόστος SLM το 2006 κατά την έναρξη της κατασκευής Μ.Ο. χρησιμοποιώντας CAD/CAM, ήταν υψηλό και συγκεκριμένα «στα 269 \$ ανά σκελετό για μια παρτίδα έξι διαφορετικών σκελετών Μ.Ο., συν το κόστος του κράματος». Ωστόσο, σε σύγκριση με το κόστος των συμβατικών Μ.Ο., το συνολικό κόστος θεραπείας με χρήση SLM μειώθηκε κατά περίπου 25 % το 2019, όταν η τεχνολογία CAD/CAM είχε ωριμάσει. Συνεπώς, σήμερα αν και το αρχικό κόστος μιας μηχανής SLM είναι υψηλό, πλέον το συνολικό κόστος των σκελετών Μ.Ο. θεωρείται χαμηλότερο σε σχέση με τη CST (έχει εκτιμηθεί ότι εντός μιας ημέρας το κόστος κατασκευής ενός σκελετού με SLM μπορεί να μειωθεί σε λιγότερο από το ήμισυ του κόστους των παραδοσιακών τεχνικών) και τη MIL, και αυτή η συνολική μείωση του κόστους είναι αποτέλεσμα της μείωσης του χρόνου σχεδίασης και του χρόνου κατασκευής με την εξέλιξη του λογισμικού CAD και των μηχανών CAM που μπορεί να επιτρέψουν την ταυτόχρονη παραγωγή περισσότερων σκελετών και να βελτιώσουν την οικονομική αποδοτικότητα, την μείωση του κόστους της σκόνης και τη μείωση της σπατάλης των υλικών (μείωση απορριμμάτων και ικανότητα ανακύκλωσης αχρησιμοποίητου υλικού).^{11,19} Παρόλα αυτά το αρχικό κόστος απόκτησης των ψηφιακών συσκευών αποτελεί ακόμη περιορισμό για ορισμένα εργαστήρια, ωστόσο είναι δυνατή η εξωτερική ανάθεση της διαδικασίας κατασκευής σε κέντρα CAD-CAM, γεγονός που μπορεί να μειώσει και πάλι το κόστος κατασκευής. Επιπλέον, ένα να μονοπάτι που χρησιμοποιεί τόσο ψηφιακές όσο και συμβατικές τεχνικές (AM+CST, I-MIL) θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση έναντι στην εξωτερική ανάθεση της κατασκευής σκελετού.^{25,179}

Πάντως, η τεχνολογία SLM είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και η αγορά της αναπτύσσεται ραγδαία καθώς βελτιώνεται η διαδικασία κατασκευής και το κόστος συνεχίζει να μειώνεται. Οι κατασκευαστές επεκτείνονται γρήγορα για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για αυτήν την τεχνολογία για βιομηχανικές, ιατρικές και οδοντιατρικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, το 2016, η General Electric (GE) αγόρασε δύο ομάδες 3D εκτύπωσης, την Arcam της Σουηδίας και την SLM Solutions της Γερμανίας, συνολικά 1,4 δισεκατομμύρια δολάρια, και το 2013, η 3D-Systems εξαγόρασε τη γαλλική εταιρεία Phenix. Ως αποτέλεσμα αυτού του ανταγωνισμού, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες, η ακρίβεια και η ταχύτητα παραγωγής της τεχνολογίας SLM αναμένεται να βελτιωθούν περαιτέρω στο μέλλον, και η τιμή



της μηχανής SLM αναμένεται να μειωθεί δραστικά από τον ανταγωνισμό της αγοράς, ειδικά καθώς τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας της τεχνολογίας λήγουν στο εγγύς μέλλον.⁴⁷



6.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τη χύτευση

6.1.1 Πυρόχωμα

Όπως αναφέρθηκε στο γενικό μέρος στην ενότητα των πυροχωμάτων (4.1.1.1), μετά το τέλος των αντιδράσεων αναφέρθηκε ότι για την συνήθη θερμοκρασία θέρμανσης (1000-1300 °C), ίσως παραμείνει κάποιο $Mg_2P_2O_7$ στην δομή ή να αντικατασταθεί πλήρως από άμορφο $Mg_3(PO_4)_2$, εξαρτάται από την πραγματική σύνθεση.⁴⁴

Για τις αντιδράσεις κατά τη χύτευση τώρα ισχύουν τα εξής. Το σημείο τήξης του $Mg_3(PO_4)_2$ είναι 1184 °C ενώ του $Mg_2P_2O_7$ είναι 1383 °C. Δεδομένου ότι οι θερμοκρασίες liquidus των κραμάτων Co-Cr είναι 1200-1450 °C και ότι για καλές χυτεύσεις χρειάζεται θέρμανση επιπλέον -263.15 °C (= 50K), φαίνεται ότι είναι αναπόφευκτη κάποια τήξη του συνδετικού υλικού κατά τη χύτευση. Αυτές οι αναφερόμενες θερμοκρασίες είναι στην πραγματικότητα τα ανώτερα όρια καθώς η επίδραση των προσμίξεων και της μόλυνσης είναι γενικά να μειώνουν τις θερμοκρασίες σύντηξης. Ακολούθως λαμβάνει χώρα η αντίδραση με το SiO_2 , με περαιτέρω μείωση των θερμοκρασιών σύντηξης, σχηματίζοντας υαλώδη υλικά κατά την ψύξη. Αυτή η τήξη δεν είναι πρόβλημα από την άποψη της ακρίβειας διαστάσεων καθώς το καλούπι δεν υπερθερμαίνεται και η ψύξη του κράματος πραγματοποιείται γρήγορα. Πάντως, φαίνεται ότι η σκωρία σε τέτοιου είδους χυτεύσεις οφείλεται εν μέρει σε αυτό το τήγμα. Ένα πιθανό παράδειγμα είναι:

$2CoO + SiO_2 \rightarrow Co_2SiO_4$ (~1345 °C) (αντίδραση 12 με βάση τη σειρά των αντιδράσεων που προηγήθηκαν κατά τη πήξη και θέρμανση στην ενότητα 4.1.1.1) παρόλο που το Cr_2O_3 δεν φαίνεται να αντιδρά για να δώσει ένα ισοδύναμο πυριτικό άλας και ακόμη δεν λιώνει μέχρι τους 2200 °C. Αντιδράσεις με το MgO και φωσφορικά ιόντα είναι πιθανές επίσης. Ωστόσο αποτελεί σφάλμα ότι το κράμα αντιδρά με το SiO_2 διότι είναι θερμοδυναμικά αδύνατο.⁴⁴

Σε κάθε περίπτωση, η υπερθέρμανση του πυροχώματος (και του κράματος) είναι πιθανό να αποδειχθεί δυσμενής. Στην «καλύτερη περίπτωση» αυτό θα κάνει τον καθαρισμό



του χυτού πολύ πιο δύσκολο, ενώ στην «χειρότερη περίπτωση», η τήξη μπορεί να είναι αρκετά σοβαρή για να προκαλέσει παραμόρφωση του καλουπιού ενώ το κράμα ήταν ακόμη λιωμένο, και έτσι στο ίδιο το χυτό.⁴⁴

Υπερθέρμανση των χυτευόμενων κραμάτων μπορεί να προκαλέσει δύο κύριες επιδράσεις, τις διαβρωτικές και τις θερμικές. Οι διαβρωτικές ή οξειδωτικές επιδράσεις οφείλονται στη συνδυασμένη επίδραση θερμότητας και οξειδωτικών ατμών του χυτευόμενου κράματος, στη διείσδυση συστατικών (οξειδίων κ.α.) του λιωμένου κράματος μέσα στο πυρόχωμα και την μεταξύ τους αντίδραση, και οι οποίες μπορούν να μειώσουν το πάχος του καλουπιού. Οι καθαρά θερμικές επιδράσεις, οφείλονται στην εκλύομενη θερμότητα του κράματος που μπορεί να προκαλέσει ρωγμές από θερμικό σοκ εξασθενώντας και λιώνοντας το πυρόχωμα, και μπορούν να εμφανισθούν μερικώς και μετά την στερεοποίηση του κράματος. Σαν αποτέλεσμα δημιουργείται σύντηξη των πυροχωμάτων συστατικών και παράγεται ένα παχύρρευστο τήγμα, ίδιας σύστασης με το υαλώδες στρώμα του χυτού.^{22,38,180}

Σε αυτή τη παλαιή μελέτη που έγινε ανάλυση των επιφανειών επαφής πυροχώματος-κράματος φάνηκε ότι μετά τη χύτευση και κυρίως μετά την υπερθέρμανση του κράματος Co-Cr σχηματίζονται 3 ζώνες:

- Η καστανοκόκκινη ζώνη που υπήρχε περιστασιακά ως διακριτοί μη προσκολλημένοι κρύσταλλοι μεταξύ πυροχώματος και πράσινης ζώνης. Σε αυτήν υπήρχαν μεγάλες ποσότητες Cr (λόγω υψηλής διάχυσης) και Mn και καθόλου Co. Βρέθηκε και Ca αν και θεωρήθηκε ως ακαθαρσία.
- Η πράσινη ζώνη που υπήρχε μεταξύ καστανοκόκκινης και γκρι ζώνης. Σε αυτήν υπήρχαν σχεδόν όλα τα συστατικά του κράματος (π.χ. Cr, Co, Mn) και του πυροχώματος (π.χ. Mg, Si), και μπορεί να ήταν $MgCr_2O_4$ ($MgO \cdot Cr_2O_3$) ή $Cr_3O_4(CrO \cdot Cr_2O_3)$. Απαιτεί εκτεταμένη μηχανική κατεργασία για την απομάκρυνση της με αποτέλεσμα την απώλεια ακρίβειας διαστάσεων. Mg και Si υπήρχαν σε μεγαλύτερη ποσότητα στη πράσινη ζώνη από ότι στο παρακείμενο της πράσινης ζώνης πυρόχωμα, καθώς με τον σχηματισμό της πράσινης ζώνης το πυρόχωμα αδειάζει από τα συστατικά αυτά. Cr, Co και Mn αν και λιγότερα από ότι στην πράσινη ζώνη εμφανίστηκαν και στο πυρόχωμα.^{38,39}
- Η γκρι λεπτή ζώνη που υπήρχε μεταξύ μεταλλικής επιφάνειας και πράσινης ζώνης, και ουσιαστικά ήταν ένα μείγμα μετάλλου και πυροχώματος. Περιείχε τα περισσότερα στοιχεία μετάλλου. Mn δεν βρέθηκε ούτε στην γκρι ζώνη ούτε στο πυρόχωμα. Η διαχυτικότητα του Mn είναι τόσο καλή που περνάει από την λεπτή γκρι ζώνη στην πράσινη ζώνη. Το Co δεν βρίσκεται σε τόση μεγάλη ποσότητα σε σχέση με την μεγάλη συγκέντρωση



του στο κράμα. Τα Cr και Ni πρέπει να συμπεριφέρονται με έναν τρόπο παρόμοιο όπως το Cr στην πράσινη ζώνη.³⁹

Δηλαδή, το Cr διαχέεται περισσότερο μέσα στο πυρόχωμα, το Mn διαχέεται στο ίδιο βάθος ή και περισσότερο από το Cr (πάνω από 80 μm) και είναι σχεδόν πλήρως εξαχνωμένο από το κράμα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το πυρόχωμα. Το Co παρατηρείται σε σχετικά μικρά ποσά στο πυρόχωμα και δεν είναι στον ίδιο βαθμό ή στο ίδιο βάθος διαχυμένο όπως το Cr. Μια ένωση τείνει να μειώνεται όταν αυξάνεται η ποσότητα του πυροχώματος και αυτή πιθανόν είναι το CoO, το οποίο δεν ενώνεται εύκολα με το πυρόχωμα. Το ίδιο συμβαίνει και με τον Fe ενώ δεν ανιχνεύτηκαν καθόλου στο πυρόχωμα Ni, Mo, W, Cu, Ti ή Ta.^{38,39}

Η παρουσία αλκαλικών αλάτων στα φωσφορικά πυροχώματα και η υψηλή δραστηριότητα του P₂O₅ ίσως ευθύνονται για την τραχύτητα της επιφάνειας των χυτών.³⁸

6.1.2 Τήξη-χύτευση

Όπως αναφέρθηκε σε γενικές γραμμές η μέθοδος τήξης με φλόγα υστερεί σε σχέση με την επαγωγική τήξη. Όσον αφορά τη μέθοδο τήξης με φλόγα, ο συνδυασμός κάθε ενός από τους παραπάνω τύπους με κάθε μια από τις αποστάσεις της φλόγας, δίνει και ένα τύπο χυτού με, διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, μεταλλογραφική δομή και εξωτερική επιφάνεια. Τα αποτελέσματα μιας παλαιότερης μελέτης σχετικά με την σύνθεση και την απόσταση της φλόγας στα κράματα Co-Cr φαίνονται στον Πίνακα 6-1.^{4,7}

Πίνακας 6-1 Επίδραση σύνθεσης και απόστασης φλόγας στο κράμα Co-Cr.⁷

Χαρακτηριστικά	Ουδέτερη φλόγα			Ενανθρακωμένη φλόγα			Οξειδωτική φλόγα	Υπερθέρμανση
Απόσταση	4 inc	3 inc	2 inc	4 inc	3 inc	2 inc	3 inc	4 inc
Πορώδες	Όχι	Μικρό	Μεγάλο	Μεγάλο	Μικρό	Ίσος	Ογκώδες	Μεγάλο
Μέγεθος Κόκκων	Μεγάλο	Μεγάλο	Μικρό	Μικρό	Μεγάλο	Μεγάλο	Μεγάλο	Ογκώδες
Καρβίδια	Μικρά	Μικρά	Μικρά	Μικρά	Μεγάλα	Ογκώδη	Μικρά	Μικρά
Δενδρίτες	Καλοί	Καλοί	Καλοί	Καλοί	Καλοί	Καλοί	Τραχείς	Τραχείς
Επιφάνεια	Καλή	Καλή	Καλή	-	Καλή	Τραχεία	Καλή	Τραχεία

Το 2012, οι Bauer και συν¹⁸¹ συγκρίνοντας τα κράματα Co-Cr που κατασκευάστηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες χύτευσης: φλόγα/αέρας, επαγωγή/αργόν, επαγωγή/αέρας, επαγωγή/κενό (1^η, 2^η, 3^η και 4^η μέθοδος αντίστοιχα), έδειξαν ότι για τα κράματα, η σκληρότητα με φθίνουσα σειρά ήταν στην 1^η, 2^η, 4^η και 3^η μέθοδο (σχεδόν ίδια), η επιμήκυνση αντίστοιχα στην 1^η, 3^η, 2^η και 4^η, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό στην 3^η, 4^η, 2^η και 1^η (μόνο



για την 1^{η} , $p < 0,05$). Συνεπώς, οι μέθοδοι τήξης-χύτευσης (καθώς και η σύνθεση του κράματος) επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr.¹⁸¹ Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι ο τύπος της μηχανής χύτευσης έχει μικρή επίδραση στις ιδιότητες ή την ακρίβεια των κραμάτων χύτευσης και ότι η επιλογή είναι θέμα ευκολίας και προσωπικής προτίμησης. Ωστόσο, αυτή η συνοπτική δήλωση μπορεί να μην είναι ακριβής για πολλά εμπορικά κράματα, καθώς άλλοι ερευνητές έχουν αποδείξει μια συσχέτιση μεταξύ των τεχνικών χύτευσης και των ιδιοτήτων του κράματος.⁸³ Η μελέτη το 2013 των Thompson και συν⁸³ επιβεβαίωσε εν μέρει αυτά τα ευρήματα, καθώς βρέθηκε ότι η μέθοδος χύτευσης των κραμάτων Co-Cr δεν επηρέασε σημαντικά τη μικρο-σκληρότητα Vickers, ενώ επηρέασε το μέγεθος των κόκκων και η χυτευσιμότητα. Πιο αναλυτικά, υπό βέλτιστες συνθήκες, οι επαγωγικές/πίεσης-κενού μηχανές χύτευσης μπορεί να παράγουν οδοντικά χυτά με μικρότερο μέγεθος κόκκων σε σύγκριση τις μηχανές φλόγας/φυγόκεντρης χύτευσης. Πλην αυτού, οι επαγωγικές/πίεση-κενού συσκευές χύτευσης αποδίδουν μεγαλύτερη λεπτομέρεια επιφάνειας. Ακόμη, η χημική ανάλυση απέδειξε ότι οι επιφανειακές συνθέσεις του ίδιου κράματος με τις 2 μεθόδους χύτευσης είναι ποσοτικά διαφορετικές, αν και όπως επισημάνθηκε δεν δημιουργούν αλλαγή στη σύνθεση του κράματος. Συνολικά επιτεύχθηκε υψηλό επίπεδο χυτευσιμότητας (98,5 % κατά μέσο όρο) και για τις 2 τεχνικές, με την τεχνική την επαγωγική/πίεσης-κενού να δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Σημειώνεται ωστόσο, ότι μικρές παραλλαγές στις διαδικασίες ή τα υλικά μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη χυτευσιμότητα ενός κράματος. Για παράδειγμα, ο τύπος πυροχώματος, η θερμοκρασία θέρμανσης του κράματος και η θερμοκρασία τήξης μπορεί να επηρεάσουν το μέγεθος των κόκκων, την ανάπτυξη πορώδους, την ανάπτυξη δενδριτικών κόκκων, τη μικρο σκληρότητα και την τραχύτητα της επιφάνειας.⁸³

Οι Beer και συν¹⁸² κατασκευάζοντας δοκίμια κράματος Co-Cr με συσκευή τήξης επαγωγική και χύτευσης με φυγόκεντρό ή πίεσης-κενού, εξέτασαν την ποιότητα τους και ανέλυσαν τα αίτια της πρόωρης απώλειας της ποιότητας των τμημάτων τους. Οι ερευνητές παρατήρησαν τα εξής. Μακροσκοπικά, τα κράματα και των δύο μεθόδων χύτευσης είχαν καλή ποιότητα επιφάνειας και έλλειψη ατελειών. Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων του σχήματος και των διαστασιακών αποκλίσεων δίδονται στην Εικόνα 6-1. Μικροδομικές μελέτες έδειξαν την παρουσία μιας τυπικής δενδριτικής δομής της μήτρας σε μορφή στερεού διαλύματος Co-Cr-Mo και ευτηκτικής με την παρουσία πρωτογενών ιζημάτων (Εικόνα 6-2 α και δ). Μικροδιαφορισμοί έχουν παρατηρηθεί εντός των κρυσταλλιτών. Τα πρωτογενή ιζήματα συνεχούς φύσης βρίσκονται στους διαδενδριτικούς χώρους και κατά μήκος των συνόρων των κρυσταλλιτών. Οι διαφορές τώρα των μεθόδων είναι οι εξής:

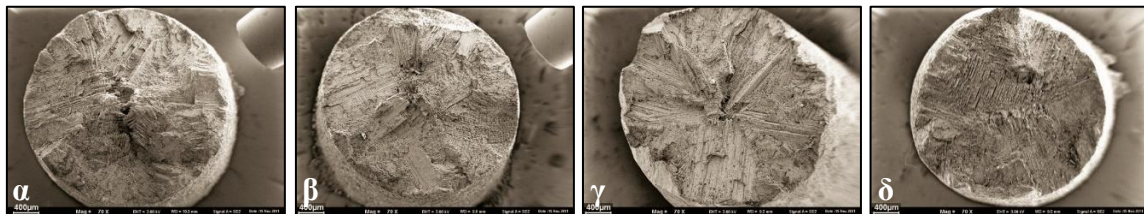


- Οι σκελετοί Μ.Ο. που κατασκευάζονται με χύτευση χαρακτηρίζονται από σημαντική ποσότητα ελαττωμάτων χύτευσης με τη μορφή πόρων και πορώδους συστολής (Εικόνα 6-3), ωστόσο, τα δείγματα που κατασκευάζονται με μια μέθοδο κενού-πίεσης χαρακτηρίζονται από την παρουσία μεμονωμένων περιπτώσεων μικροπορώδους και πορώδους συρρίκνωσης (Εικόνα 6-2 β και γ) ενώ τα χυτά που γίνονται με φυγοκεντρική μέθοδο χαρακτηρίζονται από την παρουσία πορώδους που εμφανίζεται κατά μήκος του άξονα των δενδριτών (Εικόνα 6-2 ε) και πορώδους συρρίκνωσης που εμφανίζεται στους βραχίονες και μικρορωγμές που διαδίδονται μεταξύ των βραχιόνων με πορώδες συστολής (Εικόνα 6-2 ζ). Η εκτίμηση της έντασης των ελαττωμάτων χύτευσης (Εικόνα 6-4 α και β) δείχνει την παρουσία περίπου 1,3 % των πόρων στην διατομή του στοιχείου, ενώ η μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους συνήθως εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα. Υπάρχει επίσης μια μεγάλη ποσότητα ακτινικών ρωγμών, οι οποίες στην περίπτωση των φορτίων κόπωσης θα μειώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής διευκολύνοντας τη διάδοση των ρωγμών κόπωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση έχει πραγματοποιηθεί στην εγκάρσια τομή, ενώ στο διαμήκες τμήμα εμφανίζονται τα διαμήκη ελαττώματα (Εικόνα 6-4 γ), που μειώνουν σημαντικά την αντοχή στην κάμψη και τη διάρκεια ζωής.
- Οι ιδιότητες των χυτών που γίνονται με μια μέθοδο πίεσης-κενού είναι υψηλότερες από αυτές που δημιουργούνται με φυγοκεντρική. Συγκεκριμένα, το όριο διαρροής που δηλώνεται από τον κατασκευαστή είναι 0,68, ενώ για το ληφθέν υλικό είναι 0,75 για το φυγοκεντρική μέθοδο και 0,72 για τη μέθοδο πίεσης κενού, και η τιμή της επιμήκυνσης που λαμβάνεται είναι 2-3 %. Αυτές οι ιδιότητες σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις των καταγμάτων, έδειξαν ότι και στις 2 τεχνικές, τα κατάγματα είναι ψαθυρά. Η κύρια διεύθυνση κρυστάλλωσης είναι από την εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου με την ολοκλήρωση της κρυστάλλωσης στο κέντρο του δοκιμίου (Εικόνα 6-1 α και γ). Ωστόσο, και για τις δύο μεθόδους χύτευσης οι μηχανικές ιδιότητες είναι χαμηλότερες από αυτές που δηλώνει ο κατασκευαστής, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία δομικών ελαττωμάτων στα χυτά. Η μείωση της αντοχής σε σχέση με τα δεδομένα του κατασκευαστή μπορεί να είναι το αποτέλεσμα της παρουσίας πορώδους συρρίκνωσης στη δομή του χυτού. Επιπλέον, η διάταξη του πορώδους συρρίκνωσης και των μικρορωγμών (στους δενδριτικούς βραχίονες, κατά μήκος του άξονα των δενδριτών) αποτρέπει την πλαστική παραμόρφωση αυτών των περιοχών και την αντιστάθμιση για τη διάδοση ρωγμών. Η σχετικά χαμηλή πλαστικότητα του κράματος μπορεί να είναι η πηγή του πολλαπλασιασμού της διάδοσης των μικρορωγμών που προκύπτει μεταξύ των περιοχών πορώδους συρρίκνωσης, όπου η μεταλλική ζώνη δεν είναι ικανή να μεταδίδει τις θερμικές τάσεις κατά τη

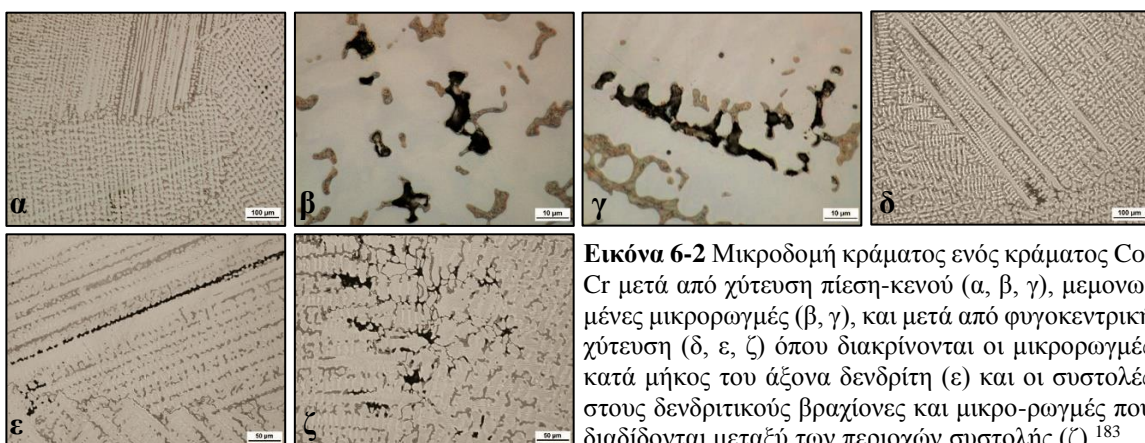


διάρκεια της ψύξης. Αυτές οι μικρορωγμές προωθούνται ιδιαίτερα σε ευτηκτικές περιοχές με χαμηλή πλαστικότητα και συνεπώς χαμηλή τιμή δυσθραυστότητας θραύσης (Εικόνα 6-1 ζ).

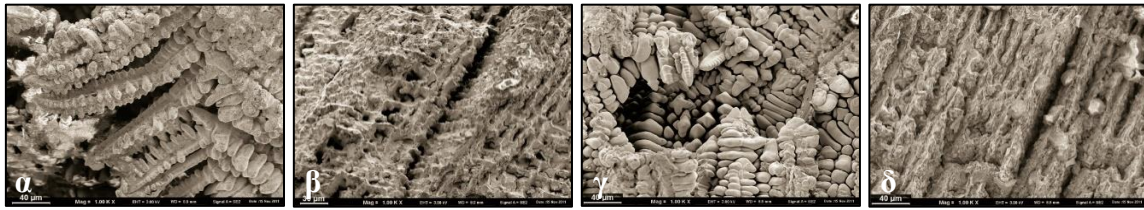
- Αυτός ο τύπος κατασκευής σε συνδυασμό με ελαττώματα χύτευσης είναι η αιτία δημιουργίας ρωγμών κατά την χρήση των οδοντοστοιχιών. Η μείωση του κινδύνου εμφάνισης ελαττωμάτων στις δομές χύτευσης και η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων απαιτεί τη βελτίωση των κατευθυντήριων γραμμών της τεχνολογίας χύτευσης και των παραμέτρων της πιθανής θερμικής επεξεργασίας, διατηρώντας παράλληλα ένα αποδεκτό επίπεδο κόστους παραγωγής. Επιπλέον, προκειμένου να αποφευχθούν επιπλοκές που εμφανίζονται μετά από βλάβη των οδοντοστοιχιών (βλάβη των δοντιών ή πνιγμός), συνιστάται η παρακολούθηση της κατάστασης της Μ.Ο. με οπτική αξιολόγηση (οδοντιατρικό μικροσκόπιο ή άλλα οπτικά όργανα) κάθε έξι μήνες από τους οδοντιάτρους. Τα μεταλλικά στοιχεία πρέπει κατά κύριο λόγο να υποβληθούν σε αξιολόγηση (για τον επιπολασμό των γρατσουνιών ή των μικρορωγμών - ως αρχή ενός κατάγματος κόπωσης). Η άλλη νευραλγική περιοχή είναι οι άκρες των οδοντοστοιχιών - επίσης για την παρουσία των μικρορωγμών και τυχόν ζημιά που οδηγεί σε σύντομο χρονικό διάστημα σε αποτυχία λόγω κόπωσης και απώλεια λειτουργικότητας της πρόσθεσης.¹⁸³



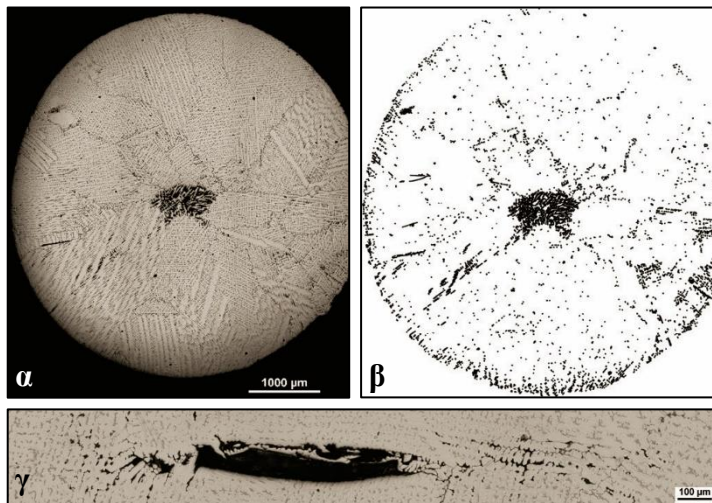
Εικόνα 6-1 Μακρο-δομές των σπασμένων τμημάτων δοκιμών: α, β – από χύτευση πίεσης-κενού και γ, δ – από φυγοκεντρική μέθοδο χύτευσης.¹⁸³



Εικόνα 6-2 Μικροδομή κράματος ενός κράματος Co-Cr μετά από χύτευση πίεση-κενού (α, β, γ), μεμονωμένες μικρορωγμές (β, γ), και μετά από φυγοκεντρική χύτευση (δ, ε, ζ) όπου διακρίνονται οι μικρορωγμές κατά μήκος του άξονα δενδρίτη (ε) και οι συστολές στους δενδριτικούς βραχίονες και μικρο-ρωγμές που διαδίδονται μεταξύ των περιοχών συστολής (ζ).¹⁸³

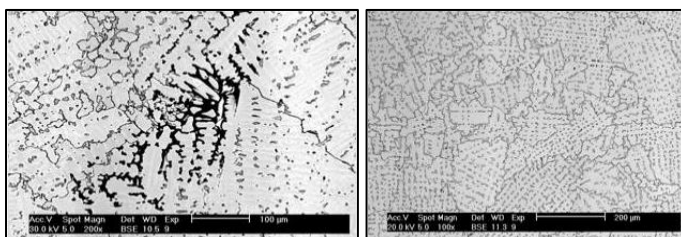


Εικόνα 6-3 Ελαττώματα χύτευσης στη δομή των δοκιμών: α, β που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο χύτευσης υπό πίεση κενού: συστολή (α), ρωγή κατά μήκος του δενδρίτη (β), και γ, δ που κατασκευάστηκαν με μια φυγοκεντρική μέθοδο χύτευσης: συστολή (γ), συστολή και πορώδες (γ και δ).¹⁸³



Εικόνα 6-4 Μικροδομή επιλεγμένου τμήματος από το την προ-προηγούμενη εικόνα (α), συστολές (β), διαμήκη αστοχίες σε διαμήκη τομή ενός επιλεγμένου τμήματος (γ).¹⁸³

Οι σκελετοί που γίνονται με τη μέθοδο χύτευσης πίεσης-κενού έναντι της φυγοκεντρικής-αέρα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια, σταθερότητα διαστάσεων, ποιότητα επιφάνειας, αναπαράσταση σχήματος και από μια πολύ πιο συμπαγή δομή. Οι διαφορές στη δομή των χυτών που γίνονται με τις προαναφερθείσες μεθόδους φαίνονται στην Εικόνα 6-5. Η τεχνολογία φυγοκεντρικής χύτευσης-αέρα χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων ποσοτήτων των λεγόμενων μικροσυστολών στη δομή του υλικού. Οι διεξαγόμενες δοκιμές υλικών έδειξαν ότι ανεξάρτητα από τη μέθοδο χύτευσης, οι ιδιότητες που αναφέρουν οι κατασκευαστές των κραμάτων μεταβάλλονται μετά τη χύτευση (Πίνακας 6-2). Στην περίπτωση πραγματικών τμημάτων σκελετών Μ.Ο., τα οποία ενδέχεται να υποστούν πλαστικές παραμορφώσεις υπό την επίδραση μασητικών φορτίων, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην εκτέλεση της χύτευσης χωρίς ελαττώματα ή να διασφαλιστεί η αφαίρεση των ελαττωμάτων πριν από την παράδοση της οδοντοστοιχίας.¹⁸⁴



Εικόνα 6-5 Μικροδομή χυτού κράματος Co-Cr με φυγοκεντρική χύτευση στα αριστερά και πίεση-κενού στα δεξιά.¹⁸⁴



Πίνακας 6-2 Σύγκριση των ληφθέντων ιδιοτήτων των κραμάτων μετά τη χύτευση σε σχέση με τις τιμές που αναφέρει ο κατασκευαστής.¹⁸⁴

CST	R _{p0,2}		R _m		Επιμήκυνση %	
	Μέση	ΤΠ	Μέση	ΤΠ	Μέση	ΤΠ
Φυγόκεντρος-αέρα	600	64	820	94	1,1	0,4
Πίεσης-κενού	610	14	790	48	0,8	0,2
Στοιχεία κατασκευαστή	625		910		4,1	

Ορισμένοι ερευνητές συγκρίναν τη επίδραση της μεθόδου χύτευσης (φυγόκεντρος και μέθοδος κενού-πίεσης) στην δύναμη εκτροπής αγκίστρων Co-Cr με ευθεία προφίλ ημικυκλικής διατομής. Η χρήση ευθείων προφίλ αγκίστρων για μέτρηση είναι ένα είδος απλούστευσης των πραγματικών καταστάσεων όπου παρουσιάζονται καμπύλα προφίλ αγκίστρων προσαρμοσμένα στην καμπυλότητα των δοντιών-στηριγμάτων. Η εφαρμογή διαφορετικής μεθόδου χύτευσης δεν βελτίωσε τις ελαστικές ιδιότητες των χυτών ημικυκλικών ευθειών αγκίστρων, αν και παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά περίπου 6 % μεταξύ των δύο μεθόδων χύτευσης. Η δύναμη εκτροπής δείχθηκε ότι ήταν κατά 0,03 kg μεγαλύτερη στη μέθοδο κενού-πίεσης. Η κατανομή της δύναμης εκτροπής των προφίλ των αγκίστρων με τις δύο μεθόδους χύτευσης φαίνεται να είναι σημαντική και αυτό μπορεί να αντικατοπτρίζει μια πραγματική κατανομή των δεδομένων που μπορεί να παρατηρηθεί ως περίπου ± 9 % στην κλινική πρακτική. Όσον αφορά την επίδραση της μεθόδου χύτευσης στη μικροδομή, τα άγκιστρα και των δύο μεθόδων είχαν την τυπική δενδριτική μικροδομή, και εκείνο που διέφερε ήταν οι κόκκοι όπου ενώ για τις δύο μεθόδους χύτευσης παρατηρήθηκε το ίδιο μοτίβο διάταξης κόκκων (το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται από το άκρο του αγκίστρου προς το σώμα και επίσης το σώμα του αγκίστρου κοντά στην επιφάνεια έχει μικρό μέγεθος κόκκων το οποίο αυξανόταν έως και 10 φορές προς το κέντρο), ωστόσο το μέγεθος των κόκκων στη μικροδομή ήταν διαφορετικό και συγκεκριμένα μεγαλύτερο στη μέθοδο χύτευσης κενού-πίεσης γεγονός επηρέασε την συγκρατητική δύναμη των αγκίστρων (όσο μεγαλύτεροι οι κόκκοι τόσο αυξάνεται η συγκρατητική δύναμη). Αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι η ίδια η τεχνολογία χύτευσης, αλλά μάλλον ο ρυθμός ψύξης είναι υπεύθυνος για αυτές τις διαφορές. Αυτό είναι καλά ορατό σε εικόνες διατομής όπου προφίλ με δύναμη συγκράτησης μεγαλύτερη από 0,7 kg έχουν μόνο δύο μεγάλους κόκκους που συνδέουν οπίσθιο τοίχωμα, ενώ προφίλ με δύναμη συγκράτησης 0,5 kg έχουν τρεις ή περισσότερους. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεγάλοι και μπορεί να μεγαλώνουν έως και 1 mm σε διάμετρο. Τα δείγματα που χυτεύθηκαν με πίεση-κενό δεν έδειξαν εμφανείς διαφορές στο πάχος ορίων των κόκκων από εκείνα που χυτεύθηκαν με τη μέθοδο επαγωγής/φυγόκεντρησης.¹⁸⁵



Η θερμοκρασία τήξης και ο ρυθμός ψύξης κατά τη στερεοποίηση μπορεί να αλλάξουν το μέγεθος κόκκων του κράματος, σε κάθε μέθοδο χύτευσης. Τυχόν διαφορές μπορούν προφανώς να επηρεάσουν τη μικροδομή του κράματος. Η διαδικασία ψύξης θα μπορούσε σίγουρα να είναι διαφορετική για καθεμία από τις μεθόδους χύτευσης. Αυτό συμβαίνει επειδή, η περιστροφική κίνηση της φυγόκεντρου στον περιβάλλοντα αέρα κατά τη χύτευση με τη φυγόκεντρική μέθοδο και τον κλειστό μικρό θάλαμο της μεθόδου πίεσης κενού δημιουργούν πολύ διαφορετικές συνθήκες ψύξης. Στη μέθοδο της πίεσης-κενού, η διαδικασία ψύξης είναι προφανώς πιο αργή, επειδή δεν υπάρχει περιστροφή σε περιβάλλοντα αέριο. Επαγωγικό κράμα τήξης υπό συνθήκες κενού υπό υπολογιστικό έλεγχο μπορεί να καθορίσει τη θερμοκρασία τήξης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό μπορεί να παράγει μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου του χυτού αγκίστρου. Οι μεγαλύτεροι κόκκοι του αγκίστρου κράματος Co-Cr επιμηκύνουν τη διάρκεια ζωής κόπωσης. Από την άλλη πλευρά, οι μεγαλύτεροι κόκκοι μειώνουν την αντοχή σε εφελκυσμό και την ολκιμότητα των κραμάτων Co-Cr. Ακόμη, το διαφορετικό μέγεθος κόκκων μπορεί να τροποποιήσει τη δυσθραυστότητα των αγκίστρων.²¹⁶ Αντίθετα, σε άλλη μελέτη που βρέθηκε μικρότερο μέγεθος κόκκων στη συσκευή πίεσης-κενού, αναφέρθηκε ότι μια εξήγηση για τη μείωση του μεγέθους των κόκκων, μπορεί να είναι ότι το τηγμένο κράμα, υπό την υψηλότερη πίεση που υφίστανται από αυτές τις συσκευές, απάγει εύκολα τη θερμότητα, με αποτέλεσμα πιο γρήγορο ρυθμό ψύξης και στερεοποίησης, λόγω αυξημένης επαφής με το πυρόχωμα.⁸³

Αναζητώντας το λόγο των διαφορετικών ρυθμών ψύξης για την ίδια μέθοδο χύτευσης, μπορεί να σημειωθεί ότι τα προφίλ αγκίστρων μπορεί να έχουν διαφορετική απόσταση από το κανάλι αγωγού και αυτά που πλησιάζουν έχουν παρατεταμένο χρόνο ψύξης από εκείνα από το άκρο του μοτίβου κεριού. Έτσι σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ιδιότητες του κράματος κοβαλτίου-χρωμίου δεν είναι οι ίδιες με αυτές που αναφέρουν οι κατασκευαστές ή άλλες πηγές, επειδή η τεχνική χύτευσης δεν είναι η βέλτιστη για κάθε κράμα ή συνθήκες χύτευσης του διαφέρουν σε κάθε εργαστήριο.¹⁸⁵



Κατά την τήξη ενός κράματος με τη μέθοδο χύτευσης κενού/πίεσης, η χρήση αερίου σχηματισμού (forming gas) που είναι ένα μείγμα αζώτου και υδρογόνου υπό πίεση 0,6 bar μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή λεπτότερων καρβιδίων τα οποία τείνουν να συσσωρεύονται κατά μήκος των ορίων των κόκκων και υπό αυτή την άποψη η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες των χυτών. Δεν υπάρχουν ορατές αλλαγές με το πλάτος του περιγράμματος κόκκων και για τις δύο μεθόδους χύτευσης.¹⁸⁵

Ο παραγωγός κάθε κράματος συνοδεύει πάντα μαζί με τα κράματα οδηγίες χρήσης που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες κατασκευής και τις σχετικές ιδιότητες των χυτών. Στην πράξη, αν και η αξιολόγηση και η επίτευξη της ιδανικής θερμοκρασίας χύτευσης των κραμάτων είναι πολύ δύσκολη, η θερμοκρασία των υγρών κραμάτων έχει άμεση επίδραση των στις ιδιότητες των χυτών και τελικά την ποιότητα των οδοντοστοιχιών.⁹³ Πιο αναλυτικά, σε μια μελέτη δείχθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας χύτευσης των κραμάτων Co-Cr κατά 10-30 °C, ιδίως κατά 30 °C, μειώνει την αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων, δεδομένου ότι στη συγκεκριμένη έρευνα παρατηρήθηκε ότι το ρεύμα διάβρωσης αυξήθηκε έως και δέκα φορές και το δυναμικό διάβρωσης μειώθηκε κατά μέσο όρο 20 %. Επίσης παρατηρήθηκε ότι, η αύξηση της θερμοκρασίας χύτευσης κατά 10-30 °C ιδίως κατά 30 °C, ή μείωση της κατά 10 °C από τη συνιστώμενη, μειώνει το όριο διαρροής και την αντοχή στη θλίψη. Στη συγκεκριμένη μελέτη παρατηρήθηκε ότι τόσο το όριο διαρροής όσο και η αντοχή στη θλίψη μειώθηκαν κατά περίπου 10 % και 25 % αντίστοιχα από τις τιμές που λαμβάνονται για την προεπιλεγμένη θερμοκρασία που δίδεται με τις οδηγίες του κατασκευαστή του κράματος. Αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας χύτευσης των κραμάτων από την συνιστώμενη μεταβάλλει επίσης τη σκληρότητα του κράματος. Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων όπως παρατηρήθηκε και σε άλλη εργασία συνδέεται με το γεγονός ότι στην υψηλότερη θερμοκρασία χύτευσης το μέγεθος των κόκκων αυξάνεται και η δομή γίνεται πιο χονδροειδής, πράγμα που μειώνει την αντοχή. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας χύτευσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ψαθυρότητας και τα κράματα με την αύξηση της βράχυνσης (shortening) περίπου 9-12 % γίνονται πολύ περισσότερο πλαστικά.⁴⁰

6.1.3 Επανάτηξη – Επαναχύτευση

Οι κατασκευαστές οδοντιατρικών κραμάτων συμβουλεύουν να μην επαναχρησιμοποιείται κράμα το οποίο έχει προηγουμένως χυτευθεί.⁷ Πολύ λίγοι κατασκευαστές υποστηρίζουν ότι



αν και δεν συνίσταται είναι αποδεκτή η μερική προσθήκη νέου κράματος. Γενικώς πάντως ισχύει ότι καλό είναι να μην χρησιμοποιείται κράμα Co-Cr το οποίο έχει ξανατακεί καθώς μετά την πρώτη τήξη των κραμάτων αυτών, μπορεί να χαθούν ιχνοστοιχεία του κράματος μέσω εξαέρωσης των εύτηκτων συστατικών ή οξειδωσης ή μπορεί να προσληφθούν άλλα όπως ακαθαρσίες, με αποτέλεσμα να επέρχονται μεταβολές στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες όμως θα αναλυθούν παρακάτω.⁵³ Ωστόσο, αρκετά εργαστήρια συνεχίζουν να επαναχρησιμοποιούν συχνά το πλεόνασμα κράματος χύτευσης.¹⁸⁶ Οι κυριότεροι λόγοι που οδηγούν στην επαναχύτευση των κραμάτων από τους οδοντίατρους και τους τεχνολόγους είναι τρεις. Ο πρώτος λόγος είναι οικονομικός, για τη μείωση του συνολικού κόστους δεδομένου ότι έχει αυξηθεί η τιμή των κραμάτων Co-Cr λόγω της αύξησης της ζήτησης. Ο δεύτερος είναι η σπατάλη φυσικών πόρων, καθώς από τη δεκαετία του 1980, η ποσότητα των ευγενών και υψηλών ευγενών μεταλλικών κραμάτων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της οδοντιατρικής έχει μειωθεί σημαντικά λόγω της αύξησης της τιμής τους, και ως αποτέλεσμα, τα βασικά κράματα μετάλλων έχουν γίνει όλο και πιο δημοφιλή. Ο τρίτος λόγος είναι η περιβαλλοντική προστασία, καθώς η ανακύκλωση παρέχει περιβαλλοντικά οφέλη όσον αφορά διατήρηση φυσικών πόρων, την εξοικονόμηση ενέργειας, τον μειωμένο όγκο αποβλήτων και τις μειωμένες εκπομπές που σχετίζονται με την εξοικονόμηση ενέργειας. Στα εργαστήρια οδοντικής τεχνολογίας όταν για τη δημιουργία σκελετού Μ.Ο. χρησιμοποιείται η μέθοδος χύτευσης (lost wax casting method), δημιουργείται αρκετά μεγάλη ποσότητα περισσειας (π.χ. κώνος και αγωγοί χύτευσης) χυτευμένου κράματος συγκριτικά με άλλους τύπους οδοντιατρικών κατασκευών. Έτσι, φαίνεται να έχει πιο νόημα η επαναχρησιμοποίηση κράματος για τέτοιες αποκαταστάσεις και ειδικά για τις όχι τόσο ανεπτυγμένες χώρες με περιορισμένους πόρους, οικονομικούς περιορισμούς και αναλφαβητισμό, όπου η καλύτερη δυνατή χρήση ποιοτικών υλικών έχει τεράστια σημασία. Πλην αυτών των χωρών, ακόμη και σε πολλά σύγχρονα εργαστήρια η επαναχρησιμοποίηση χυτευμένου κράματος συνεχίζει να αποτελεί ρουτίνα.^{131,151,186-192}

Όσον αφορά το ποσοστό και τον εφικτό αριθμό επαναχυτεύσεων, στην ανασκόπηση το 2015 των Corroy και συν¹⁸⁶ αναφέρθηκε ότι αν και υπάρχουν έρευνες και παρόλο που αυτές οι μελέτες διαφέρουν πολύ στη μεθοδολογία και το σχεδιασμό, με τον αριθμό επαναχυτεύσεων να κυμαίνεται από 1 έως 10 και με ποσοστό του νέου κράματος από 0 έως 100 % κ.β. με μέση τιμή 50 % κ.β εντούτοις παρατήρησαν ότι κανένα γενικό πρωτόκολλο δοκιμής δεν μπορεί να συναχθεί από αυτές τις μελέτες, γεγονός το οποίο περιορίζει τη σύγκριση και την εκμετάλλευση των δεδομένων. Προσπάθειες έχουν γίνει και σε αυτή και άλλες έρευνες για την καθιέρωση ενός κοινού πρωτόκολλου συναίνεσης προσθήκης 50 % κ.β.



χρησιμοποιημένου κράματος σε καινούργιο μέγιστο αριθμό επαναχυτεύσεων των 4, που είναι εύκολο και οικονομικά αποδοτικό με σαφείς μεθόδους αξιολόγησης που περιγράφονται για να βοηθήσουν στην επικύρωση της επαναχρησιμοποίησης κράματος μένει ωστόσο να δοκιμαστεί και στο μέλλον.^{186,187} Μάλιστα σύμφωνα με ορισμένους κατασκευαστές επιτρέπεται αν και δεν συνίσταται η χύτευση κράματος που περιέχει έως και 50 % επαναχυτευμένο κράμα, καθώς όπως επισημαίνουν μια τέτοια αναλογία δεν συμβάλει στη μείωση της ποιότητας των κατασκευών. Πάντως σαν γενικός κανόνας σήμερα και μετά την άποψη που διατυπώθηκε και από τον Anusavice έχει επικρατήσει η επαναχύτευση των κραμάτων Co-Cr μπορεί να πραγματοποιείται με την προσθήκη 50 % νέου κράματος.^{192,193} Οι μελλοντικές μελέτες πρέπει να εργαστούν για την καθιέρωση ενός κοινού πρωτοκόλλου συναίνεσης.^{186,191}

Παλαιότερη μελέτη του 1962 είναι σύμφωνη με μια μελέτη του 1995, και υποστήριξαν την προσθήκη νέου κράματος στην αναλογία τουλάχιστον ίσου βάρους παλαιού κράματος Co-Cr για τη διατήρηση της χυτευσιμότητας και των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος.¹³¹ Ερευνητές το 1965 μελετώντας κράματα Co-Cr πριν από την πρώτη τήξη και μετά από 1, 6, 9 και 13 επαναχυτεύσεις, έδειξαν ότι η επαναχύτευση προκαλεί αλλοιώσεις στη χημική σύνθεση του κράματος που προκαλεί μείωση της ρευστότητας και της ευκολίας τήξης. Ωστόσο, επισήμαναν ότι η επαναχύτευση μπορεί να γίνει έως 13 φορές χωρίς το κράμα να χάσει τις φυσικές του ιδιότητες. Υποστήριξαν επίσης ότι στο εντελώς καθαρισμένο και αποξειδωμένο χυτό κράμα δεν χρειάζεται να προστεθεί νέο κράμα σε καμία αναλογία.¹⁹² Ένας ερευνητής το 2003, χρησιμοποίησε τη δοκιμή Whitlock για να συγκρίνει ένα τοπικά παρασκευαζόμενο κράμα Co-Cr με ένα εμπορικά διαθέσιμο, και παρά του ότι το τοπικά παρασκευασμένο έδειξε υψηλότερο τιμή χυτευσιμότητας (92,42 %) από το εμπορικό (90,15 %), εντούτοις η διαφορά αυτή δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Στην ανασκόπηση το 2015 των Corroy και συν¹⁸⁶, αναφέρθηκε ότι οι πολλαπλές επαναχυτεύσεις των κραμάτων Co-Cr οδηγούν σε αλλαγές στη χημική σύνθεση, που αυτό με τη σειρά του μειώνει την ρευστότητα του κράματος. Μελέτες σε διαφορετικά κράματα τα οποία πιθανόν ισχύουν και για τα Co-Cr δεδομένου ότι τα ευρήματα αφορούν την συμπεριφορά ορισμένων στοιχείων, έχουν δείξει ότι στοιχεία όπως το Ni, Co, Cu, Zn, Cr, Sn και Fe μπορεί να χαθούν κατά τη διαδικασία χύτευσης λόγω της εξάτμισης και της οξείδωσης.¹⁸⁶ Το 2017, οι Imran και συν¹³¹, οι οποίοι απέδειξαν ότι το κράμα Co-Cr μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί έως και έξι φορές χωρίς να επηρεαστεί η χυτευσιμότητα υπό την προϋπόθεση ότι προστίθεται 50 % νέο κράμα σε κάθε επαναχύτευση, παρόλο που βρέθηκε μια μικρή μείωση της χυτευσιμότητας η οποία ήταν μη στατιστικά σημαντική και η οποία ωστόσο θα μπορούσε να αποδοθεί στην



επαναλαμβανόμενη επεξεργασία που μπορεί να προκαλέσει μικροδομικές αλλαγές όπως αλλοίωση στα δευτερεύοντα στοιχεία, ακανόνιστο μέγεθος κρυστάλλων και μικροπόρους που έχουν ως αποτέλεσμα μικρά ελαττώματα χύτευσης. Το 2018, οι Wang και συν¹⁹⁴ απέδειξαν ότι υπό την κατάσταση κενού με αργό η επαναχύτευση δεν είχε καμία προφανή επίδραση στη χημική σύνθεση των μεταλλοκεραμικών κραμάτων Co-Cr με επαναχύτευση 1-3 φορές ($P > 0,05$).

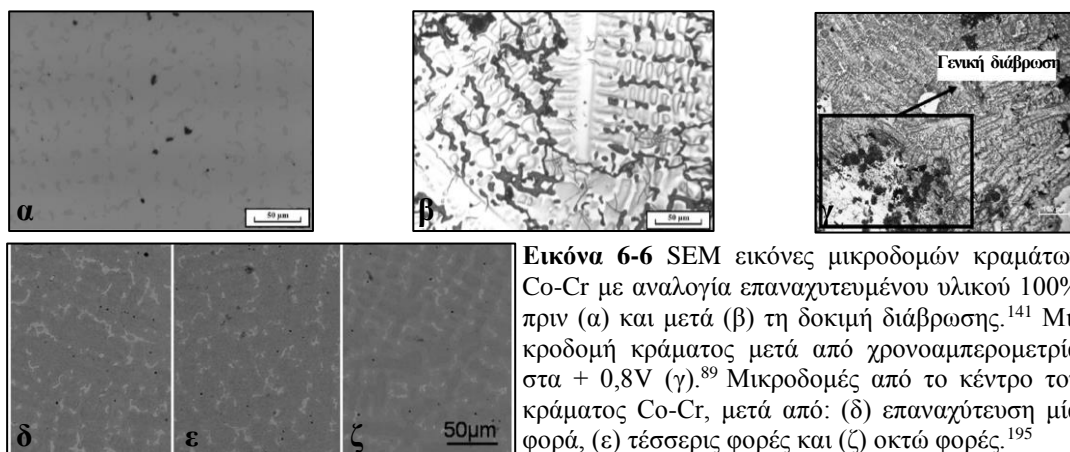
Όσον αφορά την αντίσταση στη διάβρωση έχουν αναφερθεί τα εξής. Το 2015, στην ανασκόπηση των Corroy και συν¹⁸⁶, αναφέρθηκε ότι σε μελέτη του 2004 αναφέρθηκε ότι τα επαναχυτευμένα κράματα Co-Cr έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση.¹⁸⁶ Παράλληλα η μεταβολή στη χημική σύνθεση είναι και ένας από τους παράγοντες που επηρεάζει για την ευαισθησία των κραμάτων σε διάφορους τύπους διάβρωσης μετά την επαναχύτευση. Η απελευθέρωση ιόντων Ni, Cr, Co και Fe αυξάνεται με την προσθήκη του πλεονάσματος κράματος. Επιπλέον, η ποσότητα Ni που απελευθερώνεται τόσο σε όξινα όσο και σε αλκαλικά μέσα αυξάνεται όταν η ποσότητα του Cr σε κράμα πέφτει κάτω από 14 % κ.β. με 20 % κ.β. Ο Zn δρα ως δεσμευτής οξυγόνου κατά την τήξη για να ελαχιστοποιήσει την οξείδωση άλλων στοιχείων στο κράμα. Επιπλέον και όπως έχει δείχθει και μεταξύ άλλων και σε κράματα Co-Cr, οι αυξημένες διαστάσεις κόκκων, οι ακαθαρσίες και μικροπορώδες μετά την επαναχύτευση οδηγούν σε μικροδομικές αλλαγές που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων, και επιπλέον έχει δείχθει ότι εάν το κράμα βυθιστεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, η απελευθέρωση ιόντων όπως τα Cu, Fe και Ni αυξάνεται με τη διάρκεια της περιόδου εμβάπτισης.¹⁸⁶ Άλλοι ερευνητές, απέδειξαν ότι η προσθήκη επαναχρησιμοποιούμενου κράματος Co-Cr σε νέο, μεταβάλλει την αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων Co-Cr. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό από την παρατήρηση κραμάτων Co-Cr με 100 % επαναχυτευμένο κράμα, στα οποία διακρίνεται η ύπαρξη κοιλοτήτων διάβρωσης (μικροδιαβρώσεις-διάτρηση του παθητικού στρώματος) και βλάβης στην επιφάνεια με τη μορφή ενδοκοκκικής διάβρωσης (οι πιο σκοτεινές περιοχές στην Εικόνα 6-6 α, β). Αυτές οι κοιλότητες, εμφανίζονται στα όρια των ιζημάτων τύπου μπλοκ, σε αυτά τα ιζήματα και στις διαδενδρικές περιοχές κατά μήκος των συνεχών ιζημάτων. Αυτό πιθανότατα σχετίζεται με το διαφορισμό της ζώνης χρωμίου στα δείγματα. Το Cr ως γνωστό είναι στοιχείο υπεύθυνο για την αντοχή στη διάβρωση στα κράματα Co-Cr, και σύμφωνα με τα αποτελέσματα κυριαρχεί στα ιζήματα του μπλοκ ενώ τα όρια μεταξύ ιζημάτων και της μήτρας είναι εξαντλημένα σε αυτό το στοιχείο. Ωστόσο, ο προσδιορισμός της εξάρτησης της αντίστασης της διάβρωσης του κράματος από την αναλογία παλιού/καινούργιου κράματος δεν είναι δυνατός και ξεκάθαρος χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλοι παράγοντες (αλλαγές χημικής σύνθεσης,



μικροδομή, μακροδομή). Για αυτό αποτελεί ένα περίπλοκο ζήτημα το οποίο απαιτεί περαιτέρω έρευνα προκειμένου να ληφθούν πειστικές αποδείξεις εάν η εφαρμογή επαναχύτευσης έχει στην πραγματικότητα σημαντική επίδραση στην αντοχή στη διάβρωση ή μάλλον οριακή.¹⁴¹ Ορισμένοι ερευνητές το 2016 διερεύνησαν την επίδραση της πολλαπλής επαναχύτευσης (1, 4, 8 φορές) ενός κράματος στα δομικά χαρακτηριστικά του και στους ρυθμούς απελευθέρωσης ιόντων στο τεχνητό σάλιο όπου παρακολούθηθηκαν *in vitro* για περίοδο 22 εβδομάδων σε θερμοκρασία 37 °C και pH 2,3. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι το κράμα Co-Cr μιας φοράς επαναχύτευσης έδειξε ανθεκτικότητα όσον αφορά τη δομή του υλικού και τη χημική αντοχή του στο τεχνητό σάλιο και τις δεδομένες συνθήκες. Πιο αναλυτικά δείχθηκαν τα εξής. Όλα τα δείγματα επαναχύτευσης (Εικόνα 6-6) στην άνω μελέτη παρουσίασαν μια μήτρα στερεού διαλύματος με μια τυπική δενδριτική διάταξη. Υπήρξαν αισθητές αλλαγές στη μικροδομή με τον αριθμό επαναχυτεύσεων. Το δείγμα μιας φοράς επαναχύτευσης είχε μια μικροδομή δενδριτικής στερεοποίησης, η οποία άλλαξε με επαναλαμβανόμενη επαναχύτευση και συγκεκριμένα η μικρο-δομή πλέον αποτελούταν από μια δενδριτική μήτρα με ιζήματα που υπάρχουν στα όρια των κόκκων και στις διαδενδριτικές περιοχές (Εικόνα 6-6 δ). Με την αύξηση του αριθμού της επαναχύτευσης, η σαφής διάκριση μεταξύ της μήτρας και των δενδριτών εξαφανίστηκε και η μικροδομή έγινε πιο ομοιογενής (Εικόνα 6-6 ε, ζ), και κατά συνέπεια παρατηρήθηκαν μειώσεις στη μακρο- και μικροσκληρότητα, καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Γενικώς, η επαναχύτευση περιλαμβάνει επανάτηξη και επαναστερεοποίηση και το νέο μέγεθος κόκκων μπορεί να διαφέρει από το αρχικό. Όταν η θερμοκρασία τήξης και οι συνθήκες χύτευσης είναι οι ίδιες (όπως στην περίπτωση αυτή), το νέο μέγεθος κόκκων εξαρτάται από τη συγκέντρωση των πυρήνων για το σχηματισμό κόκκων. Γενικά, με κάθε επαναχύτευση, οι ακαθαρσίες μπορεί να διευκολύνουν την πυρήνωση των κόκκων και να μειώσουν το μέγεθος των κόκκων που προκαλεί αύξηση της μακροσκληρότητας. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη, η μακρο- και μικρο-σκληρότητα μειώθηκε ελαφρώς με τον αυξανόμενο αριθμό επαναχυτεύσεων και επομένως Θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι αυτή η ιδιότητα εξαρτάται πολύ περισσότερο από τον τύπο δομής των φάσεων παρά από τη διαφορά στη χημική τους σύνθεση και το μέγεθος των κόκκων.¹⁹⁵ Ακόμη η κατανομή των βασικών στοιχείων στις δενδριτικές και διαδενδριτικές περιοχές ήταν διαφορετική ανάλογα με τον αριθμό των επαναχυτευτεύσεων. Δηλαδή, στο δείγμα επαναχύτευσης η ποσότητα του Co στις διαδενδριτικές περιοχές ήταν περίπου 20 % μικρότερη σε σύγκριση με τις δενδριτικές, αντίθετα η ποσότητα του Mo ήταν πολύ υψηλότερη (περίπου 2,5 φορές) στις διαδενδριτικές περιοχές, ενώ η ποσότητα Cr κατανεμόταν πάντα ομοιογενώς και στις δύο περιοχές και ήταν ανεξάρτητη από τον αριθμό της επαναχύτευσης.



Το περιεχόμενο των στοιχείων βάσης κράματος Co και Cr τείνει να εξισώνεται στις δενδριτικές και διαδενδριτικές περιοχές.¹⁹⁵ Μόνο τα στοιχεία Co και Fe ανιχνεύθηκαν στο τεχνητό σάλιο και εκτιμήθηκαν οι ρυθμοί απελευθέρωσής τους. Ο ρυθμός απελευθέρωσης αυξανόταν πάντοτε με τον χρόνο, ανεξάρτητα από τον αριθμό των επαναχυτεύσεων. Οι πολλαπλές επαναχυτεύσεις επιταχύνουν την απελευθέρωση ιόντων, ωστόσο, η επιτάχυνση μειώνεται σταδιακά με τον αυξανόμενο αριθμό επαναχυτεύσεων. Μετά από έναν άπειρο αριθμό επαναχύτευσης, ο ρυθμός απελευθέρωσης φτάνει τη μέγιστη οριακή τιμή. Ο ρυθμός απελευθέρωσης του Fe ήταν πάντοτε υψηλότερος από αυτόν της Co. Ωστόσο, οι τρέχουσες συγκεντρώσεις Fe και Co υπό τις δεδομένες συνθήκες πιθανότατα δεν θα θεωρούνται τοξικές για τον άνθρωπο, επειδή δεν υπάρχουν αποτελέσματα συσσώρευσης.¹⁹⁵ Το 2017, οι Loch και συν⁸⁹ διερευνώντας επαναχυτευμένα κράματα Co-Cr ανέφεραν ότι και τα κράματα επαναχύτευσης χαρακτηρίζονται από καλή αντοχή στη διάβρωση σε διάλυμα τεχνητού σάλιου pH 7,4. Τα κράματα παρουσίασαν μια μη ομοιόμορφα κατανομημένη γενική διάβρωση (Εικόνα 6-6 γ). Η μικροδομή των εξεταζόμενων κραμάτων ήταν τυπική δενδριτική.⁸⁹ Το 2017, ο Abduljabbar¹⁹⁶ στη μελέτη του επαναχύτευσε το κράμα 4 φορές, ενώ μόνο στην 4^η επαναχύτευση πρόσθεσε 50 % νέο κράμα. Τα αποτελέσματα της αντίστασης πόλωσης (Rp) λαμβάνουν την ακόλουθη σειρά Rp ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$) 2^η επαναχύτευση > 4^η επαναχύτευση + προσθήκη νέου κράματος > 1^η επαναχύτευση > 3^η επαναχύτευση κράματος Co-Cr. Αυτό σημαίνει ότι η 2^η επαναχύτευση και η προσθήκη νέου μετάλλου με την 4^η επαναχύτευση αυξάνουν την αντίσταση του κράματος στη διάβρωση μέσω της νέας φάσης που παράγεται στην επιφάνεια του κράματος. Συνεπώς, η προσθήκη νέου κράματος μετάλλου κατά 50 % στο παλιό βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση. Από πρακτική άποψη, αυτό υποδηλώνει ότι οι παλιοί σκελετοί μπορούν να επαναχυτευθούν με την προσθήκη νέων μεταλλικών κραμάτων κατά 50 % χωρίς κίνδυνο για διάβρωση.¹⁹⁶



Εικόνα 6-6 SEM εικόνες μικροδομών κραμάτων Co-Cr με αναλογία επαναχυτευμένου υλικού 100% πριν (α) και μετά (β) τη δοκιμή διάβρωσης.¹⁴¹ Μικροδομή κράματος μετά από χρονοαμπερομετρία στα + 0,8V (γ).⁸⁹ Μικροδομές από το κέντρο του κράματος Co-Cr, μετά από: (δ) επαναχύτευση μία φορά, (ε) τέσσερις φορές και (ζ) οκτώ φορές.¹⁹⁵

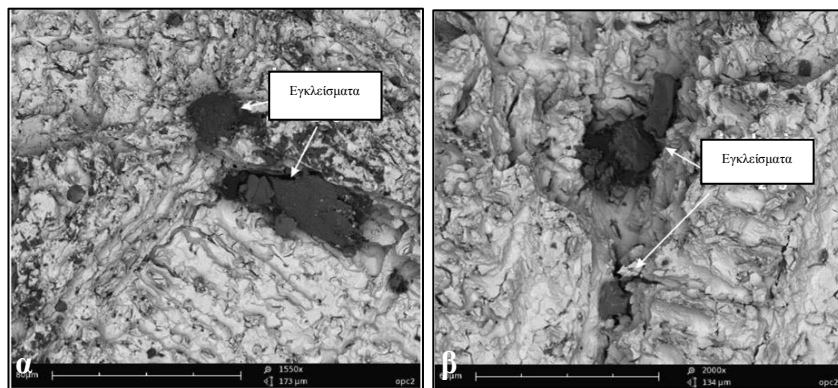


Μια σημαντική συνέπεια της απελευθέρωσης στοιχείων είναι η κυτταροτοξικότητα των παρακείμενων ιστών σε κυτταρικές καλλιέργειες. Η κυτταροτοξικότητα των χυτών κραμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση και την απελευθέρωση στοιχείων, η οποία μπορεί να επηρεαστεί από την επαναχύτευση. Τα κράματα Co-Cr επηρεάζονται περισσότερο αρνητικά με την επαναχύτευση από τα κράματα Ni-Cr. Η περιεκτικότητα σε Cu ενός κράματος αυξάνει σημαντικά την κυτταροτοξικότητα του. Στο κλινικό περιβάλλον, η επαναχύτευση κραμάτων βασικών μετάλλων μπορεί να αυξήσει τις πιθανές κυτταροτοξικές επιδράσεις τους. Επομένως, η χρήση αυτής της διαδικασίας μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς τους μαλακούς ιστούς που γειτνιάζουν με την αποκατάσταση. Για αυτούς τους λόγους, μια μελέτη έχει δείξει ότι τα κράματα βασικών μετάλλων δεν πρέπει να επαναχυτεύονται.⁶ Σε άλλη αναφέρθηκε ότι, η προσθήκη επαναχυτευμένου κράματος πράγματι αυξάνει τις κυτταροτοξικές επιδράσεις των κραμάτων Co-Cr και αν και η προσθήκη 50 % πλεονάσματος κράματος φαίνεται να είναι αποδεκτή, σύμφωνα με τον συγγραφέα, οι οδοντίατροι θα πρέπει να παραμείνουν προσεκτικοί, ιδιαίτερα κατά τη θεραπεία ασθενών με γνωστή ευαισθησία σε Ni και Pt.¹⁸⁶ Το 2017, οι Lin και συν¹⁹⁷ αξιολόγησαν την κυτταροσυμβατότητα των κραμάτων Co-Cr μετά την επαναχύτευση για 1-3 φορές, και δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης ιόντων των κραμάτων Co-Cr εκτός του Ga. Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στον κύκλο κυττάρων L-929 στα κράματα Co-Cr μεταξύ των δειγμάτων που επαναχυτεύθηκαν για 1 φορά και για 2-3 φορές. Δεν βρέθηκε σημαντική διαφορά στα ποσοστά απόπτωσης και νέκρωσης. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι η βιοσυμβατότητα των κραμάτων Co-Cr που έχουν χυτευθεί 1-3 φορές δεν αλλάζει.¹⁹⁷

Μετά τη χύτευση, η επιφάνεια των κραμάτων μολύνεται κανονικά με πυρόχρωμα, μεταλλικά οξείδια (όπως το Al) και στρώματα αντίδρασης στη διεπαφή, γεγονός το οποίο απαιτεί κάποια επεξεργασία της επιφάνειας πριν την επαναχύτευση. Για τα κράματα βασικών μετάλλων, η αμμοβολή με Al_2O_3 από απόσταση 250 μm με πίεση 600 kPa, η στίλβωση με λειαντικούς ελαστικούς τροχούς και η ψύξη με απεσταγμένο νερό παρέχει ισχυρή λάμψη και καλή κλινική ποιότητα.¹⁸⁶ Το 2012, οι Walczak και συν⁸¹ πρότειναν ότι αγωγοί και κώνος υπόκεινται σε αμμοβολή με σωματίδια Al_2O_3 , στη συνέχεια αποκόπτονται οι αγωγοί, τοποθετούνται σε λουτρό υπερήχων για καθαρισμό, και αναμειγνύονται με νέο κράμα. Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση που δεν τοποθετηθούν σε συσκευή υπερήχων τότε είναι δυνατόν να ενσωματωθούν εγκλείσματα Al_2O_3 (Εικόνα 6-7) στη μήτρα Co και να προκαλέσουν δομικές ασυνέχειες, οι οποίες θα μπορούσαν να αυξήσουν τη σκληρότητα του νεοσχηματισμένου κράματος και να μειώσουν την αντοχή σε εφελκυσμό. Επιπλέον, οι τοποθεσίες εμφάνισης εγκλεισμάτων είναι οι περιοχές στις οποίες διαδίδονται μικρορωγμές που



προκύπτουν ως αποτέλεσμα της συσσώρευσης τάσεων. Όσο περισσότερο το περιεχόμενο του υλικού από την επαναχύτευση, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των εγκλεισμάτων Al_2O_3 στη μικροδομή.⁸¹ Σε νεότερη μελέτη προτάθηκαν οι ακόλουθες διαδικασίες επιφανειακής επεξεργασίας πριν από την επαναχύτευση: αμμοβολή με σωματίδια Al_2O_3 και εμβάπτιση σε βασιλικόν ύδωρ (aqua regia) για 15 λεπτά για κράματα Co-Cr μεταλλοκεραμικής.¹⁸⁶



Εικόνα 6-7 SEM μικροδομή – παρουσία εγκλεισμάτων του Al_2O_3 σε κράμα Co-Cr με προσθήκη (α) 0% νέου υλικού (β) 25% νέου υλικού.⁸¹

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή έχουν δειχθεί τα εξής. Μελέτη που διεξήχθη το 1986 σχετικά με τη σκληρότητα του επαναχυτευμένου κράματος από την πρώτη έως την τέταρτη γενιά έδειξε ότι οι τιμές των κραμάτων δεν ήταν σε συμφωνία μεταξύ των τεσσάρων γενεών. Όμως, τα αποτελέσματα της δοκιμής σκληρότητας υπερέβησαν τις υπολογισμένες ελάχιστες προδιαγραφές για το κράμα (335-390 VH).¹⁸⁷ Ορισμένοι ερευνητές το 2004 επισημαίνουν ότι η σκληρότητα παραμένει αμετάβλητη μετά από επαναλαμβανόμενες χυτεύσεις και η σκληρότητα μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη Ti στα κράματα Co-Cr.⁴¹ Σε μελέτη του 2007, οι ερευνητές συγκρίνοντας το κράμα Co-Cr δύο διαφορετικών κατασκευαστών, ανέφεραν σημαντική αύξηση της σκληρότητας με 100 % και 50 % επαναχυτευμένο κράμα. Ισχυρίστηκαν, ότι η αυξημένη σκληρότητα οφείλεται στην αύξηση της περιεκτικότητας του κράματος σε άνθρακα λόγω της συμβατικής διαδικασίας της χύτευσης.¹⁸⁷ Το 2008, οι Khalaf και συν¹⁹⁸ εξετάζοντας την προσθήκη 50 % και 75 % επαναχυτευμένου κράματος σε νέο (wironit extra-hard), ανέφεραν ότι η επαναχύτευση με την προσθήκη 75 % νέου κράματος δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή στην κόπωση των κραμάτων Co-Cr, ενώ η επαναχύτευση με την προσθήκη 50 % νέου κράματος μειώνει σημαντικά την αντοχή στην κόπωση. Η μείωση της αντοχής στη κόπωση με την αύξηση της ποσότητας του επαναχυτευμένου κράματος μπορεί να οφείλεται σε ποικίλους λόγους μεταξύ των οποίων είναι: Η αύξηση της ποσότητας του επαναχυτευμένου κράματος μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή και κατά συνέπεια αύξηση του πορώδους χύτευσης και του αριθμού των εγκλεισμάτων στα χυτά, και αυτές οι μικροπορώσεις και οι ακαθαρσίες μειώνουν



την περιοχή διατομής του δείγματος και προκαλούν μια περιοχή συγκέντρωσης τάσεων που προκαλούν διάδοση ρωγμών και κάταγμα από κόπωση.¹⁹⁸ Η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την επαναλαμβανόμενη διαδικασία τήξης και σχεδόν όλα τα στοιχεία στα κράματα Co-Cr αντιδρούν με τον άνθρακα για να σχηματίσουν καρβίδια. Όμως οποιαδήποτε διαδικασία που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας σε καρβίδια του κράματος θα μειώσει την αντίσταση στην κόπωση.¹⁹⁸ Η ολκιμότητα είναι μία από τις μηχανικές ιδιότητες που επηρεάζουν την αντίσταση στην κόπωση. Ένας υψηλός βαθμός επιμήκυνσης δείχνει καλή ολκιμότητα. Η αυξημένη ολκιμότητα θα βελτιώσει την αντίσταση στην κόπωση. Μικρή ποσότητα μικροπορώδους στο δοκίμιο μπορεί να μειώσει σημαντικά την επιμήκυνση. Τα καρβίδια μπορεί επίσης να αυξηθούν και το μαγγάνιο μπορεί να μειωθεί κατά την επανάτηξη με αποτέλεσμα την μειωμένη ολκιμότητα.¹⁹⁸ Η διαδικασία επαναχύτευσης προκαλεί αύξηση στο μέγεθος των κόκκων. Η χονδροειδής δομή του αγκίστρου υποδηλώνει χαμηλή αντοχή στην κόπωση.¹⁹⁸ Το 2011, Ramamoorthi¹⁹¹ μελέτησε την συμπεριφορά κόπωσης μέχρι και 3 γενιές σε διαφορετικές αναλογίες (100 %, 50 %, 75 % αναλογία νέου κράματος) επαναχυτευμένων κραμάτων αγκίστρων M.O. και συγκεκριμένα Co-Cr-W-Si και 3 IV ευγενή κράματα [Au-Ag-Pd-Cu (κράμα μεσαίας περιεκτικότητας σε χρυσό), Au-Ag-Pt-Cu (κράμα υψηλής περιεκτικότητας σε χρυσό), Pd-Ag-In-Sn-Ga-Zn (κράμα παλλαδίου)]. Οι ομάδες κράματος παρουσίασαν μειωμένη αντίσταση στην κόπωση στην δεύτερη γενιά συγκριτικά με τη πρώτη, ενώ η τρίτη γενιά εμφάνισε την μικρότερη αντίσταση κόπωσης συγκριτικά με τις άλλες 2. Όταν χρησιμοποιείται για τη χύτευση αναλογία 100 % νέου κράματος, εμφανίζεται η μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση, από ότι αν χρησιμοποιηθεί 50 % ή 75 % νέο κράμα, ενώ δεν υπήρχε στατιστική διαφορά μεταξύ των ομάδων σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %. Δηλαδή, η αντίσταση κόπωσης μειώνεται εάν το ποσοστό νέου κράματος είναι μικρότερο από 100 %. Τα ευγενή κράματα αποκάλυψαν καλύτερη αντίσταση στη κόπωση συγκριτικά με τα Co-Cr. Συνεπώς, στην επαναχύτευση εκτός από τον κίνδυνο της βιοσυμβατότητας, διακυβεύεται επίσης η αντίσταση στην κόπωση.¹⁹¹

Ορισμένοι ερευνητές το 2012 ανέφεραν ότι η επαναλαμβανόμενη επαναχύτευση των κραμάτων Co-Cr χωρίς προσθήκη νέου κράματος επιδεινώνει τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής, εκατοστιαία επιμήκυνση, και σκληρότητα), ενώ η προσθήκη 25 % και 50 % κ.β. νέου κράματος σε αυτό μπορεί να επιφέρει βελτίωση τόσο στις μηχανικές ιδιότητες όσο και στη μικροδομή. Παρά το γεγονός ότι υποστήριζαν την προσθήκη 50 % κ.β. νέου κράματος στο παλαιό κράμα κατά την τέταρτη επαναχύτευση, παρατήρησαν επίσης μια συνολική μείωση της τιμής μικρο σκληρότητας του κράματος και ανέφεραν στατιστικά σημαντικές αλλαγές στις τιμές σκληρότητας μεταξύ ενός κράματος Co-Cr που



τήκεται μία φορά (373 HV) με το κράμα επαναχύτευσης τριών και τεσσάρων φορών (346 HV). Αυτή η σταδιακή μείωση σημειώθηκε σε όλες τις ομάδες επαναχύτευσης.¹⁸⁶⁻¹⁸⁸ Το 2012, οι Walczak και συν⁸¹ απέδειξαν ότι η επανάτηξη των κραμάτων Co-Cr χωρίς προσθήκη νέου μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες τους και για αυτό απαιτείται η προσθήκη νέου κράματος σε ποσότητες τουλάχιστον 50 % καθώς έτσι δεν προκαλείται σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας των χυτών και για οικονομικούς λόγους αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των οδοντικών προσθέσεων.^{81,186} Πιο αναλυτικά, σε ότι αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, η μηχανική αντοχή όλων των επαναχυτευμένων κραμάτων δείχθηκε ότι ήταν μικρότερη από αυτήν των νέων κραμάτων. Συγκεκριμένα, η αναλογία Poisson ήταν ίση με 0,25 για χύτευση από 100 % νέο υλικό και έως 0,31 για χύτευση με 75 % επαναχυτευμένο υλικό, το όριο διαρροής και η αντοχή εφελκυσμού ήταν μικρότερες στις χυτεύσεις με χρήση επαναχυτέυσιμου υλικού. Ο συντελεστής Young ήταν κατά μέσο όρο 196 GPa.⁸¹ Σε ότι αφορά τη μικροδομή, παρατηρήθηκε αύξηση της ετερογένειας της δομής των κραμάτων με την αύξηση της ποσότητας του επαναχυτευμένου υλικού, ενώ παράλληλα αυτά έγιναν πιο σκληρά και συνεπώς πιο επιρρεπή σε ψαθυρή θραύση (η αύξηση της σκληρότητας μπορεί να προκύψει από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της επανατήξεως των διαφόρων τύπων καρβιδίων σχηματίστηκαν ιζήματα ή π.χ. σε ελλειπής απομάκρυνση των σωματιδίων Al_2O_3 που χρησιμοποιούνται κατά την προετοιμασία των κραμάτων πριν την επαναχύτευση με αποτέλεσμα την παρουσία εγκλεισμάτων στη δομή). Επιπλέον, τα ιζήματα διαφόρων τύπων καρβιδίων και η παρουσία διαμεταλλικών φάσεων διαπιστώθηκε ότι έχουν καθοριστική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες (ιδίως τη σκληρότητα) των λαμβανόμενων χυτών. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν ιζήματα Cr και Mo από τη διασπορά των καρβιδίων $M_{23}C_6$ (η μορφολογία των καρβιδίων είναι εξαρτώμενη από τη χημική σύνθεση) στη μικροδομή κράματος. Μετά τη χύτευση, τα καρβίδια $M_{23}C_6$ είναι παρόντα στα όρια των κόκκων και στις ενδοδενδριτικές περιοχές. Τα πρωτογενή (μεγάλα) κατακρημνισμένα καρβίδια έχουν μεγαλύτερο μέγεθος και ακανόνιστο σχήμα. Τα μικρά ιζήματα καρβιδίων $M_{23}C_6$, τα οποία συνήθως έχουν ευτηκτική μορφή, έχουν σχήμα ελασμάτων (lamellar). Αναλυτικότερα σε ότι αφορά τη μορφολογία, η ανάλυση SEM έδειξε ότι στη μικροδομή υπάρχουν «αστεροειδείς τύποι καρβιδίων» (“starlike types of carbides”) (Εικόνα 6-8 α). Σύμφωνα μια μελέτη, ο διαχωρισμός αυτού του τύπου καρβιδίων σχηματίζεται σε υψηλή θερμοκρασία της τάξης των 1275 °C. Βρέθηκαν επίσης ιχνοποσότητες «περλίτη τύπου καρβιδίων» (“pearlitic type of carbides”) (Εικόνα 6-8 β), που εμφανίζονται κυρίως σε κράματα με 25 % και 0 % νέο υλικό. Η ελασματοειδή (lamellar) μορφολογία των καρβιδίων μπορεί να σχηματιστεί ως αποτέλεσμα μετασχηματισμού ευτηκτοειδών.



Σύμφωνα με μελέτες ορισμένων συγγραφέων, η ελασματοειδής δομή του καρβιδίου μπορεί να είναι συνέπεια αλλαγών του ρυθμού ψύξης από 8 σε 16 °C/min και ο μέγιστος ρυθμός ψύξης για το σχηματισμό της ευτηκτοειδούς φάσης είναι 35 °C/min. Επιπρόσθετα, σε περιοχές «αποικιών τύπου καρβιδίων περλίτη» παρατηρήθηκαν ιζήματα διαμεταλλικών φάσεων, όπου τέτοια ιζήματα των φάσεων μπορούν να επηρεάσουν τη μείωση της πλαστικότητας του κράματος Co-Cr-Mo.⁸¹ Οι δοκιμές εφελκυσμού έδειξαν ότι η μικροδομή των χυτών κραμάτων χαρακτηρίζεται από μια τυπική χονδρόκοκκη δενδριτική δομή (Εικόνα 6-9). Μέσα στους κρυσταλλίτες είναι δενδριτικοί μικροδιαφορισμοί, στις διαδενδριτικές περιοχές κατά μήκος των ορίων των κρυσταλλιτών είναι διευθετημένες πρωτογενείς συνεχείς καθιζήσεις. Τα χυτά νέου-επαναχυτευμένου κράματος δείχνουν παρόμοια δομή με μια μικρή ποσότητα μικροπόρων, ενώ στην συγκεκριμένη έρευνα δεν παρατηρήθηκαν εγκλείσματα, τα οποία θα μπορούσαν να προέλθουν από μόλυνση του υλικού με σωματίδια του πυροχώματος. Στις εικόνες της μικροδομής που λήφθηκαν μέσω SEM είναι ορατή η αύξηση των αστοχιών του υλικού με τη μορφή αύξησης δομικών ασυνεχειών όπως μικροπόρων και μικροσυστολών, μικρορωγμών (σύμφωνα με τον προσανατολισμό των δενδριτών με την πυκνότητα να αυξάνεται με την αύξηση επαναχυτεύσιμου υλικού) καθώς και των υπολειμμάτων του Al₂O₃ μετά τη διαδικασία αμμοβολής αγωγών χύτευσης. Τα ελαττώματα χύτευσης με τη μορφή ασυνέχειας στα υλικά μπορούν να συμπεριφερθούν ως μικροεσοχές προκαλώντας συσσώρευση τάσεων συμβάλλοντας στη μείωση της αντοχής.⁸¹ Στο στάδιο παραγωγής των κραμάτων Co-Cr-Mo με ανακυκλωμένο υλικό πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαδικασία καθαρισμού σε συσκευή υπερήχων για την εξάλειψη των σωματιδίων Al₂O₃. Επίσης, είναι απαραίτητο να διεξαχθεί μια λεπτομερής ανάλυση φάσεων των χυτών υλικών και να ελεγχθεί η πιθανότητα να γίνει μια ομοιογενής δομή μέσω εφαρμογής κατάλληλης θερμικής επεξεργασίας προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες αντοχής των χυτών.⁸¹ Άλλοι ερευνητές, μελετώντας κράμα Co-Cr τα οποία επαναχυτεύθηκαν έως 4 φορές, έδειξαν ότι η μικροδομή των κραμάτων που μελετήθηκαν δε διέφερε σημαντικά μετά την επαναχύτευση. Ο όγκος, το μέγεθος και η κατανομή των φάσεων παραμένουν παρόμοια. Η ανάλυση της χημικής σύνθεσης έδειξε ότι όλα τα δείγματα εμπίπτουν στις συνθέσεις που παρέχονται για το κράμα δοκιμής. Εκτός από αυτό, η σκληρότητα των δειγμάτων, ανεξάρτητα από τον αριθμό των επανατήξεων δεν έδειξε σημαντικές διακυμάνσεις και παρέμεινε εντός του ορίου σφάλματος. Μετά την ανάλυση όλων των αποτελεσμάτων, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι επαχυτεύσεις των κραμάτων δεν έχουν σημαντική επίδραση στις ιδιότητές τους και τα επανατηγμένα κράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για προσθετικές εργασίες.¹⁰¹ Η μικροδομή του κράματος Co-Cr μέχρι 4 επανατήξεις είναι παρόμοια και



αποτελείται από τα ίδια δομικά συστατικά με τις ποσότητες και τα μεγέθη να είναι αναλογικά. Συγκεκριμένα αποτελείται από δενδρίτες (φάση α στερεού διαλύματος), και 2 διαδενδριτικές φάσεις που κρυσταλλώνονται μεταξύ των δενδριτών (φάση δ, ευτηκτικό διάλυμα αποτελούμενο από φάση-α και καρβίδια). Πιο αναλυτικά σχετικά με τις μεταβολές που συμβαίνουν κατά την κρυστάλλωση του κράματος, η μελέτη έδειξε ότι μετά την πρώτη επανάληψη τρεις θερμικές επιδράσεις μπορούν να παρατηρηθούν οι οποίες αντιστοιχούν στην κρυστάλλωση διαφόρων φάσεων στο δοκιμασμένο κράμα. Το πρώτο θερμικό αποτέλεσμα που εμφανίζεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες αντιστοιχεί στην κρυστάλλωση α φάσης η οποία είναι κυρίως ένα στερεό διάλυμα βασισμένο στο κοβάλτιο (στερεό διάλυμα Cr και Mo σε Co). Σύμφωνα με μελέτες της χημικής σύνθεσης περιέχει: 70,24 % Co, 24,97 % Cr, 3,58 % Mo, 0,83 % Mn και 0,40 % Si. Στη θερμοκρασία 1391°C αρχίζει η κρυστάλλωση της α-φάσης και αποτελεί τη στιγμή που δημιουργήθηκε η περισσότερη θερμότητα, ενώ η θερμοκρασία 1378 °C αποτελεί το τέλος της κρυστάλλωσης. Στη συνέχεια, κρυσταλλώνεται ως επόμενη φάση η φάση-δ η οποία αποτελείται κυρίως από Cr, Co και Mo και σε σύγκριση με ένα στερεό διάλυμα έχει αυξημένη συγκέντρωση Cr (49,57 %) και Mo (21,65 %) και μειωμένη Co (27,81 %). Αυτό αποδεικνύει ότι η ώθηση των ατόμων Cr και Mo με κρυστάλλωση ενός στερεού διαλύματος σε ένα υγρό σχηματίζοντας έτσι κατάλληλες συνθήκες για κρυστάλλωση αυτής της φάσης. Το τέλος της κρυστάλλωσης αυτής της φάσης λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασία 1279 °C. Ξεκινώντας από αυτήν τη θερμοκρασία το θερμικό αποτέλεσμα αντιστοιχεί στην ευτηκτική κρυστάλλωση, η οποία αποτελείται από α φάση και λεπτά καρβίδια. Με βάση τις βιβλιογραφικές αναφορές μπορεί να υποθεθεί ότι σε αυτό το ευτηκτικό υπάρχουν: $(Cr_{0,77}Co_{0,15}Mo_{0,08})_{23}C_6$ και CrC. Η ευτηκτική κρυστάλλωση τελειώνει στους 1192 °C. Σε αυτό το χρονικό διάστημα που διερευνήθηκε το κράμα Co-Cr-Mo ολοκληρώνει την κρυστάλλωσή του.¹⁰¹ Ο Prabhu¹⁹⁰ (2014) μελέτησε τις μηχανικές ιδιότητες δύο επαναχυτευμένων κραμάτων Co-Cr (Wirobond-C, Wironit αντίστοιχα), όπου χυτεύθηκαν ανά κράμα έξι ομάδες δείγματος (τήξη 1, 2, 5, 10, 15 και 20 φορές). Όσον αφορά την αντοχή εφελκυσμού, για τα δείγματα Wironit μειώθηκε από 850 MPa σε 777 MPa μετά την 5η επαναχύτευση και σε 674 MPa στο τέλος της 20ης επαναχύτευσης, ενώ για δείγματα Wirobond-C μειώθηκε από 720 MPa σε 678 MPa μετά την 5η επαναχύτευση και περαιτέρω μειώθηκε σε 534 MPa στο τέλος της 20ης επαναχύτευσης. Μέχρι την 5η επαναχύτευση υπήρξε πολύ μικρή αλλαγή στην αντοχή εφελκυσμού και στη συνέχεια σημειώθηκε ελαφρά μείωση της αντοχής εφελκυσμού, η οποία είναι αμελητέα όσον αφορά τις οδοντιατρικές εφαρμογές, καθώς η αντοχή εφελκυσμού είναι πολύ μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για οδοντιατρικές κατασκευές. Όσον αφορά τη σκληρότητα, για τα δείγματα Wironit μειώθηκε από 380VHN



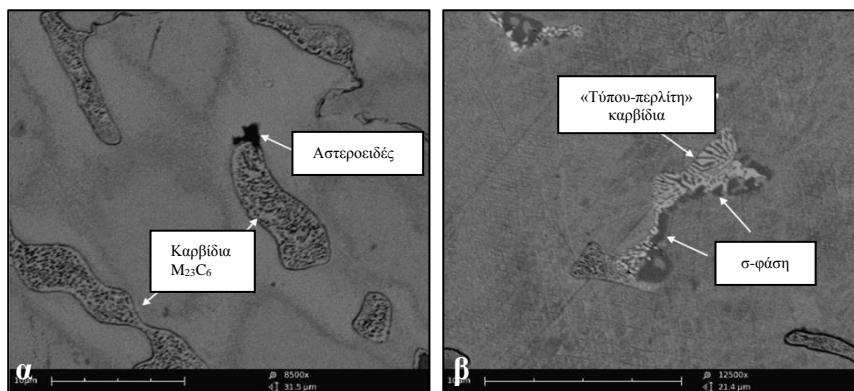
σε 335VHN στο τέλος της 20ης επαναχύτευσης, και για δείγματα Wirobond-C μειώθηκε από 328VHN σε 247VHN μετά την 20η διαδικασία επαναχύτευση. Η σκληρότητα αυξήθηκε μετά την πρώτη επαναχύτευση (μικροδομικές μελέτες μπορεί να αποκαλύψουν τον λόγο για την αρχική της αύξηση) και στην επόμενη επαναχύτευση μειώθηκε. Ο ερευνητής επισήμανε ότι, παρά το γεγονός ότι τα κράματα Co-Cr που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη έδειξαν ότι υπάρχει μια ελαφρά μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και της σκληρότητας τους μετά από διαδοχικές επαναχυτεύσεις (1η-20η επαναχύτευση), ωστόσο η ελαφριά μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους δεν θα έχει καμία επίδραση και δεν θα επηρεάσει την κλινική τους απόδοση τις οδοντιατρικές κατασκευές. Δηλαδή, η επαναχύτευση των κραμάτων Co-Cr περίπου κατά είκοσι φορές, χωρίς την προσθήκη νέου κράματος, δεν έχει αποκαλύψει καμία σημαντική αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες. Το συμπέρασμα ήταν ότι δεν υπάρχει σημαντική υποβάθμιση στις μηχανικές ιδιότητες (καθώς η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους είναι αμελητέα) μετά την επαναχύτευση, και ως εκ τούτου, τα εναπομείναντα κράματα μετά από διαδικασίες χύτευσης μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν (ακόμη έως και 20 φορές) στην οδοντιατρική με την προϋπόθεση της ικανοποίησης δοκιμών κυτταροτοξικότητας. Αυτό διότι, οι μηχανικές ιδιότητες δεν είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την επαναχρησιμοποίηση αυτών των κραμάτων, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η βιοσυμβατότητα. Πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι αυτοί οι τύποι κραμάτων δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν άμεσα στην οδοντιατρική λόγω των αστοχιών βιοσυμβατότητας που προκύπτουν από τη μόλυνση των κραμάτων από ακαθαρσίες και την απώλεια ορισμένων σημαντικών συστατικών χαμηλής θερμοκρασίας τήξης κατά τη διάρκεια επαναλαμβανόμενων διαδικασιών χύτευσης. Ωστόσο, ακόμη κι αν τα κράματα αυτά αποτύχουν στις δοκιμές κυτταροτοξικότητας, αντί να απορρίπτονται από τα εργαστήρια, μπορούν να αποσταλούν πίσω στους κατασκευαστές προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν με ασφάλεια στον τομέα της μηχανικής και της βιομηχανίας για την δημιουργία κατασκευών όπως εργαλεία κοπής κλπ. όπου η βιοσυμβατότητα των κραμάτων δεν αποτελεί την σημαντικότερη ιδιότητα όπως στην οδοντιατρική για την αξιοποίησή τους. Αυτή η διαδικασία ανακύκλωσης θα επιστρέψει το 50 % των εσόδων στον οδοντιατρικό τομέα, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους θεραπείας για τους ασθενείς και την προστασία του περιβάλλοντος δεδομένου ότι περιορίζεται σε κάποιο βαθμό η εξόρυξη (πράσινη οδοντιατρική).^{151,190} Το 2015, οι Vaillant και συν¹⁸⁸, οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση της επαναχύτευσης στη μικροδομή και τις ιδιότητες ενός CST κράματος Co-Cr, χρησιμοποιώντας ως ομάδες σύγκρισης, 1^η με 100 % νέο υλικό, 2^η 25 % νέο υλικό, 3^η 50 % νέο υλικό, 4^η 75 % νέο υλικό και 5^η 100 % επαναχυτευμένο υλικό μιας φοράς. Παρατήρησαν ότι, η μικροδομή



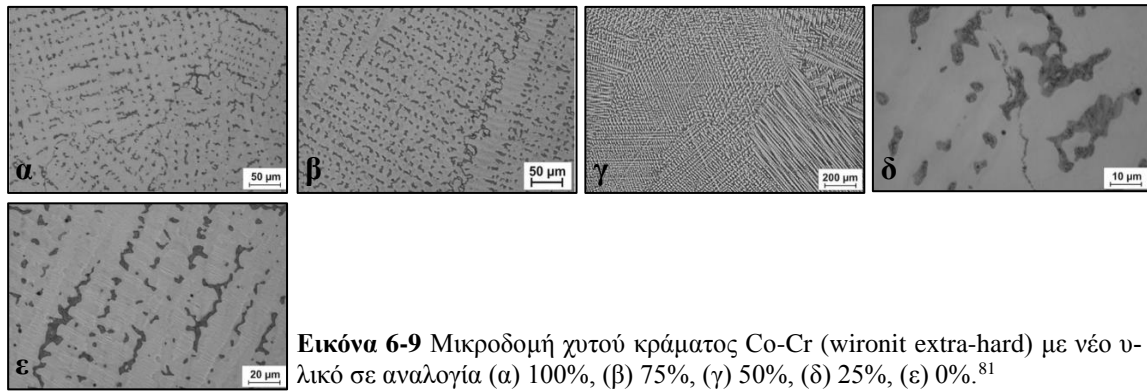
επηρεάστηκε από την επαναχύτευση, και συγκεκριμένα διέκριναν μια αύξηση της ετερογένειας στη δομή των κραμάτων με περισσότερο επαναχυτευμένο υλικό. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η εμφάνιση ιζημάτων διαφόρων τύπων καρβιδίων και η παρουσία διαμεταλλικών φάσεων που έχουν καθοριστική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των λαμβανόμενων χυτών. Δεν βρέθηκαν σημαντικές διαφορές για τις τιμές VHN. Λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή ελαστικότητας, οι διαφορές δεν είναι σημαντικές. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ελαφριές εκφυλιστικές αλλαγές στο κράμα Co-Cr, όταν η χύτευση πραγματοποιήθηκε με περισσότερο από 50 % νέο κράμα. Το μικροπορώδες παραμένει ένα επαναλαμβανόμενο πρόβλημα κατά τη χύτευση κραμάτων. Η ατμοσφαιρική μόλυνση ελαχιστοποιήθηκε καθ' τη διάρκεια αυτής της έρευνας με προσοχή στη λεπτομέρεια σε όλες τις φάσεις της τεχνικής. Πράγματι, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν δραματικά με την μόλυνση από αμμοβόληση. Όμως, καθώς δεν υπάρχει πρωτόκολλο συναίνεσης για την αξιολόγηση της CST, και καθώς αυτή η μελέτη δείχνει ακόμη προκαταρκτικά αποτελέσματα, περαιτέρω μελέτες πρέπει να εργαστούν για την επιβεβαίωση ή την απόρριψη αυτών των αποτελεσμάτων. Παρά την πιθανότητα αυξημένης μόλυνσης όταν το κράμα επαναχυτεύεται, αυτό δεν φαίνεται να προκαλεί σοβαρές επιβλαβείς αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Επομένως, η επαναχύτευση του πλεονάσματος χύτευσης μπορεί να είναι μια καλή εναλλακτική λύση για τη μείωση του σχετικού κόστους, συμβάλλοντας στη μείωση των αποβλήτων και τη διατήρηση των φυσικών πηγών, όταν η προσθήκη νέου κράματος είναι λιγότερο από 50 % κ.β.¹⁸⁸ Το 2018, οι Amitha και συν¹⁹² σύγκριναν τις μηχανικές ιδιότητες (σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό, συντελεστής ελαστικότητας) ενός κράματος χύτευσης (100 % νέο κράμα), ενός επαναχυτευμένου κράματος (100 % επαναχυτευμένο), και ενός κράματος 50 % νέου και 50 % επαναχυτευμένου. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά και στις 3 μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr ($p = 0,0001$), υποδεικνύοντας ότι υπάρχει επιδείνωση των ιδιοτήτων όταν το ποσοστό του επαναχρησιμοποιούμενου κράματος είναι 50 % ή λιγότερο. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες, η προσθήκη λιγότερο από 50 % επαναχρησιμοποιημένου κράματος σε νέο κράμα είναι αποδεκτή κλινικά.¹⁹² Το 2018, οι Wang και συν¹⁹⁹ ανέφεραν ότι με την αύξηση των χρόνων επαναχύτευσης, η μικροδομή του κράματος Co-Cr εμφάνισε ανάπτυξη κόκκων, αύξηση μήτρας κόκκων και αύξηση της διαμεταλλικής ένωσης στο όριο κόκκων. Το συμπέρασμα ήταν ότι η επαναχύτευση αλλάζει τη μικροδομή των κραμάτων Co-Cr.¹⁹⁹ Το 2019, οι Imran και συν¹⁸⁷ αξιολόγησαν τη μικροσκληρότητα ενός κράματος Co-Cr-Mo, χρησιμοποιώντας για την τήξη του οξυακετυλική φλόγα, όταν σε αυτό προστίθεται 50 κ.β. % επαναχυτευμένου κράματος μέχρι έξι φορές, και κατέληξαν στο



συμπέρασμα ότι το κράμα Co-Cr-Mo μπορεί να επαναχυτευθεί έως έξι φορές υπό την προϋπόθεση ότι σε αυτό προστίθεται 50 % νέο κράμα σε κάθε επαναχύτευση, χωρίς αλλαγή στις ιδιότητες (μικροσκληρότητα) του κράματος. Ωστόσο, πριν την κλινική εφαρμογή και χρησιμοποιώντας το παρόν πρωτόκολλο μελέτης, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν περαιτέρω μελέτες όσον αφορά την επίδραση της απελευθέρωσης στοιχείων και της κυτταροτοξικότητας των κραμάτων σε συνδυασμό με ανάλυση με μικροσκόπιο του επαναχρησιμοποιούμενου κράματος, καθώς και μελέτη άλλων σημαντικών μηχανικών ιδιοτήτων για τη χύτευση Μ.Ο. όπως η αντοχή σε κάμψη. Αναλυτικότερα με τα ευρήματα της συγκεκριμένης μελέτης, τα δείγματα χωρίστηκαν σε 4 ομάδες, όπου η ομάδα 1 ήταν η ομάδα ελέγχου με 100 % νέο (μη ξανατακούμενο) κράμα χύτευσης και στην ομάδα 2, 3 και 4, το 50 % κ.β. των προηγούμενων χυτών αναμίχθηκε με νέο κράμα. Η ομάδα 1 είχε τη μέγιστη σκληρότητα που κυμαινόταν 297,82-353,33 HV (μέση σκληρότητα 340+10), ακολουθούμενη από την ομάδα 2 με 309,52-398,26 (μέση σκληρότητα 305+11). Η ομάδα 3 είχε 269,67-328,13 HV (μέση σκληρότητα 334+10) και η ομάδα 4 είχε τη λιγότερη σκληρότητα 271,79-357,06 HV (μέση σκληρότητα 303+15). Η τιμή σκληρότητας της ομάδας 1 Vicker (μέση τιμή 340,8 HV) ήταν πλησιέστερη στην αξίωση του κατασκευαστή (350 HV). Η συνολική μέση τιμή σκληρότητας micro Vickers όλων των ομάδων καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος ήταν 321,21 HV. Δεν υπήρχε στατιστικά σημαντική διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5 % (τιμή $p = 0,094$) στη μικροσκληρότητα μεταξύ των τεσσάρων ομάδων. Σε συμφωνία με το παρόν εύρημα της μελέτης, μελέτες υποστηρίζουν ότι το κράμα επαναχρησιμοποιείται εάν προστίθεται φρέσκο κράμα για τη διατήρηση των ιδιοτήτων του.¹⁸⁷



Εικόνα 6-8 Μικροδομή χυτού κράματος Co-Cr (wironit extra-hard) (α) ιζήματα καρβιδίων τύπου «αστεριού» σε κράμα με 0% νέο υλικό, (β) ιζήματα φάσης σ και αποικίες ελασματοειδούς καρβιδίου σε κράμα με 25% νέο υλικό.⁸¹



Εικόνα 6-9 Μικροδομή χυτού κράματος Co-Cr (wironit extra-hard) με νέο υλικό σε αναλογία (α) 100%, (β) 75%, (γ) 50%, (δ) 25%, (ε) 0%.⁸¹

Μια μελέτη συνέκρινε το χρώμα της αδιαφανής πορσελάνης που εφαρμόζεται σε επαναχυτευμένα κράματα με διαφορετικές αναλογίες (50 % και 100 %) συμπεριλαμβανομένων των Co-Cr και δείχθηκε ότι οι διαφορετικές αναλογίες επαναχυτευμένων κραμάτων είχαν παρόμοια μεταβολή στο χρώμα της αδιαφανούς πορσελάνης.¹⁸⁶ Ακόμη, η προσθήκη σε επαναχυτευμένο δεν συνίσταται για την κατασκευή μεταλλοκεραμικών αποκαταστάσεων, καθώς μειώνει την αντοχή του κράματος και του μεταλλοκεραμικού δεσμού. Σύμφωνα με αρκετές μελέτες, ο κύριος παράγοντας για τη μείωση της αντοχής μεταλλοκεραμικού δεσμού σε βασικά μεταλλικά κράματα είναι το αυξημένο ή μειωμένο πάχος της στιβάδας οξειδίου. Η επαναχύτευση είχε αρνητικές επιπτώσεις στο πάχος στη μεταλλοκεραμική διαπαφή των κραμάτων Co-Cr. Επομένως, οι συγγραφείς δεν προτείνουν την επαναχύτευση αυτών των κραμάτων.¹⁸⁶ Επιπρόσθετα, η επαναχύτευση μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της σύνθεσης του μεταλλικού οξειδίου στην επιφάνεια του οδοντικού κράματος, η οποία είναι κρίσιμη για τον μεταλλοκεραμικό δεσμό. Σε ότι αφορά τον μεταλλοκεραμικό δεσμό έχειδειχθεί ότι η πρώτη επαναχύτευση των κραμάτων μειώνει την αντοχή του μεταλλοκεραμικού δεσμού, ενώ ο δεσμός στην δεύτερη επαναχύτευση δεν διαφέρει σημαντικά από την πρώτη, ενώ επισημαίνεται ότι μια επαναχύτευση 50 % μειώνει σημαντικά τον δεσμό. Πάντως με την αύξηση του αριθμού των επαναχυτεύσεων μειώνεται ο μεταλλοκεραμικός δεσμός. Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές το 2011, η επαναχύτευση των βασικών μεταλλικών κραμάτων είχε αρνητική επίδραση στην αντοχή μεταλλοκεραμικού δεσμού και η προσθήκη άνω του 50 % επαναχυτευμένου κράματος έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση της αντοχής του δεσμού. Ακόμη, από άλλους ερευνητές επισημαίνεται ότι επειδή μετά από πολλαπλές χυτεύσεις αναμένεται αλλαγή στα ιχνοστοιχεία (αλουμίνιο, βηρύλλιο, βόριο, άνθρακας, κοβάλτιο, χαλκός, πυρίτιο, σίδηρος, κασσίτερος, γάλλιο και ζirkόνιο), αυτό οδηγεί σε μειωμένο δεσμό μεταξύ του μετάλλου και του κεραμικού, καθώς ο χημικός δεσμός επηρεάζεται από αυτά τα στοιχεία. Τα ευρήματα των άλλων ερευνητών έδειξαν ότι υπήρξε σημαντική μείωση της αντοχής μεταλλοκεραμικού δεσμού για τα κράματα Co-Cr με την



προσθήκη επαναχυτευμένου κράματος στο νέο κράμα, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε αύξηση της συχνότητας των διεπιφανειακών κενών καθώς αυξάνεται το ποσοστό του επαναχυτευμένου μετάλλου, ενώ ένας άλλος πιθανός λόγος για την αποτυχία του κράματος επαναχύτευσης μπορεί να είναι η αλλαγή σύνθεσης που συμβαίνει μετά από πολλές χυτεύσεις.¹⁸⁹ Το 2017, οι Jayarakash και συν¹⁵¹ διερεύνησαν την απελευθέρωση ιόντων μεταλλοκεραμικών κραμάτων σε τεχνητό σάλιο σε 6,7 % και 2,3 % και 0,9 % αλατούχο διάλυμα σε pH 7,3 για 1 εβδομάδα και 4 εβδομάδες, και για το κράμα Co-Cr παρατηρήθηκε αύξηση της ποσότητας απελευθέρωσης ιόντων με την επαναχύτευση, ωστόσο δεδομένου ότι η ποσότητα απελευθέρωσης ιόντων δεν αυξήθηκε πολύ επισημαίνεται ότι το κράμα Co-Cr μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επαναχύτευση. Μεταξύ των επιλεγμένων κραμάτων στην παρούσα μελέτη, τα κράματα Co-Cr είχαν υψηλότερη συγκέντρωση Cr που βοήθησε στο σχηματισμό του εξαιρετικά αδιαπέρατου παθητικοποιημένου στρώματος, και ως εκ τούτου, στην παρούσα μελέτη, τα κράματα Co-Cr παρουσίασαν χαμηλότερη απελευθέρωση ιόντων από τα κράματα Ni-Cr. Πάντως γενικώς, καθώς οι αριθμοί επαναχύτευσης αυξάνονται, αυξάνεται η ποσότητα απελευθέρωσης ιόντων και αυτό μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή της χημικής σύνθεσης των κραμάτων λόγω της απώλειας στοιχείων κατά τη διάρκεια των διεργασιών επαναχύτευσης. Ακόμη, το Cr είναι ένα βασικό θρεπτικό συστατικό των ανθρώπων σε ποσότητες 50-200 mg/ημέρα στον μεταβολισμό της γλυκόζης. Ακόμη στην παρούσα μελέτη, οι ποσότητες Cr που απελευθερώθηκαν από το κράμα Co-Cr ήταν κάτω από τη μέση διατροφική πρόσληψη 280 μg/ημέρα. Σημειώνεται ότι η μέση διατροφική πρόσληψη Cr είναι 280 μg/ημέρα. Ωστόσο, τα χρωμικά άλατα – που προκύπτουν από τη διάβρωση των βασικών μεταλλικών κραμάτων – θα μπορούσαν να προκαλέσουν ευαισθησία στο δέρμα και δερματίτιδα. Η συχνότητα εμφάνισης αλλεργίας Cr είναι 10 % σε άνδρες και 3 % σε γυναίκες. Η εκτιμώμενη θανατηφόρα δόση για Cr στους ανθρώπους είναι περίπου 50-70 mg/kg σωματικού βάρους.¹⁵¹ Ο Alruthea²⁰⁰ αξιολόγησε τον μεταλλοκεραμικό δεσμό μετά από επιφανειακή κατεργασία με λέιζερ του επαναχυτευμένου μεταλλοκεραμικού κράματος Co-Cr και σύναξε το συμπέρασμα ότι η επεξεργασία της επιφάνειας με λέιζερ αυξάνει σημαντικά την αντοχή του δεσμού διάτμησης μεταξύ των κραμάτων Co-Cr και πορσελάνης, όταν το κράμα που χρησιμοποιείται αποτελείται από 50 % επαναχυτευμένο κράμα μίας φοράς επαναχύτευσης ή από 25 % και 50 % δύο φορές επαναχύτευσης, στο βαθμό που ήταν συγκρίσιμο με 100 % νέα κράματα. Αναλυτικότερα, 90 δείγματα σε σχήμα δίσκου κατασκευάστηκαν και συγκεντρώθηκαν σε έξι ομάδες. Η ομάδα A ήταν κατασκευασμένη από νέο κράμα χωρίς επεξεργασία λέιζερ, η ομάδα B από νέο κράμα με επεξεργασία επιφάνειας με λέιζερ, η ομάδα Γ-75 % νέο κράμα αναμειγμένο με 25 % επαναχυτευμένο κράμα μιας



φοράς ακολουθούμενη από επεξεργασία με λέιζερ, η ομάδα Δ -50 % νέο κράμα αναμεμιγμένο με 50 % κράμα μιας φοράς επαναχύτευσης ακολουθούμενο από επεξεργασία με λέιζερ, η ομάδα Ε-75 % νέο κράμα αναμεμιγμένο με 25 % κράμα δύο φορές επαναχύτευμένο και κατεργασμένο με λέιζερ και η ομάδα Ζ-50 % νέο κράμα αναμεμιγμένο με 50 % δύο φορές επαναχύτευμένο κράμα και επεξεργασία με λέιζερ. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι οι μη σημαντικές τιμές υπολογίστηκαν μεταξύ της ομάδας Α και των ομάδων Β, Γ, Δ, Ε και Ζ με τιμές σημαντικότητας (0,059, 0,612, 1.000, 0,922 και 0,845). Ομοίως, η διαφορά μεταξύ των ομάδων Γ, Δ, Ε και Ζ έδειξε μη σημαντικές τιμές (0,479, 0,177 και 0,074). Μια σημαντική διαφορά σε επίπεδο 0,05 παρατηρήθηκε μεταξύ της ομάδας Β και της ομάδας Δ, Ε, Ζ με τιμές σημαντικότητας (0,037, 0,003 και 0,002) αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, η επεξεργασία επιφανειών με λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματική επεξεργασία επιφάνειας μετά την προσθήκη επαναχύτευμένων κραμάτων στη διαδικασία χύτευσης προκειμένου να ενισχυθεί η αντοχή του δεσμού με τα κεραμικά υλικά. Σε γενικές γραμμές, ο ισχυρότερος δεσμός επιτεύχθηκε με 100 % νέο κράμα επεξεργασμένο με λέιζερ (ομάδα Β) που ήταν μεγαλύτερη και από την ομάδα 100 % νέου κράματος χωρίς επεξεργασία με λέιζερ (Α), χωρίς όμως σημαντική στατιστική διαφορά μεταξύ των δύο ομάδων. Ένα τέτοιο εύρημα υποδηλώνει ότι η επεξεργασία με λέιζερ δεν είναι σημαντικά επωφελής όταν το κράμα που χρησιμοποιείται είναι 100 % νέο. Αυτό θα μπορούσε επίσης να ισχύει όταν χρησιμοποιείται μόνο 75 % νέο κράμα, δεδομένου ότι οι τιμές αντοχής του δεσμού αυτής της ομάδας (Ομάδα Γ) ήταν στατιστικά συγκρίσιμες με τις 100 % νέες ομάδες, είτε με είτε χωρίς επεξεργασία λέιζερ. Σημαντική διαφορά μεταξύ των 100 % νέων κατεργασμένων με λέιζερ δειγμάτων και δειγμάτων με επαναχύτευμένα κράματα άρχισε να είναι εμφανής όταν το ποσοστό του κάποτε επαναχύτευμένου κράματος αυξήθηκε στο 50 % και όταν χρησιμοποιήθηκε 25 % έως 50 % δύο φορές επαναχύτευμένου κράματος. Ωστόσο, οι τιμές αντοχής δεσμού αυτών των δειγμάτων ήταν στατιστικά συγκρίσιμες με τα 100 % νέα δείγματα που δεν υπέστησαν επεξεργασία με λέιζερ. Αυτά τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν το σημαντικό όφελος της επεξεργασίας με λέιζερ όταν χρησιμοποιούνται ένα και δύο φορές επαναχύτευμένα κράματα με τέτοιες αναλογίες. Όσον αφορά τον τρόπο δράση του λέιζερ αξίζει να σημειωθούν τα εξής. Ως γνωστόν, η συγκόλληση πορσελάνης με το μέταλλο εξαρτάται από ορισμένους μηχανισμούς (μικρο-μηχανική συγκράτηση, εφαρμογή θλιπτικών δυνάμεων, χημική σύνδεση και δυνάμεις Van der Waals). Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης θα μπορούσαν να αποδοθούν στον μικρο-μηχανικό μηχανισμό συγκράτησης που δημιουργήθηκε με επεξεργασία με λέιζερ, ο οποίος φαίνεται να μπορεί να ξεπεράσει τα μειονεκτήματα της ανάμιξης με επαναχύτευμένο κράμα. Επιπλέον, η δέσμη λέιζερ δημιουργεί ανώτερο χαρακτηρισμό με

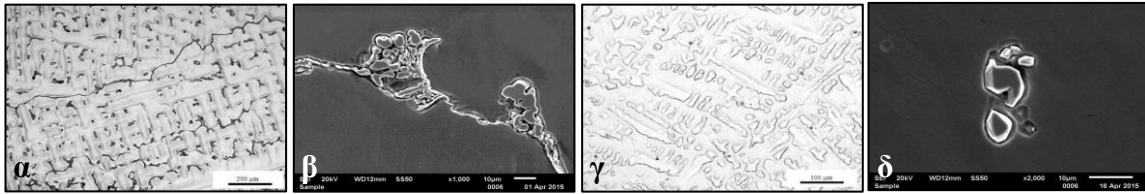


κατάλληλο βάθος στην επιφάνεια του κράματος και σχηματίζει ένα καλό περιβάλλον για πρόσφυση της πορσελάνης στην επιφάνεια των κραμάτων. Επιπλέον, η ελάχιστη μέση τιμή της αντοχής σε διατμητικούς δεσμούς της παρούσας μελέτης (27,2 MPa) υπερέβη το όριο της ισχύος του δεσμού όπως συνιστάται από τα πρότυπα ISO που ήταν 25 MPa. Κατά συνέπεια, έχει μια έγκυρη κλινική επίπτωση για την πορσελάνη συντηγμένη σε αποκαταστάσεις μετάλλων.²⁰⁰

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του MIL είναι η μη αξιοποίηση (σπατάλη) του μετά την κοπή υλικού, η ποσότητα της οποίας μπορεί να φτάσει μέχρι και το 60 % του αρχικού τεμαχίου κοπής. Το 2015, οι Nadolski και συν¹⁹³ επιχείρησαν να απαντήσουν στο ερώτημα εάν μετά την κοπή το κράμα Co-Cr που απομένει μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατασκευή προσθετικών αποκαταστάσεων μέσω της διαδικασίας της επαναχύτευσης. Για το σκοπό αυτό, μελέτησαν την επίδραση της μιας φοράς επαναχύτευσης των υπολειμμάτων των κραμάτων Co-Cr-Si κατόπιν MIL (δεν αναφέρεται το εμπορικό όνομα ή η χρήση του για αυτό συνιστάται η υιοθέτηση των αποτελεσμάτων με επιφύλαξη) στην μικροδομή, αντοχή εφελκυσμού, μικροσκληρότητα, αντοχή στη διάβρωση και το συντελεστή θερμικής διαστολής. Στο αρχικό κράμα και στο κράμα επαναχύτευσης επικρατούν δύο κύριες φάσεις, ήτοι εκείνη της μήτρας κοβαλτίου και εκείνη των καρβιδίων χρωμίου $Cr_{23}C_6$, ενώ η παρατήρηση των μικροδομών και των δύο εξεταζόμενων κραμάτων αποκάλυψε τη χαρακτηριστική δενδριτική δομή. Το αρχικό κράμα περιείχε πολλαπλά ιζήματα διατεταγμένα είτε κατά μήκος των ορίων των κόκκων είτε εντός των ενδοδενδριτικών χώρων, ενώ τα αραιά κατανεμημένα ιζήματα καρβιδίου που παρατηρούνται στο υλικό επαναχύτευσης είναι διατεταγμένα μέσα στους διαδενδριτικούς χώρους (Εικόνα 6-10 α, γ). Διαφορές εντοπίζονται πέρα από την κατανομή και τον αριθμό και στη μορφολογία των καρβιδίων (Εικόνα 6-10 β, δ). Είναι πιθανόν ότι ο χαμηλός ρυθμός ψύξης προκάλεσε τη διάλυση των καρβιδίων σε κόκκους ωστενίτη, επομένως ευθύνεται για την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού επαναχύτευσης. Το εμπορικό κράμα χύτευσης μετά από μια επαναχύτευση χαρακτηρίστηκε από υψηλότερη (κατά περίπου 15 %) αντοχή εφελκυσμού και μικροσκληρότητα από το υλικό, το οποίο όπως επισημάνθηκε προκύπτει από τη μερική διάλυση και εκλέπτυνση (refining) των ιζημάτων καρβιδίου $Cr_{23}C_6$, (η οποία αντικατοπτρίζεται από την αλλαγμένη τους διάταξη). Το γεγονός ότι τα δεδομένα δεν επαρκούν για τον προσδιορισμό του ακριβούς ρυθμού διάβρωσης, συμπεραίνεται ότι δεν βρέθηκαν συγκεκριμένα αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή στη διάβρωση των εξεταζόμενων υλικών, η περαιτέρω μελέτη αυτού του προβλήματος φαίνεται λογική. Οι συντελεστές θερμικής διαστολής για το εμπορικό κράμα



και για το κράμα μιας μόνο γενιάς επαναχύτευσης δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές, δηλαδή δεν σημειώθηκε σημαντική αλλαγή στον συντελεστή θερμικής διαστολής.¹⁹³



Εικόνα 6-10 Μικροδομή αρχικού κράματος Co-Cr (α), ιζήματα αρχικού κράματος Co-Cr (β), μικροδομή κράματος Co-Cr μετά την 1η επαναχύτευση (γ), μορφολογία ιζημάτων κράματος επαναχύτευσης (δ).¹⁹³

6.1.4 Ψύξη

Ο τρόπος ψύξης των κραμάτων Co-Cr, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ της απότομης ψύξης (άμεση εμβάπτιση σε νερό) και της αργής ψύξης (σε ένα φούρνο). Σύμφωνα με μια πειραματική εργασία του 1964 εξετάστηκαν 4 τρόποι ψύξης: α) άμεση εμβάπτιση του πυροχωμάτινου κυλίνδρου που περιέχει το χυτό σε νερό (σε δοχείο μέσα στο οποίο τρέχει νερό θερμοκρασίας δωματίου) αμέσως μετά την απομάκρυνση του κυλίνδρου από την μηχανή χύτευσης· β) αργή ψύξη του πυροχωμάτινου κυλίνδρου πάνω στην εργαστηριακή τράπεζα για 15' ή 60' αμέσως μετά την απομάκρυνση του κυλίνδρου από την μηχανή χύτευσης, και μετά εμβάπτιση σε νερό· γ) αργή ψύξη μέσα σε φούρνο για 24 ώρες, δηλαδή επιστροφή του κυλίνδρου στον θερμό φούρνο ο οποίος έχει μερικώς ψυχθεί (800 °C) και παραμονή του εκεί έως 24 ώρες, σβήνοντας ταυτόχρονα τον φούρνο. Δείχθηκε ότι, η γρήγορη ψύξη (1^η μέθοδος) των μητρών που περιέχουν τα χυτά έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της αντοχής εφελκυσμού και την αύξηση της εκατοστιαίας επιμήκυνσης, σε αντίθεση με την αργή ψύξη (2^η και 3^η μέθοδος) που έχει τα ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα. Η μέθοδος ψύξης που επιτρέπει την άριστη ισορροπία των ιδιοτήτων του εφελκυσμού και της επιμήκυνσης είναι η αργή ψύξη για 15 min στον αέρα και μετά εμβάπτιση στο νερό. Σημειώνεται ότι η μειωμένη αντοχή εφελκυσμού και η αυξημένη επιμήκυνση κατά την απότομη ψύξη, συνδυάζεται με την παρουσία σφαιρικών και διακοπτόμενων καρβιδίων στα όρια των κόκκων (απουσία ευτηκτοειδούς δομής). Αντίθετα η παρουσία ευτηκτοειδούς δομής στα όρια των κόκκων (μεγάλη συγκέντρωση καρβιδίων) προκαλεί μικρή αύξηση της αντοχής εφελκυσμού αλλά μεγάλη μείωση της επιμήκυνσης.^{4,7} Ψύξη στο νερό καθιστά το κράμα πιο μαλακό ενώ στη θερμοκρασία δωματίου πιο σκληρό και ανθεκτικό.^{98,102} Το 2013, οι Kaiser και συν¹⁰² εξετάζοντας τον χαμηλό, μέσο και υψηλό ρυθμό ψύξης (ψύξη με τη χρήση μονωτικής άμμου, φυσική ψύξη, ψύξη με τη βοήθεια αέρα από δύο ανεμιστήρες αντίστοιχα) ενός κράματος Co-Cr ανέφεραν τα εξής. Η μικροδομή του κράματος βρέθηκε να αποτελείται από ένα δενδριτικό πλέγμα με ιζήματα καρβιδίων (δευτερεύουσες φάσεις) πλούσια σε Cr και Mo



και φτωχά σε Co (συγκριτικά με το περιβάλλον πλέγμα) να καθιζάνουν στα όρια των κόκκων και στις διαδενδριτικές ζώνες. Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης το μέγεθος και το κλάσμα της περιοχής των καρβιδίων μειώθηκε σημαντικά, ενώ το μέγεθος ή το κλάσμα περιοχής των μικροπόρων μειώθηκε οριακά. Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης μειώθηκε η απόσταση του δευτερεύοντος βραχίονα δενδρίτη επηρεάστηκε σημαντικά από τα διάφορα περιβάλλοντα ψύξης. Οι κόκκοι ήταν μεγάλοι και ανομοιογενείς. Η πλειονότητα των κόκκων είναι στηλοειδείς δενδρίτες-στήλες δενδριτικές που αναπτύσσονται ακτινικά προς τα μέσα με μερικούς ισοαξονικούς κόκκους στο κέντρο, ωστόσο σημαντική μείωση του μεγέθους των κόκκων παρατηρήθηκε στη μεσαία ψύξη συγκριτικά με την αργή (Εικόνα 6-11) και επίσης διαφορές υπήρχαν και στο πάχος των ορίων των κόκκων μεταξύ των δειγμάτων χαμηλού (1,2 μm), μεσαίου (0,6 μm) και υψηλού ρυθμού τήξης (0,4 μm). Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης, οι μηχανικές ιδιότητες της σκληρότητας, της μέγιστης αντοχής στον εφελκυσμό, του ορίου διαρροής και του μέτρου ελαστικότητας αυξήθηκαν όλες ενώ η ολκιμότητα μειώθηκε.¹⁰²

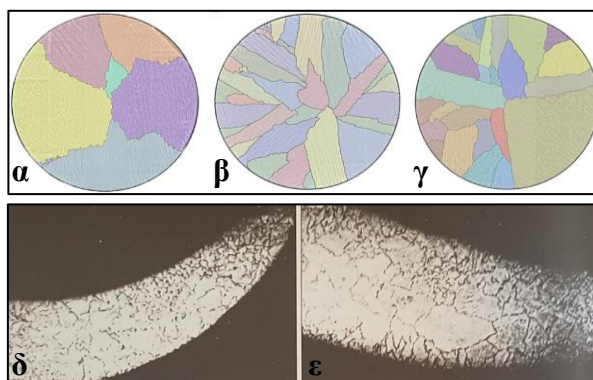
Σημειώνεται, ότι πέρα από διαφορές στο μέγεθος των κόκκων του ίδιου του εξεταζόμενου τμήματος ανάλογα (π.χ. του αγκίστρου) με το εάν αυτοί είναι στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του όπως προαναφέρθηκε (Εικόνα 6-11), ακόμη και σε άλλες βιβλιογραφίες, διαφορές μπορεί να υπάρχουν επίσης μεταξύ των τμημάτων, όπου σε λεπτά τμήματα του σκελετού (π.χ. τα άκρα των βραχιόνων των αγκίστρων) τα οποία ψύχονται πιο γρήγορα η δομή είναι μικροκρυσταλλική ενώ στα πιο παχιά (π.χ. εφαπτήρες αγκίστρων) που ψύχονται αργά η δομή είναι μεγαλοκρυσταλλική.⁴

Πέρα από τον τρόπο ψύξης μετά την απομάκρυνση του χυτού από τον κλίβανο, εξίσου σημαντικός είναι και ο ρυθμός ψύξης εντός του κλίβανου. Η μικροδομική καταβύθιση δευτερογενών φάσεων και το μέγεθος κόκκων των κραμάτων Co-Cr μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τον έλεγχο του ρυθμού ψύξης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στερεοποίησης.

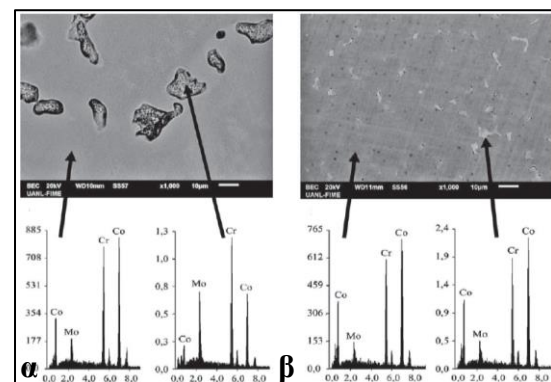
Ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιώντας επαγωγικό κλίβανο για αργό ρυθμό ψύξης και έναν ηλεκτρικό κλίβανο τόξου για γρήγορο ρυθμό ψύξης των κραμάτων Co-Cr, εξέτασαν την επίδραση του ρυθμού ψύξης στη μικροδομή και τη σκληρότητα. Με βάση τις καμπύλες θερμοκρασίας και ρυθμού ψύξης, στην αργή ψύξη (6,7 $^{\circ}\text{C/s}$) παρατηρούνται δύο αντιδράσεις: η πρώτη συνδέεται με την έναρξη της διαδικασίας στερεοποίησης στους 1383 $^{\circ}\text{C}$ που ανταποκρίνεται στην μήτρα Co- α πρωτογενούς φάσης εξωθερμικής αντίδρασης και η δεύτερη σχετίζεται με το τέλος της στερεοποίησης στους 1258 $^{\circ}\text{C}$. Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με άλλους ερευνητές το 2009 που έδειξαν το πρώτο θερμικό σήμα στους 1390 $^{\circ}\text{C}$



και το δεύτερο περίπου 1200 °C. Στην ταχεία ψύξη (23,2 °C/s) η θερμοκρασία του υγρού και το τέλος της στερεοποίησης μειώθηκαν σε 1264 °C και 1190 °C, αντίστοιχα καθώς η ταχύτητα στερεοποίησης αυξήθηκε. Σημειώνεται ότι, οι Kaiser και συν¹⁰² (2013) χρησιμοποιώντας θερμοστοιχεία και τη μέτρηση DSC, η έναρξη της στερεοποίησης βρέθηκε να συμβαίνει στους 1387 °C και 1385 °C αντίστοιχα και ένα διαδενδριτικό ίζημα ανιχνεύθηκε στους 1220 °C και στους 1255 °C αντίστοιχα. Το υγρό μετρήθηκε στους 1400 °C χρησιμοποιώντας DSC.²⁵⁵ Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης, ο μετασχηματισμός της φάσης σίγμα σε $M_{23}C_6$ μπλοκ καρβίδια μεταξύ 1150-1050 °C έχει αναφερθεί από τη μελέτη του 2009 που προαναφέρθηκε, αποτέλεσμα το οποίο δεν ανιχνεύθηκε στους 1050 °C τόσο για την αργή όσο και για την ταχεία ψύξη σε αυτή τη μελέτη. Τόσο στην αργή όσο και στην ταχεία ψύξη ταυτοποιήθηκαν, οι δευτερεύουσες φάσεις (φάση $M_{23}C_6$ μπλοκ και φάση σίγμα) που είναι ενσωματωμένες στην άλφα μήτρα κοβαλτίου-βάσης (fcc), όμως η ταχεία ψύξη έχει ως αποτέλεσμα μείωση του μεγέθους των δευτερογενών φάσεων και των κόκκων (λεπτότερη μικροδομή-Εικόνα 6-12) και μικρή μείωση της σκληρότητας. Χαρακτηριστικά βρέθηκε για την αργή και τη ταχεία ψύξη αντίστοιχα: σκληρότητα 355,8 HV και 347,6 HV, μέγεθος δευτερογενών σωματιδίων 10,1 μm και 4,4 μm, κλάσμα περιοχής δευτερογενούς φάσης 7,6 % και 9,7 %.²⁰¹



Εικόνα 6-11 Διαφορές της δομής των κόκκων ανάλογα με χαμηλό (α), μεσαίο (β) και υψηλό (γ) ρυθμό ψύξης.²⁰¹ Μεταλλογραφική εξέταση βραχιόνων ακτίστων όπου στην επιφάνεια (δ) οι κόκκοι είναι μικροί και λεπτοί (γρήγορη ψύξη) ενώ στο εσωτερικό οι κόκκοι είναι μεγαλύτεροι.⁴



Εικόνα 6-12 SEM εικόνες και EDS ανάλυση της μήτρας και της φάσης σίγμα) των κραμάτων Co-Cr αργής (α) και γρήγορης (β) ψύξης.²⁰¹

Σε κάθε περίπτωση ο τεχνολόγος κατά την ψύξη των κραμάτων Co-Cr θα πρέπει να ακολουθεί τις υποδείξεις του κατασκευαστή του κράματος καθώς η μεταλλογραφική δομή του χυτού κράματος είναι και συνάρτηση της αρχικής του σύνθεσης σε μέταλλα.⁴



6.2 Παράμετροι που επηρεάζουν τη μέθοδο PBF (Powder Bed Fusion)

Το βασικότερο στοιχείο είναι η επιλογή σκόνης. Ωστόσο, η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας είναι εξίσου σημαντική. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ενός μοντέλου σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή, τον προσδιορισμό του προσανατολισμού κατασκευής και του αριθμού των δομών υποστήριξης, την επιλογή των παραμέτρων του μηχανήματος, τον τύπο της συσκευής (π.χ. DMLM ή DMLS).⁸⁸ Από αυτές τις παραμέτρους, οι παράμετροι του μηχανήματος (με εξαίρεση το πάχος στρώσης) δεν είναι συνήθως υπό τον έλεγχο του χρήστη, ενώ η επιλογή της σκόνης, του προσανατολισμού κατασκευής, του πάχους στρώσης και του τύπου της συσκευής αποτελούν τις μεταβλητές που μπορεί να τροποποιήσει-προσαρμόσει ο τεχνολόγος.¹⁴³ Ωστόσο, οι προτιμήσεις των χρηστών μπορεί επίσης να επηρεάσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος.¹⁵

6.2.1 Επιλογή της σκόνης

Οι μηχανικές ιδιότητες του τελικού σκελετού, επηρεάζονται από διαφορετικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της χημικής σύνθεσης της σκόνης κράματος Co-Cr και του μεγέθους κόκκων σκόνης, και οι δύο από τις οποίες καθορίζονται από τους κατασκευαστές της σκόνης του κράματος, ωστόσο η επιλογή παραμένει στον τεχνολόγο. Οι διαφορές στη σύνθεση μεταξύ διαφορετικών σκονών κράματος Co-Cr μπορεί να είναι πολύ μικρές, ωστόσο οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι οι μηχανικές ιδιότητες για τις σκόνες τους είναι πολύ διαφορετικές.¹⁵ Η σκόνη, η οποία είναι απαλλαγμένη από Ni και Be, αποτελείται από σωματίδια μεγέθους μεταξύ 3 και 14 μm . Ωστόσο, κάθε σύστημα χρησιμοποιεί διαφορετικές σκόνες μετάλλων Co-Cr (Παράρτημα Β).¹¹⁹

6.2.2 Προσανατολισμός κατασκευής και δομές υποστήριξης

Ο προσανατολισμός κατασκευής ορίζεται γενικά ως η οξεία γωνία μεταξύ του διαμήκου άξονα ενός δεδομένου δείγματος και του κατακόρυφου άξονα της πλατφόρμας κατασκευής, δηλαδή η γωνία του διαμήκου άξονα ενός δείγματος σε σχέση με τη κατεύθυνση κατασκευής (Εικόνα 6-13). Η αντιστοίχιση των 0° , 45° και 90° αντιστοιχούν στο διαμήκη άξονα των δοκιμών ενώ για τα άγκιστρα για την αποφυγή σύγχυσης αντιστοιχούν στους διαμήκεις άξονες των βραχιόνων τους κάθετα (0°), με κλίση και οριζόντια/παράλληλα (90°) σε σχέση με τη πλατφόρμα κατασκευής. Η μικροδομή, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες, η υφή και η συγκέντρωση υπολειμματικών τάσεων εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της κατασκευής. Οι θερμικές διακυμάνσεις που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία κατασκευής στο

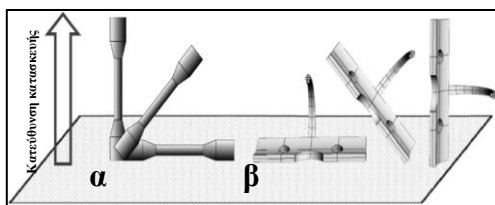


SLM ασκούν τη μεγαλύτερη επίδραση στους προσανατολισμούς των σχηματισμένων κόκκων: γενικά, ο κόκκος αναπτύσσεται από μια ψυχρότερη (πλατφόρμα οικοδόμησης) σε μια θερμότερη περιοχή (άνω επιφάνεια),^{88,110} ενώ πέραν αυτού σε ορισμένες μελέτες¹¹³ έχει αναφερθεί ότι οι κατευθύνσεις ανάπτυξης των κόκκων είναι περίπου παράλληλες προς τον προσανατολισμό κατασκευής. Επιπλέον, ο προσανατολισμός κατασκευής επηρεάζει τη διάταξη των ιζημάτων, καθώς στις μελέτες που έχουν παρατηρηθεί ιζήματα αυτά ευθυγραμμίζονται κατά μήκος της κατεύθυνσης κατασκευής.^{88,110} Ακόμη, αρκετές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τα τετηγμένα όρια δεξαμενής (MPBs), τα οποία παρατηρούνται χαρακτηριστικά σε κράματα SLM, και επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές τους ιδιότητες (Εικόνα 6-14), ο αριθμός και η γωνία των οποίων ποικίλει ανάλογα με την κατεύθυνση κατασκευής και ως εκ τούτου μπορούν να επηρεάσουν την ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων. Η Εικόνα 6-15 α παρουσιάζει κατασκευασμένα στρώματα σε δείγματα SLM σύμφωνα με διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής. Καθώς ο αριθμός των στρωμάτων στους 0° και 45° είναι υψηλότερος από ότι στις 90° , σχηματίζεται ένας μεγαλύτερος αριθμός ορίων λιωμένης δεξαμενής (molten pool boundaries). Επιπλέον, η όλκιμη παραμόρφωση των κραμάτων SLM προκύπτει από την ολίσθηση στους κόκκους και στα όρια τετηγμένης δεξαμενής. Λόγω της σχετικά χαμηλής αντοχής των MPBs σε σύγκριση με εκείνη των GBs, η ολίσθηση συμβαίνει κατά προτίμηση κατά μήκος των ορίων λιωμένης δεξαμενής.¹¹⁰ Τα κατάγματα στα μέρη SLM μπορούν να ξεκινήσουν στα όρια της λιωμένης δεξαμενής και μπορεί να παρατηρηθούν ρωγμές κατά μήκος των ορίων των επεκτάσεων των εφελκυστικών καταγμάτων. Για τα δείγματα κατασκευασμένα με προσανατολισμό 0° , η επιφάνεια θραύσης είναι σχεδόν παράλληλη με τα MPBs και οι ρωγμές μπορούν εύκολα να εξαπλωθούν κατά μήκος αυτών.^{88,115}

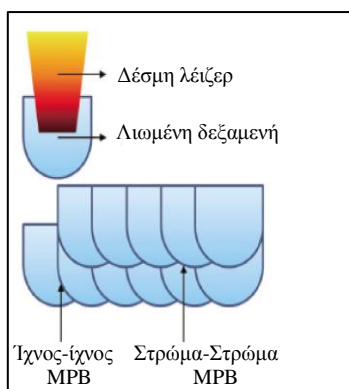
Επιπρόσθετα, η κατεύθυνση της γωνίας κατασκευής σε σχέση με το μοτίβο σύντηξης λέιζερ επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος (Εικόνα 6-15 β). Πιο αναλυτικά, στην μελέτη των Aarts και συν¹¹⁴ (2020) βρέθηκε διαφορετική τοπογραφία κατάγματος μεταξύ των διαφορετικών γωνιών κατασκευής, ήτοι η επιφάνεια θραύσης δείγματος 0° ήταν επίπεδη αλλά είχε καθορισμένες προεξοχές θραύσης, το δείγμα 45° ήταν επίπεδο χωρίς εμφανείς προεξοχές και το δείγμα βαθμού 90° είχε διακριτό κυρτό ή αντίστοιχο κοίλο σχήμα. Επίσης βρέθηκε ένας περιορισμένος αριθμός μικρών απομονωμένων σφαιρικών σωματιδίων μόνο στις λείες θέσεις θραύσης που ήταν τοποθετημένα προς τα εξωτερικά άκρα των δειγμάτων. Ελεύθερα σφαιρικά σωματίδια διαμέτρου μικρότερης από 8 mm παρατηρήθηκαν σε συσχέτιση με αυτές τις θέσεις λείων καταγμάτων. Είναι πιθανό ότι ήταν ασύντηκτα σωματίδια ή ένας αριθμός μικρότερων σωματιδίων τα οποία συντήχθηκαν μεταξύ τους. Οι



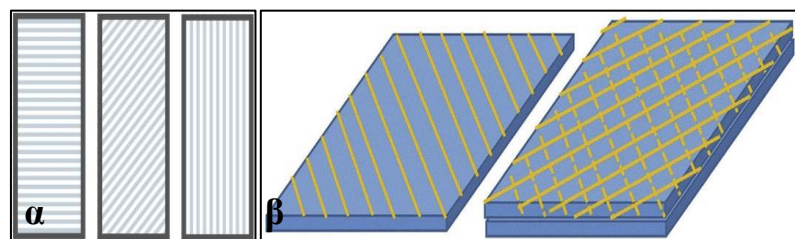
περιοχές λείας θραύσης ήταν ένα βασικό χαρακτηριστικό και είναι πιθανό ο τρόπος με τον οποίο τα στρώματα του πυροσυσσωματωμένου υλικού συντήχθηκαν ή συντήχθηκαν έλιωσαν και συνέβαλαν στο σχηματισμό των περιοχών λείας θραύσης. Οι περιοχές αυτές ήταν πιο αισθητές στα εξωτερικά άκρα του δείγματος 90° , λιγότερο εμφανείς στα δείγματα 45° και ακόμη λιγότερο εμφανείς στα δείγματα 0° . Μπορεί να υποθεθεί ότι αυτές οι θέσεις λείας θραύσης ήταν ημι-τηγμένο Co-Cr ή πόροι. Αυτές οι ημι-λιωμένες περιοχές θα μπορούσαν να οφείλονται στη διαφορά στη θερμική αγωγιμότητα της χαλαρής σκόνης και του στερεού υλικού και στην ικανότητα της θερμότητας να διαχέεται στο παρακείμενο στρώμα κατά τη διάρκεια της τήξης, η οποία συνδέεται με τον τρόπο και την ποσότητα της θερμότητας που παρέχεται στη σκόνη. Η διανομή της θερμότητας από το λέιζερ φαίνεται να γίνεται με μια ακολουθία που καθορίζεται από την κατασκευή. Η διαδικασία σύντηξης λέιζερ και το μοτίβο δεν είναι ανεξάρτητα από την κατασκευή, αλλά φαίνεται ότι το λέιζερ παρέχει θερμότητα σε σχήμα σταυροειδούς ατράκτου, με το λέιζερ να διασχίζει το στρώμα σκόνης σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε εναλλακτικά στρώματα (Εικόνα 6-15 β). Αυτό το «μοτίβο παράλληλων γραμμών» είναι εμφανές κατά τη στενή παρατήρηση και φαίνεται ότι το λέιζερ κινείται κατά μήκος της πλατφόρμας κατασκευής σε γραμμές από τη μία γωνία έως την άλλη. Αυτό επαναλαμβάνεται στη συνέχεια στο επόμενο στρώμα, αλλά σε γωνία 90° με το προηγούμενο στρώμα. Αυτό το μοτίβο σύντηξης θα μπορούσε να κάνει τα σωματίδια στη γραμμή σύντηξης να είναι μόνο ημι-συντηγμένα ή συντηγμένα. Ο προσανατολισμός των ημι-συντηγμένων περιοχών και στρωμάτων σημαίνει ότι η γωνία κατασκευής 45° παράγει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τις γωνίες 0° και 90° .¹¹⁴



Εικόνα 6-13 Προσανατολισμός κατασκευής δοκιμίων (α) και ακτίστων (β) στις 0° (αριστερά), 45° (ανάμεσα) και 90° (δεξιά).



Εικόνα 6-14 Ορισμοί λιωμένης δεξαμενής (MPB).¹¹⁰



Εικόνα 6-15 Κατασκευασμένα στρώματα στα κράματα SLM σύμφωνα με τους διαφορετικούς προσανατολισμούς κατασκευής (α): 0° , 45° και 90° (αντίστοιχα από αριστερά προς τα δεξιά).⁸⁸ Αριστερά (β) διακρίνεται η διαδρομή του λέιζερ σε ένα στρώμα και δεξιά σε δύο.¹¹⁴

Σε κάποιες μελέτες δείχθηκε ότι, τα κράματα που κατασκευάζονται από την PBF εμφανίζουν συγκρίσιμες (ή ακόμη υψηλότερες) μηχανικές ιδιότητες (όριο διαρροής, αντοχή εφελκυσμού) με εκείνες που παρασκευάστηκαν με CST.⁸⁸

Έχει αναφερθεί ότι υψηλότερο όριο διαρροής και χαμηλότερη επιμήκυνση παρατηρούνται στις 45° ή 90° προσανατολισμού κατασκευής, ενώ οι 0° αποδίδουν τις υψηλότερες αντοχές στο εφελκυσμό και επιμήκυνση μετά τη θραύση.^{88,111}

Σε άλλη μελέτη¹¹⁴, όπου πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των κραμάτων Co-Cr που κατασκευάστηκαν με γωνίες κατασκευής 0°, 45° και 90°, αναφορικά με τις ιδιότητες εφελκυσμού δείχθηκαν τα εξής. Η γωνία κατασκευής 45° αποδίδει το υψηλότερο όριο διαρροής και το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (213,3 GPa) και συνεπώς παράγει τις καλύτερες ιδιότητες για τα συγκρατητικά άγκιστρα, ενώ η γωνία κατασκευής 90° αποδίδει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας υποδεικνύοντας ότι τα τμήματα που απαιτούν μεγαλύτερη ακαμψία όπως οι εφαπτήρες και οι μείζονες συνδετήρες θα ήταν πλεονεκτικό να τοποθετούνται πιο κάθετα στην πλάκα κατασκευής. Επιπλέον, η γωνία κατασκευής 45° παράγει τη χαμηλότερη μέση επιμήκυνση (%) υποδεικνύοντας ότι τα κράματα με αυτή τη γωνία είναι ελαφρώς λιγότερο όλκιμα και πιθανώς ευκολότερα στη κατεργασία, ενώ η γωνία κλίσης 90° είχε ως αποτέλεσμα την υψηλότερη μέση επιμήκυνση (10,6 %). Η αντοχή εφελκυσμού της γωνίας κατασκευής 45° (1180,9 MPa) ήταν στατιστικά σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των γωνιών δόμησης 0° και 90° που ήταν παρόμοιες μεταξύ τους, ενισχύοντας και πάλι ότι αυτή η γωνία παράγει τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά για την αντοχή της Μ.Ο. Πάντως, το κράμα που κατασκευάζεται με DMLS έχει ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο. σε όλες τις γωνίες κατασκευής.¹¹⁴

Το 2016, οι Kajima και συν¹¹⁵, απέδειξαν ότι άγκιστρα κατασκευασμένα από SLM δεν εμφανίζουν μηχανική ανισοτροπία στην δοκιμές εφελκυσμού, ενώ παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές ορίου διαρροής και αντοχής εφελκυσμού από τα CST άγκιστρα (ανεξαρτήτως προσανατολισμού κατασκευής, πιθανώς λόγω της βελτιωμένης μικροδομής, δημιουργούμενη λόγω ταχείας στερεοποίησης τους). Το όριο διαρροής, η μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό και η % επιμήκυνση βρέθηκαν για τις γωνίες 0° να είναι 837, 1170, 12,7 MPa αντίστοιχα, για τις 45° 872, 1274 και 9,1 MPa αντίστοιχα, και για τις 90° 896, 1272, 9,1 αντίστοιχα. Ωστόσο παρουσιάζουν και σημαντική ανισοτροπία στην αντοχή τους στην κόπωση. Ωστόσο, απέδειξαν ότι η αντοχή στην κόπωση αγκίστρων Co-Cr κατασκευασμένα από SLM υπό γωνία 90° είναι σημαντικά υψηλότερη από εκείνη των CST, ενώ η αντοχή στην κόπωση των CST αγκίστρων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των υπό γωνία 0° και 45° (η διάρκεια ζωής σε κόπωση των κραμάτων ήταν 205.418, 112.770, 43.465, 28.484 κύκλοι



κόπωσης για τις τεχνικές SLM-90°, CST, SLM-45°, SLM-0°, αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αντοχή στην κόπωση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η τραχύτητα επιφάνειας, ο προσανατολισμός των κρυστάλλων, οι υπολειπόμενες τάσεις, και τα όρια τηγμένης δεξαμενής κράματος. Συνεπώς, η SLM είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος παραγωγής δύσθραυστων σκελετών Μ.Ο. εφόσον υιοθετηθεί η κατάλληλη κατεύθυνση κατασκευής. Ωστόσο, ο κυρίαρχος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή στην κόπωση του SLM παραμένει άγνωστος, υποδεικνύοντας ότι απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την αποσαφήνιση της αιτίας της ανισοτροπίας αντοχής σε κόπωση.⁸⁸ Το 2019, οι Kittikundecha και συν¹²⁸ έδειξαν ότι η αντίσταση στη κόπωση είναι μεγαλύτερη κατά φθίνουσα σειρά στα κράματα γωνίας 90°, 45° και 0°.¹²⁸

Σε γενικές γραμμές, η διάδοση ρωγμών κόπωσης μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια στάδια. Στο στάδιο I, βραχείες ρωγμές ξεκινούν να σχηματίζονται στις περιοχές συγκέντρωσης υψηλών τάσεων. Η κατανομή των τάσεων του αγκίστρου ποικίλλει ανάλογα με το σχήμα του αγκίστρου και συνδέεται με τη θέση θραύσης. Στο στάδιο II, οι μακρές ρωγμές διαδίδονται και στη συνέχεια η θραύση εμφανίζεται τελικά στο στάδιο III. Τα στάδια I και II επηρεάζουν κυρίως τη διάρκεια ζωής σε κόπωση. Ενώ οι βραχείες ρωγμές κατά το στάδιο I εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των κόκκων, οι μεγάλες ρωγμές κατά το στάδιο II εξαρτώνται από τον συντελεστή έντασης τάσης K ο οποίος όταν αυξάνεται ως συνέπεια της ανάπτυξης των ρωγμών ή της εφαρμογής υψηλότερων φορτίων, τα στρώματα ολίσθησης (slips) αρχίζουν να αναπτύσσονται σε διαφορετικά επίπεδα κοντά στο άκρο της ρωγμής, ξεκινώντας το στάδιο II. Η διάδοση στο στάδιο II είναι κάθετη προς την κατεύθυνση του φορτίου. Στην τάση που εφαρμόζεται στην άκρη της ρωγμής, συμπεριλαμβάνονται τόσο τα εξωτερικά φορτία όσο και οι υπολειπόμενες τάσεις που συσσωρεύονται κατά την επαναλαμβανόμενη γρήγορη θέρμανση και ψύξη στην διαδικασία του SLM, η ποσότητα των οποίων εξαρτάται από διάφορες συνθήκες όπως οι ιδιότητες των υλικών, το σχήμα δείγματος, η κατεύθυνση κατασκευής και οι παράμετροι σάρωσης λέιζερ.¹¹⁵



Σημειώνεται, ότι η σκόπιμη προσθήκη δομών υποστήριξης μπορεί να βελτιώσει την αντοχή στην κόπωση των αγκίστρων, αν και απαιτείται επιπλέον προσπάθεια για την αφαίρεσή.¹¹ Επιπρόσθετα, ότι η αντοχή στην κόπωση μπορεί να βελτιωθεί μέσω της θερμικής επεξεργασίας. Η ανισοτροπία σε μέρη PBF μπορεί να επηρεάσει την κλινική απόδοση.⁸⁸ Για παράδειγμα το 2020 οι Xie και συν¹¹³ σε νεότερη μελέτη κατασκευής αγκίστρων από κράμα όμως Ti-6Al-4V, στην οποία όλα τα δείγματα SLM υποβλήθηκαν σε θερμικές κατεργασίες για την απελευθέρωση των υπολειπόμενων τάσεων, επιβεβαίωσαν ότι τα SLM-90° αποδίδουν την καλύτερη αντίσταση στη κόπωση, ενώ ακολούθησαν τα SLM-45° με παρόμοια αντίσταση με εκείνη των SLM-0°, τα οποία με τη σειρά τους και τα τρία SLM είχαν καλύτερη αντίσταση στη κόπωση από τα CST. Επομένως, οι υπολειμματικές τάσεις θα μπορούσαν να συμβάλουν στο ανισότροπο χαρακτηριστικό των δειγμάτων SLM.¹¹³

Η γωνία κατασκευής 45° παράγει πέρα από τη χαμηλότερη μέση επιμήκυνση (%) που προαναφέρθηκε και τη χαμηλότερη τιμή σκληρότητας, υποδεικνύοντας ότι τα κράματα με αυτή τη γωνία είναι ελαφρώς λιγότερο όλκιμα και πιθανώς ευκολότερα στη κατεργασία.¹¹⁴ Σε άλλη μελέτη πάντως, αναφέρθηκε ότι η σκληρότητα είναι παρόμοια για τις γωνίες 0°, 30°, 60°, 90° στα κράματα Co-Cr που επεξεργάστηκαν με SLM.¹⁸⁰

Επιπρόσθετα, μεγαλύτερη αδρότητα εντοπίζεται στα άγκιστρα SLM-0°, μικρότερη στα SLM-45°, και ακόμη μικρότερη στα SLM-90° η οποία είναι παρόμοια με εκείνη των CST αγκίστρων που είναι και αυτή μικρότερη των SLM-0° και SLM-45°.¹¹⁵ Σε μια ακόμη μελέτη επιβεβαιώθηκε η μικρότερη αδρότητα των SLM-90° συγκριτικά με τις γωνίες 0° και 45°.¹²⁸ Σε άλλη μελέτη σύγκρισης των 3 προσανατολισμών αναφέρθηκε ότι τα άγκιστρα SLM-90° πέρα από την μικρότερη αδρότητα έχουν και την καλύτερη εφαρμογή και διατήρηση συγκράτησης στο χρόνο, ενώ και οι τρεις SLM-προσανατολισμοί παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με τα CST άγκιστρα, όμως κράματος Ti-6Al-4V τιτανίου.¹¹³ Η καλύτερη εφαρμογή στις 90° αναφέρεται και σε άλλη μελέτη.¹⁹

6.2.3 Παράμετροι μηχανήματος

Μια διαδικασία παραγωγής στρώματος προς στρώμα οδηγεί σε πολύπλοκα, χρονοεξαρτώμενα προφίλ θερμοκρασίας. Κάθε μεταλλικό στρώμα μπορεί επανειλημμένα να μετασχηματίζεται μεταξύ των φάσεων (π.χ. α → β) και των καταστάσεων (από στερεό σε υγρό). Αυτή η συχνή θερμική ανακύκλωση επηρεάζει τη μικροδομή του υλικού. Τα προφίλ θερμοκρασίας εξαρτώνται από έναν αριθμό μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού AM, του χρόνου μεταξύ των μεταβάσεων (passes) και του μεγέθους του τμήματος του σκελετού που κατασκευάζεται.⁸⁸



Ένας κατάλληλος συνδυασμός παραμέτρων επεξεργασίας είναι απαραίτητος για μια επιτυχημένη κατασκευή με αυτήν την τεχνολογία καθώς αυτές οι παράμετροι μπορούν να αλλάξουν τις ιδιότητες του τελικού αντικειμένου (π.χ. ακρίβεια, πυκνότητα, τραχύτητα, σκληρότητα και αντοχή). Η μικροδομή και οι ιδιότητες της διαδικασίας SLM επηρεάζονται κυρίως από την ισχύ του λέιζερ, την ταχύτητα σάρωσης, την απόσταση γραμμής σάρωσης (hatch spacing), το μέγεθος της δέσμης λέιζερ και το πάχος του στρώματος, τα οποία σχετίζονται με την ενέργεια τήξης και το βάθος διείσδυσης στη σκόνη κράματος, δηλαδή με την πυκνότητα του λιωμένου υλικού.^{33,88,110,128} Σε άλλη μελέτη, προστίθεται η σημασία της θερμοκρασίας της προθερμασμένης κλίνης σκόνης και του ρυθμού θέρμανσης για τις μηχανικές ιδιότητες.¹⁵ Πιο αναλυτικά:

- Καθώς αυξάνεται η ισχύς του λέιζερ, αυξάνεται η ποσότητα (εύρος και βάθος) της λιωμένης δεξαμενής ανά μονάδα χρόνου.⁸⁸ Διατηρώντας την ίδια ισχύ αλλά αυξάνοντας τη ταχύτητα σάρωσης (ταχύτητα της τροφοδοσίας δέσμης λέιζερ), μειώνονται το εύρος και το βάθος της λιωμένης δεξαμενής.³⁷ Ένα μικρό βάθος μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό μιας χονδροκόκκης δομής, η οποία επηρεάζει την απόδοση του σκελετού. Υψηλή ισχύς λέιζερ και η χαμηλή ταχύτητα σάρωσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εξάτμιση των λιωμένων υλικών.^{33,128}
- Η απόσταση γραμμής σάρωσης (βήμα σάρωσης) [Scan line spacing (scanning pitch)], δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών τροχιών σάρωσης με λέιζερ, επηρεάζει επίσης τα χαρακτηριστικά της λιωμένης δεξαμενής. Μια μεγάλη απόσταση μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο αριθμό κενών και μειωμένη πυκνότητα, δηλαδή σε πορώδες επειδή οι γειτονικές γραμμές τήξης δεν συντήκονται μαζί.^{33,88,128} Αυτές οι παράμετροι της διαδικασίας έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση του προϊόντος. Οι Wang και συν⁸⁸ (2020) ανέφεραν ότι η αντοχή εφελκυσμού και το όριο διαρροής του κράματος Co-Cr αυξάνονται καθώς η ισχύς του λέιζερ αυξάνεται και το βήμα σάρωσης μειώνεται. Ωστόσο, η αύξηση της ταχύτητας σάρωσης μειώνει την αντοχή εφελκυσμού και το όριο διαρροής. Για να επιτευχθούν οι καλύτερες ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr στη διαδικασία SLM, οι βέλτιστες παράμετροι φαίνεται να είναι ισχύς λέιζερ 160 W, ταχύτητα σάρωσης 1100 mm/s και γραμμή σάρωσης σε απόσταση 0,05 mm.⁸⁸

Επιπλέον, το 2016 οι Hong και συν²⁰² ανέφεραν ότι η ισχύς λέιζερ, η ταχύτητα σάρωσης και το βήμα σάρωσης πέρα από τις μηχανικές ιδιότητες επηρεάζουν και την τραχύτητα της επιφάνειας των SLM κραμάτων. Πιο αναλυτικά:

- Όσον αφορά την ισχύ λέιζερ και τον ρυθμό σάρωσης λέιζερ, όταν ο ρυθμός σάρωσης είναι γρήγορος και η ισχύς του λέιζερ είναι χαμηλή αποφεύγεται η τήξη με τη δημιουργία



σφαιρών (balling phenomenon), για την ακρίβεια δημιουργείται ένα μικρό σφαιρίδιο. Η ισχύς 200 W και ο ρυθμός σάρωσης 128,6 mm/s θεωρούνται βέλτιστα καθώς σχηματίζουν ένα βέλτιστο σχήμα σφαιριδίων, με βέλτιστο ύψος, βάθος και πλάτος (Εικόνα 6-16). Τα κράματα δεν τήκονται εντελώς εκτός αν η έξοδος λέιζερ και ο ρυθμός σάρωσης έχουν ρυθμιστεί σε συγκεκριμένα επίπεδα. Επιπλέον, άλλοι ερευνητές ανέφεραν ότι οι δύο αυτοί παράμετροι επηρεάζουν το πάχος πρόσφυσης σκόνης, και συμβάλλουν στην αποφυγή δημιουργίας ελαττωμάτων στις κατασκευές SLM. Πιο αναλυτικά στη δοκιμή σχηματισμού μιας γραμμής, κάτω από τις εφαρμοζόμενες ισχύεις λέιζερ και ρυθμούς σάρωσης, μπορούσαν να παρατηρηθούν τρία διαφορετικά μοτίβα γραμμής (Εικόνα 6-17 α): μονές λιωμένες γραμμές με σημαντικά χονδροειδείς σφαίρες (τύπος 1), μονές λιωμένες γραμμές που είναι ομαλές και συνεχείς (τύπος 2), και μονές γραμμές με μικρή ποσότητα σφαιρών και/ή ασυνεχής μερική τήξη (τύπος 3). Αυτά τα τρία διαφορετικά σχήματα γραμμών μπορούν να εξηγηθούν με βάση την πυκνότητα ενέργειας της δέσμης λέιζερ που δόθηκε στις μεταλλικές σκόνες και η οποία περιγράφει την ενέργεια λέιζερ που εφαρμόζεται στις σκόνες. Όταν η ενεργειακή πυκνότητα του εφαρμοζόμενου λέιζερ είναι επαρκής για τη σκόνη, η ζώνη τήξης μεγαλώνει και η θερμοκρασία κοντά στη λειωμένη δεξαμενή διατηρείται υψηλή, ενώ όταν η ενεργειακή πυκνότητα δεν επαρκεί για να λιώσει πλήρως τη μεταλλική σκόνη, η μη λιωμένη σκόνη παραμένει στο στρώμα, σχηματίζοντας ελαττώματα, επειδή η θερμοκρασία εντός της ζώνης τήξης είναι ανεπαρκής. Η τέλεια σύνδεση μεταξύ των σκονών και του υποστρώματος επιτυγχάνεται όταν η ενεργειακή πυκνότητα είναι 1,4-5,1 J/mm. Κάτω από αυτήν την κατάσταση, φαίνεται ότι σχηματίζεται επαρκής ποσότητα υγρού, με λογική σταθερότητα. Μετά τη στερεοποίηση, και αυτό αποδίδει συνεχείς και λείες λειωμένες γραμμές χωρίς την εμφάνιση σφαιρών. Αντίθετα, όταν η ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλότερη από 1,3 J/mm, παρέχεται ανεπαρκής ενέργεια για τις σκόνες, η οποία προκάλεσε κακή πρόσφυση μεταξύ των σκονών και του υποστρώματος (τύπος 3). Όταν η επιφανειακή ενέργεια μειώνεται, το τήγμα γίνεται εξαιρετικά ασταθές και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή τραχιών γραμμών που αποτελούνται από έναν αριθμό μικρών σφαιρών ή/και μερικής τήξης στις επιφάνειές. Ωστόσο, ο σχηματισμός μιας γραμμής διακυβεύτηκε όταν η ενεργειακή πυκνότητα είναι υπερβολική (τύπος 1). Όταν η ενεργειακή πυκνότητα είναι μεγαλύτερη από 6,6 J/mm, παρατηρείται μια μοναδική γραμμή τήξης με σημαντικά χονδροειδείς σφαίρες. Αυτό το φαινόμενο σφαίρας δείχνει ότι οι τηγμένοι κόκκοι κολλάνε μεταξύ τους λόγω της δύναμης επιφανειακής τάσης, σχηματίζοντας μια σειρά σφαιρών, όπου η ενεργειακή πυκνότητα είναι υψηλή. Τέτοιες υψηλές ενεργειακές πυκνότητες μπορούν



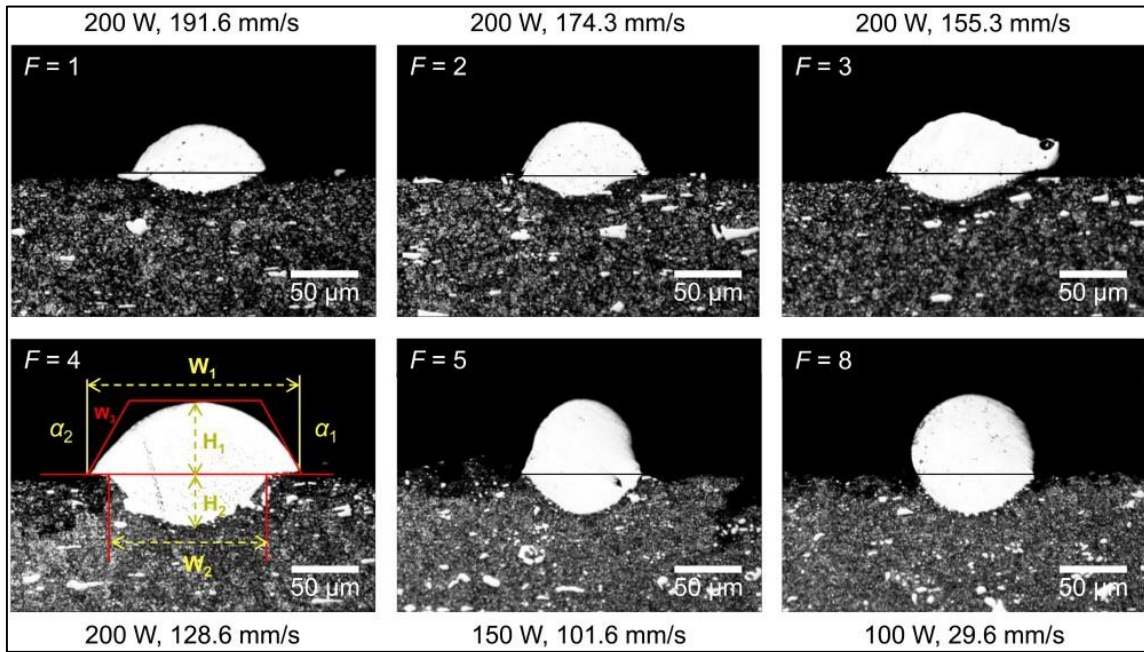
γενικά να θεωρηθούν ότι οφείλονται στην υψηλή ισχύ λέιζερ και στον αργό ρυθμό σάρωσης.

- Όσον αφορά την απόσταση σάρωσης (Εικόνα 6-17 β, Εικόνα 6-18), γενικά ισχύει ότι ο λόγος επικάλυψης τείνει να μειώνεται καθώς αυξάνεται το διάστημα γραμμής σάρωσης. Στην περίπτωση δοκιμής σχηματισμού πολλαπλών στρώσεων (3D) έχει δειχθεί ότι πιο ομαλή και επίπεδη επιφάνεια με ομοιόμορφες γραμμές επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται απόσταση γραμμής σάρωσης 100μm (ήτοι βέλτιστος λόγος επικάλυψης = 62 %) όπου αν και ανιχνεύθηκε ενός ελαφρύς σχηματισμός σφαιρών τήγματος στην επιφάνεια, αυτό δεν φαίνεται να έχει προφανή ζημία στην ποιότητα SLM. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες αποστάσεις πιθανόν υπάρχουν μικρές αναλογίες αλληλοεπικάλυψης και η εμφάνιση σχηματισμού γραμμής μη-συνδεδεμένης με την επιφάνεια να έχει τραχύτητα με δομή πλέγματος με μικρές μπάλες τήξης, ενώ σε μικρότερες υπάρχει υπερβολική αναλογία τήξης, εμφάνιση διόγκωσης η οποία είναι η άνοδος του στερεού υλικού πάνω από το επίπεδο διανομής και τήξης και υπερβολικής αλληλοεπικάλυψης. Η χρήση μιας βέλτιστης απόστασης γραμμής σάρωσης οδηγεί σε αναλογία επικάλυψης που είναι ελαφρώς πάνω από 50 %, γεγονός που βελτιώνει την ποιότητα της επιφάνειας των SLM κραμάτων Co-Cr.²⁰²

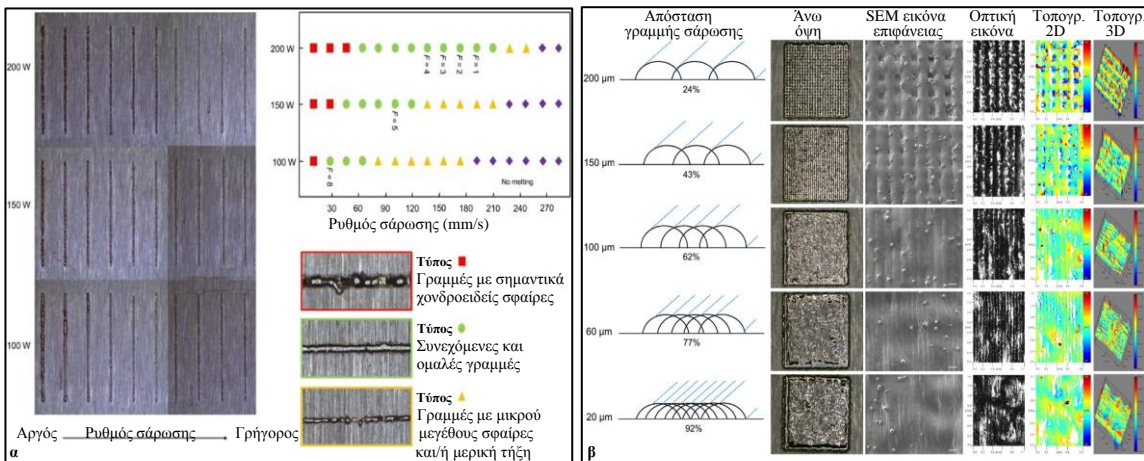
Η δέσμη λέιζερ λιώνει το υλικό κατά μήκος μιας συγκεκριμένης γραμμής σωματιδίων σκόνης, σχηματίζοντας έτσι μια λιωμένη δεξαμενή, η οποία αποκτά το σχήμα κυκλικού ή τμηματικού κυλίνδρου υπό την επίδραση της επιφανειακής τάσης. Ο κατακερματισμός μιας επανατηγμένης γραμμής με τη σειρά είναι γνωστός ως το φαινόμενο δημιουργίας σφαιρών (balling phenomenon) και είναι ένα πολύ γνωστό μειονέκτημα του SLM. Το φαινόμενο «balling» καθιστά δύσκολη τη στοίβαξη των επόμενων στρωμάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλεί αποτυχία κατά την τρισδιάστατη εκτύπωση.²⁰²

- Άλλοι ερευνητές εκτός του οδοντιατρικού κλάδου, ανέφεραν ότι η επανάτηξη μιας επιφάνειας είναι μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη σημαντικής βελτίωσης στην τραχύτητα των κατασκευών SLM. Αυτή η τεχνική μπορεί να είναι εφαρμόσιμη σε κράματα Co-Cr, και αυτή η πιθανότητα μένει να διερευνηθεί.²⁰²



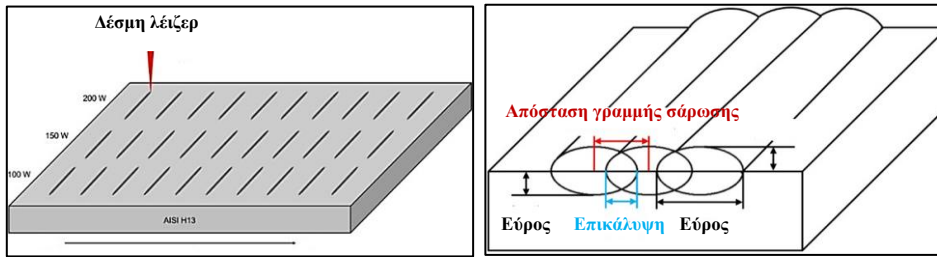


Εικόνα 6-16 Διάφορα σχήματα σφαιριδίων που παράγονται κατά τη δοκιμή σχηματισμού μίας γραμμής σε έξι διαφορετικές συνθήκες ($F = 1-5$ και 8). Όταν η ισχύς λέιζερ και ο ρυθμός σάρωσης είναι 200 W και $128,6\text{ mm/s}$, αντίστοιχα ($F = 4$), επιτυγχάνεται ένα βέλτιστο σχήμα σφαιριδίου. Όταν οι τιμές F αυξάνονται, αυξάνεται η μέση γωνία. Οι δύο γωνίες (α_1 και α_2) δείχνουν τη συμμετρία γραμμής, η οποία είναι ένα ευνοϊκό χαρακτηριστικό για την επικάλυψη των γραμμών. Όταν $F = 1-3$, η ζώνη τήξης είναι ασταθής λόγω του ρηχού βάθους διείδυσης (χαμηλή τιμή H_2), η οποία πιθανώς οφείλεται στον υπερβολικά υψηλό ρυθμό σάρωσης. Όταν αυξάνεται η τιμή F , η τιμή H_1 αυξάνεται αλλά η τιμή H_2 μειώνεται. Σε σταθερή ισχύ λέιζερ ($F = 1-4$), το πλάτος και το βάθος του ζωνών τήξης μειώθηκαν με ταχύτερους ρυθμούς σάρωσης. Το τελικό σχήμα και το μέγεθος της στερεοποιημένης σφαίρας καθορίζεται από εκείνα της ομάδας τήξης.²⁰²



Εικόνα 6-17 Φωτογραφία και χάρτης που δείχνει τα αποτελέσματα της δοκιμής σχηματισμού μίας γραμμής (α). Οι σφαίρες που ελήφθησαν κάτω από έξι διαφορετικές συνθήκες (F (αντικειμενική συνάρτηση) = $1-5$ και 8), οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την παραγωγή συνεχών και ομαλών γραμμών (τύπος 2). Φωτογραφία και χάρτης που δείχνει τα αποτελέσματα των δοκιμών σχηματισμού πολλών στρωμάτων (β). Εμφανίζονται επίσης οι επιφανειακές εικόνες της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης ($100\times$, γραμμή κλίμακας = $100\mu\text{m}$). Οι εικόνες οπτικής και τοπογραφίας (2D και 3D) λαμβάνονται από την ενδομετρία μετατόπισης φάσης Η βέλτιστη τήξη επιτεύχθηκε όταν η απόσταση της γραμμής σάρωσης ήταν $100\mu\text{m}$.²⁰²



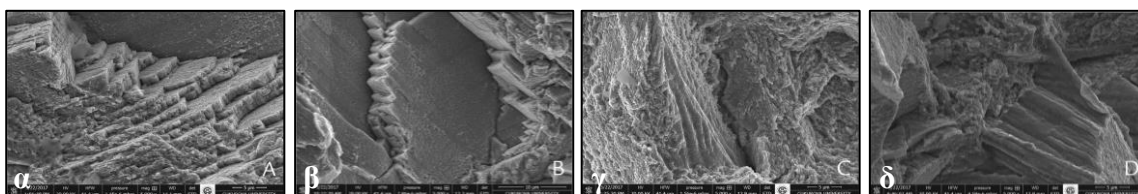


Εικόνα 6-18 Απεικόνιση δοκιμής μιας γραμμής (αριστερά) και πολλαπλών στρωμάτων δεξιά.²⁰²

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος είναι η ενέργεια εισόδου (E_i), υπολογιζόμενη ως P/V , όπου το P είναι ισχύς λέιζερ και V η ταχύτητα σάρωσης, είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας. Όσο αυξάνεται η ενέργεια εισόδου μέχρι τη τιμή των $0,36 \text{ J/s}$, τόσο αυξάνεται η πυκνότητα των σκελετών, καθώς οι μεταλλικές σκόνες τείνουν να λιώσουν πλήρως επιτυγχάνοντας έτσι ένα πλήρη μεταλλουργικό δεσμό μεταξύ των σωματιδίων. Ωστόσο, αύξηση της ενέργειας πάνω από την τιμή των $0,36 \text{ J/s}$, η πυκνότητα αρχίζει να μειώνεται λόγω της εξάτμισης των δεξαμενών τήξης.⁸⁸ Μια επιπλέον παράμετρος είναι η ενεργειακή πυκνότητα λέιζερ (LED) ή ενεργειακή πυκνότητα όγκου (E_v) η μπορεί να υπολογισθεί συνδυάζοντας τέσσερις κύριες παραμέτρους, δηλαδή την ισχύ λέιζερ P (W), την ταχύτητα σάρωσης V (mm/s), την απόσταση μεταξύ δύο επακόλουθων σαρώσεων λέιζερ h (mm) και το πάχος στρώσης d (mm). Η τιμή του LED υπολογίζεται ως εξής: $\text{LED} = P/(V \cdot h \cdot d) [\text{J}/\text{mm}^3]$. Αυτή η μέτρηση συσχετίζεται με το πορώδες, σκληρότητα, τη μικροδομή και την επιφανειακή μορφολογία των κραμάτων Co-Cr.^{88,110} Οι Takaichi και συν¹¹¹ (2013) ανέφεραν ότι πορώδεις δομές δημιουργούνται όταν η τιμή LED είναι $< 150 \text{ J}/\text{mm}^3$, ενώ όταν η είναι μεγαλύτερη από $400 \text{ J}/\text{mm}^3$ επιτυγχάνεται πυκνή πυροσυσσωμάτωση.^{110,111} Οι Qian και συν¹³⁶ (2016) ανέφεραν ότι η αντοχή στον εφελκυσμό αυξάνεται όταν η LED είναι $118 \text{ J}/\text{mm}^3$ από ότι $63 \text{ J}/\text{mm}^3$. Άλλοι ερευνητές ανέφεραν ότι έλλειψη σύντηξης και παρουσία μεγάλων ποσοτήτων πόρων σε τιμή $\text{LED} < 100 \text{ J}/\text{mm}^3$ και δημιουργία οπών (keyhole collapse) σε τιμές $\text{LED} > 200 \text{ J}/\text{mm}^3$, ενώ επισήμαναν ότι είναι σημαντικό να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης πυκνότητα σε επαρκή LED λόγω της αρνητικής επίδρασης του υψηλού πορώδους στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων SLM Co-Cr.¹¹⁰ Ακόμη, μελέτες έχουν δείξει ότι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες αποκτώνται για τιμές LED των $150\text{-}200 \text{ J}/\text{mm}^3$.⁸⁸

Όσον αφορά τώρα την εμπλοκή του παράγοντα πάχους στρώσης με τις παραπάνω παραμέτρους, έχει αναφερθεί ότι χαμηλή ισχύς λέιζερ, υψηλή ταχύτητα σάρωσης, και μεγάλο πάχος στρώματος μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκή ενέργεια για την τήξη της σκόνης.^{33,128} Δύο μελέτες δήλωσαν ότι η αύξηση του πάχους της στρώσης οδηγεί σε επιδείνωση της τελικής επιφάνειας καθώς και σε μειωμένη ακρίβεια και μηχανικές ιδιότητες. Ωστόσο, μια νεότερη μελέτη ανέφερε ότι η μείωση του πάχους στρώσης της σκόνης αυξάνει τις

μηχανικές ιδιότητες. Η πλέον νεότερη μελέτη ανέφερε ότι, ο τύπος της σκόνης ή/και το πάχος στρώσης δεν επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες (μέση αντοχή σε εφελκυσμό, μέσο όριο διαρροής 0,1 %, μέσο συντελεστή ελαστικότητας, μέσο ποσοστό επιμήκυνσης) του κράματος Co-Cr. Πάντως, σε ορισμένες σκόνες όσο αυξάνεται το πάχος στρώσης τόσο πιο εμφανής είναι το φαινόμενο της κλίμακας στη μικροδομή η οποία αποτελείται από ορισμένες κοκκώδεις περιοχές που παρεμβάλλονται στη μικροδομή κλίμακας η οποία έχει την όψη αιχμηρών ακμών. Ωστόσο, το φαινόμενο αυτό δεν συναντάται πάντα, δεδομένου ότι έχειδειχθεί ότι σε άλλες σκόνες δεν παρατηρούνται αιχμηρές ακμές (Εικόνα 6-19).²⁴¹ Πάντως, η τραχύτητα της επιφάνειας έχει αναφερθεί ότι είναι χαμηλότερη μειώνοντας το πάχος του στρώματος.^{19, 47, 128}



Εικόνα 6-19 SEM εικόνα (x 5000) επιφάνειας θραύσης κράματος Co-Cr ίδιας σκόνης που κατασκευάστηκε με DMLS, αλλά χρησιμοποιήθηκε πάχος στρώσης 20μm (α) και 30μm (β), όπου διακρίνεται η διαφορά στο φαινόμενο σκάλας. Στις αντίστοιχες επιφάνειες άλλη σκόνης ωστόσο δεν παρατηρούνται αιχμηρές ακμές και η μικροδομή είναι παρόμοια ανεξάρτητα από το πάχος στρώσης (γ, δ).²⁴¹

Ακόμη, διάφορες παράμετροι λέιζερ όπως η πηγή λέιζερ, η ισχύς λέιζερ που προαναφέρθηκε όπως και το μήκος κύματος μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη τήξη σκόνης. Τα λέιζερ που χρησιμοποιούνται είναι συχνά λέιζερ CO₂ ή λέιζερ ινών (Nd: YAG ή Yb: YAG) με ισχύ 200 έως 300 Watt. Ο Nd: YAG κρύσταλλος είναι ένα λέιζερ που χρησιμοποιείται συνήθως, ενώ ο κρύσταλλος Yb: YAG είναι νέος και έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης απορρόφησης, χαμηλότερη θερμική φόρτιση ανά μονάδα αντλίας ισχύος και μεγαλύτερο χρόνο ζωής από το Nd: YAG. Έτσι, το Yb: YAG αναμένεται να αντικαταστήσει το Nd: YAG.^{33,47}

6.2.4 Τύπος συσκευής

Οι διαφορετικές συσκευές πυροσυσσωμάτωσης [DMLS (EOSINT M 270, EOS GmbH) και DMLM (MYSINT 100, Sisma SpA)], επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος Co-Cr. Πιο αναλυτικά οι Ucar και συν¹⁵ (2018) ανέφεραν ότι στο DMLM σε σχέση με το DMLS οι μέσες τιμές: αντοχής σε εφελκυσμό ήταν υψηλότερες (1254,8 και 118,5 MPa, αντίστοιχα), συντελεστή ελαστικότητας ήταν χαμηλότερες (174,7 και 195,3 MPa, αντίστοιχα), εκατοστιαίας επιμήκυνσης ήταν υψηλότερες (3,2 % και 2,7 %, αντίστοιχα). Οι διαφορές αυτές ήταν διαφορετικές σε στατιστικά σημαντικό βαθμό, και αναμενόμενες καθώς το DMLM βασίζεται στην πλήρη τήξη των κόκκων σκόνης ενώ το DMLS είναι μια



μέθοδος μερικής τήξης συν του ότι η υψηλότερη θερμοκρασία τήξης που λαμβάνεται κατά την παραγωγή DMLM δημιουργεί σκελετούς με υψηλότερη πυκνότητα και μικρότερο πορώδες.¹⁵ Πράγματι, τόσο στο DMLS όσο και στο DMLM εμφανίστηκαν πορώδη (αν και αναμένεται η κατασκευή πυκνότερης δομής με το DMLM) και ιζήματα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν παράγοντες πρόκλησης θραύσης. Τα πορώδη μπορεί να δημιουργήθηκαν λόγω έλλειψης ενοποίησης μεταξύ των στρωμάτων ή λόγω γρήγορης κίνησης της δέσμης λέιζερ σε κάθε στρώμα όταν μια ακτίνα λέιζερ πηδά από το ένα σημείο στο άλλο μέσα στο ίδιο στρώμα. Τα ιζήματα μπορεί να δημιουργηθούν λόγω διαφορών στη θερμοκρασία τήξης, δηλαδή μιας ταχείας στερεοποίησης. Αν και τα ιζήματα αποτελούνται από τα ίδια στοιχεία των κραμάτων, έχουν παρατηρηθεί ποσοστιαίες διαφορές βάρους όπου σφαιρικά σωματίδια που μοιάζουν με μαργαριτάρι μπορεί να είναι ασύντηκτοι κόκκοι της σκόνης του κράματος.¹⁵

Οι Tuna και συν⁹² (2020) σύγκριναν την αντοχή στη διάβρωση δειγμάτων που κατασκευάστηκαν με πέντε διαφορετικά συστήματα πυροσυσσωμάτωσης με τις συνιστώμενες σκόνες κράματος Co-Cr, και βυθίστηκαν σε τεχνητό σάλιο και απιονισμένο νερό για 7 ημέρες. Οι μηχανές PBF και οι σκόνες κράματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, ProX 100-ST2724G (St-Pro), Mysint 100-EOS SP2 (SP2-Mys), EOSINT 270-EOS SP2 (SP2-EOS), SLM 100-Starbond CoS (SB-SLM) και MLab Cusing-Remanium® Star (RS-MLab), αντίστοιχα. Υπήρχε σταδιακή αύξηση της τάσης διάβρωσης τις πρώτες δύο έως τρεις ώρες μετά την εισαγωγή στο διάλυμα, ενώ το δυναμικό όλων των κραμάτων έγινε σχετικά σταθερό σε περίπου -0,2 V μετά από έξι ώρες λόγω της αργά σχηματισμένης ασταθούς στιβάδας οξειδίου. Οι τιμές δυναμικού ισορροπίας μετατοπίστηκαν σε δυναμικά που είναι πιο θετικά με την πάροδο του χρόνου, οδηγώντας σε μεγαλύτερη προστατευτική αντοχή. Το ST-Pro παρήγαγε ένα χαμηλότερο δυναμικό στρώμα οξειδίου αλλά δεν ήταν τόσο σταθερό όσο τα άλλα. Οι τιμές Eocp ήταν από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες ως εξής, SB-SLM, SP2-Mys, SP2-EOS, RS-MLab και ST-Pro, αντίστοιχα. Σε αυτή τη μελέτη, οι τιμές Rct μετά από 15 min βρέθηκαν σε παρόμοιο εύρος. Μετά από 1 h, τα αποτελέσματα EIS (και οι τιμές Rct) όλων των δειγμάτων ήταν κοντά μεταξύ τους. Συγκεκριμένα μετά από 1 h, τα δείγματα RS-MLab (7053 Ωcm²) είχαν την υψηλότερη τιμή Rct, ακολουθούμενα από τα SP2-Mys, SB-SLM, SP2-EOS και ST-Pro (4530 Ω.cm²). Κατά συνέπεια, η επιφανειακή όψη των δειγμάτων RS-MLab φάνηκε να σχηματίζει ένα πιο σταθερό στρώμα οξειδίου ανθεκτικό στη διάβρωση. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα Eocp και EIS, ένα λιγότερο σταθερό και ασταθές στρώμα οξειδίου των δειγμάτων ST-Pro μπορεί να προκύψει από τη σύνθεση της χρησιμοποιούμενης σκόνης κράματος. Αν και τα δείγματα SP2-Mys και SP2-EOS



παρήχθησαν από την ίδια σκόνη κράματος, σε αυτή τη μελέτη, μικρές διαφορές βρέθηκαν στις τιμές Eocp και EIS. Αυτές οι διαφορές μπορεί να οφείλονται στη διαφορά στο σύστημα PBF ή στις παραμέτρους λειτουργίας. Το συμπέρασμα ήταν ότι παρά το γεγονός ότι υπήρχαν μικρές διαφορές στην αντίσταση διάβρωσης (των τιμών Eocp και $R_{ct}/\Omega.cm^2$) μεταξύ των δειγμάτων κράματος Co-Cr που παράγονται με συστήματα PBF (μπορεί να οφείλονται στο περιεχόμενο των κραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, στα μεγέθη των σωματιδίων των σκονών και σε άλλους λόγους όπως οι παράμετροι λειτουργίας), η αντοχή στη διάβρωση όλων των δειγμάτων βρέθηκε να είναι αρκετά υψηλή και πληρούσε τις απαιτήσεις για υλικά οδοντικών αποκαταστάσεων τύπου 4 και 5 (ISO 22674).⁹²



Η μικροδομή και οι ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική της παραγωγής τους, και από την τυχόν θερμική κατεργασία που εφαρμοστεί. Ορισμένοι ερευνητές υπέβαλαν ένα CST κράμα Co-Cr στις 3 ακόλουθες θερμικές κατεργασίες και ανέφεραν τα εξής:

- Η αποτατική ανόπτηση ή αλλιώς ανόπτηση για ανακρυστάλλωση (ανακούφιση τάσεων) αποτελεί την μικρότερη περίοδο θερμικής κατεργασίας και έγινε ως εξής: τοποθέτηση των χυτών μέσα σε φούρνο θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ανύψωση της θερμοκρασίας μέχρι τους 850 °C για 30 λεπτά και άφεση για ελεύθερη επαναφορά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δείχθηκε ότι, η αποτατική ανόπτηση χαλάρωσε τις εσωτερικές τάσεις χύτευσης στους 800 °C και άνω και αυτή η χαλάρωση τους έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του εφελκυσμού και ορίου διαρροής με σύγχρονη ελάττωση της επιμήκυνσης. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι, η αποτατική ανόπτηση απαλλάσσει το χυτό από τις τάσεις, που έχουν δημιουργηθεί μετά από μια «εν ψυχρώ» πλαστική παραμόρφωση του κράματος, είτε από τις υπολειπόμενες εσωτερικές τάσεις που εγκλωβίστηκαν στο κράμα με την χύτευση διατηρώντας συγχρόνως την σκληρότητα και την ανθεκτικότητά του. Δηλαδή η ανόπτηση για ανακρυστάλλωση επαναφέρει τους κόκκους στην αρχική καλή τους κατάσταση (χωρίς εσωτερικές τάσεις και ατέλειες στα όρια), κάτι που σημαίνει αντοχή στη διάβρωση και καλές μηχανικές ιδιότητες χωρίς μεταβολή διαστάσεων.^{4,7} Σε μια μελέτη αναφέρθηκε ότι πρώτα πρέπει να δοκιμαστεί η ανόπτηση για να προσδιοριστεί εάν η ανακούφιση τάσεων στη δομή των κόκκων θα κάνει την αποκατάσταση να ταιριάζει τέλεια, και εάν όχι τότε πρέπει να κοπεί και συγκολληθεί, ήτοι, η θερμική κατεργασία επηρεάζει τη παραμόρφωση και την εφαρμογή.²⁰³
- Η γήρανση πραγματοποιήθηκε με παραμονή του χυτού στους 850 °C για 5 ώρες, σύμφωνα με την εξής διαδικασία: θέρμανση του κράματος σε μια θερμοκρασία όπου κατακρήμνιση μιας υπέρκορης φάσης μπορεί να γίνει και είναι η βάση του βιομηχανικού τρόπου θερμικής κατεργασίας, γνωστή σαν «σκλήρυνση λόγω γήρανσης». Με την γήρανση επέρχεται μια ανάλογη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων με αυτήν της



αποτατικής ανόπτησης, δηλαδή μικρή ακόμα αύξηση της αντοχής εφελκυσμού και του ορίου διαρροής και μικρή ελάττωση της επιμήκυνσης.^{4,7}

- Η διαδικασία διάλυσης έγινε με τοποθέτηση των χυτών σε κρύο φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 1260 °C για 15 min και εν συνεχεία ψύξη τους στον αέρα. Εκεί επιτεύχθηκε η διάλυση των καρβιδίων και των ελασματοειδών ευτηκτικών δομών με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της επιμήκυνσης και την μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και του ορίου διαρροής, καθώς και τη διάχυση των διαλυμένων καρβιδίων μέσα στην όλη δομή και τη διασκόρπιση τους μεταξύ των κόκκων. Απαιτείται προσοχή καθώς η υψηλή θερμοκρασία αποτελεί πιθανό λόγο για αλλαγή στη φάση και αποκρυστάλλωση του κράματος. Επιπλέον, κατά την κατεργασία αυτή, είναι ανάγκη, τα χυτά να προστατεύονται από την οξείδωση, και αυτό επιτυγχάνεται είτε με την θέρμανση τους μέσα σε αναγωγική ατμόσφαιρα ή στο εσωτερικό ενός δοχείου μέσα από το οποίο διέρχεται αδρανές αέριο (π.χ. αργόν), είτε με την επίστρωση των χυτών με στρώμα προφύλαξης πριν την τοποθέτηση στο φούρνο και το στέγνωμα τους με ζεστό αέρα (το υλικό αυτό απομακρύνεται μόνο του).^{4,7}
- Στην διαδικασία γήρανσης μετά τη διαδικασία διάλυσης, με παραμονή του χυτού για 5 ώρες στους 850 °C μετά τη διαδικασία διάλυσης, επέρχεται μια αύξηση της αντοχής του εφελκυσμού (η μεγαλύτερη από όλες τις θερμικές κατεργασίες), η οποία συνοδεύεται από μεγάλη πτώση της επιμήκυνσης. Για το λόγο αυτό, αυτή η θερμική κατεργασία δεν προτείνεται σε Μ.Ο. που η επιμήκυνση είναι μια βασική ιδιότητα.
- Στον Πίνακα 7-1 φαίνονται αναλυτικότερα η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων μετά από τις παραπάνω θερμικές κατεργασίες. Γενικά στα κράματα, κάθε αύξηση της αντοχής εφελκυσμού συνοδεύεται από πτώση της εκατοστιαίας επιμήκυνσης.^{4,7}

Πίνακας 7-1 Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων από την κατάσταση as-cast στην heat-treated.⁷

Κατάσταση	Αντοχή στον εφελκυσμό	Όριο διαρροής	Εκατοστιαία επιμήκυνση
As-cast με 15 λεπτά ψύξη στον αέρα	675 MPa	496 MPa	5,9 %
Αποτατική ανόπτηση	744 MPa	634 MPa	2,8 %
Γήρανση για 5 ώρες σε 850 °C	758 MPa	642 MPa	2,1 %
Κατεργασία διάλυσης για 30 λεπτά στους 1.260 °C	620 MPa	464 MPa	9,5 %
Γήρανση στις 5 ώρες στους 850 °C μετά τη διαλυτοποίηση.	841 MPa	802 MPa	1,8 %

Άλλοι ερευνητές εφάρμοσαν την εξής θερμική κατεργασία: παραμονή στους 1300 °C, 1600 °C, 1900 °C, 2200 °C για 15 λεπτά και μετά εμβάπτιση στο νερό. Δείχθηκε ότι οι καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιτυγχάνονται με τη σωστή χύτευση και ψύξη χωρίς θερμική κατεργασία η οποία δείχθηκε ότι προκάλεσε τη μείωση της αντοχής τους, ενώ η



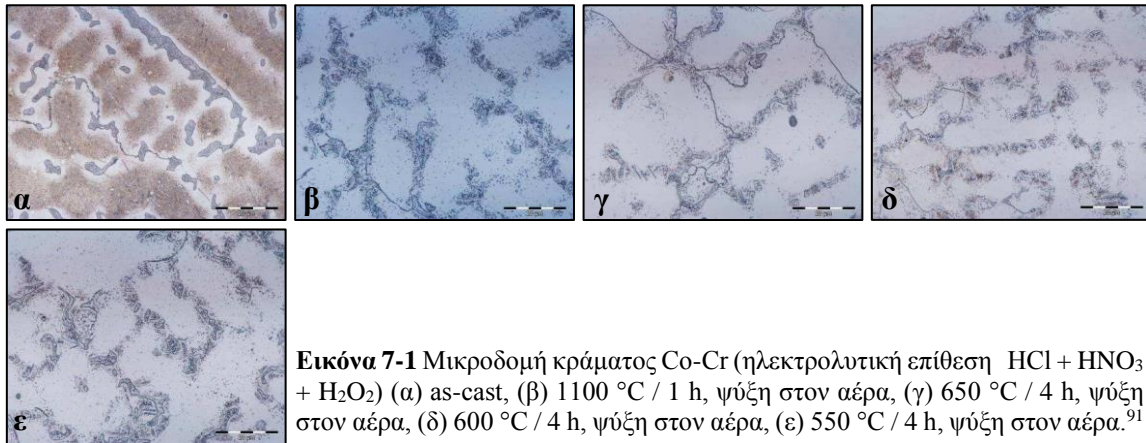
επιμήκυνση παρουσίασε διακύμανση. Το πρακτικό συμπέρασμα είναι ότι στα κράματα Co-Cr πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη θέρμανση ή υπερθέρμανση κατά τη διαδικασία συγκόλλησης και κατά τη διαδικασία λείανσης, επειδή η υπερθέρμανση προκαλεί μεταβολή της μικρόκοκκης δομής του κράματος αυξάνοντας το μέγεθος των κόκκων με αποτέλεσμα την μείωση της ελαστικότητας. Εξάλλου, η πίεση αυτή δεν είναι απαραίτητη, αφού η καλή στίλβωση του σκελετού δεν εξαρτάται από την δύναμη που ασκείται πάνω στο σκελετό από τον δίσκο, αλλά από τις στροφές του δίσκου και από την πείρα και την προσοχή του τεχνολόγου.^{4,7}

Μια ακόμη ομάδα ερευνητών, υπέβαλε CST κράματα Co-Cr στη διαδικασία του υπερκορεσμού. Τα δείγματα ανοπτήθηκαν σε κλίβανο ηλεκτρικής αντίστασης σε προστατευτική ατμόσφαιρα αργού σε θερμοκρασίες 1165, 1210, 1230, 1250 και 1270 °C για χρόνο: 30 λεπτά και 1, 2, 4, 8, 16, 32 και 64 ώρες, και αφού είχε περάσει ο απαιτούμενος χρόνος, ήταν υπερκορεσμένα στο νερό. Στη θερμοκρασία των 1165 °C, ακόμη και μετά από 64 ώρες ανόπτησης, τα καρβίδια δεν διαλύθηκαν, ενώ παρατηρήθηκε περαιτέρω καθίζηση γύρω από τα πρωτογενή καρβίδια (διαπιστώθηκε ότι πραγματοποιήθηκε μερικός μετασχηματισμός των πρωτογενών καρβιδίων τύπου $M_{23}C_6$ σε M_6C). Ο υπερκορεσμός από τη θερμοκρασία των 1210 °C, με μικρούς χρόνους ανόπτησης, προκάλεσε γρήγορη διάλυση των καρβιδίων, ενώ με τους μεγαλύτερους χρόνους ανόπτησης, ο ρυθμός διάλυσης των καρβιδίων μειώθηκε. Παρόλα αυτά, ο υπερκορεσμός των κραμάτων μετά από ανόπτηση 64 ωρών στους 1210 °C οδήγησε σε μια ομοιογενή μικροδομή των κραμάτων. Αυτό το αποτέλεσμα αποδόθηκε στο ότι τα καρβίδια $M_{23}C_6$ διαλύθηκαν κατά την πρώτη ώρα, ενώ τα καρβίδια M_6C , ήταν πιο σταθερά σε υψηλότερη θερμοκρασία και διαλύθηκαν πιο αργά. Σε περίπτωση υπερκορεσμού στους 1230 °C, ο μετασχηματισμός των καρβιδίων $M_{23}C_6$ σε M_6C πραγματοποιήθηκε εντός 15 λεπτών. Επίσης, παρατηρήθηκε ένας διαφορετικός μηχανισμός διάλυσης των καρβιδίων στα κράματα όπου τα καρβίδια διαλύθηκαν ταχύτερα. Διαπιστώθηκε ότι η διαδικασία διάλυσης καρβιδίων στους 1230 °C ελέγχθηκε με τη διάχυση των μεταλλικών στοιχείων κράματος στη μήτρα. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στους 1250 και 1270 °C έδειξαν ποικίλο ρυθμό διάλυσης καρβιδίου, που σχετίζεται με τον μακροδιαφορισμό των στοιχείων κράματος. Οι συγγραφείς της μελέτης απέδειξαν την ύπαρξη ενός φάσματος αντιδράσεων που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας που συνίσταται στον υπερκορεσμό του κράματος Co-Cr. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λαμβάνει χώρα η διάλυση των καρβιδίων με τον ρυθμό που ελέγχεται από τη διάχυση είναι πολύ στενή (1210-1230 °C) και εξαρτάται από τη σύνθεση του κράματος.²⁰⁴



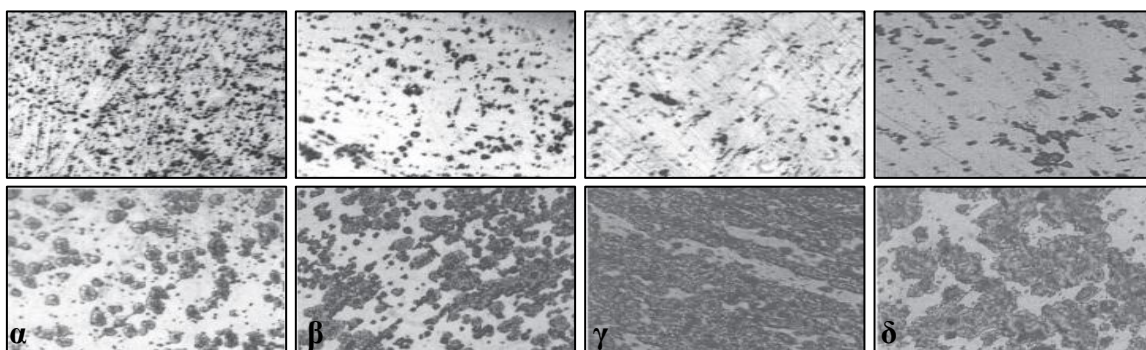
Άλλοι ερευνητές, μελέτησαν τη συμπεριφορά διάβρωσης CST κραμάτων Co-Cr σε κατάσταση as-cast και μετά από διάφορες θερμικές κατεργασίες (κατάσταση ανόπτησης), η οποία συνίσταται στη θέρμανση, περίπου στους 1100 °C / 1 h παραμονή και ψύξη στον αέρα που χρησιμοποιείται συνήθως για ομογενοποίηση της δομής. Οι άλλες καταστάσεις συνίστανται στη λεγόμενη ευαισθητοποίηση (sensibilization), που συνήθως εφαρμόζεται στο εύρος θερμοκρασιών περίπου 550-650 °C με παραμονή 4 ωρών και ψύξη στον αέρα (ήτοι 3 καταστάσεις δοκιμάστηκαν πλην της ανόπτησης α) 1100 °C / 1 h + 550 °C / 4 h, β) 1100 °C / 1 h + 600 °C / 4 h, γ) 1100 °C / 1 h + 650 °C / 4 h). Δείχθηκε ότι, η καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση επιτυγχάνεται με την κατάσταση ομογενοποίηση στους 1100°C/1h και ψύξη στον αέρα, ενώ ακολουθεί η κατάσταση as-cast και τέλος η ευαισθητοποιημένη κατάσταση που εμφανίζει τη χειρότερη αντίσταση στη διάβρωση και στην οποία το εύρος θερμοκρασιών (550-650 °C) που επιτυγχάνεται η χειρότερη αντίσταση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το κράμα [π.χ. στη συγκεκριμένη μελέτη, η χειρότερη αντίσταση στη διάβρωση για το ένα εκ των 2 κραμάτων (Co-Cr-Mo-Ti) που δοκιμάστηκαν ήταν στους 1100 °C / 1 h + 650 °C / 4 h, ενώ για το δεύτερο κράμα (Co-Cr-Mo) στους 550 °C / 4 h]. Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για την μικροδομή του κλασσικού κράματος Co-Cr-Mo φαίνονται στην Εικόνα 7-1 (δεν αναλύεται το κράμα Co-Cr-Mo-Ti διότι αποτελούσε ένα πειραματικό κράμα για τη συγκεκριμένη έρευνα). Όπως φαίνεται, στην κατάσταση as-cast η δομή αποτελείται από μη ομοιογενές στερεό διάλυμα Mo-Cr-Co και ενδοδενδριτικό ευτηκτικό, με πολύ μεγάλους κόκκους. Η εφαρμογή θερμικής κατεργασίας περίπου στους 1100 °C / 1 h μπορεί να καθορίσει μια καλή ομογενοποίηση της χυτευμένης δομής των κραμάτων, οι денδρίτες γίνονται λεπτότεροι και τα ιζήματα καρβιδίων είναι λεπτά και καλά διασκορπισμένα στη μήτρα. Από την άλλη πλευρά, η ευαισθητοποίηση στο εύρος θερμοκρασιών περίπου 550-650 °C μπορεί να καθορίσει την καθίζηση των καρβιδίων. Η καθίζηση των καρβιδίων κατά την ευαισθητοποίηση είναι πιο κυρίαρχη αυξάνοντας τη θερμοκρασία ευαισθητοποίησης, από 550 °C / 4 h, σε 600 °C / 4 h, δηλαδή συνεχώς μετά την ευαισθητοποίηση στους 650 °C / 4 h.⁹¹





Εικόνα 7-1 Μικροδομή κράματος Co-Cr (ηλεκτρολυτική επίθεση $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$) (α) as-cast, (β) $1100\text{ }^\circ\text{C} / 1\text{ h}$, ψύξη στον αέρα, (γ) $650\text{ }^\circ\text{C} / 4\text{ h}$, ψύξη στον αέρα, (δ) $600\text{ }^\circ\text{C} / 4\text{ h}$, ψύξη στον αέρα, (ε) $550\text{ }^\circ\text{C} / 4\text{ h}$, ψύξη στον αέρα.⁹¹

Το 2014, οι Minciunã και συν²⁰⁵ αφού υπέβαλαν CST κράματα Co-Cr στη θερμική κατεργασία της ομογενοποίησης στους $1100\text{ }^\circ\text{C}$ με παραμονή για 5 ώρες και ψύξη στο κλίβανο, παρατήρησαν ότι η μικροδομή των CST κραμάτων διέφερε μετά την θερμική κατεργασία (Εικόνα 7-2). Πιο αναλυτικά, τα κράματα Co-Cr που δεν υπέστησαν θερμική κατεργασία είχαν χονδροειδή και σχετικά ομοιόμορφη δομή σε σύγκριση με εκείνη των θερμικά επεξεργασμένων που αποτελούνταν από συσσωματώσεις χονδροειδών και λεπτών καρβιδίων. Ακόμη, η μικροδομή των as-cast κραμάτων παρουσίασε ενδοδενδριτικό διαχωρισμό των καρβιδίων και ευτηκτικά καρβίδια με σημειακή διάταξη, σε σύγκριση με τα θερμικά επεξεργασμένα που παρουσίασαν μη ομοιογενές άλφα διάλυμα με δενδριτική διάταξη, επιμήκη, με ενδοδενδρικά προσανατολισμένα ιζήματα. Όπως αναφέρθηκε, ο σκοπός της ομογενοποίησης είναι να βελτιώσει τη δομή της αρχικής ετερογενούς χύτευσης, και ο ρόλος της είναι να αφαιρέσει τους ενδοδενδρικούς και δενδριτικούς διαφορισμούς. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο, η άνιση δενδριτική δομή του κράματος επιστρέφει στην κανονική πολυεδρική δομή. Στις υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να συμβεί οξείδωση του υλικού, με σχηματισμό στρωμάτων οξειδίου του σιδήρου που μειώνει τη διάβρωση του υλικού.^{204,205}



Εικόνα 7-2 Κράμα Co-Cr σε κατάσταση as-cast (άνω οριζόντια) και σε κατάσταση heat-treated (κάτω οριζόντια), λύση επίθεσης: FeCl_3 σε μεγέθυνση 100 x (α), 200 x (β), 320 x (γ) και 500 x (δ).²⁰⁵

Σε μια ανασκόπηση αναφέρθηκαν τα εξής. Το πρόβλημα του ενδοδενδρικού πορώδους στα CST κράματα Co-Cr έχει ξεπεραστεί στις ορθοπεδικές εφαρμογές με την εφαρμογή ειδικών θερμικών κατεργασιών και θερμής ισοστατικής πίεσης (HIP), τεχνικές οι

οποίες επιτρέπουν την παραγωγή μιας ομοιογενούς και λεπτής δομής κόκκων με σημαντική αύξηση της αντοχής και ολκιμότητας. Δυστυχώς, η τελευταία τεχνική δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην οδοντιατρική λόγω των περιορισμών διαστάσεων. Πολλοί ερευνητές άρχισαν να διερευνούν την επίδραση διαφορετικών θερμικών επεξεργασιών για να βρουν έναν τρόπο επίλυσης του προβλήματος του μεγάλου μεγέθους κόκκων και της επίδρασής του στις ιδιότητες του κράματος. Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι, δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στη δομή των κόκκων μετά την ανόπτηση στους 850°C για 30 min και τη σκλήρυνση δια γήρανσης στους 850°C για 5 ώρες σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση. Η εξήγηση για αυτά τα ευρήματα ήταν η μικροπορώδης δομή των κραμάτων Co-Cr. Τέτοιες θερμικές κατεργασίες συνεπάγονται την ανακατανομή των καρβιδίων εντός της δομής, αλλά με μια αδρή δενδριτική και μικροπορώδη δομή, οι αλλαγές στην κατανομή καρβιδίων καθίστανται άνευ σημασίας. Σε μια άλλη διαδικασία ανόπτησης άλλων ερευνητών, χρησιμοποιώντας θερμική κατεργασία στους 704 °C, 871 °C, 1038 °C και 1204 °C για 15 λεπτά ακολουθούμενη από άμεση απόσβεση σε νερό, οι μικροδομές επιβεβαίωσαν τη διάλυση των υπαρχόντων καρβιδίων, ιδιαίτερα των μορφολογιών στα όρια των κόκκων. Γενικά, καθώς η θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας αυξήθηκε, η συνολική αντοχή του κράματος μειώθηκε, ενώ η επιμήκυνση αυξήθηκε ελαφρώς. Συμπερασματικά, είναι γενικά αποδεκτό ότι οι θερμικές επεξεργασίες χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση δεν μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την έκταση του μικροπορώδους, εξαλείφοντας τις δυσμενείς συνέπειές του.⁹

Η θερμική κατεργασία αλλάζοντας το κλάσμα όγκου των φάσεων, δημιουργεί μια πιο ομοιογενή δομή με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αυτό καθιστά δυνατή την απόκτηση καρβιδίων με την κατάλληλη διασπορά και μέγεθος και κατά συνέπεια επίσης καλή πλαστικότητα και υψηλές μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Το 2018, οι Augustyn-Nadzieja και συν²⁰⁴ υποβάλλοντας CST κράματα Co-Cr στις ακόλουθες διαδοχικές διαδικασίες θερμικής επεξεργασίας: ομογενοποίηση (1150°C / 2 h) (ονομασία H), ομογενοποίηση ακολουθούμενη από υπερκορεσμό (1150 °C / 2 h + 1200 °C / 2 h / H₂O) (ονομασία H + S) και ομογενοποίηση ακολουθούμενη από υπερκορεσμό και γήρανση (1150 °C / 2 h + 1200 °C / 2 h / H₂O + 850 °C / 1 h / αέρα) (ονομασία H + S + A), ανέφεραν τα εξής:

- Οι ληφθείσες εικόνες μικροδομών (Εικόνα 7-3) κατέστησαν δυνατή τη διαπίστωση ότι, ως αποτέλεσμα της ομογενοποίησης τα κράματα Co-Cr είχαν δενδριτική δομή, και μετά από τον υπερκορεσμό, καθώς και μετά τον υπερκορεσμό και γήρανση οι κόκκοι επεκτάθηκαν ενώ στην εσωτερική πλευρά των ορίων των κόκκων υπήρχαν καθιζήσεις φάσης καρβιδίου. Πιο αναλυτικά: η μικροδομή των κραμάτων as-cast ήταν η τυπική δενδριτική (Εικόνα 7-3 α), η οποία ήταν σχετικά ομοιογενής και αποτελούνταν από πολύ μεγάλους

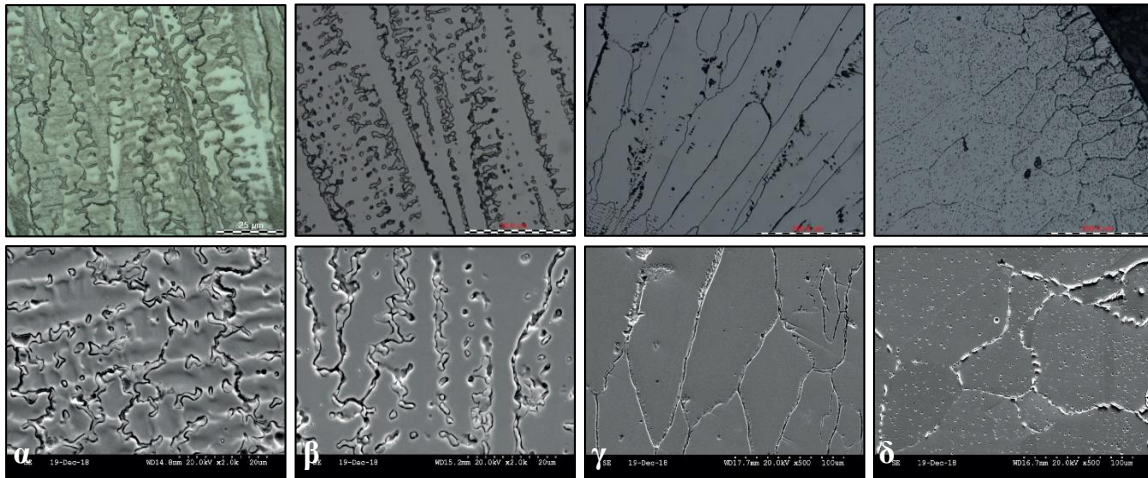


κρυστάλλους της μήτρας. Από την παρατήρηση της μικροδομής του κράματος Co-Cr που υπέστη ομογενοποίηση (H) (Εικόνα 7-3 β) φαίνεται ότι, οι δενδριτικοί βραχίονες είναι μακριοί και παρόμοια προσανατολισμένοι, ωστόσο μπορεί ακόμα να περιλαμβάνει ιζήματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε Cr, και έτσι συμπεραίνεται ότι μια μερική μείωση του μικροδιαφορισμού έλαβε χώρα (δηλαδή μια μερική ομογενοποίηση της χημικής σύνθεσης), και μπορεί να υποθεθεί ότι ο χρόνος ανόπτησης (2 ώρες) ήταν ανεπαρκής για να επιτευχθεί ολική ομογενοποίηση του κράματος. Από την παρατήρηση της μικροδομής του κράματος Co-Cr που υπέστη ομογενοποίηση και υπερκορεσμό (H + S) (Εικόνα 7-3 γ) φαίνεται ότι χαρακτηρίζεται από διογκωμένους κόκκους, στη μήτρα του κράματος δεν παρατηρούνται δενδριτικά συστήματα, και η ομογενοποίηση του κράματος είναι ορατή. Μικρά ακανόνιστα ιζήματα υπήρχαν στα όρια των κόκκων με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο, τα οποία με βάση τη βιβλιογραφία είναι καρβίδια χρωμίου, που είναι μη πλήρως διαλυμένα, γεγονός που αποδεικνύει τον μερικό υπερκορεσμό του κράματος. Στην μικροδομή του κράματος Co-Cr (Εικόνα 7-3 δ) που υπέστη ομογενοποίηση ακολουθούμενη από υπερκορεσμό και γήρανση (H + S + A), παρατηρήθηκαν κόκκοι που είναι μικρότεροι στην επιφάνεια και μεγαλύτεροι προς το στο εσωτερικό του υλικού. Εντός των κόκκων υπήρχαν κενά από την ομοιόμορφη κατανομή των ιζημάτων, ενώ μικρά ακανόνιστα ιζήματα υπήρχαν επίσης στα όρια των κόκκων με υψηλή περιεκτικότητα σε Cr (βάσει βιβλιογραφίας είναι τα $M_{23}C_6$). Είναι δυνατό να υποθεθεί ότι πρόκειται για μη διαλυμένα ιζήματα καρβιδίων, και των δύο τύπων $M_{23}C_6$ και M_6C . Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα ιζήματα καρβιδίου χρωμίου τύπου $M_{23}C_6$ είναι αποτέλεσμα γήρανσης του κράματος. Πάντως, μικρά ακανόνιστα ιζήματα με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο ($M_{23}C_6$) στα όρια των κόκκων βρέθηκε τόσο στην περίπτωση του H + S όσο και του H + S + A κράματος.

- Η σκληρότητα κατά φθίνουσα σειρά ήταν για τις τεχνικές H + S + A (411 HV10), H (389 HV10), CST (385 HV10) και H + S (347 HV10). Η υψηλότερη σκληρότητα μετά τη γήρανση του κράματος (H + S + A) είναι αποτέλεσμα της παρουσίας ομοιόμορφα κατανεμημένων, σκληρών σε διασπορά δευτερογενών ιζημάτων καρβιδίων στη μικροδομή του, που σχηματίστηκαν κατά τη διαδικασία γήρανσης, τα οποία ενισχύουν σημαντικά το κράμα. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή τιμή της σκληρότητας του κράματος μετά τον υπερκορεσμό (H + S) πιθανώς προκύπτει από ένα μέρος των καρβιδίων που διαλύονται στο διάλυμα.
- Οι θερμικές κατεργασίες δείχθηκε ότι δεν επιδεινώνουν τις παθητικές ιδιότητες του με αποτέλεσμα η αντίσταση στη διάβρωση μετά από τις θερμικές κατεργασίες να είναι

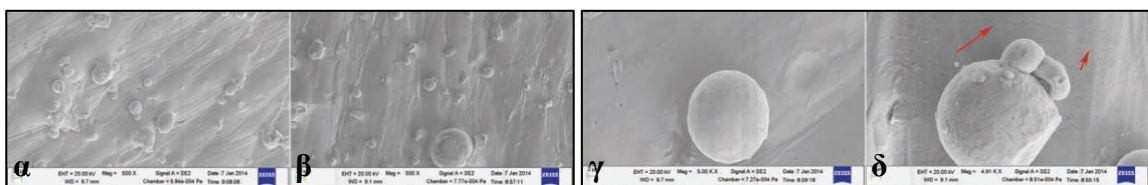


υψηλότερη από ότι στο κράμα as-cast. Η αντίσταση στη διάβρωση κατά φθίνουσα σειρά ήταν για την τεχνικές H, H + S, H + S + A με τελευταία τη CST.²⁰⁴



Εικόνα 7-3 Μικροδομές του κράματος Co-Cr (πάνω οριζόντια – φωτογραφίες χαμηλής μεγέθυνσης, κάτω οριζόντια – φωτογραφίες SEM): α) δείγματα as-cast, β) ομογενοποίηση (H), γ) ομογενοποίηση και υπερκορεσμός (H + S), δ) ομογενοποίηση ακολουθούμενη από υπερκορεσμό και γήρανση (H + S + A).²⁰⁴

Μετά τη διαδικασία κατασκευής PBF, απαιτούνται 3 διαδικασίες μετα-επεξεργασίας. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται: α) η αφαίρεση-καθαρισμός των σωματιδίων ασύντηκτης-χαλαρής σκόνης από τον επεξεργασμένο σκελετό, β) η αφαίρεση των αχρείαστων δομών υποστήριξης που συνδέουν το σκελετό στη πλατφόρμα κατασκευής, και γ) η προετοιμασία του σκελετού για θερμική κατεργασία συνήθως σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή για την ανακούφιση των υπολειμματικών τάσεων και για τη βελτίωση των μηχανικών και μικροδομικών ιδιοτήτων, συν του ότι έχει πολύ σημαντικά αποτελέσματα στη δομή των κόκκων του επεξεργασμένου υλικού.¹¹ Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι θεωρείται απαραίτητη,⁸⁸ έχει συνδεθεί και με τη διάβρωση των κραμάτων, καθώς σε μια παλαιότερη έρευνα, τα θερμικά κατεργασμένα κράματα πριν δοκιμαστούν για την in vitro στοιχειακή απελευθέρωση, έδειξαν ρωγμές σε υψηλές μεγεθύνσεις (Εικόνα 7-4 δ), οι οποίες συνέβαλαν πιθανώς στην αυξημένη στοιχειακή απελευθέρωση ($p < 0,01$) τους.⁹⁶



Εικόνα 7-4 SEM του SLM κράματος Co-Cr, 500x (α) του θερμικά κατεργασμένου, 500 x (β) του μη θερμικά κατεργασμένου, 5000 x (γ) του θερμικά κατεργασμένου χωρίς ρωγμές, 5000 x (δ) του θερμικά κατεργασμένου με ρωγμές (βέλη).⁹⁶

Μια ομάδα ερευνητών το 2018 στα κράματα DMLS, απέδειξε ότι επιτυγχάνεται η εξάλειψη της δενδριτικής μικροδομής και του μικροδιαφορισμού μετά από θερμική κατεργασία (θέρμανση στο φούρνο από τη θερμοκρασία δωματίου) στους 1150 °C, παραμονή σε αυτήν για 1 ώρα και ψύξη σε νερό. Επιπλέον, δείχθηκε ότι, εάν στην παραπάνω θερμική



κατεργασία εφαρμοστεί επιπλέον ισοθερμική θερμική κατεργασία στους 800 °C για 4 h και έπειτα ψύξη σε νερό, τότε αυξάνεται η αντοχή στον εφελκυσμό και το όριο διαρροής λόγω του σχηματισμού με διάχυση (diffusely formed) μιας hcp ε φάσης, λεπτώς κατανεμημένης στην μήτρα fcc γ . Σημειώθηκε ότι η έναρξη και η διάδοση ρωγμών συμβαίνουν κατά προτίμηση στον ϵ μαρτενσίτη.⁸⁸

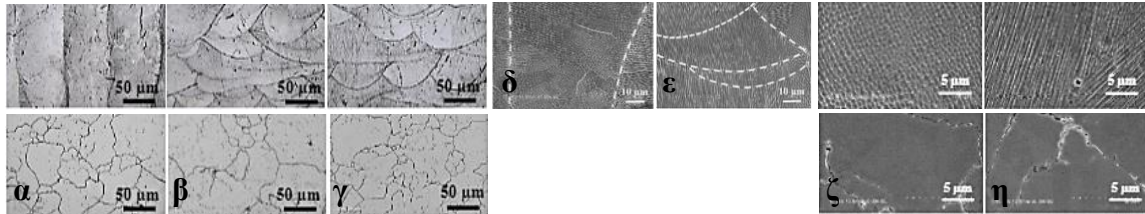
Ανάλογα με τις συνθήκες θερμικής κατεργασίας, τα κράματα υφίστανται ανακούφιση-αποκατάσταση (recovery), ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη, και κατά συνέπεια, οι κόκκοι αλλάζουν. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, η ενέργεια αποθηκεύεται κυρίως στο υλικό με τη μορφή εκτοπίσεων (μάλιστα έχει αναφερθεί ότι υψηλές πυκνότητες εκτοπίσεων υπάρχουν στα όρια των κυτταρικών δενδριτικών δομών⁸⁸), οι οποίες θεωρούνται ως κρυσταλλογραφικές θέσεις ελαττωμάτων. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανακούφισης, οι κόκκοι μειώνουν την αποθηκευμένη ενέργεια είτε αφαιρώντας είτε αναδιατάσσοντας ελαττώματα όπως εκτοπίσεις εντός της κρυσταλλικής δομής. Η εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης αφαιρείται καθώς τα άτομα μετακινούνται από τις περιοχές υψηλότερων τάσεων στις περιοχές χαμηλότερων τάσεων. Ενώ η θερμική επεξεργασία πρέπει να πραγματοποιείται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες που επιτρέπουν την ατομική κινητικότητα, θα πρέπει να πραγματοποιείται για μικρό χρονικό διάστημα, προκειμένου να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη κόκκων, που σχετίζονται με απώλεια αντοχής.^{88,110} Ερευνητές το 2018 και οι Takaichi και συν²⁰⁶ (2020) εφάρμοσαν την εξής θερμική κατεργασία: θέρμανση στο φούρνο από τη θερμοκρασία δωματίου στους 750, 900, 1050 ή 1150 °C (ρυθμός ανόδου 60 °C/min) και παραμονή στην καθορισμένη θερμοκρασία για 6 ώρες, παύση της θέρμανσης και όταν η θερμοκρασία έχει μειωθεί στους περίπου 300 °C άνοιγμα της πόρτας του φούρνου. Δείχθηκε ότι η ανακούφιση των τάσεων ξεκινάει μετά από θερμική κατεργασία στους 1050 °C ή λιγότερο για 6 h, όμως η θερμική κατεργασία σε θερμοκρασίες κάτω των 1050 °C είναι ανεπαρκής για την εξάλειψη των ανισοτροπικών στηλοειδών κόκκων, της ινώδους υφής και των υπολειμματικών τάσεων, παρόλο που η αύξηση της θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας από τους 750 °C στους 1050 °C μειώνει τις δενδριτικές δομές και τον αριθμό των υποκόκκων (ο σχηματισμός των υποκόκκων προήλθε από τις εκτοπίσεις οι οποίες αναδιατάχθηκαν κατά τη διάρκεια της ανακούφισης και στη συνέχεια μετατράπηκαν σε όρια-μικρής γωνίας, οδηγώντας στο σχηματισμό υπο-κόκκων). Αντίθετα, η ανακρυστάλλωση μέσω θερμικής επεξεργασίας στους 1150 °C για 6 h ομογενοποιεί τη μικροδομή όπου λόγω της ανακρυστάλλωσης, αντί των στηλοειδών κόκκων με <001> ινώδη υφή και των ιχνών MPBs (μάλιστα στις 0° τα MPBs φαίνονται σαν λωρίδες από τα ίχνη της τετηγμένης δεξαμενής παράλληλα προς την κατεύθυνση σάρωσης) που επικρατούν στην κατάσταση as-



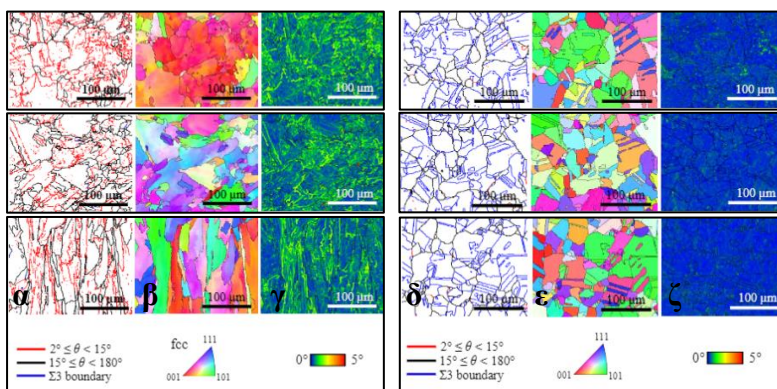
built, εμφανίζει νέους ισοαξονικούς κόκκους (Εικόνα 7-5) που έχουν έναν αριθμό Σ3 δίδυμων ορίων ανόπτησης και έχουν νέους ομοιόμορφα κατανεμημένους τυχαίους κρυσταλλικούς προσανατολισμούς με τυχαία υφή (Εικόνα 7-6 β, ε) και δεν υπάρχουν τα MPBs, ενώ παράλληλα εξαλείφει τις υπολειμματικές τάσεις (υπολειπόμενη πλαστική παραμόρφωση μέσα στους κόκκους) (Εικόνα 7-6 γ, ζ) και επιτρέπει τη μείωση των ανισοτροπικών μηχανικών ιδιοτήτων (ομοιογενή ισοτροπική μικροδομή). Ακόμη, αύξηση της θερμοκρασίας θερμικής επεξεργασίας από 750 °C σε 1150 °C, αυξάνει την ολκιμότητα του κράματος και μειώνει το όριο διαρροής 0,2 % και τη σκληρότητα Vickers.⁸⁸ Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-6, στα δείγματα as-built στον χάρτη GB, τα όρια υψηλής γωνίας με γωνίες διαφορετικού προσανατολισμού (misorientation) μεγαλύτερες από 15°, τα όρια χαμηλής γωνίας (LABs) με γωνίες διαφορετικού προσανατολισμού 2-15° και τα όρια Σ3 αντιπροσωπεύονται από μαύρες, κόκκινες, και μπλε γραμμές, αντίστοιχα. Το σχήμα κόκκου κάθε δείγματος άλλαξε ανάλογα με τη γωνία κλίσης προς την κατεύθυνση κατασκευής. Τα δείγματα των 90° είχαν στηλοειδείς κόκκους που ήταν παράλληλοι προς την κατεύθυνση z. Το τμήμα διατομής των στηλοειδών κόκκων κατανεμήθηκε στα δείγματα 0° κάθετα προς την κατεύθυνση z. Έτσι, οι κόκκοι δείγματος 0° τείνουν να είναι σε ισορροπία. Οι χάρτες GB για όλα τα δείγματα έδειξαν ότι πολλά υπο-GBs σχηματίστηκαν μέσα στους κόκκους. Σχετικά υψηλές τιμές KAM παρατηρήθηκαν στους κόκκους και στα GBs, ειδικά στο δείγμα 0°. Αντίθετα, στην κατάσταση heat-treated παρατηρήθηκαν ομοιόμορφα χρωματισμένοι κόκκοι για όλα τα δείγματα. Οι τιμές KAM ήταν πολύ χαμηλότερες από εκείνες των as-built δειγμάτων και τα δείγματα που υπέστησαν θερμική επεξεργασία στους 750, 900 ή 1050 °C, υποδεικνύοντας ότι η ανισοτροπία του σχήματος κόκκου εξαφανίστηκε και δεν υπήρχε εμφανής εσωτερικός διαφορετικός προσανατολισμός. Σε όλα τα δείγματα, τα όρια Σ3 ήταν κυρίαρχα, και αντίστοιχα, το κλάσμα των ορίων χαμηλής γωνίας μειώθηκε σχεδόν στο μηδέν.²⁰⁶ Αντίθετα, ορισμένες άλλες μελέτες έχουν αναφέρει ότι η ανακρυστάλλωση συμβαίνει στο κράμα SLM Co-Cr μετά από θερμική επεξεργασία στους 1150 °C για 1 h ή στους 1220 °C.¹¹⁰ Πάντως, ερευνητές το 2019, ανέφεραν ότι η ανακρυστάλλωση των κραμάτων στους 1150 °C ακόμη και για 1 h προκαλεί ομογενοποίηση στη μικροδομή και οι ανισοτροπικοί στηλοειδείς κόκκοι, οι δενδριτικές δομές και οι υπο-κόκκοι στα δείγματα με όλες τις γωνίες δόμησης μετασχηματίζονται σε ομοιόμορφους ισοαξονικούς κόκκους χωρίς εμφανή εσωτερικό διαφορετικό προσανατολισμό, ενώ η υπολειπόμενη παραμόρφωση εντός των κόκκων ανακουφίζεται ως αποτέλεσμα της θερμικά επαγόμενης ανακρυστάλλωσης, η οποία πιθανώς οδηγείται από την ενέργεια της παραμόρφωσης που αποθηκεύεται στη μικροδομή από τις διαφορετικές θερμικές συστολές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας PBF.⁸⁸ Αυτό δείχνει ότι μια



κατάλληλη θερμοκρασία είναι πιο σημαντική από ότι ο χρόνος θερμικής επεξεργασίας, για τη μείωση των υπολειπόμενων τάσεων στη διαδικασία ανακρυστάλλωσης. Επιπλέον, καθώς η αντοχή και η σκληρότητα μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον έλεγχο του βαθμού ανακρυστάλλωσης και ανάπτυξης.¹¹⁰



Εικόνα 7-5 Στις άνω οριζόντιες διακρίνονται τα κράματα στην κατάσταση as-built, και στις κάτω οριζόντιες μετά από θερμική κατεργασία 1150 °C για 6 h. Στις CLSM εικόνες α, β και γ διακρίνονται τα δείγματα στις 0°, 45° και 90° γωνία κατασκευής. Στις SEM εικόνες δ, ε φαίνονται οι μορφολογίες των σπηλοειδών ή κυτταρικών δενδριτικών δομών και τα ίχνη των ορίων τετηγμένης δεξαμενής στην κατάσταση as-built: (δ) 0° και 90° (ε). Στις SEM εικόνες ζ και η διακρίνονται τα δείγματα στις 0° και 90° γωνία κατασκευής, όπου στα as-built 0° παρατηρούνται λεπτές κυτταρικές δενδριτικές δομές με διάμετρο 0,5-1 μm και αντίθετα στα as-built 90° παρατηρούνται λεπτές σπηλοειδείς δενδριτικές δομές με διάμετρο 0,5-1 μm και έτσι όπως αναμενόταν, οι λεπτές κυτταρικές δενδριτικές δομές αντιστοιχούσαν στη διατομή των σπηλοειδών δενδριτών, που αναπτύχθηκαν κατά μήκος της κατεύθυνσης κατασκευής.²⁰⁶



Εικόνα 7-6 Στις εικόνες α-γ απεικονίζεται το δείγμα στην κατάσταση as-built, και στις εικόνες δ-ζ στη κατάσταση heat-treated στους 1150 °C για 6 h. Οι άνω οριζόντιες εικόνες αντιστοιχούν στα δείγματα 0°, οι μεσαίες στα 45° και οι κάτω οριζόντιες στα 90°. Στις εικόνες as-built, απεικονίζονται τα αποτελέσματα EBSD των GB, IPF, και KAM, που αντιπροσωπεύονται από τους αριθμούς α, β, γ αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες εικόνες απεικονίζονται και μετά τη θερμική κατεργασία (δ-ζ).²⁰⁶

Από αρκετές έρευνες έχει δειχθεί επίσης ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει επίσης τον μετασχηματισμό φάσης FCC → HCP και οι αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων SLM Co-Cr εξαρτώνται κυρίως από τις αλλαγές στο κλάσμα φάσης της ψαθυρής φάσης HCP.¹¹⁰ Με τη μείωση της HCP φάσης μετά τη θερμική επεξεργασία, η αντοχή (όριο διαρροής και μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό) και η σκληρότητα μειώνονται ενώ η ολκιμότητα αυξάνεται, και μάλιστα οι μεταβολές είναι πιο έντονες όσο αυξάνεται η θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας (Πίνακας 7-2).^{88,110} Πάντως, μετά το κύριο στάδιο κατασκευής, δηλαδή την τήξη της σκόνης του ακατέργαστου κράματος και να την ταχεία στερεοποίηση, ο στερεοποιημένος όγκος περνά έναν συνεχή χρονοεξαρτώμενο-μετασχηματισμό. Κατά τη

διάρκεια της ψύξης, ο παρατηρούμενος όγκος υποβάλλεται σε αρκετούς κύκλους μετά το σχηματισμό πρόσθετων στρώσεων πάνω από τον παρατηρούμενο όγκο. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι ένα σημαντικό κλάσμα φάσης ε-Co να δημιουργηθεί, ακόμη και σε μονοφασικές δομές, μέσω αλλαγών στη διαδικασία που διεξάγεται.¹⁸⁰

Πίνακας 7-2 Μηχανικές ιδιότητες κραμάτων SLM που υπέστησαν θερμική κατεργασία.¹¹⁰

Ερευνητική ομάδα	Θερμική Κατεργασία	Προσανατολισμός κατασκευής	Μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό (MPa)	Όριο διαρροής 0,2 % (MPa)	Σκληρότητα (HV)	Επιμήκυνση (%)
Ερευνητές (2018)	As-built	Διαμήκης	1173±25	839±32	477±9	12,3±2,8
	750 °C, 1 h*		1097±11	953±16	498±2	3±0,5
	900 °C, 1 h		1071±14	793±25	495±10	5,8±0,9
	1050 °C, 1 h		1075±11	738±4	428±9	11,4±0,7
	1150 °C, 1 h		1007±32	614±11	365±11	16,3±1,4
Ερευνητές (2020)	As-built	Διαμήκης	1142±21	672±24	-	8,0±0,2
	750 °C, 1 h		1279±16	1019±33	-	4,1±0,3
	850 °C, 1 h		1463±19	1258±27	-	1,7±0,2
	950 °C, 1 h		1228±21	973±14	-	1,6±0,2
	1050 °C, 1 h		1189±20	754±19	-	10,1±0,3
	1150 °C, 1 h		920±14	516±18	-	12,2±0,4
Ερευνητές (2020)	As-built	Διαμήκης	1113±25	795±11	-	9,8±2,8
	As-built ΟΠ** -Κατ		1325±11	1080±14	-	3,2±0,9
	850 °C, 1 h ΟΠ** -Κατ		1366±32	1056±16	543,7	4,33±2,59
	950 °C, 1 h ΟΠ** -Κατ		1410±11	914±25	557,9	6,05±0,53
	1050 °C, 1 h ΟΠ** -Κατ		1458±14	956±11	537,6	7,73±0,97
	1150 °C, 1 h ΟΠ** -Κατ		1296±11	816±4	402,6	12,20±0,77

*h: hour = ώρα

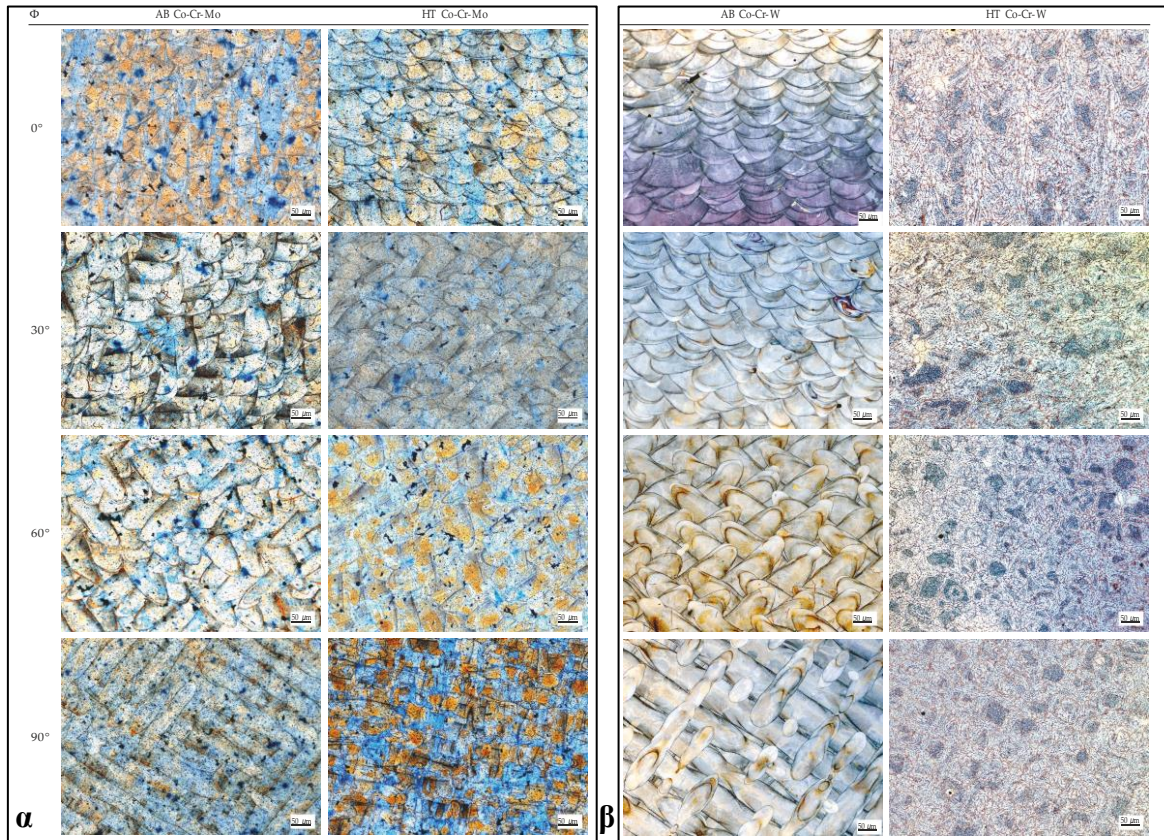
**ΟΠ: τα προγράμματα Όπτησης Πορσελάνης περιλαμβάνουν την απαερίωση και την οξειδωση, την αδιαφανή πορσελάνη, το σώμα, και την αδαμαντίνη.

Το 2018 οι Hitzler και συν¹⁸⁰ διερεύνησαν τις ιδιότητες εφελκυσμού (μέτρο Young – E, όριο διαρροής - R_{p0,2}, επιμήκυνση στη θραύση – A_t, και μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό – R_m), τη σχετική πυκνότητα και τη σκληρότητα (μικρο-HV5, και μάκρο-HV20), στην κατάσταση as-built και heat-treated δύο κραμάτων (Co-Cr-Mo, και Co-Cr-W) που



κατασκευάστηκαν με γωνίες δόμησης 0° , 30° , 60° , 90° . Στην κατάσταση as-built εντοπίστηκε το σχήμα στοίβαξης (stacking) μεμονωμένων σφαιριδίων-συγκόλλησης καθώς η εφαρμοζόμενη στρατηγική ακτινοβολήσης ελέγχει τις μικρογραφίες (Εικόνα 7-7 α, β αριστερή στήλη). Λόγω της ταχύτητας ψύξης στην SLM, δεν είναι εμφανείς μεγάλοι κόκκοι ή δενδριτικές δομές. Επιπλέον, η μετασταθής γ -Co φάση είναι παρούσα στην κατάσταση as-built. Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές η φάση ε -Co υπάρχει μόνο μετά από μια θερμική κατεργασία και το κλάσμα όγκου μεταξύ γ -Co και ε -Co ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας, με την γ -Co να παραμένει ως η κυρίαρχη φάση ($\geq 75\%$ κλάσμα όγκου). Ο μετασχηματισμός της φάσης γ -Co σε ε -Co εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, και για τις λεπτόκοκκες δομές (όπως συμβαίνει στην SLM), αυτός ο μετασχηματισμός καταστέλλεται, με αποτέλεσμα την κυριαρχία της γ -Co. Μετά την υποβολή του κράματος Co-Cr-Mo σε έναν σύντομο και οικονομικά αποδοτικό κύκλο θερμικής επεξεργασίας στους 800°C για 20-25 min, παρουσίασε βελτιωμένες ιδιότητες εφελκυσμού και τιμές HV, και συγκεκριμένα σημαντικά βελτιωμένη E και ελαφρώς αυξημένη $R_{p0,2}$, A_t , R_m και HV, όμως η διαδικασία δεν ομογενοποίησε τη μικροδομή του κράματος. Από την άλλη η θερμική κατεργασία του Co-Cr-W, ήτοι αργή θέρμανση (400°C/h) μέχρι τους 1150°C , παραμονή για 1 ώρα και μετά ψύξη σε κλίβανο στους 300°C , οδήγησε σε σημαντικά ισοτροπικά χαρακτηριστικά με αυξημένα E και A_t (εκτός από $\Phi 90^\circ$) σε αντίθεση με τις μειωμένες τιμές $R_{p0,2}$, R_m και HV, σε σύγκριση με τη κατάσταση as-built. Παρομοίως, το σχήμα στοίβαξης (stacking) μεμονωμένων σφαιριδίων-συγκόλλησης της κατάστασης as-built του Co-Cr-W αφαιρέθηκε κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, η οποία οδήγησε σε πλήρη ανακρυστάλλωση της μικροδομής (Εικόνα 7-7 β δεξιά). Στον Πίνακα 7-3 φαίνονται πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων εφελκυσμού στη συγκεκριμένη έρευνα. Και τα δύο κράματα παρουσίασαν μικροδομές χωρίς ελαττώματα με σχετική πυκνότητα άνω του $99,5\%$, ενώ η θερμική κατεργασία δεν επηρέασε τη σχετική πυκνότητα. Πάντως, και τα δύο κράματα παρουσίασαν αυξημένη E μετά από θερμική επεξεργασία, η οποία σχετίστηκε με την αυξημένη αναλογία της ε -Co. Οι διαφορές στις τιμές E για τα δύο κράματα οφείλονται πιθανώς σε διαφορετικούς λόγους γ -Co προς ε -Co στην αντίστοιχη δομή. Πάντως σημειώθηκε ότι το περιεχόμενο φάσης δεν είναι απόλυτο, και μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού μέσω μετασχηματισμού φάσης και το κλάσμα ε -Co μπορεί να αυξηθεί.¹⁸⁰





Εικόνα 7-7 Μικροδομή κραμάτων Co-Cr-Mo (α) και Co-Cr-W (β), στην κατάσταση AB: As-Built και HT: Heat-Treated υπό διαφορετικές γωνίες κατασκευής.¹⁸⁰

Πίνακας 7-3 Ιδιότητες εφελκυσμού των κραμάτων Co-Cr-Mo και Co-Cr-W.¹⁸⁰

Κράμα- Κατάσταση-Φ [°]	E [GPa]		Rp0.2 [MPa]		Rm [MPa]		At [%]	
	Μέση	ΤΠ	Μέση	ΤΠ	Μέση	ΤΠ	Μέση	ΤΠ
Co-Cr-Mo 0°_AB	98,38	17,01	702	15,4	5,7	1,04	923	32,4
Co-Cr-Mo 0°_HT	156,48	19,50	819	29,1	13,3	2,32	1097	21,6
Co-Cr-Mo 30°_AB	105,32	19,39	783	23,7	6,7	1,94	1102	45,2
Co-Cr-Mo 30°_HT	149,73	6,29	1002	41,1	8,3	0,81	1262	14,1
Co-Cr-Mo 60°_AB	112,11	58,51	696	34,3	7,5	2,10	1012	24,0
Co-Cr-Mo 60°_HT	105,67	13,18	808	37,8	9,4	1,32	1054	20,9
Co-Cr-Mo 90°_AB	100,21	6,95	674	9,0	14,8	1,62	1033	12,4
Co-Cr-Mo 90°_HT	164,54	15,10	757	7,2	16,7	1,51	1052	6,3
Co-Cr-W 0°_AB	183,44	15,58	917	9,9	11,1	1,14	1263	8,6
Co-Cr-W 0°_HT	216,32	21,99	655	26,6	15,0	1,54	1111	8,9
Co-Cr-W 30°_AB	147,50	20,57	965	5,9	10,4	1,31	1272	10,3
Co-Cr-W 30°_HT	186,96	7,90	651	4,9	15,5	1,04	1127	12,3
Co-Cr-W 60°_AB	167,17	26,23	845	11,1	17,1	1,35	1247	6,1
Co-Cr-W 60°_HT	214,51	29,25	669	20,0	18,0	2,90	1162	13,4
Co-Cr-W 90°_AB	138,55	6,93	755	8,7	24,3	0,70	1188	6,3
Co-Cr-W 90°_HT	202,35	22,08	658	7,1	16,9	1,51	1108	10,9

AB: As-Built, HT: Heat-treated



Πράγματι, και άλλες πρόσφατες μελέτες που διερεύνησαν τις ιδιότητες εφελκυσμού των SLM κραμάτων Co-Cr σε συνθήκες as-cast και heat-treated επέστρεψαν ασαφή αποτελέσματα. Μεταξύ των λοιπών ιδιοτήτων εφελκυσμού, κυρίως σημειώθηκε η σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε συνθήκες θερμικής επεξεργασίας, σε σύγκριση με το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας στην κατάσταση as-built το οποίο μόλις πληροί το πρότυπο ISO 22674: 2016 (Πίνακας 7-4, Πίνακας 7-5). Αυτό το πρότυπο απαιτεί τουλάχιστον 150 GPa μέτρο ελαστικότητας, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό σε σύγκριση με τα CST κράματα Co-Cr. Ο πρώτος ισχυρισμός για την εξήγηση αυτών των ευρημάτων έγκειται στις διαφορετικές κρυσταλλογραφικές δομές που υπάρχουν, και συγκεκριμένα την fcc (γ -Co) στην κατάσταση as-built και την hcp (ϵ -Co) στην κατάσταση θερμικής επεξεργασίας. Ωστόσο, σύμφωνα με τους άλλους συγγραφείς η γ -Co παραμένει η κυρίαρχη φάση και στις δύο καταστάσεις, με μειούμενα κλάσματα όγκου της ϵ -Co αυξάνοντας τη θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας. Δεδομένου ότι αυτό ισχύει, πρέπει να υπάρχουν πρόσθετοι παράγοντες για την κατά προσέγγιση αύξηση των 40-50 GPa στο συντελεστή Young μετά τη θερμική κατεργασία. Η θεωρητική μελέτη της θερμοδυναμικής ισορροπίας από τους άλλους ερευνητές προέβλεψε την ύπαρξη πολλών φάσεων εκτός από τις φάσεις γ και ϵ : τις φάσεις σ - και μ - και μια φάση με στοιχειομετρία Co_3W . Σε αντίθεση με την προπροηγούμενη μελέτη οι Kobylinski και συν²⁰⁷ (2020) απέδειξαν ότι, η πλαστική παραμόρφωση του κράματος μετά από δοκιμές εφελκυσμού δημιουργεί τάσεις οι οποίες συνδέονται με τον σχηματισμό της hcp- ϵ φάσης στην κατάσταση heat-treated και στην κατάσταση as-built (δηλαδή η ϵ -φάση σχηματίζεται από το μετασχηματισμό της γ -φάσης μόνο μετά την πλαστική παραμόρφωση λόγω τάσεων και όχι με θερμική κατεργασία), ενώ η θερμική επεξεργασία (βάσει οδηγιών κατασκευαστή: ρυθμός θέρμανσης 400 K/h μέχρι τους 1150 °C και στη συνέχεια χρόνο παραμονής 1 ώρα πριν από την ψύξη σε κλίβανο στους 300 °C) συνδέεται με τον σχηματισμό της φάσης-D024 καθώς το κράμα αποδείχθηκε ότι καθιζάνει τη διαμεταλλική φάση D024 κατά τη συνιστώμενη θερμική επεξεργασία η οποία μπορεί να εξηγήσει εν μέρει την παρατηρούμενη αύξηση του συντελεστή Young του. Σημειώνεται ότι, ο μετασχηματισμός της φάσης γ σε φάση ϵ μετά τη πλαστική παραμόρφωση, μπορεί να συμβάλει στην σκλήρυνση με ενδοτράχυνση η οποία παρατηρήθηκε στην κατάσταση as-built παρά τις τυπικά μεγάλες πυκνότητες εκτοπίσεων. Ο σχηματισμός της φάσης- D024 σχετίζεται με χημικές ανομοιογένειες. Αυτές οι μικροδομικές αλλαγές απαιτούν διάχυση και δεν μπορούν να προκληθούν καθαρά από το μετασχηματισμό φάσης που προκαλείται από τάσεις. Η προοπτική ενός μετασχηματισμού φάσης κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να αλλάξει την καθίζηση κατά τη διάρκεια των θερμικών επεξεργασιών. Οι μετρήσεις EDS στο



FIBSEM οδήγησαν σε κλάσμα όγκου ιζήματος ~ 7-10 %, ενώ οι προβλέψεις που βασίζονται στη στοιχειομετρία (Co, Cr)₃W είχαν ως αποτέλεσμα θεωρητικό μέγιστο 12 %. Συνολικά, η αύξηση του συντελεστή ελαστικότητας μπορεί να αποδοθεί εν μέρει μόνο σε μετασχηματισμούς φάσης, και πρέπει να εξεταστούν πιο αόριστες εξηγήσεις, όπως υπολειπόμενες τάσεις που συμβάλλουν σε πλαστικές παραμορφώσεις, ακόμη και σε μικρές μακροσκοπικές καταπονήσεις. Συνήθως, η φάση D019 είναι μια πιο σταθερή διαμόρφωση του Co₃W από τη φάση D024. Ωστόσο, όπως στις σχετικές συνθήκες ερπυσμού που βασίζονται σε νικέλιο, προωθούν τη δομή D024, ο σχηματισμός αυτής της φάσης σε αυτά τα δείγματα, τα οποία είναι πλούσια σε ενδοκοκκικές πιέσεις, φαίνεται εύλογος.²⁰⁷

Πίνακας 7-4 Ιδιότητες εφελκυσμού των κραμάτων Co-Cr στην κατάσταση as-built. Φ: κλίση, E: συντελεστής Young, Rp0,2: όριο διαρροής, Rm: μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό, At: επιμήκυνση στη θραύση.²⁰⁷

Φ [°]	E [GPa]	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
0°	183±15,58	917±9,9	1263±8,6	11,1±1,14
30°	148±20,57	965±5,9	1272±10,3	10,4±1,31
60°	167±26,23	845±11,1	1247±6,1	17,1±1,35
90°	139±6,93	755±8,17	1188±6,3	24,3±0,70
Μέσος όρος	159	871	1243	15,7

Πίνακας 7-5 Ιδιότητες εφελκυσμού των κραμάτων Co-Cr στην κατάσταση heat-treated. Φ: κλίση, E: συντελεστής Young, Rp0,2: όριο διαρροής, Rm: μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό, At: επιμήκυνση στη θραύση.²⁰⁷

Φ [°]	E [GPa]	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
0°	216±21,99	655±26,6	1111±8,9	15,0±1,54
30°	187±7,90	651±4,9	1127±12,3	15,5±1,04
60°	215±29,25	669±20,0	1162±13,4	18,0±2,90
90°	202±22,08	658±7,1	1108±10,9	16,9±1,51
Μέσος όρος	205	658	1127	16,4

Επιπλέον πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει τη συμπεριφορά των ιζημάτων και την ομογενοποίηση των μικροδομών. Καθώς τα ιζήματα εμφανίζουν ένα αποτέλεσμα ενίσχυσης δευτερογενούς φάσης, μια μείωση στα ιζήματα μετά από θερμική επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της αντοχής και της σκληρότητας του κράματος SLM.¹¹⁰ Σύμφωνα με άλλους, εκτός από την ομογενοποίηση δομής, ο σχηματισμός μεταλλικών καρβιδίων είναι γνωστό ότι επηρεάζει την απόδοση του κράματος Co-Cr. Καρβίδια εντός των κόκκων ενισχύουν τη μήτρα του κράματος, ενεργώντας ως εμπόδια στις εκτοπίσεις καθώς εμποδίζουν την ολίσθηση στα όρια των κόκκων και τη μετανάστευση στα όρια των κόκκων. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή, το μέγεθος και την ποσότητα των καρβιδίων είναι η θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας, ο χρόνος θέρμανσης



και οι ρυθμοί ψύξης. Για παράδειγμα, η ψύξη σε κλίβανο συμβάλλει στο σχηματισμό μεγαλύτερων ιζημάτων στις οριακές περιοχές του κόκκου, ενώ η απόσβεση σε νερό προάγει το σχηματισμό μικρότερων ιζημάτων και τη διάλυση των καρβιδίων στη μήτρα. Ωστόσο, σε κράματα PBF που υπόκεινται σε θερμική επεξεργασία, υπάρχουν ιζήματα που εμφανίζονται τόσο στους κόκκους όσο και στα όρια τους.⁸⁸ Άλλοι ερευνητές, ανέφεραν ότι η ολκιμότητα των θερμικώς κατεργασμένων SLM κραμάτων Co-Cr αυξάνεται σημαντικά επειδή η θερμική επεξεργασία προάγει τη διάλυση των ιζημάτων στη μήτρα και εξαλείφει τα ιζήματα στα όρια των κόκκων.¹²⁸ Ερευνητές το 2020 εφάρμοσαν τους ακόλουθους κύκλους θερμικών κατεργασιών: α) 1 ώρα στους 1220 °C, β) 4 ώρες προθέρμανσης στους 815 °C και στη συνέχεια δύο ώρες στους 1220 °C, και γ) 4 ώρες στους 1220 °C. Γρήγορη απόσβεση σε νερό σε θερμοκρασία δωματίου έγινε στο τέλος της προθέρμανσης και της κατεργασίας της διάλυσης. Μετά τη θερμική κατεργασία, τόσο η μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό όσο και το όριο διαρροής του SLM Co-Cr κράματος μειώθηκαν λόγω της ομογενοποίησης της μικροδομής και της υφής. Η ανάλυση της μικροδομής κατέληξε στο σχηματισμό καρβιδίων.⁸⁸

Επιπλέον, η ομογενοποίηση των μικροδομών και η μείωση των μηχανικά αδύναμων MPBs μετά από θερμική επεξεργασία μειώνουν την ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων και αυξάνουν την αντοχή στην κόπωση.¹¹⁰ Μια ομάδα ερευνητών καθώς και οι Kittikundecha και συν¹²⁸ (2019) και εφάρμοσαν την εξής θερμική κατεργασία: θέρμανση στο κλίβανο από τη θερμοκρασία δωματίου έως τους 600 °C (ρυθμός ανόδου 10 °C / min) και παραμονή σε αυτήν τη θερμοκρασία για 30 λεπτά, θέρμανση στο φούρνο στους 1150 °C και παραμονή σε αυτή για 1 ή 6 ώρες, παύση της θέρμανσης μετά από τη 1 ή 6 ώρες και αργή ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου σε φούρνο. Η πρώτη ομάδα έδειξε ότι, η θερμική κατεργασία στους 1150 °C για 1 και 6 ώρες επιτρέπει την ομογενοποίηση της μικροδομής και της υφής, και μάλιστα η θερμική κατεργασία 1 ώρας οδηγεί σε υψηλότερη αντοχή σε κόπωση για όλες τις γωνίες (0°, 45°, 90°) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ομάδες ελέγχου (as-built), ενώ αντίθετα η θερμική κατεργασία 6 ωρών δημιουργεί μεγάλα ιζήματα και ένα παχύ στρώμα οξειδίου που σχετίζεται με τη μείωση της αντοχής στην κόπωση.^{110,128} Ακόμη, ανέφεραν ότι παρά την ομογενοποίηση μικροδομών στα θερμικά επεξεργασμένα δείγματα, αυτά παρουσίασαν μηχανική ανισοτροπία και εξήγησαν ότι τα δείγματα 0° έχουν υψηλότερη πιθανότητα ελαττωμάτων ή πόρων από τα 90° λόγω της διαφοράς στον αριθμό των στρωμάτων μεταξύ 0° και 90°.¹²⁸ Όσον αφορά τις 90°, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν αντίθετα αποτελέσματα με τη μελέτη των Kittikundecha και συν¹²⁸, και τα διαφορετικά αποτελέσματα μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικές συνθήκες επιφάνειας των δειγμάτων.¹²⁸ Το 2019, στη μελέτη των Kittikundecha και συν¹²⁸, το γεγονός της παρουσίας στα



as-built δείγματα των λεπτών κυτταρικών ή στηλοειδών δενδριτικών δομών που λειτουργούν ως εμπόδια για την κίνηση εκτοπίσεων και οι οποίες δομές μετά τη θερμική κατεργασία εξαφανίζονται, έκανε τα as-built κράματα με 90° γωνία κατασκευής να εμφανίσουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε κόπωση από τα θερμικά κατεργασμένα (και μάλιστα τη μεγαλύτερη αντίσταση και μεταξύ των δειγμάτων as-built, καθώς η επιφάνεια θραύσης των δειγμάτων 90° είναι περίπου κάθετη προς τα όρια της λειωμένης δεξαμενής και επομένως, οι ρωγμές ενδέχεται να μην διαδίδονται εύκολα κατά μήκος των ορίων δεξαμενής σε σύγκριση με τα as built- 0° στα οποία η επιφάνεια θραύσης είναι περίπου παράλληλη με τα όρια της λειωμένης δεξαμενής και επομένως οι ρωγμές μπορούν να διαδίδονται εύκολα κατά μήκος των ορίων της λειωμένης δεξαμενής). Τα as-built κράματα με γωνίες δόμησης 0° και 45° παρότι είχαν και αυτά την επίδραση των άνω δενδριτικών δομών, έδειξαν χαμηλότερη διάρκεια ζωής σε κόπωση από τα θερμικά κατεργασμένα (τα θερμικά κατεργασμένα είχαν τυχαία υφή που μείωσε την εκκίνηση ρωγμών) λόγω της εμφάνισης των τετηγμένων ορίων της δεξαμενής και του παράγοντα Schmid. Η αντίσταση στη κόπωση και το ποσοστό επιβίωσης και μετά από θερμική επεξεργασία στους 1150°C για 1 h έδειξε μη σημαντική διαφορά σε όλες τις γωνίες. Όσον αφορά τη μικροδομή, η θερμική επεξεργασία στους 1150°C για 1 και 6 h επέτρεψε την ανακρυστάλλωση της μικροδομής και έτσι τα δείγματα έδειξαν εξάλειψη των τετηγμένων ορίων δεξαμενής και ομοιογενείς ισοαξονικούς κόκκους και τυχαία υφή και προσανατολισμό σε όλες τις γωνίες, γεγονός που μείωσε την ανισοτροπία που επηρεάζει την αντοχή στη κόπωση. Ακόμη, τα δείγματα as-built είχαν λεπτούς κυτταρικούς δενδρίτες στις 0° και λεπτές στηλοειδείς δομές στις 90° τα οποία άλλαξαν σε ομοιογενείς μικροδομές με ιζήματα στα όρια των κόκκων μετά από θερμική επεξεργασία. Τα δείγματα αγκίστρων με θερμική επεξεργασία 6 ωρών εμφάνισαν χαμηλότερη αντοχή κόπωσης από εκείνα με θερμική επεξεργασία 1 ώρας και αυτό καθώς η εκτεταμένη θερμική επεξεργασία (6 ώρες) οδήγησε σε μεγάλα (μεταβολή διαστάσεων) ιζήματα (μεγάλα μπλοκ καρβιδίων που σχηματίστηκαν στα όρια των κόκκων οδηγώντας σε μειωμένη ολκιμότητα που είναι επιζήμιο για την αντίσταση στη κόπωση) και σε ένα παχύ στρώμα οξειδίου που μείωσε την αντοχή στην κόπωση. Σημειώνεται ότι τα ιζήματα από 1 και 6 ώρες έδειξαν παρόμοιες χημικές συνθέσεις και ήταν τα $M_{23}C_6$ ($M = \text{Co}, \text{Cr}$) όπου αποτελούνται περισσότερο Cr από τη φάση μήτρας, και αυτό που διέφερε ήταν η μορφολογία. Το ποσοστό επιβίωσης των θερμικά κατεργασμένων 0° -6h ήταν σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο των θερμικά κατεργασμένων 45° -6h και 90° -6h, ενώ δεν υπήρχε σημαντική διαφορά μεταξύ εκείνων των 2 τελευταίων, και το χαμηλότερο ποσοστό επιβίωσης του πρώτου μπορεί να οφείλεται στην επιδεινωμένη τραχύτητα της επιφάνειας λόγω του φαινομένου της κλίμακας. Ακόμη, η μακρά θερμική



επεξεργασία αυξάνει το πάχος του στρώματος οξειδίου, το οποίο μπορεί να αποδοθεί στην τραχύτητα της επιφάνειας. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω μελέτη για την αξιολόγηση της σχέσης μεταξύ της τραχύτητας της επιφάνειας και του χρόνου θερμικής επεξεργασίας. Συνεπώς, η σωστή θερμική επεξεργασία μπορεί να μειώσει την ανισοτροπία της αντοχής στην κόπωση και μπορεί να αποδώσει εξαιρετικά αξιόπιστες οδοντικές συσκευές.¹²⁸

Πάντως, η βελτιστοποίηση των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων παραμένει μια σημαντική πρόκληση στο SLM.⁸⁸ Επομένως, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια θερμική επεξεργασία που μπορεί να ελέγξει ορθά τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες.¹¹⁰

Σε μια διαφορετική από τις υπόλοιπες μελέτες, διερευνήθηκε η επίδραση 2 θερμικών κατεργασιών ανακούφισης εσωτερικών τάσεων (880 °C και 1100 °C) στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. και των μεταλλοκεραμικών που κατασκευάστηκαν στο ίδιο υπόστρωμα. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν ράβδοι χρησιμοποιώντας, CST μεταλλοκεραμικά κράματα (ομάδα C-MC = conventional metal-ceramic], CST κράματα κλασσικού σκελετού Μ.Ο. (ομάδα C-RPD = Conventional Removable Partial Denture) και SLM μεταλλοκεραμικά κράματα Co-Cr. Τα δείγματα SLM υποβλήθηκαν σε 2 διαφορετικές θερμικές κατεργασίες, την L1 στους 880 °C και την L2 στους 1100 °C, και χωρίστηκαν περαιτέρω σε υποομάδες (L1-MC, L1-RPD, L2-MC και L2-RPD). Οι ερευνητές συμπέραναν ότι τα SLM κράματα Co-Cr που υφίστανται θερμική κατεργασία στους 880 °C και στους 1100 °C προκειμένου να μειωθούν οι υπολειπόμενες τάσεις παρουσιάζουν μηχανικές (όριο διαρροής, επιμήκυνση) ιδιότητες (και αντοχή μεταλλοκεραμικού δεσμού) που υπερβαίνουν τις ελάχιστες τιμές που ορίζει το ISO 22674:2016, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκελετούς Μ.Ο. τόσο και σε μεταλλοκεραμικές αποκαταστάσεις. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταλλοκεραμικών δεσμών των L1-MC και C-MC ($P = .74$) ή μεταξύ αυτών των L2-MC και C-MC ($P = .124$), όμως το όριο διαρροής 0,2 % των L1-MC και L2-MC ήταν σημαντικά υψηλότερο από εκείνο του C-MC και το L1-MC είχε υψηλότερο όριο διαρροής από το L2-MC, γεγονός που υποδηλώνει ότι η θερμική επεξεργασία στους 880 °C μπορεί να είναι καταλληλότερη για τη μείωση των υπολειπόμενων τάσεων σε μεταλλοκεραμικές αποκαταστάσεις. Ωστόσο, στη περίπτωση κατασκευής μεταλλικών στεφανών και σκελετών Μ.Ο. στο ίδιο υπόστρωμα με SLM, η θερμική επεξεργασία στους 1100 °C είναι πιο κατάλληλη για την απελευθέρωση υπολειμματικών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη δυσθραυστότητα των οδοντικών προσθέσεων. Αυτό καθώς, βρέθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των 3 ομάδων Μ.Ο. στις τιμές ορίου διαρροής 0,2 % όπου $L1-RPD > L2-RPD > C-RPD$, και στις τιμές επιμήκυνσης $L2-RPD > C-$



RPD > L1-RPD. Δηλαδή, αν και η ομάδα L1-RPD εμφάνισε υψηλότερη αντοχή από την C-RPD, η σημαντικά χαμηλότερη επιμήκυνση της πρότεινε την κακή δυσθραυστότητα της για εφαρμογές σε Μ.Ο. Σε αντίθεση με το κράμα C-RPD, το L2-RPD όχι μόνο είχε υψηλότερη αντοχή, αλλά επίσης είχε μεγαλύτερη επιμήκυνση κατάγματος, πράγμα που δείχνει ότι θα ήταν πιο κατάλληλο για εφαρμογές σε Μ.Ο. Ο μετασχηματισμός fcc σε hcp στους 880 °C μπορεί να εξηγήσει τις διαφορές στην επιμήκυνση και την ισχύ μεταξύ L2-RPD και L1-RPD. Συνεπώς, εάν τα μεταλλοκεραμικά κράματα Co-Cr, μετά την ανακούφιση των υπολειπόμενων τάσεων, είναι επίσης κατάλληλα για την κατασκευή σκελετών Μ.Ο. με SLM, οι στεφάνες Co-Cr και ο σκελετός Μ.Ο. μπορούν να κατασκευαστούν ταυτόχρονα από το ίδιο υπόστρωμα χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους διαδικασίας.⁹⁷

Η θερμική κατεργασία της όπτησης αν και διαφέρει από τις υπόλοιπες θερμικές κατεργασίες, μελέτες σχετικά με αυτή έχουν δείξει τα εξής. Οι Mengucci και συν²⁰⁸ (2015) μελέτησαν την μηχανική απόδοση (τραχύτητα, σκληρότητα, δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης) και τη μικροδομή των κραμάτων Co-Cr τα οποία κατασκευάστηκαν με DMLS και σφαιροβολήθηκαν, υπέστησαν θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων βάσει των οδηγιών του κατασκευαστή και όπτηση. Η μεταλλική σκόνη αποτελούνταν εξ ολοκλήρου από τη φάση γ -Co (fcc) σε μορφή σφαιρικών σωματιδίων με μέγεθος που κυμαίνεται από 4 έως 80 μm . Δείχθηκαν τα εξής. Μετά τη σύντηξη και στερεοποίηση, το δείγμα as-built είναι συμπαγές χωρίς ορατό πορώδες επιφάνειας, με μέση τιμή τραχύτητας επιφάνειας ανεξάρτητη από τη μέθοδο μεταεπεξεργασίας (σφαιροβολή, θερμική, όπτηση). Όσον αφορά τη μικροδομή, το δείγμα as-built δείχνει ένα μείγμα ϵ -Co (hcp) εντός της μεταστατικής φάσης γ -Co (fcc), με κλάσμα όγκου της φάσης ϵ -Co (hcp) περίπου 49 %. Το δείγμα as-built σχηματίζεται από ένα περίπλοκο δίκτυο ελασμάτων ϵ -Co (hcp) στη μήτρα γ -Co (fcc) υπεύθυνο για τις υψηλές τιμές μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό και σκληρότητας. Οι επιφάνειες ρήξης δείχνουν όλκιμους τρόπους βλάβης. Η θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων προκαλεί τροποποιήσεις στη μηχανική απόκριση των δειγμάτων και συγκεκριμένα αυξάνει τόσο τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό όσο και τη σκληρότητα ενώ μειώνει την ολκιμότητα ήτοι αυξάνει την ευθραυστότητα με την επιμήκυνση στη θραύση μειώνεται από 9 σε 6 %. Ο κύκλος όπτησης που πραγματοποιείται μετά την θερμική επεξεργασία ανακούφισης τάσεων προκαλεί περαιτέρω απώλεια στην ολκιμότητα και σημαντική αύξηση της σκληρότητας αφήνοντας αμετάβλητη τη αντοχή. Η μικροδομή του κράματος εξακολουθεί να σχηματίζεται από ελαφρώς αναπτυγμένα ϵ -Co (hcp) ελάσματα (lamellae) στη μήτρα γ -Co (fcc) στην οποία υπήρξε επιθέτηση μιας μαζικής καθίζησης χονδροειδών και επιμηκών ιζημάτων καθώς και μικρών σφαιρικών πλούσιων σε Si εγκλεισμάτων. Οι μηχανισμοί και οι

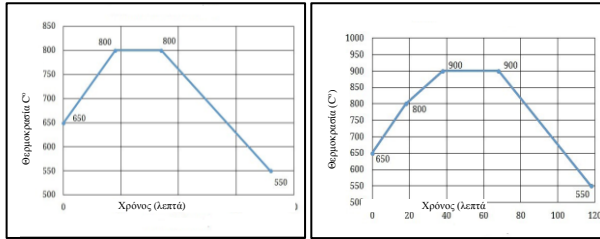


ρωγμές είναι εμφανείς στις επιφάνειες ρήξης. Χονδροειδή και επιμήκη ιζήματα παρατηρήθηκαν τα οποία για πρώτη φορά έχουν δομή hcp με παραμέτρους πλέγματος $a = 0,4734 \pm 0,0002$ nm και $c = 0,7661 \pm 0,0003$ nm και μια πιθανή σύνθεση που μοιάζει με $\text{Co}_3(\text{Mo}, \text{W})_2\text{Si}$. Οι τροποποιήσεις της μηχανικής συμπεριφοράς συνδέονται αυστηρά με δομικές αλλαγές που προκαλούνται από τις θερμικές επεξεργασίες ανακούφισης τάσεων και όπτησης. Οι θερμικές κατεργασίες τείνουν να σταθεροποιούν την ποσότητα της μαρτενσιτικής $\epsilon\text{-Co}$ (hcp) φάσης καθώς επίσης να επάγουν τον σχηματισμό εξαγωνικής ένωσης που δεν υπάρχει στην κατάσταση as-built. Συνεπώς, οι θερμικές κατεργασίες αυξάνουν το κλάσμα όγκου του $\epsilon\text{-Co}$ (hcp) αλλά τροποποιούν ελαφρώς το μέσο μέγεθος της ελασματοειδούς δομής. Ωστόσο, οι θερμικές επεξεργασίες είναι ικανές να παράγουν μια λογική αύξηση στην μέγιστη αντοχή εφελκυσμού και τη σκληρότητα και μια ισχυρή μείωση της ολκιμότητας. Αυτά τα τελευταία αποτελέσματα αποδόθηκαν κυρίως στη μαζική καταβύθιση μιας φάσης $\text{Co}_3(\text{Mo}, \text{W})_2\text{Si}$ και του σύγχρονου σχηματισμού εγκλεισμάτων πλούσιων σε Si. Σε γενικές γραμμές, οι σύνθετες κατεργασίες μεταεπεξεργασίας που τελικά σχετίζονται με τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό $\gamma\text{-Co}$ (fcc) $\rightarrow \epsilon\text{-Co}$ (hcp) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προκαλέσουν δομικές τροποποιήσεις ικανές να προκαλέσουν ελεγχόμενες αλλαγές στη μηχανική απόκριση των DMLS Co-Cr κραμάτων.²⁰⁸ Η τραχύτητα της επιφάνειας αυξάνεται με τη θερμική κατεργασία τόσο στη CST όσο και στη μέθοδο SLM.¹³⁰ Όσον αφορά την απελευθέρωση ιόντων, νεότερες μελέτες, έχουν αναφέρει ότι η θερμική κατεργασία τεσσάρων κύκλων θέρμανσης (προσομοιάζει την όπτηση) δεν επηρεάζει την απελευθέρωση ιόντων ανεξαρτήτως από τη τεχνική κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, παλαιότερη μελέτη έδειξε επίσης βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση των SLM Co-Cr κραμάτων σε σύγκριση με τα CST μετά από 4 θερμάνσεις, ενώ σε μια ακόμη παλαιότερη²⁰⁹ διαπιστώθηκε ότι η αντίσταση στη διάβρωση ενός CST κράματος Co-Cr ήταν υψηλότερη όταν το κράμα θερμάνθηκε έως επτά φορές και μειώθηκε όταν το κράμα θερμάνθηκε έως και 11 επαναλαμβανόμενες φορές, συν του ότι αναφέρθηκε αυξημένο πάχος στρώσης οξειδίου μετά από τη θέρμανση τόσο για CST όσο και για κράματα SLM Co-Cr. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την αξιολόγηση της πιθανής επίδρασης της θερμικής κατεργασίας όπτησης στην απελευθέρωση ιόντων.¹³⁰

Η θερμική κατεργασία γίνεται σύμφωνα με τους παραμέτρους που αναφέρει ο κατασκευαστής του κράματος. Ωστόσο, στην μελέτη των Kulcsár και Kónya²¹⁰ (2019), αναφέρθηκε ότι η πραγματοποίηση της θερμικής κατεργασίας των SLM κραμάτων Co-Cr (δεν αναφέρεται αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή κλασσικού σκελετού Μ.Ο.), σύμφωνα με τους παραμέτρους που αναφέρει ο κατασκευαστής οδηγεί σε ψαθυρή δομή,



ενώ η τροποποίηση των παραμέτρων της θερμικής κατεργασίας (Εικόνα 7-8) παρότι αυξάνει την σκληρότητα αυξάνει την εκατοστιαία επιμήκυνση στη θραύση και μειώνει το συντελεστή ελαστικότητας με αποτέλεσμα την μείωση της ψαθυρότητας.²¹⁰



Εικόνα 7-8 Θερμική κατεργασία όπως συνίσταται από τον κατασκευαστή (αριστερά) και τροποποιημένη (δεξιά).²¹⁰



Στη διαδικασία της χύτευσης, μετά την απομάκρυνση του σκελετού από το πυρόχωμα, την αμμοβολή, την πραγματοποίηση των διαφόρων ελέγχων, και στη μέθοδο πυροσυσσωμάτωσης μετά την αφαίρεση των δομών υποστήριξης, πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία η οποία είναι απαραίτητη τόσο στη CST όσο και στη PBF.

Πριν την έναρξη τελικής επεξεργασίας (ή και μετά τη λείανση), σημαντικό ρόλο στη μακροζωία και τη λειτουργικότητα της Μ.Ο. στη στοματική κοιλότητα διαδραματίζει η σύνδεση-δεσμός του μεταλλικού σκελετού με τη ρητίνη της βάσης της οδοντοστοιχίας, η οποία θα πρέπει να αντέχει στη συνεχή έκθεση στις μασητικές δυνάμεις, στη συνεχή ροή του σάλιου και στις μεταβολές της θερμοκρασίας που συμβαίνουν κατά την κατάποση τροφίμων και ποτών. Ωστόσο, διαχωρισμός (χαλάρωση) της ρητίνης από το κράμα είναι πιθανό να προκληθεί και οφείλεται σε διάφορα αίτια όπως σε α) χαμηλή πρόσφυση και έλλειψη χημικού δεσμού μεταξύ τους, β) διαφορά στους συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ τους, γ) συστολή πολυμερισμού της θερμοπολυμεριζόμενης ρητίνης, δ) όλα μαζί ή/και άλλους παράγοντες. Διαχωρισμός της ρητίνης από το κράμα μπορεί να συμβεί για παράδειγμα στην περιοχή των εσωτερικών και εξωτερικών γραμμών τελειώματος του ακρυλικού, και μπορεί να οδηγήσει σε πολλές ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως σε ατελές κάταγμα ή ολικό διαχωρισμό της ρητίνης από το κράμα. Επιπλέον και καθώς το χάσμα μεταξύ της ρητίνης και του κράματος αυξάνεται, μπορεί να προκαλέσει τη μικρο-διαρροή σάλιου και άλλων υγρών στο διάκενο και μικροοργανισμών, όπου με τη σειρά τους αυτά τα περιστατικά μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση της Μ.Ο., την ανάπτυξη παθολογίας στους υποστηρικτικούς ιστούς αποχρωματισμός της βάσης ακρυλικής ρητίνης. Επομένως, είναι σημαντική η προετοιμασία του κράματος επιφανειακά για την επίτευξη ενός δεσμού υψηλής αντοχής.^{211,212}

Τα συστήματα συγκόλλησης μετάλλων-ρητίνης μπορούν να ταξινομηθούν ως μηχανικά, χημικά ή συνδυασμός και των δύο. Η αποτυχία της διεπαφής μετάλλου-ρητίνης συμβαίνει όταν οι δυνάμεις υπερβαίνουν την ικανότητα των μηχανισμών συγκόλλησης. Οι μηχανικές μέθοδοι σύνδεσης περιλαμβάνουν αγκύλες (loops), πλέγμα, χάντρες (beads), κεφαλές νυχιών (nail heads) και στηρίγματα (struts), και η αμμοβολή που παρέχουν μακρομηχανική συγκράτηση. Σε παλιότερη έρευνα έχει δειχθεί ότι η αντοχή του δεσμού μεταξύ του



μη στιλβωμένου κράματος Co-Cr και της θερμοπολυμεριζόμενης PMMA ήταν πολύ χαμηλή, υποδηλώνοντας ότι οι μηχανικοί και χημικοί δεσμοί ήταν ελάχιστοι. Στην πραγματικότητα, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθεί ο δεσμός μεταξύ μιας γυαλισμένης επιφάνειας Co-Cr και PMMA, καθώς τα δείγματα τείνουν να αποτυγχάνουν πολύ εύκολα. Αυτός είναι ο λόγος για την επιλογή της αμμοβολής ή και άλλων μακρομηχανικών μεθόδων συγκράτησης. Το κύριο μειονέκτημα της μακρομηχανικής συγκράτησης μεταξύ της ρητίνης-μετάλλου είναι η κακή οριακή στεγανοποίηση, η οποία δεν επαρκεί για την αποφυγή μικροδιαρροής. Λόγω των μειονεκτημάτων της μακρομηχανικής σύνδεσης ρητίνης-μετάλλου, έχουν προταθεί μικροσκοπικά συγκρατητικά σχέδια για τη βελτίωση της συγκόλλησης της ρητίνης και του μετάλλου, όπως αμμοβολή της μεταλλικής επιφάνειας, ηλεκτρολυτική και χημική χάραξη και επεξεργασία επιφανειών με λέιζερ.^{211,212} Πιο αναλυτικά:

- Προκειμένου να βελτιωθεί η μικρο-μηχανική συγκράτηση οι μεταλλικές επιφάνειες αμμοβολούνται με κόκκους Al_2O_3 50-330 μm για να αφαιρεθεί το πυρόχρωμα από τις επιφάνειές τους. Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι η αμμοβολή με τέσσερις διαφορετικούς κόκκους, συγκεκριμένα 50 Al_2O_3 , 110 Al_2O_3 , 250 Al_2O_3 , και ένα μείγμα 180-330 μm Al_2O_3 , προκαλεί ανωμαλίες στις επιφάνειες του κράματος Co-Cr, και αυτό το μέγεθος αποτριβής καθορίζει την διαθέσιμη επιφάνεια επαφής του κράματος Co-Cr για τη συγκόλληση με την ακρυλική ρητίνη. Ανέφεραν επίσης ότι το μέγεθος κόκκων δεν καθορίζει την αντοχή του δεσμού μεταξύ ακρυλικών ρητινών και του κράματος Co-Cr λόγω της κακής προσαρμογής της ρητίνης στην περίπλοκη επιφανειακή τοπογραφία. Έδωσαν δύο λόγους για αυτό το τελευταίο συμπέρασμα. Πρώτον, τα σφαιρίδια PMMA, των οποίων η διάμετρος είναι περίπου 100 μm και το κύριο συστατικό της ρητίνης, δεν μπορούν να διεισδύσουν πλήρως στην τραχιά περιοχή επαφής σε μια επιφάνεια κράματος Co-Cr μετά την αμμοβολή. Δεύτερον, σωματίδια αλουμίνας ενσωματώνονται στην αμμοβολημένη επιφάνεια του κράματος Co-Cr και αποτρέπουν τη ροή των σφαιριδίων PMMA στην τραχιά επιφάνεια.^{211,212}
- Όσον αφορά τις χημικές μεθόδους, από αυτές, οι ενεργοποιητές συγκόλλησης μετάλλου είναι η πιο κοινή χημική μέθοδος για τη δημιουργία ισχυρού δεσμού μεταξύ PMMA και ενός κράματος σε σκελετούς Μ.Ο. Οι ενεργοποιητές συγκόλλησης μετάλλου περιλαμβάνουν τους ενεργοποιητές συγκόλλησης μετάλλου (metal primers) όπως το παράγωγο φωσφορικού οξέος, το 10-μεθακρυλοξυδεκυλιδυδροφωσφορικό (MDP), το παράγωγο μεθα-κρυλοϋλοξυαλκυλο θειοφωσφορικού οξέος (MEPS), 4-μεθακρυλοϋλεξυαιθυλο τριμελικός ανυδρίτης (4-META) και 10-μεθακρυλοϋλοξυδεκαμεθυλένιο μηλονικό οξύ (MAC-10). Ωστόσο, έχουν αναφερθεί διαφορές στην αντοχή στη διάτμηση του δεσμού



μεταξύ ρητίνης και κράματος μετά την εφαρμογή διαφόρων ενεργοποιητών συγκόλλησης μετάλλων. Για παράδειγμα, ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι οι αντοχές στη διάτμηση του δεσμού μεταξύ του PMMA και ενός κράματος Co-Cr με ενεργοποιητές MDP και MEPS ήταν μεγαλύτερες από εκείνες που βρέθηκαν όταν στο κράμα χρησιμοποιήθηκε 4-META ή το σύστημα σύνδεσης Siloc ή μετά την εφαρμογή MAC-10.^{211,212}

- Όσον αφορά την επεξεργασία επιφάνειας με λέιζερ φαίνεται να είναι μια πολύ υποσχόμενη μέθοδος επειδή είναι γρήγορη, ακριβής και σχεδόν δεν προκαλεί ζημιά.^{211,212}

Σε μια τώρα σύγκριση των παραπάνω μεθόδων, το 2011 οι Yilmaz και συν²¹² συγκρίνοντας την αντοχή του δεσμού στη διάτμηση μεταξύ του PMMA και του κράματος Co-Cr, μετά την εφαρμογή στην αμμοβολημένη επιφάνεια (ομάδα 1), ενεργοποιητή συγκόλλησης (ομάδα 2) ή ακτινοβολίας λέιζερ Nd: YAG (ομάδα 3) ή και των δύο (ομάδα 4), απέδειξαν ότι η υψηλότερη αντοχή δεσμού στη διάτμηση βρέθηκε για την ομάδα 4 (διπλάσια σε σχέση με τις 2,3) ενώ ακολούθησαν κατά φθίνουσα σειρά οι ομάδες 3 και 2 (διπλάσιες από ότι η 1) και η 1.^{211,212} Υπήρχε μια σημαντική διαφορά στις κατηγορίες αποτυχίας μεταξύ των ομάδων ($p < 0,05$). Ο τύπος αστοχίας ήταν κυρίως συγκολλητικός για τις ομάδες 1 και 3, αλλά κυρίως μικτός για τις ομάδες 2 και 4. Δηλαδή, η Nd: YAG ακτινοβολία λέιζερ 46,9 J/cm² αυξάνει την τραχύτητα της αμμοβολημένης επιφάνειας ενός κράματος Co-Cr και αυξάνει την αντοχή του δεσμού μεταξύ PMMA και κράματος. Αυτή η αντοχή δεσμού μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω εφαρμόζοντας ένα συγκολλητικό παράγοντα μετάλλου στην ακτινοβολημένη με λέιζερ επιφάνεια.²¹² Ωστόσο, το 2019, οι Aboelsayed και συν²¹¹ κατασκεύασαν ράβδους αποτελούμενες στο μισό τμήμα τους από Co-Cr και στο άλλο μισό από θερμοπολυμεριζόμενη ρητίνη και τις υπέβαλαν σε 3 επιφανειακές επεξεργασίες ήτοι αμμοβολή (ομάδα 1-ελέγχου), αμμοβολή και χημική μέθοδο με τη χρήση αλάτων αρρυδιαζονίου (ομάδα 2), και αμμοβολή και Nd:YAG λέιζερ (ομάδα 3). Στη διεπαφή μετάλλου-ρητίνης, στα δείγματα της ομάδα 1 εντοπίστηκαν μεγάλα κενά, στην ομάδα 3 μικρότερα από εκείνα της 1, και στην ομάδα 2 τα κενά μειώθηκαν δραματικά και σε ορισμένες θέσεις δεν παρατηρήθηκαν καθόλου λόγω της παρουσίας ομοιοπολικής δέσμησης μεταξύ θερμοπολυμεριζόμενης PMMA και Co-Cr κράματος. Η διαφορά στα κενά αποδίδεται στο γεγονός ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην επιφανειακή μορφολογία μεταξύ των επιφανειών των 3 αυτών μεθόδων, οι οποίες ευθύνονται κυρίως για τις διαφορές στις αντοχές των δεσμών, και που έχουν ως αποτέλεσμα, την διαφορετική ικανότητα διείσδυσης των σφαιριδίων PMMA (όσο μεγαλύτερα τα κενά τόσο πιο κακή είναι η εφαρμογή της ρητίνης στην περίπλοκη επιφανειακή τοπογραφία του κράματος Co-Cr). Έτσι, οι επιφανειακές επεξεργασίες με λέιζερ και οι χημικές βελτίωσαν σημαντικά την αντοχή εφελκυσμού μεταξύ του κράματος Co-Cr και



της ακρυλικής ρητίνης (ομάδα 1: 1,62, ομάδα 2: 3,29 MPa, ομάδα 3: 3,49 MPa). Παρόλο που δεν ανιχνεύθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στην αντοχή του δεσμού μετά από επεξεργασία επιφανειών με λείζερ και αλάτων αρρυδιαζονίου, η χημική επιφανειακή επεξεργασία είναι καλύτερη από την επιφανειακή επεξεργασία λείζερ για τη βελτίωση της οριακής στεγανοποίησης στη γραμμή τελειώματος του ακρυλικού μεταξύ του μετάλλου και της ακρυλικής ρητίνης για τη μείωση της μικροδιαρροής.²¹¹

Ακόμη, έναντι της αμμοβολής έχει δοκιμαστεί και η χρήση της σφαιροβολής (shot peening), η οποία αποτελεί μια μέθοδο ψυχρής κατεργασίας (cold working) στην οποία δημιουργούνται συμπιεστικές τάσεις στα εκτεθειμένα επιφανειακά στρώματα των μεταλλικών μερών, με την πρόσκρουση ενός ρεύματος σωματιδίων που κατευθύνονται στην μεταλλική επιφάνεια με υψηλή ταχύτητα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οι συμπιεστικές τάσεις στο μεταλλικό επιφανειακό στρώμα μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της αντοχής κόπωσης. Τα πλεονεκτήματα του «peening» είναι η δυνατότητα προσαρμογής του ενισχυτικού αποτελέσματος, η υψηλή ποιότητα επεξεργασίας, ο εύκολος καθαρισμός επιφανειών, και το γεγονός ότι έχει εγκατασταθεί στον κλάδο.⁶⁹ Στην ενότητα 9.1.4 γίνεται ανάλυση της μεθόδου αυτή για τα κράματα Co-Cr σε σύγκριση με τα άλλα υλικά.

Έπειτα ακολουθεί η τελική επεξεργασία του μεταλλικού σκελετού. Σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με τις πλέον σύγχρονες μελέτες η διαδικασία της τελικής επεξεργασίας μπορεί να χωριστεί σε 3 κύρια στάδια (και αν και σε κάποιες μελέτες όπως φαίνεται παρακάτω παραλείπονται κάποια στάδια ή εφαρμόζονται με διαφορετικό τρόπο). Τα πρώτα στάδια της αρχικής επεξεργασίας, είναι η διαδικασία αμμοβολής και της μηχανικής λείανσης, τα οποία αποσκοπούν κυρίως στη μείωση των ανωμαλιών το ανώτερο σε 3μm, παρά την αναγκαιότητα τους και τα οφέλη τους, δημιουργούν πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια του κράματος συν του ότι ως αποτέλεσμα της τριβής και της αύξησης της θερμοκρασίας που μπορεί να δημιουργήσουν μπορεί να προάγουν διαταραχές στην εσωτερική δομή του κράματος οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν περιοχές ετερογενούς δομής. Ένα κοινό ελάττωμα είναι ο σχηματισμός ενός λεπτού στρώματος που αναφέρεται ως επιφανειακό «τσαλάκωμα» (surface crumble) το οποίο έχει παραμορφωμένη κρυσταλλική δομή και πολύ εκλεπτυσμένους (αποσυντεθειμένους) μεταλλικούς κόκκους που μπορεί να οδηγήσουν στο σχηματισμό ενός τοπικού κέντρου διάβρωσης και να προκαλέσουν διάβρωση του κράματος.^{55,56} Το δεύτερο στάδιο της τελικής επεξεργασίας είναι η ηλεκτροστίλβωση. Η σωστή διεξαγωγή της ηλεκτροστίλβωσης λοιπόν, μειώνει την πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών τάσεων και αφαιρεί αυτό το στρώμα γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της σκληρότητας του κράματος και τη μείωση του συντελεστή τριβής. Έτσι βελτιώνεται η αντοχή, η συγκράτηση, η ακρίβεια και

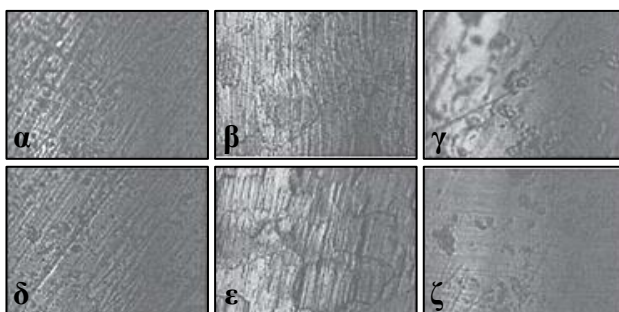


η εφαρμογή του κράματος. Επιπλέον, η ηλεκτρόλυση αφαιρεί τα οξειδία και αποτρέπει μονόσους της επιφάνειας του κράματος με σωματίδια υλικών στίλβωσης συμβάλλοντας στον καθαρισμό της επιφάνειας. Ακόμη, μειώνει τη διάβρωση και την απελευθέρωση μεταλλικών ιόντων. Ουσιαστικά, ένα στρώμα ιξώδους φιλμ σχηματίζεται στην ανοδική επιφάνεια κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης λόγω των προϊόντων διάλυσης και περιορίζεται η μαζική μεταφορά λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αντίστασης και όταν σχηματίζεται μια παθητική μεμβράνη οξειδίου στην ηλεκτρολυμένη επιφάνεια, η αντίσταση στη διάβρωση και η βιοσυμβατότητα των στιλβωμένων δειγμάτων μπορούν να βελτιωθούν όπως αναλύεται πολύ διεξοδικότερα παρακάτω. Επίσης, επιτρέπει τη στίλβωση των περιοχών που είναι δυσπρόσιτες για κατεργασία. Πλην αυτών, μειώνει σημαντικά την τραχύτητα με αποτέλεσμα την μείωση της πρόσφυσης πλάκας, αν δεν επιτυγχάνει υψηλή στιλπνότητα ή βέλτιστη ομαλότητα. Τέλος η επαρκής ηλεκτρολυτική στιβάδα καθιστά ευκολότερη την τελική στίλβωση.^{55,56} Το τρίτο (τελικό) στάδιο της διαδικασίας τελικής επεξεργασίας, αποτελεί η τελική στίλβωση, μετά την οποία σύμφωνα με μελέτες, η μέση τιμή τραχύτητας (R_a) των 0,2 μm ή λιγότερο θεωρείται κλινικά ικανοποιητική καθώς αυτή η τραχύτητα θα συλλέξει μόνο μια μικρή ποσότητα πλάκας. Σε συμφωνία με αυτό, ορισμένοι ερευνητές όρισαν την τιμή $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ ως το όριο και ανέφεραν μια σαφή μείωση της ποσότητας του βιοφίλμ που κατατίθεται κάτω από αυτήν την τιμή. Πάντως, για να επιτευχθεί η βέλτιστη ομαλότητα, απαιτείται καλή ποιότητα χύτευσης. Οι χαμηλότερες δυνατές τιμές R_a πρέπει να επιτυγχάνονται με την ηλεκτροστίλβωση και η τελική κατεργασία πρέπει να πραγματοποιείται σωστά.⁵⁶

Το 2012, οι Bortun και συν⁸² σύγκριναν τις επιφάνειες 4 τύπων διαφορετικών κραμάτων Co-Cr κλασσικών σκελετών M.O. (C, Wironit, Wironit extrahard, Heraenium CE) σε 4 διαφορετικά στάδια τελικής επεξεργασίας [αμμοβολή, λείανση (grinding), εκτροχισμός (milling)-τροχός βαμβακερού υφάσματος και στιλβωτική πάστα, στίλβωση (ελαστική)]. Η μικροσκοπική όψη του Wironit ήταν παρόμοια με εκείνη του κράματος "C", σε ορισμένα στάδια κατεργασίας (Εικόνα 8-1 αμμοβολή - α, δ, στίλβωση - γ, ζ), και διαφορετική στο στάδιο λείανσης (Εικόνα 8-1 β, ε). Οι μακροδομικές πτυχές (Εικόνα 8-2) που επισημαίνονται στο στερεομικροσκόπιο είναι παρόμοιες για τα τέσσερα πειραματικά κράματα και συγκεκριμένα: μετά την αμμοβολή, το κράμα είναι μακροσκοπικά καθαρό, ματ και τραχύ και ορισμένες (γενικά σφαιρικές) ρωγμές (τραχύτητες) εμφανίζονται στο κράμα οι οποίες μερικώς εξαφανίζονται μετά από την περαιτέρω επεξεργασία με εκτροχισμό και στίλβωση. Μετά την λείανση (grinding), η επιφάνεια του μεταλλικού υλικού καλύπτεται από μερικές τραχιές παράλληλες αυλακώσεις, στις οποίες οι τραχύτητες της αμμοβολής έχουν αφαιρεθεί. Μετά τον εκτροχισμό-εξομάλυνση (milling), η επιφάνεια αρχίζει να καλύπτεται από περιοχές με

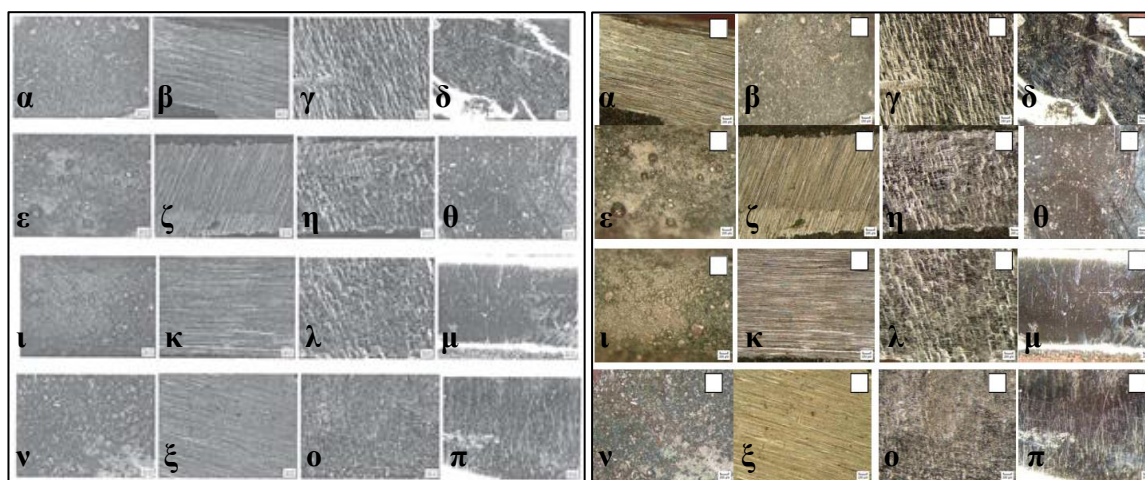


μικρά εξογκώματα-«χτυπήματα» (bumps), όλα προσανατολισμένα παράλληλα προς την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης εκτροχισμού, τα οποία είναι διαφοροποιημένα σε βάθος ανάλογα με τον τύπο του κράματος. Μετά τη στίλβωση, εξαφανίζονται όλα τα εξογκώματα, η επιφάνεια γίνεται σχετικά επίπεδη και έχει μια γυαλιστερή φωτεινή όψη, με την παρουσία μερικών μόνο πιθανών μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Η στίλβωση δεν παρείχε μια τέλεια επίπεδη επιφάνεια, σε ορισμένες περιοχές εμφανίστηκαν προεξοχές, γεγονός που υποδηλώνει την μακροσκοπική κατανομή στην επιφάνεια ορισμένων σκληρότερων σωματιδίων. Το κράμα "C" και το Heraenium Cr μοιάζουν να παρουσιάζουν μια κυματιστή όψη που δίνεται από τις ραβδώσεις παράλληλα προς την κατεύθυνση εκτροχισμού. Στα κράματα Wironit και ειδικά στο Wironit Extrahard μπορεί να παρατηρηθούν πολλαπλές τρίχες (σπονδυλικές στήλες) [aciculate bristles (spines)] κατά τη στίλβωση, γεγονός που υποδηλώνει μακροσκοπική κατανομή στην επιφάνεια ορισμένων πιο σκληρών (σκληρότερων) σωματιδίων. Για όλα τα κράματα, οι τιμές τραχύτητας μετά τον εκτροχισμό είναι πολύ υψηλότερες από εκείνες μετά την λείανση, με αναλογία περίπου $(4 \div 5): 1$. Ανάλογα με το κράμα, μπορεί να καθιερωθεί μια ιεραρχία σχετικά με τη συμπεριφορά στην τραχύτητα: το κράμα "C" έχει τις χαμηλότερες τιμές τραχύτητας και για τις δύο καταστάσεις, ακολουθούμενο από κράμα Heraenium, κράμα Wironit και Wironit Extrahard. Επιπλέον, το κράμα Heraenium EC παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά κατά την τελική επεξεργασία και το κράμα "C" καλύτερη συμπεριφορά από ότι το Wironit Extrahard.⁸² Ωστόσο, σε νεότερη μελέτη όπου συγκρίθηκαν οι επιφάνειες των ίδιων κραμάτων, σε 4 διαφορετικά στάδια τελικής επεξεργασίας [αμμοβολή, λείανση (grinding), εκτροχισμός με τροχόλιθους και δίσκους (milling), στίλβωση που περιλαμβάνει ελαστικά (gum)-βούρτσες-τσόχα] τα οποία αν και σαν κατηγορίες σταδίων είναι οι ίδιες με την προηγούμενη έρευνα, διέφεραν ελαφρώς, ωστόσο οι ερευνητές ανέφεραν ακριβώς τα ίδια μακροδομικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 8-3), με τη διαφορά ότι μετά τη στίλβωση δεν εντοπίστηκαν μη μεταλλικά εγκλείσματα. Άλλη μια διαφορά είναι ότι η πιο εύκολη επεξεργασία βρέθηκε να είναι για το κράμα Wironit και η δυσκολότερη για το κράμα Wironit extrahard.²¹³



Εικόνα 8-1 Μικροσκοπικές όψεις των σταδίων καταργασίας: α) αμμοβολή Wironit, β) λείανση Wironit, γ) στίλβωση Wironit, δ) αμμοβολή κράματος C, ε) λείανση κράματος C, ζ) στίλβωση C.⁸²



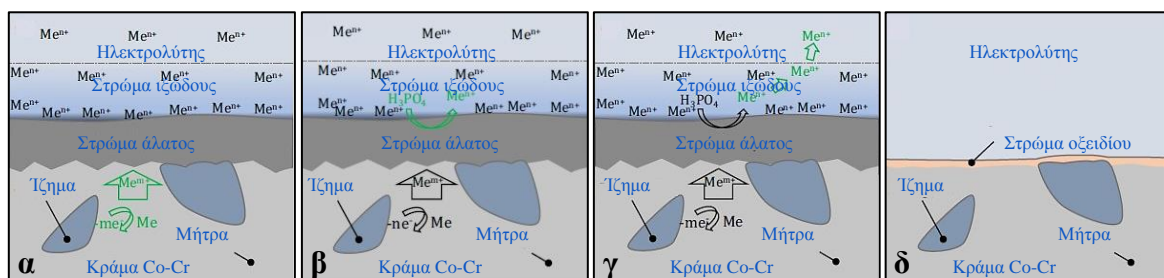


Εικόνα 8-2 Μακροδομή των κραμάτων Co-Cr: κράμα "C" (α, β, γ, δ), κράμα Heraenium CE (ε, ζ, η, θ), 5-40. Μακροδομή των κραμάτων Co-Cr: κράμα "C" (α, β, γ, δ), κράμα Heraenium CE (ε, ζ, η, θ), κράμα Wironit (ι, κ, λ, μ), κράμα Wironit Extrahard (ν, ξ, ο, π), μετά από διάφορους τελικές επεξεργασίες επιφανειών: αμμοβολή (α, ε, ι, ν), λείανση (β, ζ, κ, ξ), π, μετά από διάφορους τελικές επεξεργασίες επιφανειών: αμμοβολή (α, ε, ι, ν), λείανση (β, ζ, κ, ξ), εκτροχισμός (γ, η, λ, ο), στίλβωση (δ, θ, μ, π).⁸²

Εικόνα 8-3 Νεότερη μελέτη αντίστοιχης της εικόνας "C" (α, β, γ, δ), κράμα Heraenium CE (ε, ζ, η, θ), 5-40. Μακροδομή των κραμάτων Co-Cr: κράμα "C" (α, β, γ, δ), κράμα Heraenium CE (ε, ζ, η, θ), κράμα Wironit (ι, κ, λ, μ), κράμα Wironit Extrahard (ν, ξ, ο, π), μετά από διάφορους τελικές επεξεργασίες επιφανειών: αμμοβολή (α, ε, ι, ν), λείανση (β, ζ, κ, ξ), εκτροχισμός (γ, η, λ, ο), στίλβωση (δ, θ, μ, π).²¹³

Η συμπεριφορά ηλεκτροχημικής διάλυσης κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης του κράματος Co-Cr λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά στρώματα στην ανοδική επιφάνεια και την επιλεκτική διάλυση μεταξύ της φάσης μήτρας και της φάσης ιζήματος, περιγράφεται ποιοτικά στην Εικόνα 8-4. Η Εικόνα 8-4 α δείχνει το σχηματικό διάγραμμα της δομής ανοδικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης, που αποτελείται από το κράμα Co-Cr με τη φάση μήτρας και τη φάση καθίζησης, το στρώμα άλατος (συμπαγές φιλμ), το ιξώδες στρώμα και τον ηλεκτρολύτη. Το μοντέλο στρώματος συμπαγούς άλατος είναι υπεύθυνο για τον περιορισμό της μαζικής μεταφοράς στην ηλεκτροστίλβωση. Ένας ερευνητής ανέφερε ότι το πάχος του στρώματος συμπαγούς φιλμ άλατος ήταν της τάξης των 10 nm μελετώντας διάφορα φιλμ ανοδικού άλατος. Είναι ευρέως γνωστό ότι ένα στρώμα ιξώδους φιλμ δημιουργείται επί της ανοδικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης επειδή τα διαλυμένα μεταλλικά ιόντα δεν μπορούν να διαχέονται μακριά από την μεταλλική επιφάνεια στο χρόνο, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα στρώμα ιξώδους φιλμ με διαβάθμιση στη συγκέντρωση ιόντων μετάλλου. Σε παλαιότερη έρευνα άλλου κράματος αναφέρεται ότι το πάχος του στρώματος ιξώδους φιλμ ήταν της τάξης των 1-2 mm κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης του χαλκού και κυμαινόταν ανάλογα με το εφαρμοζόμενο δυναμικό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει σαφές όριο μεταξύ του όγκου του ηλεκτρολύτη και του ιξώδους φιλμ και η διακεκομμένη γραμμή μεταξύ τους στις εικόνες χρησιμοποιείται μόνο για ευκολία στην κατανόηση. Τα μεταλλικά ιόντα Me^{n+} έχουν υψηλή συγκέντρωση στην επιφάνεια κράματος Co-Cr και η συγκέντρωση μειώνεται σταδιακά στο στρώμα ιξώδους φιλμ με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια του κράματος. Το

χρώμα του στρώματος του ιξώδους φιλμ αντιστοιχεί στη συγκέντρωση των μεταλλικών ιόντων Me^{n+} και το σκούρο γκρι μπλε σημαίνει υψηλότερη συγκέντρωση ιόντων. Στην Εικόνα 8-4 α, λοιπόν, τα μεταλλικά στοιχεία οξειδώνονται σε κατιόντα Me^{m+} (το Me αντιπροσωπεύει τα Co, Cr, Mo, W και μερικά άλλα συστατικά του κράματος Co-Cr). Όταν το εφαρμοζόμενο δυναμικό είναι υψηλότερο από το δυναμικό διάβρωσης που φαίνεται στην Εικόνα 8-4, εμφανίζονται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, με αποτέλεσμα την οξείδωση του μετάλλου. Ως εκ τούτου, το μέταλλο Me διαλύεται και τα σχετικά κατιόντα Me^{m+} μεταφέρονται στο στρώμα άλατος. Στην Εικόνα 8-4 β, το στρώμα άλατος αντιδρά με τον όξινο ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση-διάλυση των μεταλλικών ιόντων Me^{n+} στον ηλεκτρολύτη. Στην Εικόνα 8-4 γ, τα διαλυτά μεταλλικά κατιόντα Me^{n+} μεταφέρονται στον όγκο του ηλεκτρολύτη μέσω μιας διαδικασίας περιορισμένης διάχυσης στο στρώμα του ιξώδους φιλμ λόγω της υψηλής συγκέντρωσης ιόντων κοντά στην ανοδική επιφάνεια. Αυτές οι διεργασίες στην Εικόνα 8-4 α-γ επαναλαμβάνονται για να συνεχιστεί η διαδικασία ηλεκτροχημικής διάλυσης. Το ανοδικό δείγμα στη συνέχεια ηλεκτροστιλβώνεται σε μια ομαλότερη επιφάνεια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-4 δ. Στην Εικόνα 8-4 δ, το στρώμα φιλμ οξειδίου και το στρώμα ιξώδους φιλμ εξαφανίζονται καθώς το εφαρμοζόμενο δυναμικό απενεργοποιείται μετά την ηλεκτροστιλβωση. Δεν υπάρχουν νέα μεταλλικά κατιόντα Me^{m+} από τη διαδικασία στην Εικόνα 8-4 α, ενώ το στρώμα ιξώδους φιλμ εξαφανίζεται επίσης λόγω των λιγότερο μεταφερόμενων μεταλλικών κατιόντων Me^{n+} . Επιπλέον, ένα φιλμ παθητικού οξειδίου σχηματίζεται στην ανοδική επιφάνεια μετά την ηλεκτροστιλβωση, ενώ η αύξηση του ατομικού ποσοστού του στοιχείου O επιβεβαιώνει την παραγωγή του φιλμ οξειδίου. Πιστεύεται ότι το στρώμα φιλμ άλατος αντιδρά πλήρως με τον ηλεκτρολύτη οξέος μετά την απενεργοποίηση του εφαρμοζόμενου δυναμικού επειδή δεν υπάρχει παραγωγή Me^{m+} όπως περιγράφεται στην Εικόνα 8-4 α και τα κατιόντα Me^{n+} έχουν αρκετό χρόνο διάχυσης για τη διαδικασία που περιγράφεται Εικόνα 8-4 β. Επομένως, το συμπαγές φιλμ άλατος μεταφέρεται στο τελικό στρώμα φιλμ οξειδίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-4 δ.⁵⁴

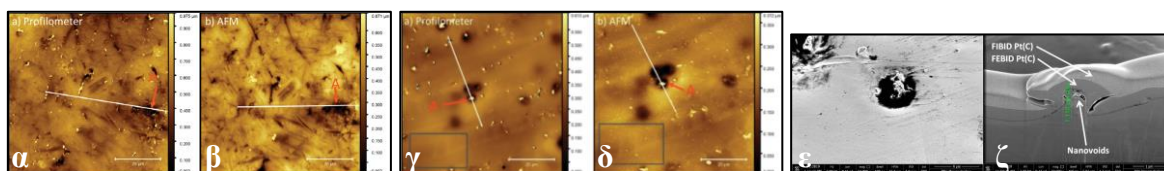


Εικόνα 8-2 Σχηματικά διαγράμματα της συμπεριφοράς ηλεκτροχημικής διάλυσης στην ηλεκτροστιλβωση κράματος Co-Cr.⁵⁴



Όσον αφορά την τοπογραφία, μια επιλεκτική διάλυση μεταξύ της μήτρας και της φάσης καθίζησης όπως περιγράφεται στην Εικόνα 8-4 δ συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης σύμφωνα με το περίγραμμα και την τρισδιάστατη γραφική παράσταση της στιλβωμένης επιφάνειας, και η φάση μήτρας έχει υψηλότερο ρυθμό διάλυσης από τη φάση καθίζησης, και αυτό προκαλείται κυρίως από τη διαφορά στις συνθέσεις διαφορετικών φάσεων.⁵⁴ Επιπρόσθετα, το 2019, οι Dąbrowa και συν⁵⁵ πραγματοποιώντας μια ανάλυση των CST ηλεκτροστίλβωμένων δειγμάτων Co-Cr ανέφεραν ότι μετά την ηλεκτροστίλβωση, παρότι οι τιμές τραχύτητας μειώνονται, υπάρχει ανάπτυξη τοπικών σημειακών ελαττωμάτων με τη μορφή προεξοχών. Η σύνθεσή των προεξοχών είναι ομοιόμορφη (τα τρία κύρια στοιχεία κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια). Κάθε προεξοχή (Εικόνα 8-5 ε) περιβάλλεται από ρηχές εσοχές και χαρακτηρίζεται από αρκετά αδρή άνω επιφάνεια. Η εικόνα SEM της διατομής του προεξέχοντος ελαττώματος αποκαλύπτει ότι η μικροδομή της προεξοχής είναι ίδια με το υλικό δείγματος, αλλά χαρακτηρίζεται από νανοέγκλειστα (επιβεβαιώνεται και από άλλη έρευνα⁵⁶) και ελαττώματα (Εικόνα 8-5 ζ). Αξίζει να σημειωθεί ότι η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων του μικροσκοπίου AFM και του OP έδειξαν εμφανείς αποκλίσεις μεταξύ των τιμών επιφανειακής τραχύτητας που ελήφθησαν και με τις δύο τεχνικές, επισημαίνοντας την ανάγκη χρήσης περισσότερων από μία μεθόδους (OP και AFM) για την ίδια περιοχή δείγματος για την ορθή και πλήρη αξιολόγηση της επιφάνειας των δειγμάτων Co-Cr για την αξιολόγηση της τραχύτητας της επιφάνειας.⁵⁵

Όσον αφορά την σύνθεση της ηλεκτροστίλβωμένης επιφάνειας, νέα συστατικά όπως Co^{3+} και Mo^{6+} εμφανίζονται σε αυτή λόγω της ηλεκτροχημικής διάλυσης. Ομοίως, το ατομικό ποσοστό των στοιχείων, ειδικά το στοιχείο Co, μειώνεται μετά την ηλεκτροστίλβωση που δείχνει ότι οξειδώνονται τα περισσότερο ογκώδη υλικά.⁵⁴



Εικόνα 8-3 Η επιφάνεια κραμάτων Co-Cr χωρίς (α, β) και μετά την ηλεκτροστίλβωση (γ, δ) 4 λεπτών που φαίνεται χρησιμοποιώντας προφίλομετρία (α, γ) και AFM (β, δ). Το σημείο A σηματοδοτεί το ίδιο χαρακτηριστικό των αντίστοιχων εικόνων, και οι κόκκινες γραμμές τα αντίστοιχα προφίλ διατομής από τις εικόνες προφίλομετρίας και AFM. Παρατηρείται ότι μετά την ηλεκτροστίλβωση οι προεξοχές εξακολουθούν να υπάρχουν (χωρίς μάλιστα εσοχές όπως θα συνέβαινε για π.χ. με τη χρήση χρόνου 2 λεπτών). Το μπλε τετράγωνο δείχνει την περιοχή που λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση της τοπικής τραχύτητας. Στην εικόνα ε φαίνεται η γενική όψη μιας τοπικής προεξοχής της επιφάνειας των ηλεκτροστίλβωμένων δειγμάτων και στην εικόνα ζ η διατομή της προεξοχής (β) (πριν από την κοπή της προεξοχής για την αποκάλυψη της διατομής, το κράμα καλύφθηκε με υλικό FEBID και FIBID Pt (C) για την προστασία της επιφάνειας από ζημιές κατά τη διάρκεια της κοπής).⁵⁵

Ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν την ηλεκτροστίλβωση πέρα από την καλή ποιότητα κατασκευής και την αποτελεσματική εκτέλεση της

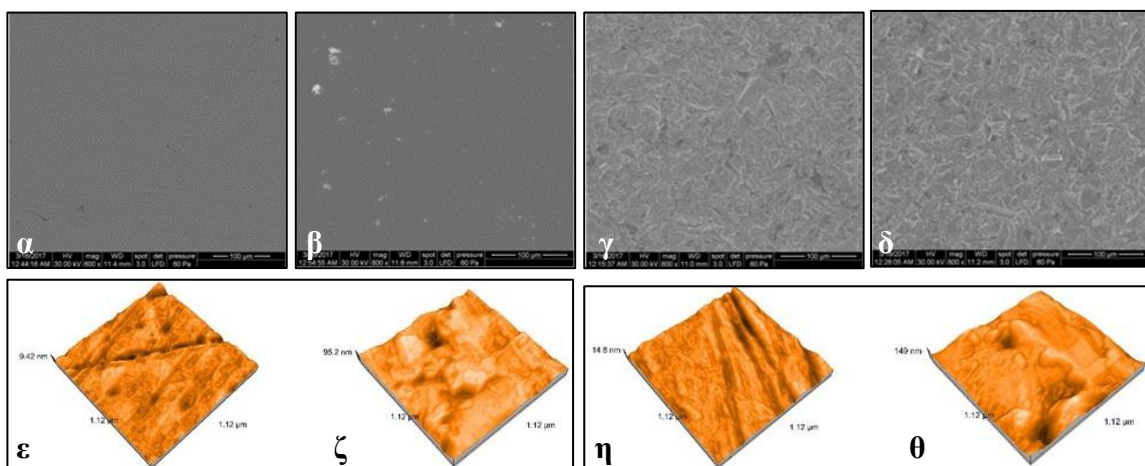
αμμοβολής και της λείανσης είναι η θερμοκρασία και η σύνθεση του ηλεκτρολύτη, ο χρόνος, η πυκνότητα ρεύματος καθώς και το μέγεθος της επιφάνειας του σκελετού.⁵⁶ Ορισμένες μελέτες έδειξαν τα εξής:

- Όσον αφορά τον ηλεκτρολύτη, ορισμένοι ερευνητές πραγματοποιώντας ηλεκτρόλυση χρησιμοποιώντας CST κράματα Co-Cr και 3 πειραματικούς (K8, K13, K15 που περιείχαν, κατά βάρος, 8,6 %, 13,5 % και 15,8 % θειικό οξύ, 91 %, 85,8 % και 83,4 % αιθυλενογλυκόλη, και 0,4 %, 0,7 % και 0,8 % νερό, αντίστοιχα) και 2 εμπορικούς [BEGO Wirolyt® (WB), Dentaaurum Electrolyt® (ED)] ηλεκτρολύτες, ανέφεραν ότι, το πιθανό επίπεδο στο οποίο ξεκινά η διαδικασία στίλβωσης αυξάνεται μαζί με τις μειώσεις της συγκέντρωσης θειικού οξέος στο διάλυμα ηλεκτρολύτη και τις αυξήσεις της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας έδειξαν ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των ηλεκτρολυτών WB, K15, K8 και K13, οι οποίοι ήταν σημαντικά καλύτεροι από τον ED. Οι ληφθείσες τιμές τραχύτητας επιφάνειας (Ra) δεν διέφεραν σημαντικά από εκείνες που επιτεύχθηκαν από άλλους ερευνητές. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα άλλων μελετών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν άλλες ερευνητικές μεθόδους, ήταν παρόμοια με εκείνα της παρούσας μελέτης. Διαφορετικοί ερευνητές, ανέφεραν τιμές $Ra \approx 1,87 \mu\text{m}$, εξετάζοντας την επιφάνεια των κραμάτων Co-Cr, κατόπιν αμμοβολής χρησιμοποιώντας Al_2O_3 και στη συνέχεια γυαλίστηκε στους ηλεκτρολύτες Metrodent®. Από την άλλη πλευρά, ένας άλλος ερευνητής διερεύνησε την επιφανειακή τραχύτητα και η μέση τιμή Ra που έλαβε ήταν $1,884 \mu\text{m}$.⁵⁶
- Όσον αφορά το χρόνο, σε μια μελέτη δείχθηκε ότι η ακατέργαστη επιφάνεια των κραμάτων CST Co-Cr χαρακτηρίζεται από πολλές εσοχές των οποίων το εύρος κυμαίνεται από 20 έως 50 nm, η επιφάνεια των κραμάτων που υπέστησαν ηλεκτροστίλβωση 2 λεπτών είχε ένα κανονικό – σαν κλίμακα (scale-like) μοτίβο (κυματοειδές) και εκείνων που υπέστησαν ηλεκτροστίλβωση 4 λεπτών είχαν λεία επιφάνεια.⁵⁵
- Όσον αφορά το ρεύμα ηλεκτροστίλβωσης, συνήθως χρησιμοποιείται εκείνο που ορίζεται από τον κατασκευαστή του διαλύματος ηλεκτροστίλβωσης. Ωστόσο με τον τρόπο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη η λεπτομέρεια της επιφάνειας που στίλβώνεται, και για τυπικούς σκελετούς μπορεί να είναι υψηλότερη από τη βέλτιστη. Παρόλο που τα πειράματα που αναπαράγουν την διαδικασία όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή, δείχνουν τη βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας των κραμάτων Co-Cr με την ηλεκτροστίλβωση, είναι πιθανό ωστόσο τα αποτελέσματα να είναι ακόμη καλύτερα εάν το ρεύμα είναι βελτιστοποιημένο.⁵⁵ Σημειώνεται ότι, για μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος



συμβαίνει εκτενής διάβρωση στο σκελετό, κάτι που θα πρέπει να αποφεύγεται ώστε να μην εισχωρούν ανεπιθύμητα στοιχεία στη μικροδομή.⁵⁴

Η επιφάνεια των τελικών σκελετών στη PBF περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια φινιρίσματος και στίλβωσης πριν την αποστολή στον οδοντίατρο, τα οποία όμως δεν διαφέρουν σαν μεθοδολογία από τη μέθοδο CST,^{11,47} αν και γενικώς ένας σκελετός που κατασκευάζεται μέσω SLM απαιτεί περισσότερη λείανση και στίλβωση από ότι ένας χυτός, και αυτό μπορεί να αποτελέσει πηγή σφάλματος.³ Σε μελέτες οδοντιατρικών κραμάτων Co-Cr, τα οποία ωστόσο δεν έχουν δοκιμαστεί σε σκελετούς Μ.Ο. έχει αναφερθεί ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι στίλβωσης (μηχανικές, υπερηχητικές, δέσμη-ιόντων και χημικές) έχουν ορισμένους περιορισμούς στην τελική επεξεργασία των τμημάτων PBF, και πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην τροποποίηση της επιφάνειας χρησιμοποιώντας λέιζερ, και έχουν δείξει ότι η ποιότητα της επιφάνειας των κατασκευασμένων AM μερών μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη στίλβωση με λέιζερ (ορισμένα κρίσιμα σημεία της μεθόδου αυτής αναλύονται στην τελευταία παράγραφο αυτής της ενότητας).⁸⁸ Πάντως σε μια μελέτη δείχθηκε ότι ανάλογα με την τεχνολογία SLM ή SLS και την επιφανειακή επεξεργασία των δειγμάτων (αμμοβολή + στίλβωση ή μόνο αμμοβολή), η τραχύτητα είναι διαφορετική (Εικόνα 8-6) και αντανακλάται σε πορώδη που προέκυψαν μετά την απόθεση της λεπτής μεταλλικής σκόνης, ειδικά για τη μέθοδο SLM. Αυτά τα ευρήματα σχετικά μπορεί να έχουν κλινικές επιπτώσεις τις μικροδομικές ιδιότητες οι οποίες μπορεί να τροποποιήσουν τις μηχανικές και ηλεκτροχημικές και άλλες ιδιότητες.²¹⁴



Εικόνα 8-4 SEM (α-δ) που δείχνουν τη δομή των αμμοβολημένων και στίλβωμένων κραμάτων Co-Cr SLS (α) και SLM (β), και τη δομή των μόνο αμμοβολημένων δειγμάτων (γ, δ) της μεθόδου SLS (γ) και SLM (δ). Εικόνες AFM (ε-θ) των μόνο αμμοβολημένων κραμάτων SLS και SLM (ζ, θ αντίστοιχα) και των τελικώς στίλβωμένων (ε, ζ αντίστοιχα).²¹⁴

Το 2017, οι Narowska-Sobieraj και Myszka⁴⁵ σύγκριναν την τραχύτητα πλακών Co-Cr που κατασκευάστηκαν με χύτευση 4 CST κραμάτων Co-Cr πριν και μετά την μηχανική στίλβωση τους και παρατήρησαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιφανειών των

δειγμάτων σε κατάσταση as-cast και μετά από μηχανική κατεργασία. Μάλιστα σημαντική διαφορά βρέθηκε και μεταξύ των επιφανειών των δειγμάτων που υπέστησαν «λεπτή» μηχανική στίλβωση στο οδοντιατρείο και «αδρή» μηχανική στίλβωση στο εργαστήριο. Σημειώνεται ότι, η «λεπτή» μηχανική στίλβωση περιλάμβανε την χρήση ενός μικροκινητήρα με ενσωματωμένο σπόγγο (eraser) για στίλβωση μετάλλων και ένα μονοπολικό κιτ λείανσης-στίλβωσης με διαδοχικά εφαρμοζόμενες βούρτσες στίλβωσης με τον καμβά και τις βαμβακερές τρίχες, και βούρτσα στίλβωσης με βαμβακερό νήμα. Αντίθετα η «αδρή» μηχανική στίλβωση περιλάμβανε στίλβωση με εργαστηριακούς τροχούς.⁴⁵

Ορισμένοι ερευνητές κατασκεύασαν Co-Cr με CST και αφού αμμοβολήθηκαν και ηλεκτροστιλβώθηκαν, στη συνέχεια εξέτασαν την επιφανειακή τους μορφολογία μετά από 3 διαφορετικές μεθόδους στίλβωσης που δοκιμάστηκαν και συγκεκριμένα, μόνο ηλεκτροστιλβωση (1^η ομάδα), μηχανική στίλβωση χρησιμοποιώντας πράσινους ελαστικούς δίσκους και μια στιλβωτική πάστα που εφαρμόστηκε από μια περιστρεφόμενη μαύρη βούρτσα (2^η ομάδα), μηχανική στίλβωση μέσω πράσινων ελαστικών δίσκων – υψηλή στιλβωτική πάστα – περιστρεφόμενη δερμάτινη βούρτσα ελαφιών (3^η ομάδα). Η μορφοκλασματική διάσταση D (μέση±τυπική απόκλιση) η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον τριασδιάστατο ποσοτικό χαρακτηρισμό της μορφολογίας των τρισδιάστατων επιφανειών των δειγμάτων της 2^{ης} ομάδας ($2,19\pm 0,07$) ήταν χαμηλότερη από εκείνη των δειγμάτων της 3^{ης} ($2,24\pm 0,08$), η οποία ήταν χαμηλότερη από αυτήν των δειγμάτων 1^{ης} ομάδας ($2,27\pm 0,09$). Έτσι, τα δείγματα της 2^{ης} ομάδας παρουσίασαν τις στατιστικά χαμηλότερες τιμές των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας, ενώ ακολούθησαν τα δείγματα της 3^{ης} και έπειτα της 1^{ης} ομάδας. Οι ερευνητές συμπέραναν ότι ανάλογα με τις μεθόδους της στίλβωσης παρατηρούνται τοπογραφικές αλλαγές. Πιο αναλυτικά, παρόλο που η μηχανική στίλβωση (2^η και 3^η ομάδα) δημιουργεί μικρές παράλληλες γρατζουνιές τόσο στα νησιά όσο και στη κυματοειδή επιφάνεια οι οποίες παρουσιάζουν τραχύτητα, απομακρύνει τις κορυφές των κρυσταλλικών νησιών καθιστώντας τις επιφάνειες σχεδόν χωρίς χαρακτηριστικά και ομαλές (μείωση ύψους νησιών σε κάθετη κατεύθυνση), και έτσι η συνολική τραχύτητα μειώνεται δραματικά. Ο λόγος που η 3^η ομάδα εμφάνισε μεγαλύτερη τραχύτητα από την 2^η ήταν ότι η περαιτέρω μηχανική στίλβωση που χρησιμοποιήθηκε αφαίρεσε τις κορυφές των νησιών μεταβάλλοντας την περίμετρο τους ιδιαίτερα από τις βαθύτερες και πυκνότερες γρατζουνιές στα νησιά. Τα βάθη γρατσουνιών κυμαίνονταν μεταξύ 15 και 100 nm, και κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του νησιού δεν μπορούσε να επιφέρει αξιοσημείωτη μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας τόσο στην 2^η όσο και στη 3^η ομάδα.^{55,57,98} Σημειώνεται ότι οι βαθύτερες γρατσουνιές, που σχηματίζονται από μηχανική στίλβωση και η επακόλουθη παραμόρφωση



κρυστάλλων στα δείγματα 3^{ης} ομάδας μπορεί να οδηγήσουν σε ενδοκοκκική διάβρωση και θάμπωμα (etching) σε ενδοστοματικό επιθετικό περιβάλλον. Συνεπώς, η διαφορά στην επιφανειακή μικρο-υφή μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά διάβρωσης του κράματος.⁵⁷

Η μορφολογία των οδοντικών κραμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύνθεση των υλικών καθώς και από τα πρωτόκολλα στίλβωσης.^{98,125}

Αναλυτικότερα σχετικά με τη μορφολογία των επιφανειών κράματος Co-Cr των 3 διαφορετικών μεθόδων στίλβωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 8-7 και στην Εικόνα 8-8. Πιο συγκεκριμένα:

- Όσον αφορά την επιφάνεια των δειγμάτων της 1^{ης} ομάδας (Εικόνα 8-7 α, β, δ), η ανάλυση AFM αποκάλυψε ότι η επιφάνεια αποτελείται από ένα συγκεκριμένο μοτίβο, ήγουν από νησιά-συστάδες νανοκρυσταλλινών (Εικόνα 8-7 β) (με ένα τυπικό πριονωτό σχέδιο στις κορυφές) τα οποία αντιστοιχούν στην ενδοδενδριτική φάση στις εικόνες οπτικού μικροσκοπίου (Εικόνα 8-7α) που ταξινομούνται σε παράλληλες σειρές και αναδύονται από την κυματοειδή επιφάνεια η οποία αντιστοιχεί στη φάση δενδιτών στις εικόνες οπτικού μικροσκοπίου (Εικόνα 8-7α). Οι διαστάσεις των κυματισμών της λείας επιφάνειας υπολογίστηκαν ότι ήταν σε μήκος 20-40 nm και σε ύψος 150-400 nm.^{57,88,98} Ωστόσο, πλην αυτών των 2 φάσεων σε μια μελέτη⁹⁸ που εντοπίστηκαν και στο οπτικό μικροσκόπιο, η ανάλυση AFM εντόπισε επιπλέον άλλες 2 φάσεις και συγκεκριμένα αφενός μερικούς υψηλούς-κωνικούς-κρυσταλλίτες που αναδύονται τόσο από την κυματοειδή επιφάνεια όσο και από τα νησιά των νανοκρυσταλλινών, αφετέρου πολύ-μικρούς-κρυσταλλίτες-που-μοιάζουν-με-κόκκους στην επιφάνεια (Εικόνα 8-7 δ).
- Όσον αφορά την επιφανειακή μορφολογία των δειγμάτων 2^{ης} ομάδας (Εικόνα 8-8 α, β, δ), δείχνει το συγκεκριμένο μοτίβο για την κυματιστή επιφάνεια μαζί με τα νησιά των κρυσταλλινών. Ωστόσο, η μηχανική στίλβωση άλλαξε τη μορφολογία των νησίδων των κρυσταλλινών που αναδύονται κάθετα από την κυματοειδή επιφάνεια κι συγκεκριμένα ενώ η περίμετρο-περίγραμμα των νησιών παρέμεινε σταθερό, οι κρυσταλλικές κορυφές των νησιών αφαιρέθηκαν-εξομαλύνθηκαν ως αποτέλεσμα της μηχανικής στίλβωσης (η άνω επιφάνεια τους δεν δείχνει πριονωτό μοτίβο) λόγω της μηχανικής διαδικασίας. με αποτέλεσμα την μείωση της, και έτσι η τραχύτητα της επιφάνειας γενικά μειώθηκε. Έτσι, οι επιφάνειες των νησιών κρυσταλλινών έγιναν σχεδόν χωρίς καθόλου κορυφές και ήταν ομαλές στο άνω μέρος (σε ύψος 40 nm). Παράλληλα όμως, με την μηχανική στίλβωση σχηματίστηκαν γρατσουνιές, οι οποίες ήταν ως επί το πλείστον παράλληλες μεταξύ τους στη κυματοειδή επιφάνεια. Οι πιο εμφανείς γρατσουνιές με προφίλ σχήματος



Υ απείχαν 13-27 mm με ανοίγματα επιφάνειας πλάτους 0,5-2 mm και βάθος 15-100 nm.^{57,88,98}

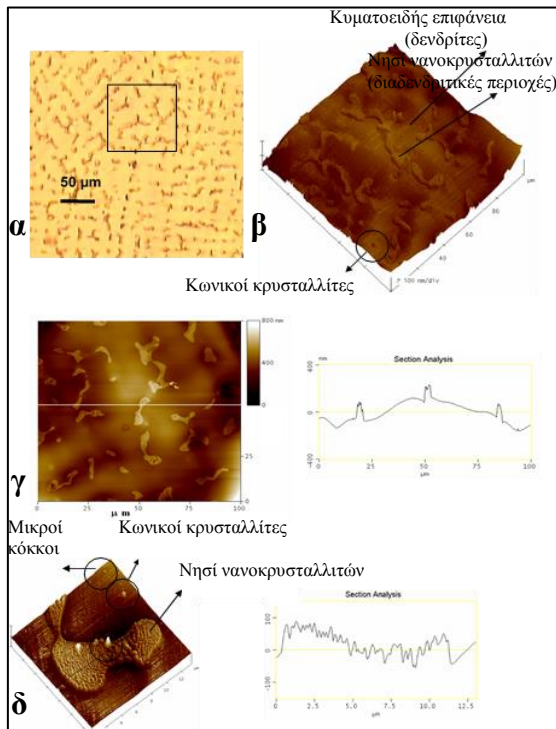
- Όσον αφορά την επιφανειακή μορφολογία των δειγμάτων 3^{ης} ομάδας (Εικόνα 8-8 ε, ζ, θ), η κυματοειδή επιφάνεια έχει περισσότερες γρατσουνιές από και οι αποστάσεις μεταξύ αυτών είναι μικρότερες (πυκνότερες γρατζουνιές) από αυτές των δειγμάτων 2^{ης}. Η κυματοειδής επιφάνεια και τα νησιά των λιωμένων κρυσταλλιτών διασχίζονται από πολλές παράλληλες γρατσουνιές. Τα περιγράμματα των λιωμένων νησιών των κρυσταλλιτών μεταβλήθηκαν ιδιαίτερα από τις παράλληλες γρατσουνιές. Τα βάρη των γρατζουνιών ήταν έως 100 nm, αυξάνοντας έτσι την τραχύτητα της επιφάνειας. Είναι προφανές ότι η μηχανική στίλβωση αφαίρεσε τις κορυφές των κρυσταλλιτών και προκάλεσε γρατσουνιές στο νησί επίσης, μεγαλύτερου βάθους, και αυτός είναι ο λόγος που οι γρατζουνιές ήταν πιο πυκνές στα δείγματα 3^{ης} ομάδας από εκείνα της 2^{ης}, και συνεπώς μεγαλύτερη η τραχύτητα.^{57,98,125}

Ανάλογα αποτελέσματα φαίνονται και μέσω της Εικόνα 8-9.⁵⁷

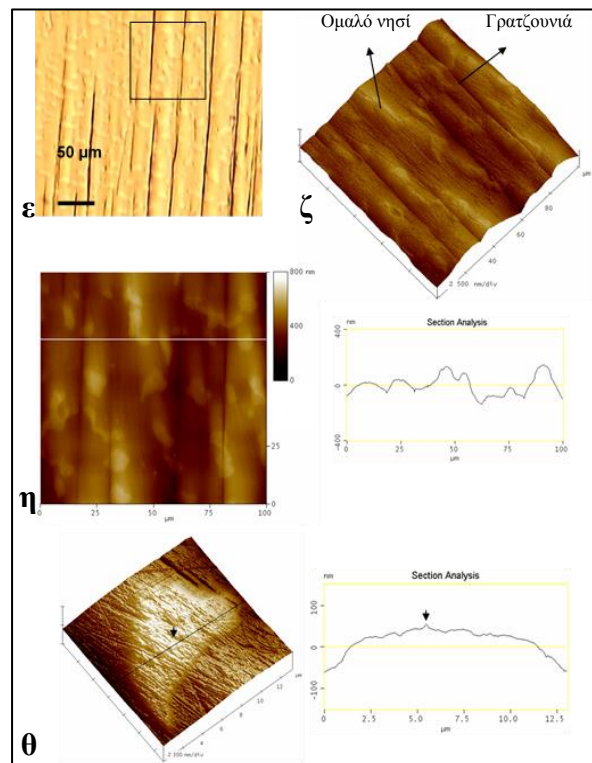
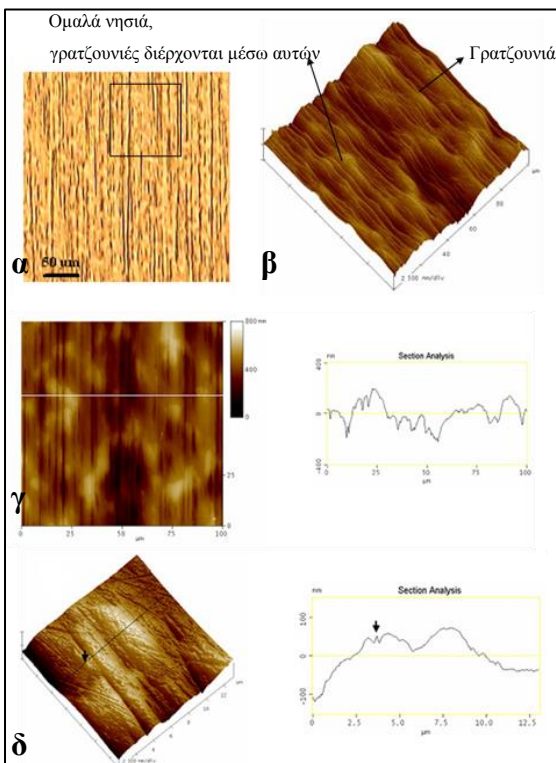
Όσον αφορά τη χημική σύνθεση (% μάζα) των φάσεων στην επιφάνεια του κράματος Co-Cr-Mo, η κυματοειδής επιφάνεια (δενδριτική φάση) ήταν δύο φορές πλουσιότερη σε Co από ότι σε Cr και αντιστοιχούσε στη δήλωση του κατασκευαστή, ενώ στην ενδοδενδριτική φάση (συστάδες ναοκρυσταλλιτών σχηματίζουν νησιά και αναδύονται από την κυματοειδή επιφάνεια) το Co ήταν σχεδόν ίσο με το Cr, το οποίο ήταν διαφορετικό από τη σύνθεση του δηλωμένου κράματος. Η χημική σύνθεση έδειξε σαφώς υψηλότερη περιεκτικότητα σε C εντός της ενδοδενδριτικής φάσης από ό, τι εντός της κυματοειδούς επιφάνειας, η οποία δείχνει ότι η ενδοδενδριτική φάση θα μπορούσε να αποτελείται από καρβίδια.⁹⁸

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις των βακτηρίων (0,5-1 μm) και των ζυμομυκήτων (4-10 μm), πιθανώς οι διαφορές τραχύτητας στις επιφάνειες των τριών δειγμάτων δεν είναι σημαντικές ώστε να μπορούν να τις «αισθανθούν».⁹⁸

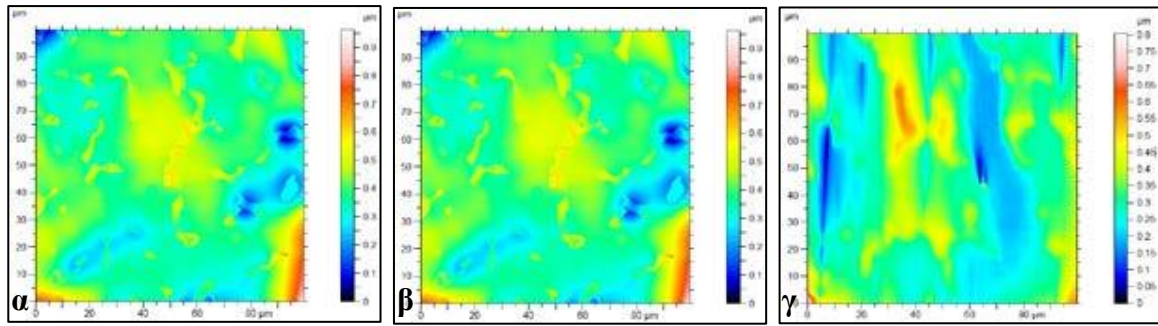




Εικόνα 8-5 Η επιφάνεια της ηλεκτροστύλβωσης (α) κράματος Co-Cr-Mo που λαμβάνεται με οπτικό μικροσκόπιο (400 x). 3-D AFM εικόνα της επιφάνειας που επισημαίνεται με ένα κουτί στο σχήμα α, 100 x 100 μm (ύψος 0,5 μm). AFM (γ) ανάλυση τομής της ίδιας επιφάνειας όπως στο β. AFM μορφολογία επιφάνειας (δ).⁹⁸



Εικόνα 8-6 Κράμα 2^{ης} (α-δ) και 3^{ης} ομάδας ε-θ. Η επιφάνεια των μηχανικά στιλβωμένων (α, ε) κραμάτων Co-Cr-Mo που λαμβάνεται με οπτικό μικροσκόπιο (400 x). 3-D AFM εικόνες β και ζ των επιφανειών που επισημαίνονται με ένα κουτί στο σχήμα α και ε, 100 x 100 μm (ύψος 0,5 μm). AFM (γ, η) ανάλυση τομών ίδιων επιφανειών όπως στα β και ζ. 13 x 13 μm AFM 3-D επιφάνεια (δ) δείχνει ένα εξομαλυσμένο νησί, ωστόσο μια κρυσταλλική κορυφή παρέμεινε (βέλος). 13 x 13 μm AFM 3-D επιφάνεια (θ) δείχνει ένα λείο νησί με γρατσουνιές να διατρέχουν αυτό. Η ανάλυση τομής αποκαλύπτει σαφώς ότι παρέμεινε μια κρυσταλλική κορυφή (βέλος).⁹⁸

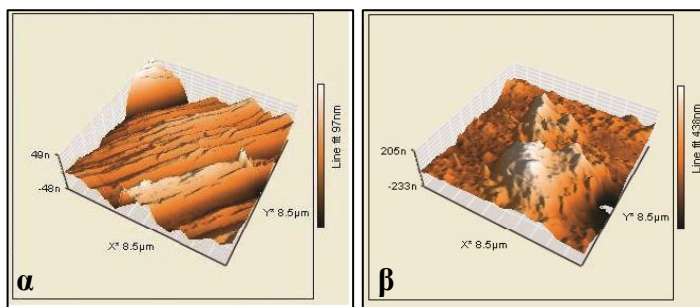


Εικόνα 8-7 Εικόνα 1. 2-D τοπογραφικές μικρογραφίες AFM, για την τετραγωνική επιφάνεια σάρωσης του κράματος Co-Cr-Mo $100 \times 100\text{-}\mu\text{m}^2$: α) δείγμα 1^{ης}, β) 2^{ης} και γ) 3^{ης} ομάδας.⁵⁷

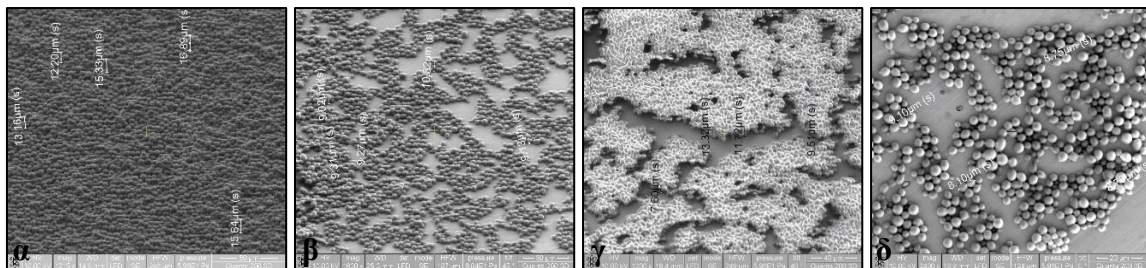
Το 2012, οι Baciu και συν²¹⁵, κατασκεύασαν κυλίνδρους CST κράματος Co-Cr, και έπειτα η επιφάνεια τους ολοκληρώθηκε είτε με μηχανικές [αποτριπτικούς δίσκους άλατος χουμικού οξέος (humates), σφουγγάρι (ruff) και λειαντική πάστα] είτε με ηλεκτρολυτικές τεχνικές στίλβωσης (όξινα ηλεκτρολυτικά διαλύματα). Στη συνέχεια στις στίλβωμένες επιφάνειες καλλιεργήθηκαν κύτταρα μυκήτων *Candida albicans* και διερευνήθηκε η ανάπτυξη βιοφίλμ *Candida Albicans* στις 2 αυτές μεταλλικές επιφάνειες μετά από 24 ώρες και μετά από 48 ώρες από την ολοκλήρωση των καλλιεργειών. Δείχθηκε ότι αν και οι 2 χρησιμοποιούμενες τεχνικές στίλβωσης (μηχανικές και ηλεκτρολυτικές) βελτιώνουν την τελική ποιότητα των μεταλλικών επιφανειών, καλύτερη ποιότητα επιφάνειας από την άποψη του μικρομετρικού προφίλ επιτυγχάνεται με τη μηχανική στίλβωση (Εικόνα 8-10 α). Όπως επισήμαναν οι ερευνητές, η ηλεκτρολυτική στίλβωση (Εικόνα 8-10 β) μπορεί να είναι αποτελεσματική μόνο όταν απαιτείται υψηλή παραγωγικότητα. Πιο αναλυτικά, η νανομετρική επιφανειακή τοπογραφία που λαμβάνεται με μηχανική στίλβωση αντιστοιχεί σε αποτριπτική διαδικασία και αποτελείται από προσκρούσεις που εκτείνονται σε ολόκληρη την επιφάνεια, τα ύψη των οποίων εξαρτώνται από το τρίψιμο του λειαντικού υλικού που χρησιμοποιείται στη μηχανική στίλβωση – δηλαδή όσο μικρότερο το μέγεθος των λειαντικών σωματιδίων στη σύνθεση της πάστας τόσο μικρότερες οι προσκρούσεις (Εικόνα 8-10 α) – από ό, τι στην περίπτωση χρήσης επικαλυμμένων λειαντικών δίσκων. Από την άλλη, η νανομετρική επιφανειακή τοπογραφία που προκύπτει από τη διαδικασία ηλεκτρολυτικής στίλβωσης υπογραμμίζει την ύπαρξη μιας διαδικασίας έλξης του άνω στρώματος των μεταλλικών σωματιδίων και του σχηματισμού κρατήρων (Εικόνα 8-10 β), η οποία εξηγεί τις υψηλές τιμές τραχύτητας που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής. Ακόμη, η βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας επηρέασε την επακόλουθη ανάπτυξη βιοφίλμ κυττάρων (Εικόνα 8-11). Πιο αναλυτικά, η ενδιάμεση φάση των 24 ωρών (Εικόνα 8-11) χαρακτηρίστηκε από μια μη ομοιόμορφη διαδικασία ανάπτυξης του βιοφίλμ. Ως αποτέλεσμα, υπήρχαν ζώνες με κυτταρικά συσσωματώματα (Εικόνα 8-11 β) και ζώνες καλυμμένες μερικώς με κύτταρα



(Εικόνα 8-11 δ). Στη φάση ωρίμανσης των 4 ωρών, τα κύτταρα κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα σε ολόκληρη την μεταλλική επιφάνεια και επίσης στο πάχος του βιοφίλμ (Εικόνα 8-11 α). Δυσκολίες σχετικά με την ομοιόμορφη κατανομή των κυττάρων σημειώθηκαν στα ηλεκτρολυτικά γυαλισμένα δείγματα, λόγω της παρουσίας των κρατήρων, με διαφορετικές διαστάσεις και πυκνότητες (Εικόνα 8-10 α και β), που αντιπροσώπευαν ζώνες που ήταν δύσκολο να προσπελαστούν στο αρχικό στάδιο της προσκόλλησης στο βιοφίλμ. Τέλος, οι ερευνητές συμπέραναν ότι η βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας των σκελετών Μ.Ο. είναι δυνατή με, την αύξηση της απόδοσης της μηχανικής στίλβωσης με λειαντικά εναιωρήματα, τον έλεγχο των φυσικών και χημικών παραμέτρων της ηλεκτρολυτικής στίλβωσης και την εφαρμογή βιοσυμβατών επικαλύψεων λεπτής μεμβράνης έτσι ώστε τα κύτταρα *Candida Albicans* να δυσκολεύονται πολύ να προσκολληθούν.²¹⁵



Εικόνα 8-8 3D επίπεδη επιφανειακή τοπογραφία δειγμάτων κράματος Co-Cr, α – μηχανική με τη χρήση σπόγγου και λειαντικής πάστας και β – ηλεκτρολυτική στίλβωση.²¹⁵



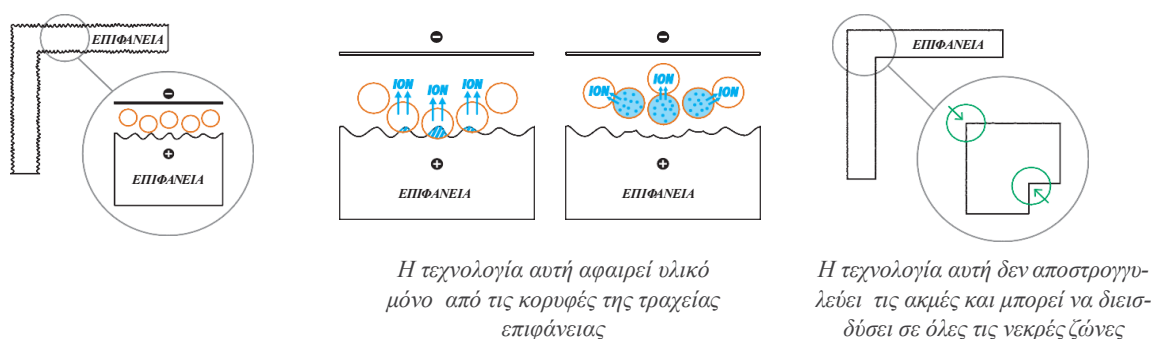
Εικόνα 8-9 SEM εικόνες των βιοφίλμ *Candida Albicans* που σχηματίστηκαν στις 48 ώρες (α, γ) και στις 24 (β, δ) και στις επιφάνειες που στίλβώθηκαν ηλεκτρολυτικά (α, β) και μηχανικά (γ, δ). Διακρίνεται πως η καλύτερη ποιότητα επιφάνειας από τη μηχανική στίλβωση επηρεάζει την προσκόλληση μικροοργανισμών.²¹⁵

Πέρα από την «υγρή» ηλεκτροστίλβωση, στην αγορά έχει εισαχθεί και μια νέα τεχνολογία, που αν και δεν έχει δοκιμαστεί ακόμη πειραματικά προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά της, εντούτοις παρουσιάζει πραγματικό ενδιαφέρον και είναι άξιο αναφοράς. Πρόκειται για την «ξηρή» ηλεκτροστίλβωση της εταιρείας Dlyte (Εικόνα 8-12), η αλλιώς «Dlyte ηλεκτροστίλβωση», η οποία αποτελεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία καθώς πραγματοποιείται από ένα μηχάνημα και με αυτόν τον τρόπο παραλείπονται όλες οι «συμβατικές» διαδικασίες τελικής επεξεργασίας (αμμοβολή, λείανση, ηλεκτροστίλβωση και τελική στίλβωση) που απαιτούνται μετά από την πυροσυσσωμάτωση, ή χύτευση ή

ακόμη και την κοπή, των σκελετών Μ.Ο. Το σύστημα DLyte χρησιμοποιεί την τεχνολογία DryLyte, μια νέα τεχνολογία λείανσης και στίλβωσης μετάλλων που λειτουργεί με μεταφορά ιόντων χρησιμοποιώντας ελεύθερα στερεά σωματίδια. Ουσιαστικά χρησιμοποιεί ξηρή ηλεκτρόλυση που δεν χρησιμοποιεί κανένα υγρό ως ηλεκτρολύτη. Η DryLyte ηλεκτροστίλβωση διαφοροποιείται από την παραδοσιακή στίλβωση, από το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή εξάγει το υλικό μόνο από τις κορυφές της τραχείας επιφάνειας, δεν στρογγυλεύει τις άκρες (ήγουν διατηρεί τα αρχικά σχήματα ακόμη και τις ακμές κοπής) αλλά διεισδύει σε όλες τις εσωτερικές κοιλότητες (νεκρές ζώνες) του σκελετού στις οποίες δεν είναι δυνατή η μηχανική πρόσβαση. Σημειώνεται, ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα κράματα Co-Cr όσο και στο Ti. Η εταιρεία υποστηρίζει ότι τα κύρια πλεονεκτήματα της είναι ότι:

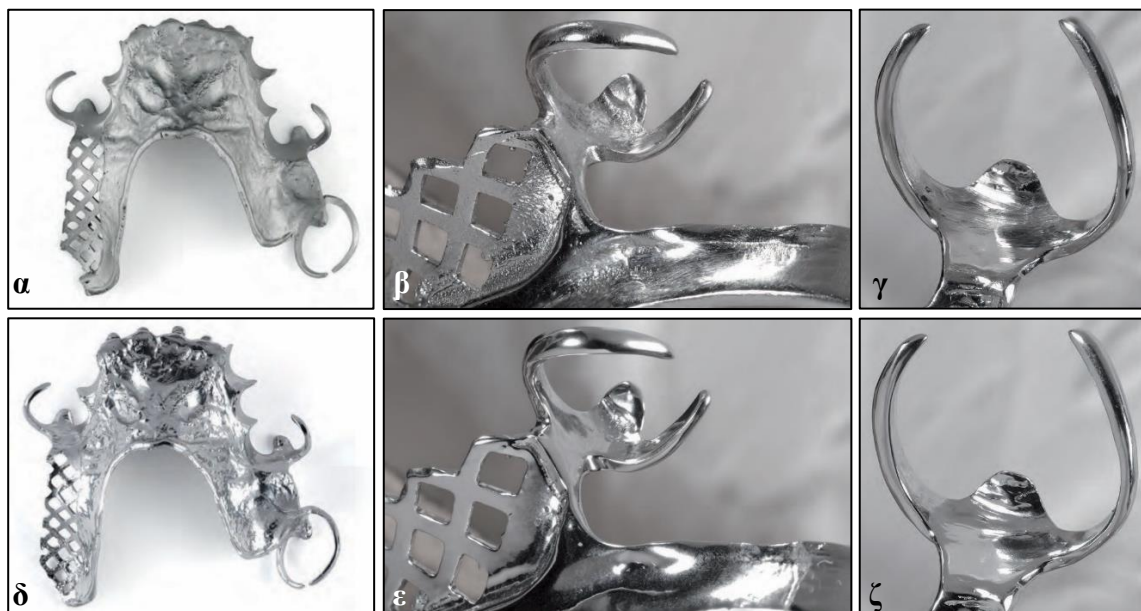
- Δημιουργεί μια ομοιογενή στίλβωση σε όλη την επιφάνεια, χωρίς να αφήνει σημάδια-μοτίβα εκτροχισμού (Εικόνα 8-13).
- Έχει την ικανότητα να επεξεργάζεται πολύπλοκες γεωμετρίες χωρίς προγραμματισμό και χωρίς να δημιουργεί μικρογρατζουνιές στην επιφάνεια.
- Σέβεται τις αντοχές
- Η τελική επιφάνεια που δημιουργεί είναι λαμπερή σαν καθρέπτης, και δημιουργείται σε ένα στάδιο και με προβλέψιμο κόστος.
- Το κόστος είναι ελεγχόμενο και οι χρόνοι προβλέψιμοι μέχρι την παραγωγή του τελικού σκελετού. Μάλιστα, όσον αφορά τους χρόνους η εταιρεία προβλέπει ότι σκελετοί Μ.Ο. από σύντηξη ή χύτευση θέλουν χρόνο 70'-80' και 50'-60' αντίστοιχα, ενώ στεφάνες από σύντηξη, χύτευση ή κοπή θέλουν χρόνο 30'-35', 30'-35', και 25'-30' αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι το μηχάνημα δέχεται μέχρι 3 σκελετούς ή μέχρι 6 στεφάνες
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον.
- Γενικώς, μειώνει την πολυπλοκότητα των τρεχουσών διαδικασιών πολλαπλών βημάτων, μειώνοντας τον χρόνο αναμονής και προετοιμασίας.²¹⁶

ΞΗΡΗ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΙΛΒΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ



Εικόνα 8-10 Διαδικασία ξηράς Dlyte ηλεκτροστίλβωσης.²¹⁶





Εικόνα 8-11 Στις εικόνες α, β και γ φαίνεται ο σκελετός Μ.Ο. που στιλβώθηκε με τη συμβατική μέθοδο (μηχανικός-χειροκίνητος τρόπος και επιπλέον κλασσική ηλεκτροστιλβωση). Στις εικόνες δ, ε και ζ φαίνεται ο σκελετός Μ.Ο. που στιλβώθηκε χρησιμοποιώντας μονάχα ξηρή (Dlyte) ηλεκτροστιλβωση.²¹⁶

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι για τη στιλβωση επιφανειών των κραμάτων Co-Cr, έχει χρησιμοποιηθεί και η στιλβωση με λέιζερ σύμφωνα με πρόσφατες δημοσιεύσεις. Ωστόσο, επειδή η τεχνική αυτή δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη σε κράματα Co-Cr σκελετών Μ.Ο., αναφέρονται μονάχα ορισμένα κρίσιμα σημεία. Η ποιότητα της επιφάνειας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη στιλβωση με λέιζερ, ενώ επιπλέον ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι η επιφανειακή μικροδομή και η αντίσταση στη διάβρωση βελτιώνονται ελέγχοντας τις θερμικές δομές και τα σχηματισμένα οξειδία.⁸⁸ Ωστόσο, δεδομένου ότι στη στιλβωση με λέιζερ τα υλικά απομακρύνονται με βάση τη διαδικασία τήξης και επακόλουθης στερεοποίησης με μια δέσμη λέιζερ που χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας, είναι μια μέθοδος που βασίζεται στη θερμική ενέργεια και έχει ως αποτέλεσμα θερμική επίδραση στην επιφάνεια των στιλβωμένων κραμάτων, με αποτέλεσμα ρωγμές και υπολειμματικές τάσεις. Σε σύγκριση με τη στιλβωση με λέιζερ, η ηλεκτροστιλβωση είναι μια προσέγγιση χωρίς θερμότητα που βασίζεται στη διαδικασία της ανοδικής διάλυσης, με αποτέλεσμα μια επιφάνεια χωρίς ζημιές, χωρίς τις ρωγμές ή υπολειμματικές τάσεις. Επιπλέον, δημιουργείται ένα νέο και παχύ στρώμα οξειδίου στην ηλεκτροστιλβωμένη επιφάνεια, το οποίο βελτιώνει τη βιοσυμβατότητα και την αντοχή στη διάβρωση (μείωση απελευθέρωσης ιόντων) του σκελετού.⁵⁴

9.1 Σύγκριση Co-Cr με μεταλλικά υλικά

9.1.1 Σύγκριση Co-Cr με το χρυσό

Τα ακόλουθα είναι τα συγκρίσιμα χαρακτηριστικά των κραμάτων χρυσού και των κραμάτων Co-Cr, όσον αφορά τη χρήση τους σε σκελετούς Μ.Ο.: το καθένα είναι καλά ανεκτό από τους στοματικούς ιστούς. Είναι εξίσου αποδεκτά αισθητικά. Ένα κράμα Co-Cr χαμηλής τήξης ή ένα κράμα χρυσού μπορεί να χυτευθεί σε σφυρήλατο σύρμα και τα σύρματα μπορούν να συγκολληθούν είτε σε κράματα χρυσού είτε σε Co-Cr (αυτά τα χαρακτηριστικά είναι σημαντικά για την υπέρβαση του αντικειμένου από ορισμένους οδοντιάτρους για την αυξημένη ακαμψία των κραμάτων Co-Cr για τα τμήματα των άμεσων συγκρατητήρων που πρέπει να εμπλέκουν μια εσοχή του δοντιού στήριξης). Η ακρίβεια που αποκτάται στη χύτευση και των δύο κραμάτων είναι κλινικά αποδεκτή υπό αυστηρά ελεγχόμενες διαδικασίες επένδυσης και χύτευσης και οι διαδικασίες συγκόλλησης (αυτογενούς και ετερογενούς) για την επισκευή των σκελετών μπορούν να πραγματοποιηθούν σε κάθε κράμα (στην τεχνική συγκόλλησης με λέιζερ, λόγω της λιγότερο ανακλαστικής φύσης του κράματος και της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητας από τα κράματα χρυσού, τα κράματα Co-Cr απαιτούν χαμηλότερη απόδοση ενέργειας στις ρυθμίσεις μέσης ισχύος μαζί με μεγαλύτερη διάρκεια παλμού).³² Ακολούθως οι διαφορές μεταξύ των κραμάτων είναι οι παρακάτω.

Ορισμένοι ερευνητές επισήμαναν ότι, οι ιδιότητες του ορίου αναλογίας και της τελικής αντοχής σε εφελκυσμό των εμπορικά κατασκευασμένων βασικών μεταλλικών κραμάτων και των θερμικά-σκληρυμένων (heat-hardened) κραμάτων χρυσού είναι ουσιαστικά οι ίδιες.⁵⁹ Νεότερες μελέτες αναφέρουν ότι τα κράματα Co-Cr γενικά έχουν μικρότερο όριο διαρροής σε σύγκριση με κράματα χρυσού. Έχοντας χαμηλότερο όριο αναλογίας, τα κράματα Co-Cr παραμορφώνονται μόνιμα σε χαμηλότερα φορτία από τα κράματα χρυσού. Επομένως, ο οδοντίατρος πρέπει να σχεδιάσει ένα σκελετό Co-Cr, έτσι ώστε ο βαθμός παραμόρφωσης που αναμένεται σε έναν άμεσο συγκρατητήρα να είναι μικρότερος από έναν συγκρίσιμο βαθμό παραμόρφωσης για ένα χρυσό σκελετό.⁶⁰ Επιπρόσθετα, τα κράματα Co-Cr



έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου διπλάσιο (200-220 GPa) από εκείνο των κραμάτων χρυσού (81-90 GPa) και η υψηλότερη ακαμψία τους αν συνδυαστεί με το γεγονός ότι τα κράματα Co-Cr έχουν χαμηλότερη πυκνότητα σε συγκρίσιμα τμήματα και ειδικό βάρος που ισούται περίπου με το μισό των κραμάτων χρυσού, συμπεραίνεται ότι τα κράματα Co-Cr υπερτερούν των κραμάτων χρυσού, και επομένως μπορούν να κατασκευαστούν σκελετοί άκαμπτοι στις μασητικές δυνάμεις και σε μικρότερο (μισό) πάχος, δηλαδή κατά πολύ ελαφρύτερες των χρυσοκραμάτων και κατά συνέπεια ευκολότερα ανεκτές από τον ασθενή.^{4,5,7} Σύμφωνα με τη μαθηματική σχέση που περιγράφεται από τον Beck, ο μεγαλύτερος συντελεστής ελαστικότητας των βασικών κραμάτων θα επιτρέψει μείωση 16 % στην ακτίνα διατομής (σε σχέση με τα χρυσά κράματα) χωρίς συνοδευτική μείωση της ακαμψίας.⁵⁹ Έτσι μπορούν να φανούν χρήσιμα σε τμήματα με περιορισμό πάχους στα οποία απαιτείται ναρθοκοποίηση, καθώς και στη μείωση του όγκου ενός βραχίονα συγκράτησης για Μ.Ο για μεγαλύτερη ευκαμψία αν και αυτό δεν ενδείκνυται επειδή το μέγεθος των κόκκων των κραμάτων Co-Cr είναι συνήθως μεγαλύτερο (σχετίζεται με το χαμηλότερο όριο αναλογίας), και έτσι η μείωση του όγκου των CST Co-Cr αυξάνει την πιθανότητα θραύσης ή μόνιμης παραμόρφωσης. Οι βραχίονες συγκράτησης και για τα δύο κράματα θα πρέπει να έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος, αλλά το βάθος εσοχής που χρησιμοποιείται για τη συγκράτηση πρέπει να μειωθεί κατά το ήμισυ όταν επιλέγεται το κράμα Co-Cr.³² Έτσι το Co-Cr προσφέρει το πλεονέκτημα για τη βέλτιστη τοποθέτηση στη σωστή θέση των συγκρατητικών στοιχείων του σκελετού όταν το μεγαλύτερο βάθος εσοχής που μπορεί να βρεθεί σε ένα δόντι στηρίγματος είναι της τάξης των 0,13 cm (0,05 ιντσών), καθώς ένα χρυσό συγκρατητικό στοιχείο δεν θα ήταν τόσο αποτελεσματικό στη συγκράτηση (η μεγαλύτερη ευκαμψία των κραμάτων χρυσού επιτρέπει συνήθως τη θέση των άκρων των συγκρατητικών βραχιόνων στο ένα τρίτο του δοντιού στήριξης στην περιοχή προς τα προς τα ούλα), ενώ για τον ίδιο λόγο αποτελεί βασική ίσως ένδειξη η χρησιμοποίηση αγκίστρων από κράματα χρυσού σε δόντια με προβλήματα από το περιοδόντιο, σε δόντια με έντονη ανατομική μύλη και σε δόντια που από τη φύση τους είναι μικρής αντοχής σε φορτίσεις (πλάγιοι τομείς άνω γνάθου, τομείς κάτω γνάθου).^{5,32,59} Επιπρόσθετα, η υψηλότερη ευκαμψία επιτρέπει επίσης τη ρύθμιση-προσαρμογή των στοιχείων συγκράτησης χρυσού κράματος.³² Αντιθέτως, σε παλαιότερη μελέτη υποστηρίχθηκε ότι η ρύθμιση των κραμάτων Co-Cr μπορεί να προκαλέσει ελαττώματα στην επιφάνεια και να οδηγήσει σε αστοχία και ως εκ τούτου, ο επαγγελματίας θα πρέπει να εξετάσει τη χρήση κραμάτων χρυσού για συγκρατητικά στοιχεία ιδιαίτερα εάν αναμένεται προσαρμογή.^{32,59}



Η σκληρότητα των κραμάτων Co-Cr είναι υψηλότερη από τα κράματα χρυσού. Αν και η σκληρότητα δεν είναι ο μοναδικός καθοριστικός παράγοντας της αποτριβής, έχει παρατηρηθεί μεγαλύτερη φθορά φυσικών δοντιών με ορισμένα από τα διάφορα κράματα Co-Cr σε σύγκριση με τα κράματα χρυσού τύπου IV τα οποία δείχνουν να είναι πιο συμβατά με τις απέναντι επιφάνειες της αδαμαντίνης. Ωστόσο, η αποτριβή δεν είναι σημαντική και για τα δύο κράματα στις κάθετες επιφάνειες των δοντιών.^{32,59} Ακόμη, κράματα Co-Cr διατηρούν τη στιλπνότητα τους καλύτερα από τα κράματα χρυσού. Η μικρότερη φθορά κάνει ένα κράμα να διαρκεί περισσότερο αρά και οικονομικά τα κράματα Co-Cr προσφέρονται καλύτερα, αν και η αυξημένη σκληρότητα κάνει δυσχερέστερη τη στίλβωση των κραμάτων Co-Cr και τη διαδικασία πιο χρονοβόρα.⁶⁰

Τα κράματα Co-Cr αναφέρεται ότι σκληρύνουν με ενδοτράχυνση ταχύτερα από τα κράματα χρυσού και αυτό, που σχετίζεται με το χονδροειδές μέγεθος κόκκων, μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία κατά τη λειτουργία.³² Ένας ερευνητής εξέτασε το μέγεθος κόκκων του κράματος Co-Cr σε διαφορετικές θέσεις στη Μ.Ο. και διαπίστωσε ότι ο αριθμός κόκκων μειώνεται συνεχώς από το άκρο του αγκίστρου προς το αγωγό. Ο αριθμός κόκκων σε μια διατομή αγκίστρου έχει αναφερθεί ότι είναι τόσο χαμηλός όσο δύο ή τρεις. Από την άλλη πλευρά, σε μια διατομή ενός αγκίστρου από κράμα χρυσού μπορεί να υπάρχουν έως και 100 κόκκοι.¹²⁶

Ένα κράμα χρυσού θεωρείται απρόσβλητο από τα υγρά του στόματος, όταν η περιεκτικότητα σε χρυσό, λευκόχρυσο ή μέταλλα της ομάδας του λευκόχρυσου υπερβαίνει το 75 %. Για τα κράματα Co-Cr ένας ερευνητής έχει αναφέρει ότι ανθίστανται εξίσου με το χρυσό στα υγρά του στόματος. Μάλλον όλα τα κράματα παρουσιάζουν μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό διάβρωσης στο στοματικό περιβάλλον. Δεν είναι καθόλου ασύνηθες κράματα χρυσού να παρουσιάζουν αλλαγή χρώματος, και αυτό αποδίδεται σε ακατάλληλη επεξεργασία του κράματος. Το χαμηλότερο πάντως διαβρωτικό δυναμικό παρουσιάζει η αμιγής Pt και ο Au 21K, ενώ μεγαλύτερο διαβρωτικό δυναμικό έχουν τα κράματα στελλιτών (Vitallium, Wiron).⁵ Έχει παρατηρηθεί ότι οι χρυσοί σκελετοί για Μ.Ο. είναι πιο επιρρεπείς στο να προκαλέσουν γαλβανικό σοκ στα δόντια στήριξης που αποκαθίστανται με ασημί αμάλγαμα από ότι οι σκελετοί που κράματος Co-Cr. Αυτό μπορεί να μην είναι βάσιμο-έγκυρο κριτήριο για την επιλογή ενός συγκεκριμένου κράματος όταν ο οδοντίατρος έχει τον πλήρη έλεγχο της επιλογής των αποκαταστατικών υλικών.³²

Τα κράματα Co-Cr είναι πιο δύσκολο να χυτευτούν από τα κράματα χρυσού λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών τήξης τους. Εμφανίζουν επίσης μεγαλύτερη συστολή χύτευσης (περίπου 2,3 %) που πρέπει να αντισταθμιστεί.¹⁹⁵ Λόγω της ευγένειας των χρυσών



κραμάτων, είναι δυνατή η επαναχύτευση του υλικού ξανά και ξανά χωρίς να χάσει κάποια από τις απαιτούμενες ιδιότητές του. Ωστόσο, το ίδιο δεν μπορεί να ειπωθεί για τα βασικά μεταλλικά κράματα.¹⁹² Τα άγκιστρα Co-Cr έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος μετάλλου σε σύγκριση με τα κράματα χύτευσης χρυσού τύπου IV.⁸⁰

Ορισμένοι ερευνητές υποστήριξαν ότι κάθε κράμα έχει επιθυμητά χαρακτηριστικά, αλλά κανένα δεν είναι ιδανικό για όλα τα τμήματα σκελετού Μ.Ο. Επομένως, η πρόκληση είναι η αποτελεσματική χρήση κάθε κράματος με βάση τις φυσικές του ιδιότητες. Μάλιστα δοκίμασαν ως εναλλακτική λύση, την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. από τον συνδυασμό των δύο κραμάτων σε ένα ενιαίο σκελετό με σκοπό κάθε κράμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα τμήματα του σκελετού που ταιριάζει καλύτερα και με σκοπό να περιοριστεί εκεί που οι ιδιότητές του το καθιστούν δυσμενές, ωστόσο επισήμαναν ότι απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την διερεύνηση του χαρακτήρα και του δεσμού μεταξύ των κραμάτων, παρά το γεγονός ότι η επιχύτευση χρυσού σε κράμα Co-Cr δεν φάνηκε να τροποποιεί τις μηχανικές ιδιότητες.⁵⁹

9.1.2 Σύγκριση Co-Cr με το σφυρήλατο σύρμα

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής σφυρήλατων συρμάτων αγκιστρών (wrought wire clasps) είναι το κράμα Co-Cr, ο ανοξείδωτος χάλυβας, και ο χρυσός.^{79,217} Ωστόσο, στην ενότητα αυτή αναφέρονται πληροφορίες που αφορούν όχι μόνο τη σύγκριση των υλικών αλλά και για σύγκριση της μεθόδου κατασκευής (κάμψης) με άλλες μεθόδους.

Οι ακατάλληλες εργαστηριακές διαδικασίες μπορούν να μειώσουν ορισμένες επιθυμητές φυσικές ιδιότητες της επεξεργασμένης δομής, καθιστώντας την σχετικά άνοηλη για τον επιδιωκόμενο σκοπό της. Για παράδειγμα, όταν θερμαίνεται το σφυρήλατο σύρμα (όπως στις διαδικασίες επιχύτευσης ή συγκόλλησης), οι φυσικές του ιδιότητες και η μικροδομή του μπορεί να αλλάξουν σημαντικά, ανάλογα με τη θερμοκρασία, το χρόνο θέρμανσης και τη λειτουργία ψύξης. Η αντοχή σε εφελκυσμό της δομής επεξεργασίας είναι μεγαλύτερη (περίπου κατά 25 %), η σκληρότητα και η δύναμη της επεξεργασμένης δομής είναι επίσης μεγαλύτερες από αυτήν του χυτού κράματος. Αυτό σημαίνει ότι μια σφυρήλατη δομή που έχει μικρότερη διατομή από μια χυτή δομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βραχίονας συγκράτησης για την εκτέλεση της ίδιας λειτουργίας. Έχει προταθεί ότι απαιτείται ελάχιστο όριο διαρροής 60.000 psi για το στοιχείο συγκράτησης ενός άμεσου συγκρατητήρα. Ένα ποσοστό επιμήκυνσης μικρότερο από 6 % είναι ενδεικτικό ότι ένα σφυρήλατο σύρμα μπορεί να μην επιδέχεται να χυτευθεί χωρίς συνακόλουθες ανεπιθύμητες αλλαγές στη μικροδομή.³²



Τα σφυρήλατα συρμάτινα άγκιστρα Μ.Ο. εμφανίζουν μεγαλύτερη ευκαμψία, επιτρέποντας την τοποθέτηση σε μεγαλύτερο βάθος εσοχής, έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα χυτά τα οποία εμφανίζουν ελαττώματα χύτευσης και σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες των ευθύγραμμων συρμάτων ενδέχεται να αλλάξουν κατά τη διαδικασία κάμψης. Η κάμψη ενός σύρματος πάνω από το ελαστικό του όριο οδηγεί σε ένα νέο παραμορφωμένο σχήμα λόγω πλαστικής παραμόρφωσης όμως με την παρουσία υπολειμματικών τάσεων.^{218,219} Ορισμένοι ερευνητές πραγματοποιώντας κάμψη σε γωνία 90° ή 120° και εκφόρτιση στον ώμο και τον βραχίονα των αγκίστρων εξέτασαν την επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης από τη διαδικασία κάμψης στις μηχανικές ιδιότητες των σφυρήλατων συρμάτινων αγκίστρων Co-Cr.²¹⁸ Κάτω από τη δύναμη κάμψης (φόρτιση) η μέγιστη τάση εφελκυσμού καταγράφηκε στην εξωτερική επιφάνεια της γωνίας κάμψης, ενώ μετά την εκφόρτιση η μέγιστη τάση εφελκυσμού εμφανίστηκε στο εσωτερικό της γωνίας κάμψης. Με τη μείωση του άκρου του αγκίστρου αυτή η τάση αυξήθηκε έως και 203 % αυτής πριν από την καταστροφή. Η μεταβολή της τάσης από την παραμόρφωση ήταν μεγαλύτερη στον ώμο από ότι στον βραχίονα. Το απαιτούμενο φορτίο για την παραμόρφωση ήταν περίπου 43 % μεγαλύτερο στα σύρματα με γωνία βραχίονα 120° από αυτά με γωνία 90°. Η μόνιμη παραμόρφωση των σφυρήλατων συρμάτων είναι πιθανό να ξεκινήσει στον ώμο του αγκίστρου, ενώ η ευκαμψία-συγκρατητική δύναμη εξαρτάται από τη γωνία κάμψης στο βραχίονα του αγκίστρου.²¹⁸ Ένας άλλος ερευνητής, εκτίμησε την επίδραση της κάμψης συρμάτων κράματος χρυσού και CST Co-Cr στις μηχανικές ιδιότητες τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν τα εξής:

- Μια δύναμη κάμψης αύξησε την κύρια τάση εφελκυσμού στην εξωτερική επιφάνεια της γωνίας κάμψης και την τάση θλίψης στην εσωτερική επιφάνεια της γωνίας κάμψης στις μέγιστες τιμές τους. Μετά την εκφόρτιση με επαναφορά (springback) δημιουργήθηκε εναπομένουσα τάση εφελκυσμού στην εσωτερική επιφάνεια.²¹⁹
- Όταν τα συρμάτινα άγκιστρα από κράμα χρυσού υποβάλλονται σε κάμψη, το σύρμα παρουσιάζει μια σχετικά μεγαλύτερη ευκαμψία (οι μέγιστες τιμές εφελκυστικών τάσεων των συρμάτινων αγκίστρων κράματος χρυσού σε αυτή τη μελέτη ήταν περίπου το 50 % από εκείνες για το σύρμα Co-Cr κάτω από τη δύναμη κάμψης και περίπου 70 % μετά την εκφόρτιση) αλλά ενδέχεται να παρουσιάζει ένα σχετικά μεγάλο φαινόμενο επαναφοράς συγκριτικά με τα κράματα Co-Cr.²¹⁹
- Η απαιτούμενη δύναμη για την παραμόρφωση χρησιμοποιήθηκε ως κλίμακα για την εκτίμηση της δύναμης συγκράτησης των αγκίστρων. Η δύναμη αυξήθηκε σχεδόν κατά 40 % όταν η γωνία στον ώμο του αγκίστρου μετατοπίστηκε από 90° σε 120°, αλλά δεν



ήταν ευαίσθητη στη γωνία του βραχίονα. Το παραπάνω αποτέλεσμα ήταν σε αντίθεση με εκείνα των αγκίστρων Co-Cr για τα οποία η δύναμη συγκράτησης αυξήθηκε κυρίως όταν η γωνία στον βραχίονα μετατοπίστηκε από 90° σε 120°. Μπορεί να υποθεθεί ότι η αύξηση της δύναμης στα άγκιστρα Co-Cr επηρεάστηκε σε μεγαλύτερο βαθμό από τη γωνία του βραχίονα του αγκίστρου λόγω της συνολικής ακαμψίας του λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας, ενώ η αύξηση των χρυσών αγκίστρων επηρεάστηκε από την γωνία ώμου του αγκίστρου λόγω της υψηλής δομικής ευκαμψίας του.²¹⁹

- Τα συρμάτινα άγκιστρα από κράμα χρυσού παρουσιάζουν μια σχετικά μικρότερη δύναμη συγκράτησης αλλά και μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση σε σύγκριση με τα συρμάτινα άγκιστρα Co-Cr.²¹⁹
- Αυτό υποδηλώνει ότι τα συρμάτινα άγκιστρα κράματος χρυσού είναι κατάλληλα για περιοδοντικά εξασθενημένα δόντια-στηρίγματα.²¹⁹
- Τα συρμάτινα άγκιστρα είναι πιο ευαίσθητα σε αστοχία, σε σύγκριση με τα σύρματα ευθείας σφυρηλάτησης, ήτοι η αντοχή τους επιβαρύνεται, λόγω των υπολειμματικών τάσεων που παράγονται κατά τη διαδικασία κάμψης.²¹⁹

Το 2015, ο Arafa²²⁰ ανέφερε ότι το άγκιστρο από σφυρήλατο σύρμα ανοξειδωτου χάλυβα συγκριτικά με τα RPL και RPI (μη συρμάτινα άγκιστρα - δεν αναφέρεται ο τρόπος κατασκευής και το κράμα) είχε το πιο βλαβερό αποτέλεσμα στις υποκείμενες των δοντιών-στηριγμάτων στηρικτικές δομές. Άλλοι ερευνητές έδειξαν ότι οι συγκρατητικές δυνάμεις των σφυρήλατων συρμάτινων αγκίστρων εμβυθισμένων σε ρητίνη της βάσης σε εσοχή 0,5 mm ήταν υψηλότερες από εκείνες των DMLS Co-Cr απλών τρισκελών και Co-Cr DMLS τύπου δοκού I τα οποία τοποθετήθηκαν σε εσοχή 0,1 mm, ωστόσο οι ερευνητές επισήμαναν ότι αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι διέθεταν διαφορετικές εσοχές (τα συρμάτινα χρειάζονται κανονικά εσοχή 0,75 mm, και τα άλλα 2 0,25 mm). Έτσι, οι δυνάμεις συγκράτησης των Co-Cr DMLS, απλών τρισκελών και των τύπου δοκού-I που εμπλέκονται σε βαθύτερες εσοχές θα ήταν συγκρίσιμες με τη συγκράτηση των αγκίστρων Co-Cr που έχει αναφερθεί σε παλαιότερες βιβλιογραφίες.¹¹⁷ Το 2020, οι Nagayama και συν²²¹ ανέφεραν ότι η χρήση CST Co-Cr αγκίστρων ή/και CST γλωσσικών πλακών οδηγεί σε μειωμένη κινητικότητα των υπολειπόμενων δοντιών, ήτοι σε μεγαλύτερη σταθεροποίηση των δοντιών στηριγμάτων, σε σχέση με τη χρήση συρμάτινων αγκίστρων και/ή CST γλωσσικών πλακών.

Αξίζει να σημειωθεί και κάτι ακόμη για τα συρμάτινα άγκιστρα. Ορισμένοι ερευνητές, πραγματοποιώντας συγκόλληση με λέιζερ σφυρήλατου κράματος Co-Cr (ρόλος αγκίστρου) σε πλάκες κράματος Co-Cr (ρόλος σκελετού) ανέφεραν τα εξής. Τα σφυρήλατα σύρματα επηρεάστηκαν από την ακτινοβολήση με λέιζερ και είχαν λιώσει μαζί και πάνω στο μέταλλο



πλήρωσης. Η αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης ήταν 100 % ισοδύναμη με το μέγιστο εφελκυστικό φορτίο του σφυρήλατου κράματος Co-Cr χρησιμοποιώντας σύρμα πλήρωσης laserniumTM (είδος Co-Cr). Επιπλέον, η επίδραση του σύρματος στις μηχανικές ιδιότητες των διαδικασιών συγκόλλησης ήταν προβληματική. Ορισμένοι ερευνητές, ανέφεραν ότι η θερμική επεξεργασία βελτιώνει τις δυναμικές ιδιότητες των σφυρήλατων συρμάτων, για παράδειγμα αυξάνοντας την ακαμψία και μειώνοντας τη μόνιμη παραμόρφωση. Ωστόσο, όταν τα συρμάτινα άγκιστρα θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες, η ακαμψία μειώνεται και η μόνιμη παραμόρφωση αυξάνεται. Οπότε, είναι σημαντικό να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του σφυρήλατου σύρματος. Η θραύση από εφελκυσμό συνέβη στο σφυρήλατο σύρμα και όχι στην συγκόλληση, αν και υπήρχαν δείγματα που εμφάνισαν κενά λόγω του σχεδιασμού της συγκόλλησης. Ακόμα και αν η ακτινοβολία λέιζερ επηρεάζει το σφυρήλατο σύρμα, η αντοχή της συγκόλλησης ήταν παρόμοια μεταξύ των 4 σχεδίων συγκόλλησης.²²²

9.1.3 Σύγκριση Co-Cr με το Ti και κράματα Ti

Η χύτευση σκελετών Μ.Ο. από Ti παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα που περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή του, και συγκεκριμένα:

- Η υψηλή θερμοκρασία τήγματος του τιτανίου, 1672°C σε σχέση με τα κράματα Co-Cr, απαιτεί ειδικές συνθήκες τήξης, κύκλους ψύξης, ειδικά πυροχρώματα και εξοπλισμό για να αποφευχθεί η μόλυνση του. Πιο αναλυτικά, το μέταλλο τήκεται με βολταϊκό τόξο ή μέσω ηλεκτρικού επαγωγικού ρεύματος σε θάλαμο γεμάτο αδρανές αέριο ή σε κενό, λόγω της τάσης του τήγματος να ενώνεται και να προσροφά στοιχεία του ατμοσφαιρικού αέρα (O₂, H₂, N₂), με αποτέλεσμα τη δημιουργία αυξημένου πορώδους, ή ορισμένων ανεπιθύμητων ενώσεων με αποτέλεσμα δυσμενείς επιπτώσεις στις ιδιότητες του χυτού. Στη συνέχεια, το μέταλλο τήκεται και μετά μεταφέρεται στο πυροχρωμάτινο καλούπι μέσω της φυγοκέντρωσης ή μέσω πλήρωσης υπό πίεση/κενό. Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι, η χύτευση του απαιτεί τη χρήση ειδικών πυροχρωμάτων και τη χρήση θαλάμου κενού (χωρίς ατμόσφαιρα περιβάλλοντος), λόγω της τάσης του να αντιδρά στις υψηλές θερμοκρασίες με στοιχεία των κλασικών πυροχρωμάτων φωσφορικού τύπου και να σχηματίζει ένα παχύ στρώμα οξειδίων (οξειδωση) στην επιφάνεια του σκελετού, το οποίο αποτελεί μια ανεπιθύμητη ζώνη μόλυνσης γνωστή σαν «a-case» που έχει πάχος περίπου 10 nm η οποία έχει εξαιρετικά βιοσυμβατή επιφάνεια και αντοχή στη διάβρωση παρόμοια με εκείνη των ευγενών μετάλλων, αλλά μπορεί να μειώσει την αντοχή και την ολικότητα της δομής που λαμβάνεται. Επίσης, οι αντιδράσεις μεταξύ του τετηγμένου μετάλλου τιτανίου και των πυροχρωμάτων παράγουν αέρια, τα οποία προκαλούν πορώδες.³²



Δηλαδή έχει και θετικά έχει και αρνητικά αλλά γενικώς θεωρείται ανεπιθύμητο. Γενικώς, υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι συστημάτων χύτευσης τιτανίου: α) χύτευση υπό πίεση/κενό με διαχωρισμένους θαλάμους τήξης και χύτευσης, β) χύτευση υπό πίεση/κενό με ένα μόνο θάλαμο τήξης και χύτευσης, και γ) χύτευση υπό κενό/φυγοκέντρωση. Διάφοροι εξοπλισμοί διατίθενται στο εμπόριο για χύτευση τιτανίου, οι οποίοι έχουν ξεπεράσει πολλές από τις υπάρχουσες δυσκολίες αλλά το κόστος τους είναι σημαντικά υψηλότερο από τους συμβατικούς εξοπλισμούς χύτευσης.^{5,62,223}

- Ο μεγάλος χρόνος θέρμανσης (burnout), ο οποίος είναι μεγαλύτερος από εκείνον των συμβατικών κραμάτων (πάνω από 10 ώρες). Αυτό είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για την «επείγουσα» εργαστηριακή εργασία.³⁵
- Ελαττώματα χύτευσης, ειδικά πορώδη λόγω χύτευσης από ένα σύστημα πίεσης αερίου, συμβαίνουν συχνά στα χυτά τιτανίου. Οι εμπειρίες δοκιμών και σφαλμάτων των οδοντοτεχνιτών έχουν οδηγήσει σε τροποποιήσεις για την προστασία των χυτών από πόρους: του πάχους των προπλάσμάτων, της αναλογίας του όγκου του προπλάσματος και του όγκου του λειωμένου μετάλλου, της θέσης έκχυσης του λιωμένου μετάλλου και της προσάρτησης ενός μικρού κώνου έκχυσης στο το άκρο του μοτίβου. Επί του παρόντος, η εμφάνιση ελαττωμάτων χύτευσης μπορεί να ελέγχεται ως επί το πλείστον στα χυτά τιτανίου. Ωστόσο, η χύτευση τιτανίου είναι πιο ευαίσθητη και δύσκολη σε σύγκριση με άλλα οδοντικά κράματα ακόμη και τώρα. Απαιτείται προσοχή κατά τη διαδικασία χύτευσης.³⁵
- Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών κατά τη χύτευση, το τιτάνιο παράγει εύκολα ένα ψαθυρό, σκληρό στρώμα χημικής αντίδρασης οξειδίου (a-case) στην επιφάνεια του όπως προαναφέρθηκε, που είναι ένα αναπόφευκτο μειονέκτημα. Το στρώμα αντίδρασης μπορεί να αποβληθεί μηχανικά και χημικά. Ωστόσο, η ακρίβεια εφαρμογής του σκελετού τιτανίου θα είναι αντίστοιχα μικρότερη. Πάντως, σε μελέτες έχει δείχθει ότι η ακρίβεια εφαρμογής, είναι παρόμοια μεταξύ αγκίστρων Co-Cr και τιτανίου. Ένας ερευνητής συνέστησε χημική απομάκρυνση για 1 έως 5 λεπτά με υδροφθορικό οξύ τόσο για κατάλληλες δυνάμεις συγκράτησης όσο και για ακρίβεια φυσικής κατάστασης του τιτανίου. Διαφορετικά, θα εμφανιστούν υπερβολικά μεγάλες συγκρατητικές δυνάμεις.³⁵
- Η κατεργασιμότητα [δυνατότητα εκτροχισμού (cutting) και λείανσης (grinding)] του τιτανίου είναι κατώτερη από εκείνη των συμβατικών οδοντικών κραμάτων. Οι χρόνοι κοπής και λείανσης είναι πολύ μεγαλύτεροι και τα εργαλεία της μηχανής φθείρονται εύκολα. Πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά εργαλεία κοπής και λείανσης για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας του τιτανίου.³⁵



- Η στίλβωση του τιτανίου για τη δημιουργία μιας επιφάνειας σαν «καθρέφτη» είναι εξαιρετικά δύσκολη. Επιπλέον, το στρώμα αντίδρασης παραμένει περιφερειακά στην επιφάνεια του τιτανίου. Η ύπαρξη ενός στρώματος αντίδρασης οξειδίου με διαφορετικά πάχη καθιστά πιο δύσκολη τη στίλβωση του τιτανίου. Όπως και με τη κατεργασιμότητα, θα πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά εργαλεία και μέθοδοι στίλβωσης για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας στη στίλβωση του τιτανίου.³⁵
- Αποκόλληση της ρητίνης της οδοντοστοιχίας. Παλαιότερα, η αποκόλληση της ρητίνης της βάσης της οδοντοστοιχίας από ένα σκελετό τιτανίου παρατηρούνταν συχνά σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την παράδοση της οδοντοστοιχίας. Πρόσφατα, οι αντοχές των δεσμών των ενεργοποιητών συγκόλλησης μετάλλου (metal primers) έχουν βελτιωθεί σημαντικά. Μικρή αποσύνδεση έχει παρατηρηθεί μεταξύ της ρητίνης της οδοντοστοιχίας και του σκελετού τιτανίου, παρόμοια με τους σκελετούς Co-Cr και χρυσού κράματος.³⁵
- Ένα σημαντικό πρόβλημα μπορεί να είναι ο αποχρωματισμός της επιφάνειας του τιτανίου λίγο μετά την παράδοση της οδοντοστοιχίας στον ασθενή. Αυτός ο αποχρωματισμός παρατηρήθηκε σε μια έρευνα μετά από βύθιση της οδοντοστοιχίας τιτανίου σε ένα αλκαλικό καθαριστικό οδοντοστοιχίας. Για αυτό οι οδοντίατροι πρέπει να δίνουν οδηγίες στους ασθενείς για την αποφυγή της χρήσης ισχυρών αλκαλικών καθαριστικών στις οδοντοστοιχίες τιτανίου.³⁵
- Μεγαλύτερη παραμόρφωση των άγκιστρων τιτανίου σε σχέση με τα συμβατικά οδοντικά κράματα.³⁵ Ορισμένοι ερευνητές, συγκρίνοντας 3 διαφορετικές σχεδιάσεις μείζονων συνδετήρων από Ti-6Al-7Nb και Co-Cr, παρατήρησαν ότι παρόλο που η κατακόρυφη απόκλιση και τοπική παραμόρφωση για τους σκελετούς κράματος Ti-6Al-7Nb ήταν υψηλότερη από εκείνη των σκελετών κράματος Co-Cr, ένα σχέδιο σκελετού εκ των τριών εμφάνισε τη μικρότερη παραμόρφωση. Αυτή η μελέτη απέδειξε έτσι ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός είχε σημαντική επίδραση στις ιδιότητες παραμόρφωσης των σκελετών Μ.Ο. από Ti-6Al-7Nb εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες.²²⁴ Άλλοι ερευνητές κατασκεύασαν άγκιστρα Co-Cr και τιτανίου και αφού τα υπέβαλαν σε προσομοιωτή μάζησης για την κυκλική φόρτιση τους σε βάθος της εσοχής ήταν 0,25 mm (ένθεση/απένθεση των άγκιστρων σε 5.000 κύκλους προσομοιώνοντας την κλινική χρήση 3 ετών), παρατήρησαν ότι υπήρχαν σημαντικές διαφορές στη δύναμη συγκράτησης μεταξύ των 2 κραμάτων και μετά την κυκλική δοκιμή και ότι η υψηλότερη συγκρατητική δύναμη καταγράφηκε για τα άγκιστρα Co-Cr και η χαμηλότερη δύναμη συγκράτησης μετρήθηκε στα άγκιστρα καθαρού τιτανίου.²²⁵ Παλαιότερα σε άλλες εργασίες, είχε αναφερθεί ότι η



αντοχή στην κόπωση των αγκίστρων από κράματα Co-Cr είναι μεγαλύτερη από αυτή των κραμάτων Ti και CPTi, αν και η τελευταία παραμένει υψηλή. Η παραμόρφωση (κάμψη) των βραχιόνων από κράμα Co-Cr με σκοπό την αύξηση της συγκρατητικής δύναμης, μπορεί να μην ελαττώσει την αντοχή στην κόπωση. Αντίθετα στα κράματα Ti μπορεί να προκληθεί ελάττωση της αντοχής στην κόπωση.^{4,5} Ακόμη, σε άλλη μελέτη έχει αναφερθεί ότι τα άγκιστρα που παράγονται από κράματα Co-Cr εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή στην κόπωση σε σύγκριση με εκείνα που κατασκευάζονται από κράματα Au, κράματα Ti και Ti. Το τελευταίο καταδεικνύει λιγότερη απώλεια συγκράτησης μετά από τρία χρόνια προσομοιωμένης χρήσης σε σύγκριση με αυτά που παράγονται από κράματα Co-Cr, με το πρώτο να δείχνει χαμηλότερη συχνότητα κατάγματος. Τα αποτελέσματα in vivo έχουν δείξει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη συχνότητα κατάγματος ή απώλεια συγκράτησης μεταξύ των κραμάτων Ti και Co-Cr, γεγονός που δείχνει την ασυνέπεια μεταξύ εργαστηριακών και κλινικών παρατηρήσεων.⁹

- Η βιοσυμβατότητα του τιτανίου είναι δυνατόν να προάγει περισσότερο την προσκόλληση της πλάκας στους σκελετούς τιτανίου σε σύγκριση με τα συμβατικά οδοντικά κράματα.^{2,35} Σε μια μελέτη αναφέρθηκε ότι υψηλότερες ποσότητες βιοφίλμ που σχηματίστηκαν από μη φιλτραρισμένο, φρέσκο ανθρώπινο σάλιο ή *S.mutans* και/ή *Candida albicans* σε CPTi από ότι σε άλλα κράματα συμπεριλαμβανομένων των Co-Cr και σε δείγματα ρητίνης.³⁵
- Συγκόλληση. Όσον αφορά τη συγκόλληση με LW, το τιτάνιο έχει χαμηλότερη τιμή θερμικής αγωγιμότητας και ένα υψηλότερα ποσοστά και ρυθμούς απορρόφησης της δέσμης λέιζερ σε σύγκριση με άλλα οδοντιατρικά κράματα χύτευσης όπως τα κράματα χρυσού ή Co-Cr. Δεδομένου ότι υπάρχουν τέσσερις βαθμοί CPTi από 1 έως 4 με μηχανικές ιδιότητες που κυμαίνονται από εύκαμπτες έως άκαμπτες, τα τμήματα M.O. μπορούν να κατασκευαστούν ξεχωριστά από τον κατάλληλο βαθμό CPTi. Μετά τη χύτευση, κάθε συστατικό μπορεί να ενωθεί με συγκόλληση με λέιζερ. Ακόμα και τα σπασμένα άγκιστρα μπορούν να επανασυνδεθούν με τη συγκόλληση με λέιζερ και η δύναμη συγκράτησης δεν μειώνεται μετά την επισκευή του αγκίστρου. Ωστόσο λόγω της ισχυρής αντιδραστικότητας του τετηγμένου τιτανίου με οξυγόνο στον αέρα του περιβάλλοντος η ενσωμάτωση οξυγόνου κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με λέιζερ μπορεί να επηρεάσει την αντοχή της συγκόλλησης.^{2,35,226,227} Η μόλυνση με στοιχεία του αέρα κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης Ti και των κραμάτων του μπορεί να οδηγήσει σε τροποποίηση της μικροδομής, η οποία προκαλεί σημαντικά αποτελέσματα στις μηχανικές του ιδιότητες, όπως χαμηλότερη ολκιμότητα και χαμηλότερες τιμές αντοχής εφελκυσμού, ακόμη



και όταν συγκολληθεί σε μηχανήματα συγκόλλησης με προστασία αδρανούς αερίου. Έτσι, οι συμβατικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν συγκόλληση με φλόγα οξυγόνου είναι ακατάλληλες για τη συγκόλληση Ti. Η ηλεκτροσυγκόλληση βολφραμίου με αδρανές αέριο, η συγκόλληση με λέιζερ και η συγκόλληση με υπέρυθρη ακτινοβολία είναι τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για μέταλλα με προστατευτικά αέρια, ελαχιστοποιώντας τη μόλυνση από οξυγόνο κατά τη διαδικασία συγκόλλησης και διατηρώντας τις μοναδικές ιδιότητες του μετάλλου.²²³

- Άλλα προβλήματα. Μερικοί ασθενείς που φορούσαν οδοντοστοιχίες τιτανίου ανέφεραν μια «ελαφρώς περίεργη γεύση». Ο λόγος για αυτό το φαινόμενο είναι άγνωστος. Απαιτείται μελλοντική μελέτη σχετικά με την αίσθηση της γεύσης των ασθενών κατά τη χρήση οδοντοστοιχιών τιτανίου.³⁵

Παρά τα όσα προβλήματα προαναφέρθηκαν η χύτευση τιτανίου παρουσιάζει και πλεονεκτήματα:

- Βιοσυμβατότητα και αντοχή στη διάβρωση. Η βιοσυμβατότητα του τιτανίου μπορεί να τονιστεί ως το πιο ευεργετικό σημείο. Σε σχέση με τα συμβατικά οδοντικά κράματα οι σκελετοί τιτανίου πλεονεκτούν καθώς παρουσιάζουν μικρότερη αλλεργία μετάλλων λόγω της εξαιρετικής βιοσυμβατότητας του. Κλινικές αναφορές έχουν δείξει ότι η αλλαγή σε αποκατάσταση πορσελάνης ή υβριδικής ρητίνης και σε οδοντοστοιχίες τιτανίου είναι ο καλύτερος τρόπος για τη θεραπεία ασθενών με μεταλλικές αλλεργίες. Ωστόσο, πρόσφατα, έχουν αναφερθεί αλλεργικές αντιδράσεις σε εμφυτεύματα τιτανίου και μπορεί σταδιακά να αυξηθούν στο μέλλον. Σημειώνεται επίσης ότι σκελετοί τιτανίου έχουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση σε σύγκριση με τα συμβατικά οδοντικά κράματα.³⁵
- Οι σκελετοί τιτανίου έχουν ιδιότητες παρόμοιες ή ελαφρώς καλύτερες σε σχέση με εκείνους των κράματων χρυσού τύπου IV, Ni-Cr και Co-Cr. Κατά το παρελθόν υποστηρίχθηκε ότι, αν και το κράμα Ti-6Al-7Nb έχει πολλές εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες η χαμηλή ακαμψία του έχει περιορίσει την κλινική του χρήση ως υλικό για την κατασκευή ενός μείζονα συνδετήρα Μ.Ο.³⁵ Ορισμένοι ερευνητές, αξιολογώντας τις ιδιότητες κάμψης του κράματος Ti-6Al-7Nb για την κατασκευή μείζονα συνδετήρα Μ.Ο. επιβεβαίωσαν την παραπάνω άποψη καθώς ανέφεραν ότι, σε κατάσταση προσομοίωσης της φόρτισης το κράμα Ti-6Al-7Nb χρησιμοποιώντας συμβατικό σχεδιασμό, παρουσίασε σημαντικά χαμηλότερη ακαμψία ($P = 0,003$) από ότι το κράμα Co-Cr, και το κράμα Ti-6Al-7Nb απαιτεί τροποποιήσεις σχεδιασμού για την βελτίωση της ακαμψίας του όταν χρησιμοποιείται στην κατασκευή μεγάλων συνδετήρων Μ.Ο. Ωστόσο, επισήμαναν ότι η ενίσχυση των σχεδίων που αναπτύχθηκαν σε αυτήν τη μελέτη για ένα κράμα Ti-6Al-



7Nb M.O. ήταν αποτελεσματική στη βελτίωση της ακαμψίας του κράματος για μείζονες συνδετήρες σε επίπεδο που δεν ήταν σημαντικά διαφορετικό από το σχέδιο ελέγχου της M.O. από κράμα Co-Cr.¹⁶⁴ Η αντοχή και η ακαμψία του τιτανίου είναι συγκρίσιμες με εκείνες άλλων πολύτιμων ή υψηλά πολύτιμων κραμάτων που χρησιμοποιούνται συνήθως στην οδοντιατρική και η ολκιμότητα του τιτανίου όταν αυτό είναι χημικά καθαρό, είναι παρόμοια με εκείνη πολλών οδοντικών κραμάτων. Το τιτάνιο μπορεί επίσης να δημιουργήσει κράμα με άλλα μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, βανάδιο ή σίδηρο, για να τροποποιήσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Ωστόσο η τοξικότητα του V έχει επισημανθεί.⁶² Σε παλαιότερες εργασίες αναφέρθηκε, ότι το CPTi με το εξαιρετικά μικρό όριο διαρροής δεν συνίσταται για την κατασκευή μεταλλικών σκελετών M.O. αφού τα βασικά κράματα έχουν διπλάσιο όριο διαρροής. Αντίθετα το κράμα Ti με όριο διαρροής διπλάσιο αυτού των βασικών κραμάτων και με μέτρο ελαστικότητας ελαφρά μικρότερο αυτών, αποτελεί υλικό εκλογής για την κατασκευή σκελετών M.O.^{4,5} Σε άλλη έρευνα αναφέρθηκε, ότι οι βαθμοί CP τιτανίου έχουν όρια διαρροής που είναι πολύ χαμηλά για κλινική χρήση ως άγκιστρα (450 MPa ελάχιστο), αν και η ολκιμότητα είναι υψηλή. Τα πολύ υψηλότερα όρια διαρροής των κραμάτων Ti-6Al-4V είναι οι ίδια με αυτά ενός τυπικού κράματος Co-Cr με ψύξη στο πάγκο αλλά με πολύ ανώτερη ολκιμότητα. Ο συνήθης συντελεστής ελαστικότητας του Young από ένα κράμα τιτανίου είναι το μισό από το Co-Cr και λίγο ελαφρώς υψηλότερος από αυτόν των κραμάτων χρυσού τύπου IV. Αυτό θα απαιτούσε μια διαφορετική προσέγγιση για το σχεδιασμό αγκίστρου από ό, τι χρησιμοποιείται για τα κράματα Co-Cr και θα παρουσίαζε ορισμένα πλεονεκτήματα.^{9,32} Υψηλότερο είναι και το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων Co-Cr (200-220 GPa) σε σύγκριση με αυτά των CPTi (110 GPa).⁹

- Ελαφρύ βάρος. Επειδή το τιτάνιο έχει χαμηλή πυκνότητα, οι οδοντοστοιχίες τιτανίου μπορούν να κατασκευαστούν ώστε να ζυγίζουν λιγότερο από εκείνες που κατασκευάζονται από χρυσό και κράματα Co-Cr. Έτσι, το τιτάνιο θα ήταν κατάλληλο για χρήση σε μεγάλους σκελετούς M.O. Μάλιστα ορισμένοι ασθενείς προτιμούν οδοντοστοιχίες τιτανίου ιδίως για την άνω γνάθο επειδή πιστεύουν ότι οι ελαφριές οδοντοστοιχίες είναι πιο άνετες. Γενικώς πάντως, οι προσθέσεις προσώπου πρέπει να είναι ελαφριές λόγω της κακής τους συγκράτησης. Η χρήση τιτανίου για ελαφριές προσθέσεις προσώπου είναι κλινικά σημαντική.^{2,5,35}
- Μη μαγνητικό. Το CPTi και όλα τα κράματα τιτανίου είναι μη μαγνητικά. Η φυσική διαφορά μεταξύ σιδηρομαγνητικών και μη σιδηρομαγνητικών υλικών έγκειται στον βαθμό μαγνητισμού. Το τιτάνιο είναι μη σιδηρομαγνητικό και δεν είναι ευαίσθητο σε



εξωτερικές παρεμβολές και δεν προκαλεί ανιχνευτή μετάλλων.³⁵ Επίσης τα κράματα Co-Cr έχει αναφερθεί ότι είναι μη μαγνητικά.⁹

- Τροποποίηση επιφάνειας. Για τη βελτίωση της αντοχής κόπωσης του τιτανίου, έχει πραγματοποιηθεί η τροποποίηση της επιφάνειας στον βιομηχανικό κόσμο. Το άγκιστρο είναι το τμήμα της Μ.Ο. που μπορεί να σπάσει πιο εύκολα, λόγω του λεπτού σχήματος και της συγκέντρωσης τάσεων κατά την ένθεση/απένθεση. Ορισμένοι ερευνητές εξέτασαν την επίδραση της σφαιροβολής στην αντοχή κόπωσης του τιτανίου. Τα μικρο-σφαιροειδή σωματίδια πρόσκρουσαν έντονα στην επιφάνεια του τιτανίου και η επιφάνεια έγινε ομαλότερη ενώ οι μηχανικές ιδιότητες αυξήθηκαν.³⁵ Η αντίσταση τη κόπωση αυξάνεται με αυτή τη μέθοδο τόσο στο CPTi και στο Co-Cr.⁶⁹
- Χρησιμοποιώντας το CPTi ως βιο-αδρανές μέταλλο, μπορεί να πραγματοποιηθεί αποκατάσταση με τη χρήση ενός μετάλλου στη στοματική κοιλότητα (one-metal rehabilitation). Γενικά, υπάρχουν πολλά διαφορετικά οδοντικά κράματα στις στοματικές κοιλότητες των περισσότερων ασθενών. Χρησιμοποιώντας CP τιτάνιο, όλες οι μεταλλικές αποκαταστάσεις, οι σκελετοί Μ.Ο. και τα τυχόν εμφυτεύματα μπορούν να ενοποιηθούν σε ένα μέταλλο. Η χρήση ενός μόνο μετάλλου για όλες τις αποκαταστάσεις θα ήταν απαραίτητη επειδή αποφεύγεται η διάβρωση μετάλλων που προκαλείται από την επαφή διαφορετικών μετάλλων. Για αυτήν την ιδέα «αποκατάστασης με ένα μέταλλο», θα πρέπει να χρησιμοποιείται εμπορικά καθαρό (CP) τιτάνιο όχι σε κράμα για όλες τις αποκαταστάσεις.³⁵

Παρά του ότι το CPTi και τα κράματα του έχουν δοκιμαστεί για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο., ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο ο σκελετός Μ.Ο. να κατασκευαστεί με χύτευση, κυρίως διότι η θερμοκρασία τήξης του τιτανίου είναι πολύ υψηλή, η μεταλλική επιφάνεια είναι εύκολα οξειδώσιμη και εύκολα δημιουργούνται ελαττώματα χύτευσης. Έτσι, η χρήση του τιτανίου για σκελετούς Μ.Ο. δεν έχει εξαπλωθεί ευρέως. Πρόσφατα η ψηφιακή κατασκευή των σκελετών έχει δοκιμαστεί αντί της χύτευσης. Όσον αφορά τους σκελετούς Μ.Ο. από Ti με τη χρήση CAD/CAM ισχύουν τα εξής:

- Σκελετός Μ.Ο. τιτανίου κατασκευασμένος με H-MIL ή I-MIL. Παρόλο που έχει δοκιμαστεί η τεχνική MIL για κατασκευή σκελετών Μ.Ο. από δίσκους τιτανίου, αυτή η τεχνική αποτελεί μια διαδικασία σπατάλης υλικού, καθώς ο αμφίπλευρης σχεδίασης σκελετός Μ.Ο. είναι σημαντικά λεπτότερος με λεπτά άγκιστρα και συνδετήρα,³⁵ και συνήθως υπάρχει ως αναφορά ενώ ορισμένοι αναφέρουν ότι δεν χρησιμοποιείται η τεχνική MIL.²²⁵ Τα μειονεκτήματα των σκελετών τιτανίου που κατασκευάζονται με MIL περιλαμβάνουν: 1) δεν είναι εύκολη η κοπή περίπλοκων σχημάτων και/ή περιοχών εσοχών,



2) απορρίπτονται μεγάλες ποσότητες κομματιών κοπής, 3) η ακρίβεια κοπής επιδεινώνεται όταν φθαρούν τα εργαλεία κοπής και 4) απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επεξεργασίας.³⁵

- Σκελετός Μ.Ο. τιτανίου κατασκευασμένος με AM+CST και PBF. Σε σύγκριση με τη διαδικασία MIL, η κατασκευή AM και PBF θεωρούνται κατάλληλες για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. καθώς παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα: 1) δεν παράγονται θραύσματα (chips) κοπής, 2) μπορούν να κατασκευαστούν πολύπλοκα σχήματα με ελεύθερες καμπύλες, εσοχές και κοίλες κατασκευές, 3) η ακρίβεια δεν μειώνεται από τα φθαρμένα εργαλεία κοπής, 4) πολλοί σκελετοί μπορούν να κατασκευαστούν ταυτόχρονα. και 5) τα κόστη είναι σχετικά χαμηλά. Ωστόσο, έχουν επισημανθεί πολλά μειονεκτήματα των σκελετών τιτανίου AM, όπως: 1) ανισοτροπικά αποτελέσματα, 2) τοπικές υπολειμματικές τάσεις και 3) αναφλεξιμότητα σκόνης τιτανίου.²²⁵ Ακόμη, ένα μεγάλο πρόβλημα των συμβατικών τεχνικών AM είναι ότι δημιουργούν επιφάνεια που είναι πολύ τραχιά επειδή το μέγεθος σωματιδίων που χρησιμοποιείται είναι μεγαλύτερο (πάνω από 50 μm).³⁵ Πάντως, ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι το SLM Ti-6Al-4V έχει χρησιμοποιηθεί στους σκελετούς Μ.Ο. τα τελευταία χρόνια, επειδή οι μηχανικές του ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές των παραδοσιακών κραμάτων CST Co-Cr.¹¹³
- Σκελετός Μ.Ο. τιτανίου με υβριδική επεξεργασία. οι αρχικές δυνάμεις συγκράτησης των C-CST αγκίστρων είναι ελαφρώς υψηλότερες στο Co-Cr (12,9±3,5 N) από ότι στο CPTi (10,9±3,4 N), ενώ μετά από 10.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης είναι 7,6N και 6 N, αντίστοιχα.¹¹²

Παρόλο που οι στεφάνες CP τιτανίου και οι σκελετοί Μ.Ο. θα μπορούσαν να χυτευτούν με κλινικά αποδεκτή ακρίβεια, απαιτούνται υψηλού επιπέδου εργαστηριακές δεξιότητες για να εξασφαλιστεί η επιτυχία χύτευσης τιτανίου. Η MIL τιτάνιο χρησιμοποιείται ήδη με μεγάλη επιτυχία για τις περισσότερες υπερκατασκευές εμφυτευμάτων και σε ακίνητες προσθετικές συσκευές, ενώ η MIL ή η AM τεχνική κατασκευής του τιτανίου είναι απίθανο να είναι ευρέως διαδεδομένη στο εγγύς μέλλον. Η HM αναμένεται να αντισταθμίσει τα μειονεκτήματα μόνο της κοπής ή της AM τιτανίου για την κατασκευή σκελετών Μ.Ο. Μελλοντικές έρευνες και κλινικές παρατηρήσεις σχετικά με την υβριδική επεξεργασία σε σκελετούς Μ.Ο. τιτανίου είναι απαραίτητες για κατάλληλη κλινική χρήση. Γενικώς, η κλινική χρήση του τιτανίου έχει δείξει εύλογα βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα, αλλά πρέπει να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες εργαστηριακής κατασκευής και τα μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα έναντι των υπάρχοντων κραμάτων πρέπει να αποδειχθούν πριν το τιτάνιο αποκτήσει ευρεία κλινική χρήση.³⁵



Πάντως έχουν επισημανθεί αρκετά μειονεκτήματα του CrTi. Πρώτον η αδυναμία έγκειται στην έλλειψη μηχανικής αντοχής για ορισμένες οδοντικές εφαρμογές όπως σκελετοί Μ.Ο. Το δεύτερο μειονέκτημα προκύπτει από την κακή αντοχή στην αποτριβή, γεγονός που καθιστά δύσκολο να γυαλιστεί. Στη συνέχεια, υπάρχει επίσης ανησυχία για την αμφισβητήσιμη κυτταροτοξικότητα του βαναδίου (V) στο κράμα Ti-6Al-4V. Κατά συνέπεια, το βανάδιο αντικαταστάθηκε από νιόβιο (Nb) στα $\alpha + \beta$ Ti-6Al-7Nb κράματα. Λόγω της υψηλής βιοσυμβατότητας και της μηχανικής αντοχής του, το κράμα Ti-6Al-7Nb είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά κράματα βασικών μετάλλων ή του CrTi για Μ.Ο.²²⁴ Το 2018, οι Sadek και συν⁷⁰ στην αναζήτηση τους για την ανεύρεση του καλύτερου υλικού για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. πρότειναν το κράμα Co-Cr και το Ti ως τα πιο συμβατά και κατάλληλα υλικά. Επισημάναν ότι τα πλεονεκτήματα της χρήσης μετάλλου ως σκελετού υπερτερούν των μειονεκτημάτων, δηλαδή η υψηλή αντοχή και η ακαμψία σε λεπτές τομές, η αίσθηση ζεστού και κρύου όπως η φυσική οδοντοστοιχία, η κατασκευή με ελάχιστη κάλυψη των ούλων, η αντοχή στη διάβρωση και η επαναπαθητικοποίηση (repassivation). Λόγω της αδράνειας και της βιοσυμβατότητας του και παρά το γεγονός ότι έχουν αναφερθεί λίγες περιπτώσεις φλεγμονής με σκελετούς οδοντοστοιχίας τιτανίου, το τιτάνιο είναι το προτιμώμενο υλικό για το σκελετό Μ.Ο. ακόμη και σε μεγάλες Μ.Ο., ενώ τα κράματα Co-Cr έχουν ανώτερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, αλλά απέχουν πολύ από το να είναι ιδανικά. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι οι μεταλλικές οδοντοστοιχίες Co-Cr μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα υφίστανται παραμόρφωση, δηλαδή, το μεταλλικά άγκιστρα δεν εφαρμόζουν με τα στηρίγματα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.⁷⁰

9.1.4 Σύγκριση Co-Cr με άλλα μεταλλικά υλικά

Ένας ερευνητής ανέφερε ότι, οι αναφερόμενες τιμές μόνιμης παραμόρφωσης των χυτών άγκιστρων από Pt, Au, Au-Ag-Pd και Co-Cr με 0,5 mm παραμόρφωση μετά από 10.000 κύκλους φόρτισης ήταν 0,02-0,09, 0,01-0,06, 0,01-0,04 και 0,12 -0,15 mm αντίστοιχα.⁷⁸

Τα κράματα Co-Cr και Ag-Pd-Cu-Au έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο. σαν εναλλακτικές επιλογές έναντι των ακριβών κραμάτων χρυσού. Το 2003, οι Garido και συν²²⁸ υποβάλλοντας CST εφαιπτήρες πάχους 0,8 mm σε 2.000.000 κύκλους κόπωσης παρατήρησαν ότι όλα τα δείγματα Co-Cr, δηλαδή και τα 20, υπερέβησαν το προκαθορισμένο όριο των 2 εκατομμυρίων κύκλων, ενώ 18 δείγματα Ag-Pd-Cu-Au έσπασαν. Μετά από 3 χρόνια προσομοιωμένης κλινικής χρήσης, μόνο το 50 % των συνολικών εφαιπτήρων Ag-Pd-Cu-Au επέζησε. Έτσι αποδείχθηκε ότι τα άγκιστρα Co-Cr είναι πιο άκαμπτα και ανθεκτικά στην κόπωση από τα άγκιστρα Ag-Pd-Cu-Au. Αυτό αποδόθηκε στο ότι

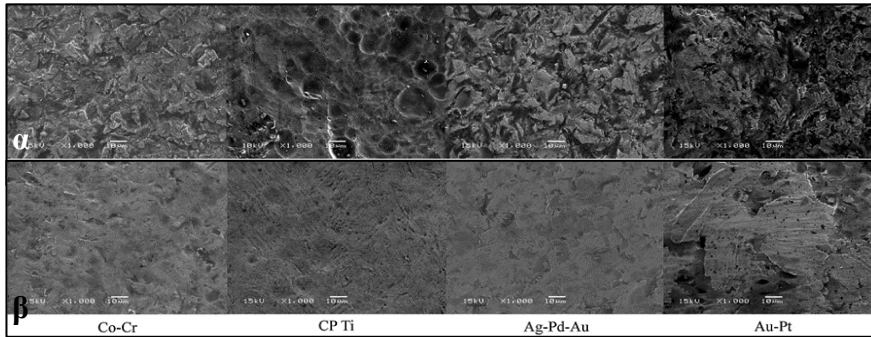


το όριο κόπωσης, για το κράμα Co-Cr ήταν λίγο πάνω από το όριο αναλογίας, ενώ για το άλλο κράμα ισούταν με το $\frac{1}{4}$ του ορίου αναλογίας και έτσι οι τιμές φόρτισης και απενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη μελέτη ενδέχεται να έχουν υπερβεί το όριο κόπωσης με αποτέλεσμα να υπάρχει αριθμός σπασμένων δειγμάτων. Ακόμη, η χρήση κράματος Ag-Pd-Cu-Au για μασητικούς επαπτήρες απαιτεί πάχος μετάλλου περίπου 1,0 mm για να παρέχει την ίδια ακαμψία με το 0,8 mm πάχος μασητικού επαπτήρα από κράμα Co-Cr (και 2 mm σε εύρος).²²⁸

Άλλοι ερευνητές απέδειξαν ότι η αντίσταση στην κόπωση των κραμάτων Co-Cr και CPTi αυξήθηκε περισσότερο από δύο φορές χωρίς αλλαγή του συντελεστή ελαστικότητας ή της αντοχής κάμψης με τη χρήση σωματιδίων Fe για σφαιροβολή.⁶⁹ Οι Toque και συν⁶⁹ (2013) κατασκευάζοντας CST άγκιστρα από Co-Cr, CP Ti, Ag-Pd-Au, Au-Pt, τα υπέβαλαν σε επιφανειακή επεξεργασία σφαιροβολής (shot peening) με σωματίδια τιτανίου 250 mm για τα άγκιστρα CP Ti και σωματίδια ζirkονίας για τα υπόλοιπα 3 υλικά των αγκίστρων και πραγματοποίησαν δοκιμές κόπωσης 10.000 κύκλων ένθεσης/απένθεσης. Η σφαιροβολή, στα κράματα Co-Cr συνέβαλε στη διατήρηση των συγκρατητικών δυνάμεων σε στατιστικά σημαντικό βαθμό καθώς παρατηρήθηκε ότι τα άγκιστρα με αμμοβολή εμφάνισαν 34,1 % μείωση της αρχικής δύναμης ενώ τα άγκιστρα χωρίς αμμοβολή μείωση 63,5 %, ενώ στα υπόλοιπα κράματα δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στη δύναμη συγκράτησης με και χωρίς την κατεργασία σφαιροβολής. Επίσης, δείχθηκε ότι τα άγκιστρα που υπέστησαν σφαιροβολή είχαν περίπου 1,4-1,6 φορές μεγαλύτερη αντοχή στη κόπωση από ότι εκείνα που δεν υπέστησαν, με εξαίρεση το άγκιστρο Au-Pt (πιθανώς να χρειάζεται άλλες συνθήκες για τη βελτίωση της αντοχής της κόπωσης του), ενώ η αντοχή στην κόπωση μεταξύ όλων των μετάλλων που δοκιμάστηκαν και ο λόγος αύξησης της αντοχής κόπωσης από την επεξεργασία με σφαιροβολή κατατάχθηκαν ως εξής: CP Ti > Co-Cr > Ag-Pd-Au > Au-Pt.⁶⁹ Ακόμη, η σφαιροβολή δημιούργησε μεγαλύτερη ομαλότητα της επιφάνειας (Εικόνα 9-1) και μεγαλύτερο βαθμό θλιπτικών υπολειμματικών τάσεων στις επιφάνειες των αγκίστρων συγκριτικά με την αμμοβολή. Ακόμα και αν οι θλιπτικές υπολειμματικές τάσεις βελτιώθηκαν και με την αμμοβολή, η ρωγμή που προέκυψε από αυτή ήταν ακόμη παρούσα και συχνά θα αποτελούσε το σημείο εκκίνησης ενός σπασίματος, ενώ αντίθετα μια κατεργασία σφαιροβολής μπορεί να παρέχει μια πιο ομαλή επιφάνεια χωρίς τραχιά άκρα όταν χρησιμοποιούνται εντελώς στρογγυλά σωματίδια. Υποτίθεται ότι η βελτίωση της δύναμης κόπωσης οφειλόταν στη μείωση των σημείων εκκίνησης των καταγμάτων από τη σφαιροβολή. Ακόμη, κατά την εφαρμογή των χυτών αγκίστρων κάτω από την εσοχή 0,25 mm, τα άγκιστρα CP Ti, Co-Cr και Ag-Pd-Au έδειξαν πλεονέκτημα από τη χρήση της μεθόδου σφαιροβολής. Συνεπώς, για να



αποφευχθεί η αποτυχία από κόπωση των σκελετών και να χρησιμοποιηθούν οι οδοντοστοιχίες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, συνιστάται μια κατεργασία με σφαιροβολή. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ήταν σύμφωνα με μιας μελέτης το 1995 που ανέφεραν ότι τα απενεργοποιημένα άγκιστρα των κραμάτων Co-Cr και Au-Pt θραύστηκαν στις 20.000-30.000 φορές.⁶⁹



Εικόνα 9-1 Επιφάνεια με ανωμαλίες από αμμοβολή με σωματίδια Al_2O_3 χωρίς κατεργασία σφαιροβολής (α) και β: πιο ομαλές και πιο επίπεδες επιφάνειες που προέκυψαν με τη κατεργασία της σφαιροβολής.⁶⁹

Τα σωματίδια Fe χρησιμοποιούνται γενικά για τη σφαιροβολή στη βιομηχανία. Τα σωματίδια Fe θα έχουν πρόβλημα διάβρωσης κατά τη στοματική χρήση. Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκαν σωματίδια 250 mm CP Ti και 50 mm ZrO_2 για σφαιροβολή λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλειά τους και την πρόληψη υποβάθμισης της βιοσυμβατότητας. Ακόμη, για την αύξηση των θλιπτικών υπολειμματικών τάσεων, συνιστώνται οι ακόλουθες συνθήκες: μικρότερα σωματίδια, μικρότερη απόσταση ακροφυσίων, μεγαλύτερος χρόνος βολής και υψηλότερη σκληρότητα των επεξεργασμένων υλικών.⁶⁹

Ορισμένοι ερευνητές μετά από 10.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης CST άγκιστρων Akers ίδιας σχεδίασης, σε στεφάνες μονολιθικής ζirkονίας και σε στεφάνες Ag-Pd-Cu σε εσοχή 0,25 mm, απέδειξαν ότι αρχική συγκρατητική δύναμη των άγκιστρων Co-Cr ήταν μεγαλύτερη από εκείνη των Ag-Pd και στις 2 στεφάνες που δοκιμάστηκαν ενώ η τελική για τις μεταλλικές στεφάνες με Ag-Pd άγκιστρα, τις μεταλλικές στεφάνες με Co-Cr άγκιστρα, τις στεφάνες ζirkονίας με άγκιστρα Ag-Pd, και τις στεφάνες ζirkονίας με άγκιστρα Co-Cr ήταν $5,6 \pm 1,1$ N, $7,6 \pm 2,4$ N, $7,0 \pm 2,3$ N, and $6,7 \pm 1,8$ N, αντίστοιχα. Μια σημαντική μείωση στη δύναμη συγκράτησης παρατηρήθηκε σε όλες τις ομάδες, όμως το ποσοστό μείωσης της δύναμης συγκράτησης στη στεφάνη ζirkονίας ήταν συγκρίσιμο ή μικρό σε σχέση με τη μεταλλική στεφάνη. Η μικρότερη μείωση παρατηρήθηκε από το κράμα Ag-Pd κατά τη δοκιμή



σε στεφάνες ζirkονίας. Στην ολομεταλλική στεφάνη η συγκρατητική δύναμη μειώθηκε λόγω της αποτριβής των αγκίστρων και της στεφάνης, ενώ στη στεφάνη συντηγμένης ζirkονίας της οποίας η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη από εκείνη των κραμάτων Co-Cr and Ag-Pd, και αυτό σε συνδυασμό με το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας των αγκίστρων Co-Cr (~ 200 GPa) σε σχέση με τα Ag-Pd (90-100 GPa), προκάλεσε την αποτριβή των αγκίστρων Co-Cr γεγονός που επιβεβαιώθηκε από τον αποχρωματισμό της στεφάνης ζirkονίας, και εκεί αποδόθηκε η μικρότερη τελική δύναμη συγκράτησης του Co-Cr κράματος στη στεφάνη ζirkονίας.²²⁹

Ορισμένοι ερευνητές το 1956 ανέφεραν ότι δεν υπήρχε εμφανής φθορά μεταλλικών δοντιών στήριξης μετά από επανειλημμένη εισαγωγή και αφαίρεση σε ένα πείραμα με την προϋπόθεση μακροχρόνιας χρήσης του αγκίστρου. Ωστόσο, ο ένας ερευνητής το 2008 ανέφερε ότι η συγκρατητική δύναμη των αγκίστρων Ag-Pd, Co-Cr, και τιτανίου μειώθηκε κατά 34-50 % μετά 10.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης, και βρέθηκε αποτριβή στην εσωτερική επιφάνεια του αγκίστρου, και χαλάρωση εξαιτίας της αποτριβής του δοντιού-στηρίγματος και της παραμόρφωσης/φθοράς του αγκίστρου. Άλλοι ερευνητές το 2012 ανέφεραν ότι τα δόντια-στηρίγματα που επισκευάστηκαν με σύνθετες ρητίνες αποτριβονται περισσότερο από τα φυσικά δόντια και όταν επισκευάζονται με κεραμικά μετά από επαναλαμβανόμενη εισαγωγή και αφαίρεση ενός αγκίστρου.²²⁹ Ορισμένοι ερευνητές απέδειξαν ότι το κράμα Co-Cr χωρίς θερμική κατεργασία εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση από το Au-Ag-Pd χωρίς θερμική κατεργασία αλλά μικρότερη από το Au-Ag-Pd με θερμική κατεργασία, το Au-Ag-Pt και το κράμα Pd-Ag-In, και συνεπώς στην παρούσα μελέτη τα ευγενή κράματα δείχνουν καλύτερη μακροζωία από το Co-Cr. Αυτό καθώς, ενώ προηγούμενες μελέτες ισχυρίστηκαν ότι το κράμα Co-Cr θα μπορούσε να αντέξει μια τάση ελαφρώς πάνω από το όριο αναλογίας του χωρίς κάταγμα σε πάρα πολλούς κύκλους, γεγονός το οποίο δεν παρατηρήθηκε σε αυτή τη μελέτη καθώς το κράμα Co-Cr έδειξε κάταγμα κατά μέσο όρο στους 44.640 κύκλους που ήταν λιγότεροι από το κράμα Pd-Ag-In (71.520 κύκλοι μετά και 67.440 κύκλοι πριν τη θερμική κατεργασία), το κράμα Au-Ag-Pt (66.720 κύκλοι μετά και 66.480 κύκλοι πριν τη θερμική κατεργασία) και το κράμα Au-Ag-Pd μετά από τη θερμική κατεργασία (52.840 κύκλοι μετά και 38.640 κύκλοι πριν τη θερμική κατεργασία).¹²⁶

Σε γενικές γραμμές τα κράματα Co-Cr σε σύγκριση με τα νικελιούχα κράματα είναι πιο δύσκολα ως προς την κατεργασία τους και οξειδώνονται περισσότερο, ωστόσο δεν περιέχουν νικέλιο που είναι γνωστό αλλεργιογόνο και βηρύλλιο που θεωρείται καρκινογόνο.²³⁰ Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι τα βασικά επαναχτυτευμένα κράματα έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και ότι τα κράματα Co-Cr-Mo έχουν υψηλότερη αντοχή στη



διάβρωση από τα Ni-Cr-Mo στο τεχνητό σάλιο.¹¹³ Έχει αναφερθεί ότι τα κράματα Ni-Cr δεν επιτρέπουν την επαναχύτευση.²³⁰ Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι, το κράμα Co-Cr έχει καλύτερη αντοχή στη διάβρωση από τα κράματα Ni-Cr.¹³⁷ Σε μια μελέτη, μετά τη δοκιμή διάβρωσης 24 ωρών σε τεχνητό σάλιο με pH 7, σε ότι αφορά την μορφολογία των στιλβωμένων επιφανειών Co-Cr και Ni-Cr πριν την διάβρωση και διαβρωμένων επιφανειών με παθητική στιβάδα οξειδίου, οι δύο επιφάνειες παρουσίασαν ομοιογενή μορφολογία. Οι διαφορές μεταξύ της χημικής σύνθεσης, πριν και μετά τη δοκιμή διάβρωσης, όμως μπορεί να οφείλονται είτε στο σχηματισμό του παθητικού φιλμ οξειδίων μετά από αλληλεπίδραση μεταξύ των ιόντων που απελευθερώνονται από το κράμα και των ιόντων από τα τεχνητά διαλύματα σιέλου κατά τη διάρκεια της περιόδου εμβάπτισης, ή στην επίδραση του pH του διαλύματος. Οι σημαντικές αλλαγές στη σύνθεση των κραμάτων, θα μπορούσαν να επηρεάσουν δραματικά τη βιοσυμβατότητα των χρησιμοποιούμενων κραμάτων στην στοματική κοιλότητα.^{137,196} Η μοριακή σύνθεση του σιελικού υμενίου που απορροφάται στην επιφάνεια των οδοντικών κραμάτων καθορίζεται από τη χημική δομή του κράματος. Το 2020, οι Basmaci και συν²³¹ τοποθετώντας υπερώιες πλάκες από Co-Cr και Ni-Cr στο στόμα υγιών ασθενών για 2 ώρες, σύγκριναν τη σύνθεση των σιελικών υμενίων που αναπτύχθηκαν στις επιφάνειες των κραμάτων αυτών. Παρατηρήθηκε περιορισμένος αριθμός πρωτεϊνών σιελολόγων τόσο στο Co-Cr όσο και στο Ni-Cr. Επιπλέον, υπήρχαν διαφορές στις πρωτεΐνες που παρατηρήθηκαν στο υμένιο του Co-Cr έναντι εκείνου του Ni-Cr. Συνεπώς, υπάρχει επιλεκτικότητα στην προσρόφηση πρωτεϊνών σιελολόγων στα κράματα Co-Cr και Ni-Cr.²³¹

Το 2004, οι Kim και συν²³² μετά από 5.000 κύκλους ένθεσης/απένθεσης, ανέφεραν ότι τα άγκιστρα από CST κράμα Ti-Ni παρουσίασαν σημαντικά μικρότερη μεταβολή της συγκρατητικής τους δύναμης σε σχέση με τα CST Co-Cr, χρυσού κατηγορίας IV και σφουρήλατου σύρματος Ni-Cr, αν και η δύναμη συγκράτησης (5N) παρόλο που μειώθηκε, τελικώς ήταν παρόμοια για όλα τα υλικά. Τα άγκιστρα Ti-Ni είχαν επίσης μεγαλύτερη τραχύτητα εσωτερικής επιφάνειας και πορώδες (δεν είχαν τα άλλα). Σε όλα τα υλικά υπήρχαν ρωγμές πλην των κραμάτων Co-Cr. Παρόλο οι ερευνητές απέδειξαν ότι που το κράμα Ti-Ni είναι κατάλληλο για τη κατασκευή Μ.Ο., και παρόλο που έρευνες έχουν δώσει φως σε ορισμένα από τα προβλήματα σχετικά με τη χυτευσιμότητα, την ακρίβεια της εφαρμογής και τις τεχνικές συγκόλλησης, οι κλινικές εφαρμογές του κράματος Ti-Ni βρίσκονται ακόμη στα στάδια ανάπτυξης, η χρήση του Ti-Ni για Μ.Ο. είναι κάπως αμφιλεγόμενη λόγω της ανάγκης για εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές.²³² Το 2016, οι Abdel-Rahim και συν⁸⁰ απέδειξαν ότι τόσο η αρχική συγκρατητική δύναμη των άγκιστρων Co-Cr όσο και η τελική μετά από φόρτιση 2920 κύκλων ένθεσης/απένθεσης σε διάφορες εσοχές (0,25, 0,5, 0,75



mm), ήταν μεγαλύτερες από εκείνη των αγκίστρων Ni-Cr τα οποία είχαν μεγαλύτερη αρχική και τελική δύναμη από τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης. Ωστόσο, για όλα τα υλικά υπήρξε σημαντική μείωση της δύναμης συγκράτησης. Οι ακεταλικές ρητίνες, τα κράματα Co-Cr και Ni-Cr έδειξαν σημαντική παραμόρφωση μετά από 24 μήνες προσομοίωσης κλινικής χρήσης. Σημειώνεται ότι αυτή η χαμηλότερη δύναμη συγκράτησης των αγκίστρων ρητίνης ακετάλης οφείλεται στη μεγαλύτερη ευκαμψία τους και λόγω της χρήσης της ίδιας διαμέτρου με τα μεταλλικά άγκιστρα. Η χαμηλότερη δύναμη συγκράτησης των αγκίστρων ρητίνης ακετάλης σε σύγκριση με άλλους τύπους αγκίστρων συμφωνεί με τα αποτελέσματα που ελήφθησαν στις αντίστοιχες μελέτες ορισμένων ερευνητών. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης διαφωνούσαν με εκείνη μιας μελέτης, στην οποία δείχθηκε ότι τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης με πάχος 1,2 mm και πάχος 2,0 mm ήταν ανθεκτικά στην παραμόρφωση. Οι δυνάμεις συγκράτησης αμφότερων των τύπων αγκίστρων ρητίνης ακετάλης δεν μειώθηκαν κατά την περίοδο κύκλου των 3 ετών και δεν έδειξαν μόνιμη παραμόρφωση και καμία σημαντική διαφορά. Τα αποτελέσματα αυτής της παρούσας μελέτης έδειξαν στατιστικά σημαντική διαφορά για τα άγκιστρα Co-Cr και Ni-Cr από την πρώτη έως την τελική περίοδο κυκλικής φόρτωσης. Τα άγκιστρα Co-Cr και Ni-Cr έχασαν τη δύναμη συγκράτησης μέσα σε 730 κύκλους τοποθέτησης και αφαίρεσης και συνέχισαν να χάνουν τη δύναμη συγκράτησης κατά την εναπομένουσα περίοδο δοκιμής. Οι προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι υπήρχε απώλεια λόγω της μόνιμης παραμόρφωσης των αγκίστρων Co-Cr.⁸⁰

9.2 Σύγκριση Co-Cr με το PMMA

Παλαιότερα έχει δοκιμαστεί η τροποποίηση της επιφάνειας των αγκίστρων Co-Cr με τη χάραξη του βραχίονα και την επικάλυψη του με ένα στρώμα ακρυλικής ρητίνης χρώματος των δοντιών, ωστόσο δείχθηκε ότι η ρητίνη επικάλυψης είναι πολύ πιθανό να παρουσιάσει ρωγμές.⁷⁶

Έχει αναφερθεί ότι, αν και η χρησιμότητα όλων των σκελετών ακρυλικής ρητίνης μπορεί να επεκταθεί εάν παρέχονται συρμάτινοι εφαπτήρες, οι τυπικές ιδιότητες του πολυμερούς δεν επιτρέπουν μια ανθεκτική διεπαφή πρόσθεσης-δοντιών και η ικανότητα της προβλεπόμενης χρήσης των υπόλοιπων δοντιών για στήριξη, η σταθερότητα και συγκράτηση με την πάροδο του χρόνου δεν εξασφαλίζεται το ίδιο καλά όπως με μια χυτή δομή.³²

Η χυτή Μ.Ο. λειτουργεί ως μια καλύτερη πρόσθεση λειτουργικά και βιολογικά από τη χρήση εξολοκλήρου ακρυλικής ρητίνης,^{36,233,234} ενώ η ακρυλική οδοντοστοιχία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί έναντι της χυτής όταν λαμβάνεται υπόψη η κοινωνικοοικονομική κατάσταση και όταν πραγματοποιείται σωστή συντήρηση της ακρυλικής



οδοντοστοιχίας.^{233,234} Αυτό διότι, τα μόνα πλεονεκτήματα της ακρυλικής Μ.Ο. σε σχέση με τη χυτή είναι το χαμηλότερο κόστος και η ευκολία κατασκευής σε σχέση.^{233,234} Από την άλλη πλευρά, με την επαρκή συντήρηση της υγιεινής του στόματος και της χυτής οδοντοστοιχίας σε τακτά χρονικά διαστήματα, η μεταλλική Μ.Ο. σε σχέση με την ακρυλική παρέχει πολλά πλεονεκτήματα όπως: βελτιωμένη ανθεκτικότητα ενώ η ακρυλική έχει χαμηλή αντοχή και αυξημένο ρυθμό θραύσης (πιο επιρρεπής σε κατάγματα). Μεγαλύτερη αντίσταση στη παραμόρφωση. Ο σκελετός είναι θερμοαγώγιμος και αυτό διευκολύνει τη διατήρηση της καλής υγείας των ιστών ενώ στην ακρυλική υπάρχει απουσία θερμικής αντίληψης από τον ασθενή. Μειωμένο βάρος και όγκο. Μειωμένο πάχος και έτσι υπάρχει μεγαλύτερος χώρος για τη γλώσσα και άρα δεν παρεμποδίζεται η ομιλία. Αυξημένη αίσθηση της γεύσης. Αυξημένη λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα της μάσησης. Ο ακριβής τρόπος κατασκευής όπου σε συνδυασμό με τη σταθερότητα σχήματος και την έλλειψη εσωτερικών τάσεων τα κράματα δεν ασκούν κάποια καταστροφική επίδραση στην περιοχή έδρασης της Μ.Ο. και έτσι εξασφαλίζεται αφενός η αποφυγή της υποβάθμισης της περιοδοντικής κατάστασης των υπολειπόμενων δοντιών (κινητικότητα) και η υφίζηση των ούλων και αφετέρου εξασφαλίζεται η στενή επαφή με αποτέλεσμα να είναι δυνατόν να επιτευχθεί πολύ καλή συγκράτηση της οδοντοστοιχίας για μεγάλο χρονικό διάστημα ενώ αντίθετα στην ακρυλική Μ.Ο. πολλοί ασθενείς επιστρέφουν με παράπονα χαλάρωσης και κινητικότητας της κατά τη διάρκεια της μάσησης και σε μια μελέτη²³⁴ αναφέρθηκε ότι η αποτελεσματικότητα της μάσησης ολο-ακρυλικής Μ.Ο. υπονομεύθηκε σημαντικά από τον 3^ο μήνα έως το 1^ο έτος σε σύγκριση με τη χυτή σε μελέτη της μάσησης για 1 έτος). Μεγαλύτερη ευκολία διατήρησης της καλής στοματικής υγιεινής από τον ασθενή μειώνοντας τον κίνδυνο συσσώρευσης πλάκας σε αντίθεση με την ημιπορώδης φύση της ακρυλικής ρητίνης. Μεγαλύτερη άνεση. Ασθενείς έχουν αναφέρει μεγαλύτερη ικανοποίηση με τη χυτή Μ.Ο. σε σχέση με την εύκαμπτη και την ολο-ακρυλική Μ.Ο. Οι Μ.Ο. Co-Cr έχουν μεγαλύτερη πρόγνωση από τις ακρυλικές οδοντοστοιχίες. Επαρκή αισθητική.^{36,233,234} Ορισμένοι ερευνητές κατασκευάζοντας πανομοιότυπους σκελετούς Μ.Ο. [υπερώια ζώνη και 4 άγκιστρα], απέδειξαν ότι οι σκελετοί Μ.Ο., ακρυλικής ρητίνης I-MIL (απόκλιση, 117±34 mm οριζόντια και 45±21 mm κάθετη) και PEEK D-MIL (απόκλιση, 43±23 mm οριζόντια και 38±21 mm κατακόρυφα) έδειξαν σημαντικά καλύτερη ($P < 0,5$) εφαρμογή από τους σκελετούς Co-Cr C-CST (απόκλιση, 133±59 mm οριζόντια, 73±25 mm κάθετα), ενώ η χειρότερη εφαρμογή βρέθηκε για τους σκελετούς Μ.Ο. που κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας ακρυλική ρητίνη με I-AM (323±188 mm οριζόντια και 112±60 mm κάθετα) ή Co-Cr με SLM Co-Cr (365±205 mm οριζόντια και 363±133 mm κάθετα), οι οποίοι ήταν ασταθείς στο κύριο εκμαγείο,



καθιστώντας τους ακατάλληλους για κλινική χρήση.¹⁵⁴ Ακόμη, άλλοι ερευνητές ανέφεραν ότι δεν βρέθηκε σημαντική διαφορά στην αναλογία σταθεροποίησης των δοντιών που παρουσίαζαν κινητικότητα μεταξύ της γλωσσικής πλάκας που κατασκευάστηκε με κράμα Co-Cr και εκείνης που κατασκευάστηκε με PMMA, ενώ σημαντική μεταξύ τους διαφορά υπήρχε στην ακαμψία.²²¹

9.3 Σύγκριση Co-Cr με την GFRC και το GFRTF

Οι κατασκευές σύνθετης ρητίνης ενισχυμένης με ίνες υάλου (GFRC = Glass Fiber-Reinforced Composite) αποτελούνται από ενισχυτικές ίνες εμβυθισμένες στην πολυμερή μήτρα της GFRC. Ουσιαστικά οι ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται σε μια περιοχή της κατασκευής που η θραύση είναι πιθανόν να συμβεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ίνες καλύπτονται με το πολυμερές μήτρας χωρίς ίνες. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που λόγω π.χ. φθοράς των αγκίστρων, φθαρεί το πολυμερές μπορεί να αποκαλυφθούν οι ίνες και συνεπώς να έρθουν σε επαφή με τα μικρόβια της στοματικής κοιλότητας. Το 2000, οι Tanner και συν²³⁵ μετά από εμβύθιση δειγμάτων σε διάλυμα *S. Mutans* που επιτρέπει την αρχική μικροβιακή προσκόλληση, παρατήρησαν ότι τα δείγματα GFRC χωρίς πολυμερή επικάλυψη παρουσίασαν τη μεγαλύτερη προσκόλληση μικροβίων, ενώ αμέσως μετά ακολούθησαν τα δείγματα GFRC με πολυμερή επικάλυψη, το κράμα χρυσού, το τιτάνιο, και τέλος το κράμα Co-Cr το οποίο έδειξε τη μικρότερη προσκόλληση, και αυτό αποδόθηκε ότι σε όλα τα υλικά ο υμένας σάλιου οδήγησε στη μείωση της προσκόλλησης των μικροβίων ενώ στις ίνες υάλου προώθησε την προσκόλληση τους.²³⁵

Ένα υδατικό περιβάλλον (όπως η στοματική κοιλότητα) μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στην επιφάνεια του γυαλιού και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες μηχανικές ιδιότητες και ανεπιθύμητες αλλαγές στη σύνθετη δομή. Το 2004, οι Narva και συν²³⁶ στη μελέτη τους παρατήρησαν ότι τα άγκιστρα GFRC δεν έσπασαν από κόπωση μετά από 150.000 κύκλους, και η δοκιμή τους σε νερό και αέρα έδειξε ότι η το απόθεμα νερού μείωσε το συντελεστή κάμψης από 18,9 ($\pm 2,9$) GPa (συντελεστής στον αέρα) σε 17,5 ($\pm 1,7$) (συντελεστής στο νερό), παρόλο που η μείωση δεν ήταν σημαντική. Συμπερασματικά, η αυξημένη αντοχή στην κόπωση και το ημιδιαφανές χρώμα των υλικών GFRC σε σύγκριση με τα κράματα Co-Cr μπορεί να δικαιολογήσει τη χρήση GFRC σε άγκιστρα και συνδετήρες Μ.Ο. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας των GFRC, πρέπει να αντισταθμιστεί αλλάζοντας το σχέδιο του αγκίστρου. Η διάμετρος των αγκίστρων GFRC θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερη, εκτιμάται ότι θα πρέπει να είναι διπλάσια από τη διάμετρο των κραμάτων Co-Cr. Δηλαδή ο μειωμένος συντελεστής κάμψης του GFRC



μπορεί να περιορίσει τη χρήση του υλικού σε μέρη όπως σε άγκιστρα. Ωστόσο, η χρήση GFRC σε κύριους συνδετήρες της Μ.Ο. μπορεί να είναι δυνατή επειδή η διάμετρος του συνδετήρα μπορεί να είναι αυξημένη για να παρέχει επαρκή ακαμψία για την κατασκευή Μ.Ο. Υπάρχουν και άλλοι κλινικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Δηλαδή, εάν υπάρχει αυξημένη επιφανειακή κάλυψη του δοντιού από το άγκιστρο ή το συνδετήρα GFRC, καθώς τότε μπορεί να υπάρχει αυξημένος κίνδυνος φθοράς.²³⁶

Το 2008, οι Kishita και συν⁷⁸ κατασκευάζοντας ράβδους GFRC παρατήρησαν ότι η αντοχή σε κάμψη και ο συντελεστής ελαστικότητας των δειγμάτων GFRC που εξετάστηκαν σε νερό 37 °C ήταν σημαντικά κατώτερα από εκείνα που εξετάστηκαν στον αέρα, και επιπλέον και τα 2 ήταν κατώτερα από αυτά του κράματος Co-Cr. Επιπλέον, με τους επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης, η μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων GFRC αυξήθηκε σημαντικά και ήταν παρόμοια με εκείνη του κράματος Co-Cr, χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των GFRC στον αέρα και στο νερό. Ως εκ τούτου, αυτή η μελέτη επαλήθευσε τις επιπτώσεις της εμβάπτισης νερού και της επανειλημμένης φόρτισης στις μηχανικές ιδιότητες ενός GFRC υλικού. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, συνίσταται να καταβληθεί μεγαλύτερη προσπάθεια για την εξερεύνηση και τον σχεδιασμό σχημάτων που θα καθιστούσαν τους βραχίονες αγκίστρων σύνθετης ρητίνης ενισχυμένης με ίνες με μηχανικές και φυσικές ιδιότητες που διαφέρουν ευνοϊκές από αυτές του μετάλλου.⁷⁸

Τα άγκιστρα GFRC επικαλύπτονται με σύνθετη ρητίνη για την πρόληψη της έκθεσης ινών και τραυματισμού στο στοματικό βλεννογόνο. Ορισμένοι ερευνητές παρατήρησαν κατά τη διάρκεια της κλινικής εφαρμογής ρωγμές (από συγκέντρωση τάσεων) στο στρώμα επικάλυψης (σύνθετη ρητίνη) GFRC αγκίστρων στην εξωτερική επιφάνεια στον ώμο του βραχίονα του απλού τρισκελούς αγκίστρου, εύρημα το οποίο παρατηρήθηκε επίσης με τα CST άγκιστρα Co-Cr. Συνεπώς, η πιθανότητα θραύσης στον ώμο είναι υψηλή για τα άγκιστρα και των 2 υλικών.¹⁸³

Παρά τις προηγούμενες μελέτες, η εφαρμογή του GFRC για τα άγκιστρα παραμένει στο πειραματικό στάδιο.⁷⁹ Το 2016, οι Nagakura και συν⁷⁹ ανέπτυξαν ένα θερμοπλαστικό πολυμερές (πολυπροπυλένιο) ενισχυμένο με ίνες υάλου (Glass Fiber-Reinforced Thermoplastic Polymer = GFRTTP), και ανέφεραν ότι έχει εξαιρετική αισθητική (οι ίνες δεν επηρεάζουν τις επιφανειακές ιδιότητες του GFRTTP) και αντοχή σε κάμψη (170,5±7,4 MPa) και συντελεστή κάμψης (16,7±0,7 GPa), υψηλότερα (κατά 1,3-3,6 και 2,88-12,88 φορές αντίστοιχα) από αυτές των εμπορικά διαθέσιμων κλασσικών θερμοπλαστικών υλικών για Μ.Ο. χωρίς μεταλλικά άγκιστρα (πολυαμίδιο, πολυεστέρας, πολυκαρβονικό, πολυπροπυλένιο,



PMMA) καθιστώντας το GFRTTP ως ένα δυνητικά χρήσιμο εναλλακτικό υλικό έναντι αυτών για την κατασκευή αισθητικών αγκίστρων, όμως χαμηλότερα από εκείνα των μεταλλικών συρμάτινων αγκίστρων κράματος Co-Cr (συντελεστής κάμψης $183,6 \pm 23,5$ GPa) και ανοξείδωτου χάλυβα καθιστώντας το GFRTTP ακατάλληλο εναλλακτικό υλικό έναντι των μεταλλικών αγκίστρων που έχουν υψηλή αντοχή και συντελεστή ελαστικότητας, και άρα απαιτείται διερεύνηση για τον εντοπισμό της βέλτιστης σχεδίασης του αγκίστρου GFRTTP που εξασφαλίζει υψηλή ακαμψία.⁷⁹

Διαφορετικές ίνες, δηλαδή, ηλεκτρικό γυαλί (E-glass), πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους (UHMWP), άνθρακας/γραφίτης και ίνες αραμιδίου έχουν δοκιμαστεί ως για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των οδοντικών πολυμερών, ωστόσο οι ίνες γυαλιού-E προτιμώνται στην κλινική πρακτική λόγω της καλής τους προσκόλλησης στα πολυμερή μήτρας και των καλών αισθητικών ιδιοτήτων τους.²³⁵ Ακόμη, στα GFRTTP μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα θερμοπλαστικά αντί του πολυπροπυλενίου, όπως το πολυαμίδιο, ωστόσο δεν βρέθηκαν μελέτες που να τα συγκρίνουν με το κράμα Co-Cr.

9.4 Σύγκριση Co-Cr με τα θερμοπλαστικά υλικά

Τα κράματα Co-Cr πέραν των πλεονεκτημάτων τους όπως της αντοχής τους, ενέχουν και μειονεκτήματα στα οποία περιλαμβάνονται το αισθητικά μη ευχάριστο χρώμα τους, το βάρος, ο κίνδυνος πρόκλησης μεταλλικής γεύσης καθώς και αλλεργικών ή τοξικών αντιδράσεων, αστοχίες κόπωσης, η δύσκολη κατεργασία, η παραμόρφωση (ειδικά όταν τα άγκιστρα ρυθμίζονται «καλιμπράρονται» με επιπλέον συγκράτηση) και η απώλεια οστού των δοντιών στήριξης, πιθανότητα εμφάνισης γαλβανισμού η απαίτηση περίπλοκων διαδικασιών παραγωγής.^{2,64,66,68,73}

Τα πλεονεκτήματα των εύκαμπτων Μ.Ο. περιλαμβάνουν: την μεγαλύτερη αισθητική λόγω της αποφυγής των μεταλλικών αγκίστρων και λόγω του ότι η διαφάνεια των υλικών παίρνει υποκείμενους τόνους ιστών καθιστώντας σχεδόν αδύνατη τη διάκριση στο στόμα. Μειώνεται κατά πολύ η ανάγκη τροποποίησης των υπολειπόμενων δοντιών για την υποδοχή των εφαπτήρων. Η πλήρης βιοσυμβατότητα επιτυγχάνεται επειδή το υλικό είναι απαλλαγμένο από μονομερές και μέταλλο που αποτελούν τις κύριες αιτίες αλλεργικών αντιδράσεων σε συμβατικά υλικά οδοντοστοιχίας. Η μεγαλύτερη ευκαμψία λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας τους επιτρέπει α) την επαναφορά της Μ.Ο. στο αρχικό σχήμα και θέση ακόμη και αν υπάρχει κάμψη β) σε συνδυασμό με την μεγαλύτερη ελαστικότητα που προσφέρουν καθιστούν τον κίνδυνο θραύσης μικρό και έτσι επιτρέπουν την κατασκευή της βάσης να γίνει λεπτότερη και άρα την συνολικά ελαφρύτερη και λεπτότερη Μ.Ο., β) σε



συνδυασμό με τη μαλακότερη επιφάνεια την καλύτερη αίσθηση των ασθενών όταν τις φοράνε, γ) την ευκολία εισαγωγής στο στόμα χωρίς προβλήματα εφαρμογής, ιδίως με εσοχές στη φατνιακή ακρολοφία: Προσφέρουν όφελος για ασθενείς με στοματικές παθήσεις όπως η εξωδερμική δυσπλασία: Είναι οικονομικότερες και απαιτούν λιγότερο χρόνο προετοιμασίας σε σχέση με τις CST.⁶⁵ Τα μειονεκτήματά τους είναι: α) τείνουν να απορροφούν νερό και να αποχρωματίζονται, β) δεν άγουν τη θερμότητα και το κρύο, γ) παρατηρείται επιφανειακή τραχύτητα μετά από μερικούς μήνες παράδοσης Μ.Ο. δεδομένου ότι είναι λιγότερο σκληρή η επιφάνεια τους και τα βάθη και τα πλάτη τους είναι μεγαλύτερα από των μεταλλικών ενώ παράλληλα το γεγονός ότι το άγκιστρο καλύπτει την αυχενική περιοχή του δοντιού-στηρίγματος σε μια ευρεία περιοχή τόσο στην πλευρά της μύλης όσο και της ρίζας σχεδιασμένο έτσι ώστε να είναι μέρος των ούλων σημαίνει ότι η περιοχή που καλύπτεται από το άγκιστρο της είναι μεγάλη και οι περιοχές κάτω από την εσοχή και την ανακούφιση μπορεί εύκολα να νεκρώσουν με τον κίνδυνο επιδείνωσης περιοδοντικών συνθηκών και για αυτό ο σχολαστικός καθαρισμός είναι επομένως απαραίτητος, δ) στερείται σημαντικών στοιχείων της συμβατικής Μ.Ο. όπως είναι οι μασητικοί εφαπτήρες και ο άκαμπτος σκελετός, επομένως η μετάδοση λειτουργικών φορτίων δεν είναι πολύ αποτελεσματική και έτσι μπορεί να επηρεάσουν σοβαρά αρκετούς ιστούς όπως τους περιοδοντικούς ιστούς των δοντιών-στηριγμάτων και την υπολειμματική κορυφογραμμή,⁷⁹ ε) τα κινητά δόντια δεν ναρθηκοποιούνται, ζ) παρουσιάζουν δυσκολία επισκευής σε περίπτωση θραύσης καθώς δεν μπορούν να γίνουν προσθήκες σε αυτή και σε τέτοιες περιπτώσεις και συνιστάται αντικατάσταση βάσης ενώ σημειώνεται ότι η θραύση συγκρατητικών στοιχείων από την δεν είναι ασυνήθιστη, η)⁶⁵ η δύναμη συγκράτησης μειώνεται μετά από μακροχρόνια χρήση.⁶⁸ Ακόμη, έχουν τεθεί ορισμένα ερωτήματα σχετικά με τη σταθερότητα χρώματος αυτών των αισθητικών υλικών, τον σχηματισμό βιομάζας και τη βιοσυμβατότητα και τη μηχανική τους απόδοση.⁶³ Για παράδειγμα, τόσο η τραχύτητα της επιφάνειάς του πολυαμιδίου όσο και η δυσκολία που λαμβάνει χώρα κατά τη στίλβωση οδηγούν σε αποικισμό βακτηρίων και μυκήτων στην επιφάνειά του, η οποία θεωρείται ως η αρνητική της όψη όπως έχει αναφερθεί και σε άλλες μελέτες.⁷⁰ Τα άγκιστρα από Co-Cr λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας εξασφαλίζουν μεγαλύτερη συγκράτηση και υψηλότερες τάσεις στο δόντι στήριγμα και στο άγκιστρο ιδίως σε εσοχή 0,75 mm, ενώ επισημαίνεται ότι μπορούν να φθείρουν (αποτριβή) την επιφάνεια της αδαμαντίνης του στηρίγματος με τις γνωστές συνέπειες.⁶³ Ακόμη, έχει αναφερθεί, μετά από 3 μήνες αξιολόγησης, ότι αν και οι εύκαμπτες (πολυεστέρας) Μ.Ο. παρέχουν καλύτερη: στοματική υγεία που σχετίζεται με την ποιότητα ζωής, γενική ικανοποίηση του ασθενούς (σημαντικά καλύτερη απόκριση έναντι στο βλεννογόνο πόνο και στη



πρόσφυση τροφών, ελαφρώς καλύτερη αν και παρόμοια στοματική άνεση και ομιλία, και σχεδόν παρόμοια μασητική ικανότητα, σταθερότητα και ευκολία καθαρισμού της οδοντοστοιχίας²³⁷) και στοματική εμφάνιση σε σύγκριση με τις Μ.Ο. Co-Cr, η σχέση κόστους-αποδοτικότητας των εύκαμπτων είναι κατώτερη από τις μεταλλικές βάσει των ασθενών (το μέσο κόστος για την επίτευξη μιας ελάχιστης σημαντικής διαφοράς στη στοματική υγεία που σχετίζεται με την ποιότητα ζωής είναι 6,5 φορές υψηλότερη στις εύκαμπτες) και ως εκ τούτου η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διαμόρφωση σχεδίων θεραπείας με εύκαμπτες Μ.Ο.²³⁸ Οι ίδιες αρχές σχεδιασμού με τις συμβατικές Μ.Ο. που χρησιμοποιούν μεταλλικά άγκιστρα πρέπει να ακολουθούνται για όλες (εύκαμπτες και άκαμπτες) τις οδοντοστοιχίες χωρίς μεταλλικά άγκιστρα.⁶³ Σημειώνεται ότι, οι εύκαμπτες Μ.Ο. μπορεί να αποτελούνται είτε από τα τεχνητά δόντια και τη ρητίνη της βάσης οδοντοστοιχίας, είτε μπορεί να ενσωματώνουν μεταλλικά στοιχεία για εφαπτήρες και συνδετήρες. Ωστόσο, έχει αναφερθεί ότι οι εύκαμπτες οδοντοστοιχίες χωρίς μεταλλικά άγκιστρα δεν συνιστώνται ως μόνιμες οδοντοστοιχίες, παρά μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις, όπως σε ασθενείς με αλλεργία σε μέταλλα, ενώ άκαμπτες οδοντοστοιχίες χωρίς μεταλλικά άγκιστρα συνιστώνται σε ασθενείς όπου δεν δέχονται μεταλλικά άγκιστρα για αισθητικούς λόγους.⁶³ Ακόμη, πρόσφατα η Ιαπωνική Προσθετική Εταιρεία δήλωσε ότι οι θερμοπλαστικές Μ.Ο. ενδείκνυνται όταν ένας ασθενής δεν δέχεται τις μεταλλικές Μ.Ο. λόγω αισθητικών προβλημάτων ενώ μόνο οι θερμοπλαστικές Μ.Ο. με μεταλλικά στοιχεία συνιστώνται για οριστική και μακροχρόνια χρήση. Πάντως, αυτή η σύσταση βασίστηκε μόνο σε γνωμοδότηση εμπειρογνομόνων και επομένως απαιτούνται στοιχεία από καλά σχεδιασμένες κλινικές δοκιμές για την επικύρωση της κλινικής εφαρμογής των εύκαμπτων Μ.Ο.²³⁸

Ένας ερευνητής κατασκευάζοντας άγκιστρα ρητίνης ακετάλης και κράματος Co-Cr, ίδιου μεγέθους (διάμετρος και μήκος), ανέφερε ότι η χρήση αγκίστρων ρητίνης ακετάλης στο χρώμα των φυσικών δοντιών δεν θέτει σε κίνδυνο τη συγκράτηση της Μ.Ο., καθώς παρατήρησε ότι υπήρχε στατιστικά σημαντική διαφορά στις μέσες μετρήσεις συγκράτησης μέχρι τον 1^ο μήνα, ενώ δεν υπήρχε από τον 1^ο μήνα έως το 2^ο μήνα και από τον 2^ο έως τον 3^ο μήνα που μπορεί να αποδοθεί σε αυξημένες φυσιολογικές συγκρατητικές δυνάμεις ως αποτέλεσμα της αυξημένης εφαρμογής της Μ.Ο.²¹⁷ Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί με άγκιστρα, κατασκευασμένα είτε εξολοκλήρου από ρητίνη ακετάλης είτε από συνδυασμό κράματος Co-Cr (μασητικοί εφαπτήρες και βραχίονες αντιστήριξης) και θερμοπλαστικής ρητίνης (βραχίονα συγκράτησης), έχει δειχθεί ότι στη δεύτερη περίπτωση η κατανομή τάσεων είναι πιο ευνοϊκότερη.⁶⁴ Ακόμη, ορισμένοι ερευνητές έδειξαν ότι μετά από 7.200



κύκλους (60 μήνες) ένθεσης/απένθεσης, τα CST άγκιστρα Co-Cr με συγκρατητικούς βραχίονες ρητίνης ακετάλης παρουσίασαν σημαντική απώλεια συγκράτησης (61,43 %) παρουσιάζοντας στατιστικά σημαντική διαφορά τόσο σε σχέση με τα CST άγκιστρα Co-Cr τα οποία παρόλο που παρουσίασαν επίσης απώλεια συγκράτησης (26,5 %) εξακολουθούσαν να διατηρούν αποδεκτή τιμή συγκράτησης, όσο και με τα άγκιστρα Co-Cr με συγκρατητικούς βραχίονες πολυαμιδίου τα οποία έδειξαν τη χαμηλότερη απώλεια συγκράτησης (12,6 %). Συνεπώς, οι επιλογές εργασίας με άγκιστρα ρητίνης ακετάλης και πολυαμιδίου, που συνδυάζονται με ένα συμβατικό μεταλλικό σκελετό της Μ.Ο., μπορούν να αποτελέσουν μια καλή επιλογή όσον αφορά την αισθητική συνδυάζοντας τη λειτουργικότητα, με στόχο μεγαλύτερη μακροζωία της πρόσθεσης.⁶⁴ Σε μελέτη του 2020 αναφέρθηκαν τα ακόλουθα. Τα άγκιστρα πολυοξυμεθυλενίου σε σύγκριση με τα άγκιστρα Co-Cr παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα: μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε αλλεργικούς στο μέταλλο ασθενείς· είναι αισθητικά πιο ευχάριστα επειδή το χρώμα ταιριάζει με αυτό του χρώματος των δοντιών· έχουν χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και κατά συνέπεια τα άγκιστρα πολυοξυμεθυλενίου παρουσιάζουν μικρότερη δύναμη συγκράτησης σε σύγκριση με τα άγκιστρα Co-Cr και στην πορεία του χρόνου δεν παραμορφώνονται με αποτέλεσμα η συγκρατητική τους ικανότητα να παραμένει σταθερή, όμως συνεχίζει να είναι μικρότερη από την μειωμένη λόγω παραμόρφωσης στην πορεία του χρόνου συγκρατητική ικανότητα των κραμάτων Co-Cr και λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας αφενός μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερες εσοχές από ότι συνιστάται για το κράμα Co-Cr και αφετέρου ασκούν μικρότερη καταπόνηση στα δόντια στηρίγματα και αυτό μπορεί να είναι επωφελές σε κλινική κατάσταση όπου η αισθητική και η περιοδοντική υγεία αποτελούν προτεραιότητα ή σε περιπτώσεις όπου δεν χρειάζεται παρασκευή των δοντιών. Ωστόσο, το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας δεν επιτρέπει στο άγκιστρο να έχει την ίδιο βαθμό συγκράτησης με το Co-Cr και επαρκή συγκράτηση εάν τοποθετηθεί στο ίδιο βάθος εσοχής. Σε περίπτωση που αυξηθεί το βάθος εσοχής υποστηρίζεται από ορισμένους ότι επειδή η μέγιστη τάση που εμφανίζεται κατά την απένθεση της οδοντοστοιχίας είναι υψηλότερη από την αντοχή του υλικού, δεν θεωρούνται κατάλληλα υλικά για άγκιστρα και η χρήση τους σε αισθητικές περιοχές που ωθούν τα άγκιστρα να τοποθετούνται πιο κοντά στα ούλα θα πρέπει να γίνεται με προσοχή. Εάν τώρα το άγκιστρο δεν τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο βάθος εσοχής για να εξασφαλίσει την απαραίτητη συγκράτηση τότε απαιτεί την αύξηση της διατομής της ρητίνης ακετάλης του άγκιστρου, η τελική διατομή είναι μεγαλύτερη των μεταλλικών άγκιστρων) προκειμένου να επιτευχθεί χρήσιμη συγκράτηση, όμως αυτός ο μεγαλύτερος όγκος έχει επιπτώσεις στη συσσώρευση πλάκας και στη διατήρηση της περιοδοντικής υγείας. Σε παλαιότερη μελέτη αναφέρθηκε ότι, για



να επιτευχθεί ακαμψία παρόμοια με εκείνη ενός χυτού αγκίστρου Co-Cr με μήκος 15 mm και διάμετρο 1 mm, το κατάλληλο άγκιστρο ρητίνης ακετάλης πρέπει να είναι μικρότερο σε μήκος (~5 mm) και να έχει μεγαλύτερη διάμετρο διατομής (~1,4 mm), και επίσης άλλη μελέτη ανέφερε ότι τα άγκιστρα POM πρέπει να έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια διατομής από τα μεταλλικά άγκιστρα για να παρέχουν επαρκή συγκράτηση.⁷² Συνεπώς, είναι πάντα πρόκληση να επιτευχθεί η βέλτιστη αισθητική, διατηρώντας παράλληλα τη συγκράτηση, τη σταθερότητα και την υγεία των δοντιών. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες σχετικά με τα διάφορα πάχη και τη σχεδίαση των αγκίστρων και του σκελετού για την επιτυχή οδοντιατρική εφαρμογή του υλικού αυτού.^{20,63} Από την άλλη το πολυαμίδιο λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας εμφανίζει την μικρότερη συγκέντρωση τάσεων στο άγκιστρο και προκαλεί λιγότερη τάση στην επιφάνεια του δοντιού, ενώ γενικώς παρουσιάζει κατάλληλη μηχανική απόδοση όταν χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα βάθη εσοχών ακόμη και σε βάθος 0,75 καθώς η συγκράτηση είναι επαρκής αν και μικρότερη από ό,τι του Co-Cr σε εσοχή 0,25, αποτελώντας έτσι μια αισθητική εναλλακτική λύση έναντι των άκαμπτων μεταλλικών αγκίστρων τα οποία δεν ενδείκνυνται η τοποθέτησή τους σε βάθος 0,75 mm επειδή η επιφάνεια της αδαμαντίνης θα υποστεί μεγάλη ζημιά.⁶³

Ορισμένοι ερευνητές σε μια *in vitro* μελέτη σύγκρισης αγκίστρων πέντε διαφορετικών υλικών μετά από 1 έτος [Co-Cr, πολυαμιδίου, ρητίνης ακετάλης, θερμοελαστικών (versacrylic), θερμοσυμπιεζόμενων (thermopress)], έδειξαν ότι τα άγκιστρα Co-Cr είχαν την μικρότερη τραχύτητα (θα μπορούσε να αποδοθεί στην ανώτερη αντίστασή τους στη διάβρωση, τη μικρο-σκληρότητα, τον συντελεστή ελαστικότητας καθώς και τη χαμηλή πυκνότητα), ακολούθησαν τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης (με διαφορετική συμπεριφορά τραχύτητας μέσα στις διάφορες περιόδους παρακολούθησης, και η μικρότερη τραχύτητα σε σχέση με τα 2 υλικά που ακολουθούν θα μπορούσε να οφείλεται στο ότι οι ρητίνες ακετάλης χαρακτηρίζονται από την υψηλή αντοχή στην αποτριβή, περιορίζουν την απορρόφηση του νερού και εμφανίζουν χαμηλότερο ερπυσμό), και έπειτα ακολούθησαν της θερμοσυμπίεσης, του πολυαμιδίου, και τέλος του θερμοπλαστικού. Όσον αφορά τη συγκράτηση, τα άγκιστρα Co-Cr εμφάνισαν την υψηλότερη μέση συγκράτηση, ενώ έπειτα ακολούθησαν τα θερμοσυμπιεζόμενα άγκιστρα, ρητίνης ακετάλης, πολυαμιδίου και τέλος τα θερμοελαστικά. Αν και η συγκράτηση μειώθηκε σε όλα τα υλικά, η συγκράτηση των ακεταλικών αγκίστρων εξακολουθούσε να είναι σημαντικά χαμηλότερη από το Co-Cr. Όσον αφορά τη παραμόρφωση αν και υπήρχε μια στατιστικά μη σημαντική διαφορά μετά τις διαφορετικές περιόδους αξιολόγησης για όλα τα υλικά, εντούτοις μετά από ένα έτος ήταν κατά φθίνουσα σειρά για τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης, πολυαμιδίου, Co-Cr, θερμοελαστικού, και



θερμοσυμπιεζόμενου. Επομένως, πέρα από το Co-Cr, από τα μη μεταλλικά υλικά συνίσταται η χρήση ρητίνης ακετάλης ως το καλύτερο υλικό Μ.Ο. λόγω των ανώτερων ιδιοτήτων συγκράτησης, τραχύτητας, και παραμόρφωσης.⁷⁰ Οι θερμοελαστικές ρητίνες παρουσιάζουν χαμηλότερη μέση συγκράτηση σε σχέση με το Co-Cr και αυτό αποδίδεται στις ιξωδοελαστικές ιδιότητές τους καθώς κατασκευάζονται με ευκαμψία η οποία είναι περίπου δέκα φορές από αυτή των μεταλλικών αγκίστρων. Επιπλέον, ένα επιπλέον πλεονέκτημα για τους θερμοελαστικούς συγκρατητικούς βραχίονες είναι ότι έχουν «μνήμη» να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα σε σύγκριση με τους μεταλλικούς συγκρατητικούς βραχίονες οι οποίοι συνήθως με 500 φορές εισαγωγής/αφαίρεσης υφίστανται κόπωση.^{69,70}

Οι σκελετοί PEEK αποτελούν πιο αισθητική επιλογή σε όσους επιθυμούν να αποφύγουν το μεταλλικό χρώμα.^{19,31,74} Το PEEK έχει μικρότερη πυκνότητα, άρα ελαφρύτερο βάρος, για παράδειγμα ένας ερευνητής το 2016 ανέφερε ότι το βάρος σκελετού από PEEK είναι κατά 27,5 % μικρότερο από αυτό του Co-Cr ακόμα και αν έχει τροποποιηθεί η διαμόρφωση, και ένας ακόμη ερευνητής το 2016 ανέφερε ότι το βάρος των σκελετών Μ.Ο. από Co-Cr, PEEK και PMMA ήταν 6,8, 1 και 0,8 g, αντίστοιχα.^{73,74} Ακόμη το PEEK μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εναλλακτικό υλικό σκελετού για ασθενείς με αλλεργίες και ερεθισμούς στο μέταλλο.^{19,31,73,74} Μια τυχαιοποιημένη κλινική δοκιμή που διενεργήθηκε το 2019 απέδειξε ότι η κατάσταση των δοντιών-στήριξης (δείκτης ουλίτιδας, παρουσία περιοδοντικών θυλάκων και ύψους οστού) των αγκίστρων από MIL PEEK είναι καλύτερη από εκείνη των αγκίστρων CST Co-Cr.⁷⁴ Άλλοι ερευνητές απέδειξαν ότι ο αριθμός των μικροβίων είναι μεγαλύτερος στην επιφάνεια από PEEK και ρητίνη ακετάλης από εκείνη των Co-Cr, και αυτό οφείλονταν στην μεγαλύτερη ανωμαλία της επιφάνειας και στις θερμικές ιδιότητες των υλικών, ενώ και για τα 3 υλικά ο αριθμός των βακτηρίων ήταν μεγαλύτερος στην επιφάνεια έδρασης τους σε σχέση με την επιφάνεια του βλενογόννου.²³⁹ Τα φαινόμενα γαλβανικής διάβρωσης εξαλείφονται.⁷⁴ Ακόμη, άλλοι ερευνητές που εξέτασαν τα άγκιστρα PEEK 2 χρόνια μετά την τοποθέτηση μιας Μ.Ο. κάτω γνάθου, παρατήρησαν ότι εκτός από μια ελαφρά αλλαγή στο χρώμα τους, τα άγκιστρα διατήρησαν την συγκράτηση και τη σταθερότητά τους, και ο ασθενής ανέφερε άνεση κατά τη μάσηση και αποτελεσματική συγκράτηση της πρόσθεσης.⁷⁴ Ένας σκελετός PEEK χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MIL δίνει καλύτερη εφαρμογή από τους συμβατικούς μεταλλικούς σκελετούς Μ.Ο. για όλες τις περιοχές (μασητικούς εφαιπτήρες και άγκιστρα, μείζονα και ελάσσονες συνδετήρες, βάση οδοντοστοιχιών). Η διαδικασία επεξεργασίας είναι εύκολη και λιγότερο χρονοβόρα.⁷³ Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, ορισμένοι ερευνητές δήλωσαν ότι τα άγκιστρα PEEK θα πρέπει να είναι παχύτερα από 1,0 mm (σε διάμετρο διατομής) όταν εμπλέκονται σε βαθύτερη εσοχή (0,50 mm) για να



κερδίσουν την ακαμψία των CST αγκίστρων Co-Cr 1 mm σε διάμετρο διατομής και να αποκτήσει μια κλινικά αποδεκτή συγκράτηση.²⁴⁰ Αντίθετα, το 2020, οι El-Baz και συν²⁴⁰ έδειξαν ότι τα άγκιστρα PEEK 1 mm σε διάμετρο διατομής που εμπλέκουν 0,50 mm εσοχή παρέχουν επαρκή συγκράτηση σχεδόν παρόμοια με αυτή των Co-Cr, καθώς δείχθηκε ότι η αντοχή στη συγκράτηση και στη κόπωση μετά από 2.880 κύκλους αν και μεγαλύτερη ήταν για το Co-Cr ήταν στατιστικά μη σημαντική μεταξύ των 2 υλικών, παρόλο που η ομάδα Co-Cr κατέγραψε στατιστικά σημαντικά υψηλότερη μέση τιμή μόνιμης παραμόρφωσης από την ομάδα PEEK.²⁴⁰ Στον Πίνακα 9-1 συγκρίνονται ορισμένες ιδιότητες μεταξύ των υλικών από την ανασκόπηση των Elmoutawakkil και συν⁷⁴ (2020). Από την άλλη ωστόσο, πρόσφατες μελέτες^{19,31} αναφέρουν ότι το PEEK δεν είναι κατάλληλο υλικό για άγκιστρα εάν τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη εσοχή από 0,25 mm επειδή η μέγιστη τάση που εμφανίζεται κατά την αφαίρεση σε μεγαλύτερες εσοχές είναι υψηλότερη από την αντοχή του υλικού, επίσης αναφέρθηκε ότι παρουσιάζουν μικρότερη δύναμη συγκράτησης από το Co-Cr,⁶³ και επιπλέον επειδή ο συντελεστής ελαστικότητας του PEEK είναι 3-4 GPa δηλαδή αισθητά χαμηλότερος από αυτό του κράματος Co-Cr και του τιτανίου (203 GPa και 107 GPa, αντίστοιχα), αυτή η τιμή δεν επαρκεί για τους κύριους συνδετήρες οι οποίοι πρέπει να είναι άκαμπτοι για να λειτουργούν αποτελεσματικά. Κατά συνέπεια, ένας σκελετός από PEEK δεν συμβάλλει σε μια ευρεία κατανομή πίεσης από τη βάση της οδοντοστοιχίας σε πολλαπλά δόντια στήριξης, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα δόντια και τον μαλακό ιστό. Επομένως, η εφαρμογή PEEK σε Μ.Ο. θα πρέπει να περιορίζεται σε ασθενείς που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεταλλικούς σκελετούς κατηγορίας Kennedy III για περιοδοντικά υγιή δόντια. Από την άλλη, άλλοι ερευνητές το σε μια μελέτη για την αποκατάσταση των περιπτώσεων της κατηγορίας II του Kennedy χρησιμοποιώντας μονόπλευρη οδοντοστοιχία στηριζόμενη με εξωκορωνικό σύνδεσμο σε στεφάνες που κάλυπταν δύο δόντια, συγκρίθηκαν στεφάνες με εξωκορωνικό σύνδεσμο ακριβείας και σκελετό από μέταλλο/Co-Cr, μέταλλο/PEEK, PEEK/PEEK, PEEK/μέταλλο, αντίστοιχα έδειξαν ότι ο συνδυασμός PEEK/PEEK (χρήση του υλικού PEEK τόσο ως σύνδεσμο ακριβείας όσο και ως σκελετό) καθιστά ευνοϊκότερη την κατανομή πίεσης συγκριτικά με το Co-Cr εμφάνισε την πιο ευνοϊκή κατανομή τάσεων, μειώνοντας τις παραμορφώσεις γύρω από τα δόντια στηρίγματα και ιδιαίτερα στην φατνιακή ακρολοφία που βρίσκεται άνω των δοντιών στήριξης.²⁴¹ Σημειώνεται, ότι ένας άλλος ερευνητής έκανε μια κλινική μελέτη σε μια γυναίκα 70 ετών που είχε μια συμβατική Μ.Ο. κάτω γνάθου από Co-Cr. Η ασθενής παραπονέθηκε για τη μεταλλική γεύση, το βάρος και τη δυσάρεστη εμφάνιση των μεταλλικών αγκίστρων και ζήτησε ένα εναλλακτικό υλικό για την κατασκευή μιας νέας πρόσθεσης. Ο ερευνητής



χρησιμοποιώντας στην θεραπεία της ασθενούς έναν τροποποιημένο σκελετό πολυμερούς υψηλής απόδοσης (Bio-HPP) PEEK με ακρυλικά δόντια και συμβατική βάση οδοντοστοιχίας από θερμοπολυμεριζόμενη ρητίνη, μετά από ένα χρόνο παρακολούθησης μετά την ολοκλήρωση της θεραπείας, διαπίστωσε ότι δεν υπήρχε θραύση του σκελετού Μ.Ο., και ότι υπήρχε καλή συγκράτηση αγκίστρων και σταθερότητα χρώματος του PEEK.⁷³ Σημειώνεται ότι οι σκελετοί PEEK έχουν υψηλότερο κόστος, και αυτό σε συνδυασμό με του άνω περιορισμούς και επιπλέον λόγω της έλλειψης επιστημονικών στοιχείων για τη μακροχρόνια χρήση τους, για το υλικό αυτό απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για να εκτιμηθεί εάν οι Μ.Ο. με σκελετό PEEK είναι μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση θεραπείας.^{19,31,73}

Πίνακας 9-1 Σύγκριση ιδιοτήτων υλικών σκελετού Μ.Ο. από την ανασκόπηση.⁷⁴

Ιδιότητα	Υλικά			
	Co-Cr	Ti	Ακετάλη	PEEK
Όριο ελαστικότητας (MPa)	460-640	830	63	110
Όριο θραύσης (MPa)	520-820	900	68	180
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	145-220	110	290	4
Επιμήκυνση (%)	6-15	10	25	20
Σκληρότητα (Vickers)	330-465	970	38	80
Πυκνότητα (g/cm ³)	8,3	4,3	1,41	1,3

Σε μια μελέτη το 2012 μετά από 15.000 κύκλους κόπωσης (προσομοίωση 10 χρόνων) σε εσοχές 0,25 mm και 0,5 mm, αγκίστρων από Co-Cr πάχους 1,0 και θερμοπλαστικής ρητίνης πάχους 1,0 και 1,5 mm (PEEK, PEKK, POM), η συγκρατητική δύναμη των 3 θερμοπλαστικών αγκίστρων παρέμεινε σταθερή αλλά σημαντικά μικρότερη από εκείνη των Co-Cr. Ωστόσο, η συγκρατητική δύναμη των κατάλληλα σχεδιασμένων θερμοπλαστικών αγκίστρων ήταν επαρκής για κλινική χρήση. Όλα τα άγκιστρα εμφάνισαν αύξηση στη δύναμη συγκράτησης κατά την πρώτη περίοδο κύκλων ακολουθούμενη από συνεχή μείωση μέχρι το τέλος των περιόδων κύκλων, αλλά εξακολουθούσε να μην διαφέρει σημαντικά σε σύγκριση με την αρχική δύναμη συγκράτησης. Τα άγκιστρα θερμοπλαστικής ρητίνης πρέπει να είναι παχύτερα από τα μεταλλικά και να εμπλέκονται σε μια βαθύτερη εσοχή για να αποκτήσουν κλινικά αποδεκτή συγκράτηση. Αυτό οφείλεται στη σχετικά χαμηλή ακαμψία της θερμοπλαστικής ρητίνης (συντελεστής ελαστικότητας, 2,4 GPa για POM και 4,0 GPa για PEEK και PEKK σε σύγκριση με 240 GPa για κράμα Co-Cr). Θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι τα δύο πιο ογκώδη σχέδια που χρησιμοποιήθηκαν στα θερμοπλαστικά άγκιστρα θα μπορούσαν να αποτρέψουν τις λειτουργίες αυτοκαθαρισμού και να προκαλέσουν περισσότερη συσσώρευση πλάκας. Ωστόσο, αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι εάν καθιερωθεί έλεγχος πλάκας με ανάκληση του ασθενή ανά τακτά χρονικά διαστήματα για έλεγχο, και



επανακαθοδήγηση, οι Μ.Ο. ενδέχεται να μην προκαλέσουν βλάβη στο περιοδόντιο. Ορισμένοι ερευνητές, διαπίστωσαν ότι ο σχηματισμός πλάκας στην παρειακή επιφάνεια δεν εξαρτάται από τον τύπο ή την τοποθέτηση των άγκιστρων, και πρότειναν την προετοιμασία των οδηγών πλακών όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο όριο των ούλων για τη μείωση της συσσώρευσης πλάκας στην εγγύς-άπω επιφάνεια.⁷² Άλλοι ερευνητές, ανέφεραν ότι ο συντελεστής ελαστικότητας για το PEKK είναι περίπου 5,1 GPa, πολύ μικρότερος από αυτόν του κράματος Co-Cr (200 GPa), ωστόσο τις χαμηλότερος συντελεστής κάμψης από εκείνο του κράματος Co-Cr μπορεί να είναι ωφέλιμος, επειδή μειώνει τον κίνδυνο υπερβολικών δυνάμεων στα δόντια-στήριξης της πρόσθεσης. Η πρόσθεση PEKK ζυγίζει περίπου 37 % λιγότερο από το κράμα Co-Cr. Ωστόσο, απαιτούνται παχύτερα άγκιστρα και συνδετήρες λόγω της χαμηλότερης αντοχής του PEKK από εκείνο του μετάλλου. Η στίλβωση μιας πρόσθεσης PEKK είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με τη στίλβωση μετάλλου, και μπορεί να προκαλέσει ανησυχία σχετικά με την πρόσφυση της πλάκας. Πάντως, με τον καθορισμό των κατάλληλων παραμέτρων σχεδίασης επιτυγχάνονται ευνοϊκά αποτελέσματα για τον ασθενή. Γενικά, απαιτούνται επιπλέον κλινικά δεδομένα, ειδικά εκείνα που αφορούν τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα σχετικά με το νέο αυτό υλικό.⁶⁶

Στον Πίνακα 9-2 διακρίνονται ορισμένες ιδιότητες των εύκαμπτων θερμοπλαστικών και των πολυμερών υψηλής απόδοσης από μια ανασκόπηση του 2019,⁷⁷ ως ενδεικτικές για τη σύγκριση με τα κράματα Co-Cr. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ανασκόπηση δεν συμπεριλαμβάνει το κράμα Co-Cr, και σε συνδυασμό με το ότι για την σύγκριση τους με το κράμα Co-Cr απαιτείται μετα-ανάλυση των δεδομένων, τα δεδομένα του πίνακα αποτελούν απλώς ενδείξεις, για το τι μπορεί να συμβαίνει σε σχέση με τα κράματα.



Πίνακας 9-2 Ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των συνήθων θερμοπλαστικών υλικών.⁷⁷

Υλικά	Ιδιότητες				
	Αντοχή κάμψης (MPa)	Συντελεστής κάμψης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Τραχύτητα (μm)	
Κλασσικά θερμοπλαστικά πολυμερή	Συμβατικό PMMA	62,38	1,55	3,9	0,12-0,92
	CAD-CAM PMMA	34,05	2,85	4,1	0,37-2,38
	Πολυαμίδιο	13,7-83,6	612-1381	0,8-1,639	0,21-0,24
	Πολυανθρακικό	29,6-100	2245	2,19-4,659	
	Πολυοξυμεθυλένιο		2,30	2,9	
Πολυμερή θερμοπλαστικά υψηλής απόδοσης	PEEK		4,0	3-4	0,018
	PEEK (Bio-HPP)			18	
	PEKK	200	4,5	5,1	
Ανθρώπινοι ιστοί	Αδαμαντίνη			40-83	
	Οδοντίνη	212,9		15	
	Φλοιώδες οστό			14	

9.4.1 Σύγκριση Co-Cr με το πολυμερές αρυλ κετόνης (ultraire AKP)

Το 2019, οι Marie και συν⁶⁷ μετά από 15.000 κύκλους κόπωσης σε ιδανικές και μη ιδανικές φορές απένθεσης (όπως εσφαλμένα είθισται να χρησιμοποιούν πολλοί ασθενείς), έδειξαν ότι τα άγκιστρα κοπής από AKP έναντι των αγκίστρων Co-Cr από AM+CST λόγω της χαμηλότερης ακαμψίας τους παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη (τόσο αρχική όσο και τελική) δύναμη συγκράτησης, η οποία ωστόσο είναι κλινικά αποδεκτή (σε ένα ευρύ φάσμα σχεδίασης) και σχετικά σταθερή καθώς τα άγκιστρα AKP δεν σκληρύνουν με ενδοτράχυνση κατά την ένθεση/απένθεση (σημαντικά και σταθερά μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση ανεξάρτητα από τη φορά απένθεσης) σε αντίθεση με τα Co-Cr που κατά την ένθεση/απένθεση παραμορφώνονται συν του μπορεί να φθείρουν την επιφάνεια έδρασης (π.χ. στη συγκεκριμένη έρευνα σε στεφάνες e.max που χρησιμοποιήθηκαν ως στηρίγματα αγκίστρων Co-Cr παρατηρήθηκε τοπική αφαίρεση του glaze) με αποτέλεσμα η αρχική δύναμη συγκράτησης



να μειώνεται σταθερά με το χρόνο ανεξάρτητα από το που βρίσκονται οι εσοχές, και αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί αξιοσημείωτο μειονέκτημα για το Co-Cr, καθώς από την ίδια τη σχεδίασή τους, τα άγκιστρα πρέπει να εμπλέκονται σε εσοχές. Σημειώνεται ότι για τους πρώτους 100 κύκλους τα άγκιστρα AKP είχαν μια μικρή μείωση ενώ τα Co-Cr μια αύξηση της συγκρατητικής δύναμης λόγω σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, ενώ μετά τους 100 και μέχρι 15.000 μείωση.⁶⁷

Το Co-Cr έχει ιδιαίτερους περιορισμούς όταν χρησιμοποιείται για άγκιστρα, συμπεριλαμβανομένης της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση (work hardening), της παραμόρφωσης και του ενδεχόμενου σπασίματος των βραχιόνων των αγκίστρων όταν είναι υπό τάση πέρα από το ελαστικό του όριο. Για να έχουν άγκιστρα την ικανότητα αποδίδουν επαρκή δύναμη συγκράτησης, τα άγκιστρα Co-Cr πρέπει να λειτουργούν κοντά στο ελαστικό όριο του υλικού. Επομένως, είναι σημαντικό οι οδοντοστοιχίες Co-Cr να είναι σχεδιασμένες με μία μόνο φορά ένθεσης/απένθεσης για να διασφαλίζεται ότι οι βραχίονες κινούνται μόνο πάνω από το «σωστό» βάθος εσοχής στα δόντια στήριξης. Εάν τα άγκιστρα τοποθετηθούν σε πολύ βαθιές εσοχές, ενδέχεται να παραμορφωθούν ή να σπάσουν και τα δόντια στήριξης μπορεί να υποστούν υπερβολικές δυνάμεις. Παρομοίως, εάν η φορά ένθεσης/απένθεσης της οδοντοστοιχίας είναι διαφορετική από την σχεδιασμένη (για παράδειγμα, εάν ο ασθενής πιέσει μια πλευρά της οδοντοστοιχίας πριν από την άλλη πλευρά κατά την εισαγωγή της οδοντοστοιχίας) τότε το βάθος της εσοχής που διανύει ο βραχίονας αυξάνεται, και η εσφαλμένη μετακίνηση της οδοντοστοιχίας θα προκαλέσει σκλήρυνση με ενδοτράχυνση, θα παραμορφώσει και τελικά θα σπάσει τους βραχίονες του Co-Cr. Το AKP έχει τη δυνατότητα να εισέρχεται και να απομακρύνεται από τις εσοχές χωρίς να πιέζεται πέρα από το ελαστικό του όριο. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης και βελτιωμένης συγκράτησης (για πολλά χρόνια) για τους σκελετούς Μ.Ο. που κατασκευάζονται από αυτά τα νέα υλικά.⁶⁷

Στον Πίνακα 9-3 διακρίνονται ορισμένες διαφορές στις ιδιότητες μεταξύ ενός χυτού κράματος Co-Cr για σκελετούς Μ.Ο. και του Ultaire AKP.⁶⁷

Πίνακας 9-3 Σύγκριση μερικών ιδιοτήτων αγκίστρων, από ένα χυτό κράμα Co-Cr και AKP.⁶⁷

	Κράμα CST Co-Cr	Ultre™ AKP
Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	675	91
Όριο διαρροής (MPa)	441	47
Όριο ελαστικότητας (%)	9,3	> 6 %
Συντελεστής ελαστικότητας (GPa)	197	3500

Δεδομένου ότι πρόκειται για νέο υλικό και η βιβλιογραφία για αυτό είναι περιορισμένη παρακάτω παρατίθενται ορισμένα πλεονεκτήματα του AKP, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη σύγκριση με το Co-Cr, όπως αναφέρονται από την εταιρεία: Μεγαλύτερη



αισθητική καθώς διατίθεται σε διάφορα χρώματα των δοντιών ή των ούλων. Είναι κατά 60 % ελαφρύτερο. Έχει μεγάλη διάρκεια ζωής πάνω από δέκα χρόνια. Είναι βιοσυμβατό, μη ερεθιστικό, μη αλλεργιογόνο, μη πυρετογόνο, μη μεταλλαξιογόνο μη κυτταροτοξικό και μη διαβρωτικό. Δεν εκπλένεται σε νερό, αιθανόλη ή εξάνιο. Εάν η Μ.Ο. χρησιμοποιείται όπως υποδεικνύεται και καθαρίζεται σύμφωνα με τις οδηγίες, τα επίπεδα βακτηρίων δεν υπερβαίνουν εκείνα που βρίσκονται τυπικά στο στοματικό περιβάλλον. Απουσία μεταλλικής γεύσης. Μπορεί να ελαχιστοποιήσει την οστική απώλεια. Όσον αφορά τη σταθερότητα του, οι ιδιότητες του δεν αναμένεται να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου υπό κανονικές συνθήκες, εάν η Μ.Ο. χρησιμοποιείται σωστά και ακολουθούνται οδηγίες χρήσης. Μέτρο ελαστικότητας παρόμοιο με το οστό και στήριξη στα δόντια και γενικά το ΑΚΡ σχεδιάστηκε ειδικά για να καλύψει το κενό μεταξύ, των μεταλλικών σκελετών οι οποίοι μπορεί να είναι πολύ άκαμπτοι και δύσθραυστοι, και άλλων πολυμερών υλικών σκελετού που μπορεί να είναι πολύ εύκαμπτοι συνδυάζοντας έτσι τη στήριξη του μεταλλικού σκελετού με την άνεση που προσφέρουν οι εύκαμπτες οδοντοστοιχίες. Γενικά μια Μ.Ο. χρειάζεται ένα υψηλό μέτρο ελαστικότητας για να διασφαλίσει ότι οι δυνάμεις κατά τη διάρκεια της δήξης και της μάσησης δεν προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση στη Μ.Ο. – χωρίς να είναι πολύ υψηλό (ή άκαμπτο) που να καθίσταται δύσκολη η ένθεση ή αφαίρεση της οδοντοστοιχίας.⁷⁵

9.5 Σύγκριση Co-Cr με τη ζirkόνια

Παρά το γεγονός ότι η ζirkόνια (Y-TZP και Ce-TZP/A) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατασκευή μεταξύ άλλων στεφάνων, μείζονων και ελάσσονων συνδετήρων, ωστόσο η δεν θεωρείται ακόμη κατάλληλη και θα ήταν δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε σκελετούς Μ.Ο. για τους ακόλουθους λόγους: 1) δυσκολία κοπής και λείανσης για διορθώσεις, 2) δυσκολία ρύθμισης της δύναμης συγκράτησης, 3) η ευθραυστότητα των βραχιόνων των αγκίστρων, 4) η αδυναμία ετερογενούς συγκόλλησης και συγκόλλησης με λείζερ, 5) δεν υπάρχουν κλινικές ενδείξεις για μακροπρόθεσμη πρόγνωση.^{19,35}

Νεότερες μελέτες αναφέρουν ότι άγκιστρα Μ.Ο. από ζirkόνια έχουν εξαιρετική βιοσυμβατότητα, δεν ενέχουν κίνδυνο αλλεργίας σε σχέση με τα κράματα Co-Cr, παράγονται με το CAD/CAM και επομένως είναι ευκολότερα στη κατασκευή-επισκευή – και αναπαραγωγή σε σχέση με τα CST Co-Cr. Εκτός αυτού, οι αποκαταστάσεις ζirkονίας μπορούν να χρωματιστούν εξωτερικά με εμβάπτιση ή βούρτσισμα στο διάλυμα χρωματισμού πάνω από την επιφάνεια ζirkονίας πριν από τη σύντηξη, και εναλλακτικά μπορούν να χρωματιστούν εσωτερικά χρησιμοποιώντας προχρωματισμένα πορώδη μπλοκ, ικανοποιώντας έτσι τις αισθητικές επιθυμίες των ασθενών. Ακόμη, η ζirkόνια και η ακρυλική ρητίνη της βάσης της



οδοντοστοιχίας παρουσιάζουν υψηλή αντοχή συγκόλλησης μετά από κατάλληλη επεξεργασία της επιφάνειας, έτσι ώστε όλοι οι σκελετοί ζιρκονίας να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις Μ.Ο. Αυτή η νέα επιλογή θεραπείας μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα ζωής του ασθενούς αυξάνοντας την ασφάλεια και την ικανοποίησή του.⁶⁸ Παρόλα αυτά, οι πιο σοβαρές προκλήσεις στην κλινική εφαρμογή των αγκίστρων ζιρκονίας είναι ότι οι ιδιότητες κάμψης, όπως η δυσθραυστότητα και η ελαστικότητα, που μπορεί να είναι κατώτερες από αυτές των μεταλλικών κραμάτων μετά τη μακροχρόνια χρήση.⁶⁸

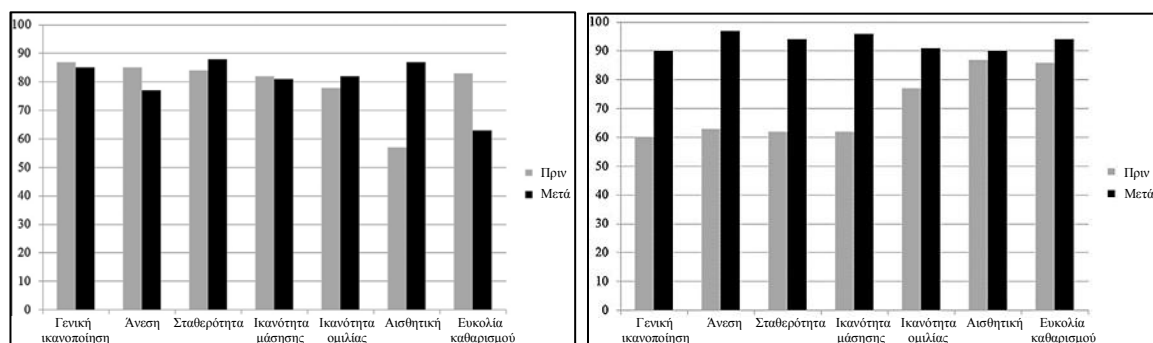
Η Ce-TZP/A έχει εξαιρετική δυσθραυστότητα θραύσης και αντοχή στην κάμψη που θα μπορούσε να είναι χρήσιμη για την εφαρμογή σε σκελετό Μ.Ο. Το 2015, οι Urago και συν⁷⁶ σύγκριναν ράβδους (προσομοιάζουν τους συγκρατητικούς βραχίονες) ίδιου σχήματος, από Ce-TZP/A και Co-Cr πραγματοποιώντας δοκιμή προβόλου όπου τα δείγματα φορτίστηκαν μέχρι τη θραύση και δοκιμές κόπωσης (κύκλοι 10^6). Τα δείγματα Ce-TZP/A έσπασαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής προβόλου, ενώ τα δείγματα Co-Cr όχι, διαφορά που αναμενόταν λόγω των εγγενών ψαθυρών χαρακτηριστικών των κεραμικών παρά την υψηλότερη αντοχή σε θραύση της Ce-TZP/A σε σύγκριση με την Y-TZP και το παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας με τα κράματα Co-Cr γεγονός που υποδεικνύει τη μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση των κραμάτων Co-Cr. Ωστόσο, οι μέγιστες εκτόπισεις πριν από τη θραύση ήταν πάνω από 0,5 mm, υποδηλώνοντας ότι ο κίνδυνος θραύσης για τα άγκιστρα Ce-TZP/A είναι, θεωρητικά, χαμηλός εάν έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν τον ίδιο βαθμό εσοχής (0,25 mm) με τα κράματα Co-Cr. Η δοκιμή κόπωσης έδειξε ότι ομάδες Ce-TZP/A παρουσίασαν αντίσταση στη κόπωση εξαιρετική και συγκρίσιμη με εκείνη του κράματος Co-Cr και ότι οι μέγιστες τιμές εκτόπισης πριν από τη θραύση των δειγμάτων Ce-TZP/A, ήταν συγκρίσιμες με εκείνες των δειγμάτων κράματος Co-Cr. Ως εκ τούτου, είναι απίθανο να συμβεί θραύση από κόπωση των αγκίστρων Ce-TZP/A ή είναι τόσο πιθανό όσο και για τα άγκιστρα κράματος Co-Cr.⁷⁶ Η χρήση των αγκίστρων Ce-TZP/A για Μ.Ο. βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη.⁷⁹

Το 2019 οι Peng και συν⁶⁸ χρησιμοποιώντας ράβδους με τη μορφή βραχιόνων αγκίστρου Μ.Ο. πραγματοποίησαν δύο δοκιμές. Μετά τη δοκιμή προβόλου με εκτόπιση 2 mm σημειώθηκαν κατάγματα στην Y-TZP αλλά όχι στο κράμα Co-Cr. Αυτή η διαφορά ήταν αναμενόμενη επειδή τα κεραμικά είναι ψαθυρά υλικά με χαμηλότερη ακαμψία από το κράμα Co-Cr. Το ψαθυρό χαρακτηριστικό σημαίνει ότι τα δείγματα δεν μπορούν να υποστούν πλαστική παραμόρφωση και είναι επιρρεπή σε ρήξη υπό χαμηλότερο φορτίο σε σχέση με το κράμα Co-Cr. Όσο χαμηλότερη είναι η ακαμψία, τόσο ευκολότερη είναι η παραμόρφωση. Έτσι, το κράμα Co-Cr και η Y-TZP δείχνουν διαφορετική «ακαμψία», παρά του ότι έχουν



τον ίδιο συντελεστή Young. Παρόλα αυτά, η δοκιμή προβόλου αποκάλυψε ότι τα δείγματα Y-TZP μπορούν να αντέξουν πάνω από τρεις φορές την κλινικά απαιτούμενη εκτόπιση (0,25 mm) υποδηλώνοντας ότι ο κίνδυνος κατάγματος για τα Y-TZP άγκιστρα είναι, θεωρητικά, χαμηλός εάν τα άγκιστρα έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν το ίδιο βάθος εσοχής (0,25 mm) με εκείνο των άγκιστρων Co-Cr. Επιπρόσθετα, μετά από 20.000 κύκλους δοκιμών κόπωσης (προσομοίωση εισαγωγής/απένθεσης πάνω από 9 χρόνια) υπό σταθερή εκτόπιση 0,25 mm, κανένα από τα δείγματα δεν εμφάνισε μόνιμη παραμόρφωση καθώς και τα 2 είχαν σχεδόν τον ίδιο βαθμό παραμόρφωσης, ωστόσο οι μέσες τιμές τάσεων (συγκρατητική δύναμη) ήταν μεγαλύτερες για το κράμα Co-Cr από ό, τι για την Y-TZP της οποίας οι μέσες τιμές τάσεων ήταν εντός του εύρους για κλινική εφαρμογή και αν και χαμηλότερες αναμένεται να μειώσουν την τριβή και την επιβάρυνση του δοντιού στήριξης, ειδικά για τους ηλικιωμένους ασθενείς. Οι ερευνητές συμπέραναν, ότι η Y-TZP μπορεί να είναι ένα κατάλληλο υλικό για συγκράτηση και προσφέρει μια αισθητική εναλλακτική λύση στα τρέχουσα άγκιστρα Co-Cr, ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού και της κλινικής μακροζωίας και της επιβίωσης της.⁶⁸

Όταν η Ce-TZP/A χρησιμοποιείται για τους μείζονες και ελάσσονες συνδετήρες που απαιτούν υψηλότερη ακαμψία και το PEEK για τα άγκιστρα που απαιτούν μεγαλύτερη ευκαμψία, τότε αυτός ο σκελετός είναι εντελώς χωρίς μέταλλο και ως εκ τούτου επρόκειτο για μια εξολοκλήρου ψηφιακή ροή εργασίας. Πλεονεκτεί σε ασθενείς με αλλεργίες/ευαισθησίες στο μέταλλο και επιπλέον επιτρέπει την καλύτερη αισθητική επειδή δεν χρησιμοποιεί μεταλλικά άγκιστρα, η οποία απεικονίζεται από το βαθμό ικανοποίησης των ασθενών από την αισθητική οδοντοστοιχίας (Εικόνα 9-2). Οι Μ.Ο. που κατασκευάζονται με αυτή τη μέθοδο κατά τη διάρκεια μιας περιόδου παρακολούθησης ασθενών έξι μηνών, δεν έχουν αναφερθεί κλινικές επιπλοκές ή κατάγματα οδοντοστοιχιών, ενώ η ικανοποίηση των ασθενών βελτιώνεται γενικά μετά την παράδοση της οδοντοστοιχίας.²³



Εικόνα 9-2 Διακρίνεται ο μεγαλύτερος βαθμός ικανοποίησης των ασθενών από την χρήση σκελετού πλήρως ψηφιακής ροής εργασίας (αριστερά) σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο χύτευσης (δεξιά).²³



Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εξέταση των κραμάτων Co-Cr ως προς, την χημική σύνθεση, τον μεταλλουργικό χαρακτηρισμό και τις ιδιότητες σε κάθε τεχνική κατασκευής. Ανάλογα με τον τύπο της Μ.Ο. που κατασκευάζεται, για παράδειγμα με άγκιστρα («κλασσικές Μ.Ο.») ή τηλεσκοπικά συστήματα, το κράμα Co-Cr που χρησιμοποιείται κατά κανόνα διαφέρει. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών κραμάτων Co-Cr με την τεχνική συγκόλλησης στον ίδιο σκελετό όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τη χρήση «κλασσικού κράματος» για τον μείζονα συνδετήρα και μεταλλοκεραμικού κράματος Co-Cr για τις δευτερεύουσες στεφάνες. Πέραν αυτού, υπάρχουν κράματα ακίνητης που έχουν δοκιμαστεί και σε κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. Για τους λόγους αυτούς, και κυρίως για τον πρώτο, κρίθηκε ωφέλιμο να αναφερθούν ορισμένες πληροφορίες για τα κράματα Co-Cr που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σκελετών Μ.Ο. που φέρουν διαφορετικά συγκρατητικά μέσα από άγκιστρα και η πλειοψηφία των οποίων, βάσει των οδηγιών των κατασκευαστών προορίζεται και για ακίνητη προσθετική. Ωστόσο, δεδομένου ότι το κύριο αντικείμενο της εργασίας αφορά τα κράματα Co-Cr αμιγώς για «κλασσικούς» σκελετούς Μ.Ο., η συζήτηση επικεντρώνεται αποκλειστικά σε αυτόν τον τύπο κραμάτων. Οι τεχνικές που μπορεί να κατασκευαστεί ένα «κλασσικός σκελετός» είναι η συμβατική-χύτευση (C-CST),⁸ η προσθετική κατασκευή σε υλικό το οποίο ακολουθώς χυτεύεται (AM+CST) και η σύντηξη σκόνης σε κλίνη (PBF) που ουσιαστικά περιλαμβάνει τις τεχνικές SLM, DMLM, SLS και DMLS.^{33,34} Επίσης, τα άγκιστρα παλαιότερα κατασκευάζονταν με κάμψη σύρματος, ενώ σε σύγχρονες έρευνες έχουν δοκιμαστεί οι τεχνικές σκληρής κοπής (H-MIL) και υβριδικής επεξεργασίας (HM)³⁵ για την κατασκευή τους. Πάντως, οι πληροφορίες στο ειδικό μέρος για τα κράματα σκληρής κοπής θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και για «κλασσικούς» σκελετούς, δεδομένου ότι αρκετοί δίσκοι κοπής παρότι δεν έχουν δοκιμαστεί σε σκελετούς Μ.Ο., κατασκευαστικά ενδείκνυνται. Ακόμη, στις PBF μεθόδους οι σκόνης που επιλέχθηκαν για την ανάλυση των μη «κλασσικών» κραμάτων, έχουν δοκιμασθεί και για την κατασκευή «κλασσικών» σκελετών Μ.Ο. Πάντως, πέραν των ανωτέρω στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν και οι παράμετροι που επηρεάζουν την κάθε τεχνική κατασκευής, καθώς και οι μεταβολές που υφίστανται το κράμα κατά την μετα- και τελική- επεξεργασία



του, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια σύγκριση τους με άλλα υλικά κατασκευής σκελετών Μ.Ο.

Η χημική σύνθεση των κραμάτων είναι καθοριστική για τις ιδιότητες.^{9,45} Από την παρατήρηση των πινάκων στο Παράρτημα Β γίνεται σαφές ότι όλα τα κράματα είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ISO. Όπως φαίνεται, για τη τεχνική CST, τα επικρατούντα στοιχεία είναι: το Co (~ 61-64 %), το Cr (~ 27-30 %) και το Mo (~ 5-6,5 %) πλην ενός κράματος που δεν περιέχει Mo αλλά W. Πάντως, το W στην πλειοψηφία των κραμάτων παρατηρείται ότι προστίθεται σε μηδενική ποσότητα ή σε μικρότερη (0,6-1,5) αυτής του Mo, ενώ σε μικρές ποσότητες προστίθενται επίσης και άλλα στοιχεία όπως Mn, Si, C, N, Ta, και Fe, και όλα μαζί δημιουργούν τη σύνθεση που θεωρείται ως η βάση αυτών των κραμάτων. Για την δημιουργία της βασικής σύνθεσης των κραμάτων στην τεχνική PBF, τα επικρατούντα στοιχεία φαίνεται να είναι το Co (~60-65 %), το Cr (~24,7-30 %), και το Mo (5-7 ή 0 %) ή W (~5,4-8,5 ή 0 %) ή και τα δύο, ενώ σε μικρότερες ποσότητες προστίθενται στοιχεία όπως Si, Fe, Mn, N, και C. Για την επίτευξη ενός επιθυμητού εύρους ιδιοτήτων στη βασική σύνθεση των κραμάτων κάθε τεχνικής μπορεί να προστεθούν και άλλα ιχνοστοιχεία από τον κατασκευαστή. Παρατηρείται ακόμη ότι παρόλο που οι μεταβολές στην σύνθεση είναι μικρές, εντούτοις η επίδραση αυτών στις ιδιότητες είναι σημαντική. Ωστόσο διαφωνία υπάρχει στο κατά πόσο η σύνθεση όσο και οι ιδιότητες μπορεί να συμπίπτουν^{45,82,85} ή όχι^{81,83,86} με εκείνες που αναφέρει ο κατασκευαστής τόσο για τη μέθοδο της χύτευσης^{45,81-83,85,86} όσο και για την μέθοδο PBF⁸⁶. Οι διαφορές αυτές ωστόσο, πιθανώς οφείλονται στην μη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων της κάθε μεθόδου επεξεργασίας και στη μετέπειτα επεξεργασία τους παρά στην φύση των κραμάτων. Σημειώνεται ότι καθένα από τα στοιχεία που προστίθεται στο κράμα έχει ξεχωριστό ρόλο, με τα σημαντικότερα ίσως: το Co το οποίο αποτελεί τον σταθεροποιητή της γ-φάσης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος το οποίο αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή σε εφελκυσμό, και τη σκληρότητα του κράματος,^{5,37,87} το Cr, Mo και W που αυξάνουν την αντοχή, τη σκληρότητα και την αντίσταση στη διάβρωση,^{4,5,9,37,88} και τον C ο οποίος συμβάλλει σημαντικά στη διαμόρφωση των μηχανικών ιδιοτήτων και ιδιαίτερα στην πλαστικότητα ακόμη και σε μικρές ποσότητες, η μείωση του οδηγεί σε μεγαλύτερο δυναμικό διάβρωσης,⁹² η αύξηση του οδηγεί σε ποιοτική και ποσοτική αλλαγή των καρβιδίων και επηρεάζει τις παραμέτρους κρυστάλλωσης του κράματος,⁹³ ενώ σε συνδυασμό με το Si επηρεάζει τον σχηματισμό ή μη της φάσης-σίγμα⁹⁴. Τα μεταλλοκεραμικά χυτά κράματα αν και έχουν δοκιμασθεί και για τη κατασκευή κλασσικών σκελετών Μ.Ο.^{95,96} διαφέρουν ως προς τη σύνθεση από τα κράματα αμιγώς για «κλασσικούς» σκελετούς Μ.Ο.,⁹⁷ και έχει αναφερθεί ότι λόγω του ανεπαρκούς ορίου διαρροής δεν θεωρούνται κατάλληλα για την



κατασκευή κλασικών σκελετών⁹⁷. Πάντως, αυτό που ισχύει είναι ότι οι βιβλιογραφίες σχετικά με αυτά είναι περιορισμένες και εφόσον υπάρχει πληθώρα κραμάτων για «κλασικούς» σκελετούς, καλό είναι να προτιμώνται έναντι των μεταλλοκεραμικών ακόμη και στη περίπτωση που οι ιδιότητες τους είναι αποδεκτές. Από την άλλη, οι σκόνες που έχουν δοκιμασθεί για την κατασκευή σκελετών με άγκιστρα, λίγες έχουν δοκιμαστεί αμιγώς για κλασικούς σκελετούς όπως προαναφέρθηκε, και αυτό συμβαίνει επειδή ο αριθμός των σκονών «κλασικών» σκελετών που κυκλοφορεί στην αγορά είναι περιορισμένος, και υπό αυτή την έννοια αρκετές σκόνες που χρησιμοποιούνται για μεταλλοκεραμικές εργασίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για τη κατασκευή «κλασικών» σκελετών, στοιχείο που επιβεβαιώνεται και από τις ευνοϊκές τους ιδιότητες όπως αναλύεται παρακάτω.

Τα κράματα Co-Cr που κατασκευάζονται με CST συνήθως παρουσιάζουν μια ανομοιογενή δομή. Η δομή τους αποτελείται από την δενδριτική fcc- γ (ή αλλιώς α) ωστενιτική μήτρα που αποτελεί την κυρίαρχη φάση, και την διαδενδριτική η οποία σύμφωνα παλαιότερες έρευνες αντιστοιχεί στο στερεό διάλυμα hcp- ϵ ,⁹⁸ όμως στη πλειοψηφία των μελετών δεν διευκρινίζεται κάτι τέτοιο απλώς αναφέρεται ότι σε αυτήν υπάρχουν άλλες φάσεις,^{9,45,85,87,90,101} ενώ μια ακόμη μελέτη συμφωνεί με την πλειοψηφία υπογραμμίζοντας παράλληλα ότι δεν υπάρχει ϵ -φάση¹⁰⁴. Από την άλλη, έχει αναφερθεί ότι η κύρια δομή των κραμάτων CST αποτελείται από μια μήτρα μετασταθούς διαλύματος Co- β και σε αυτό υπάρχουν καρβίδια ή καρβίδια και διαμεταλλικές φάσεις, ενώ η αναλογία του Co- α διαλύματος δεν υπερβαίνει αρκετό ποσοστό % και για αυτό δεν αποτελεί αντικείμενο έρευνας, παρόλο που εντοπίζεται στη δομή σε μια από τις πλέον σύγχρονες μελέτες.⁹³ Συνεπώς, αν υποθεθεί ότι το διάλυμα Co- β αντιστοιχεί στην fcc- γ μήτρα και το διάλυμα Co- α στην hcp- ϵ φάση, συμπεραίνεται ότι στα περισσότερα κράματα το hcp- ϵ διάλυμα δεν υπάρχει στην μικροδομή, ενώ σε περιπτώσεις κραμάτων που υπάρχει η αναλογία του είναι πολύ μικρή. Πάντως, οι χημικές συνθέσεις των δενδριτικών και διαδενδριτικών φάσεων θεωρούνται παρόμοιες αν και ορισμένοι ανέφεραν ότι οι δενδριτικές περιοχές είναι ελαφρώς πλούσιες σε Cr και φτωχές σε Co (αυτή η μελέτη όμως είναι εκείνη που ανέφερε ότι η διαδενδριτική φάση αντιστοιχεί στην hcp- ϵ ,⁸⁷ η οποία στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί ότι είναι η Co₃Mo⁹²), σε αντίθεση με την πλειοψηφία των μελετών που ανέφερε ότι στην δενδριτική φάση βρίσκεται μεγαλύτερη ποσότητα Co (στερεό διάλυμα των στοιχείων Co και Cr και Mo ή W)^{7,45,87} και λιγότερη ποσότητα Cr και άλλα στοιχεία που διαφέρουν ανάλογα με το κράμα.^{45,87,101,103} Ακόμη διαφωνία υπάρχει ως προς το κατά πόσον η διαδενδριτική φάση αποτελείται στην πραγματικότητα από μια φάση πλούσια σε Co,⁹⁸ καρβίδια,^{45,85,90,98, 101} σ -φάση πλούσια σε Cr και Mo,⁹⁸ καρβίδια και σ -φάση^{87,104}, α φάση και καρβίδια¹⁰¹ ή γενικότερα μια



πολυφασική περιοχή⁹⁸. Σημειώνεται ότι τα καρβίδια μπορεί να είναι διαφόρων τύπων όπως $M_{23}C_6$ που είναι το πλέον σύνηθες (M: Co, Cr και Mo με συνηθέστερο το $Cr_{23}C_6$ ⁴⁵)^{9,85,101}, MC ,^{9,101} M_7C_6 ,⁹⁸ M_3C_2 ^{9,90}, M_7C_3 ⁹, $M_{12}C-M_6C$,¹⁰⁴ ενώ σε κράματα που εμφανίζουν τον ίδιο τύπο η ποσότητα τους αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας τους σε άνθρακα⁸⁵. Τα ιζήματα καρβιδίων ως προς τη μορφολογία αναφέρθηκε παλαιότερα⁴ ότι μπορεί να είναι σφαιρικά και διακοπτόμενα (σαν νησίδια) ή συνεχόμενα ή σε στρώματα (ευτηκτοειδείς περιοχές), ενώ νεότερες μελέτες⁷ αναφέρουν ότι μπορεί να είναι τύπου-μπλοκ και ελασματοειδή με γεωμετρία νησίδας ή επίμηκη,⁷ και ακόμη έχουν εντοπιστεί ότι υπάρχουν και «αστεροειδείς τύποι καρβιδίων», καθώς και καρβίδια τύπου περλίτη.⁸¹ Η ελασματοειδή μορφολογία των καρβιδίων μπορεί να σχηματιστεί ως αποτέλεσμα μετασχηματισμού ευτηκτοειδών.⁸¹ Η κατανομή των ιζημάτων καρβιδίων μπορεί να είναι εντός των κόκκων ή στα όρια αυτών,⁴ η διάταξη τους σημειακή²⁰⁵, και σχετικά με τον προσανατολισμό τους στις διαδενδριτικές περιοχές (όπως και για τα ιζήματα σ-φάσης): τα ιζήματα μπορεί να είναι: ευθυγραμμισμένα παράλληλα μεταξύ τους¹⁰⁴. Το μέγεθος των κόκκων μπορεί να κυμαίνεται από χονδροκρυσταλλικό,^{85,93} μικροκρυσταλλικό,⁸⁵ και τα δύο με την διάταξη των κόκκων να είναι: κόκκοι μικρότεροι στα λεπτότερα μέρη και προς την εξωτερική επιφάνεια και μεγαλύτεροι στα παχύτερα και προς το κέντρο^{4,56,185}. Τα όρια των κόκκων μπορεί να είναι ακανόνιστα χωρίς διδυμίες ανόπτησης,¹⁰⁴ ενώ το πάχος των ορίων μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις παραμέτρους ψύξης¹⁰². Εντός των κόκκων μπορεί να υπάρχουν ανεπτυγμένα όρια μικρής γωνίας. Περισσότερες τάσεις αναπτύσσονται γύρω από τέτοια όρια και λιγότερες στις ενδοκοκκώδεις περιοχές. Είναι πιθανό αυτά τα όρια χαμηλής γωνίας να σχηματίζονται λόγω της πρόσκρουσης των δενδριτών με παρόμοιους κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς στις τελικές περιοχές στερεοποίησης (δηλαδή στις διαδενδριτικές περιοχές).¹⁰⁴ Επιπρόσθετα, στην μικροδομή μπορεί να εντοπιστούν εσωτερικές ατέλειες που μειώνουν τη μηχανική αντοχή και επιδεινώνουν τις ιδιότητες,^{9,93,198} και στις οποίες περιλαμβάνονται: α) τα έγκλειστα, β) τα ιζήματα καρβιδίων ή εύθραυστων διαμεταλλικών φάσεων ως αποτέλεσμα χημικού μικροδιαφορισμού ο οποίος μειώνεται όταν το W περιέχεται στη σύνθεση του κράματος^{45,93}, γ) οι πόροι που μπορεί να είναι έγκλειστα αερίων ή πόροι συρρίκνωσης (οι πόροι μπορεί να εμφανιστούν κυρίως στα διαδενδριτικά όρια, ενώ μπορεί ακόμη και να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή⁴⁵),⁴ και δ) μικρορωγμές κυρίως λόγω τάσεων. Από αυτές, ο σχηματισμός ιζημάτων στη μήτρα είναι μεγάλης σημασίας για τη βελτίωση της αντοχής των CST κραμάτων Co-Cr, και μάλιστα τα ιζήματα καρβιδίων έναντι των ιζημάτων φάσης-σ θεωρούνται αποτελεσματικότερα στην ενίσχυση και τα τελευταία θα πρέπει να αποφεύγονται,¹⁰⁴⁻¹⁰⁶ ενώ σημειώνεται ότι δεν πρέπει να προστίθεται πολύς άνθρακας στα κράματα¹⁰⁴



καθώς τότε τα ιζήματα καρβιδίων μπορούν να επιδεινώσουν τις ιδιότητες.^{93,98,102,104} Πλην των ιζημάτων καρβιδίων και φάσης-σίγμα, μπορεί να υπάρχουν επίσης ιζήματα νιτριδίων [π.χ. π (M_2T_3X όπου $X = C, N$)] ως μηχανισμός ενίσχυσης της αντοχής με παράλληλη διατήρηση της ολκιμότητας.¹⁰⁴ Σημειώνεται, ότι τα τριμερή κράματα Co-Cr-Mo μπορούν να αναλυθούν μέσω των διαγραμμάτων δυαδικής ισορροπίας Co-Cr, Cr-Mo και Mo-Co ή μέσω των ισοθερμικών τμημάτων του τριμερούς διαγράμματος.¹⁰⁹ Πάντως, αν και σε μια πρόσφατη μελέτη έχει αναφερθεί ότι τα CST κράματα παρουσιάζουν υψηλή ποιότητα, χωρίς να υπάρχει μεταβολή διαστάσεων και ελαττώματα χύτευσης (όπως κοιλότητες συστολής, πόροι, βοθρία, χτυπήματα ή ρωγμές),⁸⁵ οι εσωτερικές ατέλειες που μπορούν να αποφευχθούν είναι τα έγκλειστα ξένων σωμάτων και πόρων, ενώ οι υπόλοιπες μπορούν να περιοριστούν σημαντικά με τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων επεξεργασίας (πυρόχωμα, τήξη, επανότηξη, μέθοδος και θερμοκρασία χύτευσης, τρόπος ψύξης) και με τις κατάλληλες διαδικασίες μετα-επεξεργασίας όπως αναλύονται στη συνέχεια, όμως το μικροπορώδες συστολής και οι μικρορωγμές λόγω τάσεων φαίνεται ότι οφείλονται στην ίδια τη φύση της διαδικασίας της χύτευσης και ακόμη και αν μελέτες υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχουν πιθανώς αυτό οφείλεται στη μη χρήση αρκετά υψηλής μεγέθυνσης για την ανίχνευση τους στη μικροδομή.

Η υπερθέρμανση του πυροχώματος και συνεπώς του κράματος, μπορεί να προκαλέσει δύο κύριες επιδράσεις, τις θερμικές και τις διαβρωτικές. Οι διαβρωτικές ή οξειδωτικές επιδράσεις αφορούν την αντίδραση συστατικών (οξειδίων κ.α.) του λιωμένου κράματος με το πυρόχωμα και μπορούν να μειώσουν το πάχος του καλουπιού (υποστηρίζεται ότι ισχύουν και στη χύτευση). Όσον αφορά την αντίδραση αυτή, το Co δεν ενώνεται εύκολα με το πυρόχωμα, και η ένωση που τείνει να μειώνεται-διαχέεται στο πυρόχωμα είναι πιθανόν το οξείδιο του CoO. Το ίδιο συμβαίνει και με τον Fe ενώ δεν έχουν ανιχνευτεί καθόλου στο πυρόχωμα Ni, Mo, W, Cu, Ti ή Ta. Το Cr διαχέεται περισσότερο μέσα στο πυρόχωμα και το Mn διαχέεται στο ίδιο βάθος ή και περισσότερο από ότι το Cr (πάνω από 80 μm) και είναι σχεδόν πλήρως εξαχνωμένο από το κράμα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το πυρόχωμα.^{22,38,149,180} Κάτι ανάλογο συμβαίνει και κατά τη χύτευση καθώς και εκεί υπάρχει κάποιου είδους υπερθέρμανση δεδομένου ότι φαίνεται αναπόφευκτη κάποια τήξη του συνδετικού υλικού κατά τη χύτευση [σημείο τήξης του $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ είναι 1184 °C ενώ του $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ είναι 1383°C και οι θερμοκρασίες liquidus των κραμάτων Co-Cr είναι 1200-1450°C και για καλές χυτεύσεις χρειάζεται θέρμανση επιπλέον -263,15 °C (= 50K)]. Έτσι, λαμβάνει χώρα η αντίδραση με το SiO_2 (ένα πιθανό παράδειγμα είναι: $2\text{CoO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Co}_2\text{SiO}_4$ (~1345 °C)], σχηματίζοντας τελικά υαλώδη υλικά κατά την ψύξη και φαίνεται ότι η σκωρία σε τέτοιου είδους χυτεύσεις οφείλεται εν μέρει σε αυτό το τήγμα. Το Cr_2O_3 (οξείδιο του



κράματος) δεν φαίνεται να αντιδρά για να δώσει ένα ισοδύναμο πυριτικό άλας και ακόμη δεν λιώνει μέχρι τους 2200 °C. Αντιδράσεις με το MgO και φωσφορικά ιόντα είναι πιθανές. Ωστόσο αποτελεί σφάλμα ότι το κράμα αντιδρά με το SiO₂ διότι είναι θερμοδυναμικά αδύνατο.⁴⁴ Σημειώνεται, ότι οι μελέτες διερεύνησης των πιθανών αντιδράσεων κατά τη χύτευση είναι περιορισμένες, και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πλέον κυκλοφορούν διαφόρων τύπων κράματα, πυροχρώματα και συσκευές χύτευσης, τα οποία μπορούν να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά κάθε κράματος κατά τη χύτευση, συμπεραίνεται ότι απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του συνόλου των πιθανών αντιδράσεων με το SiO₂ κατά τη χύτευση ή άλλων πιθανών αντιδράσεων που μπορεί να υφίστανται, ή αν τελικά μπορούν να αποφευχθούν αντιδράσεις πυροχρώματος-κράματος. Πάντως με την εξέλιξη των υλικών και εφόσον ακολουθούνται οι οδηγίες των κατασκευαστών, φαινόμενα αντιδράσεων πυροχρώματος-κράματος αναμένεται να περιοριστούν στο ελάχιστο.

Όσον αφορά τις μεθόδους τήξης, σε γενικές γραμμές η τήξη με φλόγα υστερεί σε σχέση με την επαγωγική όπως αναφέρθηκε στο γενικό μέρος, ενώ σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί, πιο ευνοϊκός τύπος φλόγας ως προς τη μικροδομή είναι ο ουδέτερος σε μια απόσταση 2 ή 4 inc.^{4,7} Η σκληρότητα με φθίνουσα σειρά είναι στη μέθοδο φλόγας/αέρα, επαγωγής/αργόν, επαγωγής/κενό και επαγωγής/αέρα (σχεδόν ίδια), η επιμήκυνση αντίστοιχα στην 1^η, 3^η, 2^η και 4^η, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό στην 3^η, 4^η, 2^η και 1^η (μόνο για την 1^η, $p < 0,05$).²⁴² Όσον αφορά τον τύπο της μηχανής χύτευσης, ορισμένοι υποστηρίζουν ότι έχει μικρή επίδραση στις ιδιότητες ή την ακρίβεια των κραμάτων και ότι η επιλογή είναι θέμα ευκολίας και προσωπικής προτίμησης, ενώ άλλοι επιβεβαιώνουν εν μέρει τον άνω ισχυρισμό εντοπίζοντας παρόμοια μικροσκληρότητα μεταξύ των μεθόδων: α) επαγωγική τήξη / χύτευση πίεσης-κενού και β) φλόγα/φυγόκεντρη χύτευση, όμως παράλληλα εντοπίζουν ποσοτικές (και όχι ποιοτικές) διαφορές στην επιφανειακή σύνθεση του κράματος καθώς και μεγαλύτερη χυτευσιμότητα, επιφανειακή λεπτομέρεια και μικρότερο μέγεθος κόκκων, για την μέθοδο επαγωγική/πίεσης-κενού.⁸³ Συνεπώς, όσον αφορά την τήξη αν και η τεχνική της φλόγας υστερεί συγκριτικά με τις λοιπές μεθόδους, οι επαγωγικές μέθοδοι επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες, και δεν μπορεί να συναχθεί συμπέρασμα για το ποια υπερτερεί, πιθανώς η επαγωγική/κενού διότι εξασφαλίζεται τόσο η ευκολότερη κατεργασία του κράματος, όσο και η ολκιμότητα και η αντοχή του. Άλλοι ερευνητές όπου εξέτασαν αμιγώς τη μέθοδο χύτευσης (δηλαδή η μέθοδος τήξης ήταν κοινή) ανέφεραν ότι στην μέθοδο χύτευσης της πίεσης-κενού σε σχέση με τη φυγόκεντρη/αέρα υπάρχει χαμηλότερη ανθεκτικότητα του της στιβάδας παθητικοποίησης,¹³⁵ μεγαλύτερο όριο διαρροής,^{182,184} μικρότερη αντοχή στον εφελκυσμό¹⁸⁴ και μικρότερη εκατοστιαία επιμήκυνση (δεν επισημαίνεται αν η



διαφορά είναι στατιστικά σημαντικά για τις 2 ιδιότητες),¹⁸⁴ αν και κατά άλλους μεγαλύτερη επιμήκυνση¹⁸², ωστόσο ανεξάρτητα από τη μέθοδο, οι ιδιότητες που αναφέρουν οι κατασκευαστές των κραμάτων μεταβάλλονται μετά τη χύτευση, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία δομικών ελαττωμάτων στα χυτά.^{182,184} Επιπλέον, η μέθοδος χύτευσης πίεσης-κενού αποδίδει μεγαλύτερη: ακρίβεια, σταθερότητα διαστάσεων, ποιότητα επιφάνειας, αναπάρσταση σχήματος, συγκρατητική δύναμη.^{184,185} Όσον αφορά την επίδραση της μεθόδου χύτευσης στη μικροδομή, τα κράματα και των δύο μεθόδων παρουσιάζουν την τυπική δενδριτική μικροδομή με το ίδιο μοτίβο διάταξης κόκκων, και με μικροδιαφορισμούς εντός των κρυσταλλιτών,¹⁸² και εκείνο που διαφέρει είναι το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων (αν και στην άνω μελέτη αναφέρθηκε μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων¹⁸⁵) και η πιο συμπαγής δομή στην μέθοδο χύτευσης πίεσης-κενού (παρουσία μεμονωμένων περιπτώσεων μικροπορώδους, πορώδους συστολής και μικρορωγμών, έναντι της φυγόκεντρης/αέρα που υπάρχει παρουσία πορώδους κατά μήκος του άξονα των δενδριτών και πορώδους συστολής στους δενδριτικούς βραχίονες, και μικρορωγμές που διαδίδονται μεταξύ των βραχιόνων με πορώδες συστολής).^{83,182,184} Η διαφορά στο μέγεθος των κόκκων μεταξύ των μεθόδων χύτευσης οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες ψύξης για καθεμία από αυτές, καθώς η περιστροφική κίνηση της φυγόκεντρου στον περιβάλλοντα αέρα δημιουργεί πιο γρήγορη ψύξη συγκριτικά με τον κλειστό θάλαμο της μεθόδου πίεσης-κενού,¹⁸⁵ ενώ αντίθετα σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι το τηγμένο κράμα στη συσκευή πίεσης-κενού ψύχεται γρηγορότερα λόγω της υψηλότερης πίεσης που δημιουργεί αυξημένη επαφή με το πυρόχωμα, και έτσι απάγει πιο εύκολα τη θερμότητα.⁸³ Πάντως, η διαφορά στο μέγεθος κόκκων μεταξύ των δύο μελετών, μπορεί να οφείλεται πιθανώς στο ότι η μια μελέτη χρησιμοποίησε φλόγα έναντι της επαγωγικής τήξης, ενώ στην άλλη η μέθοδος τήξης ήταν κοινή. Σε περίπτωση που εντοπίζονται διαφορές μεταξύ των κραμάτων για την ίδια μέθοδο χύτευσης αυτές μπορεί να οφείλονται στην διαφορετική απόσταση από το κανάλι αγωγού (αυτά που πλησιάζουν έχουν παρατεταμένο χρόνο ψύξης).¹⁸⁵ Ακόμη, κατά την τήξη ενός κράματος με τη μέθοδο χύτευσης κενού/πίεσης, η χρήση αερίου σχηματισμού (forming gas) μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή λεπτότερων καρβιδίων τα οποία τείνουν να συσσωρεύονται κατά μήκος των ορίων των κόκκων και υπό αυτή την άποψη η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες των χυτών¹⁸⁵. Για αυτό πρέπει, να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη βελτίωση των κατευθυντήριων γραμμών της χύτευσης για την εκτέλεση της χωρίς ελαττώματα, ή να διασφαλιστεί η αφαίρεση των ελαττωμάτων πριν την παράδοση του σκελετού, και επίσης συνιστάται ο έλεγχος του σκελετού για τυχόν επιπολασμό των γρατσουινιών ή των μικρορωγμών – ως αρχή τις κατάγματα κόπωσης – κάθε έξι μήνες από τους οδοντιάτρους.^{182,184}



Συνεπώς, οι μέθοδοι χύτευσης επηρεάζουν σημαντικά τη μικροδομή (κυρίως το μέγεθος κόκκων και των ιζημάτων, και τη πυκνότητα της δομής), τις μηχανικές ιδιότητες, τη σκληρότητα, την ακρίβεια, την δύναμη συγκράτησης, τη σταθερότητα διαστάσεων, την ποιότητα επιφάνειας, την αναπαράσταση σχήματος, την ποσοτική σύνθεση και τη χυτευσιμότητα των κραμάτων Co-Cr, την αντίσταση στη διάβρωση και ενδεχομένως τη βιοσυμβατότητα. Η πλέον πλεονεκτική στο σύνολο των ιδιοτήτων φαίνεται να είναι συσκευή πίεσης/κενού, καθώς το μέγεθος κόκκων καθορίζεται περισσότερο από άλλους παράγοντες, και επιπλέον η υψηλότερη απελευθέρωση ιόντων που προαναφέρθηκε δεν σημαίνει απαραίτητα ότι δημιουργεί υψηλότερη διάβρωση καθώς όπως έχει αναφερθεί παρόλο που κάποια υλικά υφίστανται περισσότερη διάβρωση, λιγότερα ιόντα εκλύονται, και αυτό οφείλεται στα προϊόντα διάβρωσης που προσεγγίζουν την μεταλλική επιφάνεια και σχηματίζουν ένα αδρανές στρώμα¹⁴⁵. Σημειώνεται ακόμη, ότι αν και η αξιολόγηση και η επίτευξη τις ιδανικής θερμοκρασίας χύτευσης των κραμάτων είναι πολύ δύσκολη, κάθε μεταβολή της ακόμη και κατά 10 °C έχει άμεση επίδραση στις ιδιότητες των χυτών (μείωση: αντίστασης στη διάβρωση, ορίου διαρροής, αντοχής στη θλίψη, και τη μεταβολή: σκληρότητας, ψαθυρότητας και πλαστικότητας).⁴⁰ Για αυτό πέρα από τη ορθή τήρηση των διαδικασιών χύτευσης, και την αποφυγή χρήση φλόγας για τη τήξη, καλό είναι να γίνεται κατά το δυνατόν συχνότερα «καλιμπράρισμα» των φούρνων.

Ο τρόπος ψύξης των κραμάτων Co-Cr, μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ της απότομης ψύξης και της αργής ψύξης. Αύξηση του ρυθμού ψύξης αυξάνει τη σκληρότητα, τη μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό, το όριο διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας και μειώνει την ολκιμότητα.^{4,7,102} Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης μειώνεται το μέγεθος των κόκκων, το πάχος των ορίων των κόκκων, το μέγεθος και το κλάσμα τις περιοχής των καρβιδίων, και το μέγεθος ή το κλάσμα περιοχής των μικροπόρων.^{98,102,105,201} Ακόμη, ανεξάρτητα από τον ρυθμό ψύξης σχηματίζονται οι ίδιες φάσεις,^{102,201} ωστόσο σε μια μελέτη αναφέρθηκε ότι σε ταχεία ψύξη ο μετασχηματισμός τις φάσης-σίγμα σε $M_{23}C_6$ μπλοκ καρβίδια μεταξύ 1150-1050 °C, αποτέλεσμα ωστόσο το οποίο δεν έχει ανιχνευθεί σε νεότερη μελέτη τόσο για την αργή όσο και για την ταχεία ψύξη.²⁰¹ Για την επίτευξη ταχείας ή αργής ψύξης έχουν δοκιμαστεί διάφοροι μέθοδοι εκτός,^{4,7,102} εντός κλιβάνου²⁰¹ ή και τα δύο.^{4,7} Σε κάθε περίπτωση ο τεχνολόγος κατά την ψύξη των κραμάτων Co-Cr θα πρέπει να ακολουθεί τις υποδείξεις του κατασκευαστή του κράματος καθώς η μεταλλογραφική δομή του χυτού κράματος είναι και συνάρτηση της αρχικής του σύνθεσης σε μέταλλα,⁴ το οποίο βρίσκει σύμφωνο και το συγγραφέα σαν τελικό συμπέρασμα της παρούσης εργασίας καθώς ο κατασκευαστής μπορεί να έχει προσθέσει κάποιες ουσίες που να καθορίζουν τελικώς τη συμπεριφορά του



κράματος και έτσι για παράδειγμα ενώ στην αργή ψύξη υπάρχει πρόβλεψη για μεγάλο μέγεθος κόκκων, μπορεί οι ουσίες του κατασκευαστή να τροποποιούν τη συμπεριφορά του και τελικώς να δημιουργείται μικρό μέγεθος κόκκων. Πάντως, ο ρυθμός ψύξης επιδρά στο μέγεθος των κόκκων, των καρβιδίων και των μικροπόρων, στην αναλογία μεταξύ τους, ενώ μπορεί να επηρεάσει και τον τύπο διαδενδριτικής φάσης που σχηματίζεται, επηρεάζοντας τελικά τις ιδιότητες.

Οι κατασκευαστές οδοντιατρικών κραμάτων συμβουλεύουν να μην επαναχρησιμοποιείται κράμα το οποίο έχει προηγουμένως χυτευθεί, με πολύ λίγους να υποστηρίζουν ότι αν και δεν συνίσταται είναι αποδεκτή η μερική προσθήκη νέου κράματος και μάλιστα σε αναλογία που περιέχει έως και 50 % επαναχυτευμένο κράμα, καθώς όπως επισημαίνουν μια τέτοια αναλογία δεν μειώνει την ποιότητα των κατασκευών.¹⁸⁶ Ωστόσο οι κυριότεροι λόγοι που οδηγούν στην επαναχύτευση των κραμάτων είναι ο οικονομικός, η σπατάλη φυσικών πόρων, και η περιβαλλοντική προστασία.^{131,151,186-188,190-192} Αν και υπάρχουν έρευνες που έχουν δοκιμάσει μεγάλο αριθμό επαναχυτεύσεων και διαφορετικές αναλογίες παλαιού-νέου κράματος, εντούτοις δεν έχει καθιερωθεί κάποιο κοινής αποδοχής πρωτόκολλο συναίνεσης, με τα τελευταία χρόνια να γίνονται προσπάθειες για την καθιέρωση της πρωτοκόλλου προσθήκης 50 % κ.β. χρησιμοποιημένου κράματος σε καινούργιο με μέγιστο αριθμό επαναχυτεύσεων των 4, μένει ωστόσο να δοκιμαστεί και στο μέλλον^{186,187} ή μελλοντικές μελέτες να εργαστούν για την καθιέρωση ενός νέου κοινού πρωτοκόλλου συναίνεσης.^{186,191} Πάντως, η επαναχύτευση προκαλεί αλλοιώσεις στη χημική σύνθεση^{131,186,192,194} αν και σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι σε κατάσταση κενού με αργό η επαναχύτευση δεν έχει κάποια επίδραση στη χημική σύνθεση των κραμάτων με επαναχύτευση 1-3 φορές¹⁹⁴. Ακόμη, προκαλεί μείωση της χυτευσιμότητας^{131,192} αν και ορισμένες ομάδες ερευνητών έχουν αναφέρει μη σημαντική μεταβολή της και αυτό κυρίως σε ίση αναλογία παλαιού/νέου κράματος ενώ η πιο πρόσφατη μελέτη απέδειξε ότι το κράμα Co-Cr μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί έως και έξι φορές χωρίς να επηρεαστεί η χυτευσιμότητα υπό την προϋπόθεση ότι προστίθεται 50 % νέο κράμα σε κάθε επαναχύτευση¹³¹. Αν και παλαιότερα αναφέρθηκε ότι τα επαναχυτευμένα κράματα έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση,¹⁸⁶ νεότερες μελέτες δείχνουν ότι η απελευθέρωση ιόντων αυξάνεται με την προσθήκη πλεονάζοντος κράματος^{19,186} ενώ η προσθήκη νέου κράματος κατά 50 % στο παλιό βελτιώνει την αντοχή στη διάβρωση σε βαθμό που δεν υπάρχει κίνδυνος¹⁹⁶, και ακόμη πολλαπλές επαναχυτεύσεις επιταχύνουν την απελευθέρωση ιόντων ωστόσο η επιτάχυνση μειώνεται σταδιακά με τον αυξανόμενο αριθμό επαναχυτεύσεων αν και οι απελευθερούμενες συγκεντρώσεις θεωρούνται μη τοξικές.¹⁹⁵ Η μορφή της επιφανειακής διάβρωσης στη περίπτωση χρήσης 100 % επαναχυτευμένου υλικού μπορεί να



είναι μικροδιάβρωση ή ενδοκοκκική διάβρωση^{19,186,232} ενώ έχει αναφερθεί και η παρουσία μη ομοιόμορφα κατανεμημένης γενικής διάβρωσης¹⁸⁰ σε επαναχυτευμένο κράμα μιας φοράς επαναχύτευσης στην οποία επισημαίνεται ότι η αντίσταση είναι καλή.⁸⁹ Η επαναχύτευση μπορεί να αυξήσει τις πιθανές κυτταροτοξικές επιδράσεις,^{6,186} σε βαθμό που τα κράματα δεν πρέπει να επαναχυτεύονται,⁶ όμως η προσθήκη 50 % πλεονάσματος κράματος φαίνεται να είναι αποδεκτή¹⁸⁶ και μάλιστα έχει αναφερθεί σε πρόσφατη μελέτη ότι η βιοσυμβατότητα των κραμάτων Co-Cr που έχουν χυτευθεί 1-3 φορές δεν αλλάζει.¹⁹⁷ Σε παλαιότερη μελέτη αναφέρθηκε ότι, η επαναχύτευση με την προσθήκη 75 % νέου κράματος δεν επηρεάζει σημαντικά την αντοχή στην κόπωση, ενώ η επαναχύτευση με την προσθήκη 50 % νέου κράματος μειώνει σημαντικά την αντοχή στην κόπωση¹⁹⁸, ενώ αντίθετα σε νεότερη αναφέρθηκε ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην αναλογία 50 και 100 % και επιπλέον σημειώθηκε ότι η αντίσταση μειώνεται από τη 1^η στη 3^η γενιά επαναχύτευσης.¹⁹¹ Η μικροδομή των επαναχυτευμένων κραμάτων είναι τυπική δενδρίτη,⁸⁹ ωστόσο η αύξηση της ποσότητας του επαναχυτευμένου κράματος μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση: της ετερογένειας της μικροδομής,^{81,188} της διάστασης των κόκκων,^{186,198,199} των καρβιδίων λόγω της πιθανής αύξησης της περιεκτικότητας σε άνθρακα^{198,188}, γενικότερα των διαμεταλλικών ενώσεων^{188,199} στο όριο κόκκων¹⁹⁹, ακαθαρσιών (π.χ. εγκλείσματα¹⁹⁸ όπως υπολειμμάτων του Al_2O_3 ⁸¹ ή πυροχρώματος⁸¹) και δομικών ασυνεχειών όπως – πορώδες^{81,186}, μικροσυστολές⁸¹ και μικρορωγμές⁸¹ – με αποτέλεσμα την μεταβολή των ιδιοτήτων που εξαρτώνται από αυτά. Αντίθετα, μια ομάδα ερευνητών έδειξε ότι η μικροδομή των κραμάτων που επαναχυτεύθηκαν 4 φορές δε διέφερε σημαντικά μετά την επαναχύτευση, όσον αφορά τον όγκο, το μέγεθος, τη κατανομή και τη χημική σύνθεση των φάσεων οι οποίες ωστόσο ανέφεραν ότι ήταν δενδρίτες (φάση α στερεού διαλύματος), και 2 διαδενδριτικές φάσεις που κρυσταλλώνονται μεταξύ των δενδριτών [φάση δ (στερεό διάλυμα Cr, Mo και Co), ευτηκτικό διάλυμα αποτελούμενο από φάση-α και καρβίδια].¹⁰¹ Σε αντίθεση με τις άνω μελέτες, σε μια πιο πρόσφατη μελέτη, με την αύξηση των αριθμών επαναχύτευσης, η σαφής διάκριση μεταξύ της μήτρας και των δενδριτών εξαφανίστηκε και η μικροδομή έγινε πιο ομοιογενής, με ιζήματα που υπάρχουν στα όρια των κόκκων και στις διαδενδριτικές περιοχές, και μικρότερο μέγεθος κόκκων πιθανώς λόγω των ακαθαρσιών που διευκολύνουν την πυρήνωση των κόκκων ενώ σημειώθηκε ότι η κατανομή των βασικών στοιχείων στις δενδριτικές και διαδενδριτικές περιοχές ήταν διαφορετική ανάλογα με τον αριθμό των επαναχυτευτέσεων με το περιεχόμενο των στοιχείων βάσης κράματος Co και Cr τείνει να εξισώνεται στις δενδριτικές και διαδενδριτικές περιοχές.¹⁹⁵ Πάντως, μετά τη χύτευση, η επιφάνεια των κραμάτων μπορεί να μολυνθεί, με πυρόχρωμα, μεταλλικά οξείδια (Al) και στρώματα αντίδρασης στη διεπαφή,



γεγονός το οποίο απαιτεί κάποια επεξεργασία της επιφάνειας πριν την επαναχύτευση, όπως αμμοβολή με άλλες διεργασίες που έχουν προταθεί από διάφορους συγγραφείς.^{81,186} Ακόμη, καλό είναι να πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής ανάλυση φάσεων των χυτών υλικών και να ελεγχθεί η πιθανότητα να γίνει μια ομοιογενής δομή μέσω εφαρμογής κατάλληλης θερμικής επεξεργασίας προκειμένου να βελτιωθούν οι ιδιότητες αντοχής των χυτών.⁸¹ Η σκληρότητα διαφέρει από τη 1^η μέχρι τη 4^η επαναχύτευση, υπερβαίνει τις προδιαγραφές,¹⁸⁷ και κατά νεότερες απόψεις η σκληρότητα μέχρι και την 4^η επανάτηξη δεν εμφανίζει σημαντική μεταβολή¹⁰¹. Ακόμη αυξάνεται σημαντικά με την προσθήκη 100 % και 50 % επαναχυτευμένο κράμα¹⁸⁷ ή γενικότερα με την αύξηση της ποσότητας επαναχυτευμένου υλικού^{81,195}, ενώ κατά άλλους μειώνεται με την προσθήκη 50 % κ.β. από την 1^η στη 4^η επαναχύτευση¹⁸⁷, και γενικώς η προσθήκη 25 % και 50 % κ.β. νέου κράματος επιφέρει τη βελτίωση της σε σχέση με την μη προσθήκη νέου κράματος,^{6,186} ενώ σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι μεταξύ των αναλογιών 0, 25, 50, 100 % νέου υλικού οι διαφορές δεν ήταν σημαντικές¹⁸⁸, ενώ στην πλέον πρόσφατη μελέτη αναφέρεται το κράμα Co-Cr μπορεί να επαναχυτευθεί έως έξι φορές υπό την προϋπόθεση ότι σε αυτό προστίθεται 50 % χωρίς μεταβολή της μικροσκληρότητας, αν και πριν την κλινική εφαρμογή θα πρέπει να πραγματοποιηθούν περαιτέρω μελέτες όσον αφορά την επίδραση της απελευθέρωσης στοιχείων και της κυτταροτοξικότητας και άλλων μηχανικών ιδιοτήτων.¹⁸⁷ Πάντως η σκληρότητα μπορεί να βελτιωθεί με τη προσθήκη Ti.⁴¹ Η επαναλαμβανόμενη επαναχύτευση των κραμάτων χωρίς προσθήκη νέου κράματος επιδεινώνει τη μικροδομή και το όριο διαρροής, την εκατοστιαία επιμήκυνση ενώ η προσθήκη νέου κράματος σε αναλογία 25 % και 50 % κ.β αυτό μπορεί να επιφέρει βελτίωση τόσο στις μηχανικές ιδιότητες όσο και στη μικροδομή,^{186,188} με την προσθήκη 0 % ή 25 % νέου υλικού το όριο διαρροής και η αντοχή εφελκυσμού μειώνονται,¹²⁹ έως και σε 12 επαναχυτεύσεις παρατηρείται μείωση του μέτρου ελαστικότητας¹⁸⁶ και με περισσότερο από 50 % νέο κράμα υπάρχει μικρή όμως μη στατιστικά σημαντική μεταβολή του συντελεστή ελαστικότητας¹⁸⁸. Ορισμένοι έδειξαν ότι η επαναχύτευση των κραμάτων έως και 20 φορές χωρίς την προσθήκη νέου, μειώνει τη σκληρότητα και την αντοχή σε εφελκυσμό, όμως σε μη στατιστικά σημαντικό βαθμό, (αν και για τη σκληρότητα στην πρώτη επαναχύτευση παρατηρήθηκε αύξηση και στις επόμενες ακολούθησε μείωση), και έτσι επισήμαναν ότι μπορούν να επαναχυτευθούν έως 20 φορές χωρίς υποβάθμιση της κλινικής τους απόδοσης με την προϋπόθεση της ικανοποίησης δοκιμών κυτταροτοξικότητας που είναι και το σημαντικότερο.^{151,190} Άλλοι ερευνητές απέδειξαν ότι η υπάρχει επιδείνωση της σκληρότητας, της αντοχής στον εφελκυσμό και του συντελεστή ελαστικότητας όταν το ποσοστό του επαναχρησιμοποιούμενου κράματος είναι 50 % ή περισσότερο.¹⁹² Σε μια μελέτη διερεύνησης



επαναχυτευμένου (1 φορά) H-MIL κράματος δείχθηκε ότι σε αυτό διέφερε η κατανομή ο αριθμός και η μορφολογία των ιζημάτων, είχε επίσης μεγαλύτερη αντοχή εφελκυσμού και μικροσκληρότητα, δεν βρέθηκαν συγκεκριμένα αποτελέσματα στην αντοχή στη διάβρωση και δεν σημειώθηκε σημαντική αλλαγή στο συντελεστή θερμικής διαστολής.¹⁹³ Συνεπώς, τα αποτελέσματα διαφορετικών μελετών σχετικά με την επίδραση της επαναχύτευσης στη χημική σύνθεση, τη μικροδομή, τη χυτευσιμότητα, την βιοσυμβατότητα, την αντίσταση στη διάβρωση και τις μηχανικές ιδιότητες, είναι αντικρουόμενα. Η πλειοψηφία πάντως καθιστά αποδεκτή την επαναχύτευση κράματος μέχρι 3-4 φορές με ποσοστό νέου υλικού τουλάχιστον κατά 50 %. Το σημαντικό είναι ότι, ακόμη και αν καθίσταται αποδεκτή η επαναχύτευση και η υποβάθμιση δεν είναι στατιστικά σημαντική για ορισμένες ιδιότητες, το τελικό αποτέλεσμα παραμένει αβέβαιο, και για αυτό δεν πρέπει να υιοθετείται σαν μέθοδος, ή τουλάχιστον μέχρι την καθιέρωση ενός κοινού πρωτοκόλλου που πραγματικά «δουλεύει». Εκείνο που συνίσταται και που μπορεί να κάνει ο τεχνολόγος είναι η επαναποστολή της περισσειας κράματος στον κατασκευαστή γεγονός που του αποφέρει επιστροφή κατά 50 % όπως αναφέρθηκε στη βιβλιογραφία^{151,190}. Στην περίπτωση πάντως που επιλεχθεί η πραγματοποίηση της επαναχύτευσης για ασφάλεια συνίσταται από τον συγγραφέα της διπλωματικής η προσθήκη νέου κράματος σε παλαιό σε αναλογία τουλάχιστον 75-80 % και με μέγιστο αριθμό επαναχυτεύσεων τη μια.

Γενικώς, στα CST κράματα Co-Cr θερμικές κατεργασίες από 1300 °C και πάνω για 15 min, μειώνουν την αντοχή και μεταβάλλουν την επιμήκυνση, και για αυτό θα πρέπει να αποφεύγονται.^{4,7} Η αποτατική ανόπτηση στους 850 °C / 30 min απαλλάσσει το χυτό από τάσεις και αυξάνει την αντοχή στον εφελκυσμό και το όριο διαρροής με σύγχρονη ελάττωση της επιμήκυνσης και διατήρηση της σκληρότητας και της ανθεκτικότητας του, η γήρανση στους 850 °C / 5 h για την κατακρήμνιση μιας υπέρκορης φάσης έχει ανάλογα αποτέλεσμα, η διαλυτοποίηση στους 1260 °C / 15 min επιτυγχάνει τη διάλυση και διάχυση των καρβιδίων μέσα στην όλη δομή με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της επιμήκυνσης και την μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό και του ορίου διαρροής,^{4,7} και η γήρανση (850 °C / 5 h) μετά τη διαλυτοποίηση (1260 °C / 15 min) προκαλεί την μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό όμως συνοδεύεται από μεγάλη πτώση της επιμήκυνσης και για αυτό η κατεργασία αυτή δεν προτείνεται σε M.O. που η επιμήκυνση είναι μια βασική ιδιότητα.^{4,7} Η διάλυση των καρβιδίων στην διαλυτοποίηση συμβαίνει στο εύρος των 1210-1230°C και εξαρτάται από τη σύνθεση του κράματος.²⁰⁴ Η ανόπτηση για ανακρυστάλλωση επαναφέρει τους κόκκους στην αρχική καλή τους κατάσταση (χωρίς εσωτερικές τάσεις και ατέλειες στα όρια), κάτι που σημαίνει αντοχή στη διάβρωση και καλές μηχανικές ιδιότητες χωρίς μεταβολή



διαστάσεων.^{4,7} Η θερμική κατεργασία επηρεάζει τη παραμόρφωση και την εφαρμογή.²⁰³ Η θερμική κατεργασία στους 704 °C, 871 °C, 1038 °C και 1204 °C για 15 λεπτά, προκαλεί τη διάλυση των υπαρχόντων καρβιδίων, ενώ αυξάνοντας τη θερμοκρασία η συνολική αντοχή του κράματος μειώνεται και η επιμήκυνση αυξάνεται ελαφρώς. Η καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση επιτυγχάνεται στην κατάσταση ομογενοποίησης στους 1100 °C / 1 h και ψύξη στον αέρα όπου οι δενδρίτες γίνονται λεπτότεροι και τα ιζήματα καρβιδίων είναι λεπτά και καλά διασκορπισμένα στη μήτρα, ενώ ακολουθεί η κατάσταση as-cast και τέλος η κατάσταση ευαισθητοποίησης που εμφανίζει τη χειρότερη αντίσταση στη διάβρωση και στην οποία το εύρος θερμοκρασιών (550-650 °C) που επιτυγχάνεται η χειρότερη αντίσταση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το κράμα ενώ σημειώνεται ότι μπορεί να καθορίσει την καθίζηση των καρβιδίων.⁹¹ Με την ομογενοποίηση στους 1100 °C / 5 h, τα κράματα αποτελούνται από μη ομοιογενές άλφα διάλυμα με δενδριτική διάταξη, επιμήκη, με συσσωματώσεις χονδροειδών και λεπτών προσανατολισμένων ιζημάτων καρβιδίων έναντι των σημειακών που εμφανίζονται στην κατάσταση as-cast.^{204,205} Οι θερμικές επεξεργασίες χωρίς προηγούμενη πλαστική παραμόρφωση δεν μπορούν να αλλάξουν σημαντικά την έκταση του μικροπορώδους, εξαλείφοντας τις δυσμενείς συνέπειές του.⁹ Ορισμένοι ερευνητές ανέφεραν ότι, δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στη δομή των κόκκων μετά την ανόπτηση στους 850 °C για 30 min και τη σκλήρυνση δια γήρανσης στους 850°C για 5 ώρες.⁹ Σε νεότερη μελέτη, έχει αναφερθεί ότι ως αποτέλεσμα της ομογενοποίησης (1150 °C / 2 h) τα κράματα Co-Cr παρουσιάζουν δενδριτική δομή ενώ μια μερική μείωση του μικροδιαφορισμού λαμβάνει χώρα, και μετά από αυτήν και τον υπερκορεσμό (1150 °C / 2 h + 1200 °C / 2 h / H₂O) καθώς και μετά από αυτές και γήρανση (1150 °C / 2 h + 1200 °C / 2 h / H₂O + 850 °C / 1 h / αέρα) οι κόκκοι επεκτείνονται ενώ στην εσωτερική πλευρά των ορίων τους υπάρχουν ιζήματα φάσης καρβιδίου, όμως για τη 2^η κατεργασία επισημαίνεται ότι δεν παρατηρούνται δενδριτικά συστήματα και υπάρχει ομογενοποίηση της μικροδομής (μερικός υπερκορεσμός) ενώ για τη 3^η οι κόκκοι διαφέρουν από την εσωτερική προς την εξωτερική επιφάνεια των κραμάτων και πέραν των ορίων υπάρχουν ιζήματα και εντός των κόκκων.²⁰⁴ Συνεπώς, αν και οι συγγραφείς δεν αναφέρουν ποια μέθοδος είναι πλεονεκτικότερη, πιθανόν πιο πλεονεκτική να είναι η 2^η μέθοδος εξαιτίας της μικροδομής και λόγω του ότι παρουσίασε τη μικρότερη σκληρότητα, και καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση από εκείνη του CST κράματος.²⁰⁴ Επομένως, ζητήματα που σχετίζονται με την ίδια τη φύση των κραμάτων, ήτοι ιζήματα και μεγάλο μέγεθος κόκκων, παρά του ότι η ομογενοποίηση, η διαλυτοποίηση και η γήρανση και ο συνδυασμός τους δίνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα, εντούτοις διεγείρονται προβληματισμοί, καθώς δεν αναφέρεται κάποια έρευνα στο σύνολο των ιδιοτήτων δηλαδή στη



σχέση αντοχής, σκληρότητας, αντίστασης στη διάβρωση και ολκιμότητας αλλά σε μέρος αυτών. Ζητήματα που σχετίζονται με τάσεις και απώλεια εφαρμογής, αν και μπορούν να επιλυθούν με αποτακτική ανόπτηση ή ανακρυστάλλωση, εντούτοις η βιβλιογραφία είναι αρκετά παλαιά και περιορισμένη. Το μικροπορώδες δεν επηρεάζεται από τη θερμική κατεργασία. Σαν συμπέρασμα ισχύει ότι ανάλογα με τη θερμική κατεργασία, τα κράματα Co-Cr διαθέτουν τις απαραίτητες ιδιότητες για τη χρήση τους και για αυτό πιθανόν οι κατασκευαστές κραμάτων δεν υποδεικνύουν κάποια μέθοδο θερμικής κατεργασίας για τα κράματα CST. Προβλήματα δημιουργούνται κατά τη διαδικασία χύτευσης, όταν δεν ακολουθούνται οι οδηγίες των κατασκευαστών και κατά την κατεργασία μετά την χύτευση όπως με παραμόρφωση τμημάτων για εφαρμογή τους ή κατά την υπερθέρμανση. Σκοπός λοιπόν των θερμικών κατεργασιών είναι η βελτίωση ή επαναφορά των «καλών» ιδιοτήτων των κραμάτων. Με την επιλογή της μεθόδου και των επιμέρους παραμέτρων ο οδοντικός τεχνολόγος βάζει την προσωπική σφραγίδα του στο προϊόν που διαθέτει και μπορεί να μεταβάλλει ζητήματα όπως τάσεις, κατανομή και ποσότητα ιζημάτων και το μέγεθος των κόκκων και επηρεάζοντας ανάλογα τις ιδιότητες. Δεδομένου, ωστόσο ότι δεν υπάρχουν συστάσεις των κατασκευαστών καλό είναι να ακολουθείται η μέθοδος με τους παραμέτρους της για το συγκεκριμένο κράμα που έχουν διερευνηθεί, καθώς δεν υπάρχει κάποια κοινή κατεύθυνση που να πιστοποιεί τα ίδια αποτελέσματα για όλα τα κράματα. Στην περίπτωση, πάντως που δεν επιλεγεί η πραγματοποίηση θερμικής κατεργασίας, στα κράματα Co-Cr πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη θέρμανση ή υπερθέρμανση κατά τη διαδικασία συγκόλλησης και κατά τη διαδικασία λείανσης, επειδή προκαλείται μεταβολή της μικρόκοκκης δομής τους, όπως άλλωστε έχει αναφερθεί,^{4,7} και αυτό είναι εύλογο καθώς υφίσταται «κάποιου τύπου θερμική κατεργασία»

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του SLM σε σύγκριση με την CST, είναι η ικανότητα παραγωγής σκελετών που οι μικροδομές τους είναι πιο ομοιογενείς, πιο λεπτόκοκκες και με μειωμένο αριθμό ελαττωμάτων.^{11,31,47,99,106} Στα κράματα Co-Cr από SLM, το μεγαλύτερο μέρος της φάσης fcc διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου λόγω της διαδικασίας ταχείας ψύξης. Κατά συνέπεια, αυξάνεται το όριο στερεού διαλύματος των στοιχείων κράματος, μειώνοντας έτσι τα ιζήματα και τον δενδριτικό διαφορισμό, διατηρώντας παράλληλα τον υπερκορεσμό. Αυτό οδηγεί στο αποτέλεσμα ισχυροποίησης στερεού διαλύματος και στο αποτέλεσμα ισχυροποίησης δεύτερης φάσης. Δηλαδή τα SLM κράματα γενικώς εμφανίζουν υψηλότερα κλάσματα fcc φάσης και όρια στερεού διαλύματος συγκριτικά με τα CST.¹¹⁰ Έτσι, έρευνες έχουν δείξει ότι τα κράματα μπορεί να αποτελούνται μόνο από τη μήτρα-γ (μονοφασική δομή)^{9,105,180} ή μαζί με αυτή και από: ιζήματα (π.χ. φάσης-σίγμα πλούσια σε



Cr και Mo στα όρια των κόκκων¹¹¹),¹¹⁰ ή σε μικρότερο βαθμό φάση hcp-ε,^{52,88,110} ή και από τις δύο σε χαμηλότερη αναλογία¹¹⁰. Ακόμη, τα SLM κράματα παρουσιάζουν όρια τετηγμένης δεξαμενής (MPBs) πέραν των ορίων των κόκκων,¹¹⁵ τα οποία αντιστοιχούν σε ίχνη σάρωσης με λέιζερ ή στις λεγόμενες δεξαμενές τήξης.¹⁰⁶ Επιπρόσθετα, τα κράματα SLM εμφανίζουν μικρότερο μέγεθος κόκκων,^{105,111} από τα CST και αυτό σχετίζεται κυρίως με τον ρυθμό πυρήνωσης (I) και τον ρυθμό υποψύξης-ΔT (undercooling),¹¹⁰ καθώς και με το μικρό αρχικό μέγεθος της σκόνης¹¹. Μικρότερες είναι και, οι δενδριτικές δομές (ενώ στη χύτευση μπορεί να είναι πολύ μεγάλες¹¹) καθώς και η απόσταση πρωτογενών δενδριτών¹¹⁰. Επιπλέον τα ιζήματα (στις μελέτες που έχουν εντοπιστεί) έχουν μικρό μέγεθος σε αντίθεση με τη τεχνική CST όπου το μέγεθος είναι μεγάλο.¹¹⁰ Πάντως, τα κράματα μπορεί να εμφανίζουν κόκκους με έντονο προτιμησιακό προσανατολισμό και έντονη υφή αποτελούμενοι από δενδρίτες,^{105,111} ή τυχαίο προσανατολισμό με ασθενή ή καθόλου υφή, χωρίς συγκεκριμένη μορφολογία και με μερικούς να έχουν πολλαπλά όρια υποκόκκων μικρής γωνίας.^{105,110} Μια εξήγηση για αυτό είναι ότι, σε χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σχηματίζονται μικροί κόκκοι χωρίς προτιμώμενους προσανατολισμούς, ενώ σε υψηλές ενεργειακές πυκνότητες, σχηματίζονται μεγάλοι κόκκοι με ισχυρή υφή κατά μήκος της κατεύθυνσης κίνησης του λέιζερ λόγω μιας μεγάλης θερμικής κλίσης που εμφανίζεται καθώς το λέιζερ κινείται πάνω από το δείγμα.¹⁰⁵ Πλην της ενεργειακής πυκνότητας, ο προσανατολισμός κατασκευής επηρεάζει λόγω της ανισοτροπίας τον προσανατολισμό των κόκκων, των ιζημάτων και των MPBs, όπως και την υφή-μορφολογία.^{19,110,112} Έχει αναφερθεί ότι τα MPBs στις 0° είναι επιμήκη και στις 90° έχουν σχήμα τόξου.¹¹⁵ Οι κόκκοι 0° εμφανίζουν προτιμησιακό προσανατολισμό ενώ αντιθέτως οι κόκκοι των 45° και 90° δεν δείχνουν σημαντικό προτιμησιακό προσανατολισμό και στις 0° εντοπίζονται κυτταρικοί δενδρίτες ενώ στις 90° ή 45° στηλοειδείς¹¹⁵. Πάντως, σημειώνεται ότι, οι δενδριτικές δομές μπορεί να είναι λεπτόκοκκες κυτταρικές ή στηλοειδείς, και η στηλοειδής-κυτταρική ανάπτυξη των κόκκων σχετίζεται και με την κατεύθυνση της ροής θερμότητας.¹¹⁰ Αντίθετα, σε μια μελέτη έχει αναφερθεί ότι λόγω της ταχύτητας ψύξης στην SLM δεν είναι εμφανείς δενδριτικές δομές.¹⁸⁰ Πιθανώς ωστόσο, να υπήρχαν καθώς η διερεύνηση της μικροδομής έγινε σε σχετικά χαμηλή κατεύθυνση. Σε άλλες έχει αναφερθεί ότι τα ιζήματα ευθυγραμμίζονται κατά μήκος, της κατεύθυνσης κατασκευής (και οι κόκκοι είναι περίπου παράλληλοι).^{88,110} Πάντως, όσον αφορά την μορφολογία, σε πολλές μελέτες, έχει αναφερθεί ότι παρατηρούνται, οι λεπτόκοκκες μικροδομές ως «κλίμακες ψαριών» και πολλοί στηλοειδείς κόκκοι που αναπτύσσονται κάθετα προς τα κυκλικά MPBs σχήματος τόξου,^{88,110,111,116} ενώ σε μια αναφέρθηκε ότι διασυνδεδεμένοι επιμήκεις κόκκοι με διαφορετικές κατευθύνσεις παρατηρούνται στις δενδριτικές



δομές και η τρισδιάστατη υφή αυτών των κόκκων είναι παρόμοια με εκείνη των κοινών υφασμάτων (weaved fabrics).¹¹⁰ Σχετικά, με τα κράματα SLS και DMLS, παρά τον περιορισμό μελετών έχει αναφερθεί ότι η fcc φάση εντοπίζεται στην DMLS ενώ στην SLS μαζί με αυτή εντοπίζεται επιπλέον η hcp Co-Mo^{51,52} και αυτό έχει αποδοθεί στο ότι η σκόνη κραμάτων που υποβάλλεται σε επεξεργασία με τη μέθοδο SLS εκτίθεται σε θερμοκρασίες κάτω από τη φάση μετάβασης, ενώ σύμφωνα με άλλους και στο DMLS υπάρχει η φάση ε^{52,208} ή/και διαμεταλλικές ενώσεις¹⁰⁶. Το μέγεθος κόκκων των κραμάτων SLS και DMLS είναι μικρότερο από εκείνο της CST.^{51,106,107} Η CST παρουσιάζει διαφορετικά όρια κόκκων μέσα στην επιφάνεια⁵¹ ενώ κατά άλλους και η DMLS παρουσιάζει όρια με γεωμετρική ποικιλομορφία.¹⁰⁷ Στην DMLS έχει αναφερθεί ότι οι κόκκοι έχουν πολυκατευθυντική κρυστάλλωση και η ανάπτυξη των δενδριτών είναι επιταξιακή, ενώ ευδιάκριτα είναι και εδώ τα MPBs.^{106,107} Στα κράματα SLM υπάρχει υψηλότερη ποσότητα και κατανομή υπολειμματικών τάσεων σε σχέση με τα CST, λόγω αφενός της ταχείας θέρμανσης και ψύξης και αφετέρου της ύπαρξης σημαντικής διαφοράς στη θερμοκρασία μεταξύ των στρωμάτων: εκτυπωμένου και πρόσφατα αποτεθειμένου.¹¹⁰ Αυτές είναι κοντά στο όριο διαρροής του υλικού, και ως εκ τούτου μπορεί να υπάρξουν μεταξύ άλλων παραμορφώσεις, σχηματισμός πόρων και ρωγμές υπονομεύοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες,¹¹⁰ ή πρόωρα κατάγματα λόγω μειωμένης αντοχής στη κόπωση. Ωστόσο, οι τάσεις μπορούν να εξαλειφθούν με μεθόδους όπως την: προθέρμανση της σκόνης, «στρατηγική σάρωσης των νησιών», εκ νέου σάρωση, και κυρίως με τη θερμική κατεργασία.¹¹⁰ Πλην των άνω διαφορές εντοπίζονται και στην πυκνότητα. Στην πλειοψηφία των μελετών έχει αναφερθεί ότι η τεχνική SLM αποδίδει μικρότερο πορώδες από ότι η CST,^{11,52,110,117} αν και σε μια μελέτη αποδείχθηκε το αντίθετο²¹⁴. Τόσο στην DMLS όσο και στην DMLM έχουν εντοπιστεί πορώδη, αν και αναμένεται η κατασκευή πυκνότερης δομής με την DMLM.¹⁵ Έχει αναφερθεί ακόμη ότι το πορώδες είναι κατά αύξουσα σειρά στις τεχνικές CST, SLS (ελαφρώς υψηλότερο) και DMLS,⁵¹ ωστόσο σε άλλες μελέτες υπάρχει διαφωνία για το εάν η DMLS σε σχέση με τη CST αποδίδει υψηλότερη¹⁰⁶ ή χαμηλότερη¹¹⁸ πυκνότητα, αν και έχει αναφερθεί ότι αποδίδει πιο ομοιογενές μέγεθος και κατανομή και σημαντικά μικρότερο μέσο και συνολικό όγκο εσωτερικών πόρων¹¹⁸. Πάντως, το πορώδες στα κράματα SLS και DMLS είναι περισσότερο ισοτροπικό και παρότι το ποσοστό ανοικτού πορώδους είναι το ίδιο για τις 3 τεχνικές η πλειονότητα των πόρων στα κράματα SLS είναι κλειστοί (λιγότερο δυσμενείς).⁵¹ Έτσι, ενώ για τη τεχνική της χύτευσης αναφέρθηκε που μπορεί να οφείλεται η δημιουργία πορώδους στην παραπάνω παράγραφο, για τις ψηφιακές τεχνικές πλήρους τήξης έχει αναφερθεί ότι αποδίδουν πυκνότερες δομές από ότι οι τεχνικές μερικής τήξης επειδή οι τελευταίες προσδίδουν απωθητικές



δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων σε υψηλή αναλογία του υγρού συνδετικού τμήματος,¹¹⁹ και λόγω του φαινομένου δημιουργίας σφαιρών (balling phenomenon)¹¹⁰ το οποίο αναλύεται σε επόμενη ενότητα. Συνεπώς, οι τεχνικές DMLM και SLM αναμένεται υπερτερούν ως προς την πυκνότητα έναντι των SLS και DMLS και με βάση τα παραπάνω η SLS φαίνεται πλεονεκτικότερη έναντι της DMLS, πιθανώς επειδή στην DMLS χρησιμοποιείται ένα μείγμα μεταλλικών σκονών και η σκόνη με τη χαμηλή θερμοκρασία τήξης λιώνει πλήρως ενώ η σκόνη με υψηλή θερμοκρασία τήξης λιώνει μερικώς⁵¹ και έτσι θα μπορούσε να υποθεθεί ότι η διαδικασία αυτή πλησιάζει περισσότερο τη διαδικασία χύτευσης. Πάντως, διαφορές μπορεί να υπάρξουν από τα αναμενόμενα αποτελέσματα μεταξύ των τεχνικών μερικής και πλήρης τήξης, ανάλογα με τις παραμέτρους επεξεργασίας που επηρεάζουν το πορώδες. Ακόμη, με βάση την πυκνότητα, και επειδή οι μελέτες σύγκρισης των ψηφιακών τεχνικών μεταξύ τους (DMLS, SLS, DMLM, SLM) είναι περιορισμένες όπως θα φανεί καλύτερα και από παρακάτω, θα μπορούσε να υποθεθεί ότι οι τεχνικές SLM και DMLM αναμένεται να έχουν καλύτερη απόδοση έναντι των λοιπών στο σύνολο των ιδιοτήτων. Μάλιστα επειδή δεν έχει διερευνηθεί αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των SLM και DMLM, θα μπορούσε ακόμη να υποθεθεί με περισσότερη ασφάλεια ότι η SLM για την οποία υπάρχουν και περισσότερες μελέτες ότι θα αναμένεται να αποτελεί την πλεονεκτικότερη συνολικά μέθοδο. Βέβαια, το τελευταίο αποτελεί απλώς μια υπόθεση καθότι πλέον οι κατασκευαστές μπορεί να έχουν επιτύχει συνδυασμούς σκονών-συσκευών-παραμέτρων που να επιτυγχάνουν αντίθετα από τα αναμενόμενα αποτελέσματα, ή μπορεί πράγματι να υπάρχουν διαφορές αλλά σε μη στατιστικά σημαντικό βαθμό. Συνοψίζοντας, η μικροδομή μεταξύ των τεχνικών PBF πιθανόν να μην παρουσιάζει ουσιαστικές διαφορές με εξαίρεση το πορώδες αφού σαν μεθοδολογία παραμένει η ίδια. Η PBF αναμένεται να έχει υψηλότερα κλάσματα fcc φάσης και όρια στερεού διαλύματος ή και πιθανόν μικρότερη αναλογία ε-φάσης ή και μικρότερο αριθμό ιζημάτων, συγκριτικά με τη CST. Επίσης έχει μικρότερο μέγεθος κόκκων, δενδριτών, απόσταση πρωτογενών δενδριτών και ιζημάτων. Ο προσανατολισμός της μικροδομής μπορεί να είναι προτιμησιακός, η υφή έντονη, η μορφολογία συγκεκριμένη – ή τυχαία και αυτό εξαρτάται μεταξύ άλλων από το προσανατολισμό κατασκευής. Οι κόκκοι αποτελούνται από στηλοειδούς ή κυτταρικούς δενδρίτες ή και υποκόκκους. Συγκριτικά με την CST, το πορώδες είναι μικρότερο και οι τάσεις υψηλότερες.

Η επιφάνεια των σκελετών as-cast μπορεί να αποτελείται από εξωτερικές μεταλλικές προεξοχές, μικρές ατέλειες και ήπιο πορώδες.⁴⁵ Η τραχύτητα που αποδίδει η τεχνική HM είναι μικρότερη από εκείνη της τεχνικής CST και SLM.^{19,112,127} Η τραχύτητα, στην AM+CST είναι μεγαλύτερη από εκείνη στην C-CST,⁵² αλλά μικρότερη και στις 2 τεχνικές



από εκείνη στην SLM^{19,52,112,115,127} Η DMLS αποδίδει μεγαλύτερη τραχύτητα από την H-MIL και I-MIL (μεταλλοκεραμικό).¹²⁹ Η μικρότερη τραχύτητα στην HM έχει αποδοθεί στο ότι η επιφάνεια που δημιουργείται μοιάζει με την επιφάνεια σκληρής κοπής και έτσι εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη τελική φρέζα.¹¹² Η τραχύτητα στην SLM είναι πολυπαραγοντική και οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της κλίμακας, ωστόσο μπορεί να μειωθεί με διάφορους τρόπους που εντάσσονται στην μετα-επεξεργασία και τελική επεξεργασία.⁸⁸ Η διαφορά μεταξύ των τεχνικών CST μπορεί να αποδοθεί, για την AM+CST στο γεγονός ότι η AM επηρεάζεται από παρόμοιους παράγοντες όπως και η PBF (π.χ. φαινόμενο κλίμακας, μετα-επεξεργασία κλπ.) που αναφέρθηκαν στο γενικό μέρος (σελίδα 67-68) και επομένως η μεγαλύτερη τραχύτητα αποδίδεται στην φύση της AM. Στην τεχνική I-MIL η τραχύτητα εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος των κόκκων και το βαθμό φθοράς της τελευταίας χρησιμοποιούμενης για την κοπή φρέζας και οπότε η μικρότερη τραχύτητα που αναφέρθηκε δεν είναι απόλυτη. Ακόμη, έχει αναφερθεί ότι η τεχνική H-MIL αποδίδει τα καλύτερα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά και τη μικρότερη τραχύτητα έναντι των SLM και SLS, ενώ η μικρότερη τραχύτητα του SLS πιθανόν οφείλεται στην πιο έντονη παρουσία πόρων στο SLM (βέβαια αυτή η διαφορά όπως αναλύθηκε προηγουμένως δεν είναι απόλυτη).⁸⁶ Όσον αφορά τη σύνθεση της επιφάνειας, στη μέθοδο CST, η συνολική αναλογία των στοιχείων στην επιφάνεια του κράματος και το γενικό περιεχόμενο του υλικού δεν είναι παρόμοια, και η κατανομή των στοιχείων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του υλικού μπορεί επίσης να είναι διαφορετική.⁹² Ωστόσο στα κράματα PBF τα ποσοστά των στοιχείων στην επιφάνεια των δειγμάτων ότι είναι σχεδόν τα ίδια με τις αναλογίες στοιχείων στο περιεχόμενο του κράματος.⁹² Συνεπώς, τα δομικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά καθώς και η σύνθεση της επιφάνειας σε διαφορετικά σημεία και ως προς το εσωτερικό του υλικού διαφέρουν ανάλογα με τη τεχνική, ενώ πόροι μπορεί να ανιχνευθούν στη PBF και CST, με την πιο πλεονεκτική πιθανώς να θεωρείται η τεχνική H-MIL ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά, καθώς πρόκειται για ένα προκατασκευασμένο μπλοκ σε μορφή σκελετού και η PBF που παρουσιάζει μεγάλη ομοιογένεια.

Τα CST κράματα χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή χυτευσιμότητα.⁴⁵ Γενικώς, οι σκελετοί M.O. από κράματα Co-Cr της τεχνικής SLM έναντι της CST λόγω της μεγαλύτερης ομοιογένειας και πιο λεπτόκοκκης μικροδομής και της ικανότητας τους να παράγουν σχεδόν 100 % πυκνότητα, έχουν δείξει ανώτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τη CST,^{11,25,112,96,133} συμπεριλαμβανομένων των υψηλότερων ιδιοτήτων εφελκυσμού,¹¹ της υψηλότερης μέγιστης αντοχής στον εφελκυσμό^{59,111} και επιμήκυνσης,¹¹¹ του υψηλότερου ορίου διαρροής 0,2 %¹¹¹ αν και κατά άλλους είναι παρόμοιο όπως παρόμοιο είναι και το όριο



αναλογίας (αν και ελαφρώς καλύτερα στο SLM).¹⁰⁵ Το όριο διαρροής 0,2 % (λόγω του μικρού μεγέθους κόκκων στη διαδικασία SLM⁹⁶) και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό των κραμάτων Co-Cr που παρασκευάζονται με SLM είναι ανώτερα από εκείνα της CST, ακόμη και για τα κράματα Co-Cr που αναπτύχθηκαν για μεταλλοκεραμικές αποκαταστάσεις⁹⁷ σε βαθμό ώστε να παρουσιάζουν επαρκή μηχανική αντοχή για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. με άγκιστρα.^{19,35} Το μέτρο ελαστικότητας, είναι μικρότερο για την τεχνική HM από εκείνο της CST,¹¹² και μικρότερο για την τεχνική SLS (επειδή η πλειονότητα των πόρων στα κράματα SLS είναι κλειστοί) έναντι των τεχνικών DMLS και CST (οι δύο τελευταίες τεχνικές εμφανίζουν παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας)⁵¹ όπως και για την τεχνική SLM σε σχέση με την CST²⁰⁷. Η δυσθραυστότητα θραύσης και αντοχή σε κάμψη είναι σημαντικά μεγαλύτερες στην SLS έναντι των τεχνικών DMLS και CST,⁵¹ το όριο διαρροής σε κάμψη είναι σημαντικά μεγαλύτερο στις τεχνικές DMLS και SLS από ότι στη CST,⁵¹ και η δυσθραυστότητα και αντοχή στη κάμψη είναι βελτιωμένες στην τεχνική SLM έναντι της CST¹¹³, αν και για την αντοχή στη κάμψη στην SLM έχει αναφερθεί γενικώς στη βιβλιογραφία ωστόσο δεν εντοπίστηκε μελέτη που να αφορά τα κράματα Co-Cr και να το επιβεβαιώνει. Η επεξεργασία του κράματος Co-Cr με τη μέθοδο DMLS συνεπάγεται πλήρη τήξη μέρους της μεταλλικής σκόνης που την καθιστά πιο κοντά στη μέθοδο χύτευσης από τη μέθοδο SLS και αυτό μπορεί να είναι ο λόγος της ομοιότητας των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των κραμάτων DMLS και CST⁵¹. Η αντοχή στην κόπωση είναι μεγαλύτερη στη μέθοδο SLM από ότι στη CST,^{51,118,127,135} ενώ σύμφωνα με άλλους είναι μεγαλύτερη μόνο όταν ο προσανατολισμός κατασκευής είναι στις 90°, ¹¹⁵ αν και μετά τη θερμική κατεργασία τροποποιείται η αντίσταση στη κόπωση και μπορεί είτε να βελτιωθεί είτε να μειωθεί όπως αναλύεται ακολούθως. Η αντίσταση στη κόπωση είναι μεγαλύτερη στις μεθόδους DMLS και SLS από ότι στη CST.^{51,118} Σε μια παλαιά μελέτη, έχει αναφερθεί ότι οι CST σκελετοί έχουν μέσο ποσοστό επιβίωσης 5,5 χρόνια.⁵¹ Από την άλλη, άλλες μελέτες έχουν αναφέρει ότι τα κράματα CST για 2.000.000²²⁸ και για 1.000.000⁷⁶ κύκλους δεν θραύονται.^{76,228} Σε νεότερη αναφέρθηκε ότι η διάρκεια ζωής σε κόπωση των κραμάτων ήταν 205.418 και 112.770 για τις τεχνικές SLM-90° και CST αντίστοιχα.¹¹⁵ Ωστόσο, η αντίσταση στη κόπωση μπορεί να διερευνηθεί και μέσω της μόνιμης παραμόρφωσης, που εξετάζεται σε επόμενη παράγραφο που αφορά τη μεταβολή της συγκρατητικής δύναμης. Παρατηρώντας, τις μελέτες που αφορούν τη μεταβολή της δύναμης συγκράτησης, παρατηρείται ότι αυτές πραγματοποιούνται κατά κανόνα μέχρι 10.000-15.000 κύκλους, όπου οι 15.000 κύκλοι αντιστοιχούν σε προσομοίωση 10 χρόνων, και δεν εντοπίζουν θραύση. Συνεπώς, συγκρίνοντας τους κύκλους θραύσης και παραμόρφωσης, και δεδομένου ότι ένας ασθενής φορά μια Μ.Ο. για 5-10 χρόνια, τα κράματα δεν



κινδυνεύουν τόσο από θραύση από κόπωση αλλά από παραμόρφωση και αυτός είναι και πιθανόν ο λόγος που οι μελέτες διερεύνησης της θραύσης από κόπωση είναι περιορισμένες. Επιπλέον, από αυτές τις μελέτες όπως αναλύεται και ακολούθως, τα ψηφιακά κράματα παρουσιάζουν μικρότερη μεταβολή της δύναμης συγκράτησης σε σχέση με τα χυτά. Ωστόσο, ένα από τα ζητήματα που αντιμετωπίζουν τα PBF κράματα, είναι η ανισοτροπία στην αντοχή στη κόπωση όπως αναλύεται ακολούθως, η οποία ωστόσο με βάση τελευταίες μελέτες φαίνεται να διευθετείται με διάφορους τρόπους κυρίως μέσω της επιλογής του κατάλληλου προσανατολισμού κατασκευής και της κατάλληλης θερμικής κατεργασίας. Συνεπώς, παρόλο που δεν εντοπίστηκαν αρκετές μελέτες που να διερευνούν την μακροχρόνια επιβίωση και τα ποσοστά θραύσης από κόπωση των ψηφιακών κραμάτων μακροχρόνια, αναμένεται σε μακροχρόνια βάση να έχουν καλύτερη αντίσταση στη κόπωση και μεγαλύτερο μέσο ποσοστό επιβίωσης, ιδίως αν επιλυθεί και το ζήτημα της ανισοτροπίας που προς το παρόν συνεχίζει να δημιουργεί ερωτηματικά. Η μεγαλύτερη αντίσταση στη κόπωση των κραμάτων SLM αν και πολυπαραγοντική πιθανόν οφείλεται κυρίως στα υψηλότερα κλάσματα fcc φάσης, στην εκλέπτυνση των κόκκων (άρα περισσότερα όρια κόκκων), στην μικρότερη απόσταση πρωτογενών δενδριτών, και στις λιγότερες ατέλειες συγκριτικά με τη μέθοδο CST¹¹⁰. Η υψηλή αντίσταση στην κόπωση των κραμάτων SLS και DMLS έχει αποδοθεί στην υψηλή αντοχή του ορίου διαρροής που επιτρέπει υψηλότερη αντοχή σε πλαστική παραμόρφωση, δηλαδή στην μεγαλύτερη ευκαμψία σε σύγκριση με τα κράματα CST⁵¹. Η υψηλή αντοχή σε κάμψη και αντοχή στην κόπωση των 2 αυτών κραμάτων μπορεί να αποδοθεί στην κρυσταλλικότητά τους και στην ομοιογενή μικροδομή τους⁵¹. Πλην των άνω, η σκληρότητα μπορεί να διαφέρει ελαφρώς μεταξύ των διαφορετικών CST κραμάτων, που μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως το πορώδες, η ύπαρξη W ή/και Mo,⁴⁵ και Ni¹³⁶ ενώ επίσης μπορεί να διαφοροποιείται και στο ίδιο κράμα ανάλογα με την περιοχή του κάθε τμήματος¹⁰⁷. Η τεχνική SLM δίνει μεγαλύτερη σκληρότητα από εκείνη του CST κράματος. Επομένως, τα κράματα SLM Co-Cr λόγω των υψηλότερων κλασμάτων fcc φάσης και ορίων στερεού διαλύματος εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή, σκληρότητα και ολκιμότητα από τα CST κράματα Co-Cr, και λόγω της εκλέπτυνσης των κόκκων βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες, η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα.¹¹⁰ Τα SLS και DMLS είναι σημαντικά σκληρότερα από το κράμα CST, ενώ και τα 3 είναι σκληρότερα από την αδαμαντίνη.^{51,107} Στην τεχνική DMLS τα ε-ελάσματα που αναπτύσσονται στα {111} γ επίπεδα περιορίζουν την ολίσθηση εκτοπίσεων στη φάση γ (fcc) αυξάνοντας τη σκληρότητα συγκριτικά με τη μέθοδο C-CST.⁵² Συνεπώς, οι τεχνικές SLM/DMLS/SLS παρουσιάζουν τις περισσότερες ευνοϊκές ιδιότητες, ενώ η μεγαλύτερη σκληρότητα και το χαμηλότερο ή παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας μπορεί να



αποτελέσουν ταυτόχρονα μειονέκτημα και πλεονέκτημα όπως αναλύεται για τις δύο αυτές ιδιότητες στο γενικό μέρος, δηλαδή για παράδειγμα οι τεχνικές HM και SLS που φαίνεται να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ευκαμψία πιθανώς καθίστανται καταλληλότερες για την κατασκευή αγκίστρων, ενώ η DMLS και η CST φαίνεται να είναι καταλληλότερες για τμήματα που απαιτούν ακαμψία. Πάντως παρατηρώντας τους πίνακες μηχανικών ιδιοτήτων (Πίνακας 13-3, Πίνακας 13-4, Πίνακας 13-5) βάσει των κατασκευαστών μετά την θερμική κατεργασία, συμπεραίνεται ότι τα άνω αποτελέσματα για τις 2 αυτές ιδιότητες και κυρίως για το μέτρο ελαστικότητας, δεν είναι απόλυτα και μπορεί π.χ. το μέτρο ελαστικότητας να είναι μεγαλύτερο στα ψηφιακά κράματα. Ακόμη, η σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας²⁰⁷ μετά τη θερμική κατεργασία για την SLM έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά όπως φαίνεται και παρακάτω. Από την άλλη οι πληροφορίες αυτές έρχονται σε αντίφαση με την άποψη που διατυπώθηκε στη βιβλιογραφία στο γενικό μέρος ότι δηλαδή το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τους ατομικούς δεσμούς και από τον αριθμό των δεσμών στην μονάδα του όγκου και είναι ανεξάρτητο από οποιαδήποτε θερμική και μηχανική κατεργασία και εξαρτάται μόνο από τη σύνθεση του κράματος³⁷. Συνεπώς, η πραγματικότητα ενδεχομένως υπάρχει κάπου ενδιάμεσα ότι δηλαδή, κατά κύριο λόγο η επιλογή του κράματος καθορίζει το μέτρο ελαστικότητας ενώ μεταβολές αποδुकνείται ότι μπορεί να υπάρξουν ανάλογα με την αρχική και μετα – επεξεργασία του. Έτσι τελικώς το μόνο «μειονέκτημα», που ενδεχομένως παραμένει, είναι η υψηλότερη από την αδαμαντίνη σκληρότητα των κραμάτων, και αυτό ωστόσο μπορεί να αντισταθμιστεί⁵¹ όπως με την επιλογή κράματος με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Βέβαια αυτό εξαρτάται και από τον τύπο του ανταγωνιστή, δεδομένου ότι μπορεί να μην είναι αδαμαντίνη.

Η βιοσυμβατότητα αποτελεί την πιο σημαντική απαίτηση μεταξύ όλων των ιδιοτήτων των κραμάτων Co-Cr.^{37,137} Παλαιότερες κλινικές (in vivo) μελέτες για τα CST κράματα, αναφέρουν ότι ο επιπολασμός πλάκας και ουλίτιδας μπορεί να είναι υψηλός ή χαμηλός μεταξύ των ασθενών, αν και έχει εντοπιστεί ο ίδιος υψηλός βαθμός ουλίτιδας μεταξύ ασθενών, φερόντων και μη, M.O. και έτσι οι τακτικοί περιοδοντικοί έλεγχοι είναι απαραίτητοι για την ελαχιστοποίηση της ουλίτιδας.⁹ Από την άλλη, σε πρόσφατες, μη κλινικές μελέτες, ως σημάδι της υψηλής βιοσυμβατότητας των CST κραμάτων, έχει αναφερθεί ότι η μικροβιακή πλάκα και η προσκόλληση πρωτεϊνών των σιελογόνων αδένων είναι παρόμοια με τον υδροξυαπατίτη σε σύγκριση με τα κράματα Co-Cr.¹³⁹ Ακόμη, έχει αποδειχθεί ότι τα CST κράματα Co-Cr δεν παρουσιάζουν κυτταροτοξική επίδραση^{87,138} (χαμηλή απελευθέρωση ιόντων κραμάτων,⁸⁷ εξαιρετική κυτταρική πρόσφυση και πολλαπλασιασμός,^{87,138} και ογκώδη μορφολογία⁸⁷ αν και μπορούν να επηρεάσουν τη βιωσιμότητα των κυττάρων¹³⁸).



Επιπρόσθετα, τα κράματα Co-Cr που παράγονται από SLM έχουν καλύτερη ή συγκρίσιμη βιοσυμβατότητα σε σχέση με τα CST.^{11,99,133,141} Ο κυτταρικός πολλαπλασιασμός στο DMLS είναι παρόμοιος (ελαφρώς καλύτερος),¹⁴¹ στο SLM χαμηλότερος (βιωσιμότητα πολύ υψηλότερη από το 50 % και για τα δύο κράματα)¹³³ και κατά νεότερες απόψεις υψηλότερος από εκείνον της CST, χωρίς μόνιμη βλάβη στη λειτουργία^{133,141} ή τη μορφολογία⁹⁹ των κυττάρων. Τα SLM κράματα Co-Cr είναι μη κυτταροτοξικά, μη ερεθιστικά χωρίς ενδείξεις αιμορραγίας, πήξης ή αγγειακής λύσης (με ορισμένα να είναι ελαφρώς ερεθιστικά), και θεωρούνται ασφαλείς τόσο για τους στοματικούς ιστούς όσο και για το σώμα στο σύνολό του.¹¹ Ακόμη, τα κράματα Co-Cr SLS και DMLS είναι βιοσυμβατά και παρουσιάζουν παρόμοια βιοσυμβατότητα σε σύγκριση με τα CST κράματα Co-Cr.⁵¹ Πάντως, η βιοσυμβατότητα μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με τις παραμέτρους επεξεργασίας, την τελική επεξεργασία, και την επιφανειακή τραχύτητα.⁸⁶ Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι παρόλο που οι μελέτες των κραμάτων Co-Cr αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς Μ.Ο. αναφέρουν ότι δεν παρουσιάζουν κυτταροτοξικότητα,⁸⁷ και τα κράματα Co-Cr είναι βιοσυμβατά, υπάρχουν μελέτες που υπογραμμίζουν την κυτταροτοξικότητα των ιόντων Co και Cr,^{51,87,99}. Αυτό συμβαίνει καθώς, η βιοσυμβατότητα μπορεί να εξεταστεί όχι μόνο με κλινικές, επιδημιολογικές και *in vitro* μελέτες, αλλά και από μελέτες αντοχής στη διάβρωση οι οποίες όπως αναλύεται και σε επόμενη παράγραφο έχουν δείξει χαμηλές απελευθερώσεις ιόντων.^{5,37,137} Συνεπώς, αν και σε παλαιότερες μελέτες αναφέρθηκαν ότι μπορεί να υπάρξουν προβλήματα ουλίτιδας, τα οποία ωστόσο μπορεί να αποφευχθούν, πλέον το σύνολο των μελετών πλάκας, κυτταροτοξικότητας [κυτταρική πρόσφυση, πολλαπλασιασμός ή/και νέκρωση (βιωσιμότητα), μορφολογία-σχήμα, και λειτουργία-μέγεθος κυττάρων], ερεθιστικότητας, και αντοχής στη διάβρωση καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η βιοσυμβατότητα των κραμάτων, ψηφιακών και μη, είναι πολύ καλή.

Σε γενικές γραμμές η αντίσταση στη διάβρωση και στην οξειδωση των κραμάτων Co-Cr, παρά την ανομοιογένεια που μπορεί να παρουσιάζουν, είναι εξαιρετική, και αυτό το οφείλουν στο φαινόμενο της παθητικοποίησης, ήτοι στον αυθόρμητο σχηματισμό ενός παθητικού στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια τους. Ακόμη, η βιοσυμβατότητα των κραμάτων είναι συνέπεια της παρουσίας της επιφανειακής στιβάδας οξειδίου.^{37,57,87,125,135,144} Ουσιαστικά, υπό φυσιολογικές συνθήκες τα ιόντα που απελευθερώνονται από τα κράματα αλληλεπιδρούν με τα ιόντα από το σάλιο για να σχηματίσουν αυτό το στρώμα παθητικών οξειδίων. Το στρώμα αυτό αποτελείται κυρίως από Cr₂O₃ (περίπου 90 %), με δευτερεύοντα συστατικά το Mo και το Ni (εφόσον περιέχεται στο κράμα, αν και έχει παρατηρηθεί ότι το κράμα Co-Cr-Mo είναι πιο σταθερό και ανθεκτικό στη διάβρωση σε σύγκριση με το κράμα



Co-Cr-Mo-Ni για οποιαδήποτε τιμή pH λόγω της αυξημένης αντίστασης του στρώματος οξειδίου),¹³⁶ και υπό φυσιολογικές συνθήκες το πάχος του είναι 1-4 nm και τείνει να αυξάνεται με το χρόνο αυξάνοντας την παθητικότητα, όμως υπό συνθήκες που μεταβάλλουν το pH του σάλιου το πάχος μπορεί να τροποποιηθεί.¹³⁷ Έτσι, σε επιθετικό στοματικό περιβάλλον (π.χ. pH 3), τα ιόντα του σάλιου θα μπορούσαν να αντιδράσουν με τα επιφανειακά στοιχεία αλλάζοντας ή προκαλώντας ελαττώματα στα στρώματα παθητικών οξειδίων των κράματων, οδηγώντας σε απελευθέρωση ιόντων και διάβρωση.^{5,37,137} Σημειώνεται συχνά θεωρείται ότι υπάρχει μια γραμμική συσχέτιση της ποσότητας απελευθερούμενων ιόντων και του βαθμού διάβρωσης ενός υλικού, ωστόσο παρόλο που κάποια υλικά υφίστανται περισσότερη διάβρωση, λιγότερα ιόντα εκλύονται, και αυτό οφείλεται στα προϊόντα διάβρωσης που προσεγγίζουν την μεταλλική επιφάνεια και σχηματίζουν ένα αδρανές στρώμα.¹⁴⁵ Για τα CST κράματα Co-Cr, όσον αφορά τις δομικές μεταβολές μεταξύ των φάσεων, τα κράματα είναι ευαίσθητα σε τοπική διάβρωση (μικροδιάβρωση),¹⁴⁴ ενώ σύμφωνα με άλλους σε γενικευμένου τύπου και προτιμησιακή σε φάσεις διάβρωση με οξείδωση σε ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού και τον σχηματισμό ενός επιφανειακού στρώματος διάβρωσης στη φάση τύπου μήτρας.⁹⁰ Επιπρόσθετα, στην δεύτερη περίπτωση, παρατηρούνται και οι τάσεις μετανάστευσης στοιχείων μεταξύ των ορίων και του κέντρου των κόκκων (δηλαδή υπάρχει διαφορετική κατανομή).⁹⁰ Παρά λοιπόν του ότι μπορεί να εμφανιστεί διάβρωση, έχει αναφερθεί ότι οι ποσότητες των απελευθερωμένων στοιχείων Co, Cr και Mo είναι πολύ κάτω από τα επιτρεπόμενα επίπεδα⁸⁷ του ISO 22674,^{87,90} έως και κατά 100 φορές με το υψηλότερο ποσοστό απελευθέρωσης να υπάρχει για το Co^{51,87,90,133} και ελάχιστο για το Cr και το Mo,⁸⁷ ενώ κατά άλλους δεν υπάρχει απελευθέρωση του Cr^{87,90} και υπάρχει μεγαλύτερη απελευθέρωση του Mo (πλην του Co) και αύξηση στο κράμα του ποσοστού μάζας άλλων στοιχείων.⁹⁰ Δηλαδή, οι συγκεντρώσεις των απελευθερωμένων μεταλλικών ιόντων δεν αντανakλούν το περιεχόμενο βάρους στο κράμα.⁸⁷ Σχετικά με επιλογή του σωστού καθαριστικού του μεταλλικού σκελετού της χυτής M.O. έχει αποδειχθεί ότι διαλύματα καθαριστικών που περιέχουν π.χ. υποχλωριώδη μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση, χρώση και ακόμη και απώλεια φυσικών ιδιοτήτων.¹²⁴ Η χρήση δισκίων υποχλωριώδους νατρίου 0,05 %^{124,146} και κιτρικού οξέος¹⁴⁶ προκαλούν επιβλαβείς επιπτώσεις στην επιφάνεια του σκελετού όπως αμαυρώσεις, εστιασμένη διάβρωση, αν και αυτά τα διαλύματα δεν προκαλούν σημαντική αλλαγή τραχύτητας στα κράματα,^{124,146} ενώ για το υποχλωριώδες έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις αποσύνδεσης επιφανειακών πλακών οξείδωσης,¹²⁴ και για το λόγο αυτό ενδέχεται να μην ενδείκνυνται για το καθαρισμό της M.O.¹⁴⁶ Τα κράματα SLS παρουσιάζουν συνολικά καλύτερη ηλεκτροχημική συμπεριφορά από τα SLM (σχηματισμός λεπτότερης παθητικής



στιβάδας).¹²³ Ακόμη, τα κράματα SLM έχουν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση και σημαντικά χαμηλότερες εκλύσεις ιόντων σε σχέση με τα CST,^{11,99,106,130} αν και η μετρούμενη ποσότητα των απελευθερωμένων ιόντων δείχνει ότι και οι δύο τεχνικές είναι ασφαλείς για χρήση στη στοματική κοιλότητα δεδομένου ότι οι εκλύσεις ιόντων που εμφανίζουν είναι κάτω από το ανώτερο όριο των 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ εντός $7\pm 0,1$ ημερών που ορίζει το ISO 10271,^{11,19,99,106,130,133,145,147} αν και σε μια μελέτη αναφέρθηκε ότι σχεδόν δεν υπάρχει διαφορά μετά τις δύο εβδομάδες μεταξύ των δύο μεθόδων¹³³. Τα στοιχεία που απελευθερώνονται στις τεχνικές SLM, SLS και DMLS είναι τα Co, Cr, και Mo με κύριο ιόν απελευθέρωσης το Co.^{51,133} Σε αντίθεση με την άνω μελέτη που προαναφέρθηκε για τα CST κράματα⁸⁷, εδώ το αίτιο της μεγαλύτερης απελευθέρωσης του Co αποδόθηκε στο γεγονός ότι αποτελεί το κύριο στοιχείο στη σύνθεση των κραμάτων.⁵¹ Οι διαφορές στην αντίσταση στη διάβρωση των μεθόδων PBF έναντι των CST αποδίδεται στην υψηλότερη πυκνότητα, στη μεγαλύτερη ομοιογένεια, στην πιο λεπτόκοκκη μικροδομή, στο γεγονός ότι αποτελεί πιο ελεγχόμενη διαδικασία, και στην προσθήκη βολφραμίου στις σκόρες το οποίο είναι γνωστό ότι βελτιώνει τις ιδιότητες διάβρωσης των κραμάτων Co-Cr και μειώνει τις διαμεταλλικές περιοχές με έλλειψη χρωμίου.¹⁰⁶ Πάντως, η διαδικασία διάβρωσης είναι πολύπλοκη και η αντίσταση και η απελευθέρωση ιόντων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες,¹⁴⁵ πέρα από τη μέθοδο κατασκευής, και εκεί αποδίδονται τυχόν διαφορές μεταξύ των δειγμάτων που κατασκευάζονται με την ίδια μέθοδο. Μερικοί από αυτούς είναι ο τύπος και η χημική σύνθεση (Cr, W, Mo, Nb, Fe) του κράματος,^{87,92,143–146,150,151} η στοιχειακή κατανομή στο υλικό,⁹² τα χαρακτηριστικά της επιφανείας,^{135,151,140} η μικρο και μακρο – δομή,^{92,135,140,151} οι παράμετροι επεξεργασίας^{135,151} και τελικής επεξεργασίας κράματος,⁹⁸ ο συνδυασμός υλικών,¹³⁰ το μέσο απελευθέρωσης^{11,100,106,140} και η συγκλεισιακή φόρτιση¹⁴³. Συνεπώς, τα κράματα έχουν καλή αντίσταση στη διάβρωση χάρη στην παθητικοποίηση. Η καλύτερη αντίσταση παρουσιάζεται στις τεχνικές SLS, DMLS, και SLM έναντι της CST. Αν και η τεχνική SLS αναφέρθηκε ότι παρουσιάζει καλύτερη αντίσταση στη διάβρωση έναντι της SLM απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Το κύριο στοιχείο που απελευθερώνονται είναι το Co. Αν και οι συγκεντρώσεις των απελευθερούμενων στοιχείων έχουν αναφερθεί ότι είναι χαμηλές, καθώς όλες οι μελέτες διερευνούν την απελευθέρωση για ορισμένες μόνο ημέρες, εγείρονται προβληματισμοί σχετικά με την ποσότητα που απελευθερώνεται και καταπίνεται από έναν ασθενή που φορά ένα σκελετό Μ.Ο. μακροχρόνια, δηλαδή για 5-10 χρόνια. Από αυτή την άποψη, τα αποτελέσματα της χαμηλότερης έκλυσης ιόντων από τα ψηφιακά κράματα ακόμη και στη περίπτωση που η διαφορά τους με τα CST είναι μη στατιστικά σημαντική, μακροχρόνια μπορεί η διαφορά να είναι σημαντική και επομένως, ενδεχομένως να είναι πλεονεκτικότερα.



Η SLM αποδίδει σκελετούς με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις τεχνικές CST, και η SLS μεγαλύτερη ακρίβεια από την H-MIL η οποία με τη σειρά της δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια από την AM+CST. Οι τεχνικές SLS και DMLS είναι κατά 8 φορές (και οι 2 τεχνικές) μεγαλύτερης ακρίβειας από την CST. Ακόμη, η πιστότητα, στην SLM εκτιμάται ανώτερη από εκείνη της CST,¹⁹ και εκείνη στην SLS και DMLS εκτιμάται κατά 8 και 3,5 φορές μεγαλύτερη από τα κράματα που κατασκευάζονται με CST. Δηλαδή, τις μικρότερες τιμές απόκλισης παρουσιάζει η SLS και η SLM γεγονός που υποδεικνύει ότι από την άποψη της ακρίβειας και της αναπαραγωγιμότητας αυτές οι δύο είναι εξαιρετικές για την κατασκευή αγκίστρων.^{30,34} Κατά άλλους υποστηρίζεται, ότι η ακρίβεια στην προσθετική μέθοδο εκτιμάται θετική αλλά εξακολουθεί να είναι χαμηλότερη από αυτήν της αφαιρετικής κατασκευής.^{47,118} Για την μέθοδο HM υποστηρίζεται ότι μπορεί να κατασκευαστεί σκελετός με μεγαλύτερη ακρίβεια παρά με τη χρήση μόνο της SLM ή της MIL.¹²⁷ Η ακρίβεια διαστάσεων στην AM+CST θεωρείται ανώτερη από ότι για την C-CST.⁵² Συνεπώς, την μεγαλύτερη ακρίβεια φαίνεται να αποδίδει η μέθοδος HM, ενώ ακολουθούν οι προσθετικές και αφαιρετικές μέθοδοι που υπάρχει διαφωνία για το ποια πλεονεκτεί, με τελευταία τη CST. Ωστόσο, οι μελέτες που ανέφεραν μεγαλύτερη ακρίβεια για την H-MIL δεν ήταν για κλασικούς σκελετούς M.O. αλλά αφορούσαν γενικώς τις προσθετικές αποκαταστάσεις, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι βέβαιη η ανωτερότητα κάποιας αφαιρετικής μεθόδου. Πάντως, η διαφορά στην πιστότητα των προσθετικών μεθόδων έναντι της χύτευσης πιθανώς οφείλεται στο μειωμένο αριθμό συσσωρευμένων σφαλμάτων τα οποία εμφανίζονται στα διάφορα στάδια κατά τη διαδικασία χύτευσης, ενώ η διαφορά στην ακρίβεια μεταξύ των διαφόρων μεθόδων θα μπορούσε πιθανότατα να σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος.⁵¹ Παρά την υψηλότερη ακρίβεια των τεχνικών SLM και SLS, η συνολική εφαρμογή των σκελετών και των αγκίστρων κράματος Co-Cr είναι χειρότερη για τη μέθοδο SLM στη πλειοψηφία των μελετών σε σχέση με τη CST,^{112,127,153,154} παρόμοια (αν και ελαφρώς καλύτερη στο SLM) σε μία μελέτη του 2019,¹⁶⁸ και συγκρίσιμη και καλύτερη σε μια μελέτη η οποία όμως αφορούσε κράμα Ti-6Al-4V.¹⁹ Σημειώνεται ότι η ακρίβεια εφαρμογής διαφέρει σε κάθε μέθοδο κατασκευής ανάλογα με το τμήμα σκελετού της M.O. που εξετάζεται και υπάρχουν κενά σε διαφορετικές κατευθύνσεις σε σχέση με τα δεδομένα σχεδίασης.^{30,34} Παρόλο που το SLM παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη συνολική εφαρμογή σε σχέση με τη CST, ωστόσο παρατηρείται μη σημαντική διαφορά στην εφαρμογή μεταξύ της μεθόδου SLM και της μεθόδου CST για τους εφαιτήρες και τους μείζονες συνδετήρες Co-Cr ($P > 0,05$). Επιπλέον στη μέθοδο HM έναντι της C-CST η εφαρμογή για τους βραχίονες του αγκίστρου είναι σημαντικά χαμηλότερη ($P < 0,05$) αλλά αυτή του εφαιτήρα δεν είναι



στατιστικά σημαντική ($P > 0,05$).¹⁹ Επιπρόσθετα, οι σκελετοί από C-CST δεν παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά ως προς την ακρίβεια εφαρμογής από εκείνους που κατασκευάζονται με ενδοστοματική σάρωση – AM+CST, ενώ οι σκελετοί και των δύο αυτών μεθόδων παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά καλύτερη εφαρμογή (μικρότερα κενά) από αυτούς που κατασκευάζονται με τη χρήση εργαστηριακού σαρωτή εκμαγείου – AM+CST. Δηλαδή, η πεποίθηση ότι η AM+CST αναμένεται να προσδίδει ίση ή καλύτερη εφαρμογή⁵² από τη μέθοδο C-CST, λόγω της μικρότερης ανθρώπινης παρέμβασης, της αυτοματοποίησης ορισμένων σταδίων κατασκευής, της αποφυγής των περιορισμών του κηρού, και της ανώτερης ακρίβειας της ψηφιακής αποτύπωσης στην μέθοδο AM+CST,^{28,118} προς το παρόν δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί, ωστόσο ενδεχομένως η πεποίθηση αυτή με περαιτέρω μελέτες και ιδίως με την βελτίωση της τεχνολογίας και των παραμέτρων AM+CST να επιβεβαιωθεί στο εγγύς μέλλον. Παρά το γεγονός ότι από την βιβλιογραφία δεν βρέθηκε μελέτη που να έχει κατασκευάσει ολόκληρο σκελετό με άγκιστρα από Co-Cr με MIL, ωστόσο από μια μελέτη φαίνεται ότι η καλύτερη εφαρμογή επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιηθεί H-MIL ενώ ακολουθεί κατά φθίνουσα σειρά η I-MIL με συγκρίσιμα αποτελέσματα με την C-CST, η AM+CST (ελαφρώς χειρότερη σε σχέση με τη C-CST) και τελευταία η SLM (η χειρότερη) και μάλιστα οι 2 τελευταίες θεωρήθηκαν ακατάλληλες για κλινική χρήση.¹⁵⁴ Συνεπώς, από τον συνδυασμό των άνω μελετών μπορεί να υποθεθεί ότι καλύτερη εφαρμογή παρατηρείται κατά φθίνουσα σειρά στις τεχνικές: H-MIL, I-MIL όπου είναι παρόμοια με την C-CST και παρόμοια με την AM+CST με τη χρήση ενδοστοματικού σαρωτή, και τελευταίες οι HM και η SLM για τις οποίες δεν γίνεται κάποια σύγκριση μεταξύ τους, αν και πιθανώς λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας της HM και της μικρότερης τραχύτητας που δημιουργεί να πλεονεκτεί από την SLM. Ωστόσο, για τις τεχνικές I-MIL, H-MIL και HM, επειδή έχουν δοκιμαστεί για την κατασκευή μεμονωμένων τμημάτων και λόγω μειωμένου όγκου βιβλιογραφίας, δεν μπορούν να συναχθούν ασφαλή συμπεράσματα, παρά μόνο ενδείξεις. Ακόμη, παρά την ανωτερότητα που φαίνεται να επιδεικνύει η H-MIL και η I-MIL, το πιο πιθανό είναι να αφορά συγκεκριμένα σχέδια σκελετού καθώς σε πλήρη σκελετό ή πολύπλοκα σχήματα τα αποτελέσματα της αναμένεται να υποβαθμίζουν την εφαρμογή. Γενικώς, σαν τελικό συμπέρασμα αναφορικά με την ακρίβεια και εφαρμογή ισχύει ότι είναι δύσκολο να ερμηνευθούν επακριβώς, παρότι διάφορες μελέτες έχουν επιδιώξει να τις εξετάσουν, λόγω πολλών περιορισμών όπως ο περιορισμός της αξιολόγησης ενός μόνο τμήματος του σκελετού, το σφάλμα ενδοστοματικού σαρωτή στη διαδικασία κατασκευής σκελετού, η πληθώρα μορφών σχεδίασης σκελετού κ.α. Αυτό που θα μπορούσε να υποθεθεί με τη μεγαλύτερη ασφάλεια είναι ότι η τεχνική SLM (και ενδεχομένως και οι PBF) παρουσιάζει χαμηλότερη εφαρμογή έναντι



των CST, και αυτό κυρίως οφείλεται στην υψηλότερη τραχύτητα που δημιουργούν, η οποία μπορεί ωστόσο να βελτιωθεί με διάφορους τρόπους. Γενικώς, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την τελική εφαρμογή, οι οποίοι μπορεί να χωριστούν α) σε αυτούς που αφορούν τη τεχνική κατασκευής και οι οποίοι εντάσσονται στο φάσμα της μετα-επεξεργασίας και τελικής επεξεργασίας, και σε β) σε αυτούς που είναι ανεξάρτητοι από τη τεχνική της κατασκευής. Αυτοί οι παράγοντες αναλύθηκαν στο ειδικό μέρος, ωστόσο κάτι που δεν αναφέρθηκε στη βιβλιογραφία και που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι υπάρχει πιθανότητα για το ίδιο ψηφιακό αρχείο, ακόμη και στην περίπτωση που επιλεγθεί η ίδια μέθοδος με τις ίδιες παραμέτρους επεξεργασίας, η ακρίβεια του τελικού σκελετού να διαφέρει σε κάθε εκτύπωση, δηλαδή να υπάρχει χαμηλή πιστότητα. Έτσι, ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής που θα επιλεγθεί για την κατασκευή σκελετού, προκειμένου να εξασφαλισθεί η υψηλή ακρίβεια διαστάσεων και συνεπώς η βελτίωση εφαρμογής, χρειάζεται να καθοριστούν οι σωστές ρυθμίσεις στις συσκευές (βαθμονόμηση-καλιμπράρισμα), οι οποίες μπορεί να απαιτούν δοκιμές. Το τελευταίο γίνεται ιδιαίτερα απαραίτητο, στην περίπτωση που η κατασκευή γίνεται από άλλο εργαστήριο από αυτό της σχεδίασης, όπου τότε κρίνεται σκόπιμη η αποστολή σε αυτό του αρχείου των ψηφιακών ρυθμίσεων.

Μια επαρκής δύναμη συγκράτησης για ένα άγκιστρο M.O. θεωρείται περίπου τα 5 N.¹¹⁸ Έχει αναφερθεί ότι οι συγκρατητικές δυνάμεις των C-CST αγκίστρων μετά από 2 χρόνια προσομοίωσης γήρανσης μειώνονται λόγω παραμόρφωσης,⁸⁰ ή κατά άλλους μετά από 3 χρόνια μειώνονται^{80,118} ενώ δεν εντοπίζεται καμία μείωση σε έως και 10 χρόνια προσομοιωμένης γήρανσης, ενώ άλλες μελέτες που συμφωνούν με αυτόν τον ισχυρισμό δηλώνουν ελαφρώς αυξημένες δυνάμεις σε πάνω από 5 χρόνια κυκλικής φόρτισης¹¹⁸. Νεότερες μελέτες δείχνουν ότι η δύναμη των C-CST αγκίστρων μειώνεται μετά από τους 10.000 κύκλους,^{112,127} άλλες μετά τους 7.200 κύκλους (60 μήνες),⁶⁴ και άλλες μετά τους 15.000⁶⁷ αν και αρχικά μπορεί να αυξηθεί λόγω της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση,^{67,72} ή παραμένει σταθερή χωρίς παραμόρφωση μέχρι τους από 20.000 κύκλους (προσομοίωση εισαγωγής/απένθεσης πάνω από 9 χρόνια).⁶⁸ Οι αρχικές δυνάμεις συγκράτησης των HM αγκίστρων είναι συγκρίσιμες¹²⁷ ή υψηλότερες¹¹² από αυτές των συμβατικών C-CST, και επιπλέον, τα HM παρουσιάζουν μικρή μείωση των δυνάμεων συγκράτησης έως τους 10.000 κύκλους εισαγωγής/αφαίρεσης σε σύγκριση με τα C-CST που παρουσιάζουν σημαντική μείωση ενώ τα SLM παρουσιάζουν μείωση ενδιάμεσης εκείνης των C-CST και HM.^{112,127} Οι αρχικές συγκρατητικές δυνάμεις είναι παρόμοιες για τις μεθόδους AM+CST και DMLS, σχετικά σταθερές και για τις δύο, έως και 10 χρόνια ενώ μειώνονται μετά από 65 χρόνια προσομοίωση γήρανσης σημαντικά για την AM+CST, όχι όμως για την μέθοδο DMLS.¹¹⁸ Πλην της DMLS και η



SLS παρουσιάζει σημαντικά μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση μετά από προσομοίωση 5 χρόνων.⁵¹ Οι αρχικές συγκρατητικές δυνάμεις είναι σημαντικά μεγαλύτερες στη μέθοδο DMLM συγκριτικά με την I-MIL, ενώ μετά από 6 χρόνια προσομοίωσης έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της δύναμης στα άγκιστρα από DMLM και συνεχή μείωση στα άγκιστρα I-MIL.⁴¹ Σημειώνεται ότι, η δύναμη συγκράτησης των αγκίστρων Μ.Ο. επηρεάζεται πέρα από την τεχνική κατασκευής, από τη σχεδίαση του σκελετού και το σχήμα των δοντιών.^{72,118} Συνεπώς, οι τεχνικές HM, SLM, SLS, DMLS, DMLM παρουσιάζουν παρόμοιες ή υψηλότερες αρχικές δυνάμεις συγκράτησης, έναντι της χύτευσης. Ωστόσο, την καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη διατήρηση της συγκρατητικής δύναμης φαίνεται να δίνει η τεχνική HM, και να ακολουθούν οι τεχνικές SLM, SLS, DMLS, DMLM με τελευταία τη CST. Πάντως, ανεξαρτήτως τεχνικής, μέχρι τα πρώτα 6-10 χρόνια φαίνεται η συγκρατητική δύναμη να μένει σταθερή ή μπορεί να αυξάνεται ελαφρώς ή να μειώνεται, όμως έπειτα ιδίως μετά τα 10 χρόνια ενώ οι τεχνικές CST φαίνεται να παρουσιάζουν μείωση ή διατήρηση, οι ψηφιακές τεχνικές παρουσιάζουν διατήρηση ή αύξηση της δύναμης. Η πιθανή αρχική αύξηση της δύναμης συγκράτησης έχει αποδοθεί στο φαινόμενο της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση, δηλαδή καθώς το Co-Cr παραμορφώνεται πλαστικά μέσω επανειλημμένης εμπλοκής του στις εσοχές, εμφανίζονται εκτοπίσεις στο κράμα και όσο περισσότερες είναι τόσο περισσότερο θα αλληλοεπιδράσουν μειώνοντας την κινητικότητά τους οδηγώντας τελικά σε ενίσχυση του υλικού Co-Cr με συνεχή μείωση της ολκιμότητας του⁶⁷. Η πιθανή αρχική μείωση της δύναμης συγκράτησης πιθανόν οφείλεται στην αποτριβή του κράματος Co-Cr ή/και του υλικού της μήτρας-στεφάνης (π.χ. ζirkόνια, Co-Cr κ.α.) που έχει χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση των δοκιμών ένθεσης/απένθεσης, ή/και σε μόνιμη παραμόρφωση η οποία μπορεί να οφείλεται σε επιλογή υλικών με μικρότερο όριο αναλογίας, δηλαδή μικρότερη ελαστικότητα, τα οποία μπορεί να παραμορφωθούν ευκολότερα με αποτέλεσμα την απώλεια συγκράτησης ιδίως αν τοποθετηθούν σε ακατάλληλες εσοχές και έχουν ακατάλληλη σχεδίαση. Η πιθανή αρχική διατήρηση της δύναμης συγκράτησης χωρίς μόνιμη παραμόρφωση πιθανόν οφείλεται στο μικρότερο βάθος εσοχής με αποτέλεσμα τη μείωση της διαδρομής του αγκίστρου και συνεπώς της πιθανότητας δημιουργίας εκτοπίσεων. Η διατήρηση ή αύξηση στη δύναμη συγκράτησης στο χρόνο για τις ψηφιακές μεθόδους πιθανόν οφείλεται στην μεγαλύτερη δομική ομοιογένεια (π.χ. μικρότερο μέγεθος κόκκων) και στο υψηλότερο όριο διαρροής συγκριτικά με τη CST με αποτέλεσμα τα άγκιστρα να μπορούν να υποβληθούν σε υψηλότερες τάσεις πριν υποστούν πλαστική παραμόρφωση.

Άλλες ιδιότητες σύγκρισης μεταξύ των τεχνικών περιλαμβάνουν τα εξής. Η ικανοποίηση των ασθενών στην SLM είναι μεγαλύτερη από ότι στη CST,¹¹ και το ίδιο ισχύει στη



σύγκριση της SLS με τη CST καθώς ασθενείς έχουν αναφέρει μεγαλύτερη γενική ικανοποίηση, ικανότητα ομιλίας, ικανότητα καθαρισμού, και αύξηση της ικανοποίησης στο χρόνο, χωρίς προβλήματα ακρίβειας εφαρμογής, συγκράτησης, έλκους της γλώσσας ή ουλίτιδας και γενικώς με λιγότερα παράπονα ιδίως αυτά που σχετίζονται με τη χαλάρωση της οδοντοστοιχίας.¹⁷⁹ Τα μειονεκτήματα της διαδικασίας MIL συγκριτικά με την PBF και HM είναι ότι δεν είναι εύκολο να κατασκευαστούν πολύπλοκα σχήματα, απορρίπτονται μεγάλες ποσότητες περίσσειας υλικού μετά την κοπή και η ακρίβεια εξαρτάται από τα εργαλεία κοπής.^{47,112} Ακόμη στην MIL απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι επεξεργασίας,¹¹² σε αντίθεση με την HM που είναι εντελώς αυτόματη, και επίσης πολλοί σκελετοί μπορούν να κατασκευαστούν ταυτόχρονα,¹¹² και με την SLM που είναι ημι-αυτόματη με τη δυνατότητα κατασκευής σκελετών ταυτόχρονα¹¹² ενώ για την SLM έχει αναφερθεί ότι είναι ταχύτερη των μεθόδων CST (C-CST και AM+CST, και μάλιστα η AM+CST είναι πιο γρήγορη από ότι η C-CST) και συνεπώς η παραγωγικότητα καθίσταται υψηλή, αν και η SLM απαιτεί μεγάλο χρόνο μεταεπεξεργασίας και χρόνο για τελική επεξεργασία.^{11,47} Όσον αφορά το κόστος, η MIL έχει υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης,^{47,61} στην HM το κόστος είναι σχετικά χαμηλό και είναι οικονομικά αποδοτικότερη από την κοπή και την σύντηξη μεμονομένα.¹¹² Το αρχικό κόστος μιας μηχανής SLM είναι υψηλό, πλέον όμως το συνολικό κόστος των σκελετών Μ.Ο. θεωρείται χαμηλότερο σε σχέση με την CST και την MIL.^{11,19} Παρόλα αυτά το αρχικό κόστος απόκτησης των ψηφιακών συσκευών αποτελεί ακόμη περιορισμό για ορισμένα εργαστήρια. Ωστόσο είναι δυνατή η εξωτερική ανάθεση της διαδικασίας κατασκευής σε κέντρα CAD-CAM, γεγονός που μπορεί να μειώσει και πάλι το κόστος κατασκευής. Επιπλέον, ένα μονοπάτι που χρησιμοποιεί τόσο ψηφιακές όσο και συμβατικές τεχνικές (AM+CST, I-MIL) θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ως εναλλακτική λύση για την εξωτερική ανάθεση της κατασκευής σκελετού.^{25,179} Γενικώς, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες, η ακρίβεια και η ταχύτητα παραγωγής της τεχνολογίας SLM αναμένεται να βελτιωθούν περαιτέρω στο μέλλον, και η τιμή της μηχανής SLM αναμένεται να μειωθεί δραστικά.⁴⁷ Η τελευταία άποψη βρίσκει σύμφωνο το συγγραφέα.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαδικασία PBF είναι το πρόγραμμα που αναπτύσσεται το μοντέλο, η εκλογή της σκόνης (σύνθεση, μέγεθος κόκκων), ο προσανατολισμός κατασκευής, οι δομές υποστήριξης, οι παράμετροι του μηχανήματος και ο τύπος της συσκευής.⁸⁸ Οι διαφορές στη σύνθεση μεταξύ διαφορετικών σκονών αναλύθηκαν παραπάνω, ωστόσο σημειώνεται ότι είναι απαλλαγμένες από Be και Ni και το μέγεθος κόκκων κυμαίνεται μεταξύ 3 και 14μm.¹¹⁹ Η μικροδομή, οι φυσικομηχανικές ιδιότητες, η υφή και η συγκέντρωση υπολειμματικών τάσεων εξαρτώνται από τον προσανατολισμό κατασκευής.



Αυτός μπορεί να επηρεάζει τη διάταξη των ιζημάτων, την κατεύθυνση ανάπτυξης των κόκκων, τον αριθμό (στις 90° τα λιγότερα) και την γωνία των τετηγμένων ορίων δεξαμενής όπως προαναφέρθηκε με αποτέλεσμα να επηρεάζει την ανισοτροπία των μηχανικών ιδιοτήτων.¹¹⁰ Επιπρόσθετα, η κατεύθυνση της γωνίας κατασκευής σε σχέση με το μοτίβο σύντηξης λέιζερ επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος,¹¹⁴ και πιο συγκεκριμένα έχει βρεθεί από τον προσανατολισμός των ημι-συντηγμένων περιοχών και στρωμάτων ότι η γωνία κατασκευής 45° παράγει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τις γωνίες 0° και 90°.¹¹⁴ Παλαιότερα, αναφέρθηκε ότι οι 0° αποδίδουν την υψηλότερη επιμήκυνση μετά τη θραύση και αντοχή στον εφελκυσμό, όμως χαμηλότερο όριο διαρροής συγκριτικά με τις 45° και 90°.^{88,111} Νεότερες μελέτες συμφωνούν στο ότι η γωνία κατασκευής 45° δίνει τη χαμηλότερη εκατοστιαία επιμήκυνση, όμως διαφωνούν στην αντοχή στον εφελκυσμό και το όριο διαρροής για τις οποίες αναφέρουν τιμές υψηλότερες.¹¹⁴ Ακόμη, η γωνία 45° δίνει μικρότερη σκληρότητα και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Πάντως, το κράμα που κατασκευάζεται με DMLS παρόλο που παράγει καλύτερες ιδιότητες εφελκυσμού έχει ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις γωνίες κατασκευής.¹¹⁴ Μηχανική ανισοτροπία φαίνεται να μην υπάρχει στις δοκιμές εφελκυσμού, αλλά υπάρχει στην αντοχή στην κόπωση, η οποία ωστόσο με την κατασκευή υπό γωνία 90° καθίσταται σημαντικά υψηλότερη από την τεχνική CST (και η CST είναι μεγαλύτερη από εκείνη των υπό γωνία 0° και 45°). Πολλές μελέτες έχουν αναφέρει ότι μεταξύ των 0°, 45° και 90°, τη μικρότερη αδρότητα αποδίδει ο προσανατολισμός στις 90°,^{19,128} και μάλιστα σε μια¹¹⁵ επισημαίνεται σε βαθμό που είναι παρόμοια με τα CST κράματα, ενώ μελέτες (όμως σε κράματα τιτανίου) έχουν δείξει ότι στις 90° επιτυγχάνεται και καλύτερη εφαρμογή.^{19,113} Σε άλλη μελέτη πάντως, αναφέρθηκε ότι η σκληρότητα είναι παρόμοια για τις γωνίες 0°, 30°, 60°, 90°.¹⁸⁰ Γενικώς, έχει δοκιμαστεί και ο προσανατολισμός κατασκευής στις 30° και 60°,^{12,180} όμως δεδομένου ότι οι μελέτες στις οποίες δοκιμάστηκαν αυτές οι γωνίες αποσκοπούσαν στην διερεύνηση των μεταβολών των ιδιοτήτων των κραμάτων από τη κατάσταση as-cast στην heat-treated και δεδομένου ότι δεν ανέφεραν αν οι διαφορές στις ιδιότητες ανα γωνία κατασκευής είναι στατιστικά σημαντικές, δεν θα μπορούσαν να ληφθούν ασφαλή συμπεράσματα. Πάντως τα αποτελέσματα των μελετών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 7-2 και Πίνακα 7-3.^{12,180} Πέραν του προσανατολισμού κατασκευής, έχει αναφερθεί ότι η σκόπιμη προσθήκη δομών υποστήριξης μπορεί να βελτιώσει την αντοχή στην κόπωση των αγκίστρων, αν και απαιτείται επιπλέον προσπάθεια για την αφαίρεση τους.¹¹ Ακολουθούν στοιχεία αναφορικά με τις παραμέτρους τους μηχανήματος. Διάφορες παράμετροι λέιζερ όπως η πηγή λέιζερ, και το μήκος κύματος μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη τήξη σκόνης (το Yb: YAG αναμένεται να



αντικαταστήσει το Nd: YAG).^{33,47} Δύο ακόμη σημαντικές παράμετροι που σχετίζονται κυρίως με την πυκνότητα του υλικού είναι: α) η ενεργειακή πυκνότητα λέιζερ ή αλλιώς LED [= Ισχύς (P) / (Ταχύτητα σάρωσης (V) · απόσταση μεταξύ δύο επακόλουθων σαρώσεων (h) · πάχος στρώσης (d) J/mm³] η οποία συσχετίζεται επίσης πέραν του πορώδους,^{110,111} με, τη μικροδομή, την επιφανειακή μορφολογία, τη σκληρότητα και τις μηχανικές ιδιότητες,^{88,110} ενώ έχουν αναφερθεί διάφορες τιμές για αυτή χωρίς ταύτιση των συγγραφέων^{88,110,111}, και β) η ενέργεια εισόδου ή αλλιώς E_i (= P/V) η οποία όσο αυξάνεται μέχρι την τιμή των 0,36 J/s τόσο αυξάνεται η πυκνότητα των σκελετών. Πάντως, χαμηλή P, υψηλή V, μεγάλη h και μεγάλο d μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπαρκή ενέργεια για την τήξη της σκόνης,^{33,128} ή υψηλή ισχύς λέιζερ και χαμηλή ταχύτητα σάρωσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εξάτμιση των λιωμένων υλικών, οδηγώντας σε μειωμένη πυκνότητα.^{33,128} Οι τρεις πρώτες παράμετροι επιπλέον επηρεάζουν: το μέγεθος των κόκκων (σχηματισμός χονδρόκοκκης δομής),^{33,88,128} την τραχύτητα της επιφάνειας (μπορεί να μειωθεί όταν η V είναι γρήγορη και η P είναι χαμηλή λόγω του ότι αποφεύγεται το φαινόμενο «balling» και συγκεκριμένα P στα 200W και V στα 128,6 mm/s θεωρούνται οι βέλτιστες τιμές καθώς σχηματίζουν ένα βέλτιστο σχήμα σφαιριδίων, και ακόμη η h στα 100μm (ήτοι βέλτιστος λόγος επικάλυψης = 62 %),²⁰² και τις μηχανικές ιδιότητες (η αντοχή εφελκυσμού και το όριο διαρροής του κράματος Co-Cr μειώνονται με την μείωση της P, την αύξηση της h, και την αύξηση της V, ενώ οι βέλτιστες παράμετροι για τις ιδιότητες φαίνεται να είναι P = 160 W, V = 1100 mm/s και h = 0,05 mm⁸⁸). Αύξηση του d επιπλέον μπορεί να επιδεινώσει την ακρίβεια, τις μηχανικές ιδιότητες (αν και νεότερες μελέτες αναφέρουν ότι δεν τις επηρεάζει), την τραχύτητα^{19,128,165} και το φαινόμενο της κλίμακας γίνεται εντονότερο αν και το φαινόμενο αυτό δεν συναντάται πάντα¹⁵. Πάντως, στις μηχανικές ιδιότητες εξίσου σημαντικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία της προθερμασμένης κλίνης σκόνης και ο ρυθμός θέρμανσης¹⁵. Ακόμη, η επανάτηξη της επιφάνειας είναι μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη σημαντικής βελτίωσης στην τραχύτητα των κατασκευών SLM, και αυτή η τεχνική είναι πιθανότατα εφαρμόσιμη σε κράματα Co-Cr, ωστόσο μένει να διερευνηθεί.²⁰² Όσον αφορά τις διαφορετικές συσκευές PBF, η DMLM σε σχέση με την DMLS αποδίδει μέσες τιμές: αντοχής σε εφελκυσμό υψηλότερες, συντελεστή ελαστικότητας χαμηλότερες και εκατοστιαίας επιμήκυνσης υψηλότερες, ενώ παράλληλα δημιουργεί σκελετούς με υψηλότερη πυκνότητα και μικρότερο πορώδες, όπως προαναφέρθηκε.¹⁵ Επιπλέον, παρόλο που υπάρχουν μικρές διαφορές στην αντίσταση στη διάβρωση των κραμάτων ανάλογα με το συνδυασμό σκόνης-μηχανής PBF, όλοι οι συνδυασμοί αποδίδουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και πληρούν τις απαιτήσεις για υλικά από αποκαταστάσεων τύπου 4 και 5 (ISO 22674).⁹² Συνεπώς, για την



σωστή επιλογή σύνθεσης σκόνης ανάλογα με τη κάθε περίπτωση κατασκευής, σημαντικός παράγοντας θεωρείται η προσωπική έρευνα και σύγκριση των πληροφοριών που αναφέρουν οι κατασκευαστές με τις τιμές που καταδεικνύει η έρευνα, ενώ το μικρότερο μέγεθος κόκκων σκόνης λόγω της βελτίωσης των ιδιοτήτων και κυρίως της μείωσης της τραχύτητας ενδεχομένως να θεωρείται πιο ευνοϊκό. Οι γωνίες κατασκευής 45° ή 90° φαίνεται να πλεονεκτούν έναντι των 0° , με την κάθε μια από αυτές να υπερτερεί σε διαφορετικά σημεία. Πάντως, λαμβάνοντας υπόψη την αντοχή στη κόπωση, την τραχύτητα και την εφαρμογή που έχουν αποτελέσει μειονεκτήματα της PBF έναντι της CST, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι ιδιότητες εφελκυσμού είναι κλινικά αποδεκτές ακόμη και στην περίπτωση που είναι χαμηλότερες στις 90° , τότε η γωνία κατασκευής 90° φαίνεται να είναι η πλεονεκτικότερη στο σύνολο των ιδιοτήτων για την κατασκευή ενός «κλασσικού» σκελετού με άγκιστρα. Για τις γωνίες 30° και 60° θεωρείται σκοπιμο όπως προαναφέρθηκε να μη ληφθεί κάποιο συμπέρασμα. Επιπρόσθετα, με την σωστή ρύθμιση των παραμέτρων μηχανήματος μπορεί να επιτευχθεί εξάλειψη ή περιορισμός της δημιουργία πορώδους, να μειωθεί η τραχύτητα, και το μέγεθος των κόκκων, και να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Η θερμοκρασία της προθερμασμένης κλίνης σκόνης, ο ρυθμός θέρμανσης, το μήκος κύματος, η πηγή λέιζερ και άλλοι παράγοντες χρήζουν περαιτέρω μελέτης. Σχετικά με τις διαφορετικές συσκευές απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να ληφθεί κάποιο συμπέρασμα με ασφάλεια. Το σημαντικό πάντως είναι ότι προβλήματα όπως ανισοτροπία, τάσεις, τραχύτητα, πορώδες, και μεγάλο μέγεθος κόκκων μπορούν να περιοριστούν, ενώ παράλληλα να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες.

Παρότι, τα δεδομένα για την θερμική κατεργασία στην τεχνική HM είναι περιορισμένα, έχει αναφερθεί ότι αυτή αυξάνει την δύναμη συγκράτησης λόγω της μικρής παραμόρφωσης και της αύξησης του συντελεστή ελαστικότητας.¹¹² Όσον αφορά τις μεθόδους PBF η θερμική κατεργασία θεωρείται απαραίτητη,⁸⁸ αν και σε μια παλαιότερη μελέτη συνδέθηκε με τη δημιουργία ρωγμών και την αυξημένη στοιχειακή απελευθέρωση.⁹⁶ Ωστόσο, πιθανόν αυτό να οφείλονταν στην μη ορθή επιλογή των κατάλληλων συνθηκών θερμικής κατεργασίας. Από την άλλη έχει αποδειχθεί ότι η θερμική κατεργασία στους $1150^\circ\text{C} / 1\text{ h}$ επιτυγχάνει εξάλειψη δενδριτικής δομής και μικροδιαφορισμού, και εάν σε αυτή προστεθεί κατεργασία στους $800^\circ\text{C} / 4\text{ h}$ αυξάνεται η αντοχή στον εφελκυσμό και το όριο διαρροής λόγω του σχηματισμού με διάχυση μιας hcp ε φάσης.⁸⁸ Η κατεργασία ενός κράματος Co-Cr στους $800^\circ\text{C} / 20\text{-}25\text{ min}$ βελτιώνει-αυξάνει τις ιδιότητες εφελκυσμού και τη σκληρότητα όμως δεν ομογενοποιεί τη μικροδομή.¹⁸⁰ Γενικά, ανάλογα με τις συνθήκες θερμικής κατεργασίας, τα κράματα υφίστανται ανακούφιση-αποκατάσταση (recovery), ανακρυστάλλωση



και ανάπτυξη, και κατά συνέπεια, οι κόκκοι αλλάζουν. Ενώ η θερμική επεξεργασία πρέπει να πραγματοποιείται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες που επιτρέπουν την ατομική κινητικότητα, θα πρέπει να πραγματοποιείται για μικρό χρονικό διάστημα, προκειμένου να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη ανακρυστάλλωση και ανάπτυξη κόκκων, που σχετίζονται με απώλεια αντοχής.^{88,110} Έχει δειχθεί λοιπόν, ότι η διαδικασία αποκατάστασης συμβαίνει μετά από τους 1050 °C ή λιγότερο, ωστόσο είναι μη ικανή να περιορίσει την ανισοτροπία και τις υπολειματικές τάσεις. Από την άλλη η διαδικασία ανακρυστάλλωσης ομογενοποιεί τη μικροδομή, δηλαδή: τα ίχνη MPBs εξαλείφονται, β) οι ανισοτροπικοί στηλοειδείς κόκκοι με συγκεκριμένο προσανατολισμό και υφή, οι δενδριτικές δομές και οι υπο-κόκκοι στα δείγματα με όλες τις γωνίες δόμησης μετασχηματίζονται σε νέους ομοιόμορφους ισοαξονικούς κόκκους που έχουν έναν αριθμό Σ3 δίδυμων ορίων ανόπτησης με νέους ομοιόμορφα κατανεμημένους τυχαίους κρυσταλλικούς προσανατολισμούς με τυχαία υφή γ) οι υπολειματικές τάσεις εξαλείφονται και δ) μειώνονται έτσι οι ανισοτροπικές μηχανικές ιδιότητες. Παράλληλα αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας¹⁸⁰ και η ολκιμότητα^{88,180} εκτός τις 90^ο¹⁸⁰,⁸⁸ και μειώνεται το όριο διαρροής 0,2 %, η σκληρότητα,^{88,180} και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό.¹⁸⁰ Από αρκετές έρευνες έχει δειχθεί επίσης ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει επίσης τον μετασχηματισμό φάσης FCC → HCP, και συγκεκριμένα, με τη μείωση της ψαθυρής HCP φάσης μετά τη θερμική επεξεργασία, η αντοχή (όριο διαρροής και μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό) και η σκληρότητα μειώνονται ενώ η ολκιμότητα αυξάνεται, και μάλιστα οι μεταβολές είναι πιο έντονες όσο αυξάνεται η θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας μέχρι τους 1150 °C.^{88,110} Πάντως, επειδή μετά το κύριο στάδιο κατασκευής, δηλαδή η σκόνη ακατέργαστου μετάλλου να λιώνει πλήρως και να στερεοποιείται ταχέως, ο στερεοποιημένος όγκος περνά έναν συνεχή χρονοεξαρτώμενο-μετασχηματισμό και ως εκ τούτου είναι πιθανό να δημιουργηθεί ένα σημαντικό κλάσμα φάσης ε-Co μέσω αλλαγών στη διαδικασία που διεξάγεται.¹⁸⁰ Από αρκετές έρευνες έχει δειχθεί επίσης ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει τον μετασχηματισμό φάσης FCC → HCP και οι αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων SLM Co-Cr εξαρτώνται κυρίως από τις αλλαγές στο κλάσμα φάσης της ψαθυρής φάσης HCP.¹¹⁰ Με τη μείωση της HCP φάσης μετά τη θερμική επεξεργασία, η αντοχή (όριο διαρροής και μέγιστη αντοχή στον εφελκυσμό) και η σκληρότητα μειώνονται ενώ η ολκιμότητα αυξάνεται, και μάλιστα οι μεταβολές είναι πιο έντονες όσο αυξάνεται η θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας μέχρι τους 1150 °C.^{88,110} Πάντως, μετά το κύριο στάδιο κατασκευής, δηλαδή την τήξη της σκόνης του ακατέργαστου κράματος και να την ταχεία στερεοποίηση, ο στερεοποιημένος όγκος περνά έναν συνεχή χρονοεξαρτώμενο-μετασχηματισμό. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, ο παρατηρούμενος όγκος υποβάλλεται σε αρκετούς κύκλους μετά το



σηματισμό πρόσθετων στρώσεων πάνω από τον παρατηρούμενο όγκο. Ως εκ τούτου, είναι πιθανό ότι ένα σημαντικό κλάσμα φάσης ϵ -Co να δημιουργηθεί, ακόμη και σε μονοφασικές δομές, μέσω αλλαγών στη διαδικασία που διεξάγεται.¹⁸⁰ Από την άλλη η σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας έχει αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες. Αρχικά, αποδόθηκε στις διαφορετικές κρυσταλλογραφικές δομές που υπάρχουν, και συγκεκριμένα την fcc (γ -Co) στην κατάσταση as-built και την hcp (ϵ -Co) στην κατάσταση θερμικής επεξεργασίας. Ωστόσο, σύμφωνα με τους άλλους συγγραφείς η γ -Co παραμένει η κυρίαρχη φάση και στις δύο καταστάσεις, με μειούμενα κλάσματα όγκου της ϵ -Co αυξάνοντας τη θερμοκρασία θερμικής κατεργασίας. Η θεωρητική μελέτη της θερμοδυναμικής ισορροπίας από τους άλλους ερευνητές προέβλεψε την ύπαρξη πολλών φάσεων εκτός από τις φάσεις γ και ϵ : τις φάσεις σ - και μ - και μια φάση με στοιχειομετρία Co_3W . Σε αντίθεση με την προπροηγούμενη μελέτη στην πιο πρόσφατη μελέτη δείχθηκε ότι, η πλαστική παραμόρφωση του κράματος μετά από δοκιμές εφελκυσμού δημιουργεί τάσεις οι οποίες συνδέονται με τον σχηματισμό της hcp- ϵ φάσης στην κατάσταση heat-treated και στην κατάσταση as-built (δηλαδή η ϵ -φάση σχηματίζεται από το μετασχηματισμό της γ -φάσης μόνο μετά την πλαστική παραμόρφωση λόγω τάσεων και όχι με θερμική κατεργασία), ενώ η θερμική επεξεργασία συνδέεται με τον σχηματισμό της φάσης-D024 καθώς το κράμα αποδείχθηκε ότι καθιζάνει τη διαμεταλλική φάση D024 κατά τη συνιστώμενη θερμική επεξεργασία η οποία μπορεί να εξηγήσει εν μέρει την παρατηρούμενη αύξηση του συντελεστή Young του. Συνήθως, η φάση D019 είναι μια πιο σταθερή διαμόρφωση του Co_3W από τη φάση D024. Συνολικά, η αύξηση του συντελεστή ελαστικότητας μπορεί να αποδοθεί εν μέρει μόνο σε μετασχηματισμούς φάσης, και πρέπει να εξεταστούν πιο αόριστες εξηγήσεις, όπως υπολλειπόμενες τάσεις που συμβάλλουν σε πλαστικές παραμορφώσεις.²⁰⁷ Πλην των ανωτέρω, πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η θερμική επεξεργασία επηρεάζει τη συμπεριφορά των ιζημάτων και την ομογενοποίηση των μικροδομών.¹¹⁰ Έχει αναφερθεί ότι η θερμική κατεργασία προάγει τη διάλυση των ιζημάτων στη μήτρα,¹²⁸ και ότι μια μείωση στα ιζήματα μετά από θερμική επεξεργασία οδηγεί σε μείωση της αντοχής και της σκληρότητας του κράματος SLM,¹¹⁰ αν και κατά άλλους μετά τη θερμική κατεργασία δημιουργούνται ιζήματα^{88,128}. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται σε διαφορές που αφορούν τη θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας, το χρόνο θέρμανσης και τους ρυθμούς ψύξης που αποτελούν όπως έχει αναφερθεί τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την κατανομή, το μέγεθος και την ποσότητα των καρβιδίων. Η ανακρυστάλλωση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω θερμικής επεξεργασίας στους $1150\text{ }^\circ\text{C} / 6\text{ h}$,⁸⁸ ενώ κατά άλλους $1150\text{ }^\circ\text{C} / 1\text{ h}$,¹⁸⁰ ή στους $1220\text{ }^\circ\text{C}$ ¹¹⁰. Αυτό δείχνει ότι μια κατάλληλη θερμοκρασία είναι πιο σημαντική από ότι ο χρόνος θερμικής επεξεργασίας, για τη μείωση



των υπολειπόμενων τάσεων στη διαδικασία ανακρυστάλλωσης.¹¹⁰ Από την άλλη έχει αναφερθεί ότι η ανακρυστάλλωση μόνο στους 1150 °C / 1 h και όχι για 6 h οδηγεί σε υψηλότερη αντοχή σε κόπωση για όλες τις γωνίες (0°, 45°, 90°),^{110,128} αν και σύμφωνα με άλλη μελέτη¹²⁸ αυτό ισχύει μόνο για τις γωνίες 0° και 45° ενώ για τις 90° οδηγεί σε μικρότερη γεγόνος που αποδίδεται στην εξαφάνιση των δενδριτικών δομών που λειτουργούν ως εμπόδια στη κίνηση των εκτοπίσεων. Τα διαφορετικά αποτελέσματα των δύο αυτών μελετών μπορεί να οφείλονται σε διαφορετικές συνθήκες επιφάνειας των δειγμάτων.¹²⁸ Επομένως, οι συνθήκες 1150°C / 1 h ενδεχομένως να θεωρούνται οι πιο ευνοϊκές συνθήκες για την ανακρυστάλλωση. Ωστόσο, η διαφωνία στην αντίσταση στη κόπωση για τις 90° και δεδομένου ότι η αντοχή και η σκληρότητα μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων¹¹⁰, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον έλεγχο του βαθμού ανακρυστάλλωσης και ανάπτυξης. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων παραμένει μια σημαντική πρόκληση στην PBF.⁸⁸ Επιπρόσθετα η θερμική κατεργασία δεν επηρεάζει τη σχετική πυκνότητα.¹⁸⁰ Στη περίπτωση κατασκευής μεταλλικών στεφανών και σκελετών Μ.Ο. στο ίδιο υπόστρωμα με SLM, εφόσον το επιτρέπει η σκόνη, η θερμική επεξεργασία στους 1100 °C είναι πιο κατάλληλη για την απελευθέρωση των υπολειμματικών τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη δυσθραυστότητα των οδοντικών προσθέσεων.⁹⁷ Επομένως, η θερμική κατεργασία θεωρείται απαραίτητη στην ΗΜ και PBF με τις κατάλληλες συνθήκες θερμικής κατεργασίας, μπορεί να ομογενοποιηθεί η μικροδομή και να εξαλειφθούν οι τάσεις μέσω των διαδικασιών αποκατάστασης και ανακρυστάλλωσης, ενώ παράλληλα η θερμική κατεργασία μπορεί να τροποποιήσει το κλάσμα φάσεων fcc/hcp και την συμπεριφορά των ιζημάτων. Η βελτιστοποίηση των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων (ειδικά των ιδιοτήτων κόπωσης) παραμένει μια σημαντική πρόκληση στην SLM.

Για την δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού μεταξύ θερμοπολυμεριζόμενης PMMA και του κράματος, αρχικά προτάθηκαν μακρομηχανικές μέθοδοι συγκράτησης [αγκύλες, πλέγμα, χάντρες, κεφαλές νυχιών, και στηρίγματα (struts), αμμοβολή], όμως βρέθηκε ότι δημιουργούν κακή οριακή στεγανοποίηση κράματος-ρητίνης, και για αυτό στη συνέχεια προτάθηκαν μικροσκοπικές μέθοδοι συγκράτησης: αμμοβολή (με κόκκους Al₂O₃ ενός μεγέθους, καθώς τα πολλά διαφορετικά μεγέθη κόκκων έχουν ως αποτέλεσμα την κακή προσαρμολή της ρητίνης στη περίπλοκη επιφανειακή τοπογραφία), ηλεκτρολυτική και χημική χάραξη (οι ενεργοποιητές συγκόλλησης μετάλλου είναι η πιο κοινή χημική μέθοδος οι οποίοι παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορές στην αντοχή στη διάτμηση του δεσμού μεταξύ ρητίνης και κράματος) και επεξεργασία επιφανειών με λέιζερ (πολύ υποσχόμενη μέθοδος



επειδή είναι γρήγορη, ακριβής και σχεδόν δεν προκαλεί ζημιά).^{67,211} Η αμμοβολή της επιφάνειας σε συνδυασμό με τη χημική μέθοδο και το λέιζερ αποδίδει διπλάσια αντοχή στη διάτμηση από το συνδυασμό αμμοβολής με λέιζερ ή αμμοβολής με χημική μέθοδο.^{211,212} Μεταξύ των 2 τελευταίων μεθόδων αναφέρθηκε ότι η μέθοδος με λέιζερ αποδίδει μεγαλύτερη αντοχή στη διάτμηση από τη χημική, ενώ σε νεότερη μελέτη²¹¹ αναφέρθηκε ότι η αντοχή του δεσμού είναι παρόμοια όμως η χημική επιφανειακή επεξεργασία είναι καλύτερη από την επιφανειακή επεξεργασία λέιζερ για τη βελτίωση της οριακής στεγανοποίησης στη γραμμή τελειώματος του ακρυλικού για τη μείωση της μικροδιαρροής.²¹¹ Η σφαιροβολή συμβάλλει στη διατήρηση της συγκρατητικής δύναμης και την βελτίωση, της ομαλότητας της επιφάνειας, των θλιπτικών δυνάμεων και της αντίστασης στη κόπωση, και μάλιστα καλό είναι να πραγματοποιείται με σωματίδια ZrO_2 για την πρόληψη υποβάθμισης της βιοσυμβατότητας, ενώ θεωρείται ευνοϊκότερη της αμμοβολής.⁶⁹ Έπειτα ακολουθεί η τελική επεξεργασία του μεταλλικού σκελετού, η οποία σε γενικές γραμμές, μπορεί να χωριστεί σε 3 κύρια στάδια (αν και σε κάποιες μελέτες που φαίνονται παρακάτω παραλείπονται κάποια στάδια ή εφαρμόζονται με διαφορετικό τρόπο): α) αμμοβολή και μηχανική λείανση που αποσκοπούν κυρίως στη μείωση των ανωμαλιών το ανώτερο σε $3\mu m$ ωστόσο μπορεί να προκαλέσουν και διάφορα προβλήματα, β) ηλεκτροστίλβωση, η σωστή διεξαγωγή της οποία έχει πολλαπλά οφέλη, και γ) τελική στίλβωση μετά την οποία η μέση τιμή τραχύτητας (R_a) των $0,2\mu m$ ή λιγότερο θεωρείται κλινικά ικανοποιητική καθώς η τιμή αυτή αποτελεί το όριο για την ποσότητα του βιοφίλμ που προσκολλάται.^{55,56} Πάντως, για να επιτευχθεί η βέλτιστη ομαλότητα, πρέπει να έχει προηγηθεί καλή ποιότητα επεξεργασίας.⁵⁶ Η εφαρμογή αμμοβολής, λείανσης (grinding), εκτροχισμού (milling)-τροχού βαμβακερού υφάσματος και στίλβωτικής πάστας, και ελαστικής στίλβωσης επηρεάζουν την τραχύτητα του κράματος, η οποία μετά τον εκτροχισμό είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη μετά την λείανση, με αναλογία περίπου ($4 \div 5$): 1,⁸² ωστόσο μετά τη στίλβωση, εξαφανίζονται όλα τα εξογκώματα, η επιφάνεια γίνεται σχετικά επίπεδη και έχει μια γυαλιστερή φωτεινή όψη, όμως με την παρουσία μερικών μόνο πιθανών μη μεταλλικών εγκλεισμάτων,⁸² σε αντίθεση με νεότερη μελέτη που αναφέρθηκε ότι μετά τη στίλβωση δεν εντοπίστηκαν μη μεταλλικά εγκλείσματα.²¹³ Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί ηλεκτροστίλβωση, αναφέρθηκε ότι η δομή της ανοδικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια της, αποτελείται από το κράμα Co-Cr με τη φάση μήτρας και τη φάση καθίζησης, το στρώμα άλατος (συμπαγές φιλμ), το ιξώδες στρώμα και τον ηλεκτρολύτη. Το μοντέλο στρώματος συμπαγούς άλατος είναι υπεύθυνο για τον περιορισμό της μαζικής μεταφοράς στην ηλεκτροστίλβωση. Επιπλέον, ένα φιλμ παθητικού οξειδίου σχηματίζεται στην ανοδική επιφάνεια μετά την ηλεκτροστίλβωση. Όσον αφορά την τοπογραφία, μια



επιλεκτική διάλυση μεταξύ της μήτρας και της φάσης καθίζησης συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ηλεκτροστίλβωσης και η φάση μήτρας έχει υψηλότερο ρυθμό διάλυσης από τη φάση καθίζησης.⁵⁴ Επιπρόσθετα, μετά την ηλεκτροστίλβωση οι τιμές τραχύτητας μειώνονται, όμως υπάρχει ανάπτυξη τοπικών σημειακών ελαττωμάτων με τη μορφή προεξοχών. Η σύνθεση των προεξοχών είναι ομοιόμορφη, κάθε μια από τις οποίες περιβάλλεται από ρηχές εσοχές και χαρακτηρίζεται από αρκετά αδρή άνω επιφάνεια, η μικροδομή τους είναι ίδια με το υλικό του δείγματος όμως και αυτή χαρακτηρίζεται από νανοέγκλειστα.⁵⁵ Όσον αφορά την σύνθεση της ηλεκτροστίλβωμένης επιφάνειας, νέα συστατικά Co^{3+} και Mo^{6+} εμφανίζονται σε αυτή λόγω της ηλεκτροχημικής διάλυσης. Ομοίως, το ατομικό ποσοστό των στοιχείων, ειδικά το στοιχείο Co, μειώνεται μετά την ηλεκτροστίλβωση που δείχνει ότι οξειδώνονται τα περισσότερο ογκώδη υλικά.⁵⁴ Ορισμένοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν και καθορίζουν την ηλεκτροστίλβωση πέρα από την καλή ποιότητα κατασκευής και την αποτελεσματική εκτέλεση της αμμοβολής και λείανσης είναι η θερμοκρασία και η σύνθεση του ηλεκτρολύτη, ο χρόνος, η πυκνότητα ρεύματος καθώς και το μέγεθος της επιφάνειας του σκελετού⁵⁶ (σημειώνεται ότι πιθανή βελτιστοποίηση σχετικά με την τραχύτητα μπορεί να επέλθει τροποποιώντας το ρεύμα που αναφέρει ο κατασκευαστής του ηλεκτρολύτη, ανάλογα με την λεπτομέρεια της επιφάνειας του σκελετού⁵⁵). Σε άλλη μελέτη, εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των επιφανειών των δειγμάτων σε κατάσταση as-cast και μετά από μηχανική στίλβωση, καθώς και μεταξύ «λεπτής» στο οδοντιατρείο και «αδρής» στο εργαστήριο μηχανικής στίλβωσης.⁴⁵ Σε άλλη μελέτη, δείχθηκε ότι η ηλεκτροστίλβωμένη επιφάνεια που υπέστη μηχανική στίλβωση χρησιμοποιώντας πράσινους ελαστικούς δίσκους και μια στίλβωτική πάστα που εφαρμόστηκε από μια περιστρεφόμενη μαύρη βούρτσα, παρουσιάζει τη μικρότερη τραχύτητα ενώ ακολουθεί η μηχανική στίλβωση μέσω πράσινων ελαστικών δίσκων – υψηλή στίλβωτική πάστα – περιστρεφόμενη δερμάτινη βούρτσα ελαφιών, με τελευταία την επιφάνεια που υπέστη μόνο ηλεκτροστίλβωση. Αυτό διότι ανάλογα με τις μεθόδους της στίλβωσης παρατηρούνται τοπογραφικές αλλαγές.⁵⁷ Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις των βακτηρίων (0,5-1 μm) και των ζυμομυκήτων (4-10 μm), πιθανώς οι διαφορές τραχύτητας στις επιφάνειες των τριών δειγμάτων δεν είναι σημαντικές ώστε να μπορούν να τις «αισθανθούν». Σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι, αν και οι 2 χρησιμοποιούμενες τεχνικές στίλβωσης βελτιώνουν την τελική ποιότητα των μεταλλικών επιφανειών, καλύτερη επιφάνεια και μικρότερη προσκόλληση μικροοργανισμών επιτυγχάνεται με την μηχανική στίλβωση (αποτριπτικοί δίσκοι άλατος χουμικού οξέος-σπόγγος-λειαντική πάστα) σε σχέση με την ηλεκτροστίλβωση.²¹⁵ Πάντως, η βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας των σκελετών Μ.Ο. είναι δυνατή με, την αύξηση της απόδοσης της μηχανικής στίλβωσης



με λειαντικά εναιωρήματα, τον έλεγχο των φυσικών και χημικών παραμέτρων της ηλεκτρολυτικής στίλβωσης και την εφαρμογή βιοσυμβατών επικαλύψεων λεπτής μεμβράνης έτσι ώστε τα κύτταρα *Candida Albicans* να δυσκολεύονται πολύ να προσκολληθούν.²¹⁵ Πέρα από την «υγρή» ηλεκτροστίλβωση, στην αγορά έχει εισαχθεί και μια νέα τεχνολογία γνωστή ως «ξηρή» ηλεκτροστίλβωση, με αρκετά πλεονεκτήματα σύμφωνα με τα λεγόμενα της εταιρείας καθώς επρόκειτο για μια αυτοματοποιημένη διαδικασία με την οποία παραλείπονται οι «συμβατικές» διαδικασίες τελικής επεξεργασίας (λείανση, ηλεκτροστίλβωση και τελική στίλβωση).²¹⁶ Για τη στίλβωση επιφανειών των κραμάτων Co-Cr έχει χρησιμοποιηθεί και η στίλβωση με λέιζερ η οποία όμως δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη σε κράματα Co-Cr σκελετών Μ.Ο., ωστόσο έχει δείχθει ότι βελτιώνει σημαντικά τη ποιότητα της επιφάνειας, την επιφανειακή μικροδομή και την αντίσταση στη διάβρωση όμως έχει κατηγορηθεί ότι δημιουργεί ρωγμές και υπολειμματικές τάσεις, μειονεκτήματα τα οποία αποφεύγονται με την ηλεκτροστίλβωση συν του ότι η τελευταία παράγει ένα παχύ στρώμα οξειδίου που ενισχύει την αντίσταση στη διάβρωση.⁸⁸ Η επιφάνεια των τελικών σκελετών στη PBF περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια φινιρίσματος και στίλβωσης πριν την αποστολή στον οδοντίατρο, τα οποία όμως δεν διαφέρουν σαν μεθοδολογία από τη μέθοδο CST,^{11,47} αν και γενικώς ένας σκελετός που κατασκευάζεται μέσω SLM απαιτεί περισσότερη λείανση και στίλβωση από ότι ένας χυτός, και αυτό μπορεί να αποτελέσει πηγή σφάλματος, και σε μια μελέτη δείχθηκε ότι ανάλογα με την τεχνολογία SLM ή SLS και την επιφανειακή επεξεργασία των δειγμάτων (αμμοβολή + στίλβωση ή μόνο αμμοβολή), η τραχύτητα είναι διαφορετική.²¹⁴ Συνεπώς, για την δημιουργία ενός ισχυρού δεσμού μεταξύ PMMA-κράματος, η επεξεργασία της επιφάνειας του κράματος με συνδυασμό χημικής μεθόδου και λέιζερ φαίνεται ο ιδανικότερος για την αντοχή του δεσμού όσο και την βελτίωση της οριακής στεγανοποίησης, ενώ σε περίπτωση επιλογής μιας από τις δύο καλό είναι να προτιμάται η χημική μέθοδος. Η σφαιροβολή θεωρείται ευνοϊκότερη της αμμοβολής, ωστόσο ενδεχομένως να απαιτείται επιπλέον έρευνα για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητα της. Οποιαδήποτε τεχνική τελικής επεξεργασίας εφαρμοστεί βελτιώνει την τελική επιφάνεια και τις ιδιότητες, αν και μπορεί να συνοδεύεται από την δημιουργία έγκλειστων. Η αμμοβολή και η μηχανική λείανση θεωρούνται απαραίτητες, ενώ σχετικά με τη στίλβωση η μηχανική στίλβωση θεωρείται απαραίτητη καθώς θεωρείται ευνοϊκότερη της ηλεκτροστίλβωσης συν του ότι ορισμένες έρευνες δεν έχουν χρησιμοποιήσει καθόλου την ηλεκτροστίλβωση. Πάρα ταύτα, πέρα από τη βελτίωση της επιφανειακής τραχύτητας που προσφέρουν όλες οι τεχνικές τελικής επεξεργασίας (μηχανικές και η ηλεκτροστίλβωση), η ηλεκτροστίλβωση προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα που αδυνατούν να προσφέρουν οι λοιπές τεχνικές με κυριότερα εκείνα που αφορούν την



αντίσταση στη διάβρωση και τη βιοσυμβατότητα, και για αυτό ο συγγραφέας της διπλωματικής την θεωρεί απαραίτητη (σε συνδυασμό πάντα με τη μηχανική στίλβωση). Ακόμη, χρειάζεται προσοχή στην εκτεταμένη μηχανική λείανση και στίλβωση καθώς φαίνεται να αυξάνει την τραχύτητα αντί να την μειώνει, προκαλώντας δυσμενείς επιπτώσεις στη τοπογραφία. Λαμβάνοντας υπόψιν, ότι τα δεδομένα βιβλιογραφίας δεν καταλήγουν σε κάποιο κοινό πρωτόκολλο ως προς το ποια εργαλεία, από τι υλικά, και με ποια σειρά πρέπει να χρησιμοποιούνται στην τελική επεξεργασία για τα βέλτιστα αποτελέσματα, σε κάθε περίπτωση καλό είναι να τηρούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή που διευκρινίζει επακριβώς για το πως πρέπει να πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία. Η «ξηρή» ηλεκτροστίλβωση μένει να δοκιμαστεί πειραματικά για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά της. Η μέθοδος στίλβωσης με λείζερ αν ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα ζητήματα, και με την εξέλιξη της τεχνολογίας φαίνεται να παρουσιάζει ενδιαφέρον μελλοντικά. Όλα τα παραπάνω ισχύουν για τη συμβατική μέθοδο, ενώ για τη μέθοδο PBF παρότι έχουν αναφερθεί κάποιες γενικές πληροφορίες, δεν υπάρχουν ακόμη μελέτες που να διερευνούν την συμπεριφορά του κράματος ανάλογα με τη τεχνική τελικής επεξεργασίας.

Τα κράματα Co-Cr πέραν των πλεονεκτημάτων τους όπως το γεγονός ότι είναι σχετικά φτηνά και των ευνοϊκών ιδιοτήτων τους όπως της υψηλής αντοχής τους, του υψηλού μέτρου ελαστικότητας και της αντίστασης στη διάβρωση,⁶¹ ενέχουν και μειονεκτήματα στα οποία περιλαμβάνονται το αισθητικά μη ευχάριστο χρώμα τους, το βάρος, ο κίνδυνος πρόκλησης μεταλλικής γεύσης καθώς και αλλεργικών ή τοξικών αντιδράσεων, αστοχίες κόπωσης, η δύσκολη κατεργασία, η παραμόρφωση (ειδικά όταν τα άγκιστρα ρυθμίζονται «καλιμπράρονται» με επιπλέον συγκράτηση) και η απώλεια οστού των δοντιών στήριξης, η πιθανότητα εμφάνισης γαλβανισμού και η απαίτηση περίπλοκων διαδικασιών παραγωγής.^{2,64,66,68,73} Ακόμη, τα κράματα Co-Cr, εξαιρώντας τα κράματα τιτανίου, έχουν το υψηλότερο εύρος τήξης των κραμάτων χύτευσης καθιστώντας δύσκολο το χειρισμό αυτών των κραμάτων στο εργαστήριο, ενώ η υψηλή σκληρότητα και η χαμηλή ολκιμότητα τους καθιστούν δύσκολη την τελική κατεργασία και στίλβωση τους.⁶¹ Αυτοί είναι και μερικοί από τους λόγους που οδήγησαν στην ανάπτυξη άλλων υλικών όπως παρουσιάζονται ακολούθως.

Τα συγκρίσιμα χαρακτηριστικά των κραμάτων χρυσού και των κραμάτων Co-Cr, αφορούν την ανεκτικότητα από τους ιστούς, την αισθητική, την ικανότητα διαμόρφωσης σε σφυρήλατο σύρμα και συγκόλλησης στο σκελετό, την ακρίβεια χύτευσης, τις διαδικασίες συγκόλλησης,³² την τελική αντοχή στον εφελκυσμό και το μικρότερο όριο αναλογίας σε σχέση με τα θερμικά σκληρυμένα κράματα χρυσού,⁵⁹ αν και κατά νεότερες μελέτες⁶⁰ τα κράματα Co-Cr έχουν μικρότερο όριο διαρροής και αναλογίας από εκείνα του χρυσού.



Επιπρόσθετα, τα κράματα Co-Cr έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου διπλάσιο από εκείνο των κραμάτων χρυσού, χαμηλότερη πυκνότητα σε συγκρίσιμα τμήματα και ειδικό βάρος που ισούται περίπου με το μισό των κραμάτων χρυσού,^{4,5,7} υψηλότερη σκληρότητα χωρίς σημαντική αποτριβή και για τα 2 κράματα ωστόσο,⁶⁰ πιο γρήγορη σκλήρυνση με ενδοτράχυνση που σχετίζεται με το πιο χονδροειδές μέγεθος κόκκων,^{32,126} μεγαλύτερο διαβρωτικό δυναμικό,⁵ μεγαλύτερη δυσκολία και συστολή χύτευσης,¹⁹⁵ προβλήματα στην επαναχύτευση σε σχέση με τα κράματα χρυσού που μπορούν να επαναχυτευθούν ξανά και ξανά χωρίς να χάσουν κάποια από τις απαιτούμενες ιδιότητές τους,¹⁹² και πολύ χαμηλότερο κόστος.⁸⁰ Υποστηρίχθηκε ότι κάθε κράμα έχει επιθυμητά χαρακτηριστικά, αλλά κανένα δεν είναι ιδανικό για όλα τα τμήματα σκελετού Μ.Ο. Επομένως, η πρόκληση είναι η αποτελεσματική χρήση κάθε κράματος με βάση τις φυσικές του ιδιότητες. Μάλιστα δοκιμάστηκε η ενιαία κατασκευή σκελετού Μ.Ο. από συνδυασμό των δύο κραμάτων ωστόσο απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την διερεύνηση του χαρακτήρα και του δεσμού μεταξύ των κραμάτων.⁵⁹ Ακόμη, τα άγκιστρα χρυσού παρουσιάζουν μεγαλύτερη προσκόλληση μικροβίων από ότι τα CST Co-Cr.²³⁵ Γενικώς, τα κράματα χρυσού φαίνεται να είχαν τα πλεονεκτήματα τους κατά το παρελθόν, ωστόσο πλέον το υψηλό κόστος τους, σε συνδυασμό με την βιβλιογραφική έρευνα που φαίνεται να έχει σταματήσει και το γεγονός ότι δεν είναι συμβατά με την τεχνολογία CAD/CAM, έχουν περιορίσει τη χρήση τους σε μεγάλο βαθμό.

Τα συρμάτινα άγκιστρα μπορεί να είναι κατασκευασμένα μεταξύ άλλων από Co-Cr, ανοξείδωτο χάλυβα, χρυσό και Ni-Cr.^{79,217,232} Τα σφυρήλατα συρμάτινα άγκιστρα Μ.Ο. εμφανίζουν μεγαλύτερη ευκαμψία και έχουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες όπως μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και σκληρότητα³² σε σχέση με τα χυτά τα οποία μπορεί να παρουσιάσουν ελαττώματα χύτευσης και σκλήρυνση με ενδοτράχυνση.^{218,219} Ωστόσο, κατά τη θέρμανση (όπως στις διαδικασίες επιχύτευσης ή συγκόλλησης),^{32,222} καθώς και κατά την κάμψη η οποία δημιουργεί υπολειμματικές τάσεις οι ιδιότητες και η μικροδομή τους μπορεί να αλλάξουν σημαντικά.^{218,219} Η μέγιστη τάση εφελκυσμού, κάτω από τη δύναμη κάμψης (φόρτιση) καταγράφεται στην εξωτερική επιφάνεια της γωνίας κάμψης, ενώ μετά την εκφόρτιση στο εσωτερικό της γωνίας κάμψης. Με τη μείωση του άκρου του αγκίστρου αυτή η τάση αυξάνεται έως και 203 % αυτής πριν από την αστοχία. Η γωνία κάμψης επηρεάζει την μόνιμη παραμόρφωση και την ευκαμψία-συγκρατητική δύναμη.²¹⁸ Ακόμη, λόγω των υπολειπόμενων τάσεων τα συρμάτινα άγκιστρα είναι πιο ευαίσθητα σε αστοχία.²¹⁹ Πάντως, όταν τα συρμάτινα άγκιστρα από κράμα χρυσού υποβάλλονται σε κάμψη, παρουσιάζουν μια σχετικά μεγαλύτερη ευκαμψία, μικρότερη δύναμη συγκράτησης αλλά και μικρότερη μόνιμη παραμόρφωση (μεγαλύτερο φαινόμενο επαναφοράς) σε σύγκριση με τα συρμάτινα



άγκιστρα Co-Cr.²¹⁹ Οι συγκρατητικές δυνάμεις των σφυρήλατων συρμάτινων αγκίστρων εμβυθισμένων σε ρητίνη της βάσης σε εσοχή 0,5 mm έχει δειχθεί ότι είναι υψηλότερες από εκείνες των DMLS Co-Cr απλών τρισκελών και DMLS Co-Cr τύπου δοκού I αγκίστρων τοποθετημένων σε εσοχή 0,1 mm, ωστόσο αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι διέθεταν διαφορετικές εσοχές.¹⁸² Επιπρόσθετα, έχει αναφερθεί ότι τα άγκιστρα σφυρήλατου σύρματος ανοξειδώτου χάλυβα συγκριτικά με τα RPL και RPI (μη συρμάτινα άγκιστρα - δεν αναφέρεται ο τρόπος κατασκευής και το κράμα) είχαν το πιο βλαβερό αποτέλεσμα στις υποκείμενες των δοντιών-στηριγμάτων στηρικτικές δομές. Η χρήση CST Co-Cr αγκίστρων ή/και CST γλωσσικών πλακών οδηγεί σε μειωμένη κινητικότητα των υπολειπόμενων δοντιών, ήτοι σε μεγαλύτερη σταθεροποίηση των δοντιών στηριγμάτων, σε σχέση με τη χρήση συρμάτινων αγκίστρων ή/και CST γλωσσικών πλακών.²²¹ Ακόμη, συρμάτινα άγκιστρα από Ni-Cr παρουσιάζουν καλύτερη διατήρηση στη συγκρατητική δύναμη έναντι των CST Co-Cr.²³² Γενικώς, η χρήση συρμάτινων αγκίστρων πλέον δεν ενδείκνυνται ως μόνιμες αποκαταστάσεις, και υστερούν σε σχέση με τις λοιπές τεχνικές κατασκευής, λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν σε περίπτωση θέρμανσης τους για τη σύνδεση τους με το μεταλλικό σκελετό, και λόγω της μειωμένης λειτουργικής σταθερότητας της Μ.Ο. σε περίπτωση εμβύθισης τους σε ακρυλική ρητίνη.. Σε περίπτωση ωστόσο επιλογής προτιμότερο υλικό πιθανώς θα ήταν το Co-Cr για διάφορους λόγους με κυριότερους την αποφυγή δημιουργίας γαλβανικών φαινομένων και το παρόμοιο εύρος τήξης με το μητρικό κράμα.

Η χύτευση σκελετών Μ.Ο. από Ti παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα σε σχέση με τα κράματα Co-Cr που περιορίζουν την ευρεία εφαρμογή του, και συγκεκριμένα: η υψηλή θερμοκρασία τήγματος του τιτανίου η οποία καθιστά απαραίτητη την χρήση ειδικών συσκευών τήξης, κύκλων ψύξης, πυροχωμάτων και εξοπλισμού, για να αποφευχθεί η μόλυνση του και ενώ οι εξοπλισμοί διατίθενται στο εμπόριο έχουν ξεπεράσει πολλές από τις υπάρχουσες δυσκολίες το κόστος τους είναι σημαντικά υψηλότερο από τους συμβατικούς εξοπλισμούς χύτευσης.^{5,62,223} Ο μεγάλος χρόνος θέρμανσης (burnout)³⁵ Η μεγαλύτερη δυσκολία ελέγχου των ελαττωμάτων χύτευσης.³⁵ Αν και έχει αναφερθεί ότι άγκιστρα Co-Cr και τιτανίου παρουσιάζουν παρόμοια εφαρμογή, εντούτοις το τιτάνιο παρουσιάζει μεγαλύτερη πιθανότητα για χαμηλότερη εφαρμογή λόγω της αφαίρεσης της ζώνης α-case³⁵. Η κατεργασιμότητα [δυνατότητα εκτροχισμού (cutting) και λείανσης (grinding)] του τιτανίου είναι κατώτερη και η στίλβωση εξαιρετικά δύσκολη.³⁵ Η αποκόλληση της ρητίνης της οδοντοστοιχίας η οποία είναι παρόμοια με τους σκελετούς Co-Cr και χρυσού κράματος.³⁵ Ο αποχρωματισμός της επιφάνειας του τιτανίου.³⁵ Η μεγαλύτερη παραμόρφωση, ήτοι η μικρότερη δύναμη συγκράτησης των αγκίστρων.³⁵ Η αντοχή στη κόπωση είναι μικρότερη, όμως μπορεί να βελτιωθεί



και για τα 2 κράματα με τη σφαιροβολή,^{9,35} ενώ τα *in vivo* αποτελέσματα έχουν δείξει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στη συχνότητα κατάγματος ή απώλεια συγκράτησης μεταξύ των κραμάτων Ti και Co-Cr γεγονός που δείχνει την ασυνέπεια μεταξύ εργαστηριακών και κλινικών παρατηρήσεων⁹. Η βιοσυμβατότητα του τιτανίου είναι δυνατόν να προάγει περισσότερο την προσκόλληση της πλάκας^{2,35,235}. Εμφάνιση «ελαφρώς περιέργης γεύσης» από ορισμένους ασθενείς. Λόγω της αντιδραστικότητας με το οξυγόνο και της ανάγκης χρήσης αδρανούς ατμόσφαιρας η συγκόλληση του τιτανίου με φλόγα δεν είναι εφικτή,^{9,32} ενώ η συγκόλληση με υπέρυθρη ακτινοβολία, ηλεκτροσυγκόλληση βολφραμίου με αδρανές αέριο και η συγκόλληση με λέιζερ έχουν δοκιμαστεί όμως παρουσιάζουν δυσκολίες^{2,35,223,226,227}. Επιπλέον η χύτευση του τιτανίου παρουσιάζει και πλεονεκτήματα όπως υψηλή βιοσυμβατότητα, μικρότερη αλλεργία και αντοχή στη διάβρωση³⁵. Οι σκελετοί τιτανίου έχουν ιδιότητες παρόμοιες ή ελαφρώς καλύτερες σε σχέση με εκείνους των κραμάτων χρυσού τύπου IV, Ni-Cr και Co-Cr, και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας των κραμάτων Co-Cr είναι περίπου διπλάσιο του CPTi⁹ και των κραμάτων Ti^{35,243} αν και με την τροποποίηση της σχεδίασης η ακαμψία των κραμάτων Ti είναι παρόμοια με το Co-Cr,²⁴³ το όριο διαρροής των κραμάτων Co-Cr ισούται με το ήμισυ^{4,5} εκείνου των κραμάτων Ti ή κατά νεότερες μελέτες είναι ίδιο³² όμως είναι διπλάσιο του CPTi,^{4,5} και η ολκιμότητα των Co-Cr είναι πολύ κατώτερη³² των κραμάτων Ti. Χαμηλότερο βάρος^{2,5,35} Το CPTi και όλα τα κράματα τιτανίου³⁵ και τα κράματα Co-Cr⁹ είναι μη μαγνητικά. Χρησιμοποιώντας το CPTi ως βιο-αδρανές μέταλλο, μπορεί να πραγματοποιηθεί αποκατάσταση με τη χρήση ενός μετάλλου στα στόματα των ασθενών³⁵. Για τη κατασκευή σκελετών Ti μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλην της CST και οι τεχνικές H-MIL, I-MIL, AM³⁵ και HM που παρουσιάζουν παρόμοιους περιορισμούς με το Co-Cr με πρόσφατες μελέτες να αναφέρουν ότι οι μηχανικές ιδιότητες του κράματος Ti-6Al-4V που κατασκευάζεται με SLM είναι καλύτερες από αυτές των παραδοσιακών κραμάτων χύτευσης Co-Cr,¹¹³ ενώ για την HM έχει αποδειχθεί ότι οι δυνάμεις συγκράτησης είναι μεγαλύτερες στο Co-Cr από ότι για το CPTi.¹¹² Γενικώς, η κλινική χρήση του τιτανίου έχει δείξει εύλογα βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα, αλλά πρέπει να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες εργαστηριακής κατασκευής και τα μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα έναντι των υπάρχοντων κραμάτων πρέπει να αποδειχθούν πριν το τιτάνιο αποκτήσει ευρεία κλινική χρήση.³⁵ Πάντως, μεταξύ των CPTi, Ti-6Al-4V και του Ti-6Al-7Nb, για τα 2 πρώτα έχουν αναφερθεί μειονεκτήματα ενώ το τελευταίο έχει αναφερθεί ότι αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά κράματα βασικών μετάλλων λόγω της υψηλής βιοσυμβατότητας και της μηχανικής αντοχής του.²²⁴ Σε πρόσφατη μελέτη του 2018 με σκοπό την ανεύρεση του καλύτερου υλικού για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο., προτάθηκαν το κράμα



Co-Cr και το Ti ως τα πιο συμβατά και κατάλληλα υλικά, με το κράμα Co-Cr να έχει ανώτερες ιδιότητες (σε αντίθεση με την άνω μελέτη) όμως να απέχει πολύ από το να είναι ιδανικό και έτσι το τιτάνιο προτάθηκε ως το πλέον κατάλληλο λόγω της βιοσυμβατότητας και της αδράνειας του, ενώ επισημάνθηκε ότι τα πλεονεκτήματα της χρήσης μετάλλου ως σκελετού υπερτερούν των μειονεκτημάτων.⁷⁰ Συνεπώς, παρότι η χύτευση του τιτανίου παρουσιάζει πολλές δυσκολίες, οι ψηφιακές μέθοδοι κατασκευής πιθανότατα να δώσουν λύση στα προβλήματα που αντιμετωπίζει η μέχρι τώρα χρήση του τιτανίου, και εκεί μελλοντικά θα έχει πραγματικά ενδιαφέρον, για το εάν θα καταφέρει το τιτάνιο να επεκταθεί και να «κερδίσει έδαφος» έναντι του κράματος Co-Cr στην κατασκευή σκελετού Μ.Ο.

Μελέτες σε άλλα μεταλλικά κράματα έχουν αναφέρει τα εξής. Τα κράματα Co-Cr έχουν μεγαλύτερες τιμές μόνιμης παραμόρφωσης από την Pt, Au και το κράμα Au-Ag-Pd.⁷⁸ Τα άγκιστρα Ag-Pd-Cu-Au σε σύγκριση με τα CST Co-Cr είναι πιο ανθεκτικά στην κόπωση και πιο άκαμπτα γεγονός που απαιτεί τροποποίηση στη σχεδίαση τους.²²⁸ Η αρχική συγκρατητική δύναμη των άγκιστρων Co-Cr είναι μεγαλύτερη από εκείνη των Ag-Pd και μειώνεται με το χρόνο.²²⁹ Η σφαιροβολή στα άγκιστρα από Co-Cr, CPTi, Ag-Pd-Au, Au-Pt βελτιώνει τη δύναμη συγκράτησης μόνο για τα Co-Cr, την αντίσταση στη κόπωση για όλα πλην των Au-Pt, την ομαλότητα, τις θλιπτικές δυνάμεις και την αντίσταση στην κόπωση σε όλα τα κράματα.⁶⁹ Σε μια μελέτη αναφέρθηκε ότι το κράμα Co-Cr χωρίς θερμική κατεργασία εμφανίζει μεγαλύτερη αντίσταση στην κόπωση από το Au-Ag-Pd χωρίς θερμική κατεργασία αλλά μικρότερη από το Au-Ag-Pd με θερμική κατεργασία, το Au-Ag-Pt και το κράμα Pd-Ag-In, και συνεπώς τα ευγενή κράματα δείχνουν καλύτερη μακροζωία από το Co-Cr.¹²⁶ Μεταξύ των μεταλλικών υλικών: Co-Cr, CPTi, κράμα Ti, Ag-Pd-Au, Au-Cu-Pt, διαφορές εντοπίζονται μεταξύ τους όχι μόνο στην ποσότητα αλλά και στα μικροβιακά είδη του βιοφίλμ που σχηματίζονται στο σάλιο.¹³⁹ Σε γενικές γραμμές τα κράματα Co-Cr σε σύγκριση με τα νικελιούχα κράματα είναι πιο δύσκολα ως προς την κατεργασία τους και οξειδώνονται περισσότερο, ωστόσο δεν περιέχουν νικέλιο που είναι γνωστό αλλεργιογόνο και βηρύλλιο που θεωρείται καρκινογόνο.²³⁰ Τα βασικά επαναχυτευμένα κράματα έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και τα κράματα Co-Cr έχουν υψηλότερη αντοχή στη διάβρωση από τα Ni-Cr,^{137,186} ενώ έχει αναφερθεί ότι τα κράματα Ni-Cr δεν επιτρέπουν την επαναχύτευση.²³⁰ Επιπρόσθετα, υπάρχει επιλεκτικότητα στην προσρόφηση πρωτεϊνών σιελογόνων στα κράματα Co-Cr και Ni-Cr.²³¹ Τα άγκιστρα από CST κράμα Ti-Ni παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερη μεταβολή της συγκρατητικής τους δύναμης σε σχέση με τα CST Co-Cr, χρυσού κατηγορίας IV και σφυρήλατου σύρματος Ni-Cr, αν και η αρχική δύναμη συγκράτησης (5N) παρόλο που μειώνεται, η τελική είναι παρόμοια για όλα τα υλικά. Ωστόσο, η χρήση του Ti-



Ni για M.O. είναι κάπως αμφιλεγόμενη λόγω της ανάγκης για εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνικές.²³² Αντίθετα, σε άλλη μελέτη αναφέρθηκε ότι η συγκρατητική δύναμη αρχική και τελική των αγκίστρων Co-Cr είναι μεγαλύτερη από εκείνη των αγκίστρων Ni-Cr, αν και η τελική δύναμη ήταν μειωμένη και για τα 2 υλικά λόγω παραμόρφωσης.⁸⁰ Συνεπώς, από τα διάφορα υλικά που έχουν δοκιμαστεί για τη κατασκευή σκελετού M.O., η πλειοψηφία αυτών πλέον δεν χρησιμοποιείται, ενώ ορισμένα φαίνεται να συνεχίζονται να δοκιμάζονται μόνο πειραματικά κυρίως για λόγους σύγκρισης με το Co-Cr αν και ο αριθμός σύγχρονων μελετών είναι περιορισμένος.

Η επικάλυψη του βραχίονα των αγκίστρων με ένα στρώμα ακρυλικής ρητίνης μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία ρωγμών στο στρώμα της ρητίνης.⁷⁶ Στην χρήση σκελετών ακρυλικής ρητίνης με συρμάτινα άγκιστρα δεν εξασφαλίζεται η λειτουργική σταθερότητα το ίδιο καλά όπως με μια χυτή δομή.³² Η χυτή M.O. λειτουργεί ως μια καλύτερη πρόσθεση λειτουργικά και βιολογικά από τη χρήση εξολοκλήρου ακρυλικής ρητίνης,^{36,233,234} ενώ η ακρυλική οδοντοστοιχία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί έναντι της χυτής όταν λαμβάνεται υπόψη η κοινωνικοοικονομική κατάσταση και όταν πραγματοποιείται σωστή συντήρηση της.^{233,234} Αυτό διότι, τα μόνα πλεονεκτήματα της ακρυλικής M.O. σε σχέση με τη χυτή είναι το χαμηλότερο κόστος και η ευκολία κατασκευής.^{233,234} Από την άλλη πλευρά, η χυτή M.O. σε σχέση με την ακρυλική παρέχει πολλά πλεονεκτήματα που αφορούν την αντοχή στη θραύση και τη παραμόρφωση, τη θερμοαγωγιμότητα, το μειωμένο βάρος, όγκο και πάχος, την αυξημένη λειτουργική σταθερότητα, λειτουργικότητα και αίσθηση της γεύσης, την αποφυγή επιβάρυνσης των στηρικτικών ιστών της M.O., την διατήρηση υγιεινής, την μεγαλύτερη άνεση και ικανοποίηση, και πρόγνωση.^{36,233,234} Ωστόσο, έχει αναφερθεί ότι είναι παρόμοια η αναλογία σταθεροποίησης των δοντιών που παρουσιάζουν κινητικότητα μεταξύ της γλωσσικής πλάκας που κατασκευάστηκε με κράμα Co-Cr και εκείνης που κατασκευάστηκε με PMMA, ενώ σημαντική διαφορά υπάρχει στην ακαμψία μεταξύ τους.²²¹ Επιπρόσθετα, οι σκελετοί M.O., ακρυλικής ρητίνης με I-MIL δείχνουν σημαντικά καλύτερη εφαρμογή από τους C-CST σκελετούς Co-Cr, ενώ ακολουθούν κατά σειρά χειρότερης εφαρμογής οι σκελετοί ακρυλικής ρητίνης με I-AM και Co-Cr με SLM Co-Cr.¹⁵⁴ Συνεπώς, η επικάλυψη αγκίστρων Co-Cr καλό είναι να αποφεύγεται, ενώ η ακρυλική M.O. εξολοκλήρου ή με συρμάτινα άγκιστρα είναι υποδεέστερη της χυτής. Αν και αναφέρθηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί καλό είναι να αποφεύγεται, και αυτό οφείλεται κυρίως στην απουσία μεταλλικών επαπτήρων που αφαιρεί τη δυνατότητα της στήριξης. Γενικώς, αν και στο παρελθόν μπορεί να έδιναν λύσεις τέτοιου τύπου υλικά, ιδίως για προσωρινές αποκαταστάσεις, πλέον ακόμη



και σε περιπτώσεις που δεν είναι επιθυμητή η χρήση μεταλλικών υλικών, υπάρχουν διαθέσιμα νέα βελτιωμένα υλικά τα οποία φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Τα υλικά GFRC (σύνθετη ρητίνη ενισχυμένη με ίνες υάλου) με ή χωρίς πολυμερή επικάλυψη των ινών παρουσιάζουν μεγαλύτερη προσκόλληση μικροβίων από ότι τα CST κράματα Co-Cr, και αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι ο υμένας σάλιου στα κράματα μειώνει τη προσκόλληση των μικροβίων ενώ στις ίνες υάλου την αυξάνει. Αυτό το φαινόμενο γίνεται ιδιαίτερα έντονο όσο φθείρεται το πολυμερές και αποκαλύπτονται οι ίνες.²³⁵ Ακόμη, το υδάτινο στοματικό περιβάλλον μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στην επιφάνεια του γυαλιού και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες μηχανικές ιδιότητες και ανεπιθύμητες αλλαγές στη σύνθετη δομή.²³⁶ Το υλικό GFRC αποδίδει μεγαλύτερη αντίσταση στη κόπωση και μεγαλύτερη ημιδιαφάνεια από ότι το Co-Cr,²³⁶ όμως έχει χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας από το Co-Cr γεγονός που απαιτεί τη τροποποίηση της σχεδίασης (περίπου διπλάσια),^{78,236} και χαμηλότερη αντοχή την κάμψη.⁷⁸ Η μόνιμη παραμόρφωση των δειγμάτων GFRC αυξάνεται σημαντικά και είναι παρόμοια με εκείνη του κράματος Co-Cr.⁷⁸ Η πιθανότητα θραύσης στον ώμο λόγω της παρουσίας ρωγμών είναι υψηλή και για τα 2 υλικά.¹⁸³ Παρά τις προηγούμενες μελέτες, η εφαρμογή του GFRC για τα άγκιστρα παραμένει στο πειραματικό στάδιο.⁷⁹ Πέραν του GFRC, σε νεότερες μελέτες έχει εξετασθεί και το GFRTF (θερμοπλαστικό πολυμερές ενισχυμένο με ίνες υάλου), του οποίου τα άγκιστρα παρουσιάζουν εξαιρετική αισθητική, χαμηλότερη αντοχή σε κάμψη και συντελεστή κάμψης από τα συρμάτινα άγκιστρα Co-Cr, επισημαίνοντας την αναγκαιότητα της τροποποίησης της σχεδίασης τους, όμως μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτικό υλικό σε σχέση με τα κλασικά θερμοπλαστικά λόγω των ανώτερων μηχανικών ιδιοτήτων τους.⁷⁹ Συνεπώς, από τα δύο αυτά υλικά πλεονεκτικότερο φαίνεται το δεύτερο, ωστόσο απαιτούνται περαιτέρω μελέτες τόσο του ίδιου του υλικού, όσο και άλλων συνδυασμών ινών-πολυμερών, καθώς και σύγκριση τους με τα κράματα Co-Cr των συνήθων μεθόδων κατασκευής πέραν της κάμψης σύρματος, προκειμένου να διεξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα.

Τα εύκαμπτα θερμοπλαστικά υλικά που έχουν δοκιμαστεί για τη κατασκευή σκελετού M.O. περιλαμβάνουν το νάιλον ή πολυαμίδιο, το πολυανθρακικό, τον πολυεστέρα, την ρητίνη ακετάλης ή πολυοξυμεθυλένιο και το πολυπροπυλένιο.⁶⁵ Τα πλεονεκτήματα των εύκαμπτων M.O. περιλαμβάνουν: την μεγαλύτερη αισθητική, την βιοσυμβατότητα, την μεγαλύτερη ευκαμψία, προσφέρουν όφελος για ασθενείς με στοματικές παθήσεις, είναι οικονομικότερες και απαιτούν λιγότερο χρόνο προετοιμασίας σε σχέση με τις CST.⁶⁵ Τα μειονεκτήματά τους είναι: α) τείνουν να απορροφούν νερό, β) δεν άγουν τη θερμότητα και το κρύο, γ) παρατηρείται επιφανειακή τραχύτητα, ενέχουν τον κίνδυνο επιδείνωσης περιοδοντικών



συνθηκών, δ) στερούνται σημαντικών στοιχείων της συμβατικής Μ.Ο. και επομένως η μετάδοση λειτουργικών φορτίων μπορεί να επηρεάσει σοβαρά αρκετούς ιστούς,⁷⁹ ε) τα κινητά δόντια δεν ναρθηκοποιούνται, ζ) παρουσιάζουν δυσκολία επισκευής, η)⁶⁵ η δύναμη συγκράτησης μειώνεται μετά από μακροχρόνια χρήση.⁶⁸ Ακόμη, έχουν τεθεί ορισμένα ερωτήματα σχετικά με τη σταθερότητα χρώματος τους, τον σχηματισμό βιομάζας, τη βιοσυμβατότητα και τη μηχανική τους απόδοση.⁶³ Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί ότι τόσο η τραχύτητα της επιφάνειάς του πολυαμιδίου όσο και η δυσκολία που λαμβάνει χώρα κατά τη στίλβωση οδηγούν σε αποικισμό βακτηρίων και μυκήτων στην επιφάνειά του,⁷⁰ ενώ επίσης για τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης έχει αναφερθεί μεγαλύτερη τραχύτητα και μεγαλύτερη συσσώρευση πλάκας²³⁹. Τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης και πολυαμιδίου έχουν χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μικρότερη δύναμη συγκράτησης και χαμηλότερες τάσεις σε σύγκριση με τα άγκιστρα Co-Cr.^{63,217} Για την απόκτηση της απαραίτητης, ακαμψίας, το πολυαμίδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερα βάρη εσοχών όπως 0,75 mm, ενώ η ρητίνη ακετάλης δεν θεωρείται από ορισμένους κατάλληλο υλικό για άγκιστρα επειδή η μέγιστη τάση κατά την απένθεση της Μ.Ο. είναι υψηλότερη από την αντοχή του υλικού, ενώ σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί τοποθέτηση με παράλληλη αύξηση του πάχους (όπως έχουν προτείνει διάφορες διαστάσεις ερευνητές^{20,63,72}) ο μεγαλύτερος όγκος έχει επιπτώσεις στη συσσώρευση πλάκας και στη διατήρηση της περιοδοντικής υγείας.⁶³ Πάντως στη πορεία του χρόνου, από ορισμένους υποστηρίζεται ότι τα άγκιστρα ρητίνης ακετάλης που έχουν πάχος 1,2 mm και 2,0 mm είναι ανθεκτικά στην παραμόρφωση, άλλοι αναφέρουν ότι δεν τίθεται σε κίνδυνο η συγκράτηση²¹⁷ ότι παραμένει σταθερή^{63,72} και ότι δεν παραμορφώνονται⁶³ ενώ αντίθετα άλλοι αναφέρουν ότι παρουσιάζει σημαντική μείωση λόγω παραμόρφωσης^{70,80} και άλλοι επισημαίνουν ότι υπάρχει μείωση στη δύναμη συγκράτησης όμως μικρότερη μείωση παρατηρείται σε μεταλλικά άγκιστρα με συγκρατητικούς βραχίονες πολυαμιδίου έναντι των ολομεταλλικών με τελευταία τα μεταλλικά άγκιστρα με συγκρατητικούς βραχίονες ρητίνης ακετάλης.⁶⁴ Πάντως, η χαμηλότερη δύναμη συγκράτησης των άγκιστρων ρητίνης ακετάλης μπορεί να οφείλεται στη μεγαλύτερη ευκαμψία τους και λόγω της χρήσης της ίδιας διαμέτρου με τα μεταλλικά άγκιστρα.⁸⁰ Για τις εύκαμπτες Μ.Ο. από πολυεστέρα, έχει αναφερθεί ότι παρέχουν καλύτερη στοματική υγεία που σχετίζεται με την ποιότητα ζωής, γενική ικανοποίηση του ασθενούς²³⁷ και αισθητική όμως η σχέση κόστους-αποδοτικότητα είναι κατώτερη σε σύγκριση με τις Μ.Ο. κράματος Co-Cr.²³⁸ Σημειώνεται ότι, έχει αναφερθεί ότι εύκαμπτες Μ.Ο. χωρίς μεταλλικά στοιχεία δεν συνιστώνται ως μόνιμες οδοντοστοιχίες, παρά μόνο σε περιορισμένες περιπτώσεις,^{63,238} και οι επιλογές θεραπείας με άγκιστρα ρητίνης ακετάλης και πολυαμιδίου, που συνδυάζονται



με ένα συμβατικό μεταλλικό σκελετό της Μ.Ο., μπορούν να αποτελέσουν μια καλή επιλογή όσον αφορά την αισθητική συνδυάζοντας τη λειτουργικότητα με στόχο μεγαλύτερη μακροζωία της πρόσθεσης, ενώ έχει αναφερθεί επίσης ότι μεταλλικά άγκιστρα με βραχίονες συγκράτησης από ρητίνη ακετάλης οδηγούν σε ευνοϊκότερη κατανομή τάσεων από τα εξολοκλήρου ρητίνης ακετάλης.⁶⁴ Επομένως, αν και έχουν δοκιμαστεί αρκετά θερμοπλαστικά για τη κατασκευή σκελετού Μ.Ο., εκείνα που έχουν συγκριθεί με το κράμα Co-Cr είναι κυρίως η ρητίνη ακετάλης και το πολυαμίδιο για τα οποία υπάρχει πληθώρα πληροφοριών και σε μικρότερο βαθμό ο πολυεστέρας. Από αυτά τα 3, το πολυαμίδιο φαίνεται να συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Γενικώς, τα κλασσικά θερμοπλαστικά μπορούν να δώσουν λύσεις σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, ενώ ο συνδυασμός τους με τα κράματα Co-Cr που αναφέρθηκε ως πιο πλεονεκτικός για την χρήση τους και ως μόνιμες αποκαταστάσεις απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση προκειμένου να επιβεβαιωθεί ο ισχυρισμός αυτός.

Ακόμη, έχουν δοκιμαστεί και άλλα υλικά για την κατασκευή σκελετού Μ.Ο., ήγουν τα θερμοσυμπιεζόμενα (thermopress) και τα θερμοελαστικά (versacrylic), τα οποία πιθανώς εντάσσονται στα κλασσικά θερμοπλαστικά.^{69,70} Τα υλικά αυτά, παρουσιάζουν μεγαλύτερη τραχύτητα, μικρότερη συγκράτηση, όμως μικρότερη παραμόρφωση. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα για τους θερμοελαστικούς συγκρατητικούς βραχίονες είναι ότι έχουν «μνήμη» να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα σε σύγκριση με τους χυτούς συγκρατητικούς βραχίονες οι οποίοι συνήθως μετά από 500 φορές ένθεσης/απένθεσης υφίστανται κόπωση.^{69,70} Δεδομένου ότι οι πληροφορίες για τέτοιου τύπου υλικά είναι περιορισμένες, δεν αποτελούν μια ασφαλή επιλογή προτού υπάρξει περαιτέρω διερεύνηση τους.

Οι σκελετοί PEEK είναι πιο αισθητικοί,^{19,31,74} ελαφρύτεροι,^{73,74} ωφέλιμοι σε άτομα με αλλεργία και ερεθισμούς στο μέταλλο,^{19,31,73,74} αν και ο αριθμός των μικροβίων είναι μεγαλύτερος στην επιφάνεια τους,²³⁹ περιορίζουν τα φαινόμενα γαλβανικής διάβρωσης,⁷⁴ προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση κατά τη μάσηση και αποτελεσματική συγκράτηση της πρόσθεσης,⁷⁴ καλύτερη εφαρμογή και εύκολη και λιγότερο χρονοβόρα διαδικασία επεξεργασίας.⁷³ Η συγκρατητική δύναμη αγκίστρων PEEK παραμένει σταθερή αλλά σημαντικά μικρότερη από εκείνη των Co-Cr, όμως επαρκής για κλινική χρήση με την κατάλληλη σχεδίαση.⁷² Έχει αναφερθεί ότι τα άγκιστρα θα πρέπει να είναι παχύτερα του 1 mm (σε διάμετρο διατομής) όταν εμπλέκονται σε βαθύτερη εσοχή (0,50 mm) για να κερδίσουν την ακαμψία των CST αγκίστρων Co-Cr 1 mm σε διάμετρο διατομής και να αποκτήσουν μια κλινικά αποδεκτή συγκράτηση.²⁴⁰ Αντίθετα, νεότερη μελέτη αναφέρει ότι τα άγκιστρα PEEK 1 mm σε διάμετρο διατομής που εμπλέκουν 0,50 mm εσοχή παρέχουν επαρκή συγκράτηση σχεδόν παρόμοια με αυτή των Co-Cr, καθώς δείχθηκε ότι η αντοχή στη συγκράτηση και στη κόπωση ότι



ήταν στατιστικά μη σημαντική μεταξύ των 2 υλικών, παρόλο που η ομάδα Co-Cr κατέγραψε στατιστικά σημαντικά υψηλότερη μέση τιμή μόνιμης παραμόρφωσης από την ομάδα PEEK.²⁴⁰ Από την άλλη ωστόσο, άλλες μελέτες αναφέρουν ότι η PEEK δεν είναι κατάλληλο υλικό για άγκιστρα αφενός λόγω ανεπαρκούς αντοχής κατά την αφαίρεση από υψηλότερες από 0,25 mm εσοχές με αποτέλεσμα τη θραύση,⁶³ και αφετέρου επειδή ο συντελεστής ελαστικότητας του PEEK είναι αισθητά χαμηλότερος από αυτό του Co-Cr με αποτέλεσμα αυτή η τιμή να μην επαρκεί για τους κύριους συνδετήρες οι οποίοι πρέπει να είναι άκαμπτοι για να λειτουργούν αποτελεσματικά και κατά συνέπεια, ένας σκελετός από PEEK δεν συμβάλλει στην ευρεία κατανομή δυνάμεων. Επομένως, αναφέρθηκε ότι η εφαρμογή PEEK σε Μ.Ο. θα πρέπει να περιορίζεται σε ασθενείς που δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεταλλικούς σκελετούς κατηγορίας Kennedy III για περιοδοντικά υγιή δόντια. Από την άλλη, άλλοι ερευνητές σε μια μελέτη για την αποκατάσταση των περιπτώσεων της κατηγορίας II του Kennedy ανέφεραν ότι ο συνδυασμός PEEK/PEEK ως σύνδεσμος ακριβείας όσο και ως σκελετός, αντίστοιχα καθιστά ευνοϊκότερη την κατανομή πιέσεων συγκριτικά με το Co-Cr.²⁴¹ Σημειώνεται ότι οι σκελετοί PEEK έχουν υψηλότερο κόστος, και αυτό σε συνδυασμό με τους άνω περιορισμούς και επιπλέον λόγω της έλλειψης επιστημονικών στοιχείων για τη μακροχρόνια χρήση του, καθιστούν απαραίτητες περαιτέρω μελέτες για να εκτιμηθεί εάν οι Μ.Ο. με σκελετό PEEK είναι μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση θεραπείας.^{19,73,31} Συνεπώς, οι κυριότεροι προβληματισμοί με τη χρήση του υλικού PEEK έγκειται στην σχεδίαση και πιθανώς στην τροποποίηση της σύνθεσης του ή την προσθήκη ενισχυτικών ουσιών, ώστε να εξασφαλισθούν οι θεμιτές ιδιότητες, στο επιθυμητό βάθος εσοχής χωρίς να επέρχεται θραύση και χωρίς να επιβαρύνονται σημαντικά οι υποκείμενοι ιστοί. Πάντως, είναι ένα υλικό πολλά υποσχόμενο για το οποίο συνεχίζει έρευνα μέχρι και σήμερα.

Η συγκρατητική δύναμη αγκίστρων PEEK, PEKK, POM παραμένει σταθερή αλλά σημαντικά μικρότερη από εκείνη των Co-Cr, και επαρκής για κλινική χρήση με την κατάλληλη σχεδίαση.⁷² Η πεποίθηση ότι τα πιο ογκώδη σχέδια των θερμοπλαστικών αγκίστρων αποτρέπουν τις λειτουργίες αυτοκαθαρισμού και προκαλούν περισσότερη συσσώρευση πλάκας, φαίνεται να μην ισχύει εάν καθιερωθεί τακτικός έλεγχος της πλάκας.⁷² Ωστόσο, η συσσώρευση πλάκας σε άγκιστρα ρητίνης ακετάλης είναι μεγαλύτερη από εκείνη σε άγκιστρα Co-Cr.²³⁹ Η PEKK έχει συντελεστή ελαστικότητας πολύ μικρότερο (περίπου 5,1 GPa) από αυτόν του κράματος Co-Cr (200 GPa), είναι περίπου 37 % ελαφρύτερο από το κράμα Co-Cr, απαιτεί παχύτερα άγκιστρα και συνδετήρες λόγω της χαμηλότερης αντοχής του,⁶⁶ και παρουσιάζει δυσκολίες στη στίλβωση το οποίο μπορεί να προκαλέσει ανησυχία σχετικά με την πρόσφυση της πλάκας.⁶⁶ Γενικώς, απαιτούνται επιπλέον κλινικά δεδομένα, ειδικά



εκείνα που αφορούν τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα σχετικά με το νέο αυτό υλικό,⁶⁶ άποψη την οποία βρίσκει σύμφωνο τον συγγραφέα της διπλωματικής εργασίας.

Άγκιστρα κοπής από ΑΚΡ έναντι των άγκιστρων Co-Cr από AM+CST λόγω της χαμηλότερης ακαμψίας τους παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη (τόσο αρχική όσο και τελική) δύναμη συγκράτησης, η οποία ωστόσο είναι κλινικά αποδεκτή (σε ένα ευρύ φάσμα σχεδίασης) και σχετικά σταθερή σε αντίθεση με τα άγκιστρα Co-Cr που αν και έχουν υψηλότερη συγκρατητική δύναμη, μειώνεται με το χρόνο. Τα άγκιστρα ΑΚΡ έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται και να απομακρύνονται από τις εσοχές χωρίς να πιέζονται πέρα από το ελαστικό τους όριο και αυτό παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης και βελτιωμένης συγκράτησης (για πολλά χρόνια) για τους σκελετούς Μ.Ο.⁶⁷ Πέρα από το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας των άγκιστρων ΑΚΡ αυτά παρουσιάζουν και μικρότερη αντοχή στον εφελκυσμό και μικρότερο όριο διαρροής.⁶⁷ Γενικώς οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι έχουν και άλλα πλεονεκτήματα, και γενικώς υποστηρίζουν ότι σκοπός του ΑΚΡ είναι να καλύψει το κενό μεταξύ των μεταλλικών σκελετών (οι οποίοι μπορεί να είναι πολύ άκαμπτοι και δύσθραυστοι) και άλλων πολυμερών υλικών σκελετού (που μπορεί να είναι πολύ εύκαμπτοι) συνδυάζοντας έτσι τη στήριξη ενός μεταλλικού σκελετού με την άνεση που προσφέρουν οι εύκαμπτες οδοντοστοιχίες.⁷⁵ Συνεπώς, πρόκειται για ένα αρκετά υποσχόμενο υλικό, ωστόσο μένει να επιβεβαιωθούν οι ισχυρισμοί των κατασκευαστών και σε πειραματικές μελέτες που προς το παρόν είναι ελάχιστες.

Παλαιότερες έρευνες αναφέρουν ότι η ζirkόνια δεν θεωρείται ακόμη κατάλληλη για σκελετούς Μ.Ο.^{19,35} ωστόσο νεότερες^{68,76} φαίνεται να το επιτρέπουν για λόγους που αναφέρονται στο ειδικό μέρος. Άγκιστρα ζirkονίας σε σχέση με το Co-Cr δίνουν εξαιρετική βιοσυμβατότητα, δεν ενέχουν κίνδυνο αλλεργίας, παράγονται με το CAD/CAM και πλεονεκτούν έναντι των CST άγκιστρων, είναι ανώτερα αισθητικά, δίνουν μεγαλύτερη ικανοποίηση στον ασθενή, και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή συγκόλλησης με την ακρυλική ρητίνη μετά από κατάλληλη επεξεργασία επιφάνειας.⁶⁸ Παρόλα αυτά, οι πιο σοβαρές προκλήσεις στην κλινική εφαρμογή των άγκιστρων ζirkονίας είναι ότι οι ιδιότητες κάμψης, όπως η δυσθραυστότητα και η ελαστικότητα, μπορεί να είναι κατώτερες από αυτές των μεταλλικών κραμάτων μετά από μακροχρόνια χρήση.⁶⁸ Ωστόσο, η Ce-TZP/A έχει δειχθεί ότι παρουσιάζει εξαιρετική δυσθραυστότητα θραύσης και αντοχή στην κάμψη που θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες για εφαρμογή σε σκελετό Μ.Ο.⁷⁶ Η Ce-TZP/A,⁷⁶ και η Y-TZP,⁶⁹ έχουν μικρότερη αντοχή στην θραύση από κάμψη από το Co-Cr, ωστόσο ο κίνδυνος θραύσης είναι θεωρητικά χαμηλός εάν τα άγκιστρα έχουν σχεδιαστεί για το ίδιο βάθος εσοχής (0,25 mm) με εκείνα του Co-Cr, αφού έχουν δειχθεί σε δοκιμές προβόλου μέγιστες εκτοπίσεις πριν από



τη θραύση για τα άγκιστρα Ce-TZP/A πάνω από 0,5 mm⁷⁶ και για τα άγκιστρα Y-TZP πάνω από 0,75 mm.⁶⁸ Επιπρόσθετα, η αντίσταση στην κόπωση των Ce-TZP/A άγκιστρων είναι εξαιρετική και συγκρίσιμη με τα CST Co-Cr καθώς οι μέγιστες τιμές εκτόπισης (παραμόρφωσης) πριν από τη θραύση των δειγμάτων είναι συγκρίσιμες.⁷⁶ Ενώ τα άγκιστρα Y-TZP σε σχέση με τα CST δεν παρουσιάζουν παραμόρφωση όπως και τα Co-Cr στη συγκεκριμένη έρευνα αν και οι συγκρατητικές δυνάμεις παραμένουν μεγαλύτερες για τα κράματα Co-Cr, και οι διαφορές στις συγκρατητικές δυνάμεις αποδίδονται στη ψαθυρή φύση της ζirkονίας παρά το ίδιο μέτρο ελαστικότητας της με το Co-Cr.⁶⁸ Ακόμη, έχει αναφερθεί ότι η Ce-TZP/A και η PEEK για τη κατασκευή διαφορετικών τμημάτων του σκελετού σε μια ενιαία κατασκευή, μπορεί να αποδώσει έναν σκελετό εντελώς χωρίς μέταλλο, δηλαδή πρόκειται για μια εξολοκλήρου ψηφιακή ροή εργασίας, που αποδίδει μεγαλύτερη ικανοποίηση στους ασθενείς.²³ Συνεπώς, τα νέα δεδομένα δίνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα για τη χρήση της ζirkονίας σε άγκιστρα Μ.Ο, ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση αυτών της σε ολόκληρους σκελετούς Μ.Ο., και ιδίως για τον προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού, της μακροζωίας και των μεταβολών που μπορεί να προκληθούν κατά τη μακροχρόνια χρήση της στο στοματικό περιβάλλον.⁶⁸



Τα κράματα Co-Cr χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σκελετού Μ.Ο. που ως συγκρατητικά στοιχεία μπορεί να φέρει διπλές στεφάνες, συνδέσμους ακριβείας, άγκιστρα, ή συνδυασμούς αυτών. Κατά κανόνα, ο τύπος του συγκρατητικού στοιχείου καθορίζει και το κράμα Co-Cr που θα επιλεγεί για την κατασκευή ολόκληρου του σκελετού ή των συγκρατητικών τμημάτων του. Έτσι τα κράματα μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: «μεταλλοκεραμικά, ή αλλιώς κατάλληλα και για ακίνητες αποκαταστάσεις» και «αμιγώς για κλασσικούς σκελετούς με άγκιστρα», αν και στις ψηφιακές μεθόδους συνήθως τα ίδια κράματα έχουν δοκιμασθεί για όλους τους τύπους σκελετών Μ.Ο. Στην παρούσα εργασία, μολονότι αναφέρονται μερικές πληροφορίες για τα μεταλλοκεραμικά κράματα, το κύριο αντικείμενο της αφορά την κατασκευή «κλασσικών» σκελετών Μ.Ο. και ως εκ τούτου λόγω της πιθανότητας ανακρίβειας στην διεξαγωγή συμπερασμάτων, αυτά περιορίζονται στους «κλασσικούς» σκελετούς με άγκιστρα. Έτσι, σύμφωνα με τους περιορισμούς της εργασίας μπορούν να εξαχθούν τα εξής πορίσματα:

1. Οι σκελετοί μπορούν να κατασκευαστούν με: συμβατική χύτευση (C-CST), συνδυασμό προσθετικής κατασκευής και χύτευσης (AM+CST) και σύντηξη σκόνης σε κλίνη (PBF = DMLM, SLM, SLS, DMLS). Η κατασκευή μεμονωμένων τμημάτων του σκελετού (αγκίστρων) έχει δοκιμασθεί και με κάμψη σύρματος, σκληρή κοπή (H-MIL) και υβριδική επεξεργασία (HM). Παρακάτω παρότι συγκρίνονται συνοπτικά μεταξύ τους οι τεχνικές, τα μόνα ασφαλή συμπεράσματα αφορούν τη σύγκριση των τεχνικών CST με την SLM, που έχουν δοκιμαστεί σε πλήρεις σκελετούς και κατά κόρον.
2. Η χημική σύνθεση των κραμάτων, CST και PBF, ως επικρατούντα στοιχεία περιλαμβάνει το: Co, Cr και Mo ή/και W, και σε αυτή προστίθενται και άλλα στοιχεία για την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων. Η σύνθεση και οι ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν από αυτές του κατασκευαστή, σε περίπτωση μη τήρησης των οδηγιών επεξεργασίας. Καλό είναι να αποφεύγεται η χρήση χυτών μεταλλοκεραμικών κραμάτων, παρότι έχουν δοκιμαστεί πειραματικά, σε «κλασσικούς» σκελετούς Μ.Ο. με άγκιστρα.
3. Η ανομοιογενής δομή των CST κραμάτων Co-Cr αποτελείται: από την δενδριτική μήτρα, την διαδενδριτική φάση η οποία μπορεί να είναι μια μονοφασική ή πολυφασική



περιοχή, και εσωτερικές ατέλειες όπως ιζήματα καρβιδίων ή εύθραυστων διαμεταλλικών φάσεων ή νιτριδίων λόγω χημικού μικροδιαφορισμού, πόρους, τάσεις, ρωγμές, και πιθανόν μεγάλους κόκκους και έγκλειστα.

4. Η υπερθέρμανση του πυροχώματος και συνεπώς του κράματος μπορεί να προκαλέσει θερμικές και διαβρωτικές επιδράσεις, ενώ κατά τη χύτευση φαίνεται πιθανόν να υπάρχει κάποιου είδους υπερθέρμανση και να λαμβάνει χώρα η αντίδραση ενός οξειδίου του κράματος, μάλλον του CoO , με το SiO_2 .
5. Ο τρόπος και ρυθμός ψύξης μπορεί να επιδράσει: στον τύπο της σχηματιζόμενης διαδενδριτικής φάσης και μαζί με την μέθοδο τήξης (επαγωγική ευνοϊκότερη της φλόγας) και χύτευσης (πίεσης/κενού συνολικά ανώτερη της φυγοκεντρικής/αέρα), στο μέγεθος των κόκκων, των καρβιδίων, των μικροπόρων, στην αναλογία μεταξύ τους, στις μικρορωγμές, στη σταθερότητα διαστάσεων και γενικώς τις ιδιότητες. Ωστόσο, συνίσταται η πραγματοποίηση της ψύξης βάσει των οδηγιών του κατασκευαστή. Κάθε μεταβολή από την ιδανική θερμοκρασία χύτευσης επιδρά σημαντικά στη μικροδομή και στις ιδιότητες.
6. Η επαναχύτευση μπορεί να επιδράσει στη χημική σύνθεση, τη μικροδομή, και σε όλες τις ιδιότητες. Αν και οι απόψεις δίστανται, η πλειοψηφία των μελετών καθιστά αποδεκτή την επαναχύτευση κράματος μέχρι 3-4 φορές με αναλογία νέου/παλαιού κράματος τουλάχιστον κατά 50 %. Γενικώς καλό είναι να αποφεύγεται.
7. Τα κράματα Co-Cr χωρίς θερμικές κατεργασίες διαθέτουν τις απαραίτητες ιδιότητες για χρήση, ενώ με αυτές μπορεί να επιτευχθούν βελτιώσεις όπως: εξάλειψη των τάσεων, βελτίωση της εφαρμογής, μείωση και ανακατανομή των ιζημάτων (μείωση μικροδιαφορισμού), μεταβολή του μεγέθους των κόκκων, και βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων.
8. Στην επιφάνεια, η τραχύτητα κατά αύξουσα σειρά είναι στις τεχνικές: HM, C-CST, AM+CST και PBF. Ακόμη διαφορές υπάρχουν στην μορφολογία, τη δομή, την αναλογία και την κατανομή στοιχείων στην επιφάνεια μεταξύ των τεχνικών.
9. Τα κράματα PBF μπορεί να έχουν μια ή περισσότερες φάσεις. Συγκριτικά με τα κράματα CST έχουν πιο, ομοιογενή (αν και αυτό ισχύει περισσότερο μετά τη θερμική κατεργασία, καθώς και τα PBF εμφανίζουν ανομοιογένεια), λεπτόκοκκη και μειωμένη σε ελαττώματα ιδίως πορώδες δομή. Υπό βέλτιστες παραμέτρους οι τεχνικές DMLM/SLM αναμένεται να αποδώσουν τις πυκνότερες δομές.
10. Με τη κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη PBF (σύνθεση και μέγεθος κόκκων σκόνης, προσανατολισμός κατασκευής, αριθμός δομών υποστήριξης, παράμετροι μηχανήματος, τύπος συσκευής) μπορεί να επιτευχθεί μείωση: της ανισοτροπίας, της τραχύτητας, των τάσεων (αυτά αποτελούν τα κυριότερα μειονεκτήματα της



- PBF), του πορώδους, και η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των PBF κραμάτων σε βαθμό που να καθίστανται ανώτερα της CST, με εξαίρεση την αντοχή στη κόπωση που ωστόσο υπό 90° προσανατολισμό κατασκευής είναι πιθανόν να είναι ανώτερη της CST.
11. Η θερμική κατεργασία στα PBF κράματα θεωρείται αναγκαία για την ομογενοποίηση της μικροδομής, την μείωση των τάσεων, και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, ενώ παράλληλα επιδρά στην αναλογία fcc/hcp, και στην συμπεριφορά των ιζημάτων. Η ανεύρεση των ιδανικών συνθήκων για την βελτίωση της αντίστασης στη κόπωση παραμένει πρόκληση. Ωφέλιμη έχει αποδειχθεί και η θερμική κατεργασία στα HM κράματα.
 12. Η χυτευσιμότητα των CST κραμάτων είναι υψηλή. Οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανώτερες στις τεχνικές SLM (εφελκυστικές) και DMLS/SLS (καμπτικές) και η δυσθραυστότητα και η σκληρότητα μεγαλύτερες, σε σχέση με τη χύτευση. Το μέτρο ελαστικότητας, αν και εξαρτάται κυρίως από την επιλογή του κράματος είναι συνήθως είναι μικρότερο στις τεχνικές HM, SLS και SLM, και παρόμοιο στην DMLS, συγκριτικά με την CST, αν και αυξάνεται σημαντικά με θερμική κατεργασία.
 13. Η αντοχή στη κόπωση αν και μπορεί με την σωστή επιλογή παραμέτρων να είναι υψηλότερη για τις ψηφιακές τεχνικές έναντι της CST, οι θερμικές κατεργασίες μεταβάλλουν τη συμπεριφορά της και για αυτό η βελτίωση της εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, όπως προαναφέρθηκε. Βέβαια, αν ληφθεί υπόψιν σε συνδυασμό με τη μεταβολή της συγκρατητικής δύναμης, τότε πιθανώς η αντίσταση στη κόπωση των PBF κραμάτων να πλεονεκτεί σε μακροχρόνια βάση.
 14. Οι τεχνικές HM, SLM, SLS, DMLS, DMLM παρουσιάζουν παρόμοιες ή υψηλότερες αρχικές δυνάμεις συγκράτησης, έναντι της CST. Ωστόσο, την καλύτερη συμπεριφορά ως προς τη διατήρηση της συγκρατητικής δύναμης φαίνεται να δίνει η τεχνική HM, και να ακολουθούν οι τεχνικές SLM, DMLS, DMLM με τελευταία τη CST.
 15. Παρά του ότι η ακρίβεια και η εφαρμογή είναι πολυπαραγοντικές, φαίνεται ότι η HM αποδίδει τη μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων, ενώ κατά φθίνουσα σειρά ακολουθούν οι μέθοδοι SLM/SLS/DMLS, AM+CST, με τελευταία τη C-CST. Οι προσθετικές τεχνικές παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιστότητα έναντι της χύτευσης. Η SLM παρουσιάζει χαμηλότερη συνολική εφαρμογή από τη CST. Στα άγκιστρα, η HM δίνει χαμηλότερη και η H-MIL υψηλότερη συνολική εφαρμογή έναντι της CST. Ως προς την εφαρμογή μεταξύ των AM+CST και C-CST δεν μπορεί να συναχθεί συμπέρασμα.
 16. Τα DMLS/SLS/SLM κράματα Co-Cr παρουσιάζουν παρόμοια ή καλύτερη βιοσυμβατότητα από τα CST.



17. Τα DMLS/SLS/SLM κράματα Co-Cr παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση στη διάβρωση από τα CST. Η καλή αντίσταση στη διάβρωση επιτυγχάνεται χάρη στη παθητικοποίηση, αν και μπορεί να υπάρχουν δομικές μεταβολές μεταξύ των φάσεων, τάσεις μετανάστευσης στοιχείων, και μικρή ποσότητα απελευθέρωσης ιόντων (κυρίως Co). Η αντίσταση στη διάβρωση είναι πολυπαραγοντική. Η χρήση δισκίων υποχλωριώδους νατρίου 0,05 % και κιτρικού οξέος καλό είναι να αποφεύγονται για τον καθαρισμό ενός CST σκελετού.
18. Η PBF δίνει μεγαλύτερη ικανοποίηση στους ασθενείς έναντι της CST. Ταχύτερη είναι: η HM από την MIL και SLM, η SLM από την AM+CST και εκείνη από τη C-CST. Το αρχικό κόστος στην SLM είναι υψηλό όμως το συνολικό είναι χαμηλότερο της CST και MIL. Στην HM το κόστος είναι σχετικά χαμηλό και είναι οικονομικά αποδοτικότερη από την MIL και την SLM. Η MIL υστερεί έναντι των PBF και HM λόγω της δυσκολίας κατασκευής πολύπλοκων σχημάτων, απόρριψης μεγάλων ποσοτήτων περίσσειας υλικού και της εξάρτησης της ακρίβειας από τα εργαλεία κοπής.
19. Η επιφανειακή επεξεργασία του κράματος με αμμοβολή, ηλεκτρολυτική χάραξη ή/και με λέιζερ μπορεί να βελτιώσει την συγκόλληση κράματος-ρητίνης. Η σφαιροβολή φαίνεται ευνοϊκότερη της αμμοβολής. Η μηχανική λείανση, η ηλεκτροστύλβωση και η μηχανική στύλβωση, βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα της επιφάνειας και τις ιδιότητες των κραμάτων. Η τεχνική PBF περιλαμβάνει διαφορετικά στάδια με παρόμοια μεθοδολογία, όμως με περισσότερη λείανση και στύλβωση από τη μέθοδο CST.
20. Η κάμψη σύρματος δεν αποτελεί μια ασφαλή μέθοδο για την κατασκευή αγκίστρων, ιδίως για μόνιμες αποκαταστάσεις.
21. Δεν υπάρχει ιδανικό υλικό για την κατασκευή ολόκληρου του σκελετού ή τμημάτων του. Έχουν δοκιμαστεί πολλά υλικά, μεταλλικά και μη, κάθε ένα από τα οποία παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του σε σχέση με το Co-Cr. Πάντως, τα νέα υλικά έχουν αυξήσει την πιθανότητα νέων επιλογών θεραπείας και ροών εργασίας.



Οι δυνατότητες μελέτης, ανάλυσης και σύγκρισης των κραμάτων Co-Cr δεν έχουν εξαντληθεί ακόμη. Μερικές προτάσεις για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσαν να είναι:

1. Η δομή και οι ιδιότητες σκελετών-δοκιμίων από σκόνες αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο. με άγκιστρα (π.χ. EOS-RPD, BEGO-WIRONIUM® RP).
2. Η δομή και οι ιδιότητες στην υβριδική επεξεργασία και στη σκληρή κοπή όχι σε μεμονωμένα τμήματα αλλά σε πλήρη σκελετό.
3. Οι ιδιότητες κάμψης στην SLM και οι ιδιότητες εφελκυσμού στην DMLS/SLS συγκριτικά με την CST.
4. Η μακροζωία, δηλαδή τα μακροχρόνια ποσοστά επιβίωσης, και γενικώς η μακροπρόθεσμη απόδοση σε κλινικό περιβάλλον των κραμάτων, ιδίως των ψηφιακών.
5. Η μακροχρόνια, πάνω από 5 έτη, αντίσταση στη διάβρωση και απελευθέρωση ιόντων σε όλες τις μεθόδους κατασκευής και η επίδραση αυτής στις ιδιότητες, ιδίως στη βιοσυμβατότητα. Η διερεύνηση της ερεθιστικότητας και της πλάκας/ουλίτιδας των DMLS και SLS κραμάτων.
6. Η πιστότητα, η αναπαραγωγιμότητα, και η ακρίβεια για όλες τις τεχνικές. Η εφαρμογή για τις τεχνικές SLS και DMLS. Η περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμογής μεταξύ C-CST και AM+CST.
7. Γενικώς, συγκρίσεις μεταξύ των DMLS/SLS/DMLM/SLM/HM, καθώς οι περισσότερες μελέτες αφορούν τη σύγκριση τους έναντι της CST.
8. Το σύνολο των πιθανών αντιδράσεων με το SiO₂ ή γενικώς άλλων πιθανών αντιδράσεων κατά τη χύτευση. Ακόμη, η διερεύνηση της σχέσης των πυροχωμάτων, ταχείας χύτευσης (πέραν των συμβατικών) και εκείνων της τεχνικής AM+CST, με τα κράματα.
9. Ο συνδυασμός επαγωγική τήξης (με κενό, αργόν ή αέρα) που δίνει τις συνολικά καλύτερες ιδιότητες ενός χυτού σκελετού.
10. Η καθιέρωση ενός κοινού πρωτοκόλλου σχετικά με τον μέγιστο αριθμό επαναχυτεύσεων και την αναλογία παλαιού-νέου κράματος. Η επίδραση των θερμικών κατεργασιών σε επαναχυτευμένα κράματα. Η περαιτέρω διερεύνηση της επαναχύτευσης πλεονάσματος κράματος σκληρής κοπής.
11. Όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία PBF, όπως ο προσανατολισμός κατασκευής στις 30° και στις 60°, η επανάτηξη της επιφάνειας, η θερμοκρασία της προθερμασμένης κλίνης σκόνης, ο ρυθμός θέρμανσης, το μήκος κύματος και η πηγή λέιζερ.
12. Όλοι οι τύποι της θερμικής κατεργασίας σχετικά με τον καθορισμό παραμέτρων που επιφέρουν οφέλη στο σύνολο των ιδιοτήτων των CST κραμάτων.



13. Η ανεύρεση των ιδανικών συνθήκων θερμικής κατεργασίας στα κράματα PBF για την μείωση της ανισοτροπίας και την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων ιδίως στην αντοχή στη κόπωση. Η περαιτέρω διερεύνηση θερμικής κατεργασίας στα κράματα HM.
14. Η μεγαλύτερη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της σφαιροβολής. Η πειραματική επιβεβαίωση των υποσχέσεων της «ξηρής» ηλεκτροστίλβωσης. Η διερεύνηση και βελτιστοποίηση της στίλβωσης με λέιζερ. Η επιφανειακή επεξεργασία του κράματος CST και ιδίως του PBF για τη βελτίωση συγκόλλησης κράματος – υλικού βάσης (εξέταση κραμάτων σε σχέση με: θερμοπολυμεριζόμενη βάση, με ψηφιακή κατασκευή βάσης, με άλλα υλικά πλην του PMMA). Οι μεταβολές της επιφάνειας του κράματος PBF σε κάθε στάδιο τελικής επεξεργασίας.
15. Η σύγκριση του Co-Cr με το τιτάνιο ιδίως των ψηφιακών μεθόδων κατασκευής. Η σύγκριση του Co-Cr με: τα θερμοπλαστικά πολυμερή (πέραν του πολυπροπυλενίου που έχει δοκιμαστεί) ενισχυμένα με ίνες (πέραν των ινών υάλου που έχουν δοκιμαστεί), το PEEK, το PEKK, το AKP, τη ζιρκόνια και τα υβριδικά κεραμικά. Η σύγκριση του κράματος Co-Cr με σκελετούς που συνδυάζουν περισσότερα από ένα υλικά σε διαφορετικά τμήματα. Η σύγκριση του Co-Cr που έχει υποστεί επεξεργασία με κάποια ψηφιακή μέθοδο, με όλα τα υλικά κατασκευής.
16. Ο συνδυασμός κράματος Co-Cr με άλλα υλικά, σε έναν ενιαίο σκελετό.



1. Γιαννικάκης: Εργαστήριο ολικών οδοντοστοιχιών. 2η Έκδοση. Εκδόσεις Ανοιχτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Αθήνα 2018: Σελ 1.
2. Saeed F, Muhammad N, Khan AS, Sharif F, Rahim A, Ahmad P, Irfan M: Prosthodontics dental materials: From conventional to unconventional. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl 2020;106:110167.
3. Chang TL, Orellana D, Beumer III J: Kratochvil's fundamentals of removable partial dentures. Quintessence Publishing Co. Berlin 2019: Pp 1-3, 97-99, 101-127.
4. Προμπονάς Α, Βλησίδης Δ: Μερικές οδοντοστοιχίες σύγχρονες εργαστηριακές τεχνικές κατασκευής. Εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης. Αθήνα 2011: Σελ 1-53, 115-178, 198-215.
5. Δημητρίου Π, Πολυζώης Γ, Σταυράκης Γ, Ζήσης Α: Κινητή Προσθετική. Μερικές οδοντοστοιχίες. Εκδόσεις Μπονισέλ. Αθήνα 2008: Σελ 21, 33-73.
6. Al-Hiyasat AS, Bashabsheh OM, Darmani H: An investigation of the cytotoxic effects of dental casting alloys. Int J Prosthodont 2003;16(1):8-12.
7. Βανάκα Ε: Κράματα Cr-Co για μερικές οδοντοστοιχίες. Διπλωματική εργασία. Αθήνα: Σελ 1-37.
8. Κωτσιομύτη Ε: Προσθετική αποκατάσταση με κινητές μερικές οδοντοστοιχίες – διάγνωση, σχεδιασμός, κατασκευή, παρακολούθηση. Εκδόσεις Κάλλιπος; Αθήνα 2015: Σελ 1-22.
9. Al Jabbari YS: Physico-mechanical properties and prosthodontic applications of Co-Cr dental alloys: a review of the literature. J Adv Prosthodont 2014;6(2):138-145.
10. Roach M: Base metal alloys used for dental restorations and implants. Dent Clin North Am 2007;51(3):603-627.
11. Alifui-Segbaya F, Williams RJ, George R: Additive manufacturing: A novel method for fabricating cobalt-chromium removable partial denture frameworks. Eur J Prosthodont Restor Dent 2017;25(2):73-78.
12. Eggbeer D, Bibb R, Williams R: The computer-aided design and rapid prototyping fabrication of removable partial denture frameworks. Proc Inst Mech Eng Pt H J Eng Med 2005;219(3):195-202.
13. Williams RJ, Bibb R, Eggbeer D, Collis J: Use of CAD/CAM technology to fabricate a removable partial denture framework. J Prosthet Dent 2006;96(2):96-99.
14. Προμπονάς Α: Συνδυασμένη προσθετική. Σύνδεσμοι ακριβείας-τηλεσκοπικά συστήματα. Εκδόσεις Κάλλιπος. Αθήνα 2015: Σελ 23-31, 161-166.
15. Ucar Y, Ekren O: Effect of layered manufacturing techniques, alloy powders, and layer thickness on mechanical properties of Co-Cr dental alloys. J Prosthet Dent 2018;120(5):762-770.



16. Doh SJ, Cho JH: Prosthetic treatment for patient with congenital bilateral cleft lip and palate to close oro-nasal communication using maxillary double crown and clasp retained removable denture. *J Korean Acad Prosthodont* 2019;57(1):18-23.
17. Ha SJ, Cho JH: Hybrid telescopic double crown denture on maxillary few remaining teeth and 2 mandibular implants in case of failed implant overdenture. *J Korean Acad Prosthodont* 2016;54(3):246-252.
18. Bego – Non-precious metal denture alloys. <https://www.bego.com/>.
19. Takaichi A, Fueki K, Murakami N, Ueno T, Inamochi Y, Wada J, Arai Y, Wakabayashi N: A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base. *J Prosthodont Res* 2021; 65:1-13.
20. Lekha K, Savitha NP, Roseline M, Nadiger RK: Acetal resin as an esthetic clasp material. *J Inter Dent* 2012;2(1):11-14.
21. Prajwala N, Kumar CR, Sujesh M, Rao DC, Pavani L: Denture base reinforcing materials - A review. *Ann Prosthodont Restor Dent* 2020;6(2):52-59.
22. Kim JJ: Revisiting the removable partial denture. *Dent Clin North Am* 2019;63(2):263-278.
23. Nishiyama H, Taniguchi A, Tanaka S, Baba K: Novel fully digital workflow for removable partial denture fabrication. *J Prosthodont Res* 2020;64(1):98-103.
24. Hems E, Knott N: 3D printing in prosthodontics. *Fac Dent J* 2014;5(4):152-157.
25. Husain NA, Özcan M, Schimmel M, Abou-Ayash S: A digital cast-free clinical workflow for oral rehabilitation with removable partial dentures: A dental technique. *J Prosthet Dent* 2020;123(5):680-685.
26. Oh KC, Jeon J, Kim JH: Fabrication of a removable partial denture combining conventional and digital techniques. *J Prosthet Dent* 2020;125(4):588-591.
27. Bilgin MS, Baytaroglu EN, Erdem A, Dilber E: A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication. *Eur J Dent* 2016;10(2):286-291.
28. Maryod WH, Taha RE: Retention of removable partial denture fabricated by digital designing and 3D printing technology - A Cross Over Study. *Adv Dent & Oral Health* 2019; 10(3): 555789.
29. Songwatcharaporn A, Nagaviroj N, Kanchanasavita W: A preliminary study on fit accuracy of removable partial denture frameworks fabricated digitally and conventionally using the micro-CT. *M Dent J* 2019;39(2):135-142.
30. Tasaka A, Shimizu T, Kato Y, Okano H, Ida Y, Higuchi S, Yamashita S: Accuracy of removable partial denture framework fabricated by casting with a 3D printed pattern and selective laser sintering. *J Prosthodont Res* 2020;64(2):224-230.
31. Pereira AL, de Medeiros AK, de Sousa Santos K, de Almeida ÉO, Barbosa GA, Carreiro AD: Accuracy of CAD-CAM systems for removable partial denture framework fabrication: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2020;125(2):241-248.
32. Carr A, Brown D: McCracken's Removable Partial Prosthodontics. 13th Edition. St Louis, Mo: Mosby, 2015: Pp 1-392.
33. Tamimi F, Hirayama H: Digital restorative dentistry. A guide to materials, equipment, and clinical procedures. Springer Publications. Switzerland 2019: pp 61-115.



34. Tasaka A, Kato Y, Odaka K, Matsunaga S, Goto TK, Abe S, Yamashita S: Accuracy of clasps fabricated with three different cad/cam technologies: casting, milling, and selective laser sintering. *Int J Prosthodont* 2019;32(6):526-529.
35. Ohkubo C, Sato Y, Nishiyama Y, Suzuki Y: Titanium removable denture based on a one-metal rehabilitation concept. *Dent Mater* 2017;36(5):517-523.
36. Oleszek-Listopad J, Sarna-Bos K, Szabelska A, Czelej-Piszcz E, Borowicz J, Szymanska J: The use of gold and gold alloys in prosthetic dentistry - A literature review. *Curr Issues Pharm Med Sci* 2015;28(3):192-195.
37. Μουχταρίδη Χ: Συγκριτική μελέτη της αντοχής του μεταλλοκεραμικού δεσμού μεταξύ οδοντιατρικής πορσελάνης αστρίων και οδοντιατρικών κραμάτων Co-Cr με διαφορετικές τεχνικές κατασκευής των μεταλλικών υποστρωμάτων. Διπλωματική εργασία. Αθήνα 2019: Σελ 1-91.
38. Παναγιωτούνη Ε: Πυροχώματα φωσφορικού τύπου – γραμμικές μεταβολές κατά την πήξη στο περιβάλλον και την υγροσκοπική πήξη. Πειραματική μελέτη. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη 1991: Σελ 19-29, 64, 66.
39. Allan FC, Asgar K: Reaction of cobalt-chromium casting alloy with investment. *J Dent Res* 1966;45(5):1516-1528.
40. Reimann Ł, Dobrzański LA: Influence of the casting temperature on dental Co-base alloys properties. *Arch Mate Sci Eng* 2013;60(1):5-12.
41. Mutschler M, Schweitzer F, Spintzyk S, Geis-Gerstorfer J, Huettig F: Retention forces of prosthetic clasps over a simulated wearing period of six years in-vitro: direct metal laser melting versus dental casting. *Materials (Basel)* 2020;13(23):5339.
42. Yamaki R, Zhang Z, Hotta Y, Tamaki Y, Miyazaki T: Investigation of the sol-gel process with experimental paste-type dental phosphate-bonded investments. *Dent Med Res* 2011;31(2):123-129.
43. Scrimgeour SN, Chudek JA, Lloyd CH: The determination of phosphorus containing compounds in dental casting investment products by ³¹P solid-state MAS-NMR spectroscopy. *Dent Mater* 2007;23(4):415-424.
44. Darvell BW: *Materials Science for Dentistry*. 10th edition. Woodhead Publishing. United Kingdom 2018: Pp 478-480.
45. Narowska-Sobieraj A, Myszk D: Comparison of some properties of selected Co-Cr alloys used in dental prosthetics. *J Manuf Technol Manag* 2017;42(3):25-32.
46. Porojan L, Savencu CE, Topală FI, Porojan SD: Surface texture and hardness of dental alloys processed by alternative technologies. *J Phys Conf Ser* 2017;885(1):012004.
47. Alageel O: Optimization of removable partial dentures using digital technologies. Thesis. Canada 2019: Pp 1-252.
48. Davoudinejad A, Pérez LCD, Quagliotti D, Pedersen DB, García JA, Yagüe-Fabra JA, Tosello G: Geometric and feature size design effect on vat photopolymerization micro additively manufactured surface features. *Proc Struc Int* 2018;131250-1255.
49. Mohamed Ali SA, Jagadesan N, Mohamed Ifthikar SS, Debasish Basak FH: Evaluation of internal and marginal fit of two metal ceramic system-In vitro study. *J Clin Diagn Res* 2014;8(12):ZC53-ZC56.
50. Han X, Sawada T, Schille C, Schweizer E, Scheideler L, Geis-Gerstorfer J, Rupp F,



- Spintzyk S: Comparative analysis of mechanical properties and metal-ceramic bond strength of Co-Cr dental alloy fabricated by different manufacturing processes. *Materials (Basel)* 2018;11(10):1801.
51. Alageel O, Abdallah MN, Alsheghri A, Song J, Caron E, Tamimi F: Removable partial denture alloys processed by laser-sintering technique. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2018;106(3):1174-1185.
 52. Dikova T: Properties of Co-Cr dental alloys fabricated using additive technologies. *Biomaterials in Regenerative Medicine*. Intechopen publication. 2018: Pp 141-159.
 53. Σταθόπουλος ΑΑ: Οδοντιατρικά υλικά. Εκδόσεις Παρισσιανού. Αθήνα 1987: Σελ 93-99.
 54. Han W, Fang F: Investigation of electrochemical properties of electropolishing Co-Cr dental alloy. *J Appl Electrochem* 2020;50(3):367-381.
 55. Dąbrowa T, Majstrzyk W, Tamulewicz M, Piasecki T, Kunicki P, Więckiewicz W, Gotszalk T: Analysis of the electrolytically polished skeletal dentures surfaces using various nano-and microscopic technologies. *Acta Bioeng Biomech* 2019;21(4):123-129.
 56. Ponto-Wolska M, Wagner L: Assessment of the influence of selected electrolytic polishing process parameters on the surface roughness of casts made of the CoCrMo alloy. *Dent Med Probl* 2018;55(4):395-398.
 57. Țălu F, Stach S, Klaić B, Celebić A: Evaluation of topographical Co-Cr-Mo alloy surface changes after various finishing treatments. *Acta stomatol Croat* 2019;53(3):264-273.
 58. Perveen A, Molardi C, Fornaini C: Applications of laser welding in dentistry: A State-of-the-Art Review. *Micromachines (Basel)* 2018;9(5):209.
 59. Bange AA, Phoenix RD, Duncan R: Gold alloy cast to base metal removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent* 1994;72(2):137-140.
 60. Οικονόμου Π: Κινητές μερικές οδοντοστοιχίες. Εκδόσεις Παρισσιανού Μαρία Γρ; Αθήνα 2000: Σελ 203-215.
 61. Kim HR, Jang SH, Kim YK, Son JS, Min BK, Kim KH, Kwon TY: Microstructures and mechanical properties of Co-Cr dental alloys fabricated by three CAD/CAM-Based processing techniques. *Materials (Basel)* 2016;9(7):596.
 62. Philip GB, Jhamb M, George E, Jhamb R: Titanium and its role in Dentistry. *Int J Sci Res* 2017;7(5):602-608.
 63. Tribst JP, Dal Piva AM, Borges AL, Araújo RM, da Silva JM, Bottino MA, Kleverlaan CJ, de Jager N: Effect of different materials and undercut on the removal force and stress distribution in circumferential clasps during direct retainer action in removable partial dentures. *Dent Mater* 2020;36(2):179-186.
 64. Mutto JC, Sato TP, da Silva JM, Borges AL, Uemera ES: Retentiveness comparison of individual clasps made from polyamide, acetate resin and cobalt-chrome for removable partial dentures. *Braz Dent Sci* 2019;22(4):483-487.
 65. Pradusha R, Sajjan S, Ramaraju AV, Nair CK. A study on flexible dentures. *Trends in Prosthodontics and Dental Implantology*. 2020 Apr 15;10(1 & 2):12-9.
 66. Sun F, Shen X, Zhou N, Gao Y, Guo Y, Yang X, Wu G: A speech bulb prosthesis for a soft palate defect with a polyetherketoneketone (PEKK) framework fabricated by



- multiple digital techniques: A clinical report. *J Prosthet Dent* 2020;124(4):495-499.
67. Marie A, Keeling A, Hyde TP, Nattress BR, Pavitt S, Murphy RJ, Shary TJ, Dillon S, Osnes C, Wood DJ: Deformation and retentive force following in vitro cyclic fatigue of cobalt-chrome and aryl ketone polymer (AKP) clasps. *Dent Mater* 2019;35(6):113-121.
68. Peng TY, Shimoe S, Tanoue N, Akebono H, Murayama T, Satoda T: Fatigue resistance of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal clasps for removable partial dentures. *Eur J Oral Sci* 2019;127(2):269-275.
69. Tokue A, Hayakawa T, Ohkubo C: Fatigue resistance and retentive force of cast clasps treated by shot peening. *J Prosthet Dent* 2013;57(3):186-194.
70. Sadek SA, Dehis WM, Hassan H: Comparative study clarifying the most suitable material to be used as partial denture clasps. *Open Access Maced J Med Sci* 2018;6(6):1111-1119.
71. Ardelean L, Bortun CM, Podariu AC, Rusu LC: Thermoplastic resins used in dentistry. *Thermoplastic elastomers. Synthesis and applications. IntechOpen Publicatons*. 2015: Pp 145-167.
72. Tannous F, Steiner M, Shahin R, Kern M: Retentive forces and fatigue resistance of thermoplastic resin clasps. *Dent Mater* 2012;28(3):273-278.
73. Pai SA, Kumari S, Umamaheswari B, Jyothi M, Lakshmi CS: Polyetheretherketone in prosthodontics – A review. *J Adv Clin Res Insights* 2019;6(1):24-26.
74. Elmoutawakkil N, Bellemkhannate S: The applications of polyether-ether-ketone (peek) in dentistry: systematic review. *Am J Innov* 2020;11(1-4):192-199.
75. Solvay – Solvay Dental 360. <https://www.solvay.com/en/solvaydental360>.
76. Urano S, Hotta Y, Miyazaki T, Baba K: Bending properties of Ce-TZP/A nanocomposite clasps for removable partial dentures. *Int J Prosthodont* 2015;28(2):191-197.
77. Sampaio-Fernandes M, Campos S, Galhardo J, Oliveira S, Reis-Campos JC, Figueiral MH: Thermoplastic Materials for Infrastructures in Prosthodontic Rehabilitation: A Review. In *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Vision and Medical Image Processing*. Springer publications. 2019: Pp 606-614.
78. Kishita C, Nishi Y, Tsuru K, Maruyama H: Application of a glass fiber-reinforced composite material to clasps: study on adhesive method of veneering composite. *Prosthodont Res Pract* 2008;7(2):141-143.
79. Nagakura M, Tanimoto Y, Nishiyama N: Development of a laboratory glass fiber-reinforced thermoplastic for removable partial dentures. *Int J Oral-Med Sci* 2016;15(1):1-9.
80. Abdel-Rahim N, El-Fattah FA, El-Sheikh MM. Laboratory comparative study of three different types of clasp materials. *Tanta Dent J* 2016;13(1):41-49.
81. Walczak M, Beer K, Surowska B, Borowicz J: The issue of using remelted CoCrMo alloys in dental prosthetics. *Arch Civ Mech Eng* 2012;12(2):171-177.
82. Bortun CM, Ghiban B, Ghiban N, Ardelean L, Rusu LC: Surface Characterization of Some CoCrMo Alloys Used in RPD Technology. *Rev Chim* 2012;63(9):906-910.
83. Thompson GA, Luo Q, Hefti A: Analysis of four dental alloys following torch/centrifugal and induction/vacuum-pressure casting procedures. *J Prosthet Dent*



- 2013;110(6):471-480.
84. Malara P, Gołombek K, Szczęsna M: Metallographic research of selected alloys used in dentistry. *J Achiev Mater Manuf Eng* 2015;73(2):65-71.
 85. Szala M, Beer-Lech K, Gancarczyk K, Kilic O, Pędrak P, Özer A, Skic A: Microstructural characterisation of Co-Cr-Mo casting dental alloys. *Adv Sci Technol Res J* 2017;11(4):76-82.
 86. Porojan S, Bîrdeanu M, Savencu C, Porojan L: Structural and morphological approach of Co-Cr dental alloys processed by alternative manufacturing technologies. *J Phys Conf Ser* 2017;885(1):012005.
 87. Dimić I, Cvijović-Alagić I, Obradović N, Petrović J, Putić S, Rakin M, Bugarski B: In vitro biocompatibility assessment of Co-Cr-Mo dental cast alloy. *J Serb Chem Soc* 2015;80(12):1541-1552.
 88. Konieczny B, Szczesio-Włodarczyk A, Sokolowski J, Bociong K: Challenges of Co-Cr Alloy additive manufacturing methods in dentistry-the current state of knowledge (systematic review). *Materials* 2020;13(16):3524.
 89. Loch J, Krzykała A, Łukaszczyk A, Augustyn-Pieniążek J: Corrosion resistance and microstructure of recasting cobalt alloys used in dental prosthetics. *Arch Foundry Eng* 2017;17(2):63-68.
 90. Baciú ER, Baciú C, Bosînceanu DG, Baciú MA, Bosînceanu DN, Baciú M, Bulancea B: Influence of electrochemical corrosion tests in an artificial environment on the chemical composition of a Co-Cr-Mo dental alloy. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;400(2):022008.
 91. Ghiban A, Ghiban B, Borşun CM, Ghiban N, Antoniac I: Heat treatments influence on corrosion resistance of some new dental cobalt alloys. *Solid State Phenom* 2012;188:93-97.
 92. Tuna HS, Karaca E, Aslan İ, Pekkan G, Pekmez NÖ: Evaluation of corrosion resistance of Co-Cr alloys fabricated with different metal laser sintering systems. *J adv prosthodont* 2020;12(3):114.
 93. Beer-Lech K, Surowska B, Pałka K, Walczak M: Analysis of the carbon content effect on the microstructure and thermal behavior of cobalt-matrix dental alloy. *Int J Met* 2019;14:528-537.
 94. Yamanaka K, Mori M, Torita Y, Chiba A: Impact of minor alloying with C and Si on the precipitation behavior and mechanical properties of N-doped Co-Cr alloy dental castings. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 2018;92:112-120.
 95. Augustyn-Pieniążek J, Wilkosz K. Qualitative assessment of the defects in metal casting prosthetic restorations. *Arch Foundry Eng* 2014;14:7-12.
 96. Alifui-Segbaya F, Evans J, Eggbeer D, George R: Clinical relevance of laser-sintered cobalt-chromium alloys for prosthodontic treatment: a review. *Proc of the Intl Conf on Progress Addit Manuf* 2014;115-120.
 97. Yan X, Lin H, Wu Y, Bai W: Effect of two heat treatments on mechanical properties of selective-laser-melted Co-Cr metal-ceramic alloys for application in thin removable partial dentures. *J Prosthet Dent* 2018;119(6):1028.e1-1028.e6.
 98. Celebic A, Svetlicic V, Malina J, Klaić B: Co-Cr-Mo alloy surface features and composition prior and after mechanical polishing and corrosion in fluids simulating



- oral conditions. *Biomaterials developments and applications*. Nova Science Publishing; New York 2010: 415-433.
99. Xin XZ, Xiang N, Chen J, Wei B: In vitro biocompatibility of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting or traditional casting techniques. *Mater Lett* 2012;88(1):101-103.
 100. Mercieca S, Caligari Conti M, Buhagiar J, Camilleri J: Assessment of corrosion resistance of cast cobalt- and nickel-chromium dental alloys in acidic environments. *J Appl Biomater Funct Mater* 2018;16(1):47-54.
 101. Kacprzyk B, Szymczak T, Gumieny G, Klimek L: Effect of the remelting on transformations in Co-Cr-Mo prosthetics alloy. *Arch Foundry Eng* 2013;13(3):47-50.
 102. Kaiser R, Williamson K, O'Brien C, Ramirez-Garcia S, Browne DJ: The influence of cooling conditions on grain size, secondary phase precipitates and mechanical properties of biomedical alloy specimens produced by investment casting. *J Mech Behav Biomed* 2013;24:53-63.
 103. Ghiban A, Buzatu M, Bortun CM, Ghiban B, Serban N: Laser welding optimization procedure applied to cobalt alloys for removable partial dentures. *Adv Mat Res* 2015;1114:272-277.
 104. Yamanaka K, Mori M, Chiba A: Assessment of precipitation behavior in dental castings of a Co-Cr-Mo alloy. *J Mech Behav Biomed Mater* 2015;50:268-276.
 105. Yager S, Ma J, Ozcan H, Kilinc HI, Elwany A, Karaman I: Mechanical properties and microstructure of removable partial denture clasps manufactured using selective laser melting. *Addit Manuf* 2015;8:117-123.
 106. Puskar T, Jevremovic D, Williams RJ, Eggbeer D, Vukelic D, Budak I: A comparative analysis of the corrosive effect of artificial saliva of variable ph on dmls and cast Co-Cr-Mo dental alloy. *Materials (Basel)* 2014;7(9):6486.
 107. Augustyn-Nadzieja J, Szczotok A: The influence of prosthetic elements manufacturing technology on properties and microstructure shaping Co-Cr-Mo alloys. *Eng Biomat* 2020;56:24-31.
 108. Vitalariou A, Leata R, Chelariu R, Munteanu C, Cimpoesu R, Iie M, Comanesi R, Moisei M: Influence of the casting conditions on the structure and properties of a Co-Cr-Mo dental alloy. *Rev Chim (Bucharest)* 2015;66(12):2147-2151.
 109. Baci ER, Grădinaru I, Baci M, Forna NC: Considerations regarding the balance structure of Co-Cr-Mo alloys for removable partial denture. *Mat Enj* 2012;58:92-98.
 110. Kang HG: Dental Co-Cr alloys fabricated by selective laser melting: A review article. *J Korean Acad Prosthodont* 2021;59(2):248-260.
 111. Takaichi A, Nakamoto T, Joko N, Nomura N, Tsutsumi Y, Migita S, Doi H, Kurosu S, Chiba A, Wakabayashi N, Igarashi Y, Hanawa T: Microstructures and mechanical properties of Co-29Cr-6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. *J Mech Behav Biomed* 2013;21:67-76.
 112. Torii M, Nakata T, Takahashi K, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C: Fitness and retentive force of cobalt-chromium alloy clasps fabricated with repeated laser sintering and milling. *J Prosthodont Res* 2018;62(3):342-346.
 113. Xie W, Zheng M, Wang J, Li X: The effect of build orientation on the microstructure and properties of selective laser melting Ti-6Al-4V for removable partial denture



- clasps. *J Prosthet Dent* 2020;123(1):163-172.
114. Aarts JM, Choi JJ, Metcalfe S, Bennani V. Influence of build angulation on the mechanical properties of a direct-metal laser-sintered cobalt-chromium used for removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent* 2020;S0022-3913(20)30423-6.
115. Kajima Y, Takaichi A, Nakamoto T, Kimura T, Yogo Y, Ashida M, Doi H, Nomura N, Takahashi H, Hanawa T, Wakabayashi N: Fatigue strength of Co-Cr-Mo alloy clasps prepared by selective laser melting. *J Mech Behav Biomed Mater* 2016;59:446-458.
116. Zhou Y, Sun Q, Dong X, Li N, Shen ZJ, Zhong Y, Eriksson M, Yan J, Xu S, Xin C: Microstructure evolution and mechanical properties improvement of selective laser melted Co-Cr biomedical alloys during subsequent heat treatments. *J Alloys Compd* 2020;840:1556.
117. Alageel O, Alsheghri AA, Algezani S, Caron E, Tamimi F: Determining the retention of removable partial dentures. *J Prosthet Dent* 2019;122(1):55-62.
118. Schweiger J, Güth JF, Erdelt KJ, Edelhoff D, Schubert O: Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt–chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering. *J Prosthodont Res* 2020;64(2):210-216.
119. Revilla-León M, Meyer MJ, Özcan M. Metal additive manufacturing technologies: literature review of current status and prosthodontic applications. *Int J Comput Dent* 2019;22(1):55-67.
120. Al Jabbari YS, Barmpagadaki X, Psarris I, Zinelis S: Microstructural, mechanical, ionic release and tarnish resistance characterization of porcelain fused to metal Co–Cr alloys manufactured via casting and three different CAD/CAM techniques. *J Prosthodont Res* 2019;63(2):150-156.
121. Padrós R, Giner-Tarrida L, Herrero-Climent M, Punset M, Gil FJ: Corrosion resistance and ion release of dental prosthesis of CoCr obtained by CAD-CAM milling, casting and laser sintering. *Metals* 2020;10(6):827-839.
122. Krug KP, Knauber AW, Nothdurft FP: Fracture behavior of metal-ceramic fixed dental prostheses with frameworks from cast or a newly developed sintered cobalt-chromium alloy. *Clin Oral Investig* 2015;19(2):401-411.
123. Øilo M, Nesse H, Lundberg OJ, Gjerdet NR: Mechanical properties of cobalt-chromium 3-unit fixed dental prostheses fabricated by casting, milling, and additive manufacturing. *J Prosthet Dent* 2018;120(1):156.e1-156.e7.
124. Borsa PC, Markezan M, May LG, Braun KO: Surface change assessment of Co-Cr alloy subjected to immersion in denture cleansers. *Braz J Oral Sci* 2017;15(3):196-200.
125. Tǎlu Ş, Stach S, Klaić B, Mišić T, Malina J, Čelebić A: Morphology of Co-Cr-Mo dental alloy surfaces polished by three different mechanical procedures. *Microsc Res Techniq* 2015;78(9):831-839.
126. Ramamoorthi M, Khuraif AA: A Comparative evaluation of fatigue behavior of removable partial denture alloys with and without heat treatment. *Int J Dent Clin* 2011;3(1):14-17.
127. Nakata T, Shimpo H, Ohkubo C: Clasp fabrication using one-process molding by



- repeated laser sintering and high-speed milling. *J Prosthodont Res* 2017;61(3):276-282.
128. Kittikundecha N, Kajima Y, Takaichi A, Cho HH, Htat HL, Doi H, Takahashi H, Hanawa T, Wakabayashi N: Fatigue properties of removable partial denture clasps fabricated by selective laser melting followed by heat treatment. *J Mech Behav Biomed Mater* 2019;98:79-89.
129. Lövgren N, Roxner R, Klemendz S, Larsson C: Effect of production method on surface roughness, marginal and internal fit, and retention of cobalt-chromium single crowns. *J Prosthet Dent* 2017;118(1):95-101.
130. Kassapidou M, Hjalmarsson L, Johansson CB, Johansson PH, Morisbak E, Wennerberg A, Stenport VF: Cobalt-chromium alloys fabricated with four different techniques: Ion release, toxicity of released elements and surface roughness. *Dent Mater* 2020;36(11):e352-363.
131. Imran Y, Raza M, Khan MS, Hayat Y: Effect of Cobalt-Chromium alloy re-use in dentistry on its castability value. *J Ayub Med Coll Abbottabad* 2017;29(2):270-274.
132. *Dentistry-Metallic Materials for Fixed and Removable Restorations and Appliances. ISO 22674:2016. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2016.*
133. Jevremovic D, Kojic V, Bogdanovic G, Puskar T, Eggbeer D, Thomas D, Williams R: A selective laser melted Co-Cr alloy used for the rapid manufacture of removable partial denture frameworks: Initial screening of biocompatibility. *J Serb Chem Soc* 2011;76(1):43-52.
134. Zhou Y, Li N, Yan J, Zeng Q: Comparative analysis of the microstructures and mechanical properties of Co-Cr dental alloys fabricated by different methods. *J Prosthet Dent* 2018;120(4):617-623.
135. Beer-Lech K, Surowska B: Research on resistance to corrosive wear of dental CoCrMo alloy containing post-production strap. *Eksploatacja i Niezawodność* 2015;17(1):90-94.
136. Qian C, Wu X, Zhang F, Yu W: Electrochemical impedance investigation of Ni-free Co-Cr-Mo and Co-Cr-Mo-Ni dental casting alloy for partial removable dental prosthesis frameworks. *J Prosthet Dent* 2016;116(1):112-118.
137. Turdean GL, Craciun A, Popa D, Constantiniuc M: Study of electrochemical corrosion of biocompatible Co-Cr and Ni-Cr dental alloys in artificial saliva. Influence of pH of the solution. *Mater Chem Phys* 2019;233:390-398.
138. Dragus L, Ghergic DL, Comaneanu RM, Bechir A, Coman C, Botoaca OA: In vitro comparative tests about the biocompatibility of some dental alloys. *Rev Chim* 2019;70(2):610-613.
139. Mukai Y, Torii M, Urushibara Y, Kawai T, Takahashi Y, Maeda N, Ohkubo C, Ohshima T: Analysis of plaque microbiota and salivary proteins adhering to dental materials. *J Oral Biosci* 2020;62(2):182-188.
140. Holm C, Morisbak E, Kalfoss T, Dahl JE: In vitro element release and biological aspects of base-metal alloys for metal-ceramic applications. *Acta Biomater Odontol Scand* 2015;1(2-4):70-75.
141. Puskar T, Lapcevic A, Arandjelovic S, Radulovic S, Budak I, Vukelic DJ, Jevremovic



- D: Comparative study of cytotoxicity of direct metal laser sintered and cast Co-Cr-Mo dental alloy. *Metalurgija* 2015;54(3):481-484.
142. Pan Yu, Jiang L, Lin H, Cheng H. Cell death affected by dental alloys: Modes and mechanisms. *Dent Mater J* 2017;36(1):82-87.
143. Haugli KH, Syverud M, Samuelsen JT. Ion release from three different dental alloys – effect of dynamic loading and toxicity of released elements. *Biomater Investig Dent* 2020;7(1):71-79.
144. Dănăilă E, Bounegru I, Benea L, Chiriac A: Improving biocompatibility of Co-Cr alloy used in dentistry by surface modification with electrochemical methods – corrosion of untreated Co-Cr alloy in solution with different pH. *Ann "Dunarea Jos" Univ Galati, Fascicle IX*2014;37(2):54-59.
145. Tuna SH, Pekmez NÖ, Kürkçüoğlu I: Corrosion resistance assessment of co-cr alloy frameworks fabricated by cad/cam milling, laser sintering, and casting methods. *J Prosthet Dent* 2015;114(5):725-734.
146. Felipucci DN, Davi LR, Paranhos HF, Bezzon OL, Silva RF, Pagnano VO: Effect of different cleansers on the surface of removable partial denture. *Braz Dent J* 2011;22(5):392-397.
147. Zhu YH, Zhang B, Liu YH, Qin F, Li HF, Zheng YF: Fracture analyses of casting framework removable partial dentures. *Beijing Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban* 2012;44(1):80-83.
148. Kim HR, Kim YK, Son JS, Min BK, Kim KH, Kwon TY: Comparison of in vitro biocompatibility of a Co-Cr dental alloy produced by new milling/post-sintering or traditional casting technique. *Mater Lett* 2016;178:300-303.
149. Alifui-Segbaya F, Foley P, Williams RJ: The corrosive effects of artificial saliva on cast and rapid manufacture-produced cobalt chromium alloys. *Rapid Prototyp J* 2013;19(2):95-99.
150. Costea LV, Dan ML, Savencu CE, Porojan L: Comparative study on the corrosion resistance of CAD/CAM and conventional processed Co-Cr dental alloys in NaCl solutions. *IOP Conf Series Mater Sci Eng* 2018;416(1):012047.
151. Jayaprakash K, Shetty HK, Shetty AN, Nandish BT: Effect of recasting on element release from base metal dental casting alloys in artificial saliva and saline solution. *J Conserv Dent* 2017;20(3):199-203.
152. Quazi MM, Ishak M, Fazal MA, Arslan A, Rubaiee S, Aiman MH, Qaban A, Yusof F, Sultan T, Ali MM, Manladan SM: A comprehensive assessment of laser welding of biomedical devices and implant materials: recent research, development and applications. *Crit Rev Solid State Mater Sci* 2021;46(2):109-151.
153. Soltanzadeh P, Suprono MS, Kattadiyil MT, Goodacre C, Gregorius W: An in vitro investigation of accuracy and fit of conventional and CAD/CAM removable partial denture frameworks. *J Prosthodont* 2019;28(5):547-555.
154. Arnold C, Hey J, Schweyen R, Setz JM: Accuracy of CAD-CAM-fabricated removable partial dentures. *J Prosthet Dent* 2018;119(4):586-592.
155. Lee WS, Lee DH, Lee KB: Evaluation of internal fit of interim crown fabricated with CAD/CAM milling and 3D printing system. *J Adv Prosthodont* 2017;9(4):265-270.
156. Bhaskaran E, Azhagarasan NS, Miglani S, Ilango T, Krishna GP, Gajapathi B:



- Comparative evaluation of marginal and internal gap of Co-Cr copings fabricated from conventional wax pattern, 3D printed resin pattern and DMLS tech: an in vitro study. *J Indian Prosthodont Soc* 2013;13(3):189-195.
157. Arora A, Yadav A, Upadhyaya V, Jain P, Verma M: Comparison of marginal and internal adaptation of copings fabricated from three different fabrication techniques: An in vitro study. *J Indian Prosthodont Soc* 2018;18(2):102-107.
158. James AE, Umamaheswari B, Lakshmi CS: Comparative evaluation of marginal accuracy of metal copings fabricated using direct metal laser sintering, computer-aided milling, ringless casting, and traditional casting techniques: An In vitro study. *Contemp Clin Dent* 2018;9(3):421-426.
159. Dayan SC, Kiseri B, Gencel B, Kurt A: Evaluation of the internal and marginal discrepancies of Co-Cr metal copings prepared via CAD/CAM and conventional casting. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2019;27(1):26-31.
160. Gunsoy S, Ulusoy M: Evaluation of marginal/internal fit of chrome-cobalt crowns: Direct laser metal sintering versus computer-aided design and computer-aided manufacturing. *Niger J Clin Pract* 2016;19(5):636-644.
161. Chang HS, Peng YT, Hung WL, Hsu ML: Evaluation of marginal adaptation of Co-Cr-Mo metal crowns fabricated by traditional method and computer-aided technologies. *J Dent Sci* 2019;14(3):288-294.
162. Yang Y, Sim JY, Park JK, Kim WC, Kim HY, Kim JH: Evaluation of the marginal and internal fit of a single crown fabricated based on a three-dimensional printed model. *J Adv Prosthodont* 2018;10(5):367-373.
163. Huang Z, Zhang L, Zhu J, Zhang X: Clinical marginal and internal fit of metal ceramic crowns fabricated with a selective laser melting technology. *J Prosthet Dent* 2015;113(6):623-627.
164. Gürel K, Toksavul SU, Toman MU, Tamac E: In vitro marginal and internal adaptation of metal-ceramic crowns with cobalt-chrome and titanium framework fabricated with CAD/CAM and casting technique. *Niger J Clin Pract* 2019;22(6):812-816.
165. Hong MH, Min BK, Lee DH, Kwon TY: Marginal fit of metal-ceramic crowns fabricated by using a casting and two selective laser melting processes before and after ceramic firing. *J Prosthet Dent* 2019;122(5):475-481.
166. Svanborg P, Hjalmarsson L: A systematic review on the accuracy of manufacturing techniques for cobalt chromium fixed dental prostheses. *Biomater Investig Dent* 2020;7(1):31-40.
167. Chen H, Li H, Zhao Y, Zhang X, Wang Y, Lyu P: Adaptation of removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting. *J Prosthet Dent* 2019;122(3):316-324.
168. Bajunaid S, Altwaim B, Alhassan M, Alammari R: The fit accuracy of removable partial denture metal frameworks using conventional and 3D printed techniques: an In vitro study. *J Contemp Dent Pract* 2019;20(4):476-481.
169. Weber H, Frank G. Spark erosion procedure: a method for extensive combined fixed and removable prosthodontic care. *J Prosthet Dent* 1993;69(2):222-227.
170. Chakmakchi M, Ntasi A, Mueller WD, Zinelis S: Effect of Cu and Ti electrodes on



- surface and electrochemical properties of Electro Discharge Machined (EDMed) structures made of Co-Cr and Ti dental alloys. *Dent Mater* 2021;37(4):588-596.
171. Ohida M, Yoda K, Nomura N, Hanawa T, Igarashi Y: Evaluation of the static frictional coefficients of Co-Cr and gold alloys for cone crown telescope denture retainer applications. *Dent Mater J* 2010;29(6):706-712.
 172. Özyemişci-Cebeci N, Yavuzylmaz H: Comparison of the effects of friction varnish and electroforming on the retention of telescopic crowns. *J Prosthet Dent* 2013;109(6):392-396.
 173. Wagner C, Stock V, Merk S, Schmidlin PR, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B: Comparison of retention forces of different fabrication methods of Co-Cr crowns: pre-sintered and milled, cast and electroforming secondary crowns with different taper angles. *Int J Dent Oral Sci* 2015;2(003):15-20.
 174. Stock V, Schmidlin PR, Merk S, Wagner C, Roos M, Eichberger M, Stawarczyk B: Peek primary crowns with cobalt-chromium, zirconia and galvanic secondary crowns with different tapers-a comparison of retention forces. *Materials (Basel)* 2016;9(3):187.
 175. Zierden K, Kurzrock L, Wöstmann B, Rehmann P: Nonprecious alloy vs precious alloy telescopic crown-retained removable partial dentures: survival and maintenance needs. *Int J Prosthodont* 2018;31(5):459-464.
 176. Arnold C, Hey J, Setz JM, Boeckler AF, Schweyen R: Retention force of removable partial dentures with different double crowns. *Clin Oral Investig* 2018;22(4):1641-1649.
 177. Arnold C, Schweyen R, Boeckler A, Hey J: Retention force of removable partial dentures with CAD-CAM-fabricated telescopic crowns. *Materials* 2020;13(14):3228.
 178. Serra-Prat J, Cano-Batalla J, Cabratosa-Termes J, Figueras-Àlvarez O: Adhesion of dental porcelain to cast, milled, and laser-sintered cobalt-chromium alloys: shear bond strength and sensitivity to thermocycling. *J Prosthet Dent* 2014;112(3):600-605.
 179. Almufleh B, Emami E, Alageel O, de Melo F, Seng F, Caron E, Abi Nader S, Al-Hashedi A, Albuquerque A, Feine J, Tamimi F: Patient satisfaction with laser-sintered removable partial dentures: A crossover pilot clinical trial. *J Prosthet Dent* 2018;119(4):560.
 180. Hitzler L, Alifui-Segbaya F, Williams P, Heine B, Heitzmann M, Hall W, Merkel M, Öchsner A: Additive manufacturing of cobalt-based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties. *Adv Mater Sci Eng* 2018;2018:1-12.
 181. Bauer JR de O, Grande RH, Rodrigues-Filho LE, Pinto MM, Loguercio AD: Does the casting mode influence microstructure, fracture and properties of different metal ceramic alloys?. *Braz Oral Res* 2012;26(3):190-196.
 182. Beer K, Palka K, Surowska B, Walczak M: A Quality assessment of casting dental prosthesis elements. *Ekspluat* 2013;15(3):230-236.
 183. Maruyama H, Nishi Y, Tsuru K, Nagaoka E: Optimum design for glass fiber-reinforced composite clasps using nonlinear finite element analysis. *Dent Mater J* 2011;30(5):626-634.
 184. Jadczyk K, Białek R, Kuchta M: Impact of prosthetic materials manufacturing process



- on the reliability of dentures. *J Konbin* 2018;45(1):183-199.
185. Andruch K: A comparison of force-deflection relationships in half-round dental clasps, in vitro, fabricated by two casting methods. *Dent For* 2013;41(1):13-20.
186. Vaillant-Corroy AS, Corne P, De March P, Fleutot S, Cleymand F: Influence of recasting on the quality of dental alloys: A systematic review. *J Prosthet Dent* 2015;114(2):205-211.
187. Imran M, Hanif A, Babar BZ, Raza HM, Ayub N, Rehman ZU: Effect on hardness of reused cast cobalt chrome alloy using flame centrifuge casting method. *Oral Dent J* 2019;39(4):381-385.
188. Vaillant AS, Corne P, March PD, Fleutot S, Cleymand F, Jiehl JP: Effect of recasting of cobalt-chromium alloy on its mechanical properties. *Eur Cells Mater* 2015;30(5):17.
189. Jain AR: Effect of recasting on the bond strength of porcelain to base metal alloys: A systematic review. *Drug Invent Today* 2018;10(6):932-935.
190. Prabhu S: Evaluation of mechanical properties of recasted dental base alloys for considering their reusability in dentistry and engineering field. *Arch Med Health Sci* 2014;2(2):178-183.
191. Ramamoorthi M: Fatigue behaviour of recasted removable partial denture alloys. *Int dent clin* 2011;3(4):20-22.
192. Amitha GL, Shetty B, Mody PV, Kumar M, Ashwini AD, HV: Comparison and evaluation of the mechanical properties of casted, recasted and combination of cobalt-chromium alloy: an in - vitro study. *Int J Curr Res* 2018;10(2):65024-65027.
193. Nadolski M, Łągiewka M, Konopka Z, Zyska A, Golański G: The influence of remelting on the quality of prosthetic cobalt alloys. *Arch Foundry Eng* 2015;15(3):53-58.
194. Wang YH, Qiu FF, Wu WQ, Cheng H: Effects of recasting in vacuum with argon on the chemical composition of ceramic alloys. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2018;36(2):174-177.
195. Maksimović VM, Stoilković M, Čairović A: Some consequences of repeated casting of Co-Cr dental alloy. *J Serb Chem Soc* 2016;81(11):1307-1319.
196. Abduljabbar MA: Potentiostatic evaluation of Co-Cr alloy after four repeated casting procedure with the addition of 50% new alloy. *EC Dent Sci* 2017;9(4):138-144.
197. Lin HL, Jiang L, Zhang CY, Lin DH, Cheng H: Cytocompatibility of Co-Cr ceramic alloys after recasting. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue* 2017;26(3):246-250.
198. Khalaf HM, Al-Ameer SS, Alsaady AA: The effect of recasting on the fatigue resistance of Co-Cr alloys. *Mustansiria Dent J* 2008;5(2):205-212.
199. Wang YH, Qiu FF, Wu WQ, Cheng H: The effect of recasting on microstructure of dental ceramic alloys. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue* 2018;27(6):585-590.
200. Alrutha MS: Assessment of porcelain fused to metal bond strength after laser surface treatment of recycled cobalt-chromium alloy. *Egypt Dent J* 2020;66(2):1163-1172.
201. Alvarez-Vera M, Hernández-Rodríguez A, Hernández-Rodríguez MA, Juárez Hernández A, Benavides-Treviño JR, García-Duarte JH: Effect of cooling rate during solidification on the hard phases of M23C6-type of cast CoCrMo alloy. *Metalurgija*. 2016;55(3):382-384.



202. Hong MH, Min B, Kwon TY: The influence of process parameters on the surface roughness of a 3D-printed Co-Cr dental alloy produced via selective laser melting. *Appl Sci* 2016;6(12):401.
203. Mosch J, Hoffmann A, Hopp M: Lightening in a bottle-state of the art joining techniques in dental technology part 2. *Contin Educ* 2004;4(1):1-10.
204. Augustyn-Nadzieja J, Pełka S, Loch-Zawrotniak J: The effect of heat treatment on the microstructure and properties of the corrosion resistance of the prosthetic alloy wironit extrahart (Co-Cr-Mo). *Metall Foundry Eng* 2018;44(4):181.
205. Minciună MG, Vizurean P, Achitei DC, Ghiban N, Sandu, AV, Forna NC: Structural characterization of some CoCrMo alloys with medical applications. *Rev Chim (Bucharest)* 2014;65(3):335-338.
206. Takaichi A, Kajima Y, Kittikundecha N, Htat HL, Cho HH, Hanawa T, Yoneyama T, Wakabayashi N: Effect of heat treatment on the anisotropic microstructural and mechanical properties of Co–Cr–Mo alloys produced by selective laser melting. *J Mech Behav Biomed Mater* 2020;102:103496.
207. Kobylinski JV, Hitzler L, Lawitzki R, Kremaszky C, Öchsner A, Werner E: Relationship between phase fractions and mechanical properties in heat-treated laser powder-bed fused Co-Based dental alloys. *Isr J Chem* 2020;60(5-6):1-9.
208. Mengucci P, Barucca G, Gatto A, Bassoli E, Denti L, Fiori F, Girardin E, Bastianoni P, Rutkowski B, Czyrska-Filemonowicz A: Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties of a Co-Cr-Mo-W biomedical alloy produced by laser sintering. *J Mech Behav Biomed Mater* 2016;60:106-117.
209. Tuncdemir AR, Karahan I, Polat S, Malkoc MA, Dalkiz M: The effect of repeated porcelain firings on corrosion resistance of different dental alloys. *J Adv Prosthodont* 2013;5(1):44-50.
210. Kulesár K, Kónya J: The influence of heat treatment on the mechanical properties of 3d-printed cobalt-chrome alloy used in dental laboratory practice. *Acta Mater* 2019;1(2):97-100.
211. Aboelsayed KM, Mahfouz OA, Aboulwafa O, Hafez MA: Effect of laser and chemical surface treatment of cobalt-chromium alloy on its bond strength with heat cured acrylic resin (comparative laboratory study). *Alex Dent J* 2019;44(2):83-90.
212. Yilmaz A, Akyil MŞ, Hologlu B: The effect of metal primer application and Nd: YAG laser irradiation on the shear-bond strength between polymethyl methacrylate and cobalt-chromium alloy. *Photomed Laser Surg* 2011;29(1):39-45.
213. Bortun C, Ghiban B, Ghiban N: Surface Characterization of Some CoCrMo Dental Alloys. *Key Eng Mater* 2014;583:36-40.
214. Porojan L, Birdeanu M, Savencu C, Porojan S: Surface characteristics and corrosion properties of Co-Cr dental alloys processed by laser-based methods. *Rev Chim (Bucharest)* 2017;68(11): 2538-2541.
215. Baciú ER, Chicet D, Mareş M, Munteanu C, Baciú C, Forna NC: Influence of finishing techniques of non-noble alloys used in prosthetic restoration on candida albicans biofilm development in wet systems. *Environ Eng Manag J* 2012;11(5):1015-1022.
216. Dlyte – DLyte Electropolishing. <https://www.dlyte.es/>.



217. Mostafa MH: Evaluation of retention of tooth-colored versus cast metal dental clasps for a mandibular distal extension prosthesis. *Egypt Dent J* 2017;63(4):1567-1575.
218. Shirasu K, Wakabayashi N, Yoneyama T, Igarashi Y: Non-linear finite element stress analysis of plastic deformation in Co–Cr wrought-wire clasps. *Dent Mater J* 2008;24(11):1518-1524.
219. Oda N, Wakabayashi N, Yoneyama T, Suzuki T: Effect of bending on the mechanical properties of gold wrought-wire clasps: a non-linear finite element analysis. *Dent Mater J* 2009;28(1):121-127.
220. Arafa KA: Effect of three different clasp designs on the abutment tooth supporting structures. *Life Sci J* 2014;11(6):725-728.
221. Nagayama T, Wada J, Watanabe C, Murakami N, Takakusaki K, Uchida H, Utsumi M, Wakabayashi N: Influence of retainer and major connector designs of removable partial dentures on the stabilization of mobile teeth: A preliminary study. *Dent Mater J* 2020;39(1):89-100.
222. Takayama Y, Nomoto R, Nakajima H, Ohkubo C: Comparison of joint designs for laser welding of cast metal plates and wrought wires. *Odontology* 2013;101(1):34-42.
223. Júnior CDDS, Castro MGD, Davi LR, Neves FDD, Novais VR, Júnior PCS: Laser welding of dental alloys: a systematic overview- welding processes. *IntechOpen Publications*; 2012: Pp 415-438.
224. Srimaneepong V, Yoneyama T, Wakabayashi N, Kobayashi E, Hanawa T, Doi H: Deformation properties of Ti-6Al-7Nb alloy castings for removable partial denture frameworks. *Dent Mater J* 2004;23(4):497-503.
225. Yan HX, Zhao YB, Qin LM, Zhu HT, Wu L: Experimental study on the retentive force of cobalt-chromium alloy, pure titanium and vitallium cast clasps in the simulated 3-year clinical use. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue* 2015;24(6):696-701.
226. Ardelean LC, Reclaru L, Bortun CM, Ghiban B: Laser welding of different dental alloys. *super alloys for industry applications. Intechopen publications*; 2018: Pp 85-107.
227. Olcay S: *Removable Partial Dentures-A Practitioners' Manual*. Springer Publications. Switzerland 2016: Pp 1-282.
228. Gapido CG, Kobayashi H, Miyakawa O, Kohno S: Fatigue resistance of cast occlusal rests using Co-Cr and Ag-Pd-Cu-Au alloys. *J prosthet Dent* 2003;90(3):261-269.
229. Tanaka A, Miyake N, Hotta H, Takemoto S, Yoshinari M, Yamashita S: Change in the retentive force of Akers clasp for zirconia crown by repetitive insertion and removal test. *J Prosthodont Res* 2019;63(4):447-452.
230. Ασπρούδη Γ: Μελέτη της επίδρασης της επιφανειακής επεξεργασίας του μεταλλικού σκελετού στην αντοχή του μεταλλοκεραμικού δεσμού. *Μεταπτυχιακή εργασία; Αθήνα* 2019. Σελ 36-49.
231. Basmacı F, Özden AN, Haghghat N, Ibtisam AH: Assessment of salivary pellicle on the surface of dental alloys, in vivo. *J Basic Clin Health Sci* 2020;4(1):27-32.
232. Kim D, Park C, Yi Y, Cho L: Comparison of cast Ti-Ni alloy clasp retention with conventional removable partial denture clasps. *J Prosthet Dent* 2004;91(4):374-382.
233. Kuriakose EM, Aradya A, Swamy RKN. Cast Partial Denture: A Preferred Choice of the Patient over Acrylic Partial and Flexible Denture-A Case Report. *Int J Adv Res*



- Innov Ideas Educ 2020;5(3):615-617.
234. Suwal P, Singh RK, Ayer A, Roy DK, Roy RK: Cast partial denture versus acrylic partial denture for replacement of missing teeth in partially edentulous patients. *J Dent Mater Tech* 2017;6(1):27-34.
235. Tanner J, Vallittu PK, Söderling E: Adherence of streptococcus mutans to an e-glass fiber–reinforced composite and conventional restorative materials used in prosthetic dentistry. *J Biomed Mater Res* 2000;49(2):250-256.
236. Narva KK, Lassila LV, Vallittu PK: Fatigue resistance and stiffness of glass fiber-reinforced urethane dimethacrylate composite. *J Prosthet Dent* 2004;91(2):158-163.
237. Fueki K, Yoshida-Kohno E, Inamochi Y, Wakabayashi N: Patient satisfaction and preference with thermoplastic resin removable partial dentures: a randomised cross-over trial *J Prosthodont Res* 2019;64(1):20-25.
238. Fueki K, Inamochi Y, Yoshida-Kohno E, Wakabayashi N: Cost-effectiveness analysis of prosthetic treatment with thermoplastic resin removable partial dentures. *J Prosthodont Res* 2021;65(1):52-55.
239. Elsherbini N, Elsherbini A: Microbial adhesion to Co-Cr, PEEK and Acetal RPDs in mandibular Kennedy Class III Mod. 1 (Randomized Split mouth clinical trial). *Egypt Dent J* 2021;67(2):1557-62.
240. El-Baz R, Fayad M, Abas M, Shoieb A, Gad M, Helal MA: Comparative study of some mechanical properties of cobalt chromium and polyether ether ketone thermoplastic removable partial denture clasps: an In-vitro Study. *Braz Dent Sci* 2020;23(3):6.
241. Sadek SA: Comparative study clarifying the usage of PEEK as suitable material to be used as partial denture attachment and framework. *J Med Sci* 2019; 7(7):1193-1197.
242. Dolgov N, Dikova T, Dzhendov D, Pavlova D, Simov M: Mechanical properties of dental Co-Cr alloys fabricated via casting and selective laser melting. *Mater Sci Nonequilibrium Phase Transform* 2016;2(3):29-33.
243. Aridome K, Yamazaki M, Baba K, Ohyama T: Bending properties of strengthened Ti-6Al-7Nb alloy major connectors compared to Co-Cr alloy major connectors. *J Prosthet Dent* 2005;93(3):267-273.
244. Dentaureum – Alloys. <https://www.dentaureum.de/eng/>.
245. Dentech – SheraLit-Cylindra Chrome Cobalt Casting Alloy. <https://www.dentech.co.nz/>.
246. Dentsplysirona – Vitallium 2000 Plus Partial Denture Alloy. <https://www.dentsplysirona.com/en-ca>.
247. Eisenbacher – Robur 400 – <https://www.eisenbacher.de/en/index.htm>.
248. Argen – Non-Precious – Alloy. <https://www.argen.com/#/>.
249. Aalbadent – Vera PDS® (Hard & Reg). <https://aalbadent.com/>.
250. Eos GmbH – Cobalt chrome for industrial 3D printing. <https://www.eos.info/en>.
251. Renishaw resource centre – CoCr DG1. <https://www.renishaw.com/en/data-sheets-additive-manufacturing--17862>.
252. Scheftner Dental Alloys – Starbond Easy Powder 30. <https://scheftner.dental/starbond-easy-powder-30-en.html>.
253. Rewag Feinmechanik – AG ST2724G Technical data sheet-k.



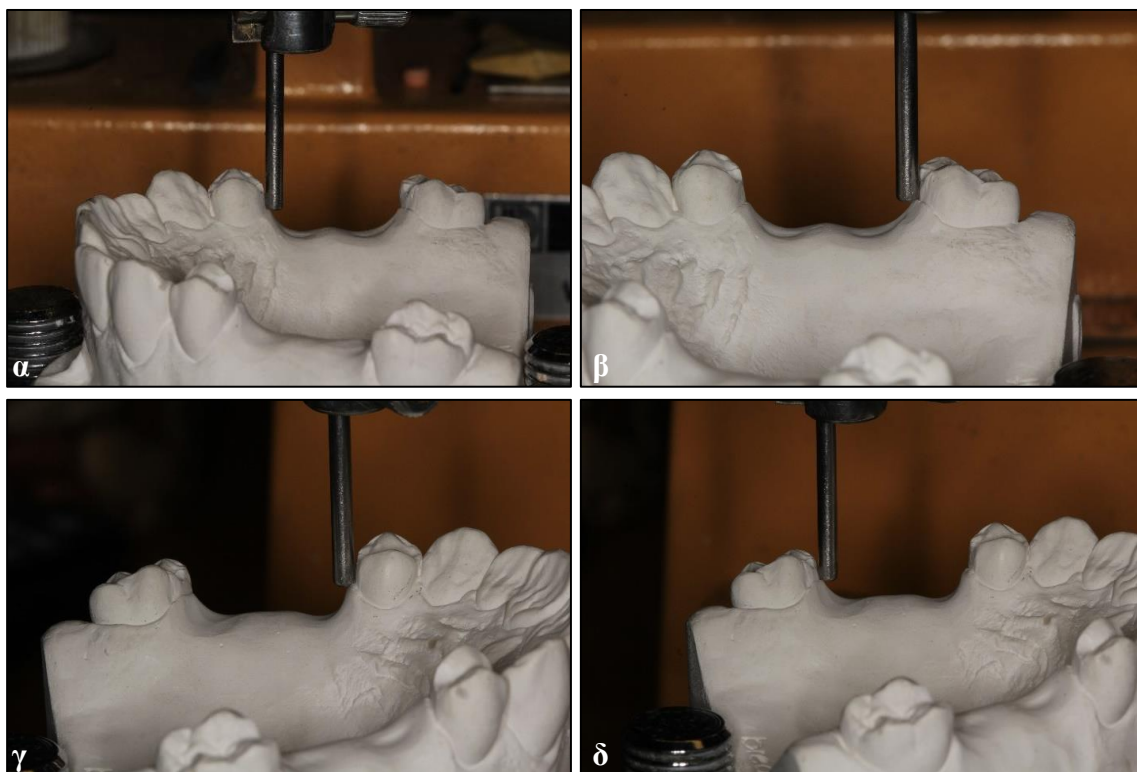




13.1 Παράρτημα Α – στάδια κατασκευής σκελετού Μ.Ο. χρησιμοποιώντας τη συμβατική μέθοδο



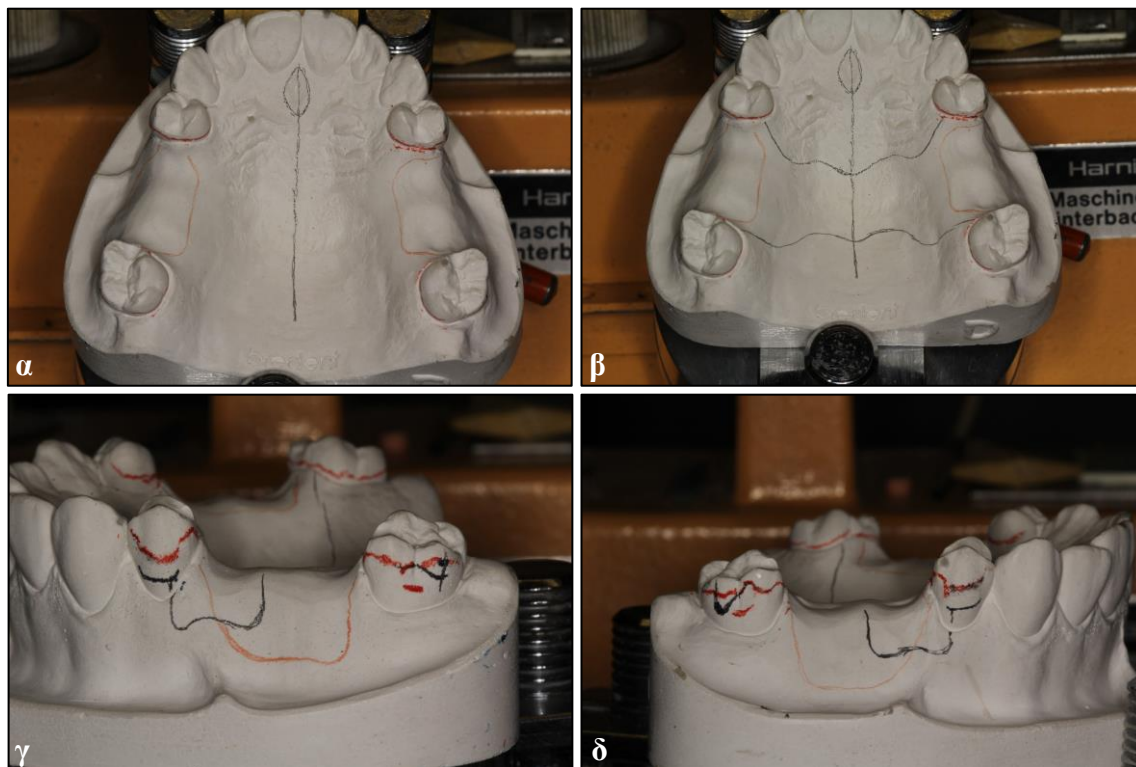
Εικόνα 13-1 Τελικό εκμαγείο.



Εικόνα 13-2 Το τελικό εκμαγείο τοποθετείται στο τραπέζιδο εργασίας του παραλληλογράφου, στο οποίο δίδεται η κλίση που είχε δοθεί στο αρχικό εκμαγείο κατά την ανάλυση του, μεταφέροντας έτσι την επιθυμητή φορά ένθεσης από το αρχικό στο τελικό. Στη συνέχεια γίνεται μια έρευνα χρησιμοποιώντας τη ράβδο ανάλυσης για την επιβεβαίωση της φοράς ένθεσης με τον εντοπισμό, όμορων οδηγών επιπέδων στα δόντια-στηρίγματα (α-δ), και των κατάλληλων εσοχών στις επιθυμητές περιοχές και σε αυτό μπορεί να βοηθήσει ξκαι η χρήση των μετρητών βάθους εσοχών.



Εικόνα 13-3 Εγγραφή της μείζονος περιμέτρου με τη βοήθεια της γραφίδας (α, β) και σημείωση του βάθους εσοχών με τη βοήθεια των μετρητών βάθους εσοχών στα δόντια-στηρίγματα βάθους 0,25 mm για τους δύο γομφίους (γ, δ) και 0,35 mm για τους δύο προγομφίους (ε, ζ).

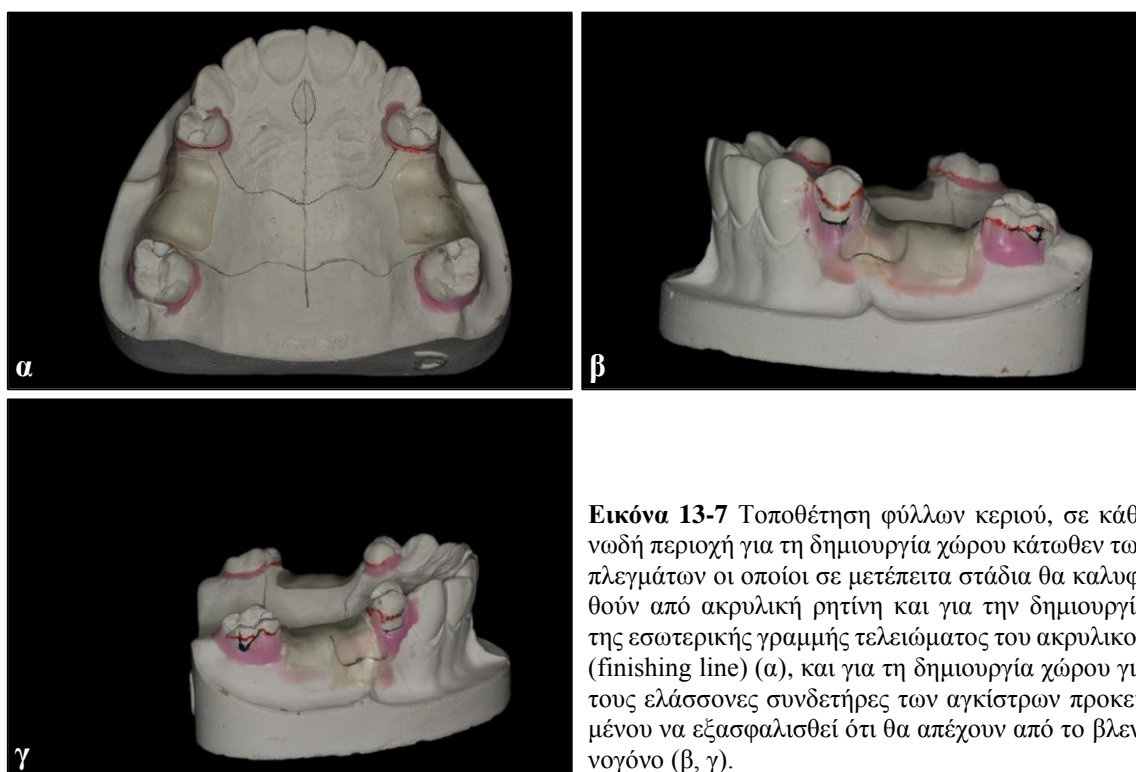
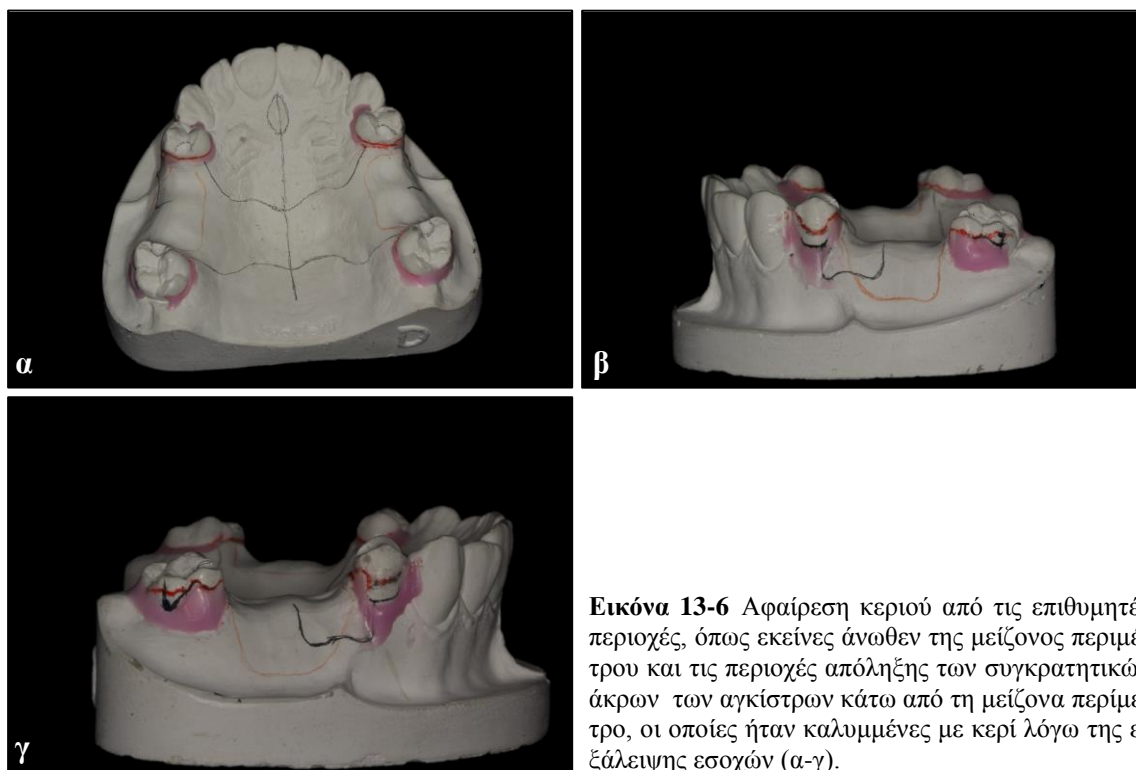


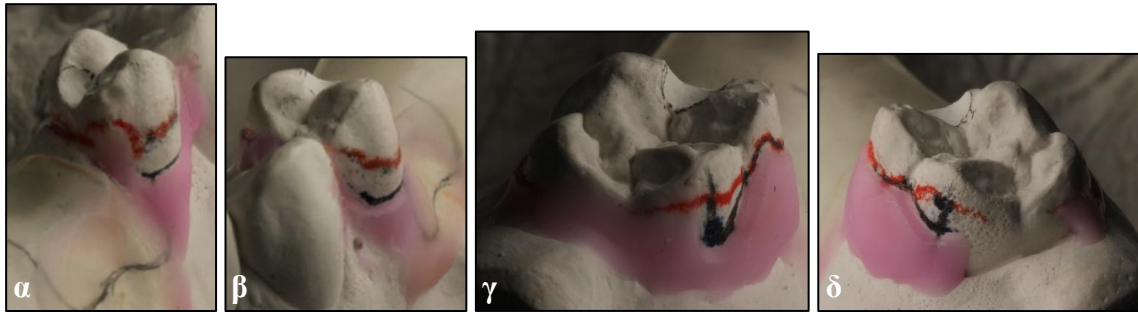
Εικόνα 13-4 Σχεδίαση των τμημάτων σκελετού: βάσεις (α) που ουσιαστικά θα καλύψουν τα πλέγματα συγκράτησης, μείζονας συνδετήρας (β), άγκιστρα (γ, δ).



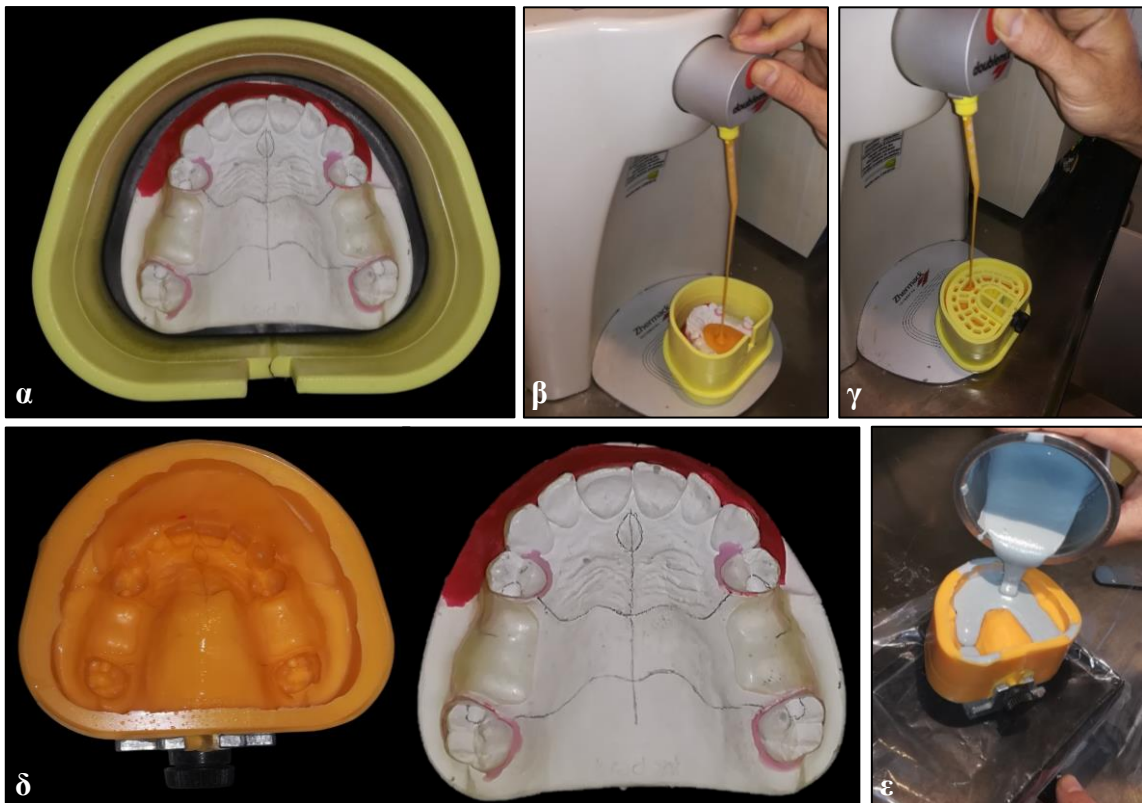
Εικόνα 13-5 Απαλοιφή εσοχών κάτω από τη μείζονα περίμετρο (α) και απόδοση με τη βοήθεια θερμοστοιχείου κλίσης 3° στο κερί (β-ζ).



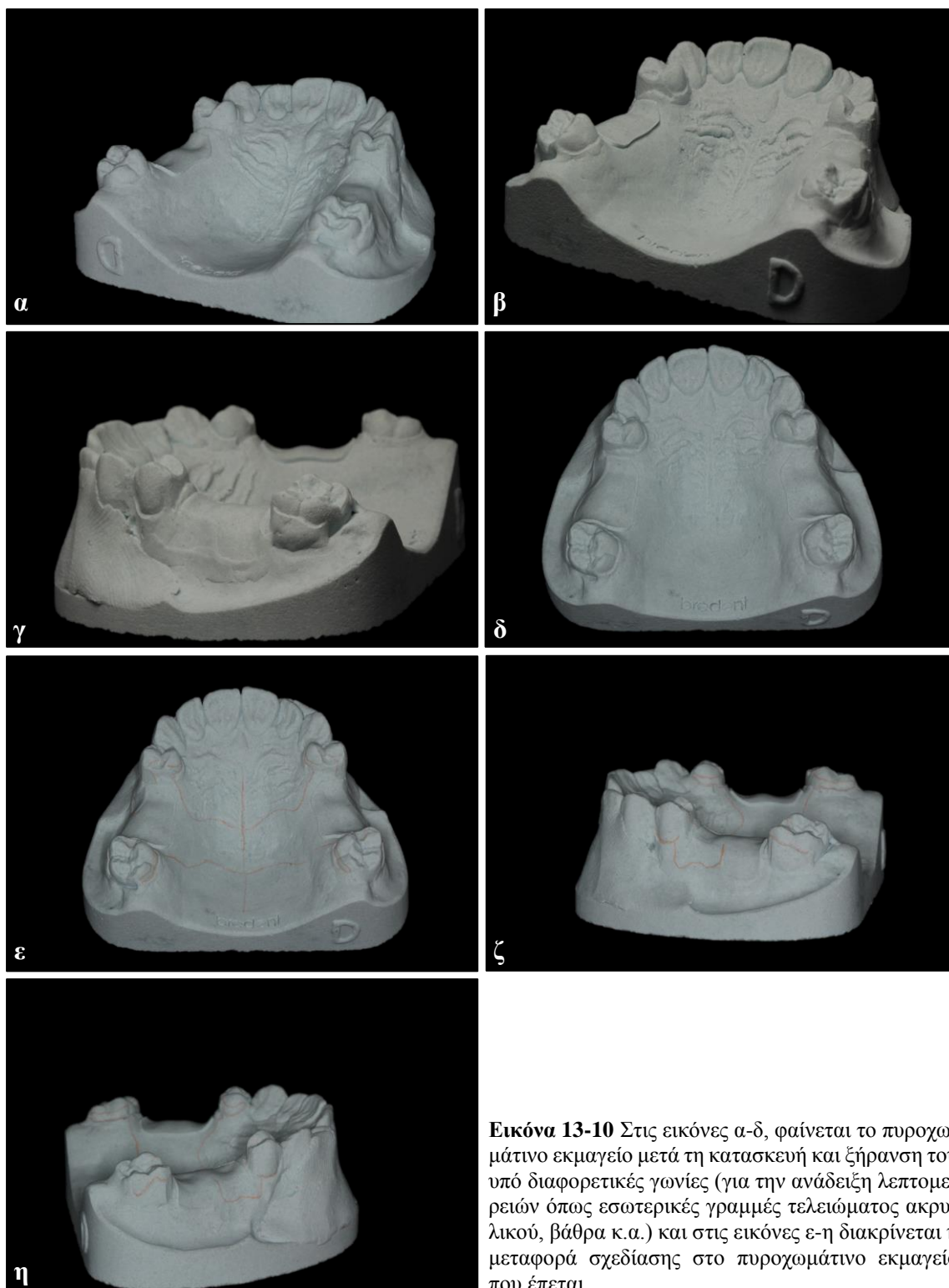




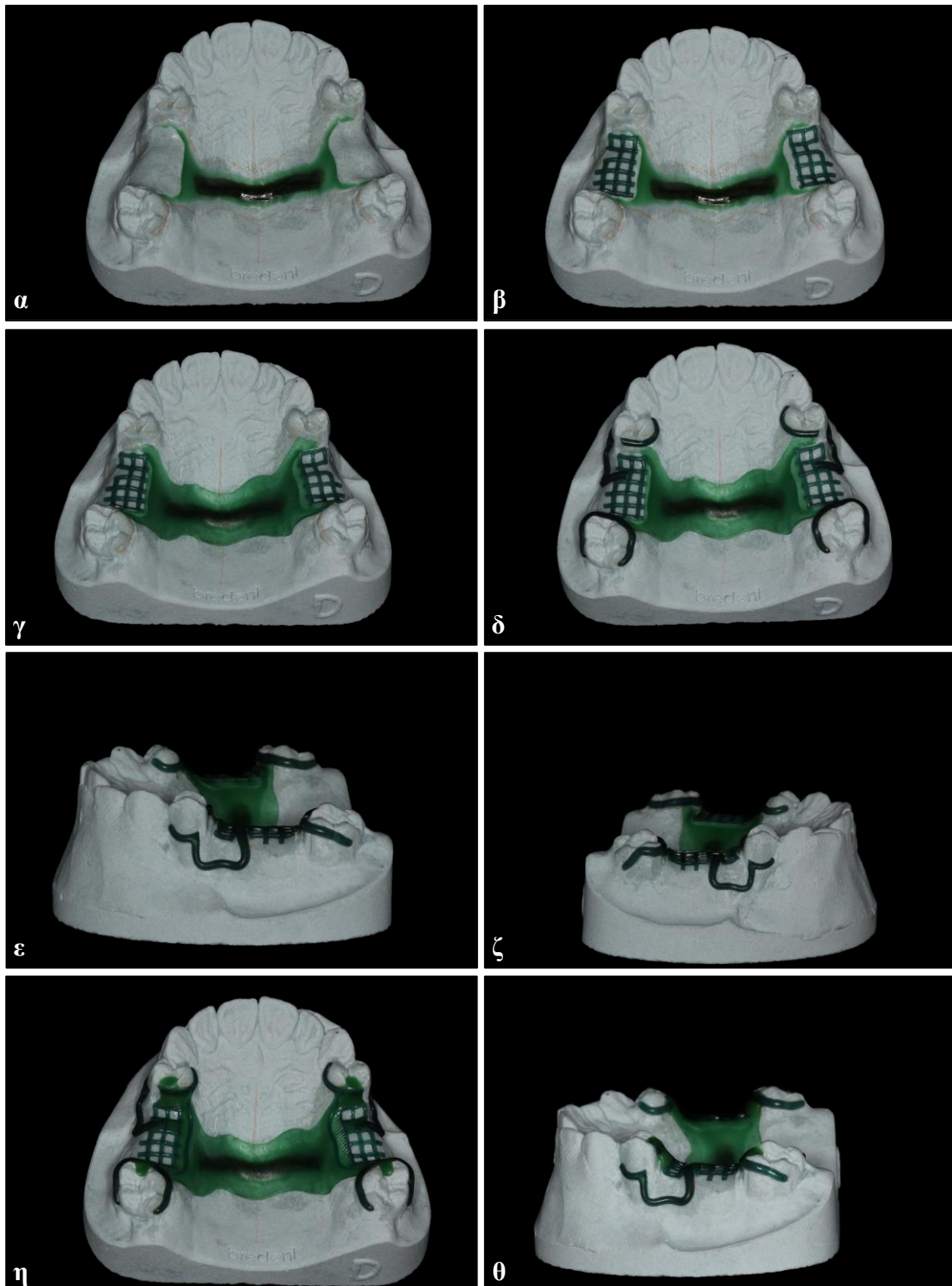
Εικόνα 13-8 Δημιουργία βάθρου στην μασητική επιφάνεια του κεριού ως «οδηγό» σημείο για την σωστή τοποθέτηση των τμημάτων του ακρίστρου όπως των συγκρατητικών βραχιόνων (α-δ). Σημειώνεται ότι η διαμόρφωση βάθρου αποτελεί ένα βοηθητικό στάδιο και θα μπορούσε να παραληφθεί.

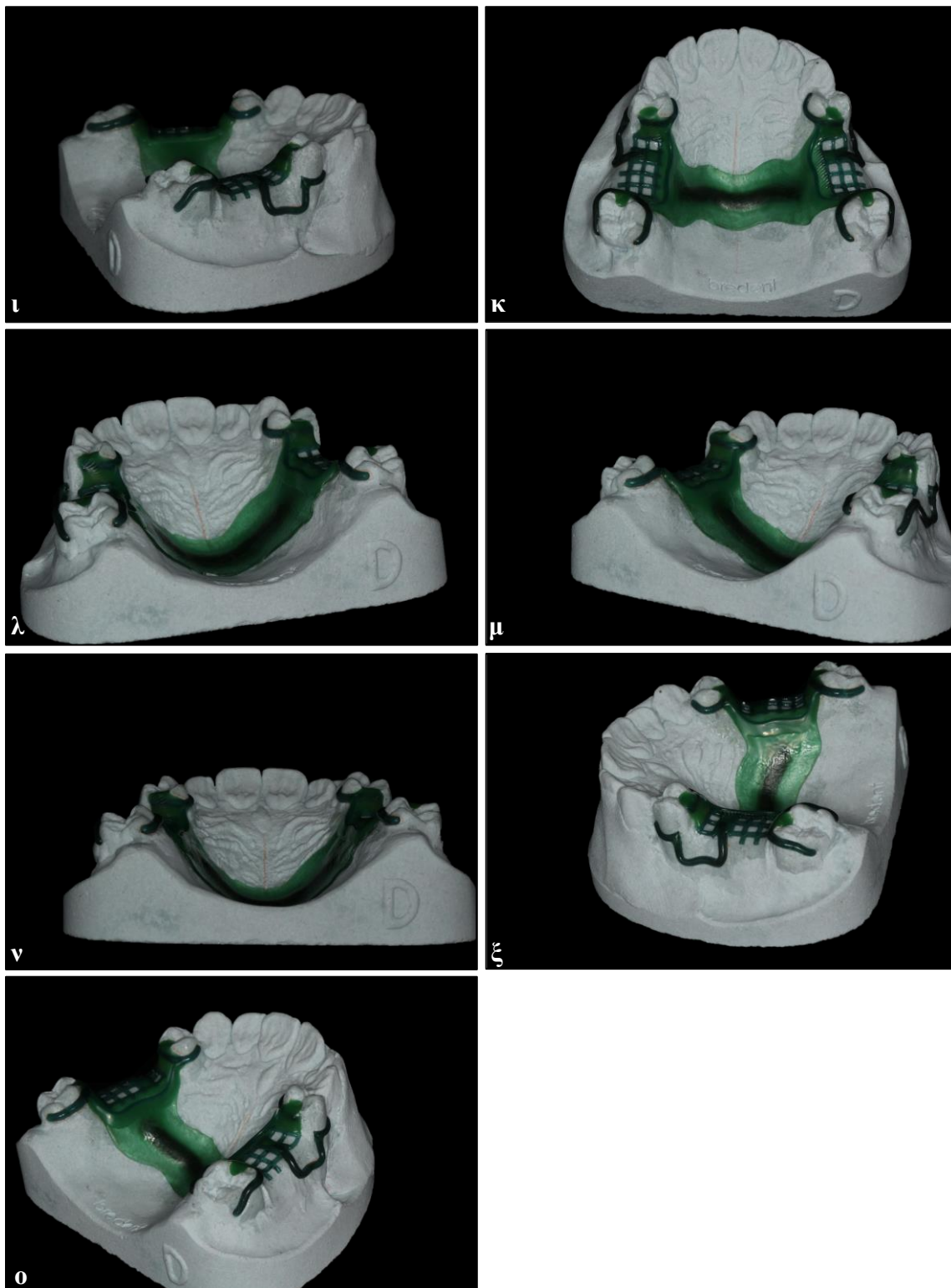


Εικόνα 13-9 Τοποθέτηση πλαστελίνης για απαλοιφή εσοχών και τοποθέτηση στο έγκλειστρο (α), πλήρωση του εγκλείστρου με σιλκόνη για την ανατύπωση του εκμαγείου (β, γ), δημιουργία σιλικονούχας μήτρας (δ) και πλήρωση της για τη δημιουργία πυροχωμάτινου εκμαγείου (ε).

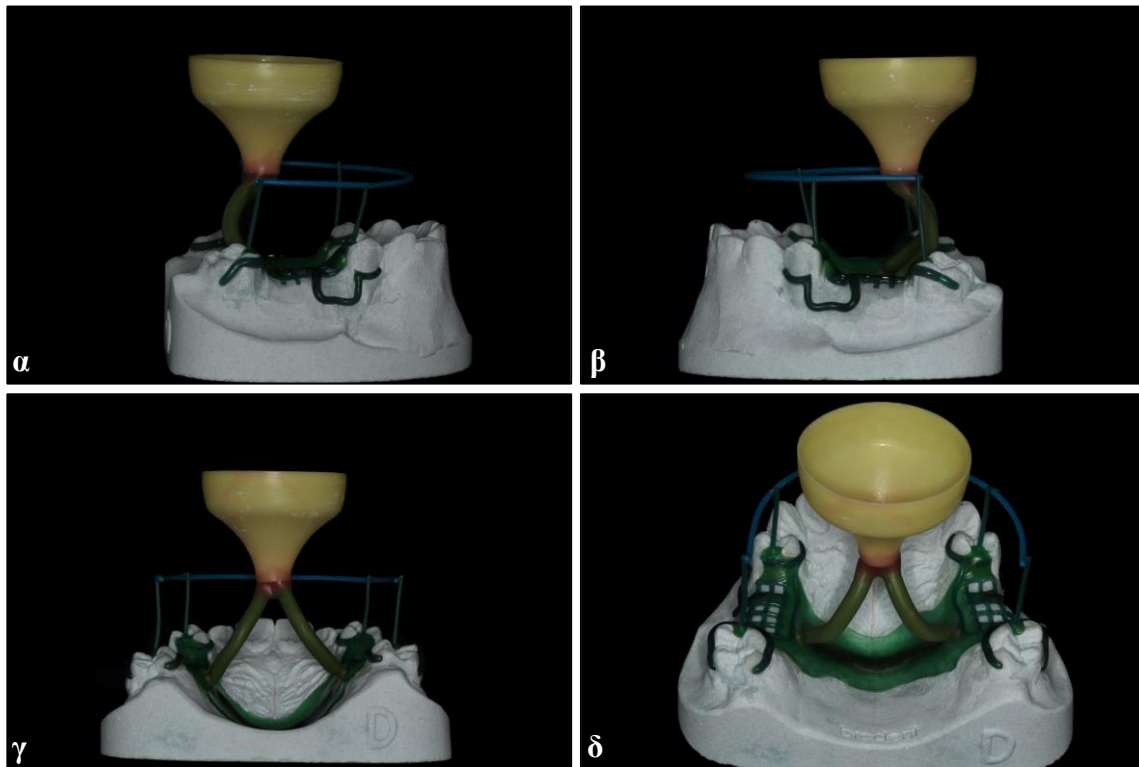


Εικόνα 13-10 Στις εικόνες α-δ, φαίνεται το πυροχωμάτινο εκμαγείο μετά τη κατασκευή και ξήρανση του υπό διαφορετικές γωνίες (για την ανάδειξη λεπτομερειών όπως εσωτερικές γραμμές τελειώματος ακρυλικού, βάρθρα κ.α.) και στις εικόνες ε-η διακρίνεται η μεταφορά σχεδίασης στο πυροχωμάτινο εκμαγείο που έπεται.





Εικόνα 13-11 Κέρωμα σκελετού με τη βοήθεια προκατασκευασμένων προπλασμάτων: ενίσχυση μείζονα συνδετήρα (α), πλέγματα (β), σαγρέ μείζονα συνδετήρα (γ), βραχίονες αγκίστρων (δ-ζ), εφαπτήρες και όμορες πλάκες αγκίστρων με παράλληλη αδροποίηση των πλεγμάτων και ένωση των τμημάτων μεταξύ τους (η-ι), εξωτερική γραμμή τελειώματος ακρυλικού (κ), και ολοκληρωμένο κέρωμα σκελετού (λ-ο).

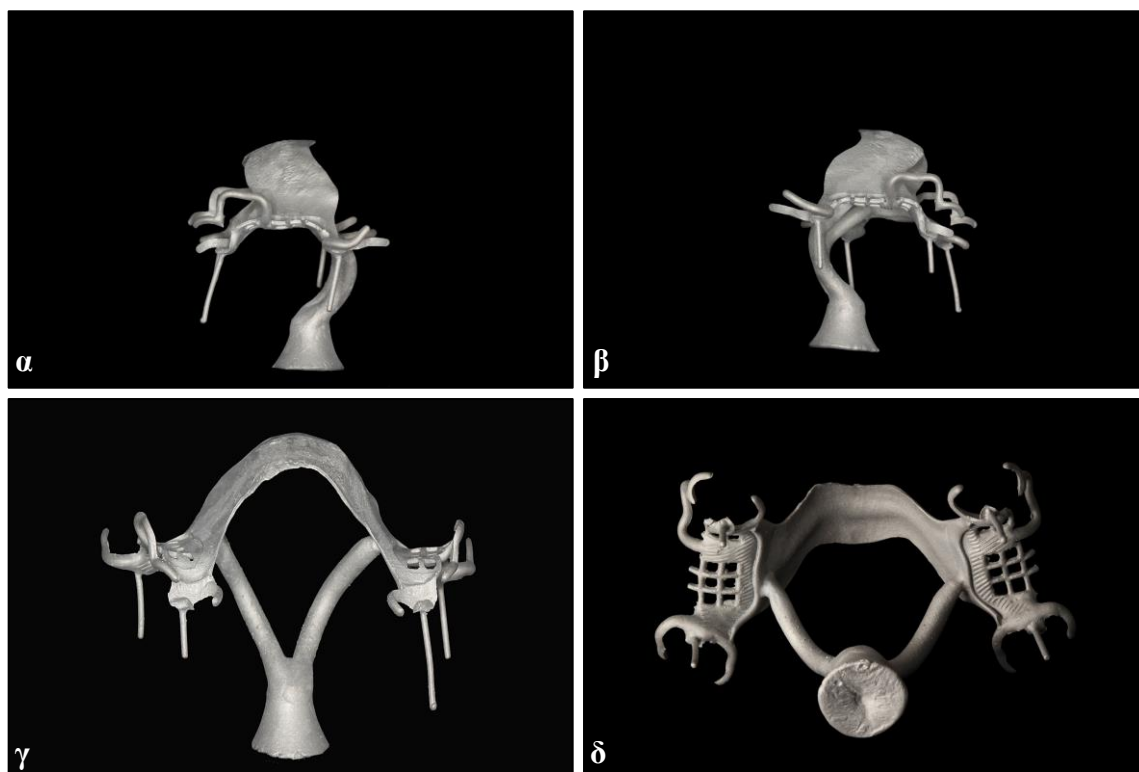


Εικόνα 13-12 Τοποθέτηση αγωγών χύτευσης, απαερίωσης και κώνου χύτευσης (α-δ).



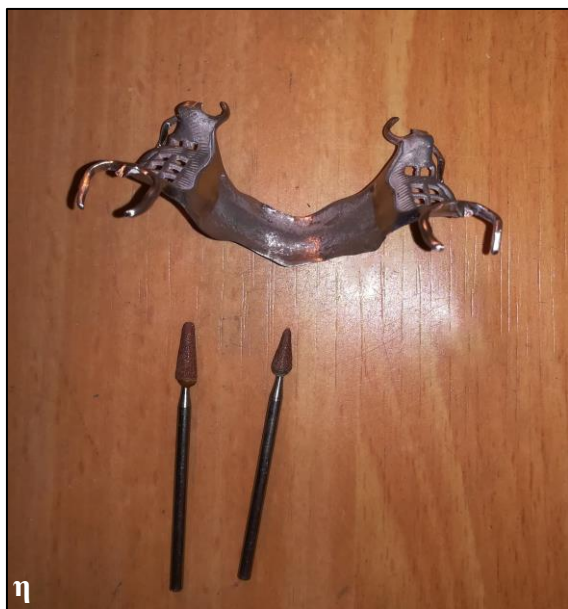
Εικόνα 13-13 Τοποθέτηση εκμαγείου στο δακτύλιο χύτευσης (α), επένδυση με πυρόχωμα (β) και στη συνέχεια χύτευση κατά τα γνωστά (αποκήρωση, προθέρμανση, χύτευση, ψύξη). Σημειώνεται, ότι μετά το τέλος των σταδίων της χύτευσης, μπορεί να ακολουθήσει η κατάλληλη θερμική κατεργασία του κράματος.



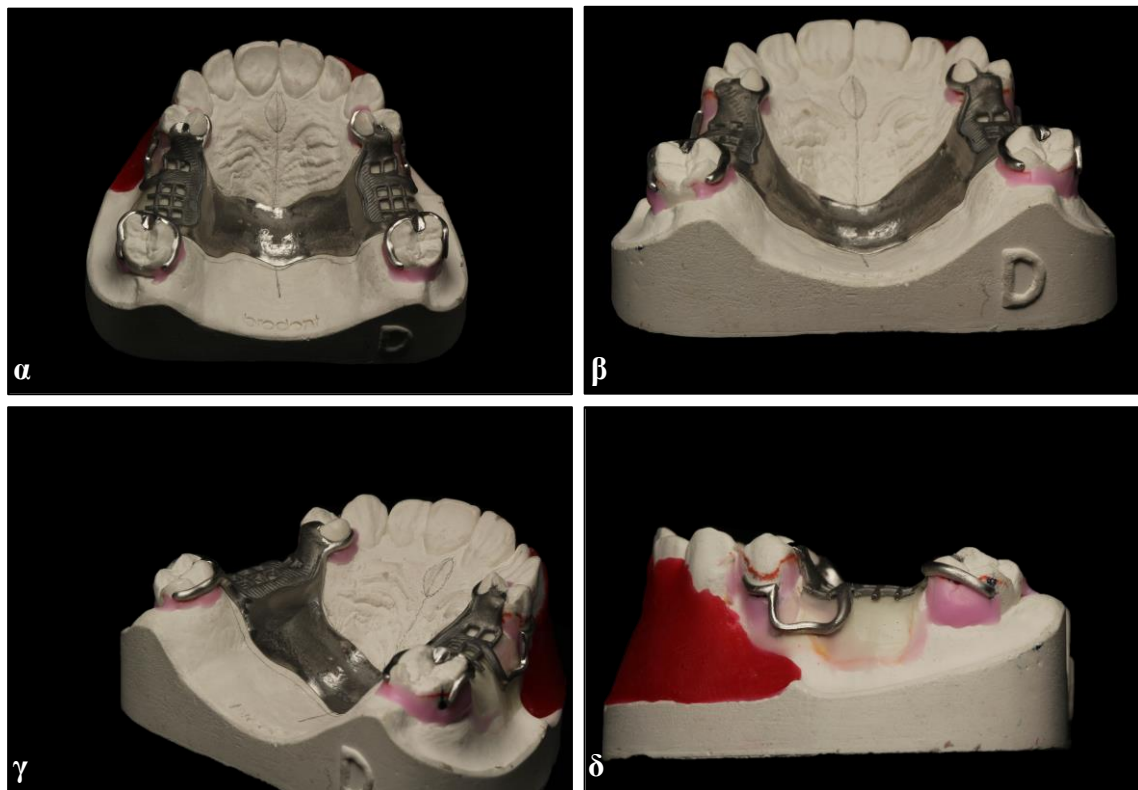


Εικόνα 13-14 Σκελετός αμέσως μετά τη χύτευση, του οποίου η επιφάνεια έχει αμμοβοληθεί για την απομάκρυνση του πυροχώματος. Παρατηρείται ότι οι αγωγοί απαερίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην χύτευση με φυγόκεντρη δύναμη δεν «αποτυπώνονται» στο χυτό (α-γ), και αυτός φυσικά είναι και ο ρόλος τους. Ακολουθεί έλεγχος της πληρότητας των τμημάτων του σκελετού, έλεγχος για την ύπαρξη παθητικής εφαρμογής του στο τελικό εκμαγείο, και τέλος πραγματοποιείται έλεγχος της ποιότητας του χυτού για τυχόν ύπαρξη εσωτερικού ή εξωτερικού πορώδους. Στη συνέχεια, αποκόπτονται οι αγωγοί χύτευσης και κάθε μεταλλική προεξοχή του σκελετού με δίσκους κοπής και πραγματοποιείται η μηχανική λείανση του σκελετού (άγκιστρα, δοκοί, ελάσσονες συνδετήρες, εφαπτήρες, κλπ.) κατά σειρά με, λεπτότερο δίσκο κοπής, κυλινδρικό τροχόλιθο, χοντρό διαμάντι, λεπτό διαμάντι ή φρέζες.

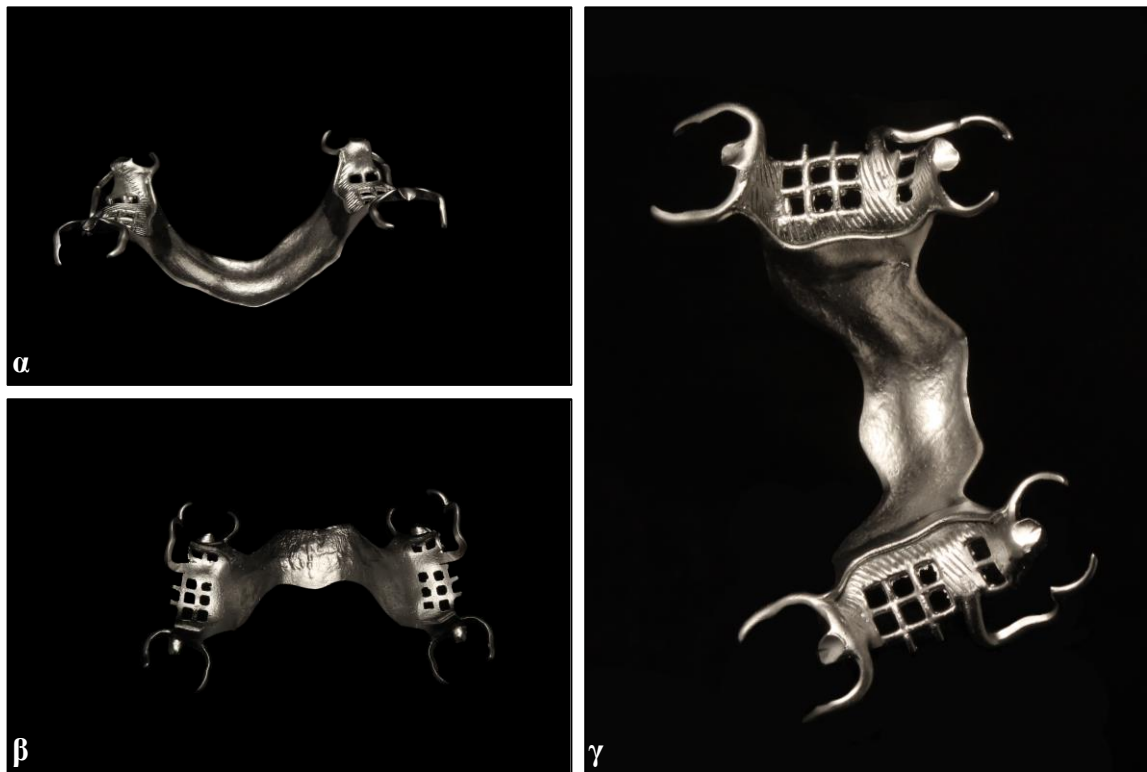




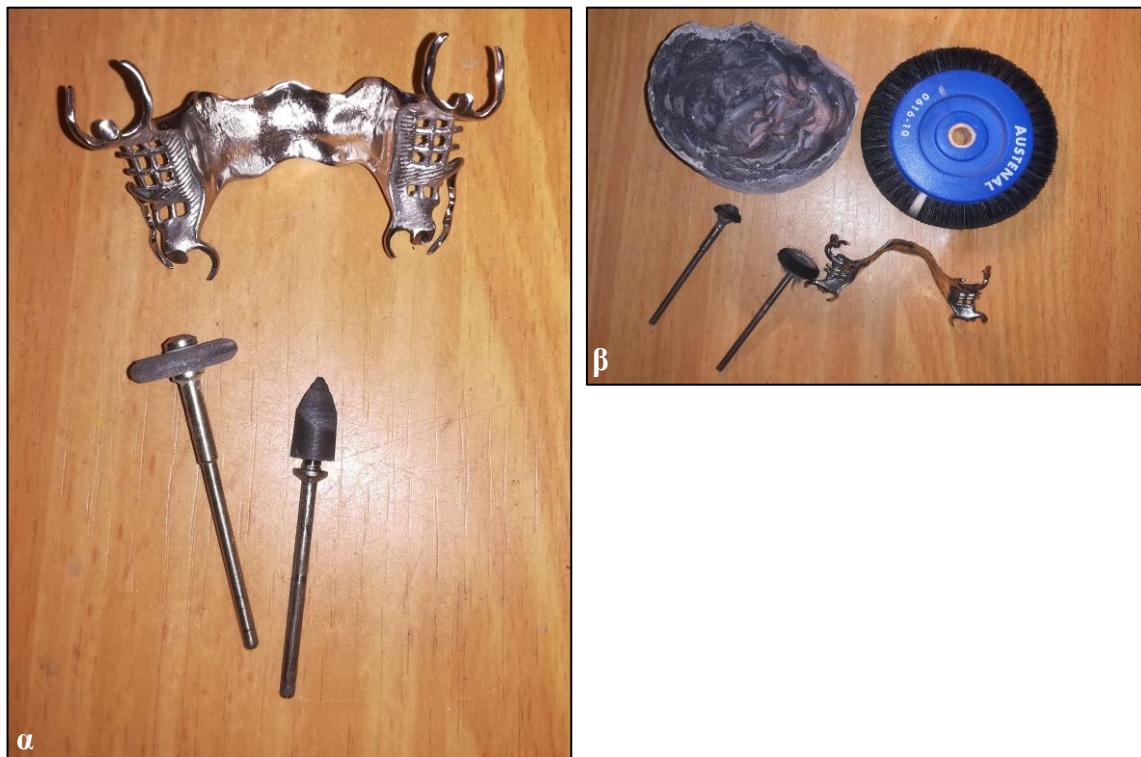
Εικόνα 13-15 Αποκοπή αγωγών με τη βοήθεια δίσκου κοπής (α) και φρέζας carbide (β) και λείανση χρησιμοποιώντας : δίσκους από κορούνδιο (γ, δ), διαμάντια (ε, ζ), τροχολιθάκια (η).



Εικόνα 13-16 Κατόπιν, ακολουθεί έλεγχος εφαρμογής σκελετού μετά τη λείανση και πριν την ηλεκτρόλυση (α-δ).



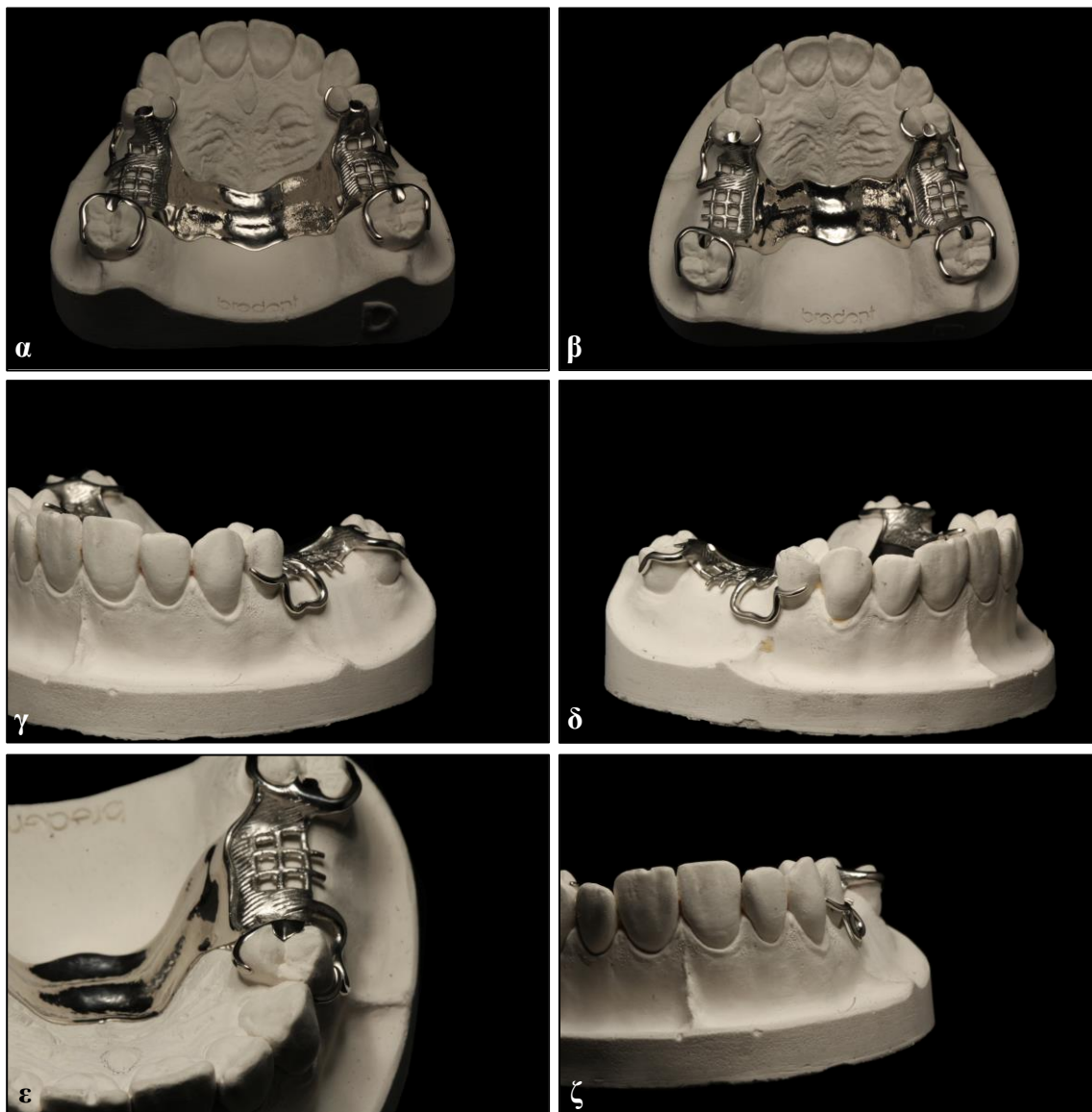
Εικόνα 13-17 Σκελετός μετά την ηλεκτρόλυση-ηλεκτροστίλβωση (α-γ).

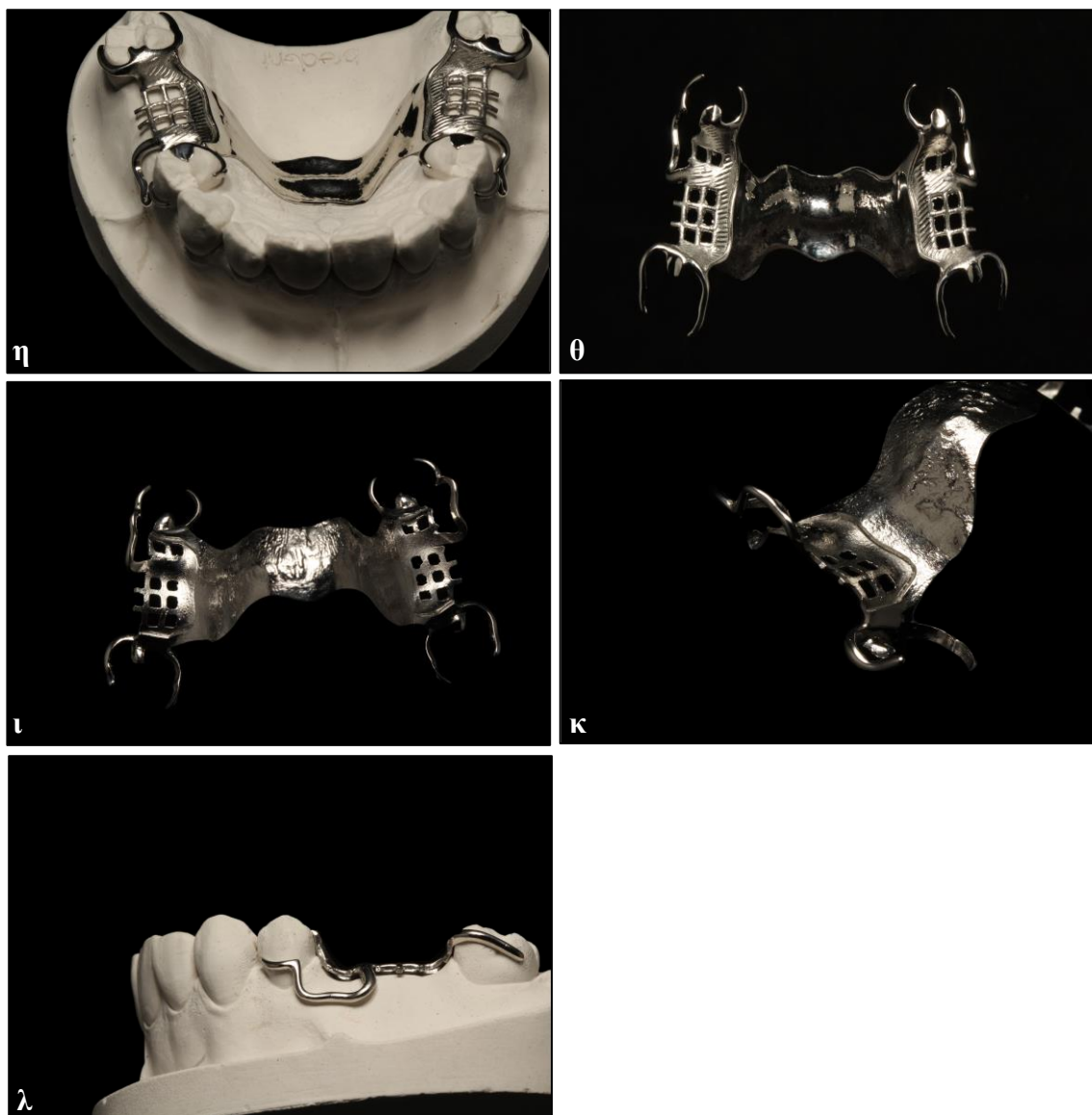


Εικόνα 13-18 Τελική στίλβωση με τη βοήθεια ελαστικών (α) και με τη χρήση διαφόρων βουρτσών και στίλβωτικής πάστας (β).



Εικόνα 13-19 Καθαρισμός σκελετού με νερό και σαπούνι.





Εικόνα 13-20 Ολοκληρωμένος σκελετός Μ.Ο. όπου παρατηρούνται στοιχεία όπως, η καλή εφαρμογή του μείζονα συνδετήρα και των εφαπτήρων, το ομαλό «σβήσιμο» του μείζονα συνδετήρα στην υπερώα για την αποφυγή παρεμπόδισης της γλώσσας διατηρώντας το πάχος του κεντρικά, η καλή εφαρμογή των άκρων των αγκίστρων, η ύπαρξη χώρου κάτω από το πλέγμα και τους βραχίονες τύπου semi-roach, η εξωτερική και εσωτερική γραμμή τελειώματος ακρυλικού και η ομαλή και στιλπνή επιφάνεια του σκελετού. Ακόμη διακρίνεται, η κατάλληλη έκταση των διαφόρων τμημάτων και η απόδοση σχήματος όπως στα άκρα των αγκίστρων για την απόδοση των επιθυμητών ιδιοτήτων (α-λ).

13.2 Παράρτημα Β – χημική σύνθεση και ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr

Παρακάτω αναφέρονται η χημική σύνθεση και οι ιδιότητες των κραμάτων Co-Cr όπως αναγράφονται από τις ιστοσελίδες των κατασκευαστών.



Πίνακας 13-1 Χημική σύνθεση ορισμένων χυτών εμπορικών κραμάτων Co-Cr αμιγώς για «κλασσικούς» σκελετούς Μ.Ο.^{18,244-249}

Επωνυμία Κράματος	Τύπος κράματος (ISO 22674)	Χημική σύνθεση κατά βάρος %										
		Co	Cr	Mo	Mn	Si	C	N	Ta	W	Fe	Άλλα < 1%
BEGO Wironit	5	64	28,5	5	1	1	< 1					
BEGO Wironit® extrahart	5	63	30	5	1	1	< 1					
BEGO Wironium®	5	63	29,5	5	< 1	1	< 1	< 1				
BEGO Wironium® extrahart	5	61	30	5	2	1	< 1	< 1				
BEGO Wironium® plus	5	62,5	29,5	5	1,5	1	< 1	< 1	< 1			
DENTAURUM Remanium® GM 800+	5	58,3	32	6,5		1	< 1	< 1		1,5		
DENTAURUM Remanium® GM 900	5	62	30	5,5		1,2		< 1	1,2			
DENTAURUM Remanium® GM 380+	5	64,6	29	4,5	< 1	< 1	< 1	< 1				
DENTAURUM Remanium® GM 280	5	61	28		< 1	1,5	< 1	< 1		8		Nb
DENTECH SheraLit-Cylindra	5	63	29	6	< 1	< 1	< 1				< 1	
DENTSPLYSIONA Vitallium 2000 plus	5	63,4	29	5								
EISENBACHER Robur 400®	5	62,5	28,5	6,1	0,55	0,45	0,5			0,6	0,7	< 0,1
ARGEN Argeloy Partial	5	64	28	6	< 1	< 1	< 1				< 1	
ARGEN Suprachrome	5	63,6	28,5	6	< 1	< 1	< 1					
AALBADENT Vera PDS® Hard & Reg	5	63,5	27	5,5	< 1	< 1					2	Ni



Πίνακας 13-2 Χημική σύνθεση ορισμένων «ψηφιακών» εμπορικών κραμάτων Co-Cr που έχουν χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή «κλασσικών» σκελετών Μ.Ο. (δεν χρησιμοποιούνται όλα αμιγώς για σκελετούς Μ.Ο.) βάσει των τιμών που αναφέρουν οι κατασκευαστές.^{244,250-253}

Επωνυμία Κράματος	Τύπος κράματος (ISO 22674)	Σύστημα PBF	Χημική σύνθεση κατά βάρος %															
			Co	Cr	Mo	W	Si	Fe	Mn	N	C	Ni	Be	Cd	Pb	Nb	Ga	
EOS CobaltChrome MP1	4	DMLS = SLM	60-65	26- 30	5-7		≤ 1	≤ 0,75	≤ 1		≤ 0,16	≤ 0,1						
EOS CoCr SP2 (DA)	4	DMLS = SLM	63,8	24,7	5,1	5,4	1	≤ 0,5	≤ 0,1			Free	Free	Free	Free			
EOS CobaltChrome RPD	5	DMLS = SLM	63,8	24,7	5,1	5,4	1	≤ 0,5	≤ 0,1			Free	Free	Free				
DENTAURUM Concept Laser Remanium star CL	5	DMLM	60,5	28		9	1,5	< 1	< 1	< 1		Free	Free				< 1	Free
RENISHAW CoCr DG1(DA)	5	SLM	63,9	24,7	5	5,4	1					Free	Free	Free	Free			
SCHEFTNER Starbond Easy 30	5	SLM	61	27,5		8,5	1,6	< 1	< 1		< 1	Free	Free	Free	Free			
SINT-TECH ST2724G	5	DMLM	Balance	29	5,5			< 1	< 1	< 1								



Πίνακας 13-3 Ιδιότητες των χυτών κραμάτων Co-Cr βάσει των τιμών που αναφέρουν οι κατασκευαστές (α' μέρος).^{18,244}

Κατασκευαστές Κράματα	BEGO					DENTAURUM			
	Wironit	Wironit® extrahart	Wironium®	Wironium® extrahart	Wironium® plus	Remanium® GM 800+	Remanium® GM 900	Remanium® GM 380+	Remanium® GM 280
Πυκνότητα (g/cm ³)	8,3	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,6
Θερμοκρασία Προθέρμανσης (°C)	950-1050	950-1050	950-1050	950-1050	950-1050				
Θερμοκρασιακό Εύρος Τήξης (°C)	1265-1395	1260-1390	1360-1405	1360-1395	1345-1390	1240-1410	1360-1410	1300-1370	1320-1420
Θερμοκρασία Χύτευσης (°C)	1460	1420	1440	1450	1440				
Αντοχή στον Εφελκυσμό Rm (MPa)						960	910	900	845
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	185	185	230	230	240	230	210	220	190
Όριο Διαρροής Rp0.2 (MPa)	615	635	680	735	715	720	700	640	600
Εκατοστιαία Επιμήκυνση A5 (%)	10	8	15	15	14	4	5	6,5	11
Vickers Σκληρότητα	360 HV10	385 HV10	345 HV10	345 HV10	350 HV10	370 HV10	340 HV10	360 HV10	280 HV10



Πίνακας 13-4 Ιδιότητες των χυτών κραμάτων Co-Cr βάσει των τιμών που αναφέρουν οι κατασκευαστές (β' μέρος).^{245,246,248,249}

Κατασκευαστές	DENTECH	DENTSPLYSIRONA	EISENBACHER	ARGEN		AALBADENT	
Κράματα	SheraLit-Cylindra	Vitallium 2000 plus	Robur 400®	Argeloy Partial	Suprachrome	Vera PDS® Hard	Vera PDS® Reg
Πυκνότητα (g/cm ³)	8,3		8,3	8,3	8,3	8,7	8,7
Θερμοκρασιακό Εύρος Τήξης (°C)	1350-1400		1355-1390	1300-1370	1300-1370	1360-1390	1375-1400
Θερμοκρασία Χύτευσης (°C)	1600		1490	1510	1510		
Αντοχή στον Εφελκυσμό Rm (MPa)	675	960	930	752		755	755
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	197		185	228	200	261	261
Όριο Διαρροής Rp0.2 (MPa)	441	680	705	552	600	675	597
Εκατοστιαία Επιμήκυνση A5 (%)	9,3	10	2,6	10	9	6	7
Vickers Σκληρότητα	549 HV1	395	420 HV 10/30	380	410	359 HV1	354 HV1



Πίνακας 13-5 Ιδιότητες των «ψηφιακών» κραμάτων Co-Cr που έχουν χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή κλασικών σκελετών Μ.Ο.^{244,250-253}

Κατασκευαστές	EOS			DENTAURUM	RENISHAW	SCHEFTNER	SINT-TECH
Κράματα	CobaltChrome MP1*	CoCr SP2 (DA)**	CobaltChrome RPD***	Concept Laser Remanium star CL****	CoCr DG1(DA)*****	Starbond Easy 30	ST2724G
Ειδικό Βάρος	σχεδόν 100%	σχεδόν 100%	σχεδόν 100%				
Πυκνότητα (g/cm ³)	8,3	8,5	8,6	90°: 8,6 45°: 8,6 0°: 8,6	8,3	8,5	8,336
Θερμοκρασιακό Εύρος Τήξης (°C)	1350-1430	1380-1440	1410-1450	90°: 1320-1420 45°: 1320-1420 0°: 1320-1420	1375-1405	1310-1410	
Αντοχή στον Εφελκυσμό Rm (Μρα)	οριζόντια/κάθετη κατεύθυνση 1100±100	≥900 (τυπική: 1100±100)	1100	90°: 1136±24 45°: 1200±14 0°: 1156±9	1213	1090	
Μέτρο Ελαστικότητας (Gra)	200±20	180 (τυπική: 200±10)	200	90°: 230 45°: 230 0°: 230	213	225	229
Όριο Διαρροής Rp0.2 (MPa)	οριζόντια/κάθετη κατεύθυνση 600±50	≥ 700 (τυπική: 900±80)	550	90°: 792±24 45°: 822±14 0°: 835±44	1026	760	815
Εκατοστιαία Επιμήκυνση A5 (%)	≥ 20	≥ 2 (τυπική: 10±2)	7	90°: 8±3 45°: 8±3 0°: 11±1	3,7	15	10
Vickers Σκληρότητα	35-45 HRC	≥ 350 HV10 (τυπική: 42±30)	370 HV		461 HV10	425 HV10	375 HV5



*Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (αργόν): 6 ώρες στους 1150 °C.

**Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (αργόν) : θέρμανση στο φούρνο μέχρι τους 450 °C εντός 60 λεπτών, παραμονή σε αυτήν για 45 λεπτά, άνοδος στους 750 °C σε 45 λεπτά, παραμονή εκεί για 60 λεπτά, παύση της θέρμανσης και όταν η θερμοκρασία κατέλθει περίπου κάτω από τους 600 °C πραγματοποιείται άνοιγμα της πόρτας του φούρνου, και όταν ο κλίβανος έχει κρυώσει περίπου 300 °C αφαιρείται το προστατευτικό κιβώτιο αερίου και κλείνεται η ροή αργόν.

***Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων: στους 1000 °C για 30 λεπτά στο φούρνο, αφαίρεση από αυτόν και ψύξη στον αέρα του περιβάλλοντος. Έπειτα αφαιρείται ο σκελετός από την πλατφόρμα κατασκευής και ακολουθεί στη συνέχεια η ανόπτηση της διάλυσης στους 1150 °C για 20 λεπτά και ψύξη στον αέρα του περιβάλλοντος

****Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (αργόν): θέρμανση μέχρι τους 1150°C , παραμονή για 1 ώρα και ψύξη στο φούρνο στους 300 °C.

*****Οι παραπάνω ιδιότητες προκύπτουν μετά τη θερμική κατεργασία ανακούφισης τάσεων υπό ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (αργόν): παραμονή στους 750 °C για 1 ώρα και ψύξη με φυσικό τρόπο (naturally).

