



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΑΟΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ
ΔΟΚΩΝ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΟΡΦΗΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ

47714

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΠαΔΑ

ΑΘΗΝΑ, 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS
FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF ROLLERS USED IN HOT ROLLING
OF STRUCTURAL SHAPE STEEL BEAMS

UNDERGRADUATE STUDENT: NIKOLAOU CHRYSOSTOMOS
47714

LABORATORY: TECHNOLOGY OF MATERIALS AND QUALITY
CONTROL

THESIS ADVISOR: MEDREA KARMEN, ASSOCIATE PROFESSOR
SUPERVISOR: PAPAGEORGIU DIMITRIOS, LABORATORY
ASSOCIATE



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι εξεταστική επιτροπή:

α/α	Όνομα/Επώνυμο	Βαθμίδα/Ιδιότητα	Ψηφιακή υπογραφή
1	ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ	ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ - ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ	
2	ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ - ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ	
3	ΚΑΡΕΛΛΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ- ΑΓΑΘΟΚΛΗΣ	ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΕΔΙΠ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ ΤΟΥ ΜΑΤΘΑΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 47714 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της 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



Νικολάου Χρυσόστομος

(υπογραφή)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη θραυστογραφική ανάλυση ράουλων για τη κατασκευή χαλύβδινων δοκών θερμής έλασης διατομής μορφής.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος περιλαμβάνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για τη διεξαγωγή μιας ανάλυσης αστοχίας. Επίσης περιλαμβάνονται διαδικασίες και τεχνικές που αξιοποιούνται στη διαμόρφωση ελασμάτων αλλά και τη μεθοδολογία κατασκευής κοιλοδοκών εν θερμώ, τα εργαλεία και οι μηχανές που αξιοποιούνται. Στο δεύτερο μέρος, η εργασία περιλαμβάνει τη διαδικασία της ανάλυσης αστοχίας ενσωματώνοντας τη δημιουργία φωτογραφικού αρχείου των δειγμάτων μέσω στερεοσκοπίου, τη διαδικασία μέτρησης της σκληρότητας, την προετοιμασία των δοκιμών προς μεταλλογραφική ανάλυση και την θραυστογραφική ανάλυση για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων που οδήγησαν στην αστοχία των ραούλων και την πρόταση λύσεων που θα αποτρέψουν περαιτέρω αστοχίες στο μέλλον.

Λέξεις κλειδιά: Ανάλυση αστοχίας, θραυστογραφική ανάλυση, διαμορφώσεις εν θερμώ κοιλοδοκών, ράουλα.

Abstract

This thesis examines the fractographic analysis of rollers used in hot rolling of structural shape steel beams.

The study has two parts. The first part has the needed theory to conduct a failure analysis it also describes all the techniques of roll forming of sheet metal to structural hollow sections, the machinery and the tools used during this process as well as the chemical and metallurgical characteristics off the rollers that are used. The second part off the study which is the experiment it includes a photography off the rollers that will be examined, the stereomicroscope, the hardness testing, the polishing off the failed parts and the fractographic analysis in order to conclude to the reason of the failure and to provide a solution for further preventions in the near future.

Key words: Failure analysis, fractographic analysis, forming of steel beams, rollers used in hot rolling

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στις παρακάτω εταιρίες και εργαστήρια που συνεργάστηκαν για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας καθώς και στους αναφερόμενους επιστήμονες, μηχανικούς και τεχνικούς για την εκπόνηση της εργασίας. Χωρίς τη βοήθεια τους σημαντικά μέρη της εργασίας δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν.

- Στον Κ. Ιωάννη Μηχελιουδάκη ιδιοκτήτη μηχανουργείου το οποίο ανέλαβε να παραλάβει τα ράουλα και να τα παραχωρήσει στη μελέτη της διπλωματικής εργασίας όπως επίσης και για την ενημέρωση με το ιστορικό που φέρουν τα ράουλα.
- Στον Κ. Δημήτριο Παπαγεωργίου, Μηχανολόγο μηχανικό ΕΜΠ. Εργαστηριακό συνεργάτη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο στη διενέργεια πειραματικών δοκιμών όσο και στην καθοδήγηση και το χρόνο που αφιέρωσε για τη σωστή εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, που παρόλη τη πίεση χρονικά που διαθέταμε ανταπεξήλθε βάζοντας κάθε δυνατή προσπάθεια.
- Στην Κα. Μέντρεα Κάρμεν, Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό UTC-N (Technical University of Cluj-Napoca) και καθηγήτρια του μαθήματος Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για τη παροχή κατάλληλων γνώσεων σε ζητήματα σχετικά με την εργασία.
- Στον Κύριο πολύκαρπο εργαζόμενο στην εταιρία ΕΛΑΣΤΡΟΝ ΑΕΒΕ ο οποίος σε συνεργασία με το κύριο Μηχελιουδάκη μερίμνησε για στην επίσκεψη και την ξενάγηση μέσα απο τη βιομηχανία ΕΛΑΣΤΡΟΝ ΑΕΒΕ για να μπορέσω να δώ στοιχεία επι της γραμμής παραγωγής
- Στην Κα. Νικολέττα Μαστορίδου εργαζόμενη στη εταιρία Νίκος Μπαζίγος ΑΒΕΕ για το τεμαχισμό ενός από τα ράουλα αξιοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτροδιάβρωσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 4 -
Περίληψη	- 5 -
Abstract.....	- 6 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	- 7 -
Πρόλογος	- 10 -
1. Ανάλυση αστοχίας	- 11 -
1.1 Εισαγωγή	- 11 -
1.2 Αστοχία	- 12 -
1.3 Ανάλυση μηχανισμών αστοχίας	- 13 -
1.4 Ανάλυση αστοχίας	- 16 -
1.5 Τεχνικές ανάλυσης αστοχίας	- 17 -
1.5.1 Συλλογή Ιστορικών δεδομένων	- 17 -
1.5.2 Προκαταρκτική εξέταση των εξαρτημάτων	- 18 -
1.5.3 Μακροσκοπική εξέταση.....	- 18 -
1.5.4 Μη καταστροφικές τεχνικές και μέθοδοι.....	- 19 -
1.5.6 Καταστροφικές μέθοδοι	- 21 -
1.5.7 Μεταλλογραφική ανάλυση	- 22 -
1.5.7.1 Μικροσκοπική εξέταση.....	- 23 -
1.5.7.3 Μηχανικές ιδιότητες-δοκιμές.....	- 24 -
1.5.7.4 Χημική ανάλυση.....	- 24 -
1.5.7.5 Θραυστομηχανική ανάλυση	- 25 -
2. Διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού	- 29 -
2.1 Σφυρηλασία	- 29 -
2.1.4 Σφυρηλασία κλειστής μήτρας.....	- 30 -
2.2 Έλαση	- 31 -
2.3 Εξώθηση.....	- 33 -
3 Διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος	- 36 -
3.1 Απότμηση.....	- 36 -
3.2 Κοίλανση	- 39 -
3.3 Κάμψη	- 42 -
3.4 Περιώθηση.....	- 46 -
4. Διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος-διαμορφώσεις λαμαρίνας	- 49 -
4.1 Διαμορφώσεις εν θερμώ περιγραφή μηχανισμών διαμόρφωσης κοιλοδοκών	- 53 -
4.2 Μηχανές για διαμόρφωση εν θερμώ	- 58 -
4.2.1 Μονάδες έλασης.....	- 59 -

4.2.2 Μηχανές κατασκευής κοιλοδοκών άνευ συγκόλλησης	- 60 -
4.2.3 Μηχανές με συγκόλληση για την κατασκευή κοιλοδοκών	- 61 -
4.3 Διαδικασία κατασκευής των ράουλων	- 63 -
4.3.1 Χημική σύσταση υλικών των ράουλων	- 63 -
4.3.2 Μικροδομή της επιφάνειας των ράουλων	- 63 -
4.3.3 Υλικά κατασκευής ράουλων	- 64 -
5. Πειραματικό μέρος προκαταρκτική εξέταση	- 66 -
5.1 Βασικά στοιχεία μηχανής - εξαρτήματος	- 66 -
5.2 Συλλογή ιστορικών δεδομένων	- 66 -
5.3 Επίσκεψη στη βιομηχανία αποτύπωση γραμμής παραγωγής	- 69 -
5.3 Οπτικός έλεγχος σε photobox	- 75 -
5.4 Έλεγχος σε στερεοσκόπιο	- 80 -
5.4 Μέτρηση σκληρότητας	- 86 -
5.4 Χημική ανάλυση.....	- 88 -
6. Καταστροφικός έλεγχος των ράουλων.....	- 89 -
6.1 Κοπή των δειγμάτων	- 89 -
6.2 Εγκιβωτισμός δοκιμίων	- 90 -
6.3 Λείανση δοκιμίων.....	- 91 -
6.4 Στίλβωση δοκιμίων.....	- 92 -
6.5 Χημική προσβολή δοκιμίων	- 92 -
6.6 Ανάλυση μικροδομής με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.....	- 93 -
7. Συμπεράσματα	- 116 -
Βιβλιογραφία	- 117 -

Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με το κανονισμό σπουδών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, με εισήγηση και επίβλεψη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η δομή, η τεκμηρίωση και η παρουσίαση της έλαβε χώρα σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης ΕΛ.Ο.Τ.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της θραύσης ραούλων που χρησιμοποιούνται για την εν θερμώ διαμόρφωση χαλύβδινων κοιλοδοκών. Τα ράουλα αυτά που είναι προς εξέταση έχουν προέλθει από την εταιρία ΕΛΑΣΤΡΟΝ Α.Ε.Β.Ε μια εταιρία που ασχολείται με την διαμόρφωση και την εμπορία χαλυβουργικών προϊόντων από κοινούς ανθρακούχους χάλυβες.

Η ανάλυση της αστοχίας των ραούλων αποσκοπεί στην ανεύρεση του κύριου μηχανισμού που οδήγησε στο να αστοχήσουν τα εξαρτήματα αυτά, και στα αίτια που οδήγησαν σε αυτή.

Η εργασία αυτή αποτελείται από δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Το θεωρητικό μέρος ξεκινάει με την ανάλυση αστοχίας όπου και γίνεται περιγραφή των μηχανισμών αστοχίας καθώς και τα απαιτούμενα βήματα για την εκπόνηση της ανάλυσης που θα οδηγήσει στη διεξαγωγή των σωστών συμπερασμάτων. Σε επόμενα κεφάλαια γίνεται μια περιγραφή της εν θερμώ διαμόρφωσης χαλύβων και ειδικότερα γίνεται αναφορά σε δυο κατηγορίες. Σε αυτή του συμπαγούς υλικού και του επιπέδου ελάσματος. Κατόπιν περιγράφονται οι διαμορφώσεις σε επίπεδο ελάσματος, όπου και γίνεται μια κατηγοριοποίηση με βάση το πάχος του ελάσματος. Στη συνέχεια περιγράφονται οι διαμορφώσεις εν θερμώ και γίνεται αναφορά σε μηχανές που εκτελούν αυτή τη διαδικασία, όπως επίσης περιγράφονται τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένα τα εξαρτήματα.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αποτελείται από το πειραματικό μέρος πιο συγκεκριμένα στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της εργαλειομηχανής που αστόχησε το εξεταζόμενο ράουλο. Στην συνέχεια, γίνεται αποτύπωση της γραμμής παραγωγής και των σταδίων που την απαρτίζουν για την καλύτερη κατανόηση της εξεταζόμενης περίπτωσης. Σε επόμενο στάδιο γίνεται η καταγραφή του ιστορικού του εξαρτήματος που αστόχησε. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται μέσω οπτικού μικροσκοπίου, με βάση το κατάλληλο πρότυπο ASTM για την αποτύπωση των φωτογραφιών. Επίσης λαμβάνονται μετρήσεις σκληρότητας για να αξιολογηθεί η κατάσταση του εξαρτήματος με τα δεδομένα της παραγωγής του κατασκευαστή.

Στο έκτο κεφάλαιο εκτελούνται όλοι οι καταστροφικοί έλεγχοι όπως χαρακτηρίζονται από τη θεωρία και περιλαμβάνουν όλες τις διαδικασίες τεμαχισμού για την προετοιμασία των δοκιμών για τον εγκιβωτισμό και τη λείανση τους η οποία θα ακολουθηθεί με τη στίλβωση ώστε να μπορούν πλέον με το στάδιο τη χημικής προσβολής να αποτυπωθούν καταλλήλως οι φάσεις που απαρτίζουν τα δοκίμια. Συμπληρωματικά, αυτά εξετάζονται σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων επί της αστοχίας.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η αποτύπωση των συμπερασμάτων τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά για την εύρεση του αιτίου της αστοχίας όσο και του μηχανισμού διάδοσής της θραύσης συνοδευόμενη από κατάλληλες λύσεις ώστε να μην επαναληφθεί στο μέλλον.

1. Ανάλυση αστοχίας

1.1 Εισαγωγή

Οι τεχνολογικές εφαρμογές ήταν πάντα μία ριψοκίνδυνη δουλειά υψηλού ρίσκου. Γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει στον τομέα της μηχανολογίας η επιθυμία να αναλύεται ο κίνδυνος και να ποσοτικοποιείται βάσει της κάθε σχεδιαστικής εφαρμογής.

Η επιστήμη που είναι υπεύθυνη ώστε να βελτιστοποιεί τα αποτελέσματα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία προϊόντων είναι η επιστήμη της τεχνολογίας των υλικών.

“The science responsible for optimizing the results from the materials used to create products is the science of materials technology”.

(Otegui, 2014)

Όταν ένα εξάρτημα τοποθετείται σε λειτουργία, τότε ξεκινάει μια μακροχρόνια δοκιμή που σημαίνει ότι όλα τα θεωρητικά μοντέλα συνοδευόμενα από όλες τις υποθέσεις στις οποίες βασίστηκε η κατασκευή του αποτελούν πλέον μία εφαρμογή αυτής της μελέτης. Οι αστοχίες αυτού του εξαρτήματος να δίνουν μία συνολική εικόνα για τις ατέλειες και τις αδυναμίες οι οποίες μπορεί να προέκυψαν κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή ή κατά την εκλογή του υλικού για την κατασκευή.

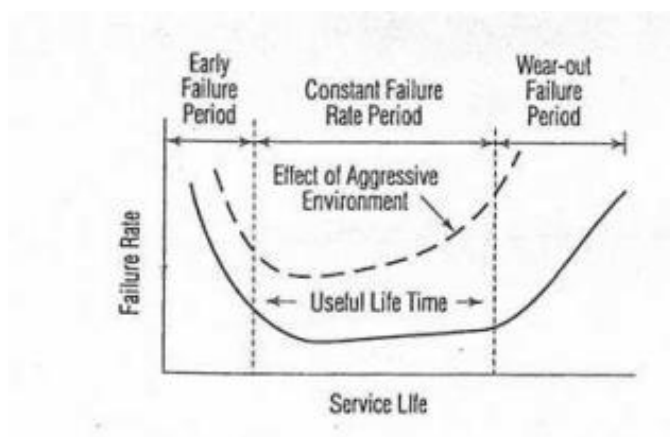
Όλη αυτή η ανάλυση της αστοχίας αποσκοπεί στη βελτίωση και την αύξηση του χρόνου ζωής του εκάστοτε αντικειμένου καλύπτοντας παράλληλα και τους οικονομικούς στόχους που σε αντίθετη περίπτωση η χρήση ή η αξιοποίηση ενός τέτοιου εξαρτήματος θα σήμαινε δαπάνηρη λειτουργία.

“All this failure analysis aims to improve and increase the life time of the respective item while also meeting the economic goals, that otherwise the use or exploitation of such component would mean an expensive operation.”

(Das, 1996)

1.2 Αστοχία

Ένας απλοϊκός ορισμός της αστοχίας είναι η διαφορά ανάμεσα στο προσδοκώμενο και το πραγματικό αποτέλεσμα. Αντιπροσωπεύει μία δυσχερή κατάσταση λειτουργίας κατά την οποία το εξάρτημα αποτυγχάνει να λειτουργήσει ως αναμενόμενο μέσα στο προδιαγραφόμενο χρονικό διάστημα για το οποίο έχει κατασκευαστεί. Οι αστοχίες είναι γενικότερα ένα σύνηθες φαινόμενο στο χρόνο ζωής ενός συστήματος και ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται μπορεί να διαφέρει πολύ. Γενικά υπάρχουν διαφορετικοί χαρακτηρισμοί της αστοχίας σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας. Οι αστοχίες αυτές περιγράφονται καλύτερα στο παρακάτω Γράφημα. (Das, 1996)



Σχήμα 1 Ρυθμός αστοχίας σε συνάρτηση με το χρόνο λειτουργίας [5]

- Η πρώτη ζώνη είναι η πρόωρη περίοδος αστοχίας που μπορεί να οφείλεται σε ελλιπή και μη έγκυρο σχεδιασμό, σε κατασκευαστικά ελαττώματα, σφάλματα εγκατάστασης και συναρμολόγησης ακόμη και σφάλματα κατά την περίοδο συντήρησης.
- Η δεύτερη ζώνη αφορά τις βλάβες λειτουργίας (constant failure rate period) αυτές οι αστοχίες είναι αναμενόμενες λόγω της λειτουργίας του εκάστου συστήματος και αποτελεί τμήμα της ωφέλιμης εκμετάλλευσης του χρόνου ζωής του.
- Η τρίτη ζώνη είναι η τελευταία ζώνη εκεί πλέον ο εξοπλισμός έχει ξεπεράσει τις προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας του με αποτέλεσμα να υπάρχει συχνότερη εμφάνιση των βλαβών στο σύστημα.

Γενικότερα, σε επίπεδο σχεδιασμού των κατασκευών στόχος είναι να περιοριστεί η πρώτη ζώνη και να επεκταθεί η δεύτερη ζώνη.

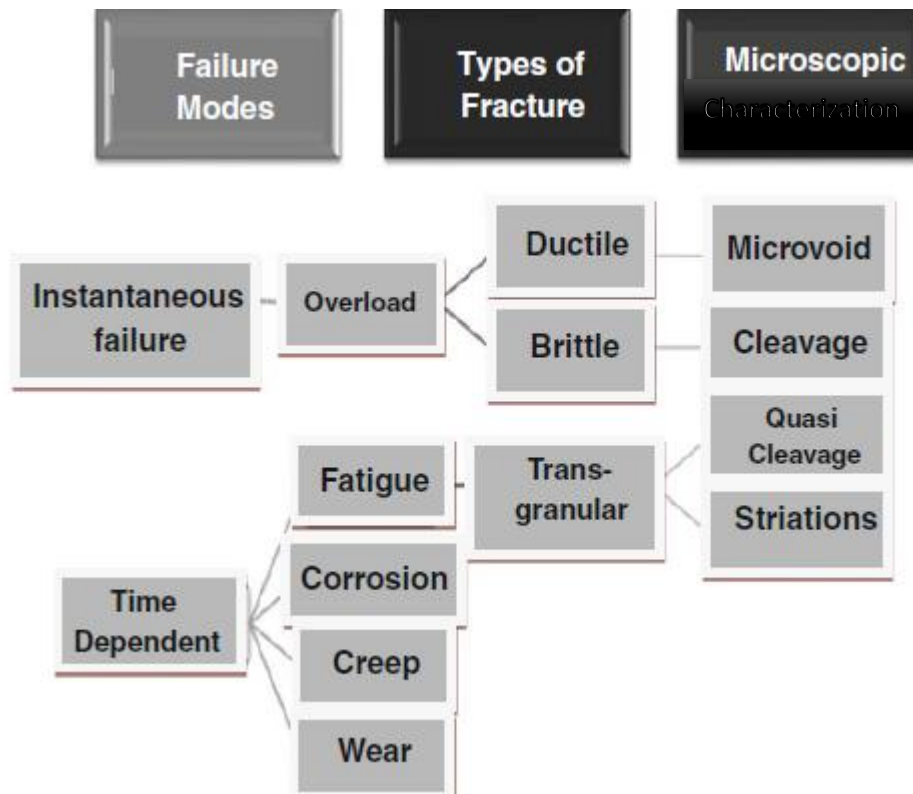
1.3 Ανάλυση μηχανισμών αστοχίας

Εξαρτήματα τα οποία υπόκεινται σε μηχανική καταπόνηση είναι σχεδιασμένα να αντέξουν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ασφαλούς λειτουργίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια να δημιουργείται ένα πλάνο συντηρήσεων και ανακατασκευών. Στους κατασκευαστικούς κώδικες έχει επικρατήσει η εξής θεωρία: ότι όλα τα υλικά αντιδρούν με το περιβάλλον τους με αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι χρόνοι συντηρήσεως των εξαρτημάτων. Για παράδειγμα στην Αλγερία πάνω από το 5% του ΑΕΠ της χώρας δαπανάται σε ζημιές που οφείλονται στη διάβρωση.

Ένας μηχανισμός αστοχίας είναι ο τρόπος με τον οποίον προκαλείται φθορά σε ένα λειτουργικό εξάρτημα το οποίο πλέον χάνει την ικανότητα να λειτουργήσει όπως έχει σχεδιαστεί. Έχει συνδυαστεί με τη μη λειτουργική κατάσταση (down-time) καθώς είναι πλέον μη λειτουργικό το σύστημα το οποίο απαρτίζει έως ότου να επισκευαστεί. Η αστοχία συμβαίνει όταν η ζημιά ξεπεράσει ένα κρίσιμο όριο το οποίο είναι το όριο αστοχίας. Έχει σαν συνέπεια τη διακοπή της παραγωγής, την απώλεια εισοδήματος, αλλά και σε άλλες την απώλεια ανθρώπινων ζώων.

Οι μηχανισμοί με τους οποίους μπορεί να προκληθεί μια αστοχία είναι οι εξής:

- Υπερβολική ελαστική παραμόρφωση που οφείλεται σε μεγάλα φορτία και θερμοκρασίες
- Διαρροές από λιπαντικές ουσίες σε πολλές περιπτώσεις, σε τρίβόμενες επιφάνειες
- Εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση
- Όλκιμη θραύση : υπάρχει εκτενής πλαστική παραμόρφωση πέριξ της θραύσης
- Ψαθυρή θραύση: χαρακτηρίζεται από μικρή έως ελάχιστη παραμόρφωση
- Θερμότητα: π.χ. Συγκόλληση
- Ελαστική ή δυναμική ευστάθεια από το αρχικό σχήμα (buckling, λυγισμός). Μέσα στο πλαίσιο λειτουργίας των εξαρτημάτων υπάρχουν επίσης μηχανισμοί που δρουν έτσι ώστε να υπάρξει αντικατάσταση τους λόγω:
- Κόπωσης: υψηλός αριθμός ωρών λειτουργίας σε συνδυασμό με μικρούς και μεγάλους κύκλους φόρτισης που οδηγούν το εξάρτημα σε ρηγματώσεις
- Διάβρωση
- Ερπυσμός
- Συνδυασμός ερπυσμού κόπωσης
- Συνδυασμός διάβρωσης κόπωσης
- Φθοράς
- Επιφανειακές τάσεις κατά την επαφή υλικών.
- Άλλες πιο εξιδικευμένες περιπτώσεις
(Das, 1996)



Διάγραμμα κατηγοριοποίησης των μηχανισμών αστοχίας [5]

Πιο ειδικά πρέπει να αναφερθούν οι διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους εμφανίζεται η φθορά στα ράουλα.

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα ράουλα διαμόρφωσης “εν θερμώ” διαφέρουν σε κάθε στάδιο της παραγωγής, στα πρώτα στάδια κύριο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχουν τα ράουλα είναι υψηλή αντίσταση στη θερμοκρασία και μεγάλη σκληρότητα, ενώ στα τελευταία στάδια θα πρέπει να έχουν υψηλή αντίσταση στη φθορά από τριβή (abrasive wear).

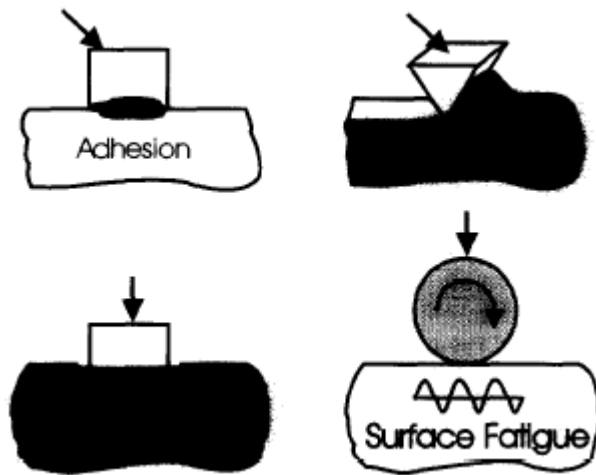
Από εφαρμογές στην αγορά έχει διαπιστωθεί ότι η φθορά στα ράουλα αυξάνεται δραστικά μετά από συγκεκριμένη ποσότητα παραγωγής, έτσι είναι σημαντικό να πραγματοποιείται αντικατάσταση τους μετά από ένα συγκεκριμένο όριο φορτίου το οποίο είναι ισοδύναμο με τις ώρες λειτουργίας του εξαρτήματος. Χαρακτηριστικά, τα ράουλα μορφοποίησης σχήματος (calibre rolls) έχουν αντοχή μερικούς εκατοντάδες τόνους ενώ τα συμβατικά επίπεδα ράουλα (flat rolls) αντέχουν από 5×10^3 - $20 \times 10^3 \text{ t} \times \text{mm}^{-1}$ (τόνους ανα χιλιοστό έλασης).

Οι μηχανισμοί φθοράς που εμφανίζονται στα ράουλα είναι οι εξής:

- Φθορά εκ τριβής (abrasive wear)
Είναι η πιο συχνή περίπτωση φθοράς που εμφανίζεται. Γενικά η φθορά τριβής μπορεί να αποτυπωθεί ως φθορά μεταξύ δύο ή και τριών σωμάτων, λόγω της παρεμβολής στρωμάτων οξειδίων τα οποία έχουν υψηλή σκληρότητα και χαμηλής πλαστικότητας ανάμεσα στα ράουλα και στα φύλα του χάλυβα που διαμορφώνονται.
- Θερμική κόπωση (thermal fatigue)
Είναι επίσης ένας διαδεδομένος μηχανισμός φθοράς στα ράουλα. Πάνω στα ράουλα υπάρχει ένας κύκλος όπου το τμήμα της επιφάνειας του ραούλου θερμαίνεται λόγω της επαφής με το θερμό χάλυβα, ενώ ένα άλλο τμήμα είναι σε φάση ψύξης από νερό ή πιο συχνά κάποιο γαλάκτωμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις.

Αν οι θλιπτικές τάσεις υπερβούν το όριο της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη θερμή φάση τότε παραμορφώνεται πλαστικά το εξωτερικό στρώμα του ράουλου, ενώ ανάλογα κατά τη ψύξη του μειώνεται η ολκιμότητα μέσω της επιβολής εφελκυστικών τάσεων. Αυτές οι τάσεις έχουν σαν συνέπεια την εμφάνιση ρηγματώσεων στα ράουλα λόγω πύρωσης (firecrack pattern).

- Φθορά από διάβρωση (corrosion wear)
Διάφορες μορφές διάβρωσης που επενεργούν πάνω στα ράουλα είναι υπεύθυνες για την εκδήλωση φθοράς.
- Φθορά πρόσφυσης (Adhesion wear)
Υπάρχουν επίσης φαινόμενα μεταφοράς και προσκόλλησης απο το επεξεργαζόμενο υλικό προς έλαση στα ράουλα. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μειώνεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος με το να αποτυπώνονται ομοιογενή σημάδια καθώς το υλικό προσκολλάται στα ράουλα κάνοντας πιο τραχεία την επιφάνεια του ενώ παράλληλα αυξάνεται ο συντελεστής τριβής. (S. Spruzic, August 1994)



Εικόνα 1 απεικόνιση μεθόδων φθοράς ράουλων [17]

1.4 Ανάλυση αστοχίας

Μία μελέτη αστοχίας έχει διάφορα θέματα που μπορεί να εξετάσει. Κύριος σκοπός μιας τέτοιας έρευνας είναι να προσδιορίσει το αίτιο αστοχίας αλλά και την αξιοπιστία του προϊόντος με γνώμονα την αποφυγή πρόωρων αστοχιών. Περιστασιακά μία μελέτη αστοχίας πραγματοποιείται και για ακαδημαϊκούς σκοπούς. Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση παραμένει η σημασία που έχει η ανάλυση αστοχίας καθώς μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις.

Γενικά οι περισσότερες αστοχίες Μπορούν εύκολα να αναλυθούν από μεταλλουργούς ενώ για πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις απαιτούνται ειδικοί εμπειρογνώμονες μηχανικοί.

(Das, 1996)

Υπάρχουν συγκεκριμένα βήματα που απαιτούνται να ακολουθήσει ένας ερευνητής προκειμένου να οδηγηθεί στη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τους παράγοντες που οδήγησαν στην αστοχία. Τα βήματα πολλές φορές μπορούν να διαφέρουν κατά περίπτωση εφαρμογής αλλά η σειρά ορίζεται όπως παρακάτω:

1. Η συλλογή ιστορικών δεδομένων ,δηλαδή όλων των πληροφοριών που να εξηγούν τι ακριβώς συνέβη πριν ή μετά την αστοχία, το ιστορικό του εξεταζόμενου εξαρτήματος με τις σχετικές κατεργασίες που έχει υποστεί και η συλλογή δειγμάτων για πειραματική ανάλυση (πρότυπο ASTM E-1188 & E 1492 (ASTM))
2. Προκαταρκτική εξέταση του εξαρτήματος .Οπτικός έλεγχος αποτύπωση σε φωτογραφίες, αποτύπωση σε σκαρίφημα α) τη γέννηση της αστοχίας β) τη τοπογραφία της συγκέντρωσης των τάσεων γ) ο σχετικός χρωματισμός δ) ο προσανατολισμός των τάσεων ε) ο κανόνας αστοχίας και ο μηχανισμός της στ) η κατεύθυνση που έχουν οι ρηγματώσεις η) η παρουσία τυχόν ατελειών θ) και τέλος μεγέθη και διαστάσεις
3. Πραγματοποίηση μη καταστροφικών ελέγχων
4. Επιλογή ταυτοποίηση καθαρισμός και συντήρηση όλων των δειγμάτων
5. Μακροσκοπική εξέταση και ανάλυση
6. Μικροσκοπική εξέταση και ανάλυση
7. Ανάλυση τάσεων για να καθοριστεί η πραγματική τάση που οδήγησε στην αστοχία
8. Προσδιορισμός του μηχανισμού αστοχίας
9. Μεταλλογραφία και ανάλυση μικροδομής
10. Εκτέλεση καταστρεπτικών δοκιμών
11. Εκτέλεση μηχανικών δοκιμών (π.χ μέτρηση σκληρότητας και αντιπαραβολή με προδιαγραφές, προσδιορισμός ιδιοτήτων των εξαρτημάτων που αστοχίσαν) ASTM E 860
12. Χημική ανάλυση
13. Έλεγχος με προσομοιωμένες συνθήκες λειτουργίας
14. Θραυστομηχανική ανάλυση για το προσδιορισμό της αστοχίας
15. Συγκέντρωση και αντιπαραβολή όλων των αποδεικτικών στοιχείων με στόχο τη διεξαγωγή συμπερασμάτων που παρουσιάζονται σε έκθεση αναφοράς αστοχίας βάση του προτύπου E 820. (William T. Becker, 2002)

1.5 Τεχνικές ανάλυσης αστοχίας

Παρόλο που η σειρά των σταδίων της ανάλυσης αστοχίας που αναφέρονται στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να αλλάζει με βάση την κάθε εφαρμογή και τα ιστορικά δεδομένα ο συνδυασμός τους απαρτίζει μία ολοκληρωμένη έρευνα αστοχίας. Πιο ειδικά τα περιγράφονται παρακάτω:

(William T. Becker, 2002)

1.5.1 Συλλογή Ιστορικών δεδομένων

Η έρευνα μιας ανάλυσης θα πρέπει να περιλαμβάνει μία εξοικείωση με όλες οι λεπτομέρειες που οδήγησαν στην αστοχία. Η συλλογή δεδομένων σχετικά με την κατασκευή του εξαρτήματος που αστόχησε είναι πολύ σημαντική καθώς παράμετροι όπως η κατεργασία συγκόλλησης, θερμική κατεργασία, επιστρώσεις αλλά και αρχεία ποιότητας και ελέγχου αποτελούν ουσιαστικό εργαλείο για όλη τη σχετική διαδικασία της ανάλυσης σε αστοχίας.

- **Ιστορικό κατασκευής:**

Περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές προδιαγραφές και τα πρότυπα που χρησιμοποιήθηκαν, τις τεχνικές προδιαγραφές τα σχόλια και τις λειτουργίες της κατασκευής. Ειδικά αναφέρεται σε μηχανουργικές κατεργασίες όπως συγκόλληση, θερμικές κατεργασίες, πρότυπα και προδιαγραφές.

- **Ιστορικό συντήρησης:**

Η διαθεσιμότητα ενός πλήρους ιστορικού εξαρτάται από το πόσο πλήρης και αναλυτικό μπορεί να είναι ένα αρχείο καταγραφής δεδομένων. Πιο ειδικά δεδομένα όπως φορτίσεις, επαναλαμβανόμενα φορτία, θερμοκρασιακές μεταβολές, λειτουργία σε διαβρωτικό περιβάλλον μπορούν να βοηθήσουν τον αναλυτή στη διεξαγωγή καλύτερων συμπερασμάτων σχετικά με τη διαδικασία. Όταν τα δεδομένα συντήρησης είναι ελλιπή τότε ο αναλυτής αναγκάζεται να εξάγει συμπεράσματα από μόνος του για τη συντήρηση των εξαρτημάτων.

- **Φωτογραφικό αρχείο:**

Φωτογραφίες του αντικειμένου που αστόχησε είναι απαραίτητες σε μία ανάλυση αστοχίας. Μία λεπτομέρεια η οποία μοιάζει αμελητέα σε μία προκαταρκτική εξέταση, μπορεί να βρεθεί στην πορεία και να διαπιστωθεί ότι έχει σημαντικές συνέπειες στην εξέλιξη της ανάλυσης, Έτσι ένα λεπτομερές φωτογραφικό αρχείο είναι απαραίτητο να αποτυπώνεται το οποίο θα διαθέτει λήψεις οι οποίες βασίζονται σε κάποια πρότυπα και δεν αλλοιώνουν την πραγματικότητα.

- **Επιλογή δειγμάτων:**

Τα δείγματα θα πρέπει να εκλέγονται με αμεροληψία, ειδικά όταν η έρευνα είναι μακροσκελής. Οι φωτογραφίες θα πρέπει να ανταποκρίνονται στα δείγματα που θα επιλεγούν και να απεικονίζονται επαρκώς τα στοιχεία της αστοχίας (ρηγματώσεις, επιφάνειες, όψεις). Η κατάλληλη επιλογή των τιμών καθορίζεται από τα πρότυπα ASTM E620, E860, E1020, E878. Είναι πολύ σημαντικό να αντιπαραβάλλονται τα εξαρτήματα που έχουν αστοχήσει με παρόμοια τα οποία δεν έχουν, έτσι ώστε να προσδιοριστεί αν η αστοχία οφείλεται σε λόγους συντήρησης, χρήσης ή ακόμη και σε κατασκευαστικά αίτια.

1.5.2 Προκαταρκτική εξέταση των εξαρτημάτων

Το εξάρτημα που έχει αστοχήσει και τα τεμάχια που μπορεί να έχουν αποκολληθεί υποβάλλονται σε εκτενή μακροσκοπική εξέταση πριν γίνει οποιαδήποτε διαδικασία καθαρισμού, καθώς ρύποι και θραύσματα από τα συντρίμμια παρέχουν πολύτιμα στοιχεία για τον καθορισμό των αιτιών της αστοχίας. Ο προκαταρκτικός έλεγχος βασίζεται πρώτα στην εξέταση με γυμνό μάτι.

Πιο Ειδικά, η οπτική εξέταση απαιτεί μόνο τη χρήση του ματιού χωρίς τη χρήση οποιουδήποτε βοηθητικού μέσου όπως μικροσκόπιο ή στερεοσκόπιο. Ο λόγος αυτός εξυπηρετεί στην ανάλυση με γρήγορο ρυθμό μεγάλων περιοχών. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στις επιφάνειες που έχει εμφανιστεί η ρωγμή αλλά και τις διαδρομές που έχει ακολουθήσει η ρηγμάτωση.

Επίσης θα πρέπει να παρατηρηθούν ενδείξεις από τυχόν δυσλειτουργίες ή κακή χρήση κατά τη συντήρηση ή επισκευή του εξαρτήματος που αστόχησε. Ακόμη πρέπει να αξιολογείται ο βασικός σχεδιασμός όπως και οι τεχνικές κατασκευής. Όλα αυτά τα στοιχεία αποτυπώνονται και καταγράφονται με τη συνοδεία οπτικοακουστικών μέσων που θα βοηθήσουν στη εξαγωγή συμπερασμάτων με το πέρας της έρευνας. (William T. Becker, 2002)

1.5.3 Μακροσκοπική εξέταση

Αφού έχει ολοκληρωθεί ο προκαταρκτικός οπτικός έλεγχος ώστε να προσδιοριστούν ποια τμήματα είναι σημαντικά για εξέταση τότε η έρευνα συνεχίζεται με τη μακροσκοπική εξέταση που πλέον αξιοποιούνται και τεχνικά μέσα τα οποία επιτρέπουν την εστίαση όπως η χρήση ειδικών φακών σε κάμερες (macro lens). Η ανάλυση συνεχίζεται με τη φωτογράφιση σε στερεοσκοπικό μικροσκόπιο.

Αυτό γίνεται για την καλύτερη αποτύπωση του εξαρτήματος αλλά και των λεπτομερειών των ρηγματώσεων, ώστε να καταλήξει στο στάδιο του μικροσκοπικού ελέγχου πλέον, όπου εκεί πλέον χρησιμοποιείται ένα μικροσκόπιο τύπου SEM (scanning electron microscope). Χάρη στη μακροσκοπική εξέταση, μπορεί να προσδιοριστεί το σύνολο των ρωγμών η κατεύθυνση τους, το είδος των σημαδιών που αποτυπώνονται αλλά και να καθοριστεί το είδος της θραύσης (William T. Becker, 2002)

1.5.4 Μη καταστροφικές τεχνικές και μέθοδοι

Παρόλο που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία ποιοτικού ελέγχου οι μη καταστροφικές τεχνικές είναι ένας σύνθετος μέσος σε μία ανάλυση αστοχίας. Οι δυνατοί έλεγχοι που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι οι εξής: μαγνητικά σωματίδια (Magnetic particle inspection), έλεγχος με δινορεύματα (eddy current inspection), έλεγχος με υπερήχους (ultrasonic inspection). Όλα αυτά αξιοποιούνται κυρίως για επιφανειακό έλεγχο. Για έλεγχο σε βάθος χρησιμοποιείται ραδιογραφικός έλεγχος. (William T. Becker, 2002)

- **Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια:**

Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί τη χρήση μαγνητικών πεδίων για τον προσδιορισμό επιφανειακών όπως και η υποεπιφανειακών ασυνεχειών σε μαγνητικά υλικά. Όταν το υλικό μαγνητίζεται ασυνέχειες που βρίσκονται κατά μήκος του θα προκαλέσουν μία διαταραχή στο μαγνητικό πεδίο, που αποτυπώνεται με την προσθήκη σωματιδίων με τη μορφή πούδρας που είναι επίσης μαγνητικά καθώς στο σημείο της ασυνέχειας του υλικού υπάρχει μία ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου άρα και μία συσσώρευση αυτών των ειδικά διαμορφωμένων σωματιδίων που δείχνουν την εμφάνιση της ασυνέχειας -ρωγμής. Σε συνδυασμό με τα μαγνητικά σωματίδια αξιοποιείται και ένα φθορίζον υγρό έτσι ώστε να είναι εμφανείς οι ασυνέχειες κάτω από υπεριώδες φως που ίσως διαφορετικά να μην ήταν αντιληπτό στο μάτι.

- **Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά**

Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται για την ανίχνευση επιφανειακών ατελειών στα υλικά. Χρησιμοποιείται κυρίως όχι όμως και σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει την επιστρωση του διεισδυτικού υγρού στο εξεταζόμενο μέσο. Τα υγρά αυτά είναι ικανά να εισχωρήσουν σε μικρές ρωγμές και ατέλειες έως 1μm. Το περισσευούμενο υλικό αφαιρείται και έτσι με τη χρήση υπεριώδους φωτός φαίνονται οι ασυνέχειες του υλικού.

Κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- ✓ Η χρήση σε μη μαγνητικά υλικά
- ✓ Η φορητότητα καθώς δεν χρειάζεται ειδικό εργαστηριακό εξοπλισμό για την εκτέλεση του ελέγχου
- ✓ Η αμεσότητα στα αποτελέσματα
- ✓ Το χαμηλό κόστος χρήσης

Υπάρχουν όμως και ορισμένα μειονεκτήματα:

- Οι ασυνέχειες για να αποτυπωθούν πρέπει να είναι σε εξωτερικές επιφάνειες
- Τα δοκίμια πρέπει να έχουν καθαριστεί πριν και μετά τον έλεγχο διότι τα διεισδυτικά υγρά είναι διαβρωτικά
- Ύπαρξη επιφανειακών επιστρώσεων που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία της μεθόδου και μπορούν να αλλοιώσουν τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης στη συνέχεια
- Δεν συνιστάται η εφαρμογή της μεθόδου σε προϊόντα χαμηλής πυκνότητας όπως προϊόντα κοινομεταλλουργίας και άλλα πορώδη υλικά

- **Έλεγχος με δινορεύματα**

Ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι δυνατόν να χρησιμοποιείται μόνο σε υλικά που δρουν ως αγωγοί του ηλεκτρισμού. Η εφαρμογή της μεθόδου στηρίζεται σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν παράλληλα δινορεύματα στην επιφάνεια του υλικού. Τα δινορεύματα δημιουργούν και αυτά αντίθετα μαγνητικά πεδία με το υλικό, με αποτέλεσμα στα σημεία που τα δινορεύματα έχουν εξασθενήσει να γίνεται η ανίχνευσή των ατελειών. Σημαντικά πλεονεκτήματα είναι:

- ✓ Η αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος
- ✓ Δυνατότητα αυτοματοποίησης σε περίπτωση συμμετρίας

Η μέθοδος αυτή έχει μειονεκτήματα όπως:

- ✓ Περιορισμό εφαρμογή σε αγώγιμα υλικά
- ✓ Μικρό βάθος σάρωσης

(Ανάλυση αστοχίας σε άξονα αντλίας ψύξης νερού, 2019)

- **Έλεγχος με υπερήχους**

Ο έλεγχος με υπερήχους βασίζεται στη χρήση ηχητικών κυμάτων πολύ υψηλής συχνότητας τα οποία μπορούν να διαδοθούν μέσα από το μέταλλο και να υποστούν ανάκλαση σε οποιαδήποτε διακριτό όριο όπως μέταλλο-αέρας στην επιφάνεια του μετάλλου, μέταλλο ή ρηγμάτωση σε μια εσωτερική ασυνέχεια. Είναι κατάλληλος για μικρές ασυνέχειες που απορροφώνται εύκολα ειδικά σε υλικά με υψηλή τραχύτητα. Η εφαρμογή υπερήχων στην ανάλυση αστοχίας είναι περιορισμένη καθώς ακριβείς αποτυπώσεις εξαρτώνται από σημεία αναφοράς απαραίτητα για τον αποκλεισμό άλλων παραμέτρων. Έχει εφαρμογή σε μεγάλα προϊόντα χύτευσης ή σφυρηλασίας για την ανίχνευση ρωγμών, κοιλοτήτων συστολής, πόρων, ασυνεχειών και εγκλεισμάτων.

Μερικά μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- Εξειδικευμένο προσωπικό για την εφαρμογή
- Εκτενής τεχνική ενημέρωση σχετικά με την εκτέλεση των διαδικασιών
- Ασυνέχειες σε μικρό βάθος μπορεί να μην αποτυπωθούν
- Απαιτούνται σύνδεσμοι για την αποτελεσματική διάδοση των υπερήχων μεταξύ των πομπών και των εξεταζόμενων δοκιμίων
- Απαιτούνται πρότυπα αναφοράς για το κατάλληλο χαρακτηρισμό μιας ασυνέχειες και για τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού.

(William T. Becker, 2002)

- **Ραδιογραφικός έλεγχος**

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ακτίνες Χ ή ακτίνες Γ οι οποίες διοχετεύονται μέσα από το εξεταζόμενο αντικείμενο και αποτυπώνονται σε φωτογραφικό φιλμ. Η απεικόνιση με χρήση έντονου φωτός μας δείχνει ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού το μονοπάτι που ακολουθεί η ακτινοβολία. Έτσι περιοχές με ανοιχτόχρωμο φωτισμό δείχνουν σημεία με πυκνότερο υλικό ενώ σκουρόχρωμες περιοχές αποτυπώνουν μία ρωγμάτωση ή ένα ελάττωμα.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:

- ✓ Ανίχνευση εσωτερικών ατελειών του υλικού
- ✓ Η υποστήριξη από φωτογραφικά μέσα

Βασικό μειονέκτημα είναι η μη ανίχνευση ατελειών που δρουν κάθετα στην δέσμη της ακτινοβολίας.

(William T. Becker, 2002)

1.5.6 Καταστροφικές μέθοδοι

Στους καταστροφικούς ελέγχους ανήκουν οι δοκιμές που ουσιαστικά εξετάζουν την αντοχή ενός υλικού και περιλαμβάνουν διαδικασίες οι οποίες αλλοιώνουν την πρωταρχική δομή του υλικού δηλαδή το καταστρέφουν. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την επιλογή τη διατήρηση και τον καθορισμό των κατάλληλων δειγμάτων, τεμαχισμό, μικροσκοπική εξέταση, χημική ανάλυση, πειραματική ανάλυση τάσεων και πειραματικές δοκιμές αντοχής.

Πιο ειδικά οι επιφάνειες θραύσης όταν κριθεί απαραίτητο περνάνε από καθαρισμό. Αυτό εξυπηρετεί περιπτώσεις που απαιτείται να αφαιρεθούν ακαθαρσίες ή συντρίμμια ή ακόμη και οξειδώσεις. Ο καθαρισμός περιλαμβάνει εργαλεία όπως είναι: ο ξηρός αέρας, ηλεκτρική βούρτσα με μαλακή τρίχα, χρήση οργανικών διαλυτών, χρήση αλκαλικών διαλυμάτων ή ήπιων οξέων αναλόγως την εφαρμογή.

Επίσης ο τεμαχισμός είναι μία διαδεδομένη εφαρμογή καταστρεπτικού ελέγχου καθώς αξιοποιείται για την κοπή του δείγματος σε πρότυπα δοκίμια που θα εγκιβωτιστούν, ώστε να χρησιμοποιηθούν σε όργανα όπως το σκληρόμετρο, ηλεκτρονικά μικροσκόπια και φασματογράφοι.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την κοπή να προστατεύεται η περιοχή της θραύσης, καθώς οποιαδήποτε αλλοίωση της μικροδομής του μετάλλου μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Σε μεγαλύτερες εφαρμογές ο τεμαχισμός εκτελείται με τη χρήση της ηλεκτροδιάβρωσης, ήπιες ξηρές κοπές με ορθή χρήση προς αποφυγή θερμικών αλλοιώσεων της ημιδομής κοντά στην επιφάνεια θραύσης.

(Κοβσένογλου, 2019), (FUJIFILM, 2021) (NDT, 2023)

Εργαστηριακά μερικές από τις καταστροφικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι οι παρακάτω:

- ✓ Δοκιμή πλαστικής παραμόρφωσης
- ✓ Δοκιμή κάμψης
- ✓ Δοκιμή στρέψης
- ✓ Δοκιμή θλίψης
- ✓ Σκληρομέτρηση (μετά από τεμαχισμό)

Μειονεκτήματα καταστροφικών ελέγχων:

- ✓ Δαπάνη πόρων κατά την εκτέλεση δοκιμών καθώς υπάρχει ένα πλήθος δοκιμών που πρέπει να διενεργηθούν με σκοπό τη στατιστική έρευνα και την κατάλληλη εξαγωγή συμπερασμάτων
- ✓ Υψηλά κόστη λόγω των υλικών και του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται σε δοκιμές
- ✓ Μεγάλη διάρκεια χρόνου εκτέλεσης δοκιμών
- ✓ Περιορισμός στον μελετητή. Τα δοκίμια πρέπει να είναι στην κατοχή του μελετητή θα εκτελέσει την εκάστοτε δοκιμή και δεν μπορούν να μοιραστούν.

1.5.7 Μεταλλογραφική ανάλυση

Η μεταλλογραφική εξέταση αποτελεί σημαντικό τμήμα της έρευνας της ανάλυσης αστοχίας και είναι ένα εργαλείο το οποίο αξιοποιείται από τους μεταλλουργούς και βοηθάει στη διεξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων σχετικά με το πως αστόχησε το εξεταζόμενο δείγμα.

Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την εξέταση των δειγμάτων από τα αστοχημένα αντικείμενα σε χαμηλής ισχύος μικροσκόπιο. Απαιτείται κατάλληλος χειρισμός του μικροσκοπίου καθώς έχει περιορισμένο εύρος τιμών που μπορούν να βοηθήσουν στην άμεση παρατήρηση των επιφανειών που έχουν αστοχήσει.

Πιο λεπτομερής παρατήρηση της μικροδομής μπορεί να αποτυπωθεί με τη χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων σάρωσης (SEM) ή με τη χρήση μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης (TEM). Σε κάθε μελέτη είναι απαραίτητη η χρήση οπτικής μικροσκοπίας καθώς η οποιαδήποτε εφαρμογή των παραπάνω μικροσκοπίων θα πρέπει να έχει φτάσει στα όρια μεγεθύνσεων μέχρι Χ1.000 όπου από εκεί και μετά χρησιμοποιούνται τα παραπάνω μικροσκόπια. (William T. Becker, 2002)

1.5.7.1 Μικροσκοπική εξέταση

Για την εφαρμογή μικροσκοπικής εξέτασης είναι σημαντικό οι επιφάνειες να είναι επεξεργασμένες κατάλληλα και να μην υπάρχουν αλλοιώσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένες εικασίες σχετικά με τα αίτια της αστοχίας. Πριν από τη χρήση των μικροσκοπίων έχει προηγηθεί οπτικός έλεγχος σε στερεοσκόπιο το οποίο αποτυπώνει χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως γραμμές ροής, ύπαρξη πόρων και ρωγμών. Πιο λεπτομερής εξέταση των επιφανειών θραύσης γίνεται με τη χρήση μικροσκοπίων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μικροσκοπίων:

Μικροσκόπια σάρωσης SEM (scanning electron microscope)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα αξιόπιστο όργανο για την έρευνα της μικρόδομης των μεταλλικών υλικών. Το μεγάλο πλεονέκτημα που διαθέτει είναι η εστίαση σε πολύ μικρές επιφάνειες. Ακόμα μπορεί να απεικονίσει η γεωμετρία των επιφανειών θραύσης.

- Μικροσκόπιο διερχόμενης δέσμης TEM (transmission electron microscope)

Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται σε τέτοια ηλεκτρονικά μικροσκόπια πρέπει να είναι πολύ λεπτά έτσι ώστε η δέσμη των ηλεκτρονίων να μπορεί να διαδοθεί στο εσωτερικό της επιφάνειας θραύσης. Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει τη δημιουργία δειγμάτων τα οποία έχουν πολύ λεπτό πάχος.

Η ανάλυση που μπορούν να φτάσουν τα μικροσκόπια αυτά είναι της τάξης των μικρομέτρων (μm) με μεγενθύσεις που ξεκινούν από $\text{MX}10.000$ και φτάνουν έως $\text{MX}60.000$.

Χάρη στην ηλεκτρονική μικροσκόπια μπορούν να διεξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η μικροδομή του υλικού
2. Η διαδρομή της ρωγμής
3. Το σχήμα και η μορφή της ρωγμής
4. Το μήκος της ρωγμής που προϋπήρχε και ενισχύθηκε λόγω κόπωσης
5. Το μήκος της ρωγμής πριν γίνει κρίσιμη διάστασης
6. Ανίχνευση των εγκλεισμάτων, εκδορών και άλλων ατελειών γύρω από την έναρξη της ρηγμάτωσης
7. Διαστάσεις των ραβδώσεων της ρωγμής
8. Ύπαρξη διαβρωτικών παραγόντων

(V. Ramachandran, 2005), (Κοβσένογλου, 2019)

1.5.7.3 Μηχανικές ιδιότητες-δοκιμές

Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων του εξαρτήματος είναι ένα σημαντικό βήμα στη διαδικασία της ανάλυσης αστοχίας. Η διαδικασία αυτή δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να κρίνει κατάλληλα αν το εξεταζόμενο δοκίμιο πληρεί τις προδιαγραφές αντοχής του και αν είναι ικανό να λειτουργεί στις εν λόγω συνθήκες λειτουργίας. Αν το μέγεθος του εξαρτήματος προς μελέτη επιτρέπει να δώσει δείγματα για περισσότερες δοκιμές όπως:

- ✓ δοκιμή πλαστικής παραμόρφωσης
- ✓ δοκιμή θλίψης – εφελκυσμού
- ✓ δοκιμή κάμψης
- ✓ δοκιμή στρέψης

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να πραγματοποιηθεί δοκιμή σκληρομέτρησης η οποία θα μπορέσει να δώσει μία σαφή εικόνα σχετικά με τις θερμικές κατεργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί ή όχι και το αν ήταν επιτυχής ή όχι. Η μέτρηση σκληρότητας μπορεί να γίνει είτε με φορητά είτε με σταθερά σκληρόμετρα. Μερικές από τις μονάδες μέτρησης σκληρότητας είναι Brinell, Rockwell, Vickers. (V. Ramachandran, 2005)

1.5.7.4 Χημική ανάλυση

Η χημική ανάλυση μπορεί να δώσει πληροφορίες ώστε να ταυτοποιηθεί το εξεταζόμενο δείγμα. Πιο ειδικά, η χημική ανάλυση μπορεί να εμφανίσει αποκλίσεις στη σύσταση του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένο το εξάρτημα. Εντοπίζει ανομοιογένειες και διαχωρισμούς. Μπορεί να παρουσιάσει πληροφορίες για την ύπαρξη διαβρωτικών προϊόντων, επιστρώσεις ή εμποτισμούς.

Είναι ιδιαίτερα γνωστό ότι αρκετές περιπτώσεις αστοχιών έχουν προκληθεί από την ύπαρξη επιβλαβών εγκλεισμάτων που έχουν οδηγήσει σε διάδοση ρωγμών. Κάποιοι παράγοντες που σχετίζονται με το υλικό ευθύνονται για την πρόκληση αστοχιών και είναι σημαντικό να ανιχνεύονται. Για παράδειγμα, το οξυγόνο προκαλεί γήρανση στα μέταλλα ενώ το υδρογόνο αυξάνει την ευθραυστότητα τους ειδικά μετά από κατεργασία συγκόλλησης όπου απορροφάται με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς. (V. Ramachandran, 2005)

Κυρίες τεχνικές χημικής ανάλυσης είναι:

- Φασματομετρία μάζας (Mass Spectrometry) : Με συγκέντρωση σε όλα τα στοιχεία από 0,001%-50% και ακρίβεια 2-5%
- Φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης (Atomic Absorption Spectroscopy): Με συγκέντρωση σε όλα τα στοιχεία από 0,001%-10% και ακρίβεια 2-5%
- Φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής (Atomic Emission Spectroscopy): Με συγκέντρωση σε όλα τα στοιχεία από 0,005-10% και ακρίβεια 2-5%
- Φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων Χ με διασπορά μήκους κύματος (Wavelength-Display X-Ray Fluorescence) : Με εφαρμογή σε μέταλλα βαρύτερα από νάτριο με συγκέντρωση 0,5-10% και ακρίβεια 2-5%

Η τοπική ανίχνευση συγκεντρώσεων γίνεται με χρήση laser ή με ανιχνευτές ηλεκτρονίων ενώ η επιφανειακή ανάλυση της χημικής σύστασης με χρήση:

1. φασματοσκοπίας Auger, Mossbauer, Leiss, Sims και περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)

1.5.7.5 Θραυστομηχανική ανάλυση

Η θραυστομηχανική είναι η επιστήμη που βοηθάει στην διερεύνηση των συνθηκών φόρτισης με το να αναλύει τρισδιάστατα το αντικείμενο που αστόχησε αλλά και να εξετάσει τις συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο έλαβε χώρα η αστοχία. Ο προκαταρκτικός έλεγχος στο πεδίο, οι οπτικές δοκιμές και η χρήση ηλεκτρονικών μικροσκοπίων βοηθούν στην εκτέλεση της θραυστομηχανικής ανάλυσης η οποία βοηθά στο να προσδιοριστεί:

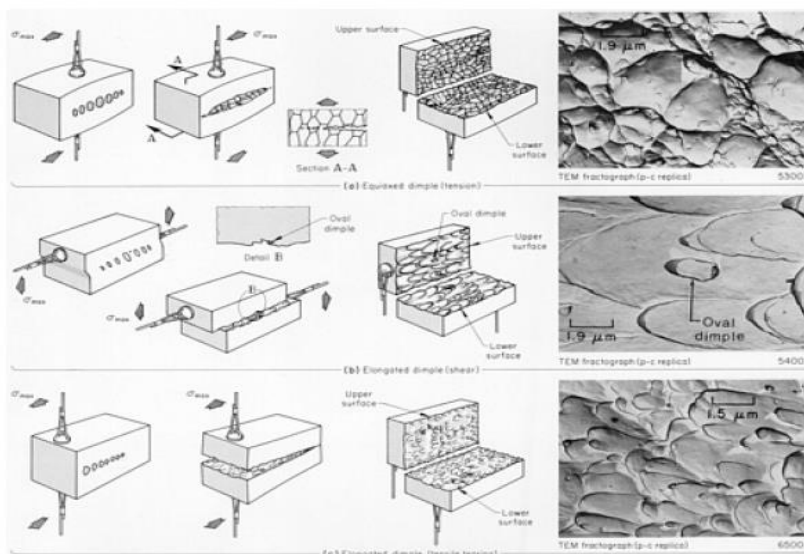
- Το μέγεθος της κρίσιμης ατέλειας που οδηγεί στην αστοχία
- Το μοτίβο της διάδοσης της
- Την έναρξη της αστοχίας και τις προϋπάρχουσες ατέλειες
- Το μοτίβο διάδοσης των προϋπάρχοντων ατελειών εν ώρα λειτουργίας

Όλα τα μέταλλα είναι πολυκρυσταλικά υλικά και έτσι η ρωγμή μπορεί να ακολουθήσει δύο πορείες. Εντός του κρυστάλλου όπου ονομάζονται ενδοκρυσταλλικές ή γύρω από τους κρυστάλλους δηλαδή περικρυσταλλικές πορείες. Πιο ειδικά, κατά τη περικρυσταλλική πορεία η ρωγμή εμφανίζεται πάνω από τα όρια των κόκκων δίχως να επηρεάζει το εσωτερικό τους ενώ η άλλη πορεία θραύσης είναι η ενδοκρυσταλλική πορεία που επηρεάζει και μέσα το εσωτερικό των κόκκων. Πολλές φορές υπάρχει περίπτωση να συνδυαστούν τα δύο αυτά μοτίβα θραύσης να εμφανίζεται δηλαδή περικρυσταλλική θραύση και στη συνέχεια να μεταβαίνει σε ενδοκρυσταλλική.

Είτε είναι περικρυσταλλική είτε είναι ενδοκρυσταλλική η θραύση, υπάρχουν γενικότερα τέσσερις κανόνες με τους οποίους μπορεί να εμφανιστεί η διαδρομή της αστοχίας.

Θραύση κατά θύλακες (Dimple rupture)

Όταν ο κύριος λόγος θραύσης είναι η υπερφόρτιση τότε στα περισσότερα κράματα εμφανίζεται αστοχία με τη μορφή του μηχανισμού της συνένωσης των μικροκενών, έτσι η ρωγμή αρχίζει από το μικροκενά και προοδευτικά με την αύξηση της φόρτισης μεγαλώνει μέσω της ένωσης με άλλες ασυνέχειες του υλικού. Τέτοια σημεία είναι σωματίδια δεύτερης φάσης, εγκλείσματα, όρια κόκκων και θέσεις συσσώρευσης ατελειών. Αυτή η αστοχία εμφανίζει διάφορες κυπελόμορφες εσοχές οι οποίες είναι αποτέλεσμα συνένωσης των μικροκενών οι οποίες ονομάζονται θύλακες.



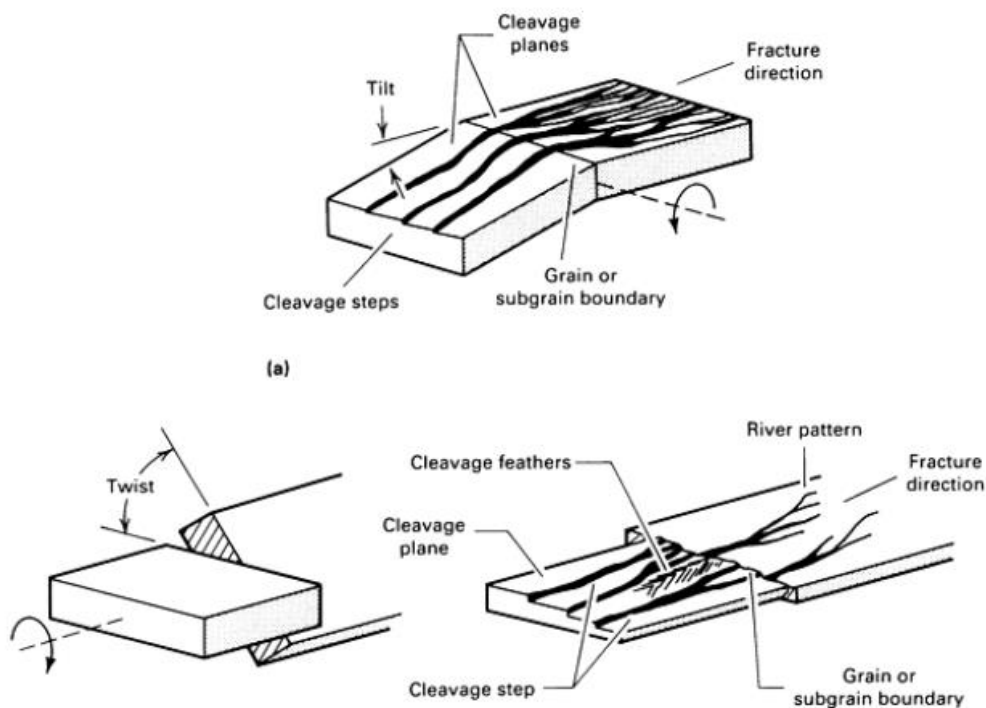
Εικόνα 2 Θραύση κατά θύλακες [6]

Θραύση αποχωρισμού(Cleavage rupture)

Η θραύση αποχωρισμού είναι μία θραύση με προφίλ χαμηλής ενέργειας η οποία εξελίσσεται στα σημεία που εμποδίζεται η ολίσθηση των κρυστάλλων. Θεωρητικά μία θραύση αποχωρισμού πρέπει να έχει τέλεια ταυτιζόμενες επιφάνειες για να μην υπάρχει κάποια ιδιομορφία ενώ παράλληλα οι επιφάνειες πρέπει να είναι και επίπεδες μεταξύ τους.

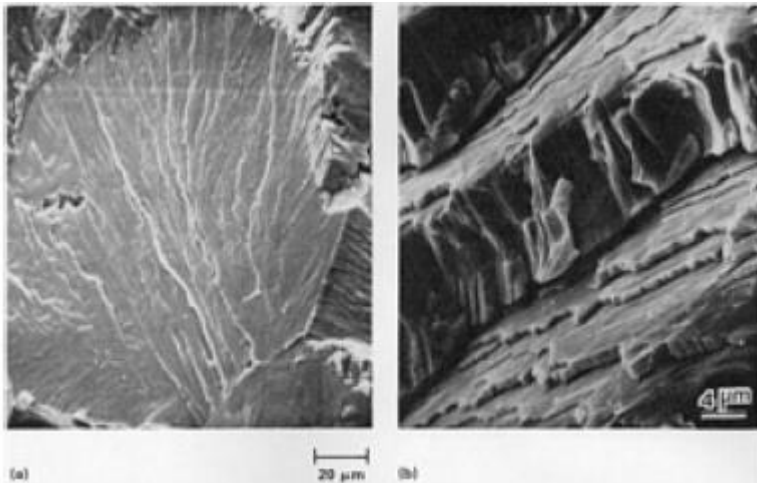
Ωστόσο τα περισσότερα κράματα είναι πολυκρυσταλλικά περιέχοντας κόκκους, και όρια ανάμεσα τους, εγκλείσματα και άλλες ατέλειες οι οποίες παρεμποδίζουν την εμφάνιση μιας τέλει θραύσης.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί οι περισσότερες θραύσεις ξεκινούν σε παράλληλα επίπεδα. Όσο η θραύση εξελίσσεται τόσο μειώνονται αυτά τα επίπεδα. Το σύνολο των ρηγματώσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των κόκκων μεγαλώνουν τόσο σε πλάτος όσο και σε μήκος, με αποτέλεσμα τα επίπεδα αποχωρισμού να αρχίζουν να μοιάζουν με τη μορφή ποταμού.



Εικόνα 3 Στοιχεία θραύσης αποχωρισμού με σημάδια ποταμού(river marks) [6]

Ένα άλλο στοιχείο της θραύσης αποχωρισμού είναι η φυλλοειδής που είναι χαρακτηριστικό των πρωταρχικών επιπέδων αποχωρισμού.



Εικόνα 4 φυλλοειδές μοτίβο (Feather pattern) [6]

Επίσης να αναφερθεί ότι υπάρχουν και οι γραμμές Wallner οι οποίες εμφανίζονται όταν επιφανείς αποχωρισμού είναι σε ψαθυρά υλικά ή μη μεταλλικά υλικά ή σε ψαθυρά εγκλείσματα ή ακόμα και σε διμεταλλικές φάσεις. Δημιουργούνται όταν αλληλοεπιδρά μία ρωγμή μαζί με ένα ελαστικό κύμα μέσα στο υλικό.



Εικόνα 5 Γραμμές Wallner [6]

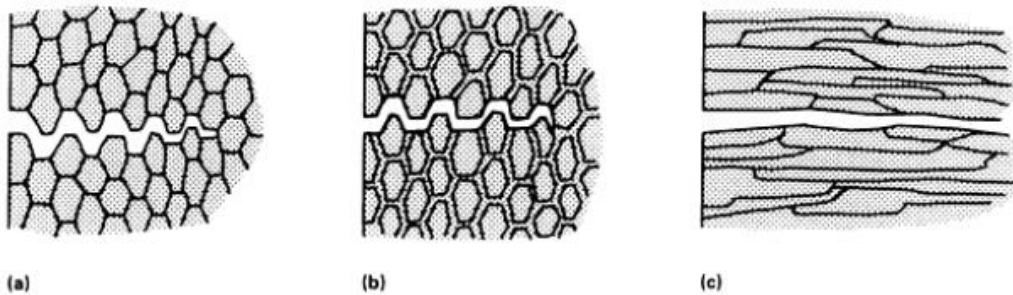
Θραύση από κόπωση (Fatigue rupture)

Είναι από τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς θραύσης καθώς είναι ο πιο απρόβλεπτος και μπορεί να εμφανιστεί οποιαδήποτε στιγμή στη διάρκεια ζωής του εξαρτήματος. Είναι αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Η θραύση κόπωσης περιλαμβάνει τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η εμφάνιση του τασικού πεδίου και κατόπιν από χρονικά επαναλαμβανόμενη μεταβολή της οδηγεί στην εμφάνιση της μικρορωγμής. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εξέλιξη της ρωγμής. Στο τρίτο στάδιο η ρωγμή έχει οδηγήσει στη δημιουργία ασυνέχειας που καταλήγει στη θραύση του τεμαχίου.

Θραύση με αποκόλληση (Decohesive rupture)

Μία τέτοια θραύση εμφανίζεται όταν υπάρχει λίγη έως και καθόλου πλαστική παραμόρφωση και δεν συνδυάζεται με καμία από τις παραπάνω μορφές θραύσης.

Αυτός ο τύπος θραύσης είναι γενικότερα αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον και της μικροδομής η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θραύση που έχει ξεκινήσει ανάμεσα στα όρια των κόκκων. Τα όρια των κόκκων έχουν το χαμηλότερο σημείο τήξης από το σύνολο της μικροδομής. Τα όρια των κόκκων είναι επίσης σημεία για την εύκολη έναρξη της διάχυσης αλλά και του διαχωρισμού από στοιχεία όπως το υδρογόνο, το θείο, ο φώσφορος, ο άνθρακας και το αρσενικό. Από εκεί μπορούν να εισέλθουν μέταλλα με χαμηλό σημείο τήξης όπως ο υδράργυρος, το γάλλιο και ο ψευδάργυρος. Η ύπαρξη γενικότερα τέτοιων συστατικών στα όρια των κόκκων μπορεί να μειώσει τη συνολική αντοχή στη συνοχή του υλικού και να επικρατήσει η αποκόλληση.



Εικόνα 6 α)αποκόλληση μεταξύ των ορίων των κόκκων β)αποκόλληση σε φάση αδύναμων ορίων των κόκκων γ)αποκόλληση κατά μήκος επιμικυνομένων κόκκων [6]

Επίσης υπάρχουν και άλλες πιο ειδικές περιπτώσεις έναρξης θραύσης όπως είναι η θραύση ερπυσμού και η θραύση Quasi-cleavage. (Decker, 1987), (William T. Becker, 2002), (Otegui, 2014)

2. Διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού

Οι διαμορφώσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες βάσει του πάχους του υλικού που διαμορφώνεται κάθε φορά. Αυτές είναι διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού και διαμορφώσεις επιπέδου ελάσματος.

Οι διαμορφώσεις συμπαγούς υλικού διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Σφυρηλασία (Forging)
- Έλαση (Rolling)
- Εξώθηση (Extrusion)

2.1 Σφυρηλασία

Η σφυρηλασία αποτελεί μία από τις αρχαιότερες μεθόδους μορφοποίησης, γνωστή ήδη από τις προϊστορικές εποχές -περίπου 5.000 π.Χ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο σιδηρουργός, που φαίνεται να κρατά ένα σφυρί και να δημιουργεί ένα αντικείμενο πάνω σε ένα αμόνι.

Στη σύγχρονη εποχή, πλέον τα δεδομένα έχουν αλλάξει, με τη διαδικασία να λαμβάνει χώρα σε ηλεκτρικές «σφύρες». Αντίστοιχα, πλέον η σφυρηλασία μπορεί να γίνει με την εφαρμογή σε χαμηλή ταχύτητα θλιπτικής δύναμης μέσω υδραυλικών ή και ηλεκτρικών στοιχείων. Σφυρηλάτηση είναι η παραμόρφωση υλικού ανάμεσα σε δύο καλούπια, προκειμένου να αποκτηθεί το επιθυμητό σχήμα, είτε χτυπώντας είτε ασκώντας πίεση μέσω κάποιας πρέσας με άμεσες ή αργές διαβαθμίσεις στην πίεση. Έτσι, ανάλογα με τον ρυθμό φόρτισης, υπάρχουν δύο κατηγορίες. (Bhaduri, 2018)

Σφυρηλάτηση κρούσης

Η σφυρηλάτηση κρούσης (impact forging), ή αλλιώς σφυρηλάτηση πτώσης (drop forging). Πρόκειται για τη κατεργασία, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα σφυρί σφυρηλάτησης, το οποίο φέρει άμεσα χτυπήματα στην επιφάνεια υλικού προς κατεργασία, με αποτέλεσμα σε σύντομο χρονικό διάστημα, να λαμβάνει χώρα η παραμόρφωση. (Bhaduri, 2018)

Για να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα και μέγεθος του τελικού προϊόντος προς κατασκευή, συνήθως απαιτούνται επαναλαμβανόμενα χτυπήματα. Στη διαδικασία αυτή, η πίεση φτάνει το μέγιστο, όταν το σφυρί αγγίζει την επιφάνεια του υλικού, ενώ παράλληλα πέφτει με ταχύτατο ρυθμό, καθώς η ενέργεια απορροφάται από το ίδιο το υλικό που παραμορφώνεται εκείνη τη δεδομένη στιγμή. Συνεπώς, η παραμόρφωση που πραγματοποιείται, λαμβάνει χώρα στα ανώτερα στρώματα του υλικού προς κατεργασία, με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να μειονεκτούν ως προς το βάθος εισχώρησης λόγω ανομοιογενούς δομής και άνισης κατανομής των μηχανικών ιδιοτήτων τους από την εξωτερική επιφάνεια προς το πυρήνα του αντικείμενου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπου αποφεύγεται αυτή η διαδικασία, αποτελούν τα μεγάλα χυτά πλινθώματα, τα οποία σε υψηλή θερμοκρασία φαίνονται σαν να έχουν κατεργαστεί, αλλά στο κέντρο θα ισχύει το ακριβώς αντίθετο, με τη δομή να παραμένει ατελής και ακατέργαστη. Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία αυτή συνιστάται σε μικρά αντικείμενα προς κατεργασία. (Bhaduri, 2018)

Σφυρηλασία πίεσης

Πρόκειται για τη διαδικασία, στην οποία, αντί για επαναλαμβανόμενα χτυπήματα, το υλικό υπόκειται σε αργή θλιπτική πίεση, με πιο βαθιά εισχώρηση της ζώνης παραμόρφωσης. Όλη αυτή η διαδικασία κρατάει μόλις έναν κύκλο, σε αντίθεση με τη σφυρηλάτηση κρούσης, καθώς επίσης τα κομμάτια έχουν καλύτερες μηχανικές αντοχές και διαστασιολογική συμπεριφορά. Μόνο μειονέκτημα αποτελεί το κόστος της διαδικασίας, καθώς μία πρέσα είναι πιο ακριβή από μία συμβατική σφύρα. (Bhaduri, 2018)

Στη σφυρηλάτηση πίεσης, η πίεση αυξάνεται βαθμιαία, καθώς το αντικείμενο παραμορφώνεται σταδιακά, μετά το κύριο σημείο κορύφωσης της πίεσης, επέρχεται η μείωσή της και πλέον η ασκούμενη δύναμη έχει πλήρη εισχώρηση στον πυρήνα του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική μέθοδος έχει καλύτερη απόδοση, καθώς το τελικό προϊόν έχει μια ολοκληρωμένη δομή με ενιαίες μηχανικές ιδιότητες σε όλο το μήκος της διατομής του, αλλά και ακρίβεια στις διαστάσεις του. Μόνος αντίποδας είναι το κόστος έναντι της προηγούμενης διαδικασίας διαμόρφωσης συμπαγών υλικών.

Οι περισσότερες σφυρηλατήσεις γίνονται εν θερμώ, παρόλο που κάποια υλικά μπορούν να κατεργαστούν και εν ψυχρώ. Η επιλογή της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες, όπως:

- άνεση και ευκολία παραμόρφωσης
- απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες
- ποιότητα επιφάνειας

Οι τελευταίοι δύο είναι καίριας σημασίας. Πάνω το 90% των κατεργασιών σφυρηλασίας γίνονται εν θερμώ. Η ψυχρηλασία δεν είναι τόσο διαδομένη, λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτεί και της υψηλής φθοράς των καλουπιών, καθώς έχει μικρότερη θερμοκρασία σε σχέση με τη θερμηλασία με αποτέλεσμα λιγότερες παραμορφώσεις. Παράδειγμα ψυχρηλασίας αποτελεί η παραγωγή νομισμάτων.

Η σφυρηλασία μπορεί να είναι ανοιχτής ή κλειστής μήτρας. Η σφυρηλασία κλειστής μήτρας. Σε αυτήν την περίπτωση, το αντικείμενο παραμορφώνεται μεταξύ δύο επίπεδων καλουπιών, ή καλουπιών που έχουν τέτοιο σχήμα, ώστε να μην εμποδίζεται η ροή του υλικού κατά τη συμπίεση του εξαρτήματος. Η διαδικασία χρησιμοποιείται κυρίως:

- Για μεγάλα αντικείμενα απλού σχήματος
- Όταν ο αριθμός των εξαρτημάτων είναι μικρός
- Για προσχηματισμό του αντικειμένου για σφυρηλασία κλειστής μήτρας
-

2.1.4 Σφυρηλασία κλειστής μήτρας

Στη κατεργασία αυτή, η παραμόρφωση συμβαίνει, για να αποκτηθεί η επιθυμητή μορφή, με το να πιέζεται το εξάρτημα μεταξύ δύο μισών τμημάτων, τα οποία κατεργαστεί και ενωμένα, δίνουν το τελικό σχήμα. Η κοιλότητα που διαμορφώνεται περιορίζει τη ροή του υλικού, και έτσι κάτω από υψηλή πίεση, η παραμόρφωση που λαμβάνει χώρα στο κατεργαζόμενο υλικό δημιουργεί ολοκληρωμένο πλέον προϊόν, το οποίο έχει το επιθυμητό σχήμα και μορφή, μέσα στα πλαίσια των ανοχών που το χαρακτηρίζουν και έτσι στο τέλος δεν απαιτείται άλλη κατεργασία μορφοποίησης. Η μεθοδολογία αυτή ενδείκνυται και για την κατασκευή μικρών εξαρτημάτων. (Bhaduri, 2018)

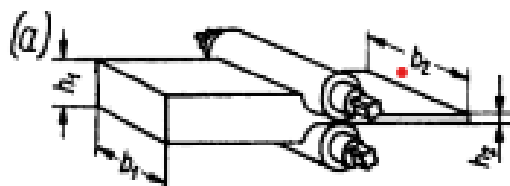
2.2 Έλαση

Η έλαση, σε αντίθεση με τη σφυρηλασία είναι μια πιο πρόσφατη τεχνική, που εμφανίστηκε γύρω στο 1500 μ.Χ. Πρόκειται για μια κατεργασία, κατά την οποία πραγματοποιείται μείωση του πάχους 25-90% του αρχικού ή και αλλαγή της διατομής ενός τεμαχίου. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης, που εμφανίζεται λόγω της αναγκαστικής διέλευσης ανάμεσα σε δύο περιστρεφόμενους κυλίνδρους Όπως και στη σφυρηλασία, έτσι και στην έλαση το επιθυμητό σχήμα και μέγεθος προκύπτει από θλιπτικές δυνάμεις κατάλληλου μεγέθους. Πιο ειδικά, κατά την έλαση το επιθυμητό σχήμα μετάλλου δημιουργείται κατά την πλαστική παραμόρφωση, που λαμβάνει χώρα στα ράουλα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε απόσταση το ένα από το άλλο σε παράλληλους άξονες και περιστρέφονται αντίθετα το ένα σε σχέση με το άλλο, ώστε να παρασύρουν το υλικό που θα περάσει ανάμεσά τους. Καμιά φορά, τα ράουλα μπορούν να αντικατασταθούν από κυλινδρικά σε κωνικά ή ακόμη μπορούν και να τοποθετηθούν δίσκοι υπό κάποια συγκεκριμένη γωνία ανάμεσά τους.

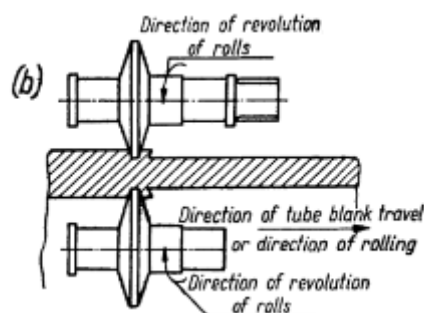
Ο εξοπλισμός μιας τέτοιας εγκατάστασης ονομάζεται μονάδα έλασης, και αποτελείται συνήθως από ένα ή και περισσότερα ράουλα με τις βάσεις τους. Το ρινίον και το μοτέρ δίνει την κίνηση, καθώς και τα βοηθητικά εξαρτήματα (Zygmunt Wusatowski, 1969), (Αντωνιάδης, 2017)

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη έλασης:

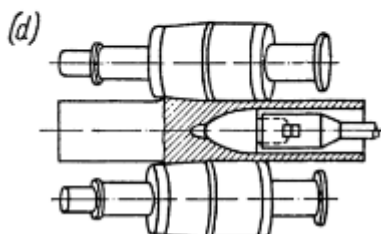
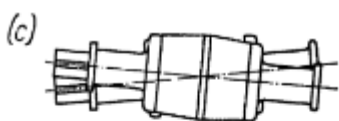
- Διαμήκης
- Εγκάρσια
- Λοξή - ελικοειδής



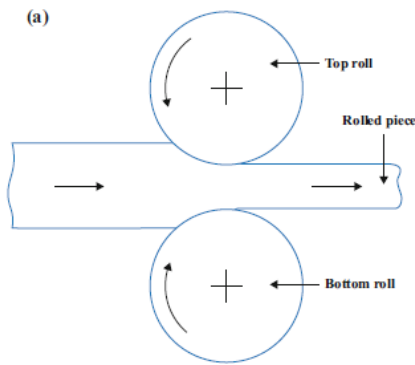
Εικόνα 7 Διαμήκης έλαση [26]



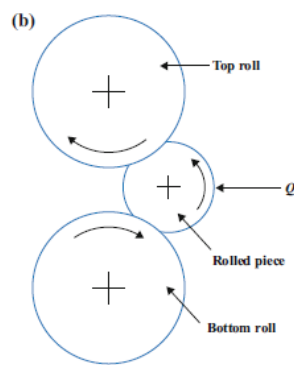
Εικόνα 8 Εγκάρσια έλαση [26]



Εικόνα 9 λοξή (C)-ελικοειδής (D) έλαση [26]



Εικόνα 10 Διαμήκης έλαση [2]



Εικόνα 11 Εγκάρσια έλαση [2]

Υπάρχουν τρεις μορφές έλασης:

- Επίπεδη έλαση με κύρια παράγωγα προϊόντα της τις επίπεδες πλάκες ή και ελάσματα κατάλληλα για την κατασκευαστική βιομηχανία. Σε αυτά υπάρχει αυξημένη μείωση του πάχους των ελασμάτων.
- Έλαση μορφής, όπου το τελικό προϊόν, με το που εξέλθει από τα ράουλα, έχει μια γεωμετρία, η οποία δημιουργείται από τους κυλίνδρους τους.
- Περιστροφική έλαση, η οποία είναι χαρακτηριστική μέθοδος για τη δημιουργία κυκλικών τεμαχίων.
- Η στρωτή έλαση ειδικότερα μειώνει το πάχος του υλικού και μπορεί να γίνει και σε διαβαθμιζόμενα επίπεδα, όπου ονομάζεται «βαθμωτή έλαση» και στη γενικότερη μορφή, όπου υπάρχουν περισσότερα του ενός επίπεδα για τα ράουλα και τότε έχουμε γενική έλαση.
- Περιστροφική έλαση, κατά την οποία μορφοποιούνται πλάκες, ελάσματα, δοκοί και σωλήνες σε διάφορα σχήματα με αναγκαστική διέλευση και συμπίεση μέσα από τρεις κυλίνδρους.
- Έλαση μορφής. Στο είδος αυτό της έλασης, μορφοποιούνται μεταλλικά ελάσματα σε επιθυμητό σχήμα με ομοιόμορφη διατομή. Τα ράουλα που συσχετίζονται με τέτοιες διαμορφώσεις έχουν το αρνητικό αποτύπωμα του σχήματος που θα αποδώσουν στο έλασμα.

Η εργαλειομηχανή, με την οποία γίνεται η έλαση αξιοποιεί ειδικά ράουλα για τη διαμόρφωση που ονομάζονται έλαστρα. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία τέτοιων μηχανών είναι ο αριθμός των κυλίνδρων ή ράουλων, που μπορούν να είναι από δύο και περισσότεροι, δηλαδή απλά τριέλαστρα, τετραέλαστρα κ.ο.κ. Επίσης, τα έλαστρα μπορούν να έχουν την ίδια φορά κίνησης, και ονομάζονται συνεχή και αυτά που μπορούν να αλλάξουν φορά. (φωτογραφία a,b,c,d).

Στην έλαση το αρχικό τεμάχιο είναι προϊόν χύτευσης, ενώ μπορούν να δημιουργηθούν ράβδοι, δοκοί τετραγωνικής διατομής. Επίσης, σε αυτή την κατηγορία, εντάσσονται οι μπινέτες τετραγωνικής διατομής 150 X 150 mm, που στην επόμενη φάση θα μετασχηματιστούν σε δοκούς 40 X 40 mm.

Τελικά προϊόντα της έλασης είναι τυποποιημένοι δοκοί, ήλοι, δακτύλιοι, λωρίδες και χοντρά ελάσματα.

2.3 Εξώθηση

Η εξώθηση αποτελεί τη τελευταία από τις κατεργασίες μορφοποίησης συμπαγούς υλικού και είναι και η πιο σύγχρονη από όλες. Πρωτοεμφανίστηκε στα τέλη 1700 με αρχές του 1800. Πρώτη εφαρμογή αυτής της τεχνικής ήταν για την δημιουργία μολύβδινων σωληνώσεων. Πιο σκληρό μέταλλο που απαιτούν μεγαλύτερη θερμοκρασία κατεργασίας δεν ήταν δυνατό να διαμορφωθούν από μήτρες εξώθησης πριν τον 20ο αιώνα. Σήμερα πλέον είναι κατεργάσιμα με τη χρήση εξώθησης μέταλλα όπως αλουμίνιο, χαλκός, νικέλιο, μόλυβδος και τα κράματα τους και ακόμη και χάλυβες καθώς η τεχνολογία μεταλλικών υλικών έχει προοδεύσει επιτρέποντας τη δημιουργία μητρών από μέταλλα για τις εφαρμογές υλικών. (Harold F. Giles, 2005)

Η μέθοδος της εξώθησης είναι μία διαδικασία η οποία περιλαμβάνει ένα μεταλλικό μπλοκ το οποίο είναι μέσα σε ένα θάλαμο ο οποίος έχει ένα πρίσμα μήτρας μέσα από την οποία πρέπει να περάσει υπό υψηλή πίεση και να μειωθεί έτσι η διατομή του. Η μήτρα μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, το πιο σύνηθες είναι το στρογγυλό. Αρχικά το υλικό προς εξώθηση είναι προϊόν ελασης ή χυτή μπιγιέτα κυλινδρικού σχήματος το οποίο τοποθετείται σε ένα σκληρό μεταλλικό θάλαμο και πιέζεται στο άλλο άκρο του θαλάμου διαμέσου της οπής της μήτρας που υπάρχει αποκτώντας έτσι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καλουπιού από το οποίο εξήλθε. Συνήθη προϊόντα που παράγονται από την εξώθηση είναι σωλήνες και κυλινδρικές ράβδοι. Επίσης το αλουμίνιο είναι ένα ακόμη μέταλλο κατάλληλο για εξώθηση λόγω κατεργασίας όπως για παράδειγμα τα προφίλ αλουμινίου για κουφώματα. (Bhaduri, 2018)

Τα μέταλλα μπορούν να κατεργαστούν είτε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε εν θερμώ. Περισσότερο επιθυμητή μέθοδος είναι η εξώθηση εν θερμώ καθώς απαιτούνται μικρότερες δυνάμεις ώστε να πιέσουν το μέταλλο το οποίο έχει χαμηλότερη αντίσταση στις παραμορφώσεις λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Παρόλα αυτά μέταλλα όπως ο μόλυβδος, ο κασσίτερος, το αλουμίνιο και ο χαλκός μπορούν να κατεργαστούν και εν ψυχρώ με τη μέθοδο της εξώθησης με κρούση. (Αντωνιάδης, 2017)

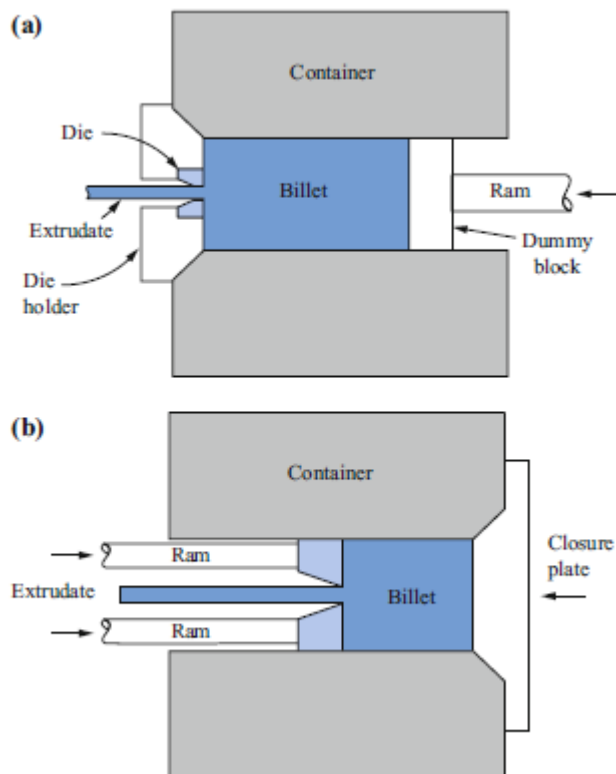
Είδη εξώθησης

Υπάρχουν πέντε διαφορετικά είδη εξώθησης:

- έμμεση εξώθηση (indirect extrusion)
- άμεση εξώθηση (direct extrusion)
- αντίστροφη εξώθηση (reverse extrusion)
- εξώθηση με κρούση (impact extrusion)
- υδροστατική εξώθηση (hydrostatic extrusion)

Οι δύο πρώτες αποτελούν τις βασικότερες μορφές από όλα τα είδη.

- Πιο συγκεκριμένα, στην άμεση εξώθηση η ροή του μετάλλου διαμέσου του ανοίγματος της μήτρας ακόμα γίνεται στην ίδια κατεύθυνση με την κίνηση του εμβόλου που το πιέζει. Το εμβόλο σε αυτή την περίπτωση έχει διάμετρο ίση με την τρύπα του θαλάμου στο οποίο εισάγεται το υλικό.
- Έμμεση εξώθηση το έμβολο έχει όπως και στην άμεση εξώθηση, μισή διάμετρο με την τρύπα του θαλάμου αλλά όμως είναι κοίλο, διαθέτει δηλαδή εσωτερική οπή από όπου και διέρχεται το παραμορφωμένο υλικό. Το υλικό στην περίπτωση αυτή ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου.



Εικόνα 12 α)Άμεση και β)Έμμεση εξώθηση [2]

- Αντίστροφη εξώθηση: το έμβολο είναι μικρότερης διαμέτρου από τη διάμετρο του θαλάμου ενώ το τελικό τεμάχιο διαμορφώνεται από τη ροή του υλικού γύρω από το έμβολο. Συνήθως στην αντίστροφη εξώθηση η κατεργασία γίνεται εν θερμώ.
- Εξώθηση με κρούση: μοιάζει με την αντίστροφη εξώθηση αλλά πραγματοποιείται με μεγαλύτερες ταχύτητες και σε πολύ μικρότερες θερμοκρασίες. Το τελικό προϊόν στην εξώθηση δεν χρειάζεται υποστήριξη και έτσι ο θάλαμος είναι μικρότερος.
- Υδροστατική εξώθηση: όπου η δύναμή του εμβόλου μεταφέρεται σε ένα ρευστό αντίστοιχα.

Προβλήματα στην εξώθηση

1. Εσωτερικές θραύσεις: πολλές φορές ο πυρήνας στα προϊόντα εξώθησης αναπτύσσει ρωγμές που οδηγούν σε θραύσεις. Αυτές οι θραύσεις είναι χαρακτηριστικές στην κατάσταση της υδροστατικής εφελκυστικής τάσης στην κεντρική γραμμή της ζώνης παραμόρφωσης. Σημαντικοί παράγοντες που οφείλονται στην παρουσία εσωτερικών θραύσεων είναι η γωνία της μήτρας, ο βαθμός εξώθησης που αντιπροσωπεύει τη μείωση διατομής του εκάστοτε τεμαχίου και η τριβή.

2. Σφάλματα αναρρόφησης υλικού. Υπάρχει περίπτωση λόγω υψηλών θερμοκρασιών αλλά και λόγω έντονων τριβών να παραμορφώνεται με διαφορετική ταχύτητα στην επιφάνεια σε σχέση με τον πυρήνα έτσι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο σημείων δημιουργεί ένα φαινόμενο χοάνης όπου ακαθαρσίες και οξείδια παρασύρονται από την επιφάνεια στον πυρήνα του υλικού.

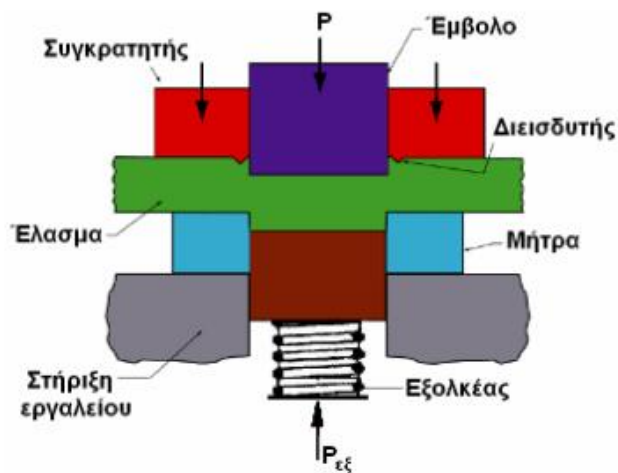
3. Τέλος υπάρχουν και οι επιφανειακές θραύσεις οι οποίες αποτελούν συνέπεια παραγόντων υψηλής θερμοκρασίας, τριβές, ταχύτητα εξώθησης. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο σύνηθες σε κράματα αλουμινίου, μαγνησίου και ψευδαργύρου αλλά και σε κράματα μετάλλου όπως το μολυβδαίνιο.

3 Διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος

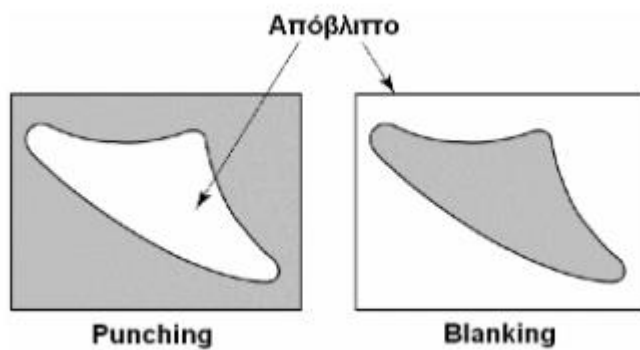
- Απότμηση (segmentation)
- Βαθεία κοίλανση (deep drawing)
- Κάμψη (bending)
- Περιώθηση (flow turning)

3.1 Απότμηση

Η απότμηση είναι η κατεργασία κατά την οποία αποχωρίζεται μέρος από το υλικό ενός ελάσματος μέσω κατάλληλου εργαλείου. Η κίνηση του κοπτικού εργαλείου είναι αντίθετη από αυτή του ελάσματος και εκτελείται από μία έκκεντρη πρέσα. Σε περισσότερες ειδικές εφαρμογές αξιοποιείται υδραυλική πρέσα. Η απότμηση σαν διαδικασία μπορεί να γίνει ως κλειστού περιγράμματος και ως ανοικτού περιγράμματος. (Αντωνιάδης, 2017)



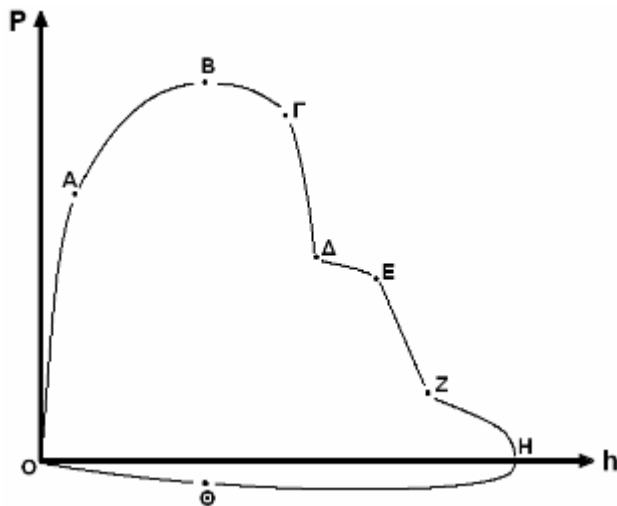
Εικόνα 13 Εργαλείο απότμησης [28] (Απότμηση)



Εικόνα 14 Κατηγοριοποίηση με βάση το απόβλιπτο [28]

Στάδια απότμησης

1. Επαφή εμβόλου με το έλασμα
2. Ελαστική συμπίεση του υλικού ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα και ελαφρά διείδυση των κοπτικών ακμών μήτρας και εμβόλου στο υλικό
3. Μεγαλύτερη εισχώρηση του εμβόλου σε σχέση πλέον με αυτή της μήτρας, συνοδευόμενη από την εμφάνιση πρώτων ρωγμών
4. Ολική αποκόληση του τεμαχίου από το έλασμα
5. Επιστροφή του εμβόλου και απόρριψη του κομμένου τεμαχίου



Εικόνα 15 Σχήμα απεικόνισης σταδίων απότμησης 1-5 [28]

Δυνάμεις απότμησης

Σημαντικό ρόλο στην απότμηση παίζει η ταχύτητα καθώς συνδέεται με τη τελική ποιότητα της επιφάνειας αλλά και με την απαιτούμενη δύναμη. Η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αύξηση του ορίου διαρροής του υλικού, Συνεπώς απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη αλλά και μεγαλύτερη σε ισχύ εργαλειομηχανή.

$$F_a = S \cdot T_a \cdot \sum_{i=1}^N I_i$$

Όπου:

F_a : Η μέση δύναμη απότμησης [N]

T_a : Η αντοχή απότμησης η οποία μπορεί να υπολογιστεί από το όριο θραύσης σε εφελκυσμό σ_b

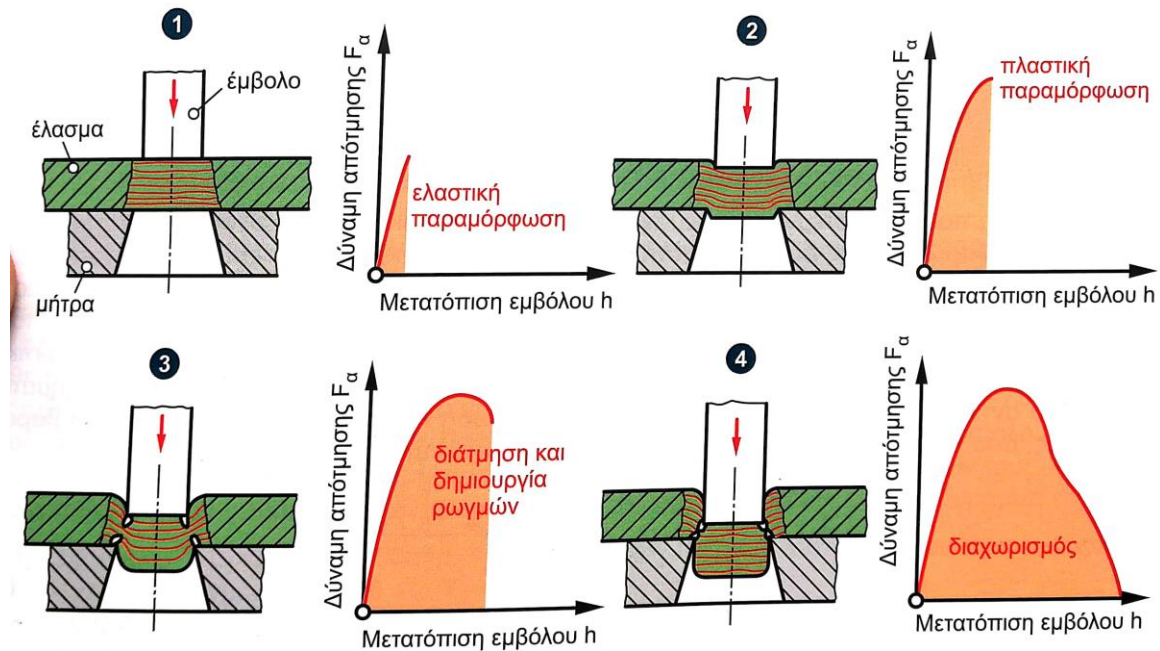
N : Το πλήθος των τμημάτων της περιμέτρου της απότμησης

I_i : Τα μήκη των N τμημάτων της περιμέτρου [mm]

S : Το πάχος του ελάσματος [mm]

Υπάρχουν δύο περιοχές εν συγκρίσει με τη διαδρομή του εμβόλου. Είναι η ενεργός και η νεκρά διαδρομή, που ισοδυναμούν σε θετική ή αρνητική δύναμη απότμησης αντίστοιχα βάσει της εικόνας 15 Όπως φαίνεται παραπάνω προκύπτουν τα εξής δεδομένα:

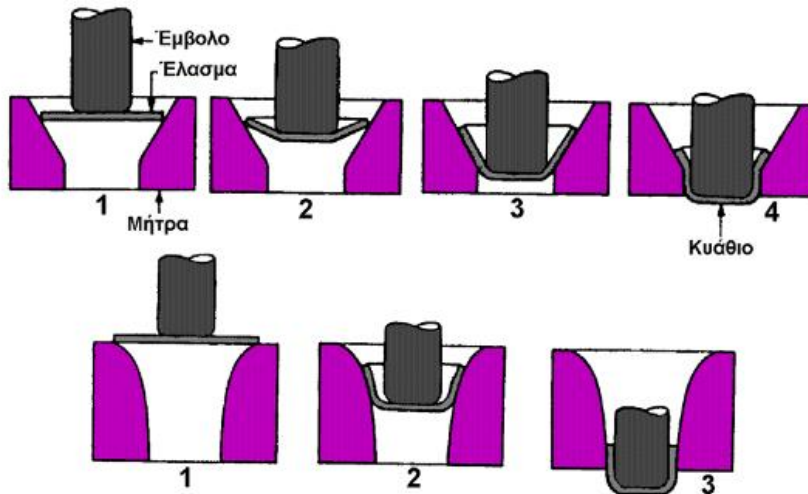
Η θέση (1) από το σχήμα αποτελεί το τέλος της ελαστικής παραμόρφωσης και την αρχή της πλαστικής παραμόρφωσης με συνεχή μείωση επιφάνειας απότμησης, ενώ η θέση (2) στο διάγραμμα αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη τιμή της δύναμης απότμησης. Στη θέση (3) εμφανίζονται οι ρωγμές στο υλικό. Τέλος στη θέση (4) εμφανίζεται ο διαχωρισμός.



Εικόνα 16 Κύκλος απότμησης [27] (Αντωνιάδης, 2017)

3.2 Κοίλανση

Βαθιά κοίλανση (deep drawing) είναι η κατεργασία κατά την οποία διαμορφώνεται ένα επίπεδο έλασμα σε κοίλο μέσω κατάλληλου εργαλείου. Η εμφάνιση της βαθιάς κοίλανσης είναι γύρω στα 1700 μΧ. Ένα από τα χαρακτηριστικά που καθιστά τη βαθιά κοίλανση ως μία από τις σημαντικότερες εργασίες διαμόρφωσης είναι ότι της δίνει τη δυνατότητα να διατηρεί το πάχος του αρχικού ελάσματος. (Αντωνιάδης, 2017)



Εικόνα 17 Διαδικασία κοίλανσης ανευ συγκράτησης [29] (Βαθιά κοίλανση)



Εικόνα 18 Προϊόντα βαθιάς κοίλανσης [29]

Η βαθιά κοίλανση αξιοποιείται για παραγωγή μεταλλικών προϊόντων κυλινδρικού σχήματος. Μία διάταξη κοίλανσης αποτελείται από το έμβολο, τη μήτρα, το έλασμα προς διαμόρφωση και αν υπάρχει συγκράτηση τότε είναι και ο συγκρατητής. Μετά τη διαδικασία αυτή, το έμβολο κινείται προς το έλασμα, ενώ ταυτόχρονα ο συγκρατητής είναι υπεύθυνος για να παραμένει το έλασμα στη θέση του για να μην προσκολληθεί στο έμβολο και παρασυρθεί στο εσωτερικό της μήτρας. Η κίνηση του εμβόλου πραγματοποιείται μέσω μιας πρέσας. (Αντωνιάδης, 2017)

Η διαμόρφωση ελασμάτων προς κοίλανση πραγματοποιείται βάσει των ιδιοτήτων του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε θερμοκρασία άνω των 350 βαθμών κελσίου ,οπότε μιλάμε για κοίλανση εν θερμώ και κοίλανση εν ψυχρώ. (Αντωνιάδης, 2017)

Χαρακτηριστικά , για μέταλλα που είναι δύσκολο να διαμορφωθούν όπως είναι τα κράματα τιτανίου χρησιμοποιείται κοίλανση έν θερμώ και ειδικότερα υπάρχει θέρμανση του ελάσματος και παράλληλα θερμαίνεται και η μήτρα.

Λόγος κοίλανσης:

Ονομάζεται η σχέση μεταξύ αρχικής διαμέτρου και τελικής διαμέτρου σε κοίλα κυάθιο με διάμετρο d.

$$\beta = \frac{D}{d}$$

Πολλές φορές πρέπει να υπάρξουν διαδοχικές κοιλάνσεις οι οποίες ονομάζονται ανακοιλάνσεις, εκεί το έλασμα παίρνει τη τελική μορφή μέσα από ενδιάμεσες μορφές, έτσι οι ενδιάμεσοι λόγοι κοίλανσης β είναι:

$$\beta_o = \frac{D}{d_o}, \beta_1 = \frac{d_o}{d_1}, \beta_2 = \frac{d_1}{d_2}, \beta_n = \frac{d_{n-1}}{d_n}$$

Τέλος ο συνολικός λόγος κοίλανσης προκύπτει από την σχέση :

$$\beta_{ολ} = \beta_1 \cdot \beta_2 \dots \beta_n = \frac{D}{d_o} \cdot \frac{d_o}{d_1} \dots \frac{d_{n-1}}{d_n} = \frac{D}{d_n} = \frac{D}{d}$$

Ανάπτυγμα ελάσματος

Είναι πολύ σημαντικό να υπολογιστεί το ανάπτυγμα του ελάσματος που πρόκειται να υποστεί βαθιά κοίλανση καθώς έτσι μπορούν να καθοριστούν οι διαστασιολογικές απαιτήσεις για τη δημιουργία του εκάστοτε κυαθίου.

Διαδικασία κοίλανσης

Κατά την κοίλανση υπάρχουν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν την κατεργασία και αυτές είναι οι εξής:

- ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού
- ο λόγος της διαμέτρου του ελάσματος προς τη διάμετρο του εμβόλου
- η διαστασιακή ανοχή ανάμεσα στο έμβολο και τη μήτρα
- η καμπυλότητα στα άκρα του εμβολίου και της μήτρας
- η δύναμη συγκράτησης
- η τριβή και η λίπανση κατά την κοίλανση
- η ταχύτητα της κοίλανσης

Κατά την κοίλανση , το έλασμα κατά κύριο λόγο υπόκειται σε εφελκυστικές τάσεις. Οι περιοχές που βάλλονται από δυνάμεις είναι το τμήμα μεταξύ μήτρας και ελάσματος όπου το κομμάτι βρίσκεται σε ολκή κατά τη διάρκεια της κοίλανσης. Επιπλέον υπάρχει το τμήμα μεταξύ μήτρας και εμβόλου το οποίο δεν έρχεται σε επαφή μαζί τους και υπάρχει κυρίως εφελκυσμός ανάμεσα στα δύο μέρη ενώ υπάρχει και η ολίσθηση μαζί με την κάμψη της μήτρας. Τέλος είναι η επιφάνεια του εμβόλου με το έλασμα το οποίο αποτελεί τον πάτο του κυαθίου, αυτό το τμήμα αναλόγως τη τριβή ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του εμβόλου. (Αντωνιάδης, 2017)

Συνοπτικά έχουμε τις εξής δυνάμεις με τις επαφές που αναπτύσσονται:

- το έλασμα μεταξύ μήτρας και συγκρατητή , ακτινική ολκή
- το έλασμα στο χείλος της μήτρας, κάμψη και ολίσθηση
- το έλασμα ανάμεσα στη μήτρα και το έμβολο , εφελκυσμό
- το έλασμα στο καμπύλο μέρος του εμβόλου , κάμψη και ολίσθηση
- το έλασμα στην επιφάνεια και πίεση του εμβόλου , έκταση και ολίσθηση

Εργαλεία βαθείας κοίλανσης

- Εργαλεία απλής ενέργειας (μήτρα- έμβολο)
- Εργαλεία διπλής ενέργειας (συγκρατητής - μήτρα- έμβολο)
- Σύνθετα εργαλεία (συνδυαστική χρήση ανάλογα με την εφαρμογή)

Ταχύτητα κοίλανσης

Η ταχύτητα κοίλανσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το διαμορφωμένο υλικό. Δηλαδή αν είναι κατάλληλο ή όχι για υψηλές ταχύτητες. Επίσης το τεμάχιο , αν είναι συμμετρικό , παίζει τεράστιο ρόλο, αν υπάρχει επαρκής λίπανση, ώστε η πίεση του συγκρατητή να είναι ελεγχόμενη και τέλος η αρτιότητα του εξοπλισμού.

Λίπανση

Για χαλύβδινα ελάσματα προτείνονται τα εξής λιπαντικά:

- μείωση διαμέτρου μικρότερη του 10%. Ορυκτέλαιο ή υδαρές διάλυμα σαπουνιού.
- μείωση της διαμέτρου 25%. Γαλακτώματα
- μείωση διαμέτρου μεγαλύτερα από το 50%. Συνιστάται η χρήση φωσφορικού οξέος ώστε να δημιουργηθεί στρώμα φωσφορικού σιδήρου διαδικασία οποία καλείται φωσφάτωση και μειώνει τις τριβές

Για λοιπά υλικά υπάρχουν τα παρακάτω λιπαντικά

- ανοξειδωτοι χάλυβες: Χλωριωμένα έλαια
- πυρίμαχοι χάλυβες: λιπαρά έλαια ή έλαια υψηλής πίεσης
- κράματα αλουμινίου: διάφορα ορυκτέλαια
- κράματα χαλκού
 - α) για μείωση διαμέτρου 10% γαλάκτωμα ή ορυκτέλαιο
 - β) για μία διαμέτρου περίπου 10 έως 30% γαλάκτωμα με πρόσθετα ή ορυκτέλαιο με πρόσθετο λιπαρού ελαίου ή υδαρές διάλυμα σαπουνιού
 - γ) για μείωση διαμέτρου 30 έως 50% διάλυμα σαπουνιού με προσθήκη λιπαρής ουσίας
 - δ) για μείωση διαμέτρου 50% και πάνω στεγνό σαπούνι ή ορυκτέλαιο ή λιπαρό έλαιο

3.3 Κάμψη

Η κάμψη είναι μία από τις πιο συνθέτες κατεργασίες διαμόρφωσης και λόγω της απλότητας της έχει μεγάλη χρήση στη βιομηχανία. Κατά την κάμψη, το διαμορφωμένο έλασμα παραμορφώνεται είτε για να λάβει το κατάλληλο σχήμα, είτε για να αυξήσει τη στιβαρότητα του μιας και ένα επίπεδο έλασμα έχει μικρότερη στιβαρότητα σχέση με ένα αντίστοιχο λυγισμένο έλασμα. Μπορεί να γίνει ελεύθερη ή με τη βοήθεια εργαλειομηχανών που ονομάζονται στρατζέρες ή και στρατζόπρεσες οι οποίες μπορούν να είναι χειροκίνητες ή μηχανοκίνητες. (Αντωνιάδης, 2017)



Εικόνα 19 Υδραυλική στρατζόπρεσα [31] (Στρατζόπρεσα)

Η κάμψη μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο εν θερμώ όσο και εν ψυχρώ καθώς κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη σωστή διεξαγωγή της διαδικασίας αυτής είναι γεωμετρία του εμβόλου, η μήτρα, η ταχύτητα αλλά και η ασκούμενη δύναμη επί του ελάσματος, όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν άμεση σχέση με το πάχος, το υλικό αλλά και τη γωνία στην οποία πρέπει να κάμπτεται το έλασμα κάθε φορά.

Η κάμψη μπορεί να εφαρμοστεί είτε ελαστικά είτε πλαστικά. Τυχόν εφαρμογή της κάμψης στην ελαστική περιοχή σημαίνει ότι υπάρχει μικρή μετατόπιση των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος και έτσι υπάρχει άμεση επανατοποθέτηση των ατόμων στις αρχές του θέσης, βάσει του νόμου του Hooke. Μετά την εφαρμογή της ελαστικής παραμόρφωσης υπάρχει και η πλαστική παραμόρφωση όπου τα άτομα δεν επιστρέφουν στις αρχικές τους θέσεις και πλέον εκεί η παραμόρφωσή τους είναι μόνιμη. Σε αυτή την περίπτωση οι τάσεις δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta_{εξ} = \sigma_{εσ} = \frac{1}{\left(\frac{2y_i}{s}\right) + 1}$$

Επίσης στην κάμψη υπάρχει το φαινόμενο της επαναφοράς το οποίο επενεργεί μετά από την εφαρμογή της δύναμης και οφείλεται σε μία μικρή ζώνη η οποία φέρει τάσεις εξωτερικά και εξαρτάται ανάλογα από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του ελάσματος, Δηλαδή για παράδειγμα στο χαλκό η επαναφορά μπορεί να είναι 0,5 μοίρες ενώ στο ανοξείδωτο χάλυβα έως και 3 μοίρες. (Αντωνιάδης, 2017)

Ακόμη εξαρτάται από το όριο διαρροής του υλικού και από τη γωνία κάμψης.

Το υπολογιζόμενο ανάπτυγμα του ελάσματος δίνεται από τη σχέση:

$$L = I_1 + I_6 + I_2 \quad (1)$$

Όπου I_1 , I_2 είναι τα μήκη του ευθύγραμμου τμήματος ενώ I_6 είναι το μήκος του τόξου που υπολογίζεται από τον παρακάτω σχέση:

$$I_6 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \left(\mu_i \frac{e \cdot S}{2} \right)$$

A : γωνία κάμψης σε μοίρες

μ_i : ακτίνα κάμψης σε mm

S: το πάχος του ελάσματος

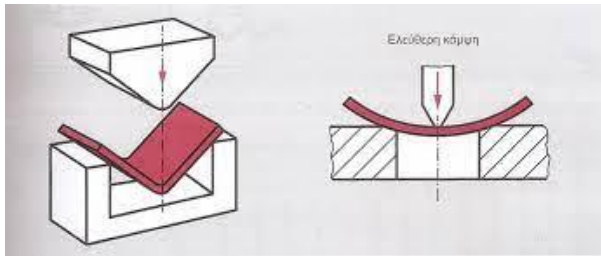
e: Συντελεστής διόρθωσης ο οποίος εξαρτάται από την ακτίνα και το πάχος του ελάσματος

πίνακας 1 τιμή συντελεστή διόρθωσης e [13]

ri/s	5	3	2	1,2	0,8	0,5
e	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

Υπάρχουν διάφορα είδη κάμψης. Πιο συγκεκριμένα είναι:

- Ελεύθερη



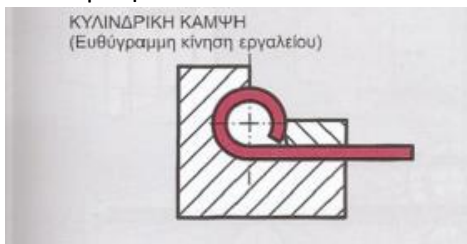
Εικόνα 20 Ελεύθερη κάμψη [27] (Αντωνιάδης, 2017)

- Περιστροφική



Εικόνα 21 Περιστροφική κάμψη [27]

- Κυλινδρική



Εικόνα 23 Κυλινδρική κάμψη [27]

- Κάμψη σε στρατσοπρέσσα



Εικόνα 24 Κάμψη σε στρατσοπρέσσα [27]

- Κάμψη μορφής



Εικόνα 25 Κάμψη μορφής [27]

- Στρογγυλή κάμψη



Εικόνα 26 Στρογγυλή κάμψη [27]

- Πτύχωση



Εικόνα 27 Πτύχωση [27]

- Κάμψη με κύλιση



Εικόνα 28 Κάμψη με κύλιση [27]

Συνηθέστερα εργαλεία για κάμψη είναι τα τύπου “V” και “U” ενώ τα υλικά που μπορούν να κατασκευαστούν αυτά τα εργαλεία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Υλικό	Ονοματολογία	Σκληρότητα HRC	Έμβολο	Μήτρα
1550	C110W1	60	✓	✓
2056	90CN3	64	✓	✓
2842	90MrV8	62	✓	✓

3.4 Περιώθηση

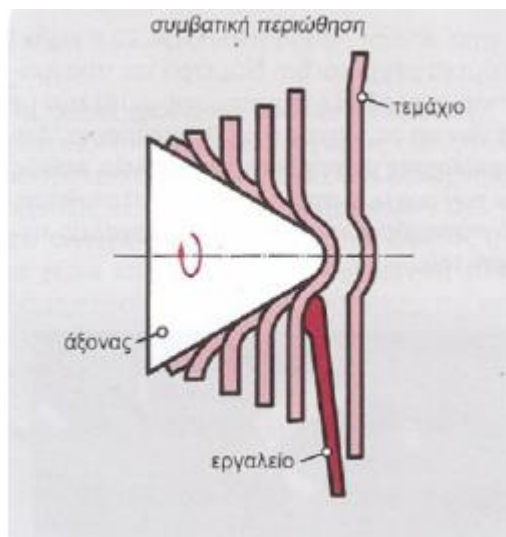
Είναι μία τεχνική μορφοποίησης ελασμάτων ή σωλήνων σε κυλίνδρους χωρίς ραφή, κώνους, ημισφαίρια ή αλλά κυκλικά σχήματα. Η περιώθηση γίνεται με συνδυασμό περιστροφής αλλά και ταυτόχρονης εφαρμογής δύναμης. Η περιώθηση ήταν γνωστή από τα πολύ παλιά χρόνια με πρώτες απεικονίσεις στην αρχαία Αίγυπτο στον τάφο του Πετοσίφισ 300 π.χ. (Αντωνιάδης, 2017)

Για πολλά χρόνια όμως επειδή η παραγωγή της ενέργειας έμεινε η ίδια η περιώθηση δεν εξελίχθηκε και ιδιαίτερα μέχρι και τον μεσαίωνα όπου η διακοπτόμενη περιστροφή των εξαρτημάτων αντικαταστάθηκε με συνεχόμενη περιστροφή με τη χρήση ενός ποδοκίνητου πεντάλ. Πλέον σήμερα με τη χρήση εργαλειομηχανών CNC, η περιώθηση έχει γίνει μία αξιόπιστη διαδικασία στον τομέα παραγωγής προϊόντων.

Η περιώθηση διακρίνεται σε χειροκίνητη ή σε μηχανική όπου η κίνηση του εργαλείου διαμόρφωσης γίνεται χειροκίνητα ή με μηχανικό τρόπο. Επίσης η περιώθηση έχει τρεις κατηγορίες με βάση τις οποίες κατατάσσεται:

Συμβατική περιώθηση

Εδώ ένα πρόδιαμορφωμένο κυκλικό ή επίπεδο έλασμα συγκρατείται πάνω σε ειδικής μορφής περιστρεφόμενο άξονα και ένα ειδικό δύσκαμπτο εργαλείο το οποίο μπορεί να περιστρέφεται εφαρμόζοντας πίεση στο σχήμα του άξονα, στο έλασμα απαιτείται όμως να γίνεται σε στάδια ενώ επίσης ο τεχνίτης πρέπει να είναι έμπειρος. Είναι μία οικονομική διαδικασία στο κομμάτι κατασκευής αντικειμένων και μπορεί να εφαρμοστεί σε συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος, με πολύ λίγες εξαιρέσεις σε ορισμένα μέταλλα με μικρή ολκιμότητα όπου απαιτείται η εφαρμογή να γίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.



Εικόνα 29 Συμβατική περιώθηση [27]

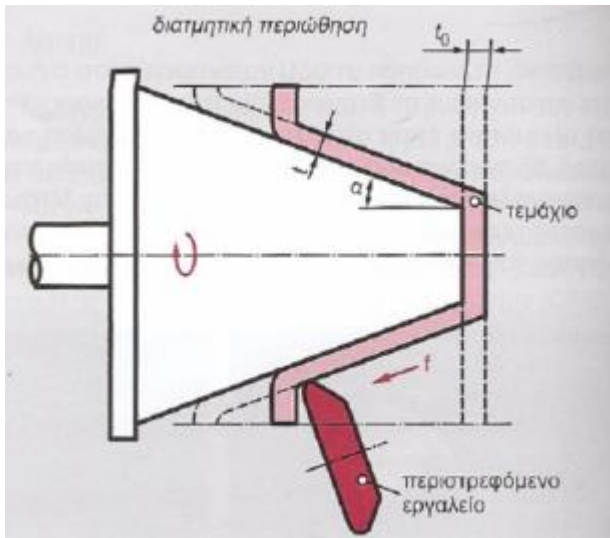
Διατμητική περιώθηση

Σε αυτή τη διαδικασία διαμορφώνεται ένα πρόδιαμορφωμένο κυκλικό ή επίπεδο έλασμα σε συμμετρικό ως προς τον άξονα κωνικό ή γενικής καμπύλης. Η διαφορά με τη συμβατική περιώθηση είναι ότι διαμέσου του τελικού τεμαχίου παραμένει ίδια με την αρχική διάμετρο του ελάσματος. Το πάχος του τελικού τεμαχίου μικραίνει και είναι ίσο με:

$$t = t_0 \cdot \sin \alpha$$

Όπου t_0 το αρχικό πάχος του ελάσματος σε [mm]

A: η γωνία του άξονα [μοίρες]

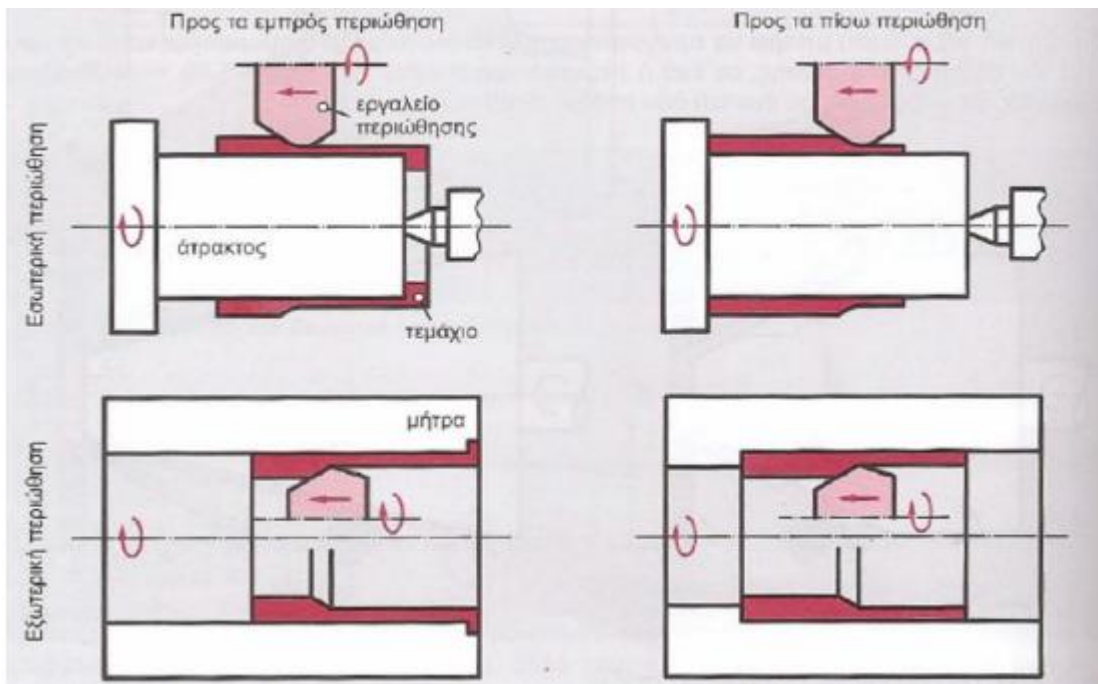


Εικόνα 30 Διατμητική περιώθηση [27]

Περιώθηση Σωλήνων

Σε αυτή διαδικασία το πάχος των σωλήνων ελαττώνεται με την πίεση περιστροφικών εργαλείων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει εξωτερικά ή εσωτερικά. Η περιώθηση σωλήνων μπορεί επίσης να γίνει από τα εμπρός ή προς τα πίσω.

Αποτέλεσμα αυτής της κατεργασίας είναι ένας λεπτότερος σωλήνας ο οποίος όμως έχει αυξηθεί στο μήκος. Σαν διαδικασία είναι ευρέως διαδεδομένη στην κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων, σκαφών και πυραύλων.



Εικόνα 31 Παραλλαγές περιώθησης σωλήνων [27]

4. Διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος-διαμορφώσεις λαμαρίνας

Οι διαμορφώσεις επίπεδου ελάσματος είναι αρκετά συνήθεις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στη διαμόρφωση και το σχηματισμό αντικειμένων όπως κουτάκια αναψυκτικών ή ακόμη και εξαρτήματα φανοποιείας στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Γενικότερα το όριο διαχωρίζεται μία λαμαρίνα από πάνω ένα συμπαγές υλικό είναι τα 6,35 mm.

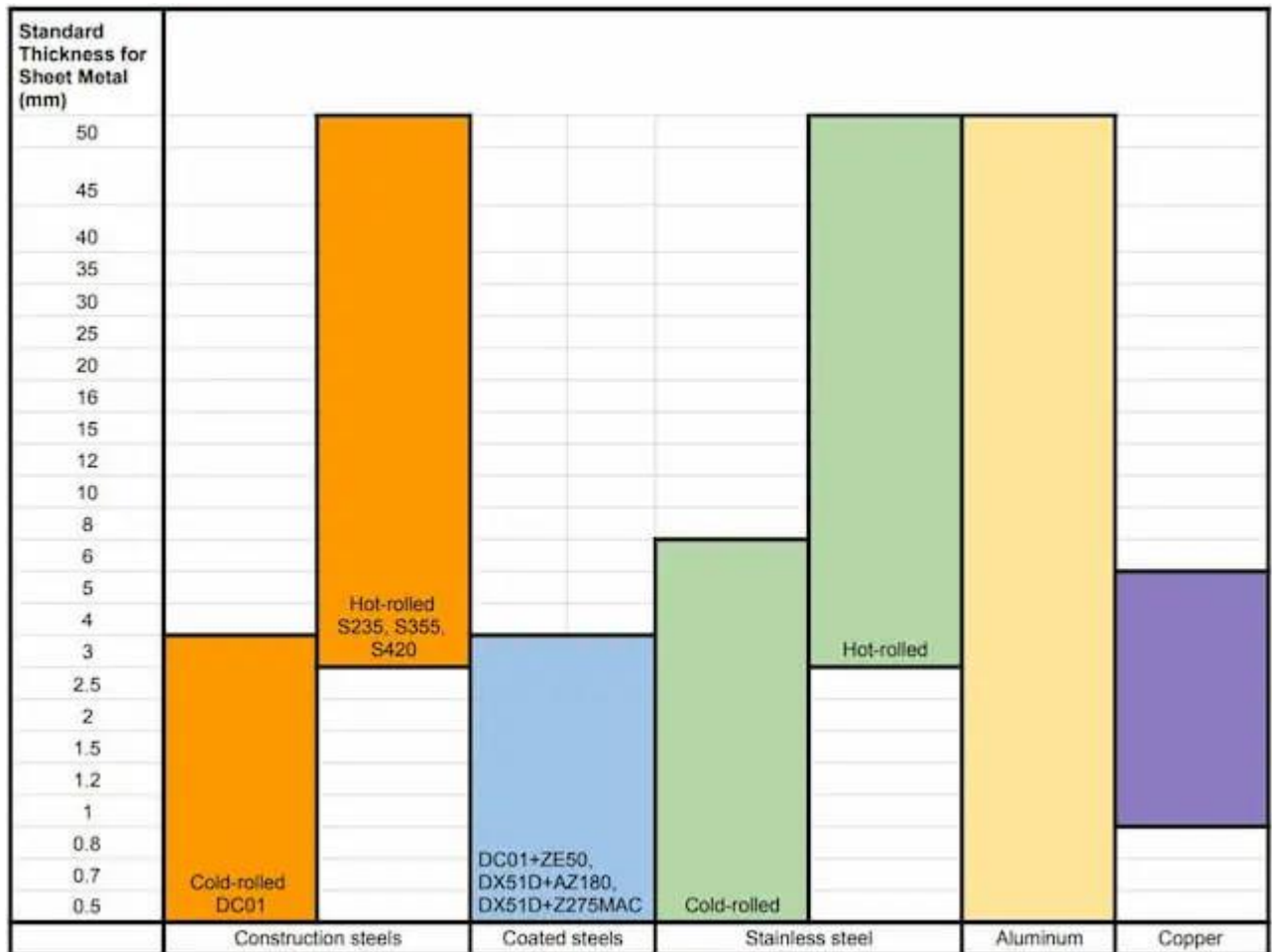
Η ονοματολογία φύλλο, λαμαρίνα, έλασμα λίγο-πολύ είναι ίδια το μόνο που αλλάζει είναι τα πάχη αυτών.

Υπάρχουν τρεις διαβαθμίσεις για τη μέτρηση του πάχους ενός ελάσματος και αυτές είναι τα χιλιοστά SI [mm], τα χιλιοστά της ίντσας [mils] και τέλος ο λόγος του πάχους του ελάσματος σε σχέση με το βάρος ανά τετραγωνικό πόδι "gauge". Όσο πιο μεγάλος είναι αυτός ο αριθμός τόσο πιο μικρό είναι το πάχος του εκάστοτε ελάσματος. (Velling, 2021)

Gauge	US Standard for steel sheet in inches (mm)	Steel inch (mm)	Galvanised steel inch (mm)	Stainless steel inch (mm)	Aluminium inch (mm)
3	0.2500 (6.35)	0.2391 (6.07)	-	-	-
4	0.2344 (5.95)	0.2242 (5.69)	-	-	-
5	0.2188 (5.56)	0.2092 (5.31)	-	-	-
6	0.2031 (5.16)	0.1943 (4.94)	-	-	0.162 (4.1)
7	0.1875 (4.76)	0.1793 (4.55)	-	0.1875 (4.76)	0.1443 (3.67)
8	0.1719 (4.37)	0.1644 (4.18)	0.1681 (4.27)	0.1719 (4.37)	0.1285 (3.26)
9	0.1563 (3.97)	0.1495 (3.80)	0.1532 (3.89)	0.1563 (3.97)	0.1144 (2.91)
10	0.1406 (3.57)	0.1345 (3.42)	0.1382 (3.51)	0.1406 (3.57)	0.1019 (2.59)
11	0.1250 (3.18)	0.1196 (3.04)	0.1233 (3.13)	0.1250 (3.18)	0.0907 (2.30)
12	0.1094 (2.78)	0.1046 (2.66)	0.1084 (2.75)	0.1094 (2.78)	0.0808 (2.05)
13	0.0938 (2.38)	0.0897 (2.28)	0.0934 (2.37)	0.094 (2.4)	0.072 (1.8)
14	0.0781 (1.98)	0.0747 (1.90)	0.0785 (1.99)	0.0781 (1.98)	0.0641 (1.63)
15	0.0703 (1.79)	0.0673 (1.71)	0.0710 (1.80)	0.07 (1.8)	0.057 (1.4)
16	0.0625 (1.59)	0.0598 (1.52)	0.0635 (1.61)	0.0625 (1.59)	0.0508 (1.29)
17	0.0563 (1.43)	0.0538 (1.37)	0.0575 (1.46)	0.056 (1.4)	0.045 (1.1)
18	0.0500 (1.27)	0.0478 (1.21)	0.0516 (1.31)	0.0500 (1.27)	0.0403 (1.02)
19	0.0438 (1.11)	0.0418 (1.06)	0.0456 (1.16)	0.044 (1.1)	0.036 (0.91)
20	0.0375 (0.95)	0.0359 (0.91)	0.0396 (1.01)	0.0375 (0.95)	0.0320 (0.81)
21	0.0344 (0.87)	0.0329 (0.84)	0.0366 (0.93)	0.034 (0.86)	0.028 (0.71)
22	0.0313 (0.80)	0.0299 (0.76)	0.0336 (0.85)	0.031 (0.79)	0.025 (0.64)
23	0.0281 (0.71)	0.0269 (0.68)	0.0306 (0.78)	0.028 (0.71)	0.023 (0.58)
24	0.0250 (0.64)	0.0239 (0.61)	0.0276 (0.70)	0.025 (0.64)	0.02 (0.51)
25	0.0219 (0.56)	0.0209 (0.53)	0.0247 (0.63)	0.022 (0.56)	0.018 (0.46)
26	0.0188 (0.48)	0.0179 (0.45)	0.0217 (0.55)	0.019 (0.48)	0.017 (0.43)

Εικόνα 32 Πάχη λαμαρινών [24] (Velling, 2021)

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας που αναπαριστά τα πάχη και τις δυο μεγάλες οικογένειες τόσο σε συμπαγή υλικά όσο και σε ελάσματα και την κατανομή τους βάση της κατεργασίας που έχει ακολουθηθεί για την κατασκευή τους αλλά και το υλικό τους. Είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι ο κύριος όγκος της κατανομής είναι χάλυβες που έχουν προκύψει από θερμή έλαση. (Velling, 2021)



Εικόνα 33 Κατανομή υλικών βάση πάχους [17] (Velling, 2021)

Το μεταλλικό φύλλο είναι πιο ευρέως διαδεδομένο στη μορφή του αλουμινόχαρτου, με το πάχος αυτού να φτάνει τα 0,2mm. Στη συνέχεια είναι το φύλλο λαμαρίνας το οποίο έχει αρχικό πάχος 0,5mm και φτάνει μέχρι και τα 6mm και πιο συγκεκριμένα το ανώτατο όριο των 6,35mm, οτιδήποτε παραπάνω θεωρείται λαμα και ανήκει στην οικογένεια των συμπαγών υλικών. (Velling, 2021)

Μεγέθη λαμαρινών

Πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά είναι κατανόηση της διαστασιολόγησης λαμαρίνας μήκος X πλάτος [mmxmm] καθώς αυτό μπορεί να βοηθήσει στην βελτιστοποίηση εκλογής της κατάλληλης διαστάσης προκειμένου να περιοριστεί η δαπάνη πλεονάζοντος υλικού αυξάνοντας έτσι την απόδοση μιας γραμμής παραγωγής μειώνοντας παράλληλα τα κόστη.

Sheet width, mm							
3000					Oversized		
2500					Oversized		
2000					Oversized		
1500			Large		Oversized		
1250		Medium			Oversized		
1000	Small				Oversized		
Sheet length, mm	2000	2500	3000	4000	6000	8000	12000

Εικόνα 34 Λαμαρίνες και διαστασιολόγηση [27] (Velling, 2021)

Οι διαμορφώσεις λαμαρίνας μπορούν να αποτυπωθούν ως εξής: (Velling, 2021)

Κάμψη, περιώθηση, βαθεία κοίλανση, απότμηση, επίσης υπάρχουν και άλλες κατεργασίες.

- Πιο ειδικά υπάρχει η **ελικοειδής συστροφή "curling"**

Είναι μια κατεργασία η οποία έχει να κάνει με τη δημιουργία ενός δακτυλίου στην άκρη της λαμαρίνας από την ίδια λαμαρίνα. Σκοπός του δακτυλίου αυτού είναι η καλύτερη μεταφορά και διαχείριση. Η κατεργασία αυτή μπορεί να γίνεται είτε αξονικά με τη λαμαρίνα είτε έκκεντρα με το δακτυλίδι να διαμορφώνεται πάνω από το επίπεδο της λαμαρίνας.

- **Απόκαμπύλωση**

είναι μία κατεργασία κατά την οποία αφαιρείται η καμπύλη από το φύλλο της λαμαρίνας, πιο συνηθέστερα εμφανίζεται σε λωρίδες ελασμάτων οι οποίες υπόκεινται σε κάμψη όταν διαμορφώνονται σε φύλλο λαμαρίνας. Η δύναμη ασκείται στο παραμορφωμένο άκρο και γίνεται σε ορισμένα μήκη.

- **Επέκταση λαμαρίνας "Πλεγματοποίηση"**

Σε αυτήν την κατεργασία το φύλλο λαμαρίνας περνάει μέσα από διατρητικά ψαλίδια όπου κόβεται και κατόπιν εφελκύεται σε ένα μοτίβο, συνήθως προτιμάται το πλέγμα σε σχήμα διαμαντιού ή αλλιώς ρόμβος. Τέτοιες εφαρμογές, είναι κατάλληλες για φράχτες ως το διακριτό όριο μεταξύ γεωτεμαχίων, πλατφόρμες, εξέδρες καθώς έχει καλή αποστράγγιση και με κατάλληλη μηχανική αντοχή για να υποστηρίξει δυνάμεις για τις οποίες έχει σχεδιαστεί.

- **Υδρομορφοποίηση "Hydroforming"**

Η υδρομορφοποίηση είναι ένας καινοτόμος τρόπος διαμόρφωσης λαμαρινών σε επιθυμητά σχήματα. Πιο ειδικά το φύλλο τοποθετείται σε ένα καλούπι αλλά αντί να χρησιμοποιηθεί μία συμβατική πρέσσα υπάρχει νερό υψηλής πίεσης το οποίο σε συνδυασμό με το «αρσενικό» κομμάτι του καλουπιού πιέζει τη λαμαρίνα στο επιθυμητό σχήμα και δεν υπάρχουν έτσι οι συσσωρευμένες τάσεις στα σημεία όπου μεταβάλλεται η γεωμετρία του καλουπιού δίνοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα στη λαμαρίνα.

Έχει καλή εφαρμογή λόγω του μικρότερου χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρώσει μια εργασία, ενώ είναι πιο φτηνό και έχει εφαρμογή και σε άλλα υλικά όπως ανοξείδωτους χάλυβες, κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, μπρούντζο και πολύτιμα μέταλλα όπως ο χρυσός.

- **Σιδέρωμα "ironing"**

Η μέθοδος αυτή αξιοποιείται ουσιαστικά στη τοπική μείωση του πάχους ενός τοιχώματος όπου αυτό απαιτείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η διεργασία στα τοιχώματα από τα κουτάκια των αναψυκτικών τα οποία απαιτούν 2-3mm στάδια "σιδερώματος" προτού φτάσουν στο επιθυμητό πάχος.

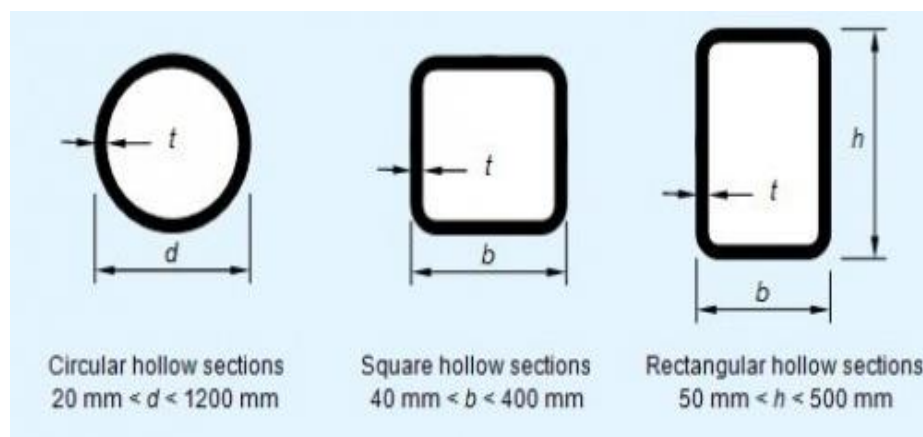
- **Κοπή με laser "laser cutting"**
 Η κοπή με laser είναι μία εφαρμογή κοπής λαμαρινών με χρήση μηχανών CNC η οποία δίνει τα επιθυμητά σχέδια με πολύ καλή ποιότητα στο κόψιμο και με μέγιστη ακρίβεια. Πλεονέκτημα της διαδικασίας αυτής είναι η ευκολία στην αναπροσαρμογή και τον έλεγχο του εκάστοτε κώδικα.
- **Φωτοχημική κατεργασία "chemical etching"**
 Η κατεργασία αυτή περιλαμβάνει την εφαρμογή ελεγχόμενης διάβρωσης και τη δημιουργία εξαρτημάτων από φύλλο λαμαρίνας. Το σχήμα διαμορφώνεται με τη χρήση δυο παραγόντων, του φωτόανθεκτικού και του χαρακτηριστικού σε συνδυασμό. Πρωτοεμφανίστηκε το 1960 και η εφαρμογή είναι κατάλληλη σε εξαρτήματα με τέλειο φινίρισμα και ακρίβεια στις ανοχές.
- **Απότμηση αποβλήτου εσωτερικά "Punching"**
 Το ποντάρισμα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία οπών σε φύλλο λαμαρίνας όπως είναι διάτρητες λαμαρίνες. Η δημιουργία της οποίας γίνεται με τη βοήθεια του καλουπιού και της αντίστοιχης πόντας που πρεσάρει τη λαμαρίνα στο καλούπι για να ανοίξει τις τρύπες.
- **Έλαση "Rolling"**
 Η έλαση αξιοποιείται για να μειωθεί το εκάστοτε πάχος της λαμαρίνας αλλά και να δώσει καλύτερη ομοιογένεια στην επιφάνεια. Η έλαση μπορεί να γίνει είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμώ πάνω από 760 °C.
- **Τροχαλισμός "wheeling"**
 Η κατεργασία αυτή αξιοποιεί το μηχάνημα που είναι και γνωστό ως βρετανικός τροχός "English wheel" το οποίο βοηθάει στο να επιμηκύνει και να καμπληλώσει το έλασμα στο επιθυμητό σχήμα. Η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για μαζική παραγωγή ενώ προαπαιτούμενο είναι η υψηλή τεχνογνωσία. Η μόνη κατάλληλη εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι στις επισκευές παλαιών οχημάτων. (Velling, 2021)

4.1 Διαμορφώσεις εν θερμώ περιγραφή μηχανισμών διαμόρφωσης κοιλοδοκών

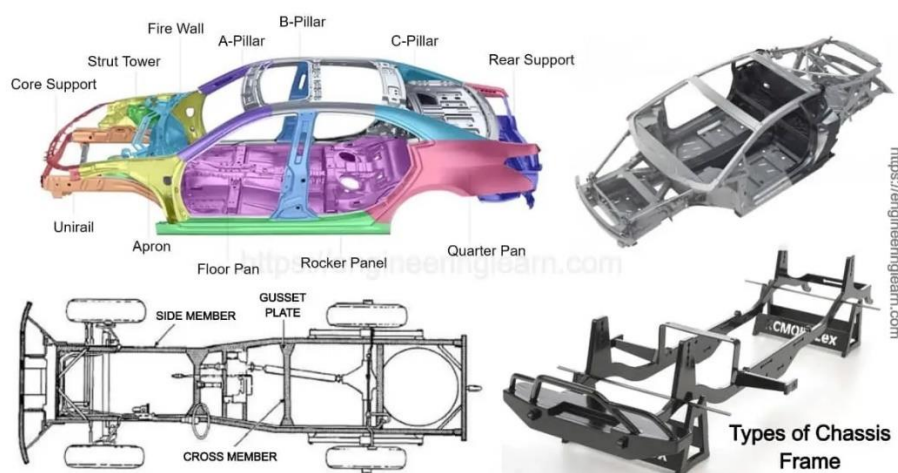
Τόσο οι τετράγωνες όσο και οι ορθογωνικής διατομής κοιλοδοκοί μπορούν να διαμορφωθούν με τη μέθοδο της έλασης, η χρήση αυτής της τεχνικής μπορεί εκάστοτε να αξιοποιηθεί για να διαμορφωθούν και προφίλ τύπου U ή τύπου V. Η εργασία αυτή σχετίζεται τη διέλευση του φύλλου της λαμαρίνας μέσα από ειδικά διαμορφωμένα ράουλα που θα αποδώσει το τελικό σχήμα του προφίλ τους διαμόρφωση.

Τα τελευταία χρόνια η χρήση κοιλοδοκών γίνεται ολοένα και πιο συχνή τόσο στον κατασκευαστικό τομέα όσο και στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Τα κτίρια που αξιοποιούν κοιλοδοκούς για την δόμηση τους έχουν αυξημένους συντελεστές ασφαλείας και καλές αναλογίες αντοχής/βάρους, λόγω της χρήσης τέτοιων στοιχείων. Οι κοιλοδοκοί για παράδειγμα από ανοξείδωτο χάλυβα έχουν υψηλή αντοχή στη διάβρωση και τη σκουριά όπως επίσης και οι κοιλοδοκοί που έχουν υποστεί κάποια κατεργασία βαφής όπως είναι το θερμό γαλβάνισμα.

Επίσης οι κοιλοδοκοί που αξιοποιούνται από τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας αποσκοπούν τόσο στη μείωση του βάρους του αυτοκινήτου αλλά και τη βελτίωση της αντοχής τους. (Mehari Zelalem Abathun, 2021)



Εικόνα 35 Διατομές κοιλοδοκών βάση σχήματος [20] (Steel construction info)



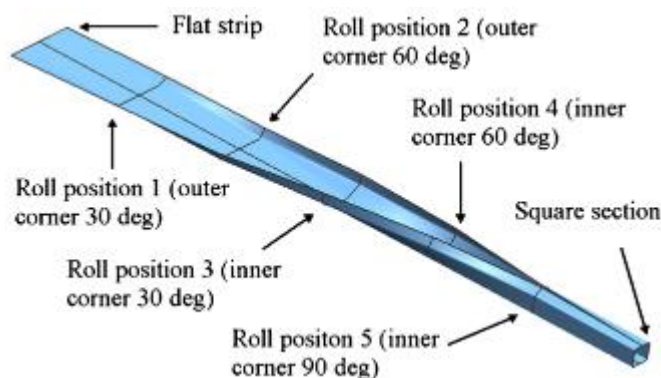
Εικόνα 36 Σκελετός αυτοκινήτου [4] (Chassis frame)

Υπάρχουν δύο ευρύτερες κατηγορίες κατασκευών κοιλοδοκών για διαφορετικά υλικά, διαφορετικές προδιαγραφές και απαιτήσεις.

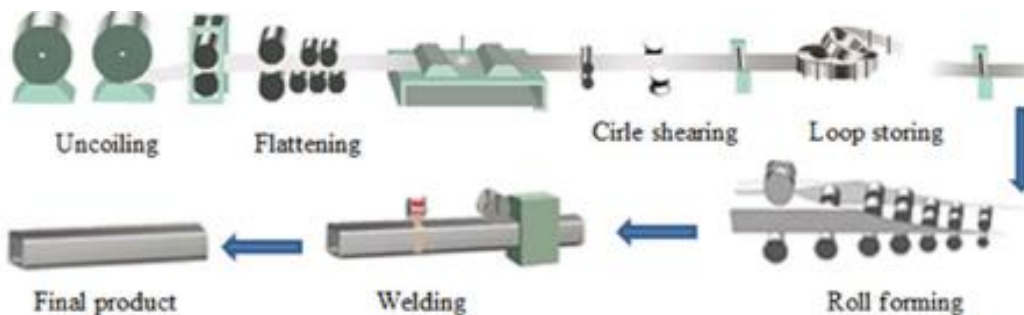
Η πρώτη μέθοδος που αξιοποιείται είναι η άμεση έλαση.

- **Άμεση διαμόρφωση κοιλοδοκού**

Κατά την άμεση έλαση τα πρώτα έλαστρα-στάδια στη μηχανή αξιοποιούνται για να δημιουργήσουν προοδευτικά το κοίλο σχήμα με το να σχηματίσουν τα ράουλα ουσιαστικά τις δύο πρώτες άνω ακμές του κοίλου σχήματος προς κατασκευή είτε είναι ορθογώνιο ή τετράγωνο, στη συνέχεια επεμβαίνουν τα ράουλα που είναι υπεύθυνα για να διαμορφώσουν, να κάμψουν ουσιαστικά και τις δύο κάτω ακμές ώστε να δοθεί μορφή η οποία απαιτείται πριν προχωρήσει για να κολληθεί. Η διαδικασία φαίνεται και πιο αναλυτικά στην παρακάτω φωτογραφία όπου φαίνεται το ανάπτυγμα λαμαρίνας αλλά και τα σημεία στα οποία δίνονται κατάλληλες γωνίες ώστε να γυρίσει σωστά το φύλλο.



Εικόνα 37 Έλαση κοιλοδοκού από λαμαρίνα [11] (Li, 2009)



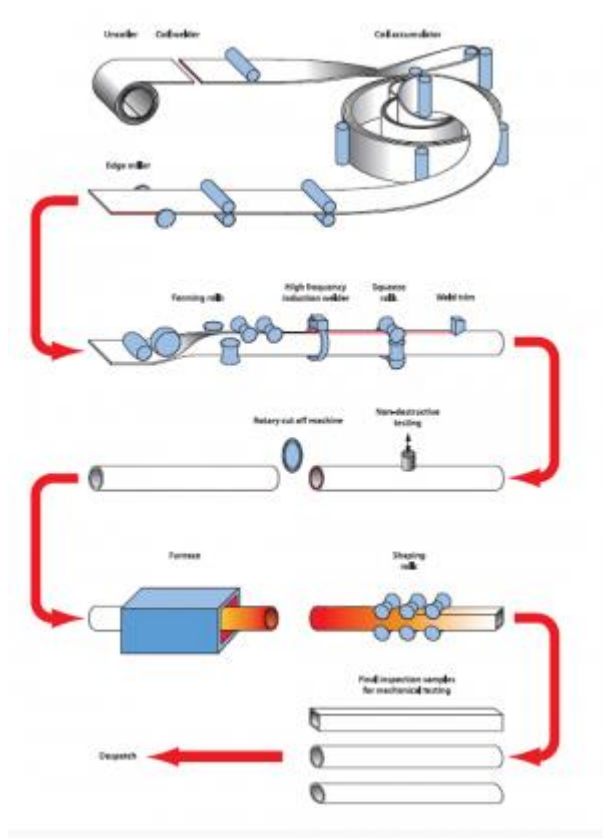
Εικόνα 38 Σχηματική απεικόνιση σταδίων έλασης [20] (Steel construction info)

Η δεύτερη κατηγορία διαμόρφωσης είναι η έμμεση διαμόρφωση.

- Έμμεση διαμόρφωση κοιλοδοκού

Στην κατηγορία αυτή η κατεργασία ξεκινάει από το φύλλο λαμαρίνας, η διαφορά είναι στο ότι το σχήμα που διαμορφώνεται από τη λαμαρίνα είναι σωλήνας ο οποίος πάλι ενώνεται με συγκόλληση στο τέλος όπως και στην άμεση διαμόρφωση. Αφού η λαμαρίνα συγκολληθεί προχωράει στα ράουλα μορφοποίησης όπου και παίρνει το τελικό κοίλο σχήμα. Είναι μια διαδικασία η οποία γίνεται συνήθως εν θερμώ λόγω των πολλαπλών σταδίων που έχει.

Αναλυτικότερα φαίνεται και στην παρακάτω φωτογραφία



Εικόνα 39 Έλαση με διαμόρφωση εν θερμώ στο τέλος (hot finished rolling) [20]

Και οι δύο διεργασίες μπορούν να γίνουν τόσο σε θερμοκρασία δωματίου δηλαδή εν ψυχρώ έλαση, αλλά και εν θερμώ ώστε να διαμορφωθούν οι κοιλοδοκοί. Τέλος υπάρχει και η έλαση με φινίρισμα εν θερμώ (hot finished rolling) που είναι συνδυαστική μέθοδος των παραπάνω δυο.

Η εν θερμώ διαμόρφωση ειδικότερα είναι η κατεργασία ότι εκτελείται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτές θερμοκρασίας της ανακρυστάλλωσης του υλικού προς διαμόρφωση.

Σύμφωνα με τη θεωρία, είναι γνωστό ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται το όριο πλαστικής παραμόρφωσης έτσι η απαιτούμενη δύναμη για να προκληθεί παραμόρφωση μειώνεται όμως σε επόμενο στάδιο κατά την διαδικασία της ψύξης έχει παρατηρηθεί ανομοιογένεια. Πιο ειδικά κοιλοδοκοί που έχουν διαμορφωθεί εν θερμώ αποβάλλουν τη θερμότητα που έχουν λάβει κατά την κατεργασία τους σε δύο μορφές. Η πρώτη είναι μέσω συναγωγής στο περιβάλλοντα χώρο και η άλλη μέσω της αγωγής μέσω των ράουλων. (Steel construction info)

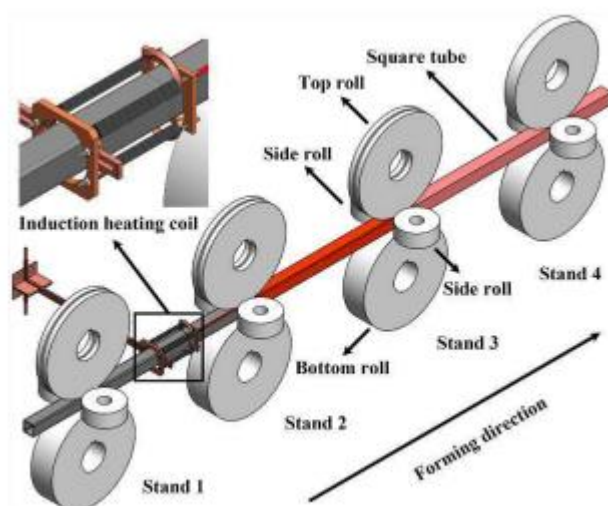
Παρόλο που δεν διαθέτουν εσωτερικές εναπομένουσες τάσεις σε σύγκριση με την εν ψυχρώ διαμόρφωση κοιλοδοκών υπάρχει το πρόβλημα της διαφοροποίησης του ρυθμού ψύξης κατά μήκος της διατομής. Εκεί παρατηρείται να ψύχεται πρώτα η εξωτερική επιφάνεια η οποία και συρρικνώνεται σε αντίθεση με το εσωτερικό μέρος το οποίο παραμένει ζεστό και λόγω συστολής κατά την μετέπειτα ψύξη του θα έχει περιοριστεί από το τμήμα της εξωτερικής επιφάνειας που θα έχει ήδη κρυώσει.

Κατά την ψυχρή έλαση κοιλοδοκών επειδή εισάγονται αρκετές τάσεις στο φύλλο της λαμαρίνας λόγω ανομοιογενούς πλαστικής παραμόρφωσης, προκειμένου να διορθωθεί αυτό το πρόβλημα αξιοποιείται ένας συνδυασμός με θερμή έλαση, για το λόγο αυτό εντάσσεται στην οικογένεια των θερμών κατεργασιών.

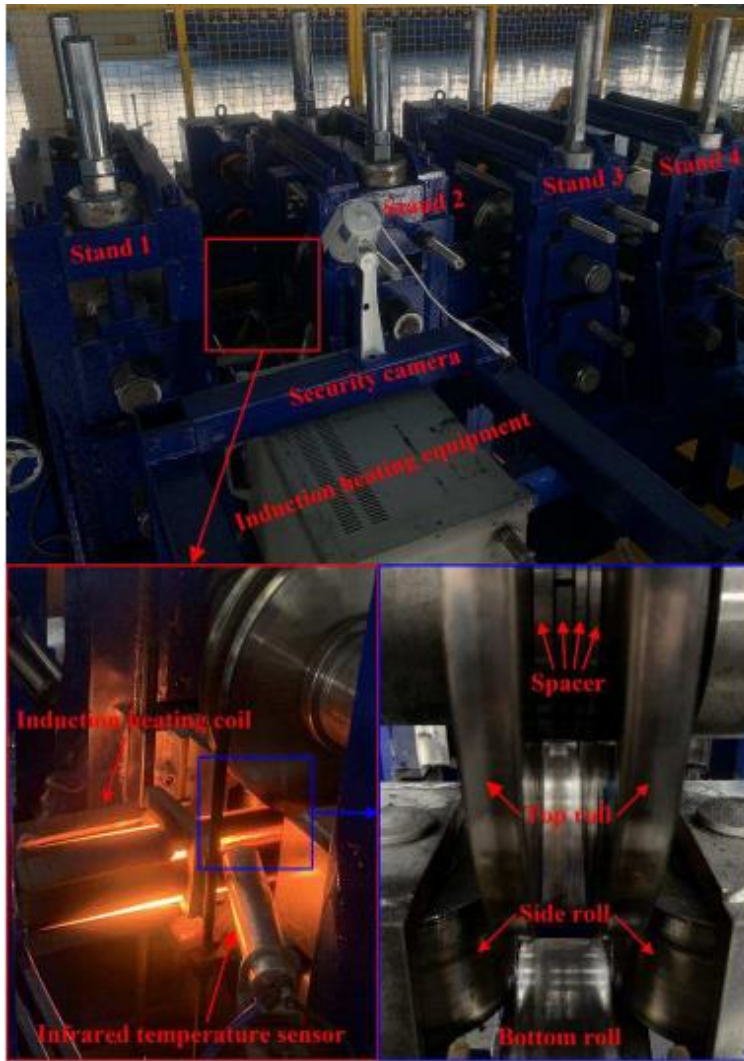
Η θερμή αυτή η κατεργασία είναι μία σειρά από βήματα που αποσκοπούν στην απελευθέρωση των εναπομενουσών εσωτερικών τάσεων που "εγκλωβίστηκαν" στο υλικό κατά τη διαδικασία της ψυχρής έλασης.

Πιο αναλυτικά το διαμορφωμένο τμήμα του κοιλοδοκού εξέρχεται από τα ράουλα μορφοποίησης και μεταφέρεται με ταινιόδρομο για θερμική κατεργασία. Η θερμοκρασία για αυτή την κατεργασία ορίζεται ως κάτω από τη θερμοκρασία ωσθενιτοποίησης, όπου παραμένει για προκαθορισμένη διάρκεια χρόνου και κατόπιν ακολουθείται από ομοιογενή ψύξη, όσο το δυνατόν είναι εφικτό καθώς είναι φυσικό να υπάρχει μέσα στα όρια ανοχών ανομοιογένεια όπως γίνεται αναφορά σε προηγούμενη παράγραφο.

Επίσης το φαινόμενο "Poisson" έχει σαν συνέπεια να εμφανίζονται διατμητικές τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια και θλιπτικές τάσεις στην εσωτερική επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα οι κοιλοδοκοί φέρουν γωνίες οι οποίες είναι ελάχιστες πιο μεγάλες σε σχέση με το πάχος των πλευρών τους. Συνέπεια αυτού είναι οι γωνίες να ψύχονται τελευταίες και έτσι να δημιουργούνται κατά μήκος του κοιλοδοκού διατμητικές και θλιπτικές τάσεις. Επίσης πριν ο κοιλοδοκός σε θερμοκρασία περιβάλλοντος υφίσταται μία διαδικασία ισιώματος η οποία εισάγει περαιτέρω τάσεις. Όμως συγκριτικά με την έλαση εν ψυχρώ οι εναπομένουσες τάσεις στη μεριά του κοιλοδοκού που έχει υποστεί συγκόλληση είναι λιγότερες όπως έδειξε η έρευνα του Stamenkovic [24]



Εικόνα 40 Εν θερμώ διαμόρφωση κοιλοδοκού [20]



Εικόνα 41 Διάταξης ράουλων μηχανής για εν θερμώ διαμόρφωση κοιλοδοκών [23]

4.2 Μηχανές για διαμόρφωση εν θερμώ

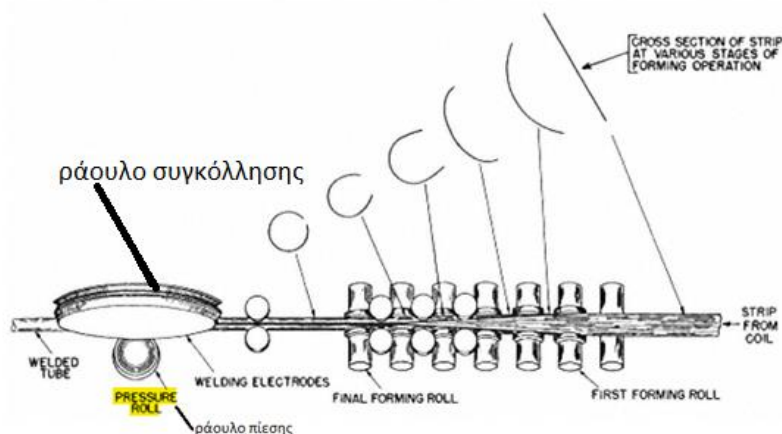
Στην οικογένεια των διαμορφώσεων του επιπέδου ελάσματος αξιοποιείται ο μηχανισμός της έλασης για την κατασκευή κοιλοδοκών από φύλλο λαμαρίνας. Γενικά υπάρχουν τρεις κατηγορίες με βάση την κατεργασία που ακολουθείται για διαμόρφωση των κοιλοδοκών. (Steel construction info)

1. Ψυχρή έλαση (cold rolled)
2. Θέρμη έλαση (hot rolled)
3. Έλαση με φινίρισμα εν θερμώ (hot finished rolling)

Όλες οι παραπάνω εργασίες μπορούν να συνδυαστούν με τη βαφή εν θερμώ γαλβανίσματος (hot dipped galvanized) για να υπάρξει μεγαλύτερη προστασία απέναντι σε διαβρωτικούς παράγοντες.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για την κατασκευή κοιλοδοκών, η πρώτη είναι η μέθοδος άνευ ραφής η οποία περιλαμβάνει τη μορφοποίηση του κοιλοδοκού με το να ανοίγεται η τρύπα σε μία ζεστή συμπαγή μπάρα αφήνοντας σαν απόβλητο ουσιαστικά το εσωτερικό τμήμα που διαμορφώνει τον κοιλοδοκό.

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή που η συνένωση γίνεται με τη χρήση συγκολλήσεως. Πιο ειδικά όταν το χαλύβδινο έλασμα περάσει από τα πρώτα στάδια μορφοποίησης λίγο πριν το τέλος της διαδικασίας όπου πλέον έχει σχεδόν διαμορφωθεί το τελικό σχήμα περνάει στη διάταξη συγκόλλησης που περιλαμβάνει τα ραουλα συγκόλλησης και τα έλαστρα πίεσης τα οποία είναι υπεύθυνα για να συγκρατήσουν το τελικό σχήμα της κοιλοδοκού αφού συγκολληθεί μέσω ηλεκτρικής αντίστασης υψηλής συχνότητας (high frequency electric resistance welding).



Εικόνα 42 Διάταξη μηχανής διαμόρφωσης εν θερμώ και αποτύπωση του ραουλο πίεσης και του ραουλο συγκόλλησης [16] σελίδα 779 (Roberts, 1983)

4.2.1 Μονάδες έλασης

Οι μονάδες έλασης που αξιοποιούνται για τη μορφοποίηση ελασμάτων είναι οι εξής:

1. Συγκροτήματα συνεχούς έλασης (continuous rolling mills)

Το έλασμα περνάει από ορισμένα στάδια ελάστρων όπου μειώνεται σταδιακά το πάχος του. Είναι κατάλληλη τεχνική για την κατασκευή δοκών του τύπου IPE,IPN.

2. Σύμπλεγμα ελάστρων (cluster rolling mills)

Χρησιμοποιεί τη διάταξη τετραπλού ύψος ελασμάτων και έχει κατάλληλη εφαρμογή σε πολύ σκληρά κράματα όπως το τιτάνιο.

3. Διάταξη διπλού, τριπλού και τετραπλού ύψος ελάστρων (two,three,four-high rolling mills)

Είναι διατάξεις που αξιοποιούνται κυρίως στην εν-ψυχρώ έλαση και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην όλο ένα και περισσότερο μείωση του πάχους του ελάσματος με την αύξηση του αριθμού της διάταξης των ράουλων από δύο έως και σε τέσσερα ανά βάση. (Ulbrich)

4.2.2 Μηχανές κατασκευής κοιλοδοκών άνευ συγκόλλησης

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες γίνεται η μορφοποίηση κοιλοδοκών εν θερμώ άνευ συγκόλλησης οι οποίες πρέπει να αναφερθούν.

- Η πρώτη μέθοδος είναι η διάτρηση (piercing) κατά την οποία ανοίγεται μία τρύπα κατά μήκος του άξονα της μπάρας. Υπάρχει επίσης η διπλή διάτρηση (double piercing) και χρησιμοποιείται για τη μείωση του πάχους του τοιχώματος και την αύξηση της διάστασης.
- Η δεύτερη μέθοδος είναι η επιμήκυνση (elongating) όπου μεγαλώνει το μήκος του αγωγού με μία μικρή μείωση στην εξωτερική διάσταση και στο πάχος των τοιχωμάτων
- Η τρίτη μέθοδος είναι η περιτύλιξη (reeling) όπου οι εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες λειαίνονται και η διάσταση εμφανίζει μία μικρή αύξηση
- Η τέταρτη μέθοδος είναι η μεγέθυνση και η σμίκρυνση (sizing, sinking) όπου το δοκίμιο διαμορφώνεται στην επιθυμητή διάσταση και δεν επηρεάζεται το πάχος των τοιχωμάτων. (Roberts, 1983)

Διαδικασία	Μηχανή που αξιοποιείται
Διάτρηση	Πρέσσα εξώθησης
	Πρέσσα διάτρησης (πρέσσα Calmes)
	Περιστροφικός διατρητής (Mannesmann, 3 roll piercer)
Διπλή διάτρηση	Περιστροφικός διατρητής (Mannesmann, 3 roll piercer)
Επιμήκυνση	Calmes piercer
	Plug mill
Περιτύλιξη	Μηχανή περιτύλιξης παρόμοια με τύπου Mannesmann
Μεγέθυνση-συρρίκνωση	Έλαστρα με πολλαπλά ράουλα που έχουν αυλακώσεις

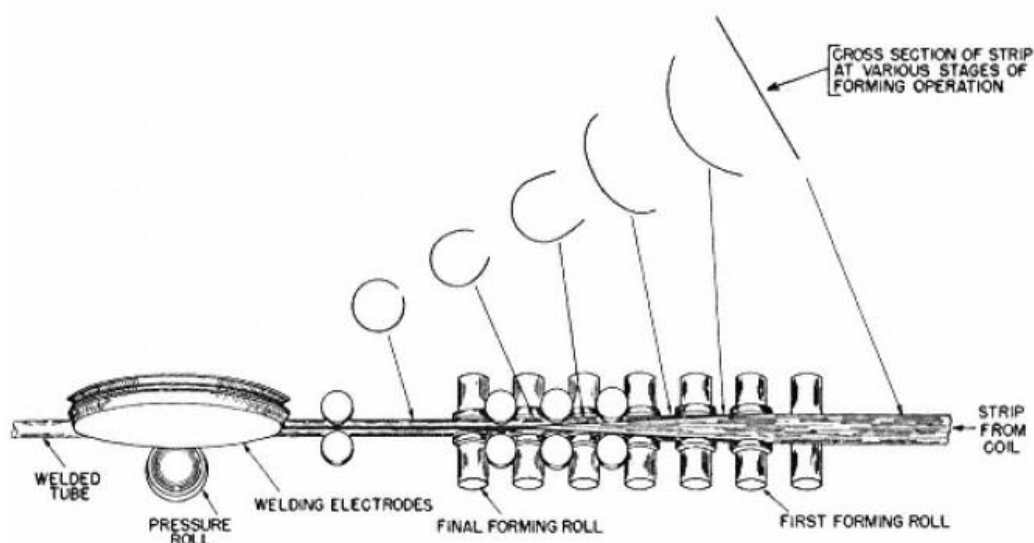
πίνακας 2 μηχανές για διαμόρφωση άνευ συγκόλλησης (Roberts, 1983)

4.2.3 Μηχανές με συγκόλληση για την κατασκευή κοιλοδοκών

Όταν διαμορφώνεται από το επίπεδο έλασμα ο κοιλοδοκός τότε αφού δημιουργεί το τελικό σχήμα οι δύο άκρες ενώνονται με τη χρήση εσωραφής συγκόλλησης (butt welding) ή με τη χρήση ηλεκτρικής αντίστασης (electric resistance welding).

Μία τυπική διάταξη που αξιοποιεί και χρησιμοποιεί τη μέθοδο συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση αξιοποιείται με σκοπό την παραγωγή σωληνώσεων με διάμετρο 26 ίντσες ή 660mm και πάχος τοιχώματος 0,5 ίντσες ή 12,7 mm.

Τα στάδια που περιλαμβάνει η διαδικασία είναι ο τεμαχισμός του ελάσματος στο απαιτούμενο πλάτος, η μορφοποίηση, η συγκόλληση, ή διαστασιολόγηση, ο τεμαχισμός και το φινιρίσμα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 43 Διαδικασία μορφοποίησης ελάσματος σε σωλήνα[16] (Roberts, 1983)

Στα πρώτα βήματα το έλασμα περνάει από ένα περικοπέα που διαμορφώνεται στο σωστό πλάτος και οι ακμές του επεξεργάζονται για να συγκολληθούν σε επόμενα στάδια μεταξύ τους.

Σε επόμενο στάδιο μεταβαίνει σε ράουλα μορφοποίησης, σε ενδιάμεσα ράουλα κάθετου κλεισίματος και τέλος στα ράουλα φινιρίσματος.

Η συγκόλληση επιτυγχάνεται με τη συγκράτηση του σωλήνα σε ράουλα πίεσης και παράλληλα με τη θέρμανση των άκρων με ρεύματα χαμηλής συχνότητας το οποίο διέρχεται μέσω ενός ηλεκτροδίου ή με τη χρήση χαμηλών ραδιοσυχνοτήτων που περνάει ρεύμα επαγωγικά ή μέσω τριβόμενων επαφών.



Εικόνα 44 Συγκόλληση μέσω επαφής (εταιρία thermatool)

Μετά τη ραφή ο βόρακας συγκόλλησης αφαιρείται και πραγματοποιούνται όλες οι μεταλλικές κατεργασίες που απαιτούνται.

Τέλος αφού κρυώσει ο σωλήνας πηγαίνει σε έλαστρα διαστασιολόγησης όπου εκεί θα πάρει το τελικό του σχήμα και θα κοπεί στο απαιτούμενο μήκος.

4.3 Διαδικασία κατασκευής των ράουλων

Οι τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των ράουλων μπορεί να είναι η χύτευση, η σφυρηλάτηση, διπλή χύτευση.

Η φυγοκεντρική χύτευση είναι ευρέως διαδεδομένη στην κατασκευή επιπέδων ράουλων που χρησιμοποιούνται για επίπεδα προϊόντα αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά ράουλα για βαριά δομικά προϊόντα του κατασκευαστικού τομέα απαιτούν ειδικές αυλακώσεις τόσο μεγάλες που ένα αξιοποιήσιμο πάχος στρώματος θα μπορούσε να αποκτηθεί μόνο με τη χρήση μονής χύτευσης. Με το σχεδιασμό ειδικών υποδοχών για τη δημιουργία βάσεων γενικής χρήσης τα περισσότερα ράουλα έχουν κατασκευαστεί μέσω της τεχνικής της φυγοκεντρικής χύτευσης. (S. Spuzic, August 1994)

4.3.1 Χημική σύσταση υλικών των ράουλων

Το εύρος της χημικής ανάλυσης δίνεται $0.3\% \leq C \leq 3.8\%$, $0.2\% \leq S \leq 2.5\%$, $Mn \leq 2.5\%$, $Cr \leq 30\%$, $Ni \leq 5\%$ και $Mo \leq 4\%$.

Επιπλέον στοιχεία της χημικής σύστασης είναι ο φώσφορος (P), το θείο (S), το βανάδιο (V), το βολφράμιο (W), το Νιόβιο (Nb) και το τιτάνιο (Ti). (S. Spuzic, August 1994)

4.3.2 Μικροδομή της επιφάνειας των ράουλων

Ανάλογα με τη χημική σύσταση και τη θερμική κατεργασία τα υλικά των ράουλων απαρτίζονται από τις εξής μικρόδομές:

1. περλιτική,
2. μπαινιτική,
3. μαρτενσιτική
4. και ωστενική,

με την ύπαρξη περισσότερης ή λιγότερης αναλογίας καρβιδίων/σεμεντίτη και την ύπαρξη γραφίτη συγκεκριμένης κατανομής και μεγέθους. Οι ιδιότητες των υλικών των ράουλων επηρεάζονται σημαντικά από την ποσότητα και την κατανομή καρβιδίων (M₂C₃) που μπορούν να αποτελέσουν έως και το 40% του όγκου της μικροδομής. Ο σεμεντίτης δίνει εξαιρετική αντίσταση στην τριβή πρόσφυσης σε θερμοκρασίες δωματίου και υψηλή αντίσταση στη φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η ύπαρξη γραφίτη δίνει υψηλή ανοχή σε ανομοιογενείς συνθήκες απόψυξης και μειωμένη τριβή σε εφαρμογές που είναι κυρία παράμετρο λειτουργίας. (S. Spuzic, August 1994)

4.3.3 Υλικά κατασκευής ράουλων

Τα υλικά κατασκευής των ράουλων είναι σε δύο κυρίες οικογένειες. Η πρώτη οικογένεια είναι τα χυτά ράουλα και η δεύτερη τα χαλύβδινα. Τα χυτά ράουλα χρησιμοποιούνται κυρίως στα τελευταία στάδια. Είναι ψαθυρά υλικά με πολύ υψηλή αντίσταση στη φθορά. Ατσάλινα ράουλα χρησιμοποιούνται γιατί έχουν υψηλότερες αντοχές σε σχέση με τα χυτά ωστόσο υψηλότερο συντελεστή τριβής, υψηλές αντοχές σε καμπτικά και στρεπτικά φορτία.

Η κατηγοριοποίηση των υλικών των ράουλων μπορεί να βασιστεί σε μία κατανόηση της συσχέτισης των μηχανικών ιδιοτήτων, της μικροδομής, της χημικής σύστασης και πιο ειδικά του ποσοστού της συγκέντρωσης σε άνθρακα.

Πολύ σημαντικό ρόλο στην εκλογή του κατάλληλου υλικού έχει η διατύπωση συγκεκριμένων προβλημάτων. Για παράδειγμα, για να επιλέγουν τα υλικά κατασκευής ράουλων για τις μεσαίες βάσεις στη γραμμή παραγωγής που είναι σε μονάδα έλασης ορίζονται κάποιες συγκεκριμένες παράμετροι.

- 1) το ιστορικό αστοχίας των επιφανειών
- 2) κατηγορίες των παραγομένων προϊόντων (ελαφριές η βαριές)
- 3) απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες

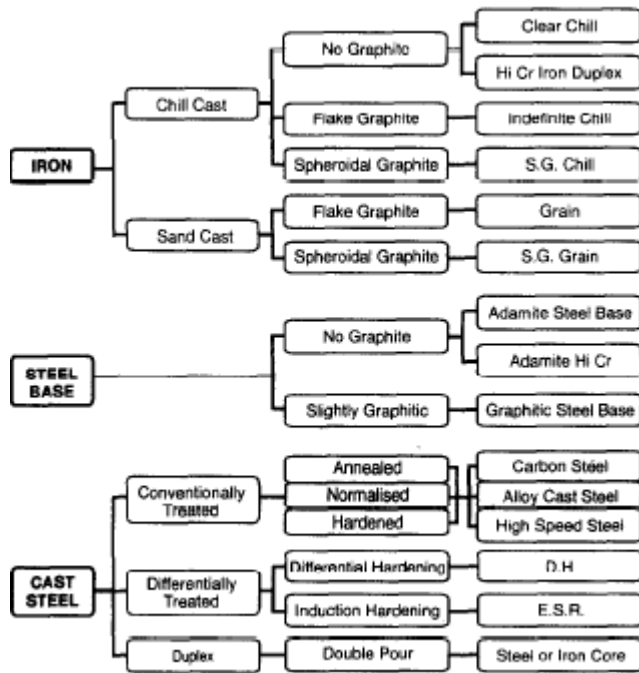
Γενικότερα τα υλικά που δίνουν το καλύτερο συνδυασμό αντοχής σε μηχανικές φορτίσεις, σε θερμικές κοπώσεις και φθορές είναι τα φυγοκεντρικής χυτεύσεως, χυτοχάλυβες (adamites).

Σε πολύ διαφορετική περίπτωση ανήκουν τα ράουλα που αξιοποιούνται από μονάδες έλασης για την κατασκευή εξαρτημάτων για δομικά στοιχεία όπως π.χ. (κοιλοδοκοί, HEA, HEB κλπ.), Εκεί καθώς υπάρχουν υψηλά φορτία και η γεωμετρία των ράουλων είναι τέτοια που όταν μειώνεται η διάμετρος τους οι τάσεις από τις φορτίσεις αυξάνονται σημαντικά.

Έτσι λοιπόν για τα πρώτα ράουλα απαιτείται υψηλή σκληρότητα όπως και αντίσταση στο θερμικό αιφνιδιασμό και αντίσταση σε φθορά.

Επειδή υπάρχει πληθώρα απαιτήσεων, στις προδιαγραφές επιλέγονται μασίφ ατσάλινα ράουλα.

Γενικότερα τα υλικά έχουν εύρος από χυτό ανθρακούχο χάλυβα 0,5%C και σκληρότητα 30 Shore C, όριο διαρροής 650 MPa και φερίττο-περιλιτική δομή έως και ράουλα υψηλής σκληρότητας από 2,3%C πρόσμιξης Cr-Mo με σκληρότητα 50 Shore C και όριο διαρροής 500 MPa και μικροδομή που αποτελείται από σφαιρικά καρβίδια ανάμεσα σε περιλιτική δομή. (S. Spruzic, August 1994)



Διάγραμμα ροής 1 Εκλογής υλικών για τη κατασκευή ράουλων [17] (S. Spuzic, August 1994)

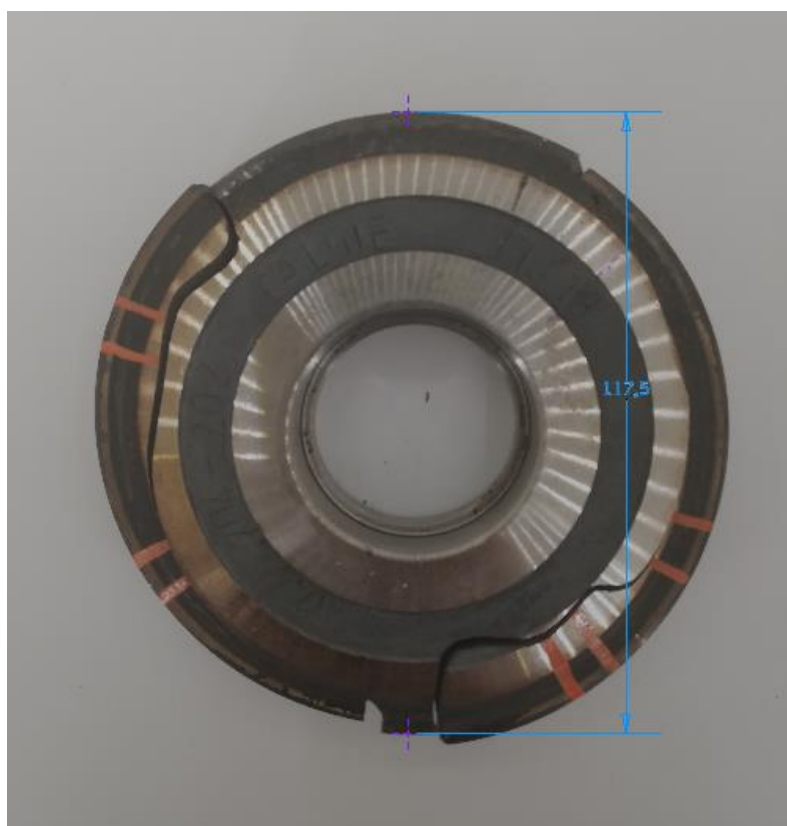
5. Πειραματικό μέρος προκαταρκτική εξέταση

5.1 Βασικά στοιχεία μηχανής - εξαρτήματος

Η μηχανή που είναι υπεύθυνη για την διαμόρφωση των κοιλοδοκών είναι η FCF 240 (FCF® - Flexible Cold Forming technology) και μπορεί να διαμορφώσει τετράγωνες και ορθογωνικές διατομές από 19 x 19 mm μέχρι έως και 63 x 63 mm με τοιχώματα πάχους από 1.0-3.3 mm . Η παραγωγή που μπορεί να έχει το μηχάνημα στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας της είναι τα 100m/min. Πάνω στη μηχανή αυτή και συγκεκριμένα στο στάδιο συγκόλλησης είναι προσαρμοσμένο το ράουλο προς εξέταση. (Seuthe)

5.2 Συλλογή ιστορικών δεδομένων

Για την μελέτη της συγκεκριμένης αστοχίας, αρχικά διενεργήθηκε επίσκεψη στις εγκαταστάσεις της εταιρείας που χρησιμοποιούνταν το συγκεκριμένο εξάρτημα. Το αστοχημένο ράουλο πρόκειται για ένα ράουλο κατασκευασμένο από το υλικό Uddeholm Caldite το οποίο έχει υποστεί κατεργασία στον τόρνο και έχει διαστασιολογικά μικρότερη διάσταση 117.5 mm Η εξωτερική διάμετρος της Α' ύλης της στρογγυλής μπάρας από το συγκεκριμένο υλικό είναι 120.3 mm. Κατά την κατεργασία της δοκού, εξωτερικά υφίσταται μια κατεργασία φινιρίσματος προκειμένου να διαμορφωθούν τα κέντρα των κύκλων στον ίδιο άξονα. Στο κέντρο του ράουλου υπάρχει μια σχισμή η οποία έχει πλάτος μετρημένο στα 4.936 mm ενώ το βάθος της είναι μετρημένο στα 11.552 mm . Σκοπός αυτής της εγκοπής είναι για να μπορεί να περάσει μέσα της η ραφή της συγκόλλησης που έχει πραγματοποιηθεί μόλις νωρίτερα προκειμένου να δωθεί το τελικό σχήμα στον κοιλοδοκό.



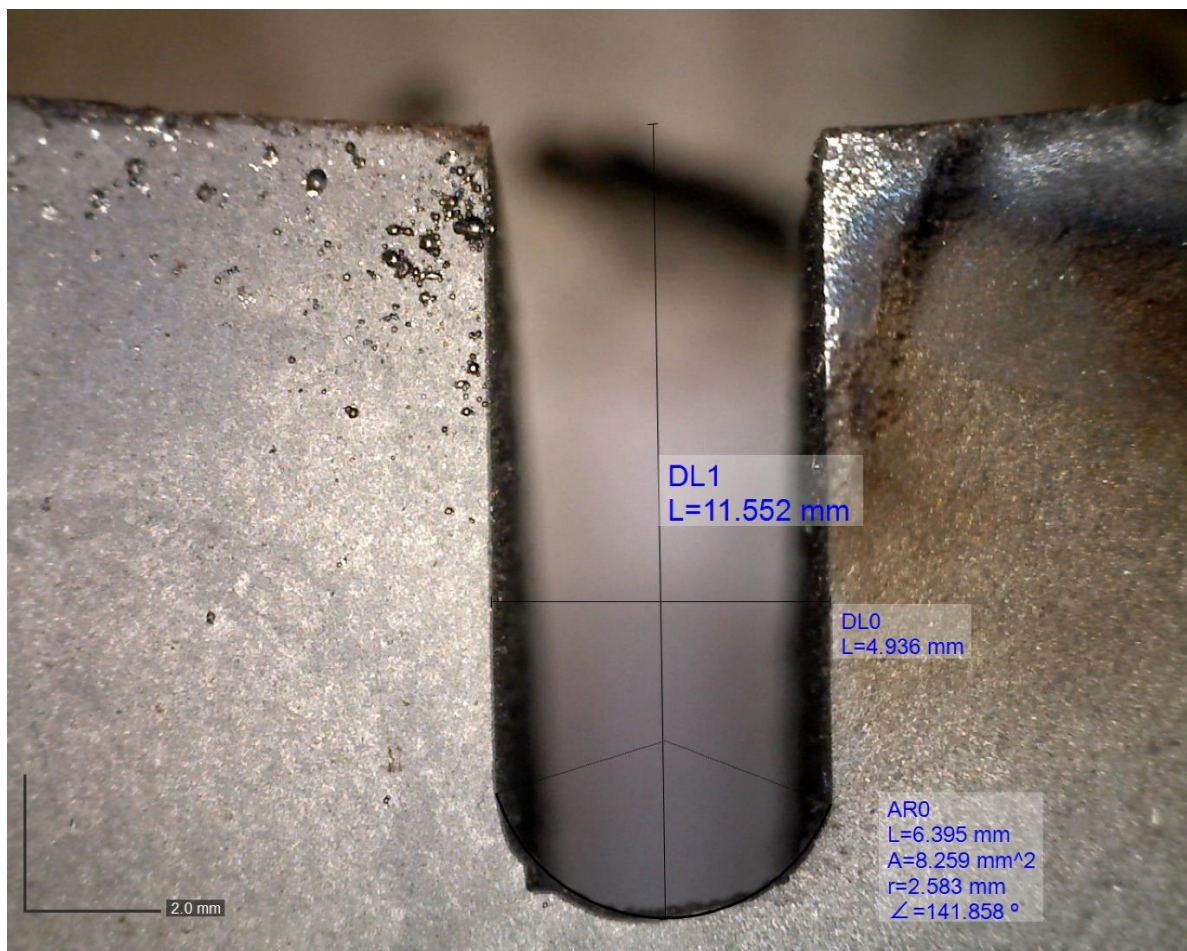
Εικόνα 45 Ράουλο CALDIE εξωτερική διάσταση όψη Α

Στη σύγκριση των εικόνων 46 και 47, διαπιστώνεται ότι το βάθος της σχισμής για το ράουλο CALDIE (εικόνα 46) είναι στα 11.552 mm ενώ σε αντίστοιχο αστοχημένο ράουλο από χάλυβα Uddeholm UNIMAX (εικόνα 47) είναι στα 10.624 mm. Αντίστοιχα το πλάτος της σχισμής για το CALDIE είναι 4.936 mm ενώ στο UNIMAX 5.889 mm. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η ακτίνα καμπυλότητας και στα δύο ράουλα έχει ανομοιογένειες οι οποίες σχετίζονται με κακή παραμετροποίηση της διαδικασίας τόννευσης κατά την κατασκευή τους.

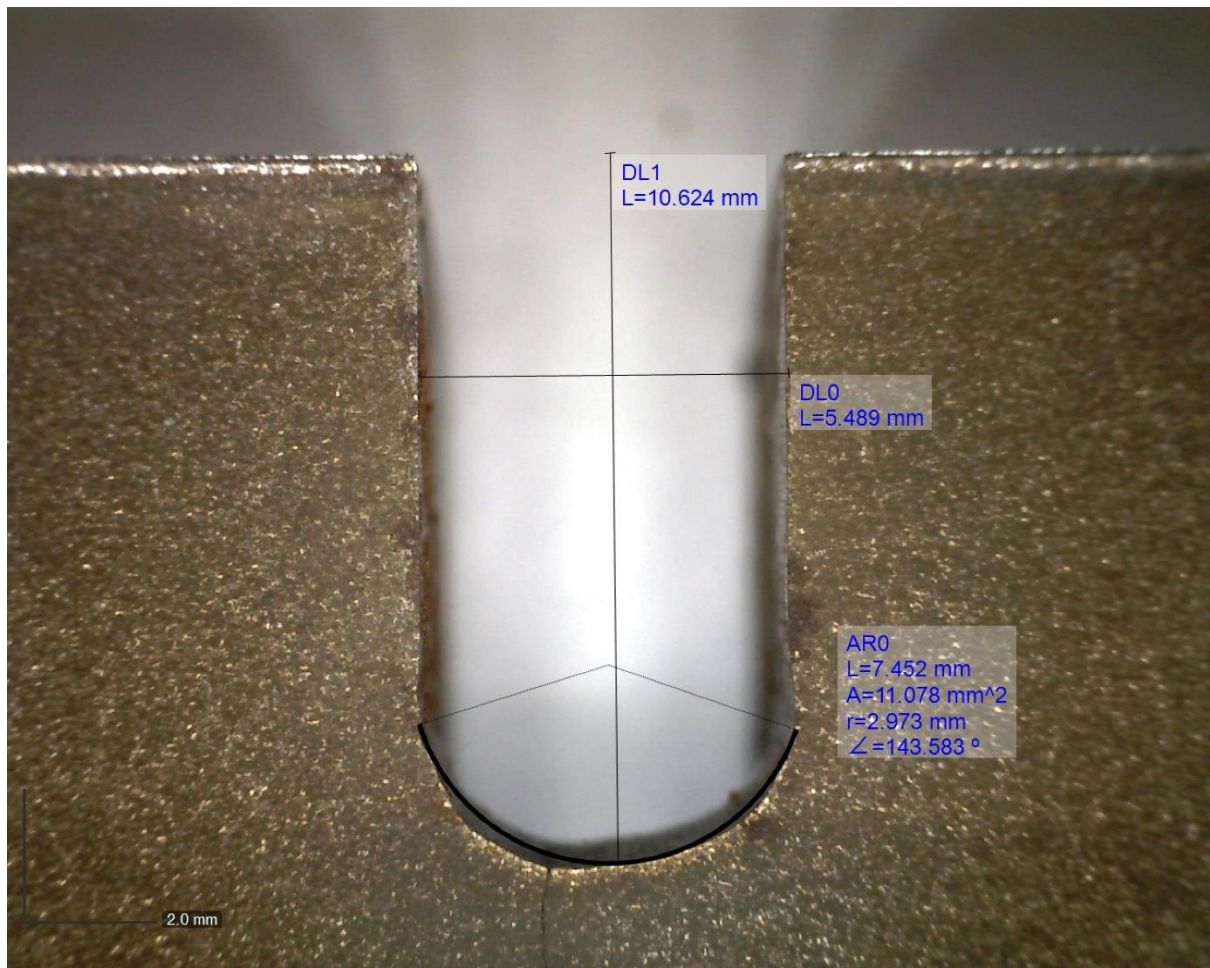
Τα ράουλα από χάλυβα Uddeholm CALDIE αυτά έχουν σκληρότητα 57-58 Rockwell C όπως μας εξήγησε και ο Κ. Μιχελιουδάκης Ι., και δεν έχουν υποστεί εναζώτωση.

Η τοποθέτηση των ράουλων γίνεται στη μηχανή FCF 240 της Seuthe. Η θέση του ράουλου προς μελέτη είναι στο σημείο που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες λόγω συγκόλλησης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο παρελθόν έχει γίνει αντικατάσταση στο τύπο του ράουλου από ράουλα κατασκευασμένα από χάλυβα Sverker 21 με σκληρότητα 62-63 Rockwell C όπως είχε εκλέξει η Seuthe, σε ράουλα από Uddeholm, το οποίο είναι και το ράουλο λειτουργίας της μηχανής.

Επίσης είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι το ράουλο από Uddeholm Unimax έχει υποστεί διαδικασία εναζώτωσης λόγω της φθοράς που παρουσίασε κατά την 1^η δοκιμή. Έγινε προσπάθεια να γίνει επικάλυψη με χρώμιο όμως δεν μπορούσε το χρώμιο να προσκολληθεί στην επιφάνεια λόγω της εναζώτωσης.



Εικόνα 46 Ράουλο CALDIE τομή Β'Β διαστάσεις σχισμής



Εικόνα 47 Ράουλο UNIMAX τομή Β'Β διαστάσεις σχισμής

5.3 Επίσκεψη στη βιομηχανία αποτύπωση γραμμής παραγωγής

Η διαδικασία παραγωγής κοιλοδοκών ξεκινάει με την Α' ύλη που είναι ελάσματα τα οποία είναι τυλιγμένα σε καρούλια (coils). Καθένα απο αυτά τοποθετούνται σε μια συστοιχία από ράουλα τα οποία παραλαμβάνουν το έλασμα και το οδηγούν σε μια τεμαχιστική μηχανή η οποία είναι υπεύθυνη για την κοπή στην απαιτούμενη διάσταση του αναπτύγματος των πλευρών του εκάστοτε κοιλοδοκού προς παραγωγή.

Σε επόμενο στάδιο, το έλασμα ξανατυλίγεται σε καρούλι μέσω μιας μηχανής (ανέμη) και στη συνέχεια τοποθετείται πάνω σε ειδικά διαμορφωμένα βαγονέτα προκειμένου να μεταφερθεί στην επόμενη θέση όπου και εκεί θα ξεκινήσει πλέον η κατεργασία διαμόρφωσης. Αρχικά τοποθετείται σε μια επόμενη «ανέμη» όπου και εκεί ξεκινάει η τροφοδοσία στα ράουλα προκειμένου να γίνει ο κοιλοδοκός που απαιτείται. Το μηχάνημα που εξετάζεται είναι το FCF 240 της Seuthe



Εικόνα 47 μεταφορά ελάσματος απο τύλιγμα σε στροφέιο



Εικόνα 48 Ανέμη ξετυλίγματος προς ράουλα διαμόρφωσης

Τα ράουλα είναι διαφόρων σχημάτων και έχουν τέτοια διάταξη έτσι ώστε όπως προχωράει το φύλλο του ελάσματος να κάμπεται βαθμωτά. Παράλληλα, το φύλλο είναι μονίμως εμβαπτισμένο σε γαλάκτωμα σαπουνελαίου εξυπηρετώντας έτσι την καλύτερη ολίσθιση μέσα από τις διάφορες γεωμετρίες των ραούλων.



Εικόνα 49 πρώτο στάδιο διαμορφώσεως από έλασμα



Εικόνα 50 Δεύτερο στάδιο διαμορφώσεως



Εικόνα 51 Τρίτο στάδιο διαμόρφωση του π

Εικόνα 52 Πέμπτο στάδιο ίσιωμα του π και αποκαμπύλωση



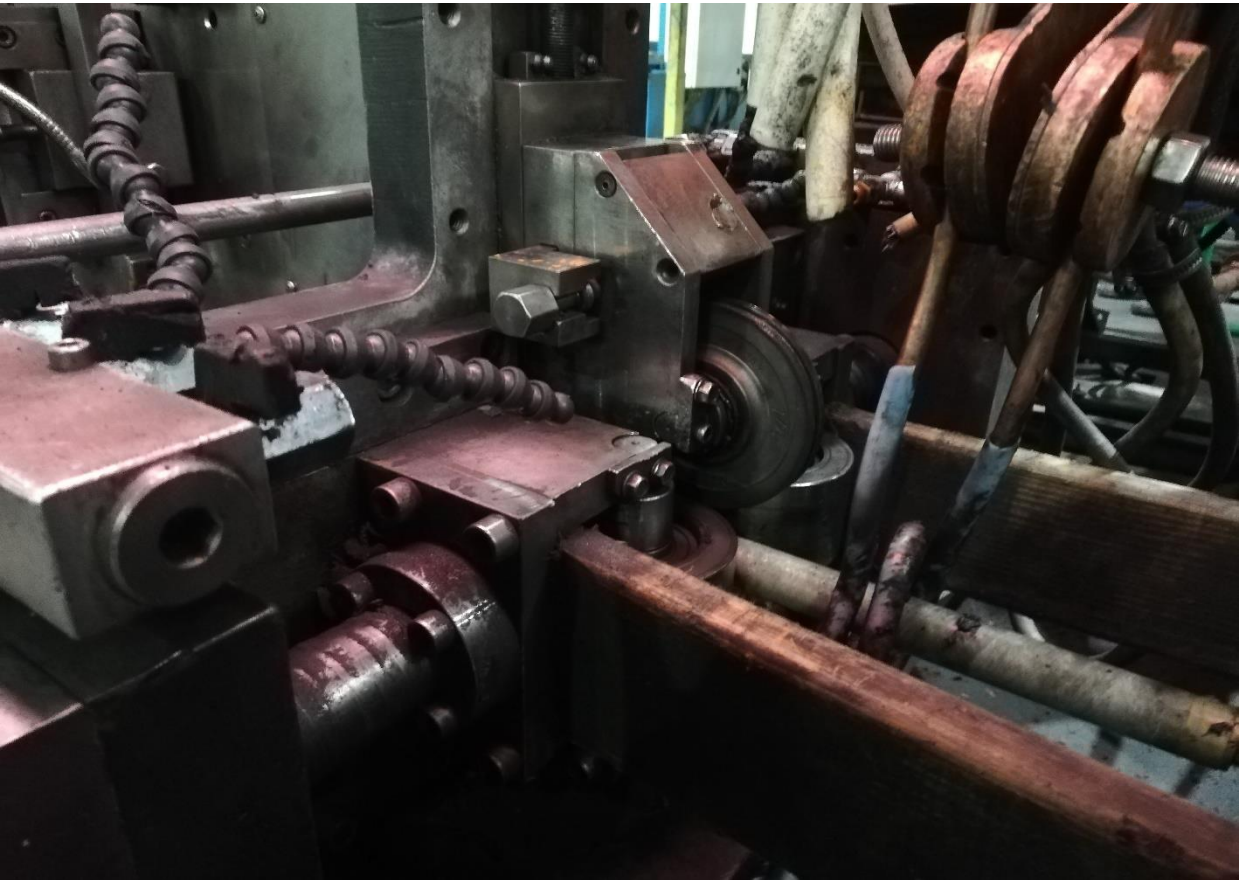
Εικόνα 53 Έκτο στάδιο κάμψη σε τετράγωνη διατομή Εικόνα 54 Έβδομο στάδιο τελικά ράουλα πριν τη συγκόλληση

Αφού πλέον περάσει από όλα τα στάδια πίεσεως και έχει φτάσει σχεδόν στη τελική διάσταση περνάει στη φάση της συγκόλλησης. Η συγκόλληση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των ράουλων συγκολλήσεως τα οποία αποτελούν και τα εξαρτήματα προς ανάλυση και εξέταση. Τα ράουλα αυτά έχουν κάποια συγκεκριμένα γεωμετρικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει μια διαβάθμιση στη γεωμετρία της επιφάνειας η οποία εξυπηρετεί για να υποδεχτεί το πάχος της ραφής της συγκόλλησης. Αυτό το ράουλο τοποθετείται στο πάνω μέρος του κοιλοδοκού. Επίσης, υπάρχουν και άλλα δύο ράουλα δεξιά και αριστερά του κοιλοδοκού τα οποία είναι λεία και ασκούν πίεση ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα η τελική διάσταση του ράουλου για τη συγκόλληση.

Επίσης στη διάταξη αυτή συμπεριλαμβάνεται και το επαγωγικό πηνίο το οποίο με τη χρήση ειδικών ράβδων από φερρίτη επιτυγχάνεται η συγκόλληση.



Εικόνα 55 Διάταξη συγκόλλησης σε λειτουργία



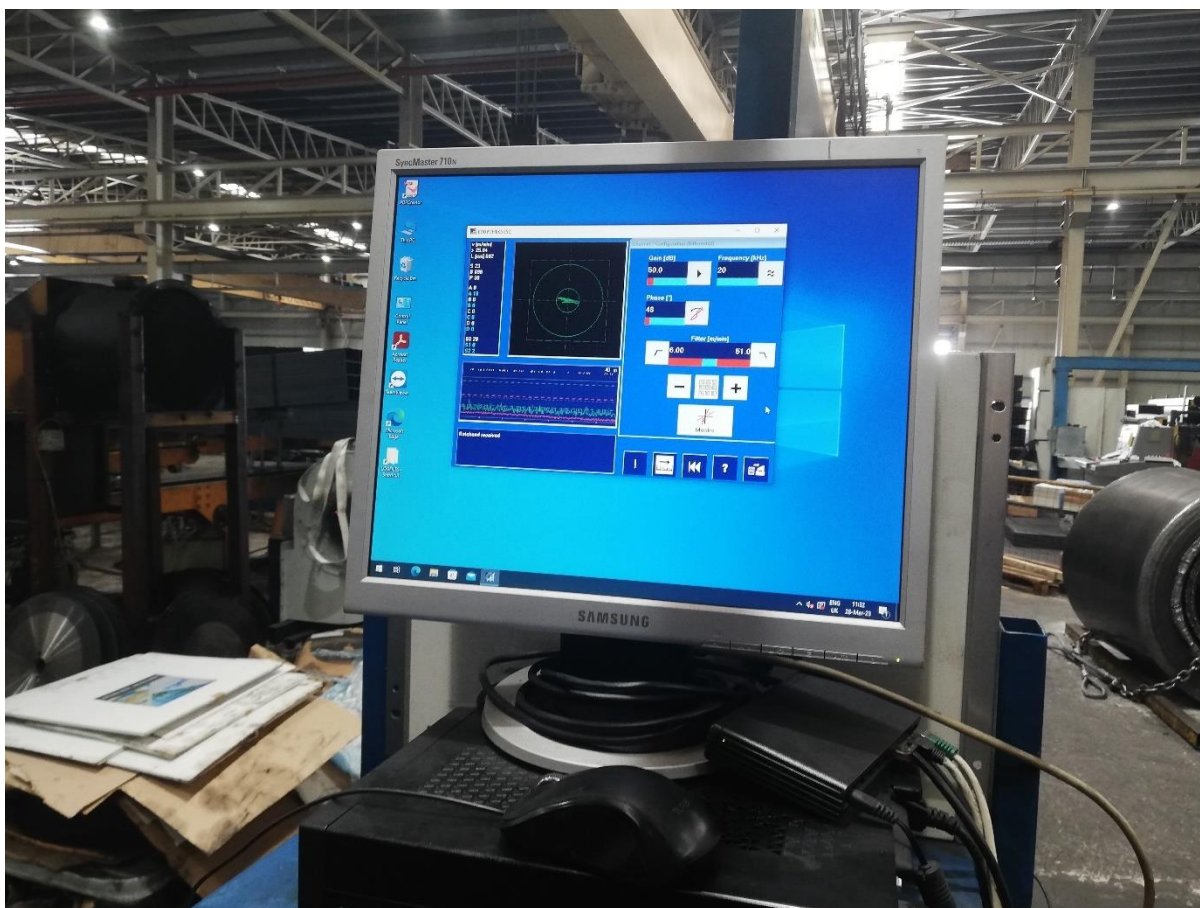
Εικόνα 56 Διάταξη ράουλου συγκολλησεως (άνω ράουλο) ανάμεσα στα τρία ράουλα είναι ο φερριτης και το επαγωγικό πηνείο

Σημειώνεται ότι υπάρχει άμεση ψύξη με το γαλάκτωμα ακριβώς μετά τη συγκόλληση οπότε διαπιστώνεται ότι το ράουλο συγκόλλησης υπόκειται εναλασσόμενους κύκλους ψύξης-θέρμανσης (φωτογραφία 55).

Σε επόμενο στάδιο της γραμμής παραγωγής ο κοιλοδοκός πλέον διαμορφωμένος, μεταβαίνει σε ένα σύστημα ελέγχου με υπερήχους όπου εξετάζεται αν έχει συγκολληθεί και ότι δεν υπάρχουν δομικές ατέλειες .Παράλληλα ένας ειδικός δρομέας είναι εκεί για την καταμέτρηση των μέτρων που ορίζουν στη συνέχεια την κοπή στο πριόνι ,η οποία μπορεί να γίνει σε 12.000 mm ή 6.000 mm ανάλογα τη διατομή.Αν στη διαδικασία ελέγχου υπάρξει για κάποιο λόγο κάποιο ελάττωμα, τότε το τεμάχιο απορρίπτεται.



Εικόνα 57 Συστήματα μέτρησης και ελέγχου ποιότητας



Εικόνα 58 Έλεγχος υπερήχων (μη καταστροφικός έλεγχος παραγόμενων κοιλοδοκών)



Εικόνα 59 Πρίονι τεμαχισμού

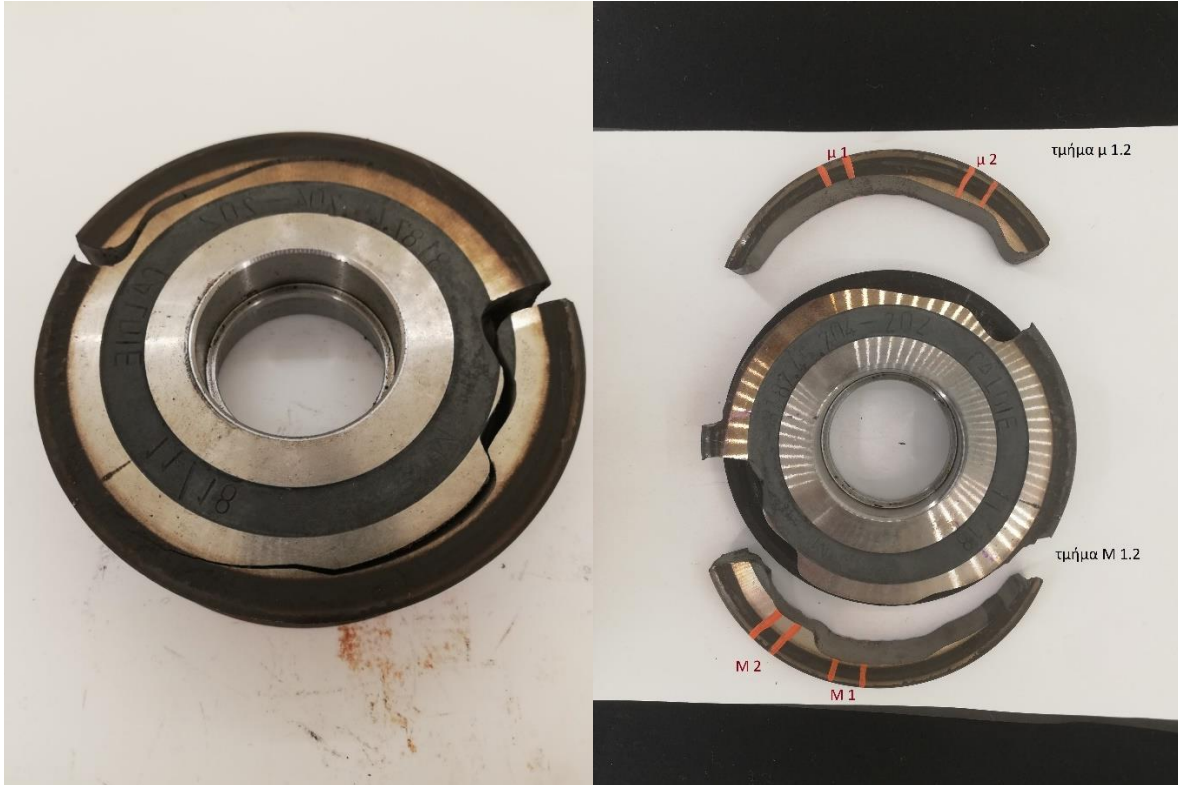
Τέλος αφού κάθε βέργα κοπεί οδηγείται πλέον σε ένα ειδικό "κρεβάτι" το οποίο τοποθετεί τις βέργες σε συστοιχίες οι οποίες είναι 4 × 4 (σειρές × στήλες).Απο εκεί η συστοιχία μεταφέρεται στη δεματοποίηση όπου και δένονται μεταξύ τους με μεταλλικά τσέρκια και πλέον με γερανό μεταφέρονται στις αποθήκες.



Εικόνα 60 Δεματοποίηση και αποθήκευση

5.3 Οπτικός έλεγχος

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E-1188 πραγματοποιείται φωτογραφική αποτύπωση του ράουλου από χάλυβα Uddeholm CALDIE με αρ. 3187.4.204-202 11/18 προς εξέταση σε photobox και στη συνέχεια θα γίνει και πιο ειδική αποτύπωση σε άλλο εξοπλισμό



Εικόνα 61 Δοκίμιο CALDIE όψη Α
ανάλυση

Εικόνα 62 Τμήματα προς κατεργασία για μεταλογραφική
ανάλυση

Διαπιστώνεται ότι στο δοκίμιο έχουν παρουσιαστεί δυο ζώνες, οι οποίες είναι αντιδιαμετρικές και συνεχείς. Υπάρχει μια αποκόλληση της επιφάνειας η οποία φαίνεται ότι συγκρατείται μόνο στην άκρη. Επίσης παρατηρείται έντονη χρωματική διαφοροποίηση λόγω ανάπτυξης θερμοκρασίας απο την εξωτερική επιφάνεια προς το κέντρο του ράουλου.



TEMPERATURE GUIDE



Εικόνα 63 Δοκίμιο CALDIE όψη Α εστίαση στο τμήμα συγκράτησης Εικόνα 64 Χρωματισμός και συσχέτιση με τη θερμοκρασία [8] (Hamilton)

Στην παραπάνω εικόνα διαπιστώνουμε πόσο μικρή επιφάνεια μένει για να συγκρατήσει το κομμάτι όπως επίσης και τη θερμοκρασία λειτουργίας του ραουλου, η οποία φαίνεται να αποτελείται από δύο ζώνες. Κόντα στην επιφάνεια η οποία φέρει σκούρο καφέ χρώμα, ενώ προς το κέντρο γίνεται χρυσό καφέ. Βάσει της εικόνας 64 φαίνεται ότι η θερμοκρασία είναι από 480 – 500F δηλαδή 248.8-260 °C προς τη μέση ενώ στην επιφάνεια είναι κοντά στους 1100 F δηλαδή περίπου 593 °C.



Εικόνα 65 Όψη Β επιφάνεια επαφής δοκιμίου με το υλικό προς διαμόρφωση Εικόνα 66 Σύγκριση με τεμαχισμένο αδούλευτο ράουλο



Εικόνα 67 Ρηγμάτωση που ξεκινάει απο τη σχισμή μέσα και μεταφέρεται προς την επιφάνεια

Η επιφάνεια του ράουλου έχει αρκετά σημάδια οξείδωσης όπως επίσης παρατηρείται ανομοιογενής φθορά από έξω προς το κέντρο της επιφάνειας του ράουλου σε σχέση με το ράουλο συγκόλλησης που δεν έχει υποστεί φθορά λόγω χρήσης (εικόνες 65 & 66). Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει μια ρηγμάτωση η οποία ξεκινάει από τη σχισμή και μεταφέρεται προς τα πάνω στην επιφάνεια και από εκεί, στην εξωτερική πλευρά του ράουλου η ρωγμή μεταφέρεται προς τα κάτω, στρίβει σε ένα ύψος και μετά διαδίδεται για μερικά χιλιοστά και σταματά (εικόνες 67 & 68), αυτό οφείλεται λόγω του ότι το κάτω τμήμα του ράουλου όπου φαίνεται ότι στρίβει η ρωγμή λόγω συμπαγούς μάζας της γεωμετρίας του, υπάρχει μεγαλύτερη αντοχή στη συστολή-διαστολή σε σχέση με την επιφάνεια του ράουλου όπου έχει μικρότερη. Αξίζει να αναφερθεί ότι το ύψος στο οποίο φαίνεται να στρίβει η ρωγμή είναι το αντίστοιχο βάθος στη σχισμή όπου αρχίζει το επίπεδο τμήμα, μετά την ακτίνα καμπυλότητας.



Εικόνα 68 Συνέχεια διάδοσης της ρωγμής και μεταφορά της στην εξωτερική επιφάνεια του ράουλου όπου σταματάει

Στο ράουλο εμφανίζονται ρηγματώσεις στην επιφάνεια. Οι ρηγματώσεις οφείλονται στην εναλλαγή κύκλων ψύξης-θέρμανσης λόγω της ύπαρξης του γαλακτώματος σαπουνελαίου που μεταφέρεται προς το ράουλο συγκόλλησης πάνω στο διαμορφωμένο κοιλοδοκό όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 69 παρακάτω. Το ράουλο το οποίο βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία υφίσταται θερμική κόπωση λόγω της εναλλαγής των κύκλων ψύξης – θέρμανσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρηγματώσεις στην επιφάνεια.

Επίσης, η ύπαρξη της κακώς κατεργασμένης επιφάνειας της εσωτερικής σχισμής οδηγεί στο γεγονός να δημιουργούνται ρηγματώσεις στο κέντρο της σχισμής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι επιφάνειες θραύσης να εμφανίζουν ουσιαστικά το ίδιο μοτίβο που είναι από το κέντρο του ράουλου και διαδίδονται δεξιόστροφα. Επίσης, παρατηρείται ότι οι ρηγματώσεις είναι συνεχόμενες και αντιδιαμετρικές.



Εικόνα 69 Ρηγματώσεις επιφάνειας λόγω θερμικής κόπωσης θράυσης

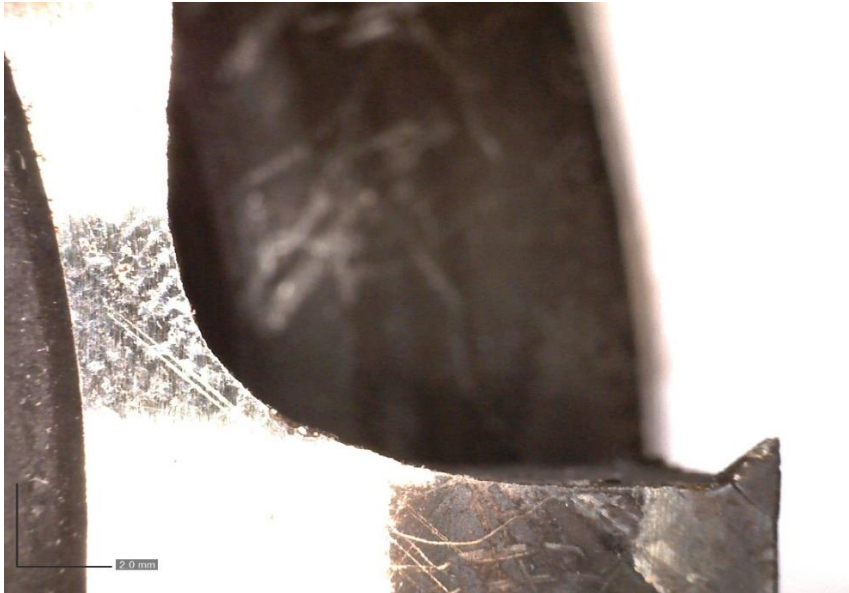


Εικόνα 70 Διάδοση ρηγματώσης και επιφάνεια θράυσης

5.4 Έλεγχος σε στερεοσκόπιο

Πραγματοποιείται έλεγχος σε στερεοσκόπιο για το ράουλο προκειμένου να παρατηρηθούν καλύτερα οι επιφάνειες προς εξέταση. Το στερεοσκόπιο που χρησιμοποιείται είναι το DINOLITE PRO 2 του εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στα σημεία έναρξης θραύσης, η επιφάνεια του ράουλου παρατηρείται να έχει ινώδεις ζώνες οι οποίες συνδέονται με το σημείο έναρξης της θραύσης.



Εικόνα 71 Ράουλο CALDIE πλευρά τελικής αποκόλλησης "μ 1.2", μεγέθυνση X20

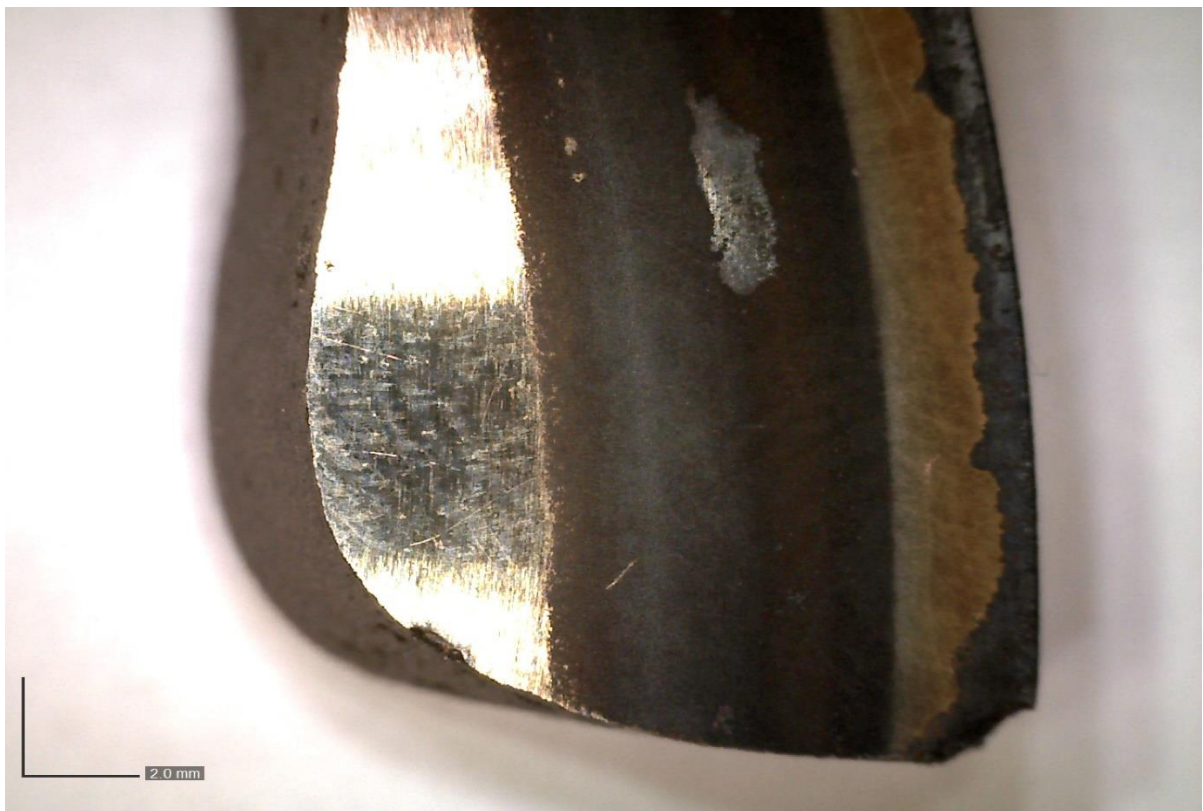


Εικόνα 72 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "M 1. 2", μεγέθυνση X20 ινώδεις ζώνες

Παρατηρείται ότι η επηρεασμένη ζώνη έχει ένα σκούρο καφέ χρώμα το οποίο υποδηλώνει θερμοκρασίες λειτουργίας γύρω στους 593 °C στην επιφάνεια του ράουλου (εικόνες 73 & 74)



Εικόνα 73 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "μ1.2", μεγέθυνση X20 οξειδώσεις επιφανείας



Εικόνα 74 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "μ1.2", μεγέθυνση X20

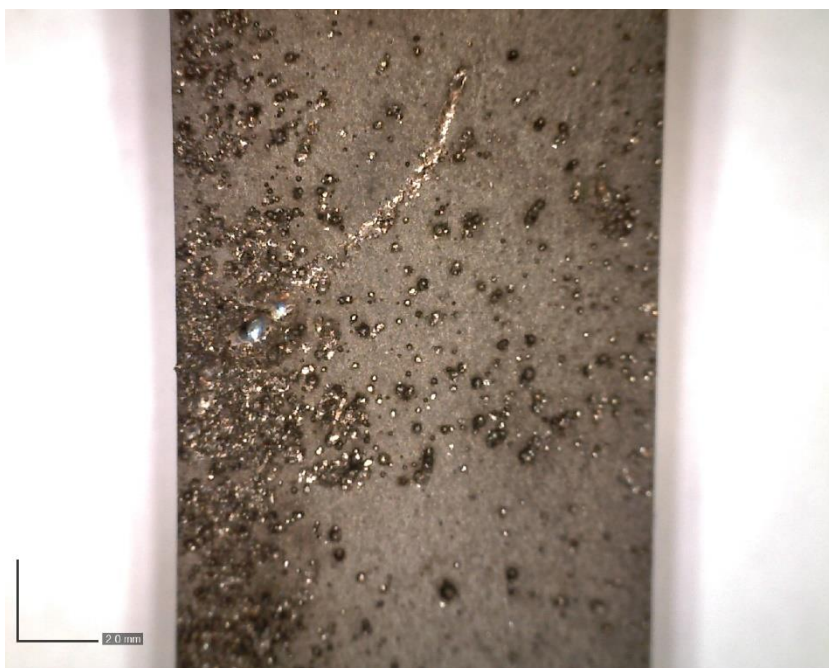
Η επιφάνεια θράυσης πάνω στο ράουλο φαίνεται να έχει πέρα από τις ινώδεις ζώνες και ζώνες που είναι απόλυτα ψαθυρές.



Εικόνα 75 Ράουλο CALDIE μερία αποκόλλησης "μ1.2", μεγέθυνση X20



Εικόνα 76 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "μ1.2", μεγέθυνση X20, ψαθυρή επιφάνεια θραύσης



Εικόνα 77 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "μ 1.2", μεγέθυνση X20



Εικόνα 78 Ράουλο CALDIE τμήμα αποκόλλησης "μ 1.2", μεγέθυνση X40

Οι εικόνες 77 και 78 αναπαριστούν μικρο-εκκενώσεις (micro-arc) οι οποίες εμφανίζονται όταν οι επιφάνειες θραύσης έρχονται σε επαφή. Αυτό εμφανίζεται μετά την αστοχία και δεν σχετίζεται με την εμφάνιση της αστοχίας, απλώς αξιοποιούνται για τον εντοπισμό των σημείων έναρξης της θραύσης.

Το τμήμα "Μ 1.2" παρουσιάζει τις ίδιες ομοιογένειες τόσο στην εξωτερική επιφάνεια όσο και στην επιφάνεια θραύσης.



Εικόνα 79 Τμήμα αποκόλλησης "Μ 1.2", μεγέθυνση Χ20, Εικόνα 80 Θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, ινώδης περιοχή



Εικόνα 81 Τμήμα "Μ1.2", ψαθυρή ζώνη (επιφάνεια θραύσης)

Εικόνα 82 Τμήμα "Μ 1.2", μικροεκκενώσεις - microarc

Στις εικόνες 83 & 84 παρατηρείται η διάδοση της ρωγμής από το εσωτερικό της σχισμής προς την επιφάνεια όπως παρατηρήθηκε και κατά τον οπτικό έλεγχο μέσω του photobox.



Εικόνα 83 Ρηγμάτωση στο κέντρο εσωτερικά



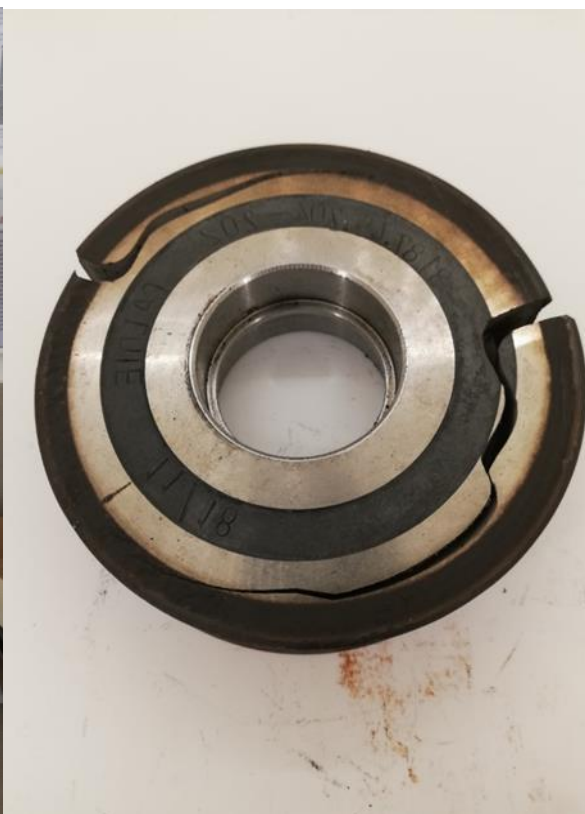
Εικόνα 84 Συνέχεια της ρωγμής στην επιφάνεια

5.4 Μέτρηση σκληρότητας

Στη πειραματική διαδικασία της εργασίας πραγματοποιήθηκε μετρήση της σκληρότητας στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Η μέτρηση της σκληρότητας γίνεται στο όργανο INNOVATEST 600 SERIES , model 600 A. Η μέτρηση της σκληρότητας γίνεται σε κλίμακα HRC (Hardness Rockwell C). Οι μετρήσεις γίνονται στην εξωτερική επιφάνεια του ράουλου.



Εικόνα 85 Σκληρομέτρηση ράουλου CALDIE



Εικόνα 86 Επιφάνεια σκληρομέτρησης

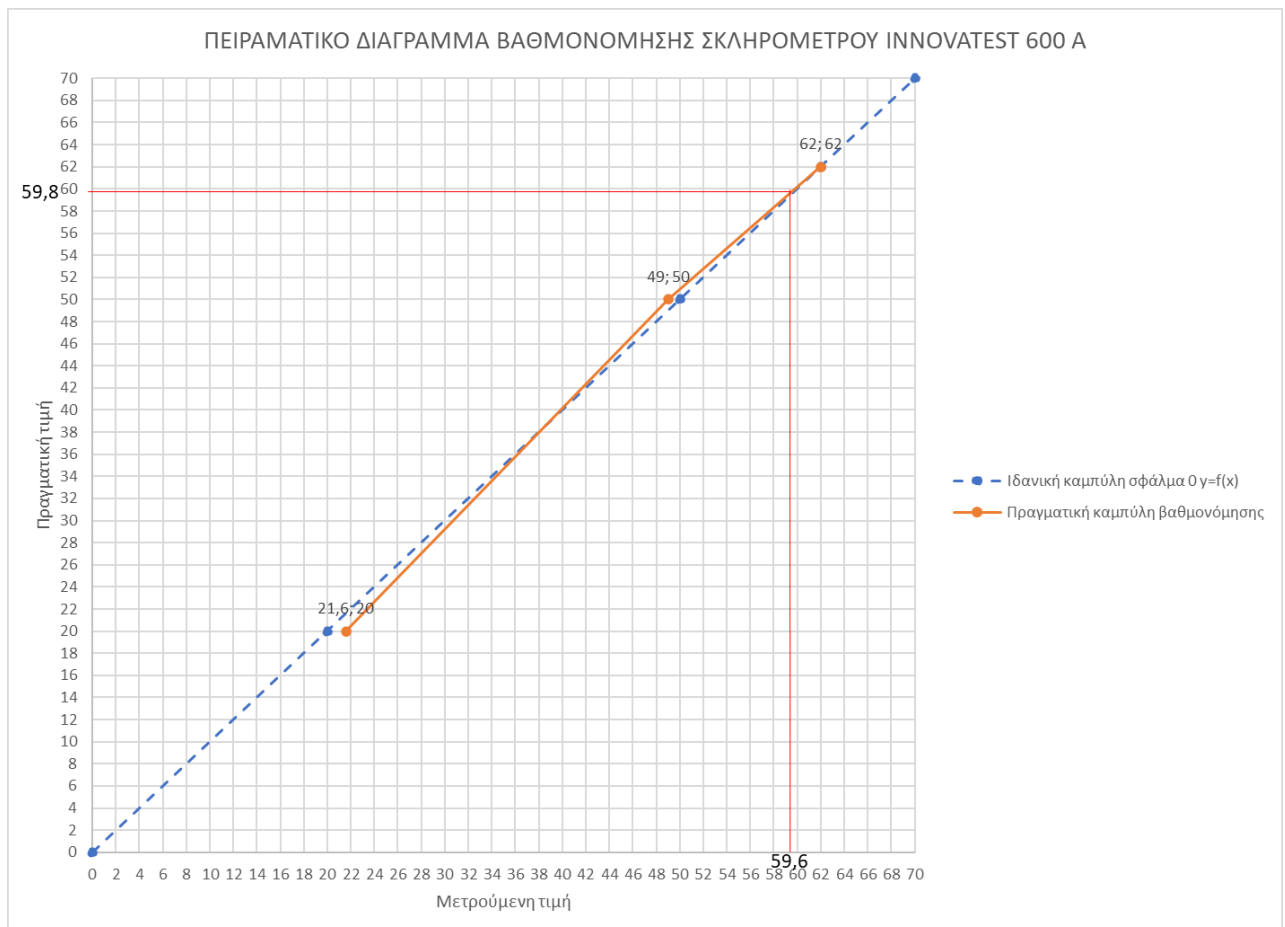
πρότυπο (HRC)	δοκίμιο	Ένδειξη 1	Ένδειξη 2	Ένδειξη 3	Ένδειξη 4	Ένδειξη 5	Μέση τιμή
	ΔΟΚΙΜΙΟ 1ο 23,8	21	22	22	22	21	21,6
	ΔΟΚΙΜΙΟ 2ο 49	49	49	49	49	49	49
	ΔΟΚΙΜΙΟ 3ο 63,2	62	62	62	62	62	62
	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΙΜΗ ΡΑΟΥΛΟ CALDIE	60	60	60	59	59	59,6

Πίνακας 3 Μετρήσεις σκληρομέτρησης κατά την επαλήθευση του σκληρομέτρου.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΡΘΟΤΗΤΑΣ (E)	Μέγιστο σφάλμα E	Μέγιστο σφάλμα Ε Όρια τιμών	Επαναληψιμότητα R	Επαναληψιμότητα R Όρια τιμών
ΔΟΚΙΜΙΟ 1ο 20-30 HRC	-2,2	±1	1	±2,0
ΔΟΚΙΜΙΟ 2ο 35-55 HRC	0	±1	0	±1,5
ΔΟΚΙΜΙΟ 3ο 60-65 HRC	-1,2	±0.5	0	±1,0

Πίνακας 3 Έλεγχος ορθότητας (E) σκληρομέτρου

Βάση του προτύπου ASTM E18-08b , διαπιστώνεται ότι το σκληρόμετρο έχει επαναληψιμότητα R μέσα στα αποδεκτά όρια όμως το μέγιστο σφάλμα έχει απόκλιση,για το λόγο αυτό, χαράσσεται καμπύλη βαθμονόμησης για τη διόρθωση της μετρούμενης τιμής



Γράφημα 1 Καμπύλη βαθμονόμησης σκληρομέτρου

Η μέση σκληρότητα υπολογίζεται στα 59.8 Rockwell C ενώ ο κατασκευαστής Uddeholm του χάλυβα στο τεχνικό φυλλάδιο ορίζει τη μέγιστη σκληρότητα του ράουλου στα 62 Rockwell C.

5.4 Χημική ανάλυση

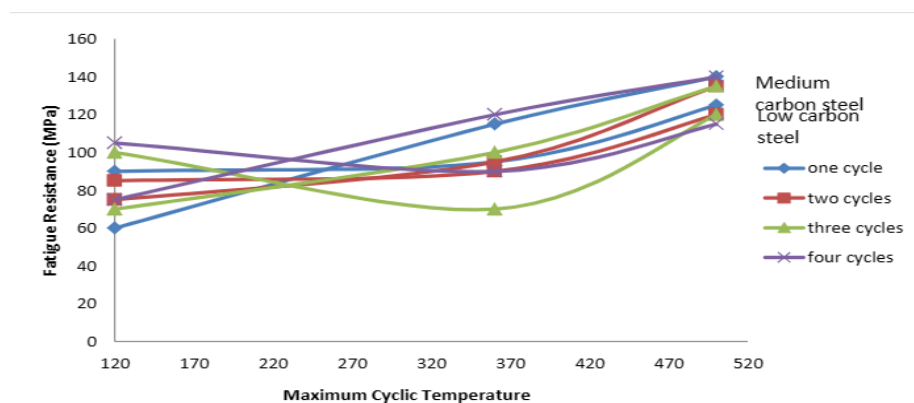
Διενεργήθηκε χημική ανάλυση στο ράουλο κατασκευασμένο από Uddeholm Caldie και επιβεβαιώθηκε η χημική σύσταση του.

Στοιχείο	ποσοστό %	Στοιχείο	ποσοστό %
C	0,7	Cr	5
Si	0,2	Mo	2,3
Mn	0,5	V	0,5

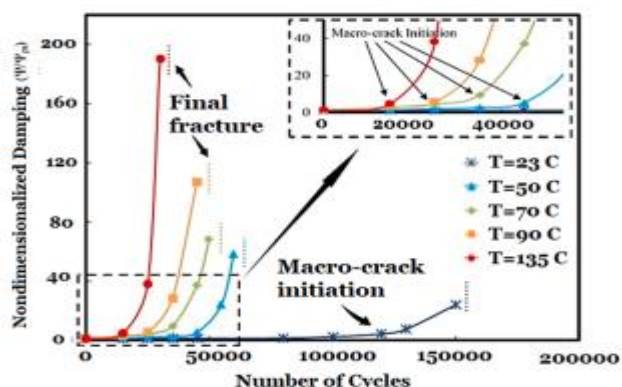
Πίνακας 4 Χημική σύσταση ράουλου CALDIE [21] (Uddeholm)

Όπως φαίνεται και παρακάτω, το ράουλο έχει υψηλό ποσοστό συγκέντρωσης σε άνθρακα που σημαίνει ότι το ράουλο καθιστάται λιγότερο δύσθραυστο όπως επίσης συνδέεται με την ύπαρξη αυξημένου ποσοστού καρβιδίων το οποίο θα μελετηθεί σε επόμενο στάδιο της ανάλυσης αστοχίας κατά το μικροσκοπικό έλεγχο.

Σε δυο επιστημονικές έρευνες για ένα χάλυβα ο οποίος έχει μέση περιεκτικότητα σε άνθρακα (medium carbon steel) $C=0.2790\%$ διαπιστώθηκε ότι η αντοχή σε θερμική κόπωση είναι αρκετά αυξημένη και πως ενδείκνυται για εφαρμογές σε υψηλες θερμοκρασίες (Osarumwense, 2013). Από την άλλη πλευρά σε ένα χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (high carbon steel) $C=0.83\%$ διαπιστώνεται ότι είναι πιο πιθανό με την αύξηση της θερμοκρασίας να ενισχυθεί η διάδοση των μικρορωγμών σε σχέση με τους κύκλους θερμικής κόπωσης (Jirandehi, 2022), Γράφιμα 2.



Γράφιμα 2. Αντίσταση σε θερμική κόπωση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για χάλυβα μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα [14]



Γράφιμα 3. Εμφάνιση μικρορηγματώσεων σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης για ένα χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα [10]

6. Καταστροφικός έλεγχος των ράουλων

Ο καταστροφικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ο έλεγχος αυτός περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες είναι ο τεμαχισμός των δοκιμών σε μικρότερα τεμάχια για να μπορέσουν να εγκιβωτιστούν σε ειδική ρητίνη και έτσι να προχωρήσουν τα δοκίμια στη λείανση και κατόπιν να σιλιβωθούν. Μετά το σίλιβωση, η επόμενη διαδικασία που ακολουθείται μέσα στα πλαίσια της θραυστογραφικής ανάλυσης είναι η χημική προσβολή που συνοδεύεται με μικροσκοπικό έλεγχο προκειμένου να αποτυπωθεί η μικρόδομή του εξεταζόμενου δοκιμίου και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με το τρόπο αστοχίας του ράουλου.

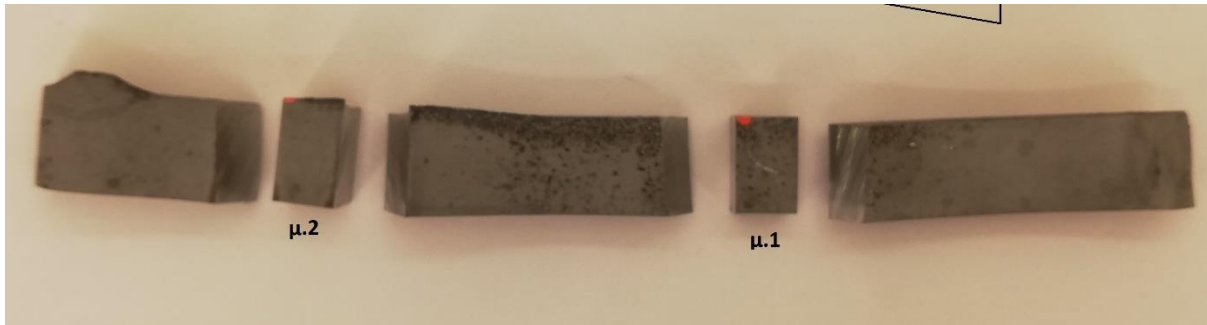
6.1 Κοπή των δειγμάτων

Απο το ράουλο κοπήκαν τέσσερα δοκίμια. Τα δοκίμια τεμαχιστήκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών ενώ ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι κοπτικό πριόνι της Struers Lobotom-3 (type: 05326156 / serial No: 5321698). Το μοτέρ του μικροτόμου είναι της ABB.

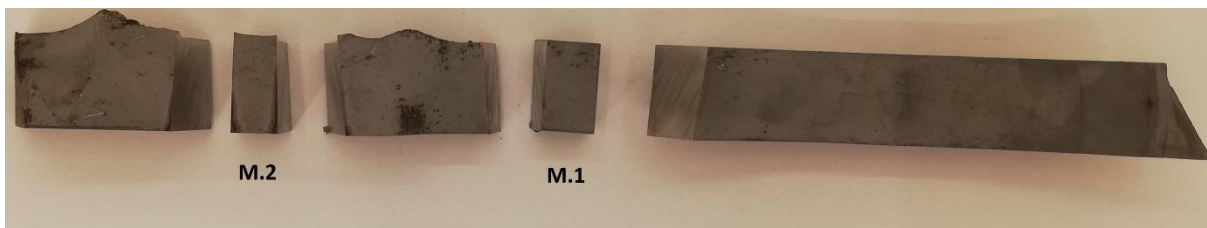


Εικόνα 87 Struers Lobotom-3 (Κοβσένογλου, 2019)

Ο τεμαχισμός γίνεται για τη δημιουργία 4 δοκιμών "μ .1", "μ.2" και "Μ .1" , "Μ .2" που θα εγκιβωτιστούν σε επόμενο στάδιο



Εικόνα 88 .Δοκίμια "μ.1" και "μ.2", ράουλο CALDIE



Εικόνα 89 .Δοκίμια "Μ.1" και "Μ.2", ράουλο CALDIE

6.2 Εγκιβωτισμός δοκιμών

Ο εγκιβωτισμός των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ποιότητας Ελέγχου και Τεχνολογίας Μεταλλικών υλικών. Η διαδικασία γίνεται στο μηχάνημα Struers Citopress - 11. Η διαδικασία γίνεται με τη χρήση ρητίνης δύο υλικών. Το πρώτο είναι το Durofast το οποίο λειτουργεί σαν βάση και το δεύτερο είναι το multifast το οποίο αποτελεί υλικό πλήρωσης. Ο χρόνος θέρμανσης είναι στα 180 sec όπου ασκείται και πίεση 250 bar. Μετά τα λιώσιμο της ρητίνης, ακολουθείται απόψυξη με τη χρήση νερού ως ψυκτικό μέσο για 120 sec. Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια έχουν εξωτερική διάμετρο 30 mm και η οποία εξυπηρετεί για τη τοποθέτηση σε βάση με πολλαπλές οπές για την κατεργασία τη λειανσης. Τα δοκίμια έχουν τοποθετηθεί σε ζεύγη και τα εγκιβωτισμένα δοκίμια που φτιάχνονται είναι το "μ .1" , "μ. 2" και το "Μ. 1" , "Μ .2".

6.3 Λείανση δοκιμών

Η λείανση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ποιότητας Ελέγχου και Τεχνολογίας Μεταλλικών υλικών. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι το Buehler Metalserv. Βάσει του προτύπου ASTM , η εφαρμοζόμενη δύναμη δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30 N.

Λειαντικό ντουκόχαρτο	χρόνος t (sec)	περιστροφές (RPM)	πάσο μ1.2	πάσο M1.2
P80	300	120	1	1
P120	300	120	1	1
P180	300	120	1	1
P240	360	120	1	1
P320	420	120	1	1
P600	30	120	6	1
P800	30	120	1	1
P1000	30	120	1	1
P1200	30	120	1	1
P2400	30	120	1	2

Πίνακας 5 Στάδια λείανσης

Σχόλια

- Στο P 600 υπήρξαν 6 πάσα λείανσης διότι στη πλάκα συγκράτησης ο άξονας ήταν παράκεντρος με αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή της δύναμης και έτσι το δοκίμιο μ 1.2 να λειανθεί ανομοιόμορφα, απαιτώντας έτσι πολλά στάδια για να διορθωθεί το σφάλμα.
- Στο P2400 στο δοκίμιο M1.2 υπήρξαν θαμπάδες και για να καθαρίσουν χρειαστήκαν 2 πάσα.
- Η λείανση στο P2400 έγινε στο χέρι σε δεύτερο μηχάνημα , το Presi Mecarol P262 .

6.4 Στίλβωση δοκιμίων

Η διεξαγωγή της στίλβωσης γίνεται στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει 4 πάσα των 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0,25 μm.

- Τα στάδια των 6 μm και των 3 μm γίνονται στο λειαντικό μηχάνημα του εργαστηρίου, Knuth rotor της Struers με S/N 1445569 στις 250 RPM.

Περιγραφή διαδικασίας

Γίνεται χρήση αιωρήματος διαμαντιού με βάση το νερό το οποίο τοποθετείται στη στίλβωτική πλάκα, όπου χρησιμοποιείται μεθανόλη η οποία λειτουργεί σαν ψυκτικό λιπαντικό. Η συνολική διάρκεια κάθε πάσου είναι στα 90 sec. Μετά το πέρας της στίλβωσης κάθε δοκίμιο αποπλένεται με jet νερού και jet μεθανόλης και στεγνώνεται με ζεστό αέρα.

- Τα στάδια των 1 μm και 0,25 μm γίνονται στο μηχάνημα Buehler Metalserv

Περιγραφή διαδικασίας

Γίνεται χρήση αιωρήματος αλουμίνας με βάση το νερό το οποίο τοποθετείται στη στίλβωτική πλάκα, χρησιμοποιείται νερό το οποίο λειτουργεί σαν ψυκτικό λιπαντικό. Η συνολική διάρκεια κάθε πάσου είναι στα 90 sec. Μετά το πέρας της στίλβωσης κάθε δοκίμιο αποπλένεται με jet νερού και jet μεθανόλης και στεγνώνεται με ζεστό αέρα.

6.5 Χημική προσβολή δοκιμίων

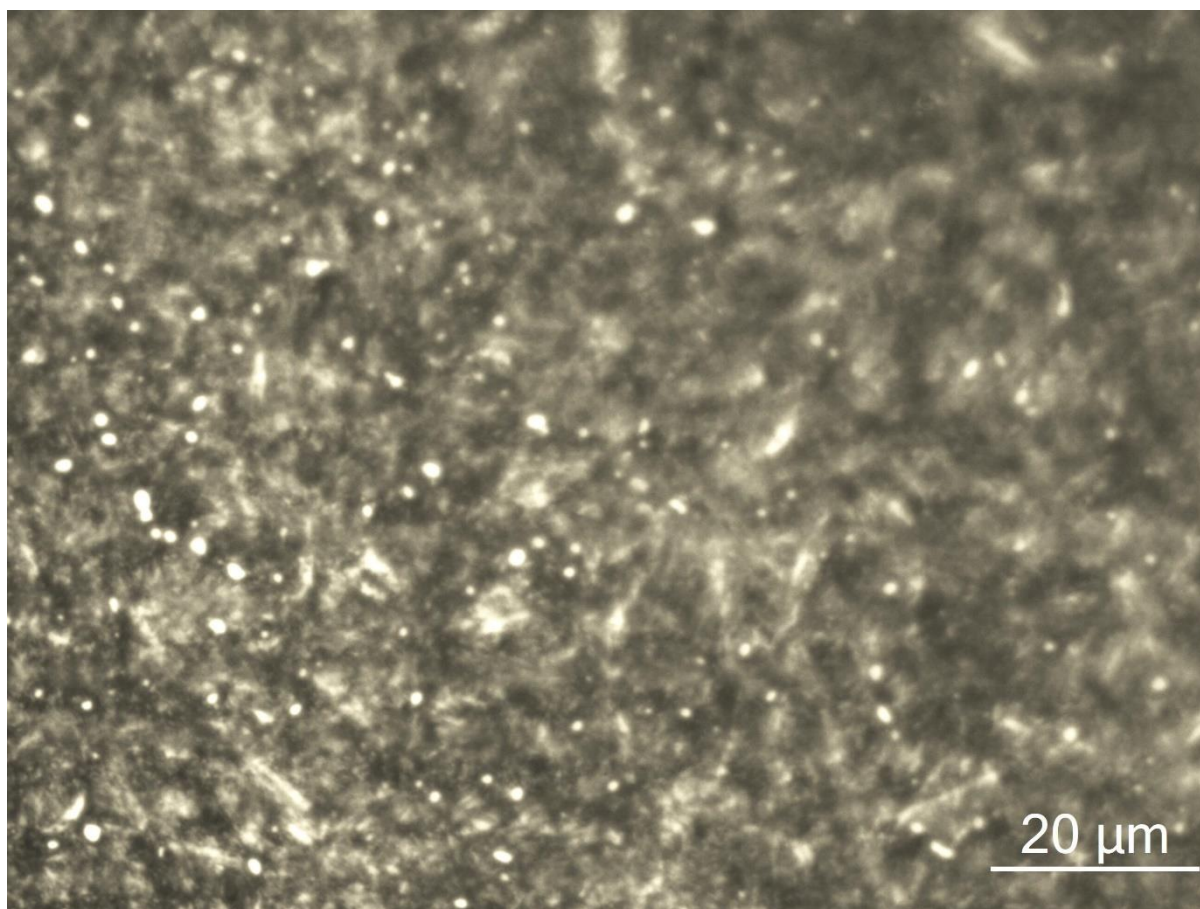
Η χημική προσβολή των δοκιμίων γίνεται στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση διαλύματος Nital 5% (διάλυμα 5 % πυκνού νιτρικού οξέως και 95 % μεθανόλης) στη μια πλευρά των δοκιμίων για περίπου 60 sec. Έπειτα ακολουθεί απόπλυση σε νερό και jet μεθανόλης και στεγνώμα σε ζεστό αέρα . Η διαδικασία εξυπηρετεί στο να υπάρξει ταχεία διαβρωση με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των φάσεων οι οποίες διαβρώνονται με διαφορετικούς ρυθμούς και την απεικονισή τους στο μικροσκόπιο.

6.6 Ανάλυση μικροδομής με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

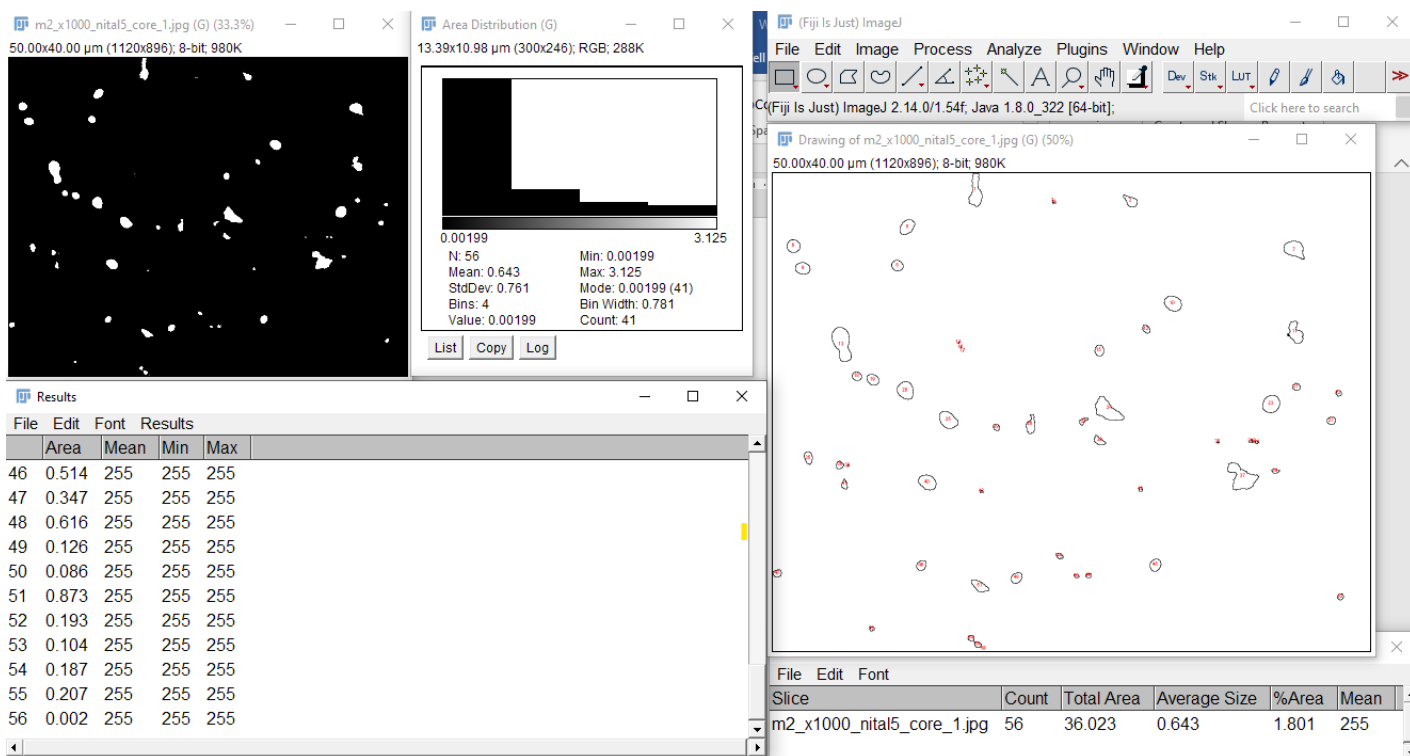
Στα δοκίμια “μ.1” και “μ.2” πραγματοποιήθηκε ανάλυση της μικροδομής ακριβώς μετά τη χημική τους προσβολή.

Διασπιστώνεται ότι η μικροδομή της επιφάνειας αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη και καρβίδια

Για την καταμέτρηση των καρβιδίων αξιοποιείται το πρόγραμμα Fiji. Η καταμέτρηση που προκύπτει από το πρόγραμμα για δοσμένο εμβαδόν στα 2000 μm^2 είναι στα 56 καρβίδια εκ των οποίων όπως φαίνεται και στην εικόνα 90 και στην εικόνα 91. Τα πλατιά καρβίδια με μεγάλο μέγεθος είναι καρβίδια Χρωμίου (Cr) ,τα στρογγυλά αποτελούν καρβίδια Μολυβδαινίου (Mo) ενώ τα πολύ μικρά στρογγυλά είναι καρβίδια Βαναδίου (V).Η ύπαρξη μεγάλης πυκνότητας πρωτογενών καρβιδίων συνδέεται με την έναρξη της θραύσης του εξεταζόμενου δοκιμίου ,επίσης σημαίνει ότι σε περίπτωση εκλογής διαφορετικού τρόπου παραγωγής του χάλυβα, θα αποτελούσε μια ενέργεια ελάττωσης εμφάνισης του ρίσκου να αστοχήσει ένα τέτοιο εξάρτημα. Μια ακόμη επιλογή είναι η εκλογή ενός χάλυβα ο οποίος θα έχει μικρότερο ποσοστό άνθρακα που έτσι σχηματίζονται μικρότερη ποσότητα καρβιδίων καθώς ο άνθρακας αποτελεί τη βάση για το σχηματισμό τους, που σημαίνει ότι με την ύπαρξη λιγότερων καρβιδίων δημιουργείται ένα χάλυβας ο οποίος έχει μεγαλύτερη ολκιμότητα αλλά και μεγαλύτερη αντοχή στη θραύση.



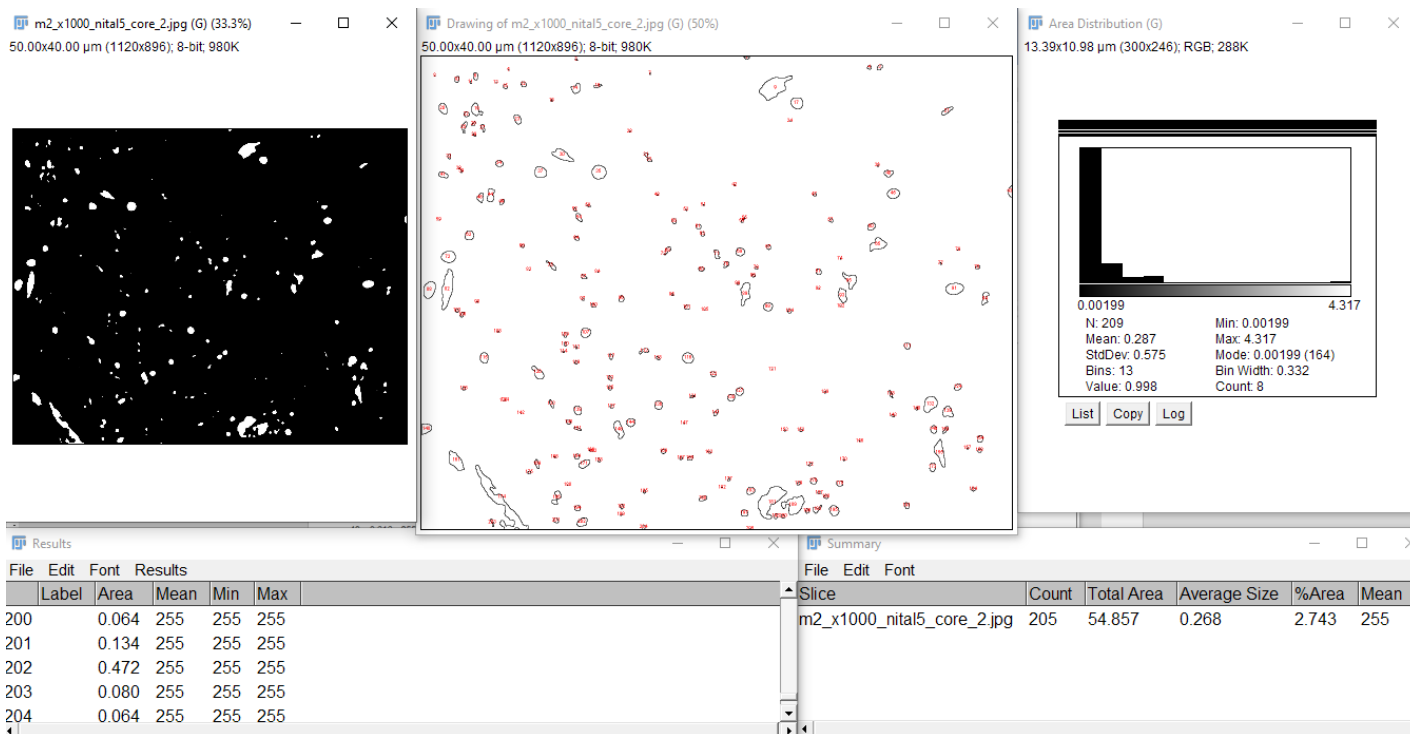
Εικόνα 90. Δοκίμιο “μ. 2” , μεγέθυνση X1000. Ύπαρξη καρβιδίων και επαναφερμένου μαρτενσίτη



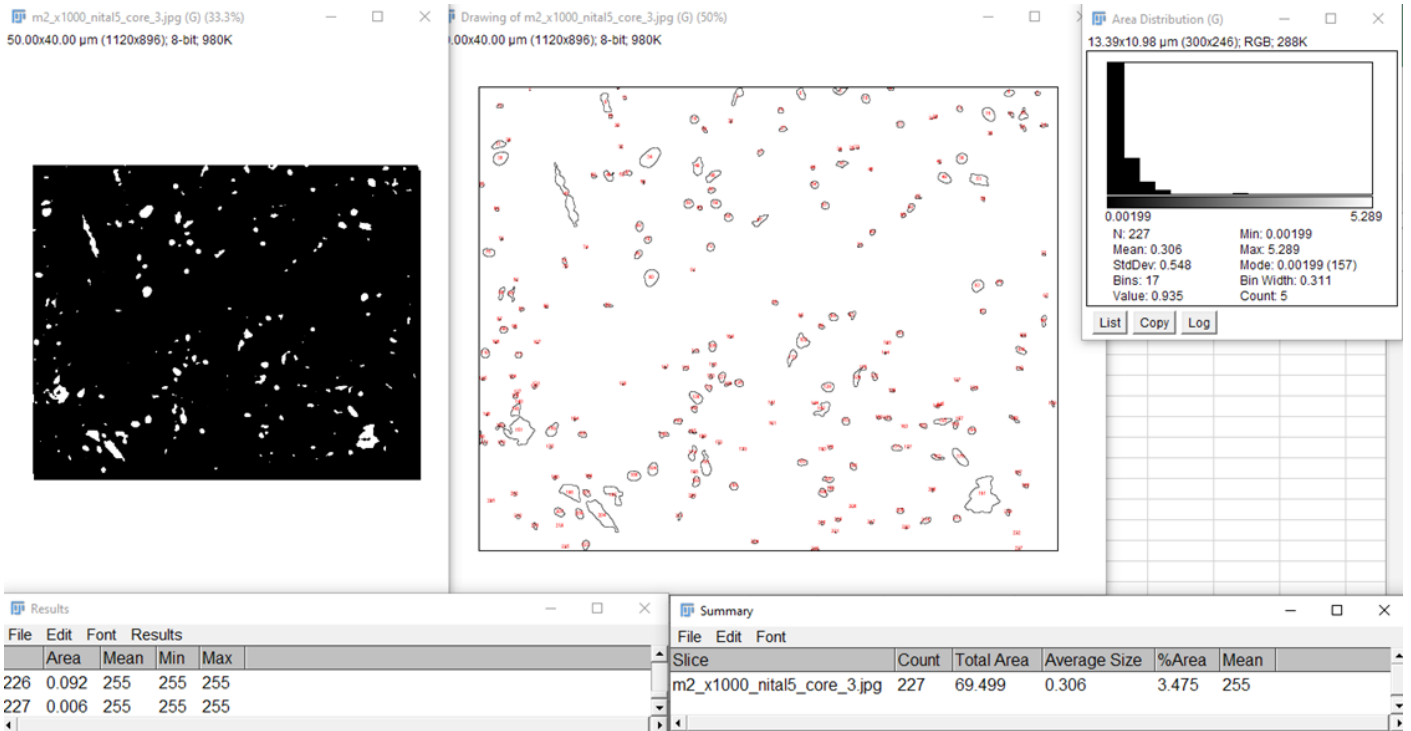
Εικόνα 91 Αποτύπωση τμήματος (50 Χ40 μm) της εικόνας 85 και αποτελέσματα καταμέτρησης καρβιδίων

Παρατηρούμε ότι σε εμβαδόν 2000 μm² υπάρχουν συνολικά 56 καρβίδια εκ των οποίων από το σχήμα τους εκτιμάται ότι τα μεγάλα/ πλατιά είναι καρβίδια χρωμίου, τα στρογγυλά είναι καρβίδια μολυβδαινίου (Mo) και τα πολύ μικρά στρογγυλά είναι καρβίδια βαναδίου (V).

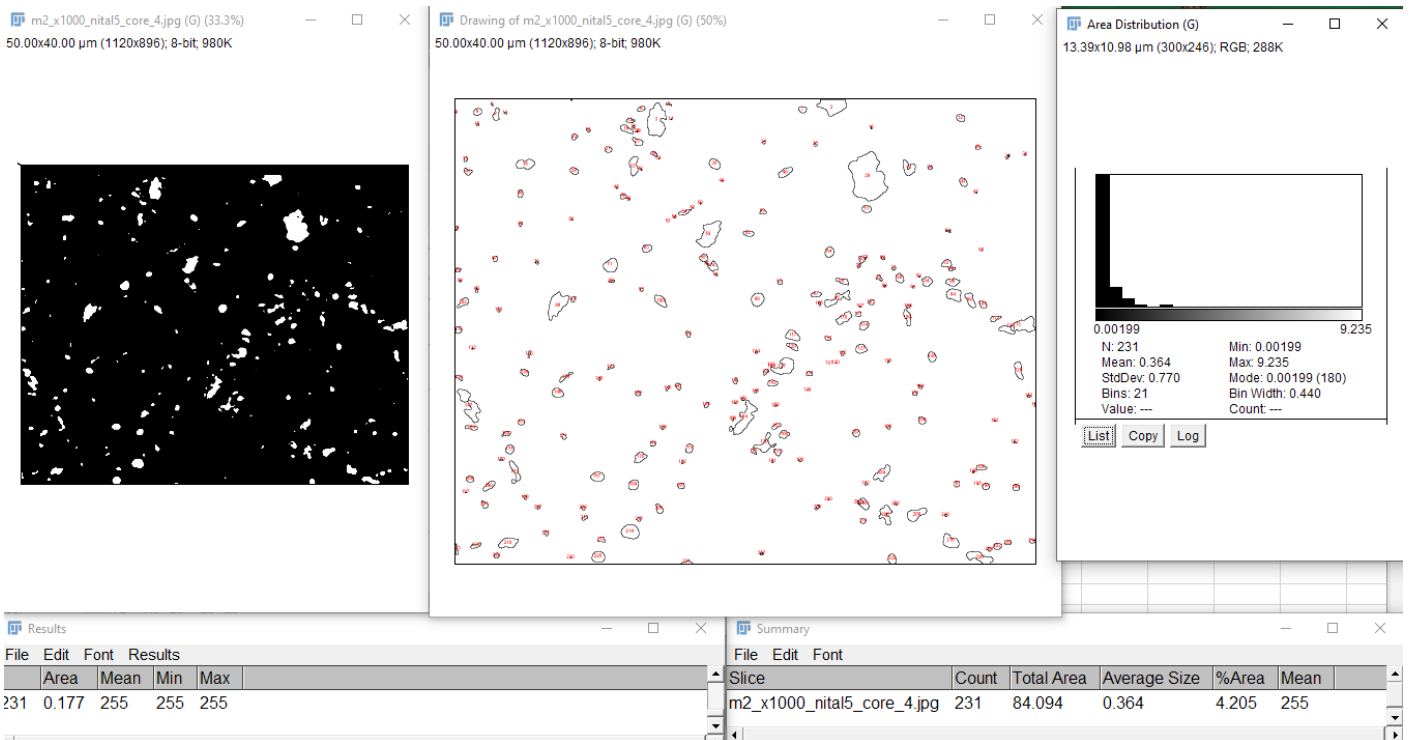
Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες 9 φορές σε ένα σύνολο 10 φωτογραφιών της επιφάνειας για το δοκίμιο μ . 2.



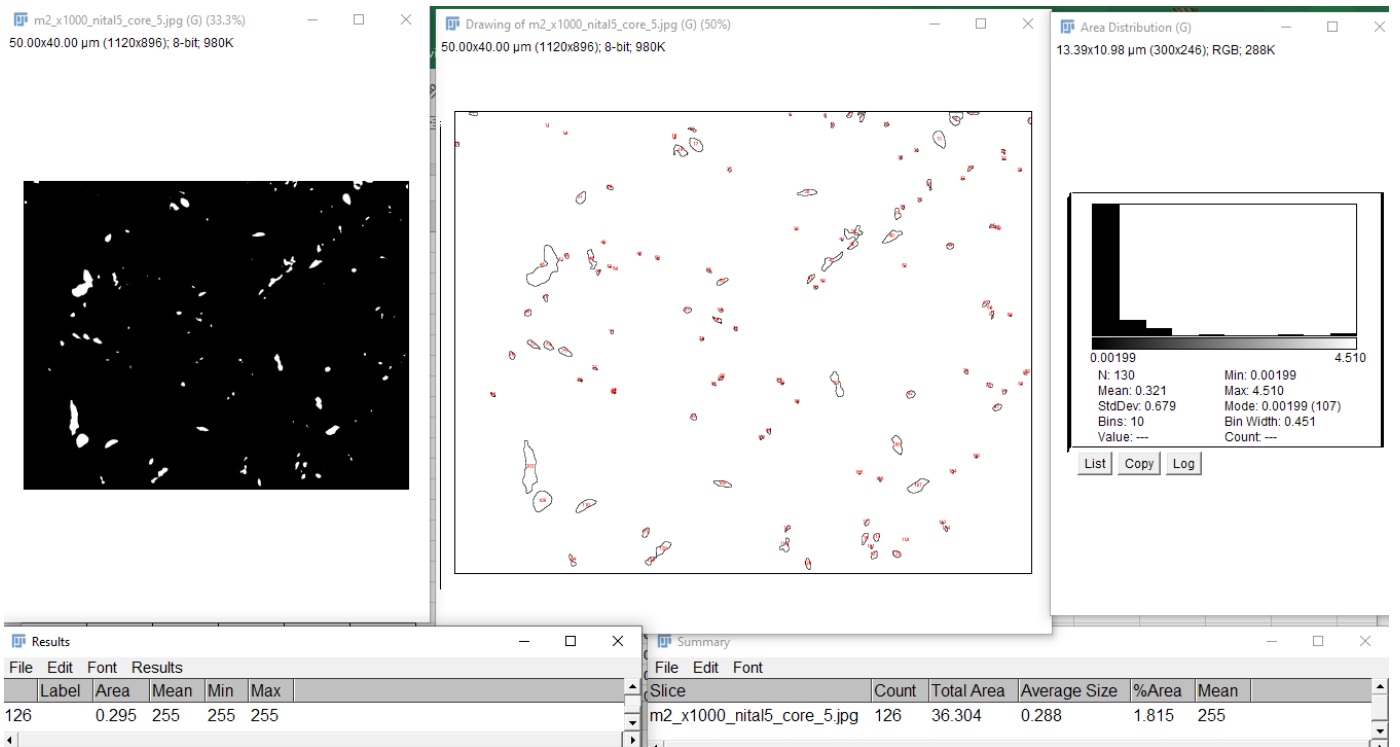
Εικόνα 92 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 205 και συνολικής επιφάνειας 54,857 μm²



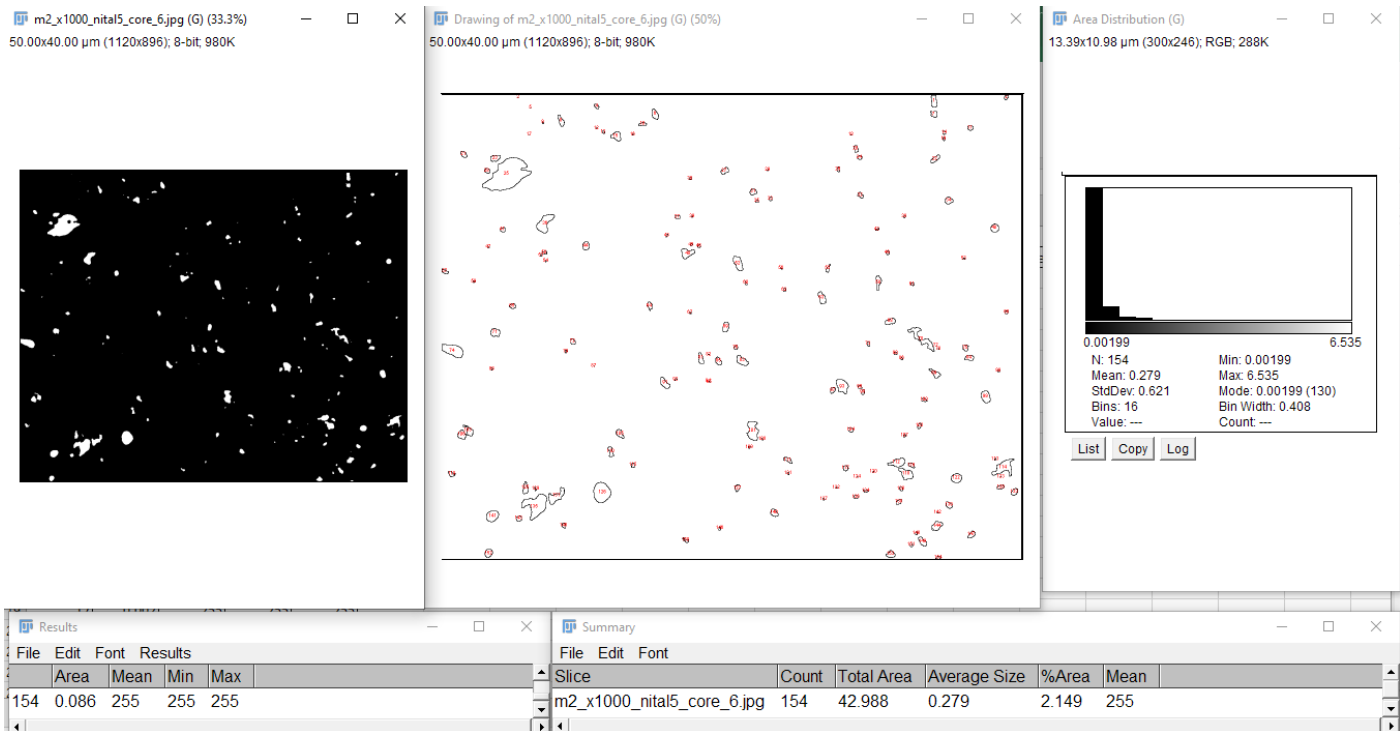
Εικόνα 93 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 327 και συνολικής επιφάνειας 69,499 μm^2



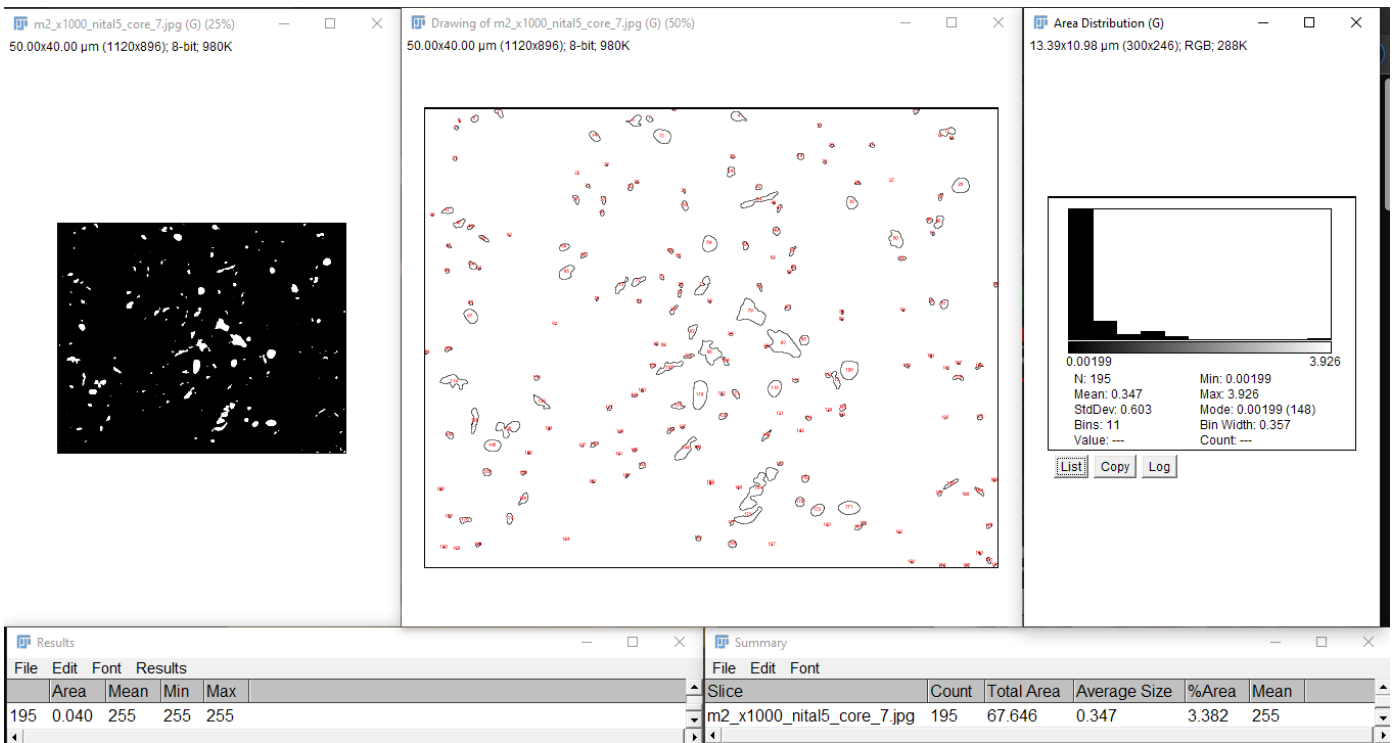
Εικόνα 94 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 231 και συνολικής επιφάνειας 84,094 μm^2



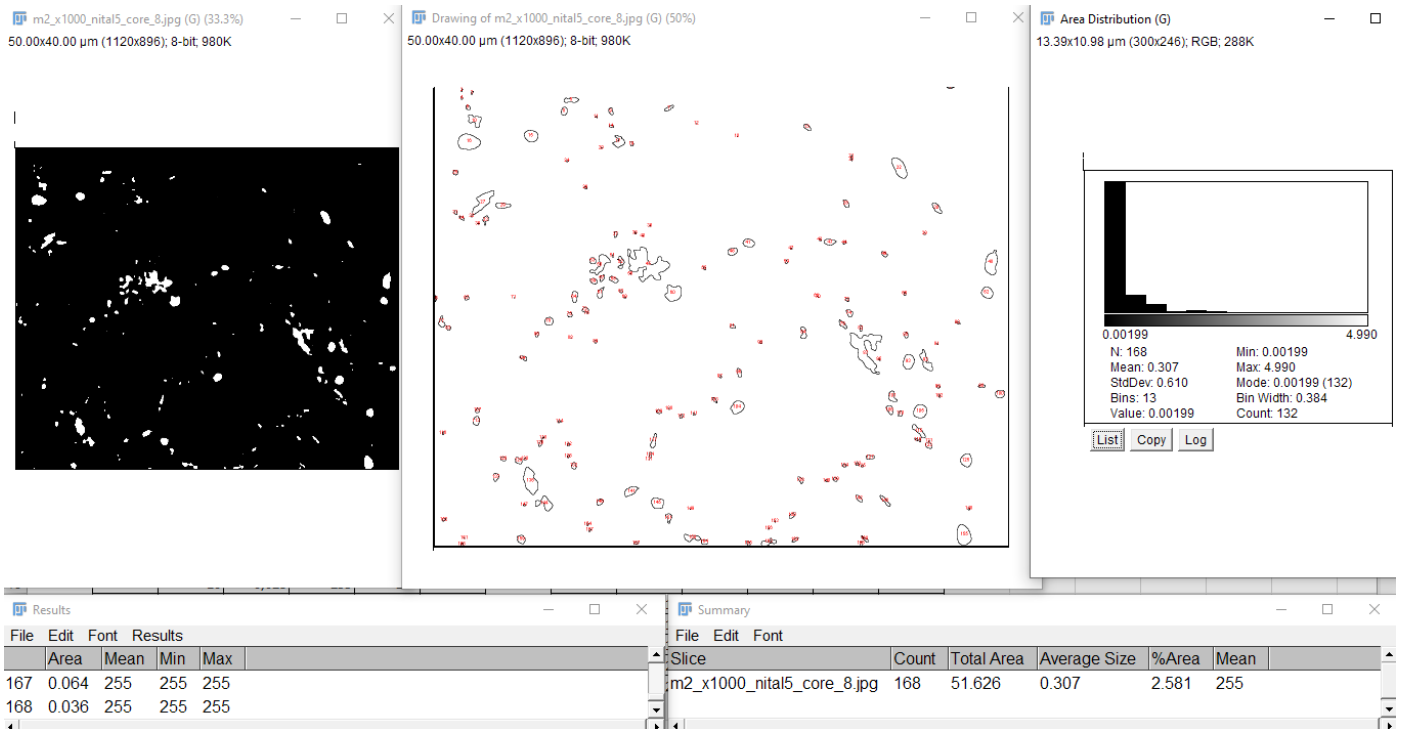
Εικόνα 95 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 126 και συνολικής επιφάνειας 36,304 μm^2



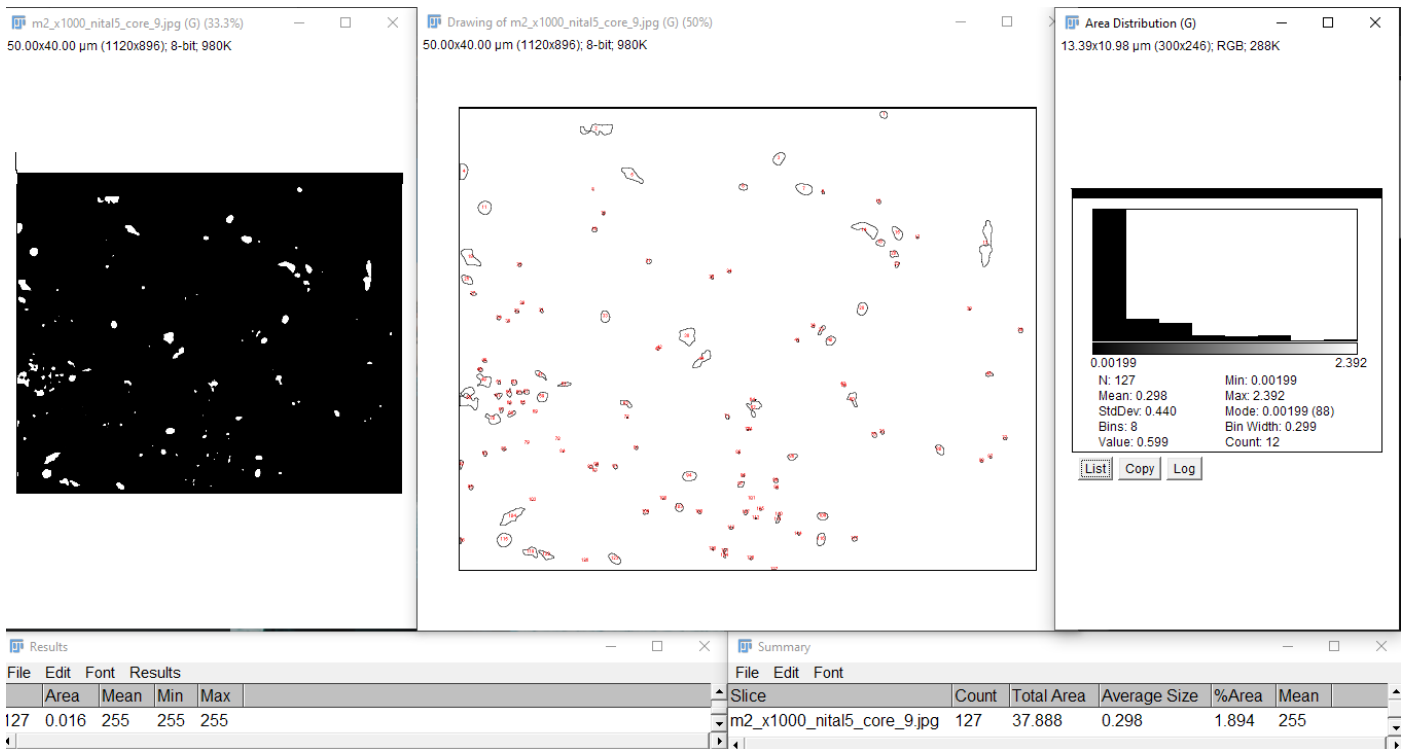
Εικόνα 96 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 154 και συνολικής επιφάνειας 42,988 μm^2



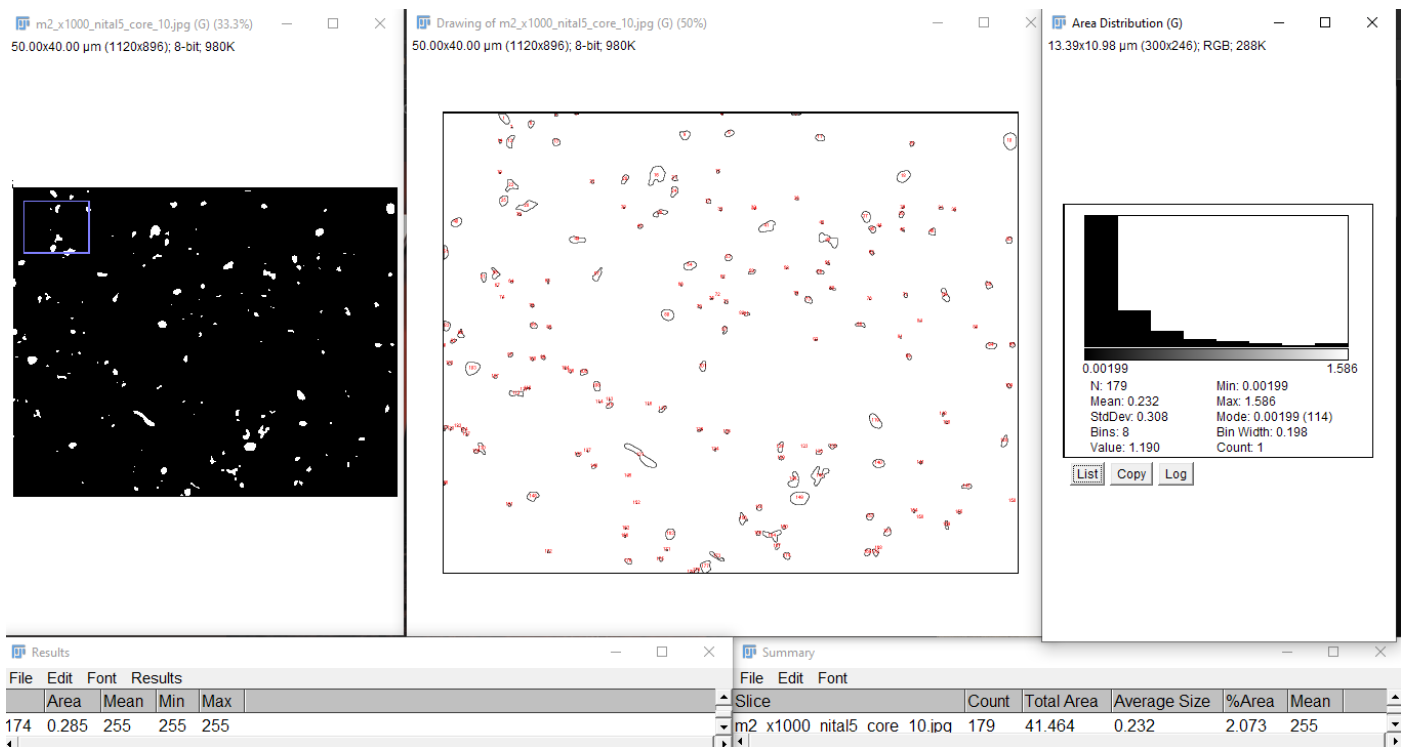
Εικόνα 97 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 195 και συνολικής επιφάνειας 67,646 μm^2



Εικόνα 98 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 168 και συνολικής επιφάνειας 51,626 μm^2

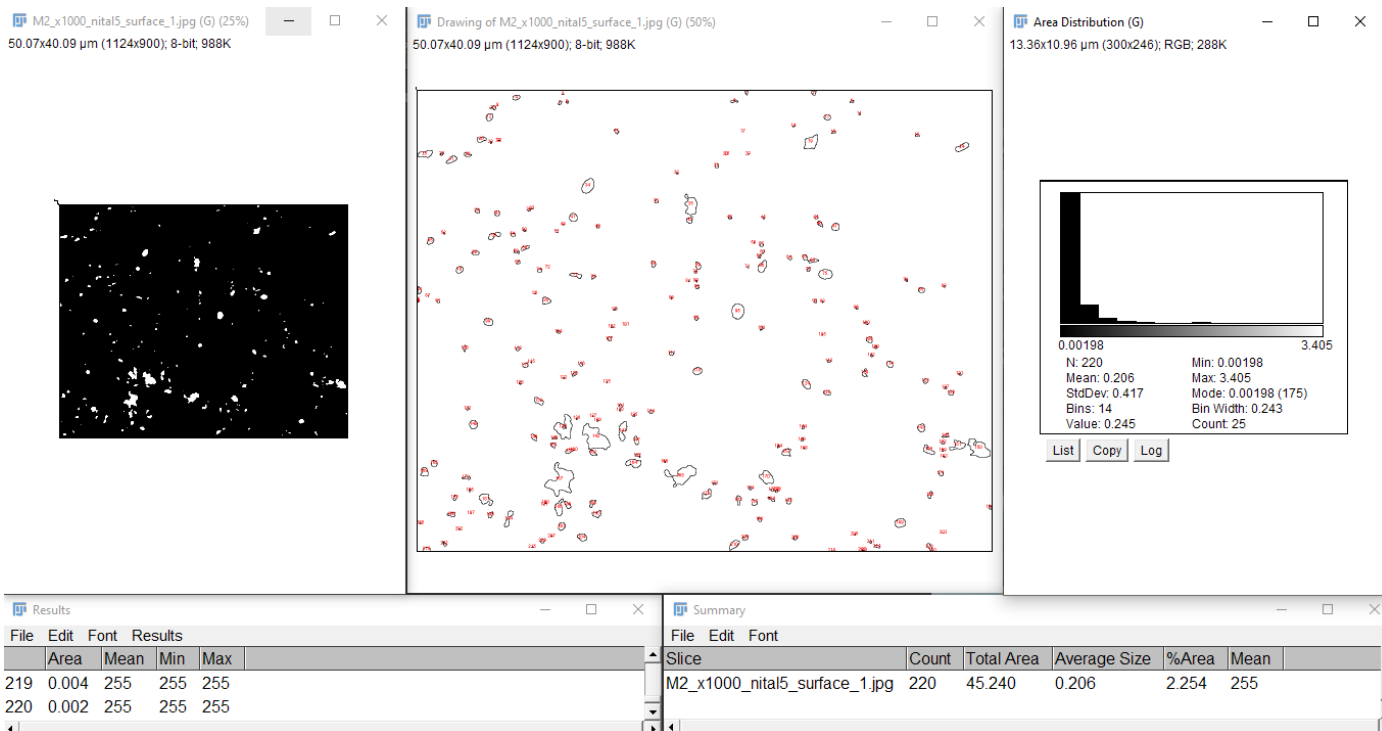


Εικόνα 99 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 127 και συνολικής επιφάνειας 37,888 μm^2

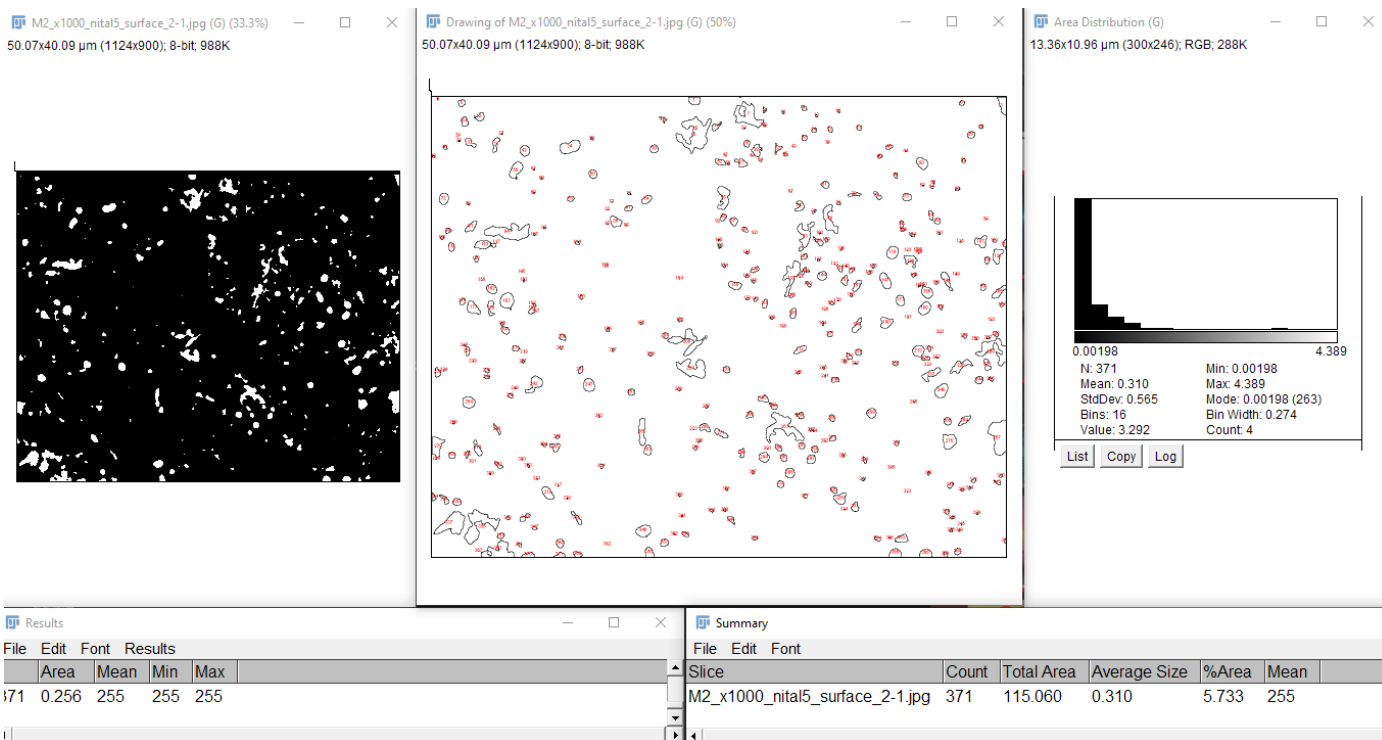


Εικόνα 100 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 179 και συνολικής επιφάνειας 41,464 μm^2

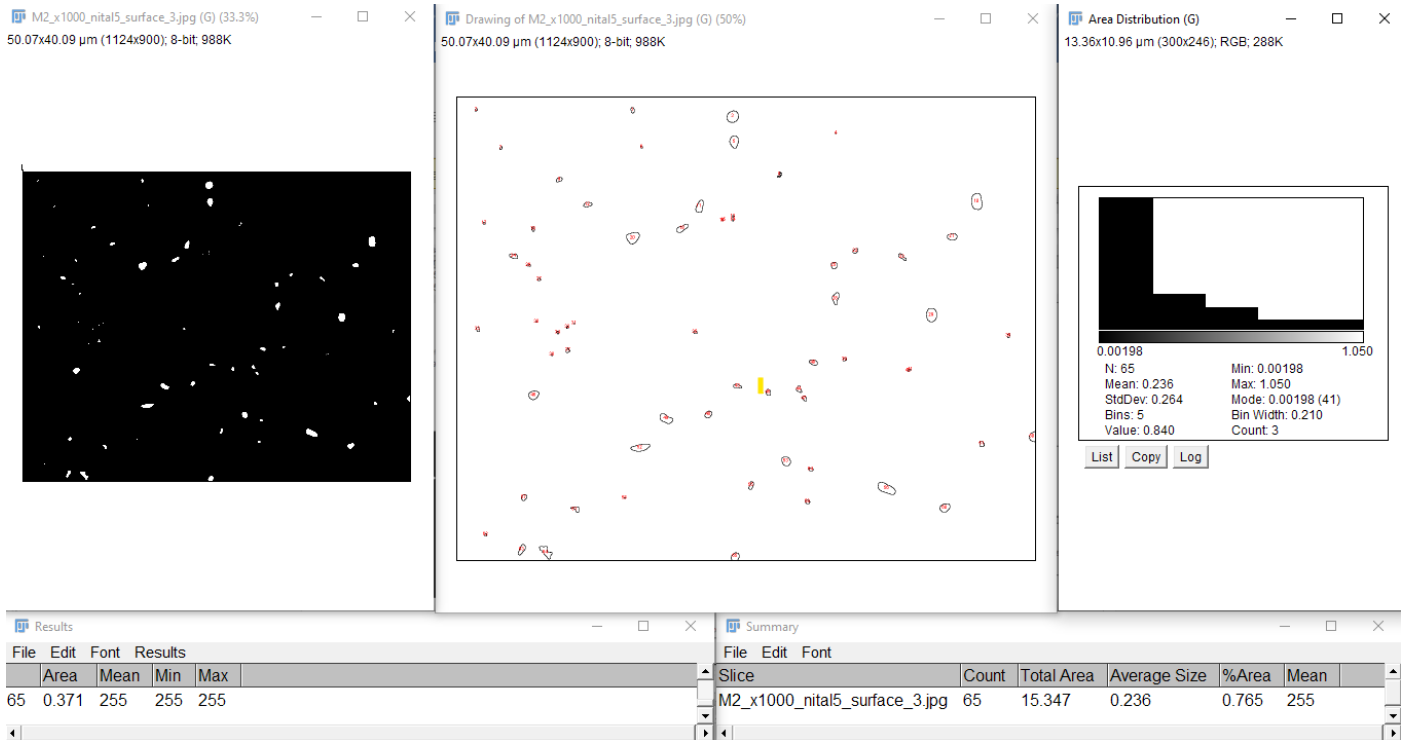
Επαναλαμβάνουμε τη καταμέτρηση των καρβιδίων και για το δοκίμιο M . 2 για να συγκρίνουμε τα δεδομένα 0,με το μ . 2



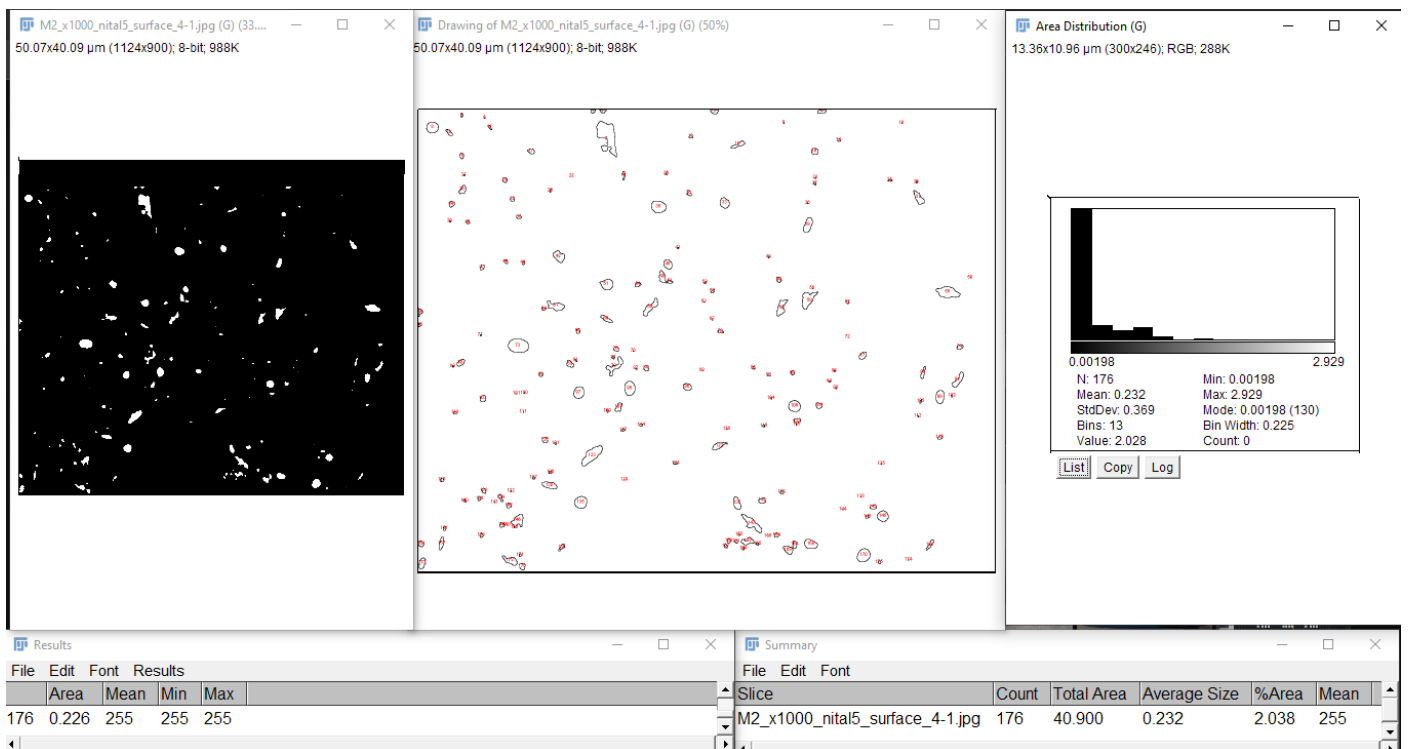
Εικόνα 101 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 220 και συνολικής επιφάνειας 45,240 μm^2



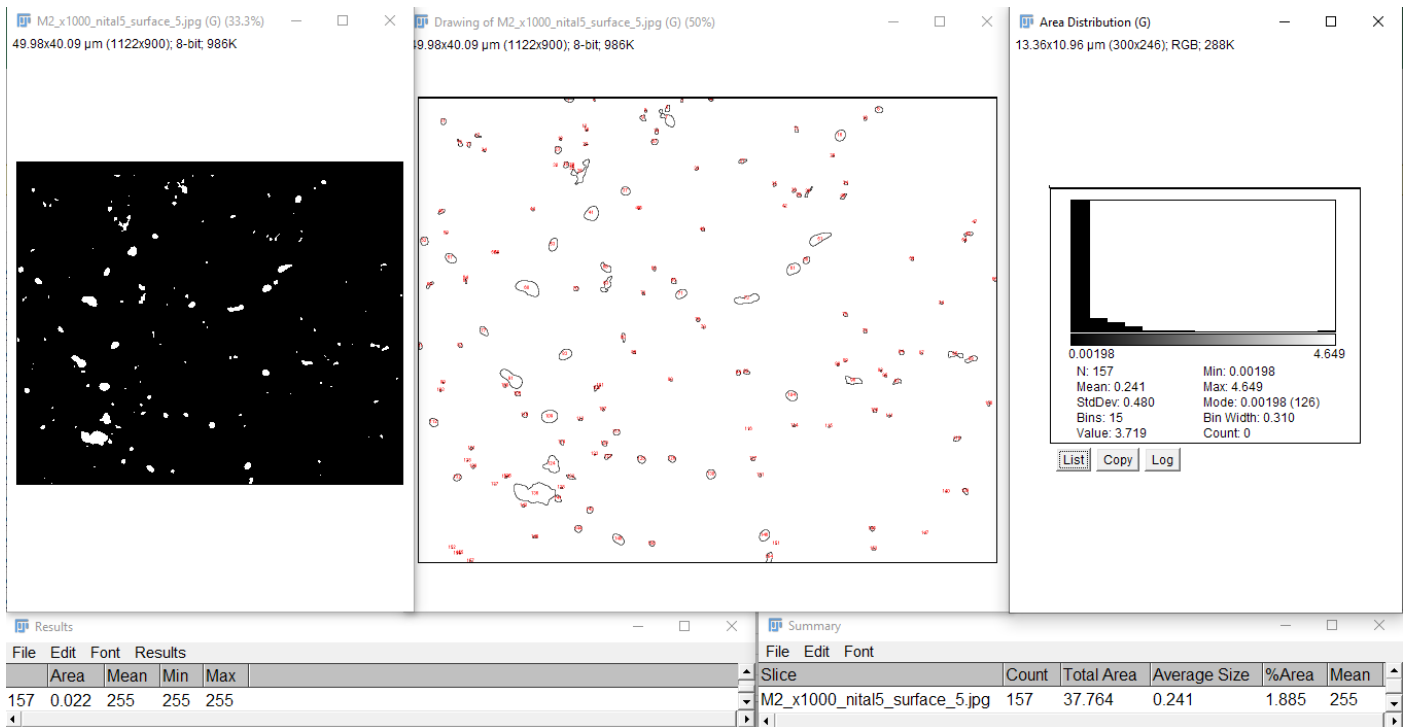
Εικόνα 102 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 371 και συνολικής επιφάνειας 115.060 μm^2



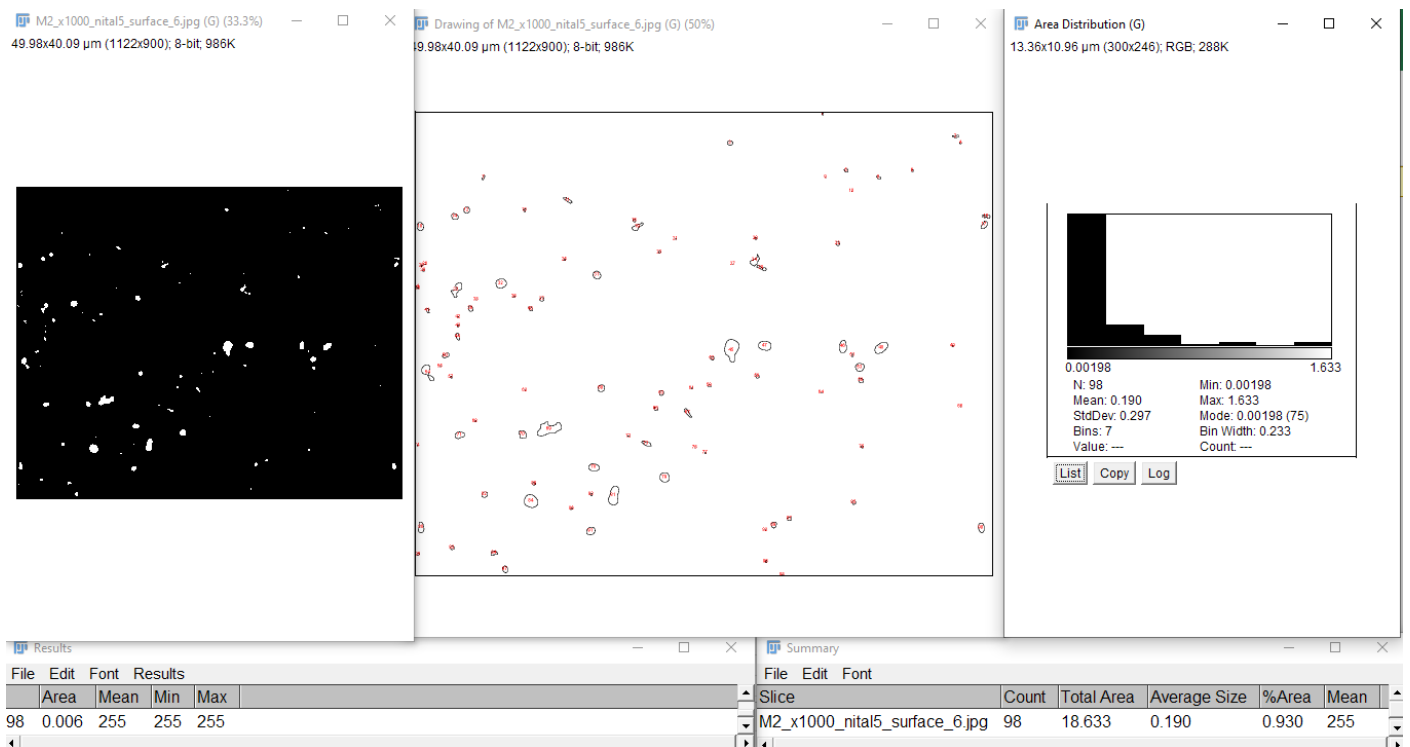
Εικόνα 103 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 65 και συνολικής επιφάνειας 15.347 μm^2



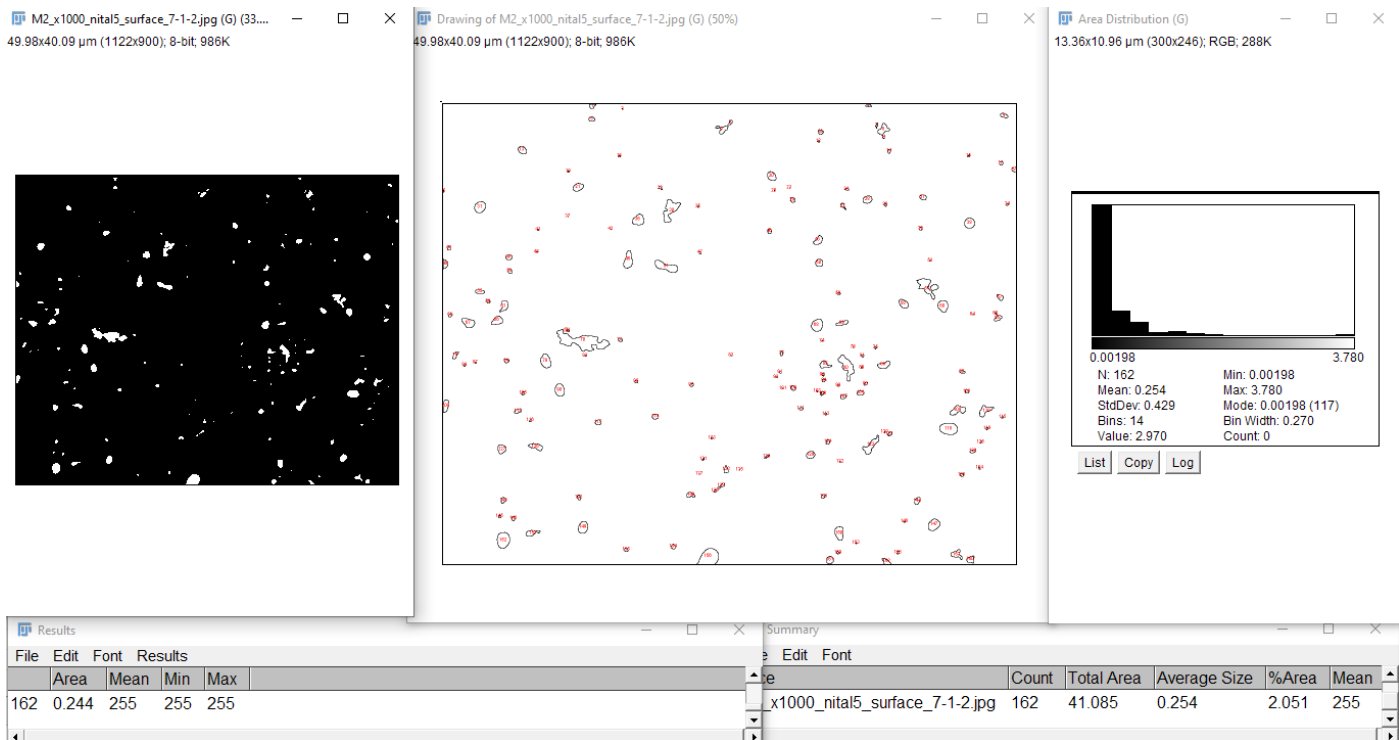
Εικόνα 104 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 176 και συνολικής επιφάνειας 40.900 μm^2



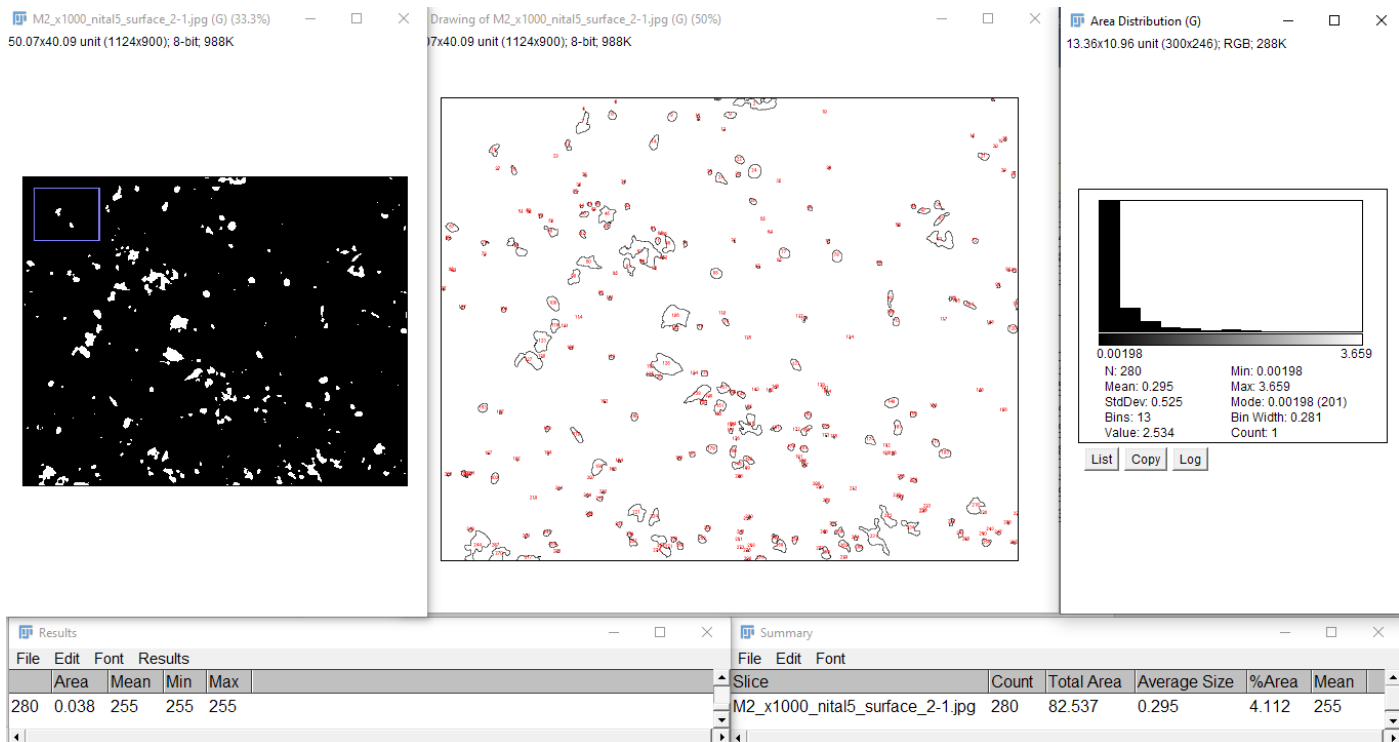
Εικόνα 105 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 157 και συνολικής επιφάνειας 37.764 μm^2



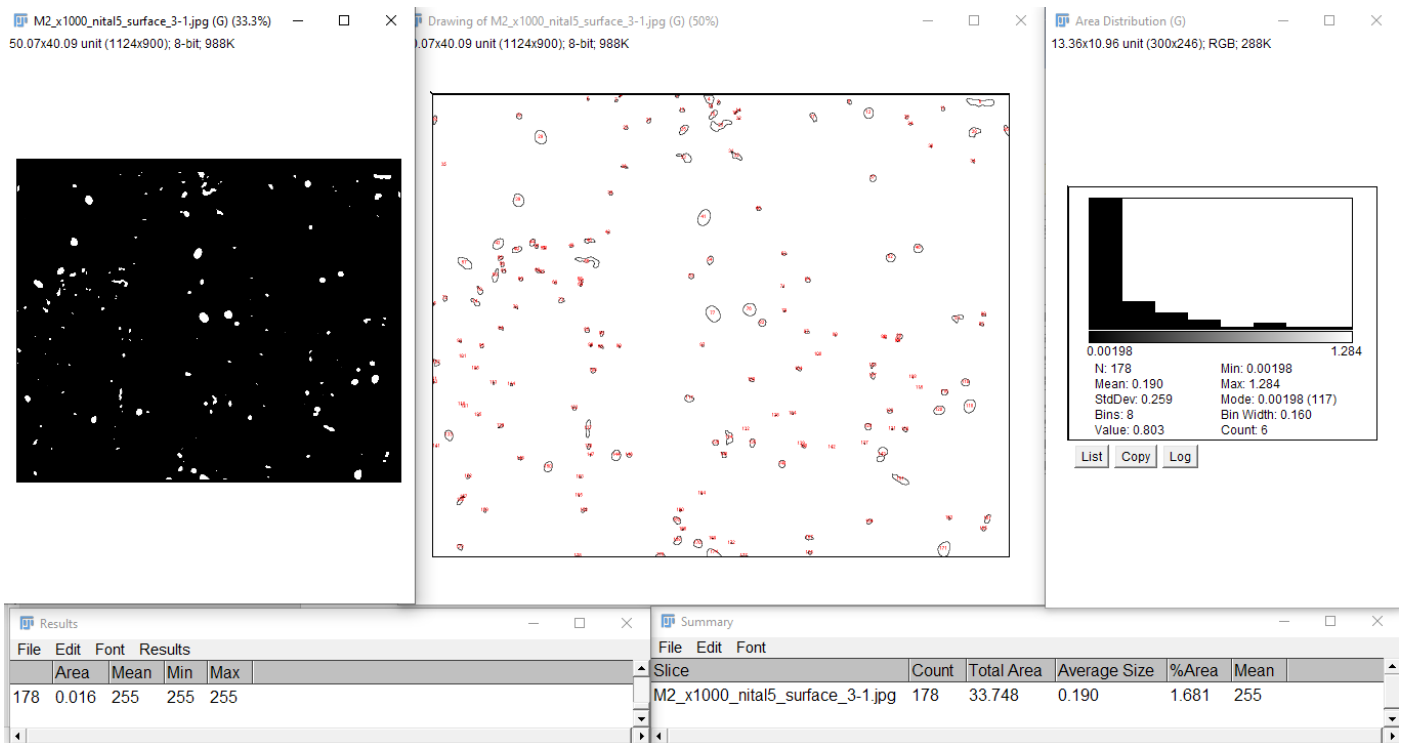
Εικόνα 106 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 98 και συνολικής επιφάνειας 18.633 μm^2



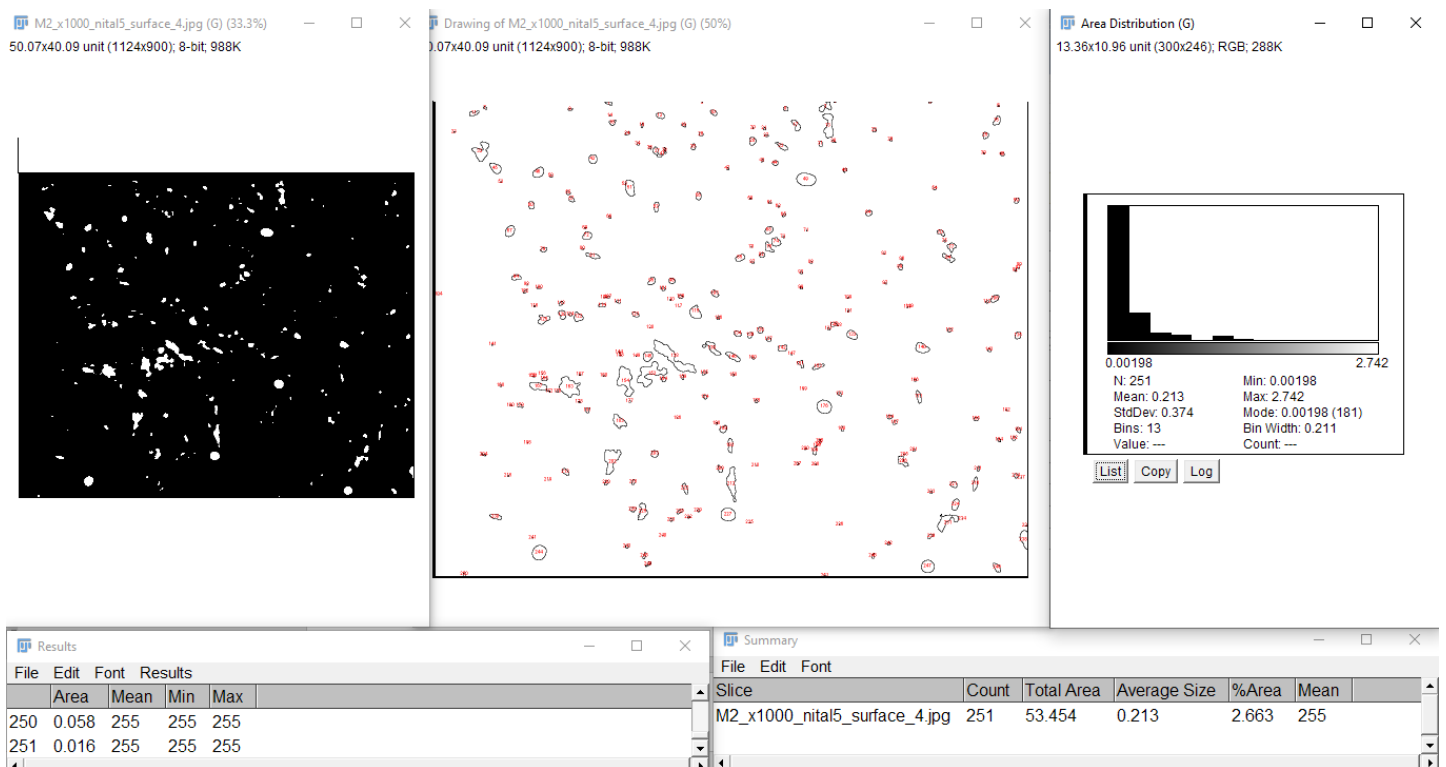
Εικόνα 107 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 162 και συνολικής επιφάνειας 41.085 μm^2



Εικόνα 108 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 280 και συνολικής επιφάνειας 82.537 μm^2



Εικόνα 109 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 178 και συνολικής επιφάνειας 33.748 μm^2



Εικόνα 110 Αποτύπωση καρβιδίων σύνολου 251 και συνολικής επιφάνειας 53.454 μm^2

δείγμα επιφάνειας μ . 2	Σύνολο κόκκων	επιφάνεια (μm)	μέσο μέγεθος κόκκου	% εμβαδόν	τυπική απόκλιση
δείγμα 1	56	36,023	0,643	1,801	0,643
δείγμα 2	205	54,857	0,268	2,743	0,287
δείγμα 3	227	69,499	0,306	3,475	0,306
δείγμα 4	231	84,094	0,364	4,205	0,364
δείγμα 5	126	36,304	0,288	1,815	0,679
δείγμα 6	154	42,988	0,279	2,149	0,621
δείγμα 7	195	67,646	0,347	3,382	0,603
δείγμα 8	168	51,626	0,307	2,581	0,61
δείγμα 9	127	37,888	0,298	1,894	0,44
δείγμα 10	179	41,464	0,232	2,073	0,308
Μέσος όρος	167	52,2389	0,3332	2,6118	0,4861

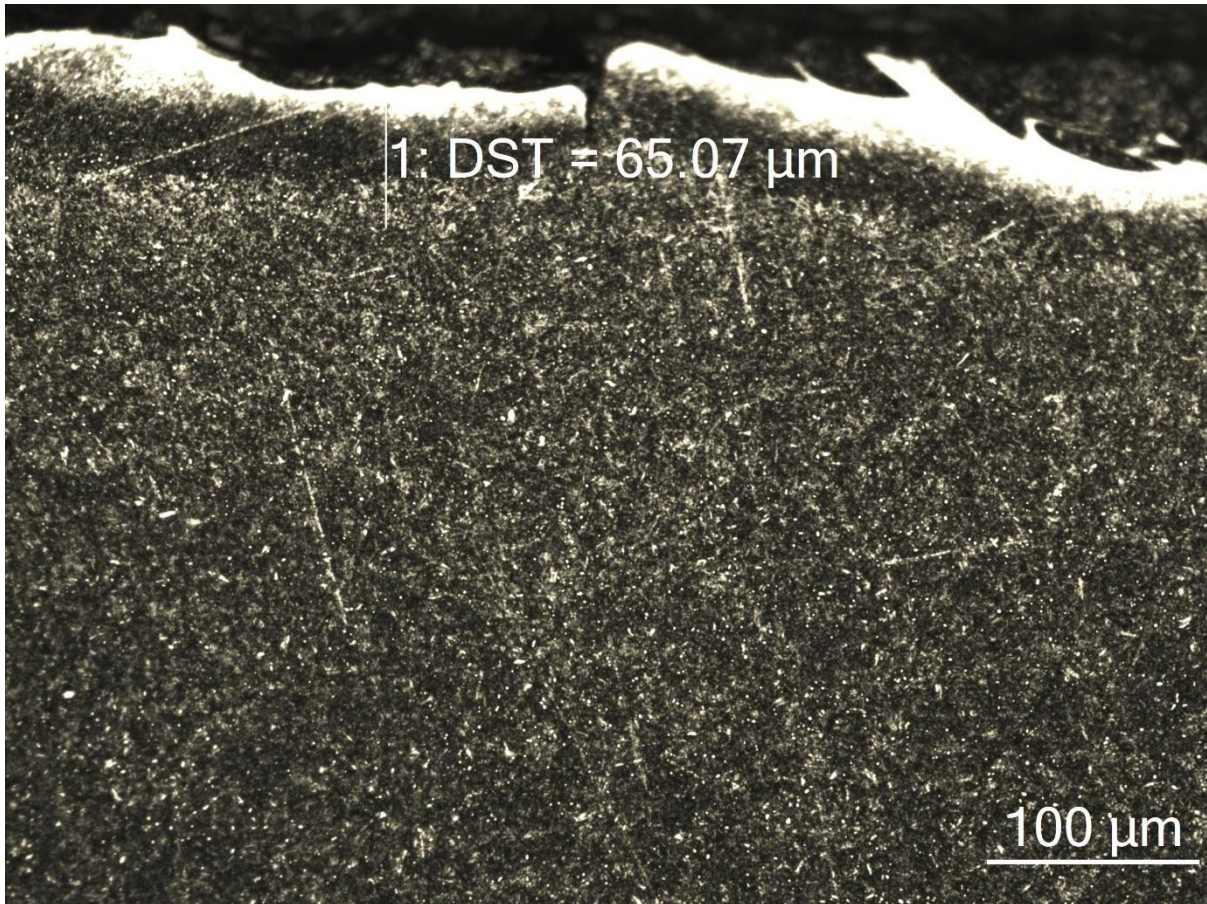
Πίνακας 6 Σύνοψη δεδομένων κοκκομετρίας από ανάλυση προγράμματος Fiji για το δοκίμιο "μ . 2"

δείγμα επιφάνειας Μ . 2	Σύνολο κόκκων	επιφάνεια (μm)	μέσο μέγεθος κόκκου	% εμβαδόν	τυπική απόκλιση
δείγμα 1	220	45,24	0,206	2,254	0,417
δείγμα 2	371	115,06	0,31	5,733	0,565
δείγμα 3	65	15,347	0,236	0,765	0,264
δείγμα 4	176	40,9	0,232	2,038	0,369
δείγμα 5	157	37,764	0,241	1,885	0,48
δείγμα 6	98	18,633	0,19	0,93	0,297
δείγμα 7	162	41,085	0,254	2,051	0,429
δείγμα 8	280	85,537	0,295	4,112	0,525
δείγμα 9	178	33,748	0,19	1,681	0,529
δείγμα 10	251	53,454	0,213	2,663	0,374
Μέσος όρος	196	48,677	0,237	2,411	0,4249

Πίνακας 7 Σύνοψη δεδομένων κοκκομετρίας από ανάλυση προγράμματος Fiji για το δοκίμιο "Μ . 2"

Από τους πίνακες 6 & 7 καταλαβαίνουμε ότι ο μέσος αριθμός καρβιδίων έχει μικρή απόκλιση ± 11 καρβίδια ανάμεσα στο "μ . 2" και στο "Μ . 2" που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στη κατανομή των καρβιδίων στα δύο σημεία του ράουλου.

Παρατηρώντας την επιφάνεια του “μ . 2” διαπιστώνεται ότι η επιφάνεια έχει εμφανίσει οξειδώσεις λόγω χρήσης και επίσης υπάρχουν τμήματα τα οποία έχουν αφαιρεθεί. Το λευκό – μαύρο τμήμα έχει κατά μέσο όρο τα 70 μm ενώ μια τοπική μέτρηση δείχνει ότι το πάχος αυτής της ζώνης είναι 65,07 μm. Η ζώνη αυτή έχει προκύψει λόγω της παρατεταμένης έκθεσης σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να έχει υποστεί το ράουλο πλαστική παραμόρφωση. Ακόμη, η ύπαρξη του σαπουνελαίου που μεταφέρεται στο ράουλο όπως έχουμε διαπιστώσει και με την αποτύπωση των συνθηκών λειτουργίας της μηχανής φαίνεται πως δημιουργεί διαδοχικούς κύκλους θερμικής κόπωσης οι οποίοι σε συνδυασμό με τη χημική σύσταση του υλικού δημιουργούν μικρορωγμές.

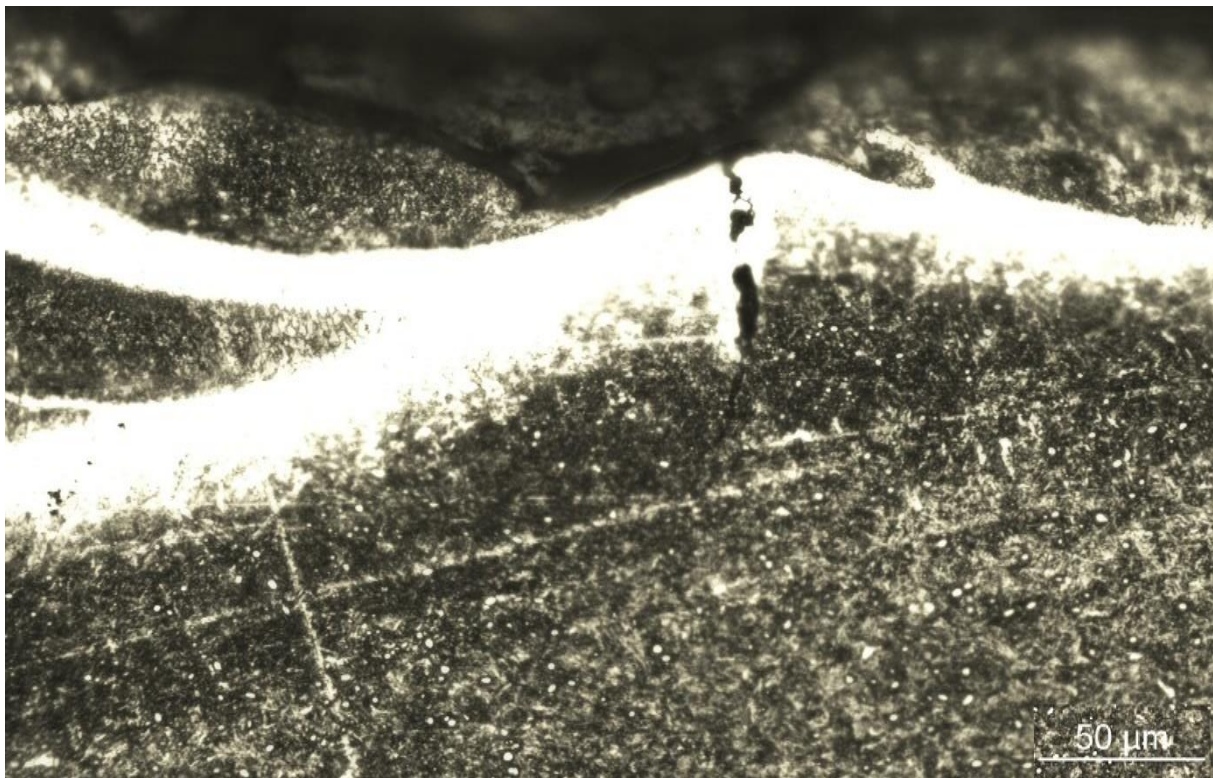


Εικόνα 111 Επιφάνεια “μ . 2”, μεγέθυνση X200 . Καταμέτρηση διάστασης της πλαστικά παραμορφωμένης ζώνης

Παρατηρείται ότι η διαταραχή της ρωγμής γίνεται περικρυσταλικά των κόκκων.

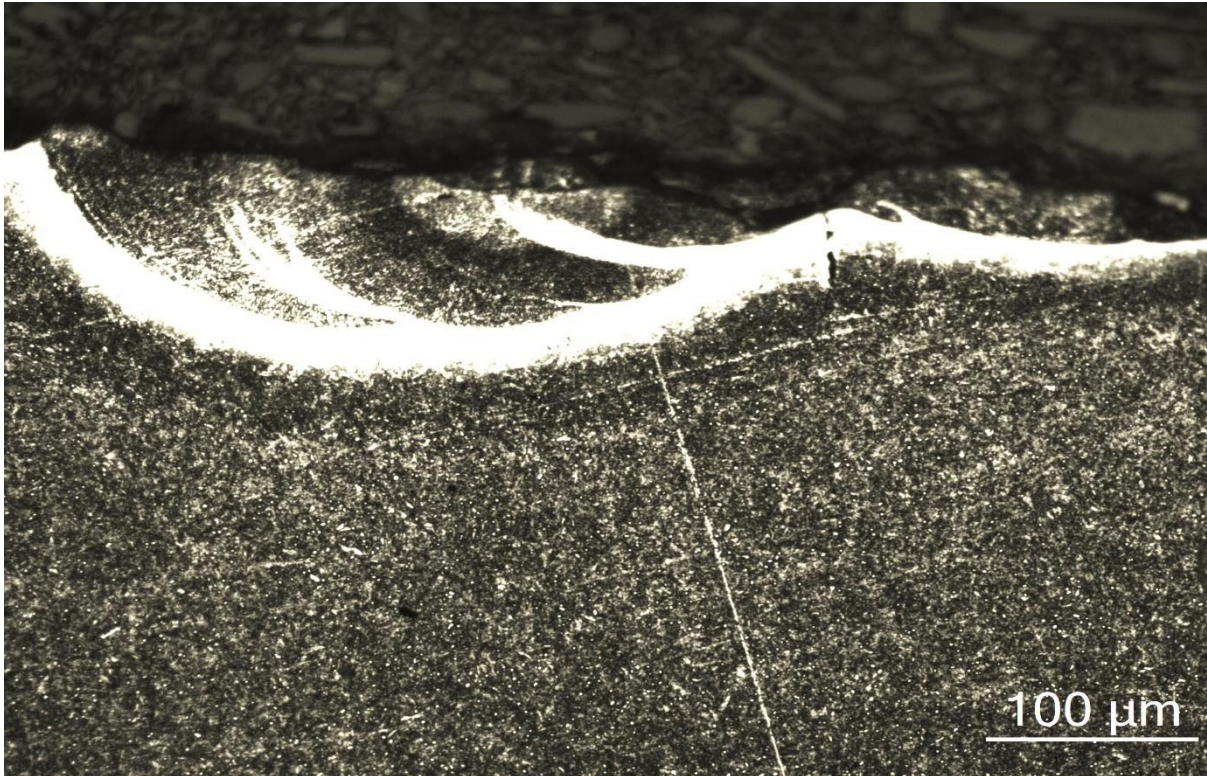


Εικόνα 112. Δοκίμιο "μ . 2" , μεγέθυνση X500, περικρυσταλλική θράυση

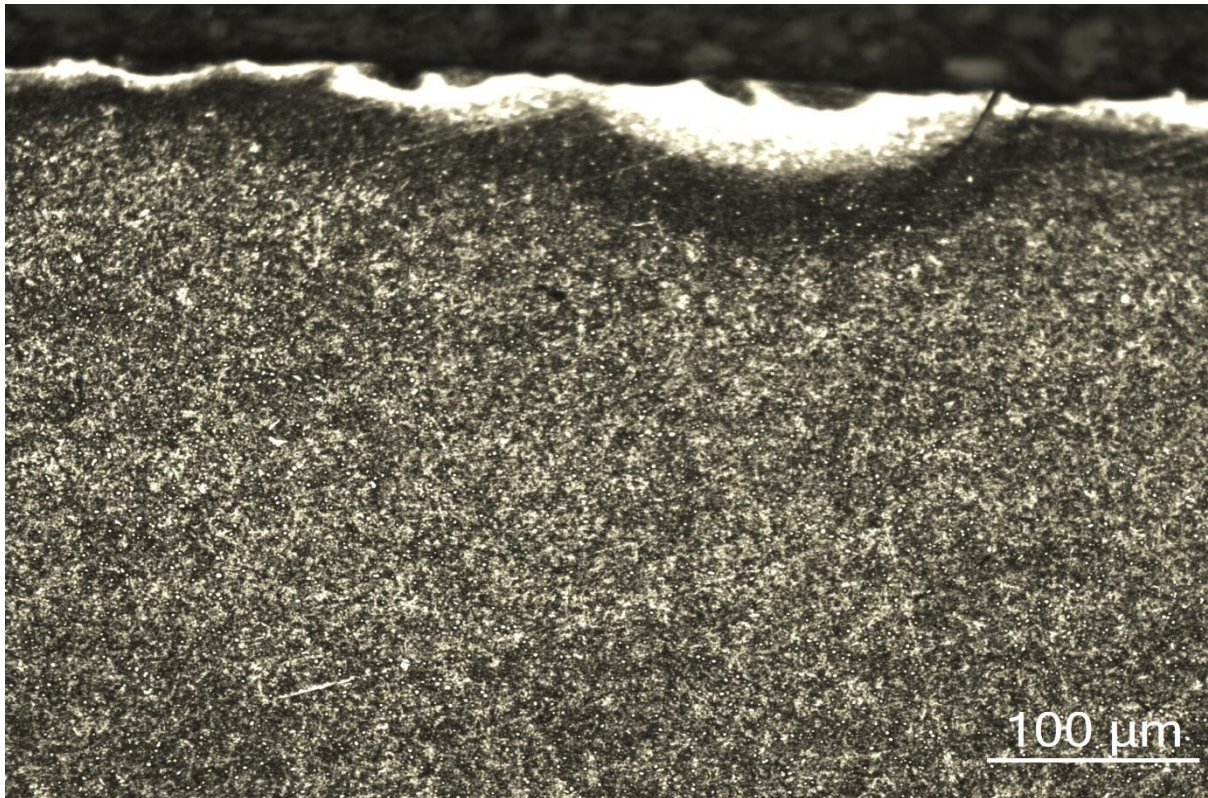


Εικόνα 113. Δοκίμιο "μ . 2" , μεγέθυνση X500, περικρυσταλλική θράυση

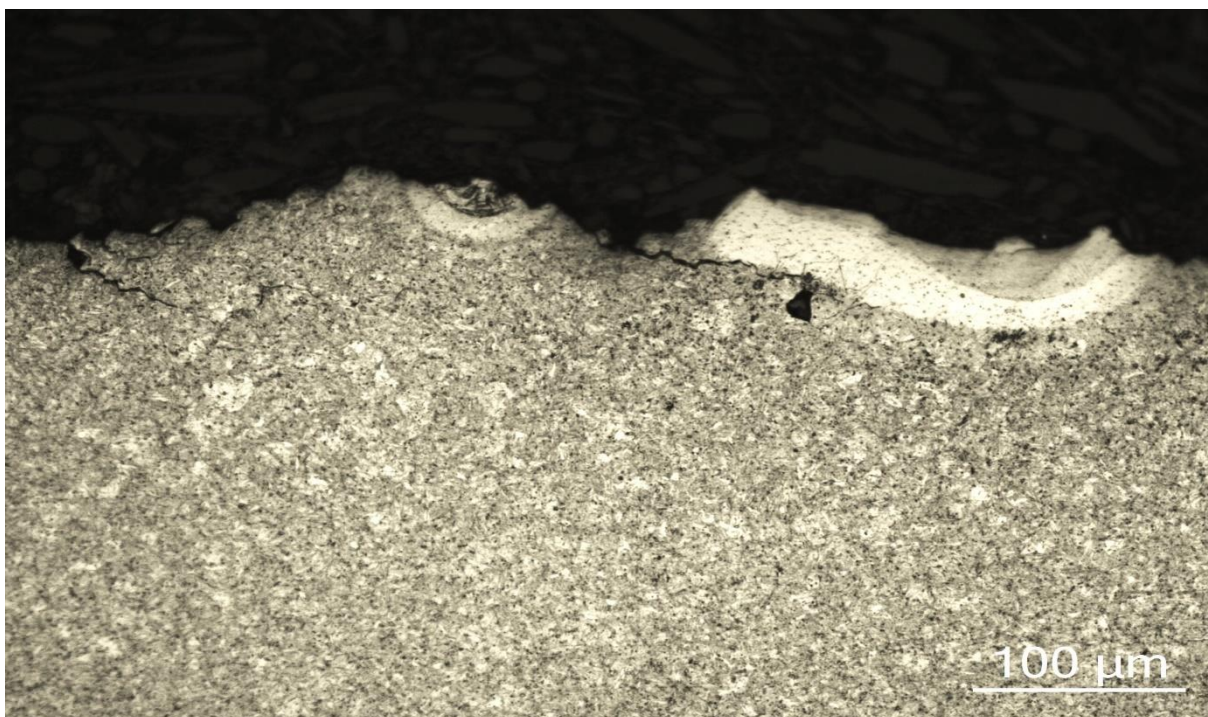
Στις φωτογραφίες 114-117 φαίνεται να παρουσιάζονται στις επιφάνειες θραύσης μικροεκκενώσεις. Αυτές οι περιοχές που εμφανίζονται οι μικροεκκενώσεις φαίνεται να έχει αλλάξει τοπικά η μορφή τους καθώς δείχνουν να έχουν λιώσει, γεγονός που είναι αντιληπτό από το έντονο άσπρο χρώμα. Επίσης, όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 112 υπάρχουν και μικρορηγματώσεις γύρω από εκείνη τη περιοχή.



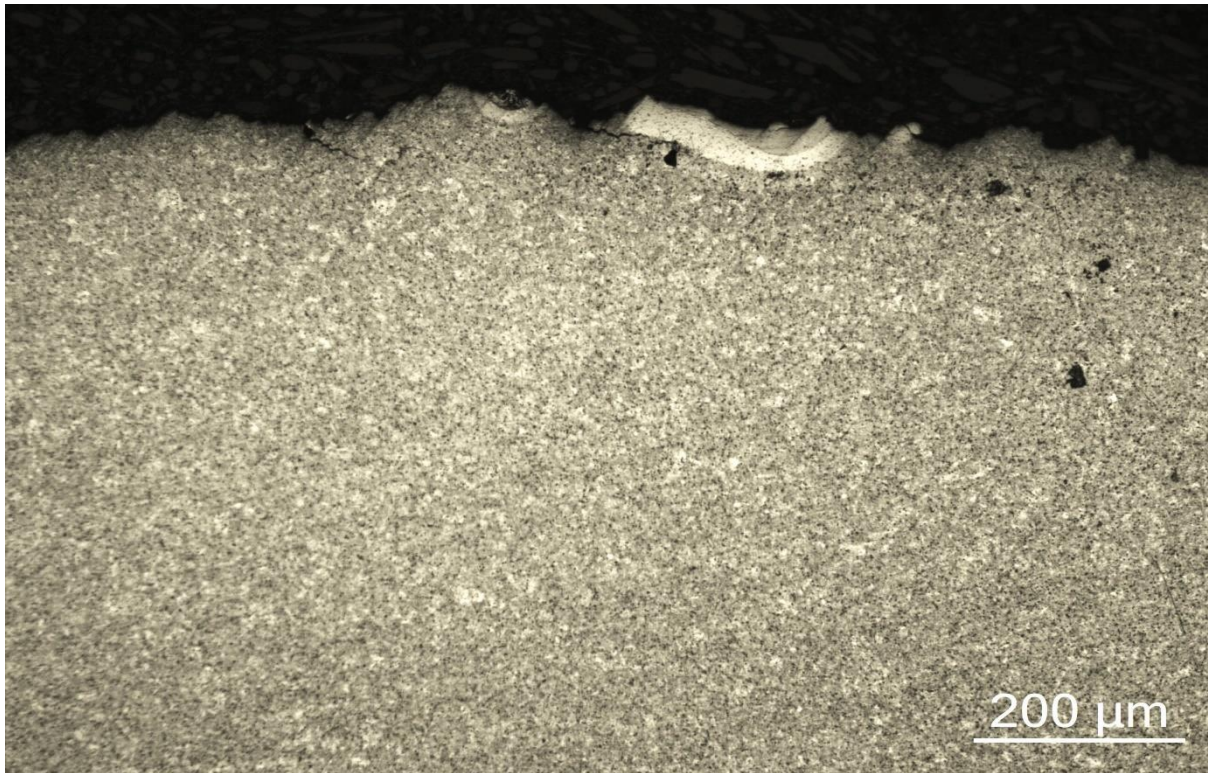
Εικόνα 114. Δοκίμιο "μ. 2", μεγέθυνση X200, μικροεκκενώσεις στην επιφάνεια θραύσης



Εικόνα 115. Δοκίμο "μ . 2", μεγέθυνση X200, μικροεκκενώσεις στην επιφάνεια θραύσης

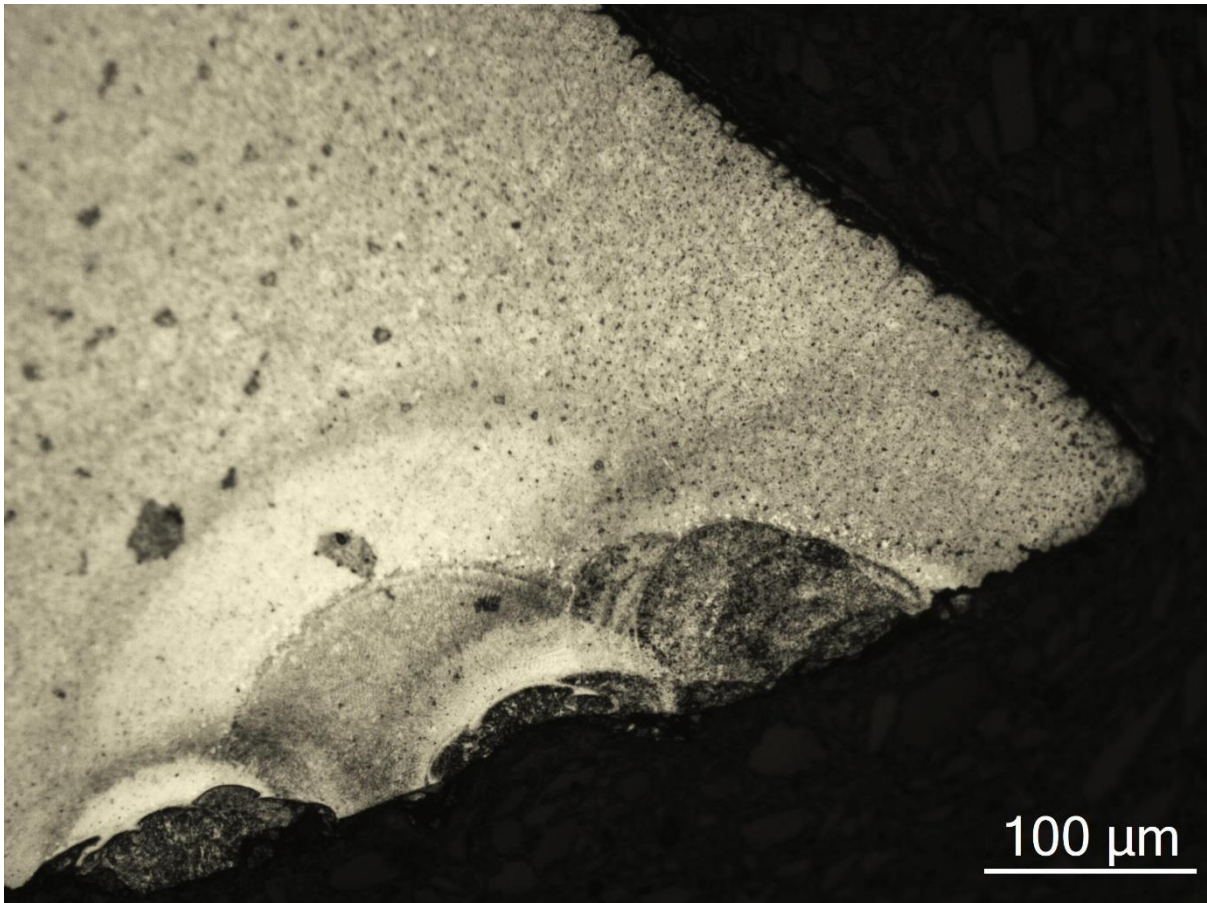


Εικόνα 116. Δοκίμο "μ . 1", μεγέθυνση X200, μικροεκκενώσεις στην επιφάνεια θραύσης

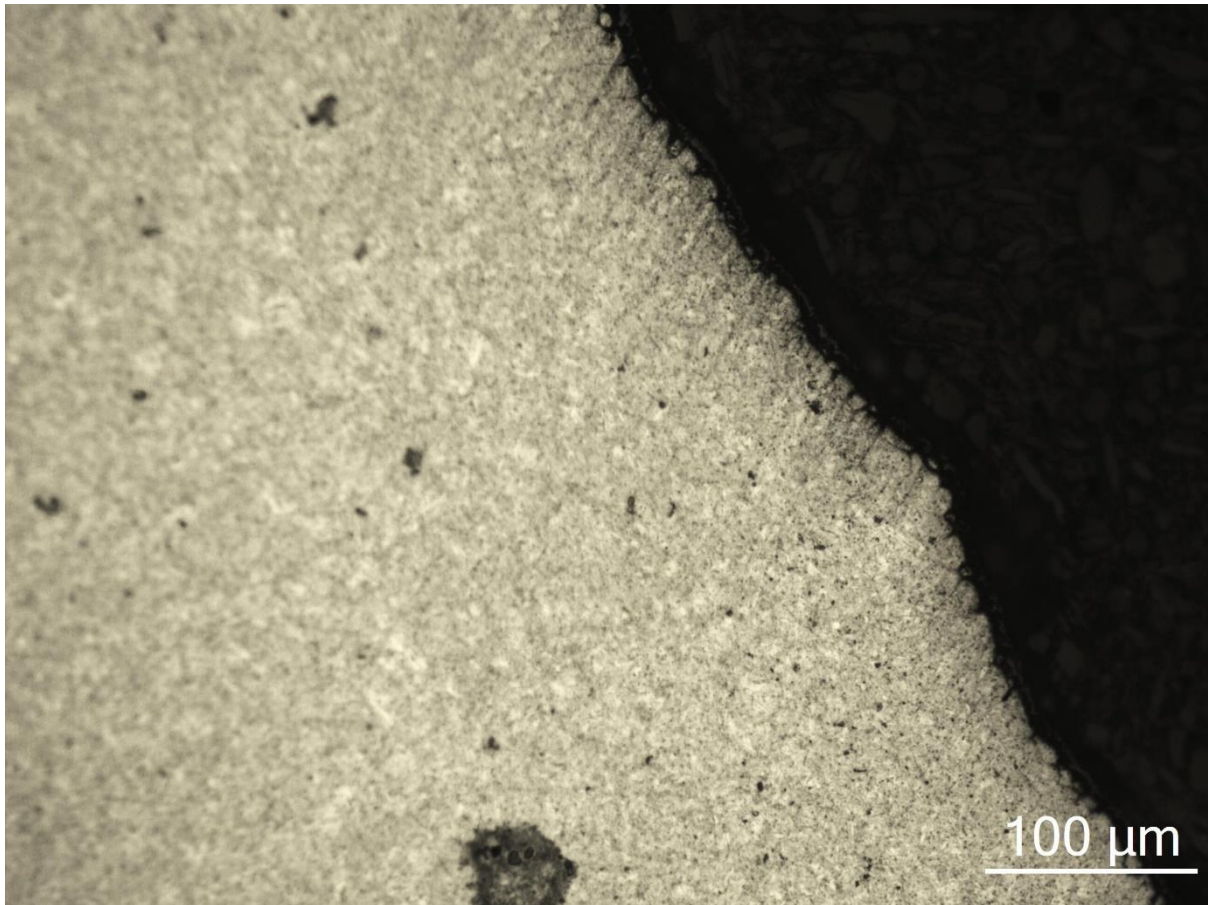


Εικόνα 117. Δοκίμιο "μ . 1" ,μεγέθυνση Χ100, μικροεκκενώσεις στην επιφάνεια θραύσης

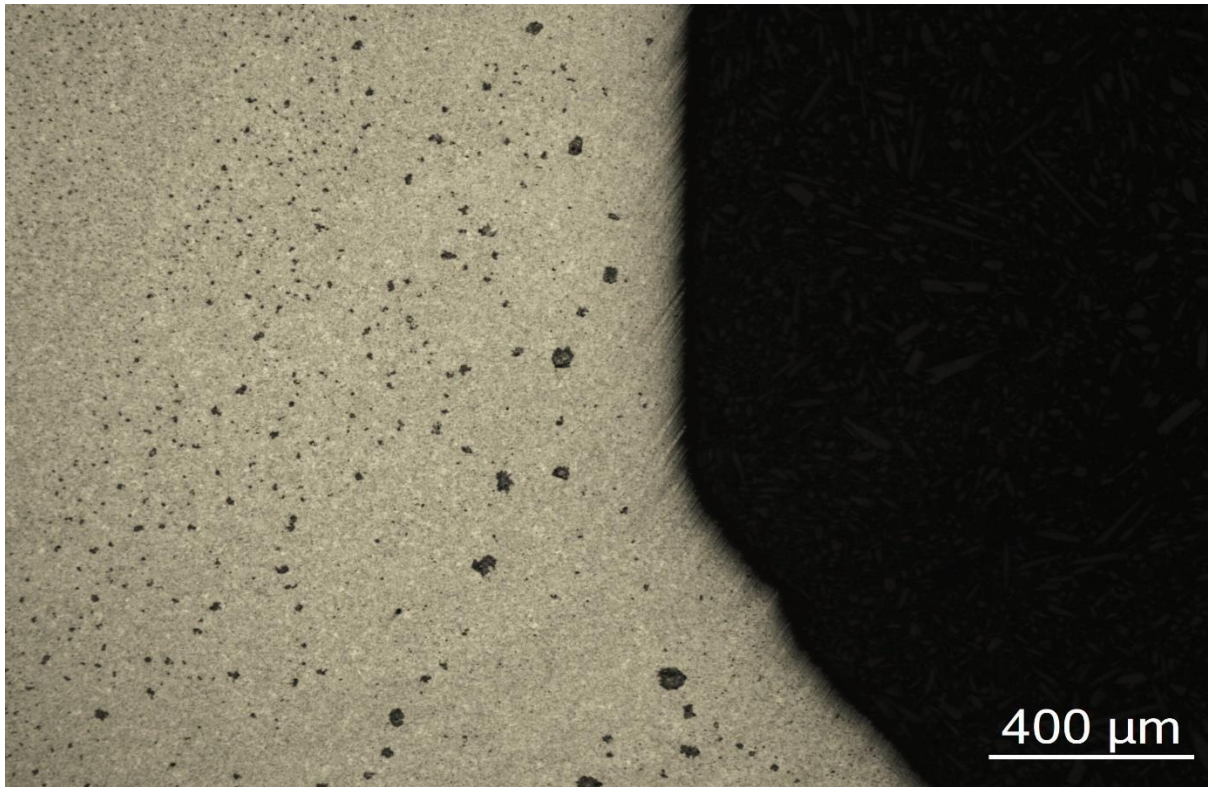
Στην εσωτερική σχισμή διαπιστώνεται ότι υπάρχουν πολλές ανομοιογένειες οι οποίες είναι αποτέλεσμα της μηχανουργικής κατεργασίας για τη δημιουργία της σχισμής η οποία είναι για να περνάει πάνω από τη ραφή της συγκόλλησης. Παρατηρείται ότι η κατεργασία, επειδή έχει γίνει με ανομοιογενή τρόπο υπάρχουν μικρορηγματώσεις κατά μήκος όλης της σχισμής που αποτελούν και πιθανά σημεία για την έναρξη κάποιας θραύσης όπως φαίνεται και στις εικόνες 119 & 120. Ακόμη κατά τον οπτικό έλεγχο διαπιστώνεται ότι το ράδιο δεν έχει την ίδια ακτίνα καμπυλότητας, με αποτέλεσμα διάφορα σημεία να επιβαρύνονται με συσσωρευμένες τάσεις. Οι δυο αυτοί παράγοντες παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην έναρξη της θραύσης.



Εικόνα 118 Δοκίμιο "μ . 2", μεγέθυνση X200 ,μικροεκκενώσεις στην επιφάνεια θραύσης από την πλευρά της κεντρικής σχισμής ν



Εικόνα 119 Δοκίμιο "μ.2", μεγέθυνση X200, μικρορηγματώσεις από την τμήμα της κεντρικής σχισμής λόγω της διαμόρφωσης



Εικόνα 120 Δοκίμιο "μ.2", μεγέθυνση X50, μικρορηγματώσεις απο την τμήμα της κεντρικής σχισμής λόγω της διαμόρφωσης

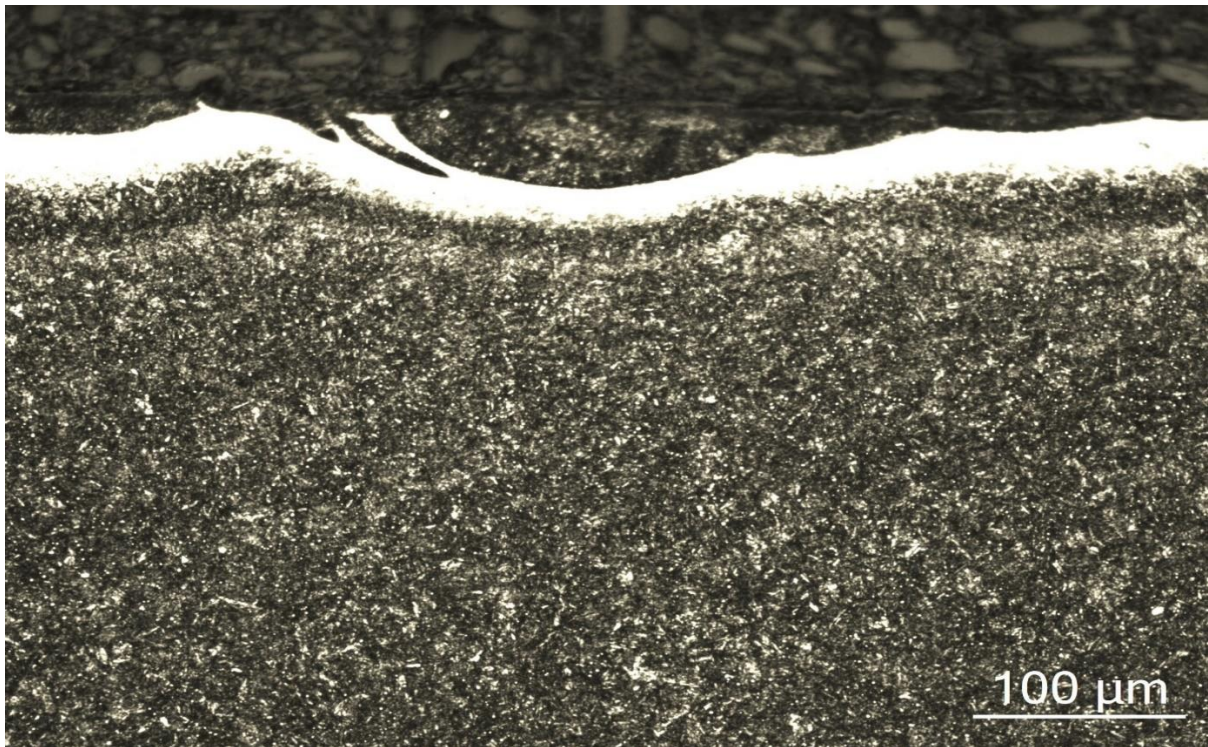
Ανάλυση Δοκιμίου "Μ . 2"

Η Επιφάνεια Μ . 2 παρουσιάζει αυξημένη πυκνότητα καρβιδίων η οποία επαληθεύεται και με την επιφάνεια μ . 2 μέσω της μέτρηση στο πρόγραμμα Fiji. Η λευκή ζώνη εμφανίζεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες. Το πάχος αυτής υπολογίζεται περίπου στα 60-70 μm . Η θερμική κόπωση είναι η αιτία για τη κατακρήμνηση των καρβιδίων . Σε σύγκριση με τον πυρήνα φωτογραφία 123, διαπιστώνουμε πως η πυκνότητα των καρβιδίων είναι μικρότερη.

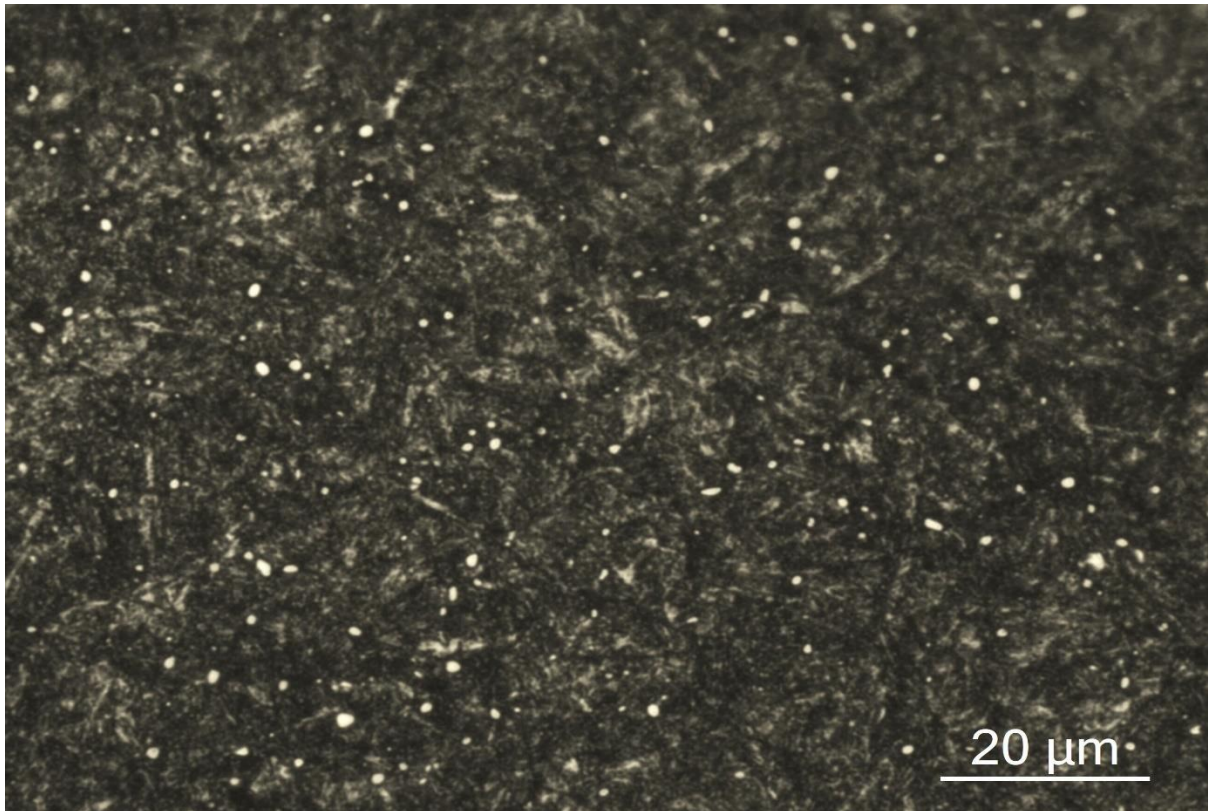
Στη φωτογραφία 124 (multifocus) παρατηρείται επίσης, πως η επιφάνεια έχει εμφανίσει σημάδια οξείδωσης και εξανθράκωσης λόγω της θέρμανσης σε θερμοκρασία 593 °C που φαίνεται ως το λευκό τμήμα στη φωτογραφία. Επίσης υπάρχουν ρωγμές και σημάδια συμπίεσης εν θερμώ.

Ακόμη παρατηρείται πως η επιφάνεια θραύσης στην εικόνα 124 του "Μ . 2" δεν έχει μικροεκκενώσεις πράγμα που σημαίνει ότι δεν αποτελεί σημείο έναρξης της θραύσης.

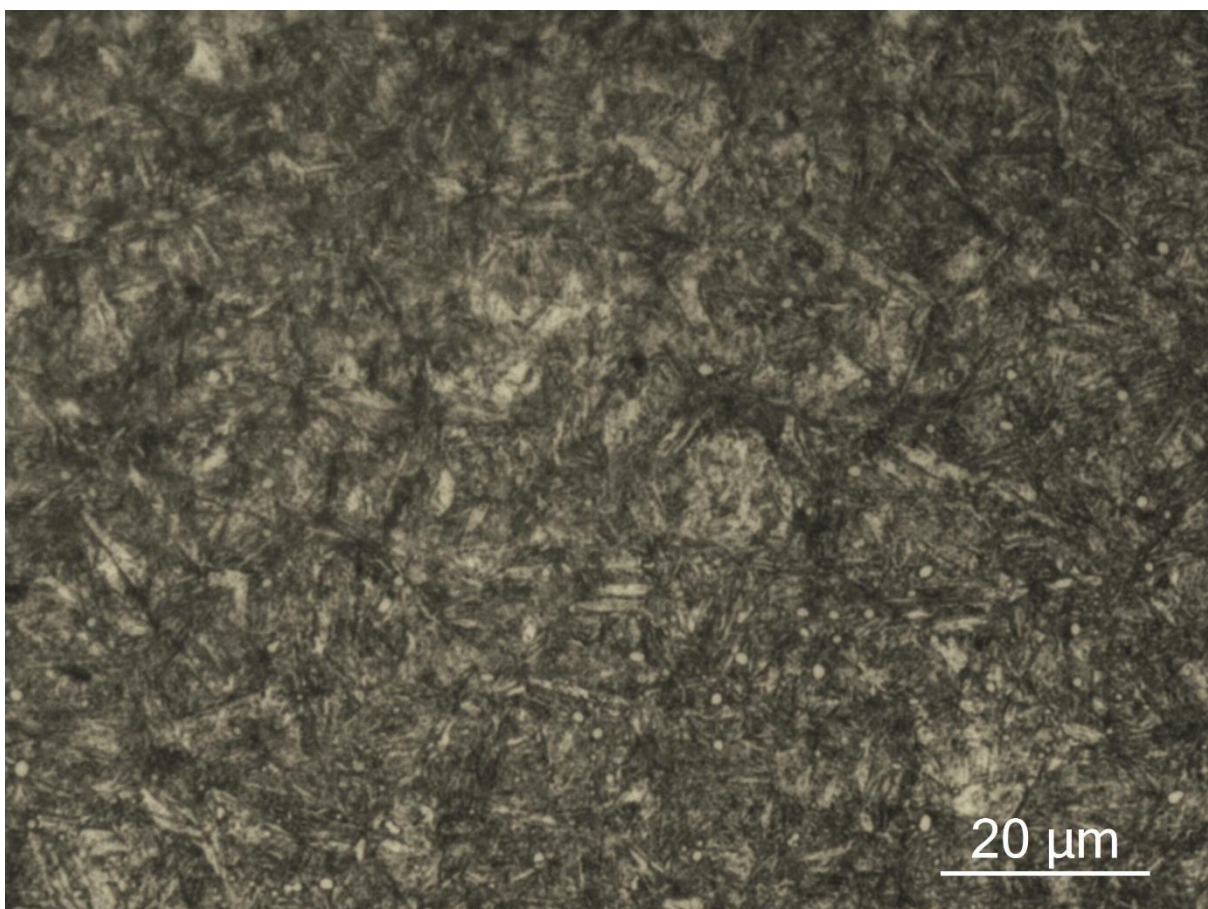
Τέλος η επιφάνεια εμφανίζει περικρυσταλλική θραύση στα όρια των κόκκων.



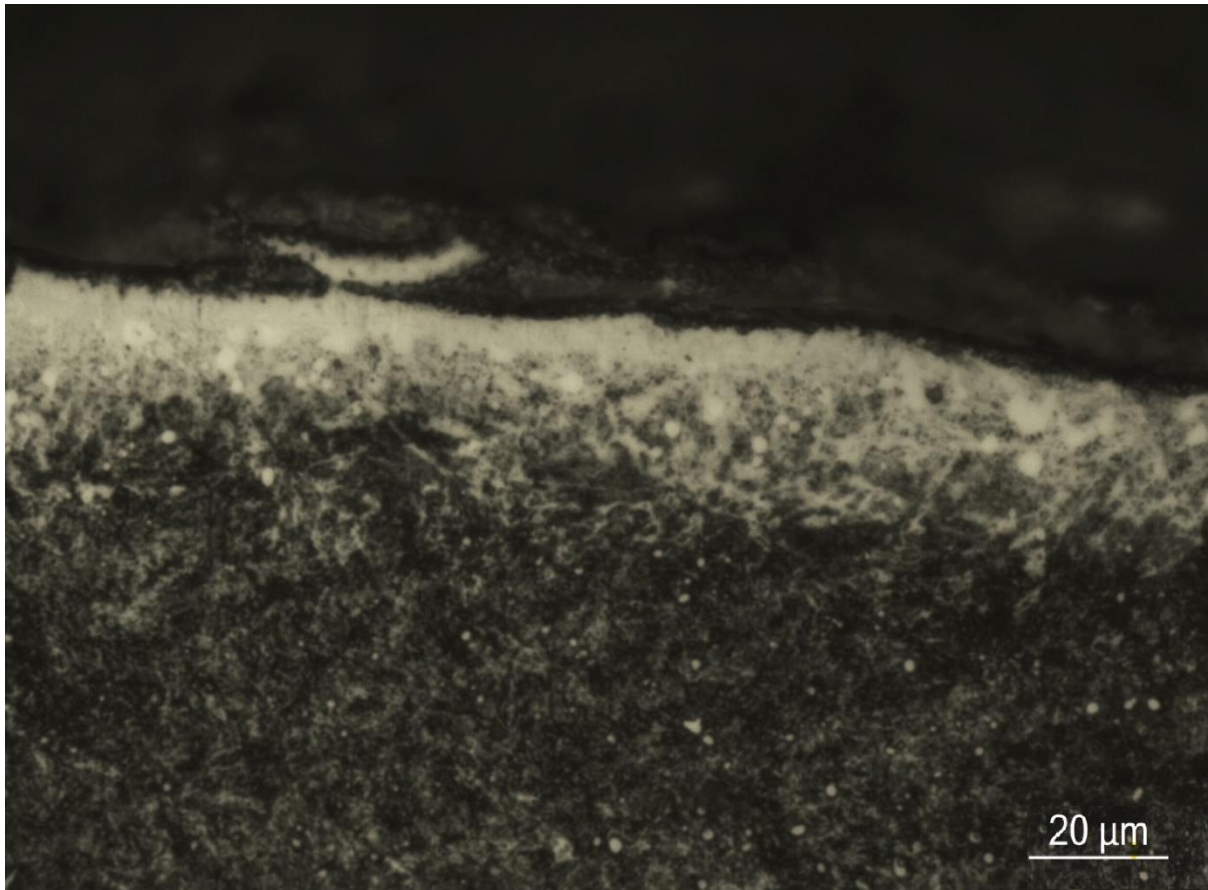
Εικόνα 121. Επιφάνεια "Μ . 2", μεγέθυνση X200



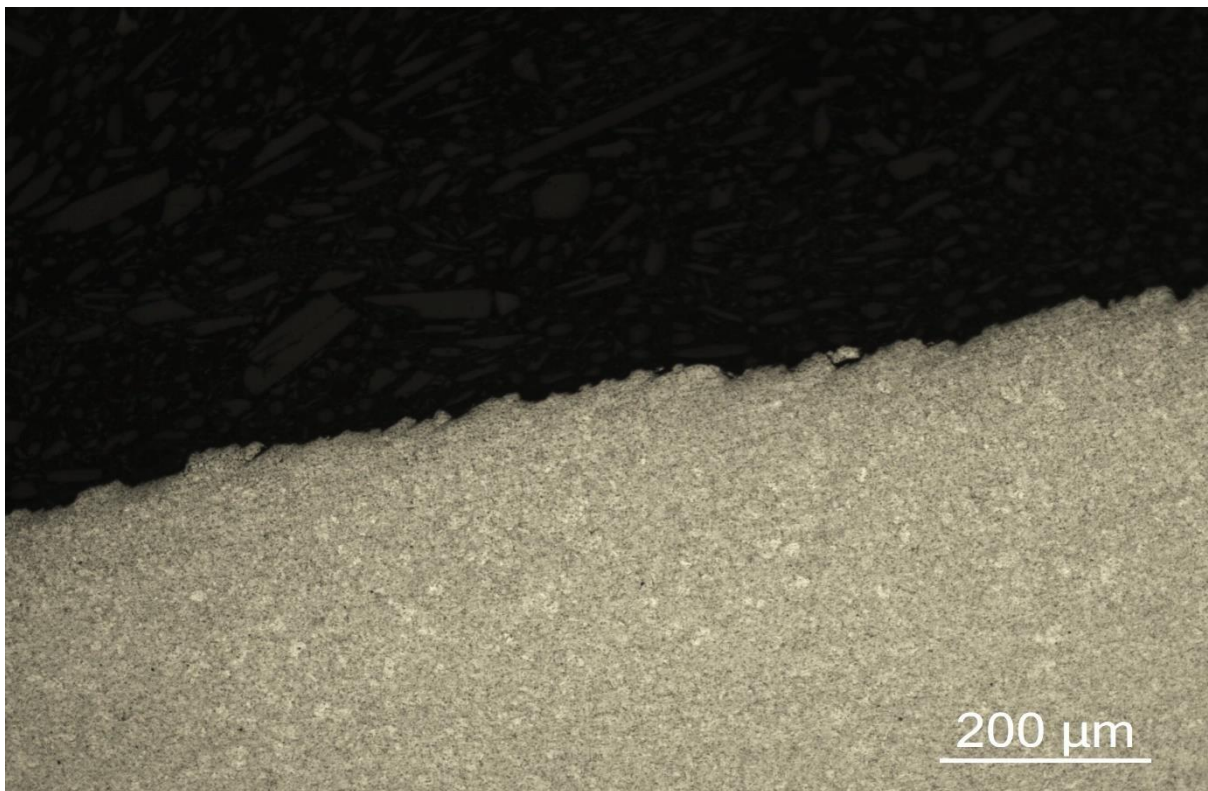
Εικόνα 122. Επιφάνεια "Μ . 2", Μεγέθυνση Χ1000



Εικόνα 123 .Φωτογραφία πυρήνα "Μ . 2", Μεγέθυνση Χ1000



Εικόνα 124. Επιφάνεια "Μ . 2", multifocus μεγέθυνση Χ1000



Εικόνα 125. Επιφάνεια θράυσης "Μ . 2" Μεγέθυνση Χ100

7. Συμπεράσματα

Μακροσκοπικά διαπιστώνεται ότι το ράουλο επιφανειακά φέρει ρηγματώσεις όπως φάνηκε από το στάδιο του οπτικού ελέγχου στο PhotoBox και στο στερεοσκόπιο, επίσης υπάρχουν δυο κύριες ζώνες που είναι επηρεασμένες θερμικά .Η ύπαρξη των ρηγματώσεων αυτών οφείλονται στην εναλλαγή κύκλων ψύξης-θέρμανσης που συνεπάγονται σε θερμική κόπωση του ράουλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει σαπουνέλαιο το οποίο μεταφέρεται μέσω της διαμορφωμένης επιφάνειας του κοιλοδοκού προς το ράουλο συγκόλλησης το οποίο είναι σε υψηλή θερμοκρασία. Επίσης παρατηρείται ότι οι διαστάσεις της εσωτερικής σχισμής φέρουν ανομοιογένειες λόγω κακής τórνευσης η οποία πιθανώς να έχει γίνει με μεγάλη ταχύτητα με αποτέλεσμα να υπάρχουν πιθανά σημεία για συσσωρεύσεις τάσεων στο εσωτερικό της σχισμής που οδηγούν σε ενάρξεις των θραύσεων. Ακόμη διαπιστώνεται ότι τα δύο τμήματα της θραύσης παρουσιάζονται ως αντιδιαμετρικά και συνεχόμενα διαδιδόμενα δεξιόστροφα.

Η επιφάνεια θραύσης χωρίζεται σε περιοχές ινώδεις αλλά και σε απόλυτα ψαθυρές περιοχές . Οι ινώδεις περιοχές αποτελούν τα σημεία έναρξης της θραύσης ,το γεγονός δικαιολογείται καθώς σε αυτές τις περιοχές παρουσιάζονται μικροεκεκνώσεις που σημαίνει ότι έχει ξαναέρθει σε επαφή το τμήμα αποκόλλησης με την επιφάνεια θραύσης μετά τη θραύση. Η διάδοση της θραύσης μετά απο την εμφάνιση της γίνεται με το να συνενώνονται οι μικρορηγματώσεις που μεταφέρονται στο εσωτερικό κομμάτι της σχισμής η οποία αποτελεί το σημείο συσσώρευσης των τάσεων και λόγω της κακής μορφοποίησης που έχει δεχτεί φαίνεται να αστοχεί πρώτα εκεί.

Μικροσκοπικά, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγάλη πυκνότητα καρβιδίων ένεκα της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που έχει ο συγκεκριμένος χάλυβας από τον οποίο φτιάχνονται τα ράουλα Uddeholm Caldie, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η δυσθραυστότητα του και να έχει χαμηλή αντοχή σε θερμική κόπωση. Επίσης λόγω της μηχανουργικής κατεργασίας που έχουν υποστεί οι επιφάνειες της εσωτερικής σχισμής υπάρχουν αρκετές μικρορηγματώσεις αλλά και ανομοιογένειες που είναι σημεία συσσώρευσης τάσεων άρα και πιθανά σημεία έναρξης θραύσης. Επίσης παρατηρείται ότι όλες οι μικρορηγματώσεις διαδίδονται περικρυσταλλικά των κόκκων.

Σαν λύση για την αποτροπή τέτοιων αστοχιών στο μέλλον προτείνεται η εκλογή ενός χάλυβα ό οποίος θα έχει χαμηλότερο ποσοστό σε άνθρακα , άρα θα έχει υψηλότερη αντοχή σε θερμική κόπωση όπως και αυξημένη δυσθραυστότητα, αυτό θα βοηθήσει στο να αυξηθεί η συνολική διάρκεια ζωής των ραούλων καθώς και στην εξοικονόμηση χρημάτων.

Επίσης προτείνεται να αναθεωρηθεί η μηχανουργική κατεργασία διαμόρφωσης της σχισμής προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας έτσι ώστε να αποφευχθούν οι μικρορηγματώσεις και κατά συνέπεια να μην εμφανιστούν ρηγματώσεις που θα οδηγήσουν σε ένα παρόμοιο τρόπο αστοχίας στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

1. ASTM. (n.d.). E2332-04 Standard Practice for Investigation and Analysis of Physical Component Failures.
2. Bhaduri, A. (2018). *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys* (Vol. 264). Kharagpur, West Bengal, India: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3>
3. Blau, P. J. (n.d.). *Metals Handbook*. ASM International. doi:ISBN 0-87170-654-7
4. *Chassis frame*. (n.d.). Retrieved from <https://engineeringlearn.com/types-of-chassis-frame-function-material-loads-acting-on-frame/>
5. Das, A. (1996). *Metallurgy, of Failure Analysis*. McGraw-Hill. doi:ISBN:0-07-015804-5
6. Decker, R. F. (1987). *Fractography* (Vol. 12). ASM International. doi:ISBN 0-87170-007-7
7. FUJIFILM. (2021). *Destructive Vs Non-Destructive Testing: A Guide*. Retrieved from <https://ndtblog-us.fujifilm.com/blog/destructive-versus-non-destructive-testing/>
8. Hamilton, N. L. (n.d.). *Tool Steel Temperature Color Chart*. Retrieved from <https://nancylthamilton.com/resources/charts/tool-steel-temperature-color-chart/>
9. Harold F. Giles, J. J. (2005). *Extrusion The Definitive Processing Guide and Handbook*. America: William Andrew Inc. Retrieved from https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=kGBkwC4akrsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=extrusion+process&ots=OeLaDh5UQi&sig=G5W6x793AEdKqW57VPNsqCMSI8E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
10. Jirandehi, A. P. (2022, september 15). Fatigue analysis of high-carbon steel at different environmental temperatures considering the blue brittleness effect. *International Journal of Mechanical Sciences*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107546>
11. Li, S. (2009). *Residual stresses in roll-formed square hollow sections*. ELSEVIER. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.015>
12. Mehari Zelalem Abathun, J. H. (2021). *Effects of manufacturing methods and production routes on residual stresses of rectangular and square hollow steel sections: a review*. Springer. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s43452-021-00193-8>
13. NDT, O. S. (2023). *What is the difference between non destructive testing & destructive testing*. Retrieved from <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/what-is-the-difference-between-ndt-destructive-testing>
14. Osarumwense, F. (2013). INFLUENCE OF THERMAL CYCLING ON THE FATIGUE RESISTANCE OF MEDIUM CARBON STEEL. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267511374_Influence_of_Thermal_cycling_on_the_fatigue_resistance_of_Medium_Carbon_Steel#fullTextFileContent
15. Otegui, J. L. (2014). *Failure Analysis Fundamentals and Applications in mechanical components*. Springer. doi:10.1007/978-3-319-03910-7
16. Roberts, W. .. (1983). *Hot Rolling of Steel Manufacturing*. CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781482276015>

17. S. Spuzic, K. S. (August 1994). *Wear of hot rolling mill rolls: an overview*. Elsevier. doi:[https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90155-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90155-4)
18. Seuthe. (n.d.). *FCF 240*. Retrieved from <https://www.seuthe.com/news/view/5640996599627776>
19. STAMENKOVIC, A. (1983). *EFFECT OF RESIDUAL STRESSES ON THE COLUMN BEHAVIOUR OF HOT-FINISHED STEEL STRUCTURAL HOLLOW SECTIONS*. (Vol. 75). doi:<https://doi.org/10.1680/iicep.1984.1196>
20. *Steel construction info*. (n.d.). Retrieved from https://www.steelconstruction.info/Steel_construction_products#cite_ref-BSEN10056_3-0
21. Uddeholm. (n.d.). CALDIE. Retrieved from <https://www.uddeholm.com/us/en-us/products/uddeholm-caldie/>
22. Ulbrich. (n.d.). *Types of Rolling Mills*. Retrieved from <https://www.ulbrich.com/blog/types-of-rolling-mills/>
23. V. Ramachandran, A. R. (2005). *Failure Analysis of Engineering Structures Methodology and Case Histories*. ASM INTERNATIONAL. Retrieved from www.asminternational.org
24. Velling, A. (2021). *Sheet metals*. Retrieved from <https://fractory.com/sheet-metal/>
25. William T. Becker, R. J. (2002). *Failure Analysis and Prevention* (Vol. 11). ASM INTERNATIONAL. Retrieved from https://www.asminternational.org/asm-handbook-volume-11-failure-analysis-and-prevention-1/results/-/journal_content/56/42240310/PUBLICATION/
26. Zygmunt Wusatowski, D. (1969). *fundamentals of rolling*. PERGAMON PRESS. Retrieved from https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=ftggBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR2&dq=rolling&ots=AhMHDaoLeA&sig=DW7pPesim3K9SV8rfyObXyzQq3A&redir_esc=y#v=onepage&q=rolling&f=false
27. Αντωνιάδης, Α. Θ. (2017). *Μηχανουργική τεχνολογία*. ΑΘΗΝΑ: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ. doi:[isbn:978-960-418-535-1](https://doi.org/10.1016/978-960-418-535-1)
28. *Απότμηση*. (n.d.). Retrieved from https://docplayer.gr/39110979-Apotmisi-1-perigrifi-haraktiristika.html#google_vignette
29. *Βαθεία κοίλανση*. (n.d.). Retrieved from <https://docplayer.gr/9489479-Vatheia-koilansi-deep-drawing.html>
30. Κυριάκος, Κ. (2019). *Ανάλυση αστοχίας σε άξονα αντλίας ψύξης νερού*. athens. Retrieved from http://okeanis.lib.teipir.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/4852/mec_45041_kovsenoglou.pdf?sequence=8&isAllowed=y
31. *Στρατζόπρεσσα*. (n.d.). Retrieved from https://www.google.com/search?q=%CF%83%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B6%CE%BF%CF%80%CF%81%CE%B5%CF%83%CF%83%CE%B1&sxsrf=APwXEddBN-tvZe7xH96Id_J2RhUJ48Tnsg:1682413234222&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjhqsPZ1cT-AhU-UqQEHV0qACKQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1