



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**«Τριβολογική συμπεριφορά επιφανειακών στρωμάτων
συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας με τη χρήση μη-
συμβατικών τεχνικών»**

Διπλωματική Εργασία

της φοιτήτριας Μαρίας ΒΑΡΣΑΚΗ του Γεωργίου (Α.Μ. 272017041)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πανδώρα Π. ΨΥΛΛΑΚΗ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

**«Tribological behavior of metallic matrix surface layers
elaborated via non-conventional techniques»**

Diploma Thesis

Maria G. VARSAKI (272017041)

Supervisor: Pandora P. PSYLLAKI

Athens, July 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος εργασίας

«Τριβολογική συμπεριφορά επιφανειακών στρωμάτων συνθέτων υλικών
μεταλλικής μήτρας με τη χρήση μη-συμβατικών τεχνικών»

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΨΥΛΛΑΚΗ ΠΑΝΔΩΡΑ	Καθηγήτρια	
2	ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ	Καθηγητής	
3	Δρ. ΜΟΥΡΛΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ	Διδάσκων επί συμβάσει (ΕΣΠΑ)	

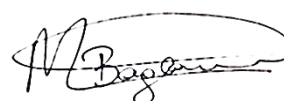
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Μαρία Βαρσάκη του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 272017041 φοιτήτρια 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».

Η Δηλούσα



Μαρία Γ. Βαρσάκη

Η επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Ευχαριστίες

Μετά τα πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια Πανδώρα Ψυλλάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, καθώς και για την καθοδήγησή της κατά την εκπόνησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Αθανάσιο Μουρλά για την προσφορά του στην εκπόνηση του πειραματικού μέρους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, οι οποίοι με στήριξαν σε όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τριβολογική συμπεριφορά επιφανειακών στρωμάτων συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας με ενίσχυση διασποράς κεραμικών σωματιδίων. Συγκεκριμένα εξετάζεται η συμπεριφορά σε τριβή ολίσθησης επιφανειακών στρωμάτων χαλύβδινης μήτρας με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου και καρβιδίων του βαναδίου. Τα υλικά που εξετάστηκαν έχουν παραχθεί από μέλη του Εργαστηρίου Μηχανικής Επιφανειών (Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΠΑ.Δ.Α.) σε προγενέστερο χρόνο, με τη χρήση της καινοτόμου τεχνικής Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας, στις εγκαταστάσεις της Ηλιακής Πλατφόρμας στην Αλμερία της Ισπανίας. Μετά από δοκιμές τριβής ξηρής ολίσθησης με τη χρήση σφαίρας αλουμίνιας, ως ανταγωνιστικού υλικού, βρέθηκε ότι:

- Τα σύνθετα επιφανειακά στρώματα παρουσιάζουν βελτιωμένη τριβολογική συμπεριφορά (συντελεστής τριβής ολίσθησης και συντελεστής φθοράς), σε σχέση με τη συμπεριφορά του χάλυβα, που αποτελεί το υλικό της μήτρας του συνθέτου.
- Η τριβολογική συμπεριφορά διαφοροποιείται ανάλογα με τη φύση των καρβιδίων ενίσχυσης (καρβίδια του νιοβίου ή καρβίδια του βολφραμίου)
- Τα νέα υλικά που παραχθήκαν με την καινοτόμο τεχνική της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ενέργειας κρίνονται κατάλληλα για χρήση σε εφαρμογές υψηλών αντιτριβικών απαιτήσεων.

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα επιφανειακά στρώματα μεταλλικής μήτρας με διασπορά καρβιδίων, καρβίδιο του νιοβίου, καρβίδιο του βαναδίου, συντελεστής τριβής, συντελεστής φθοράς, Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια

Abstract

This diploma thesis deals with the tribological behavior of the composite samples with niobium and vanadium carbide particles, which have been created by the Concentrated Solar Radiation method. Below, the surface layers of metal matrix composites with carbide dispersion are analyzed, as well as some of the more common ways of creating them. After the dry sliding friction tests, with alumina ball on the St37-2 steel specimens and the composites created, it was found that while this particular steel grade was quite resistant to wear, with the creation of the composites, it became even more durable as the wear factor. The coefficient of friction for the vanadium carbide remained relatively constant compared to that of the substrate, while for the niobium carbide it increased considerably. Finally, these two materials were deemed suitable for use in applications with large tribological arrangements.

Keywords: particulate reinforced metal matrix surface composites (PMM surface layers); niobium carbide; vanadium carbide; friction coefficient; wear coefficient; Concentrated Solar Energy (CSE).

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Βιβλιογραφικό μέρος	13
1.1 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας με διασπορά σωματιδίων ενίσχυσης και τεχνικές παραγωγής.....	13
Σύνθετα υλικά	13
Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων	15
Κατεργασίες υγρής κατάστασης-Liquid state processes	18
Χύτευση με ανάδευση- Stir casting.....	18
Χύτευση με υπερήχους-Ultrasonic assisted casting	21
Τεχνικές διήθησης -Infiltration techniques	22
Διαλυμένη εναπόθεση τήγματος -Disintegrated melt deposition.....	27
Κατεργασίες ημιστερεής κατάστασης -Semi-solid state processes.....	28
Thixocasting	28
Rheocasting	30
Κατεργασίες στερεής κατάστασης -Solid state processes	31
Κονιομεταλλουργία -Powder metallurgy	31
Μηχανική κραματοποίηση -Mechanical alloying	34
Πυροσυσσωμάτωση με μικροκύματα -Microwave sintering	36
Κατεργασία ανάδευσης τριβής-Friction stir processing (FSP)	40
1.2 Επιφανειακά στρώματα σύνθετων υλικών με διασπορά σωματιδίων και επικαλύψεις	43
1.2.1 Επικαλύψεις.....	43
1.3 Επιφανειακά στρώματα σύνθετων με διασπορά καρβιδίων.....	53
Κεφάλαιο 2 : Πειραματικό μέρος.....	62
2.1 Εξοπλισμός.....	62
2.2 Αποτελέσματα και επεξεργασία	67
2.2.1 Συντελεστής τριβής – Friction coefficient (μ).....	67
2.2.2 Ειδικός ρυθμός φθοράς – Specific wear rate (k)	69
Κεφάλαιο 3 : Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	74

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δημιουργώντας ένα εξάρτημα ή γενικότερα μία κατασκευή, υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις από το υλικό κατασκευής, οι οποίες, ενίοτε, δεν πληρούνται χωρίς περεταίρω κατεργασία. Γι' αυτόν τον λόγο, γίνεται τροποποίηση είτε της επιφανειακής τοπογραφίας, είτε της μικροδομής ή/και των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με θερμικές κατεργασίες, οι οποίες επηρεάζουν το υλικό σε όλο το σύνολό του, αυξάνοντας ή μειώνοντας τον όγκο του, ή με επιφανειακές κατεργασίες, που γίνεται προσθήκη μερικών χιλιοστών στην εξωτερική του στοιβάδα. Με την επιφανειακή κατεργασία, δίνονται στο υλικό οι απαιτούμενες ιδιότητες, με σκοπό την αποφυγή αστοχιών, οι οποίες συνήθως εκδηλώνονται στην επιφάνεια [1]. Είναι μια επιστήμη η οποία καλύπτει αντικείμενα χρήσης σε πολλούς τομείς όπως για παράδειγμα η μηχανολογία και η αεροναυπηγική, για την κατασκευή μηχανών και εξαρτημάτων, η τεχνολογία τροφίμων, για σκεύη διατήρησης τροφίμων και η ιατρική, για την ενίσχυση προσθετικών μελών. Συνήθως, με την μεταρρύθμιση των επιφανειακών στρωμάτων υλικού προσδίδονται αντοχή στη φθορά, αντιμικροβιακές ιδιότητες, βιοαποδομησιμότητα, βιοσυμβατότητα, διαβρεξιμότητα, ευμορφία κ.α., όπου είναι φυσικά απαραίτητο [2].

Τα Σύνθετα Υλικά, σύμφωνα με τον Askeland, παράγονται όταν συνδυάζονται δύο ή περισσότερα υλικά με σκοπό τη δημιουργία ιδιοτήτων που δεν θα επιτυγχάνονταν διαφορετικά. Διακρίνονται σε φυσικά, όπως τα δόντια και το ξύλο, και τεχνητά, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα. Συνηθέστερες ιδιότητες είναι η δυσκαμψία, η μηχανική αντοχή, η αντοχή σε διάβρωση, η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, η σκληρότητα, η αγωγιμότητα, αντοχή στη φθορά και την ολίσθηση [3]. Ωστόσο, οι ιδιότητες τροποποιούνται ανάλογα με τον τρόπο και το υλικό κατασκευής τους, για παράδειγμα, η βελτίωση των τριβολογικών ιδιοτήτων των Σύνθετων Υλικών Μεταλλικής Μήτρας ενισχυμένων με σωματίδια οφείλεται στην περιεκτικότητα σε κεραμικά σωματίδια, η οποία προστατεύει τη μεταλλική μήτρα από τη φθορά. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα με τα κράματα αλουμινίου που περιορίζουν την απόδοσή τους στη φθορά είναι η σχετικά χαμηλή αντίστασή τους σε σύσπαση, σε σύγκριση με το χυτοσίδηρο, σε συνθήκες ξηρής ολίσθησης. Πρόσφατες μελέτες αποκάλυψαν ότι περαιτέρω βελτιώσεις στην αντοχή στη φθορά των κραμάτων αλουμινίου μπορούν να επιτευχθούν με την ενσωμάτωση δύο ή περισσότερων κεραμικών σωματιδίων [4].

Τροποποιώντας τα επιφανειακά στρώματα υλικού, αυξάνεται η επιφανειακή σκληρότητά του, και κατά συνέπεια η αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής. Η τροποποίηση κατηγοριοποιείται ως εξής:

- Χωρίς μεταβολή της χημικής σύστασης: Η συγκεκριμένη τεχνική, επιτυγχάνεται με μηχανικό ή μεταλλουργικό τρόπο. Στον μηχανικό τρόπο, εισάγεται στο επιφανειακό στρώμα του υλικού ένα επιθυμητό πεδίο θλιπτικών τάσεων. Στον θερμικό (μεταλλουργικό) τρόπο, θερμαίνεται η επιφάνεια του υλικού με σκοπό κατά την ψύξη, μέσω του μετασχηματισμού των φάσεων, να γίνει αύξηση της σκληρότητας.
- Με μεταβολή της χημικής σύστασης: Σε αυτήν την τεχνική, χρησιμοποιούνται θερμοχημικές μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στα φαινόμενα διάχυσης ατόμων.

Αναλυτικότερα, οι μηχανικές τεχνικές επιφανειακής τροποποίησης περιλαμβάνουν όλες τις κατεργασίες διαμόρφωσης εν ψυχρώ (π.χ. ψυχρή έλαση) και τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού (π.χ. λείανση). Είναι τεχνικές οι οποίες ενώ επηρεάζουν το πεδίο εσωτερικών τάσεων του υλικού, δεν προορίζονται για επιφανειακή ενίσχυση, αλλά κυρίως για μορφοποίηση τελικών προϊόντων ή εξομάλυνση της επιφανειακής τοπογραφίας. Άλλη μια μηχανική τεχνική, είναι η σφαιροβολή, η οποία αναπτύχθηκε περεταίρω από τον J.O. Almen το 1943, όπου γινόταν εισαγωγή πεδίου θλιπτικών τάσεων στην επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, οι οποίες προσέφεραν αντοχή σε κόπωση και διάβρωση υπό τάση. Πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία γίνεται εκτόξευση σφαιριδίων από σκληρυμένο χάλυβα, κεραμικό ή ύαλο, με μεγάλη ταχύτητα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια, προκαλώντας έτσι πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια του στοιχείου, με σκοπό να την σκληρύνει. Η παραλλαγή της σφαιροβολής είναι η σκλήρυνση της επιφάνειας με τη δημιουργία κρουστικών κυμάτων από δέσμη laser. Βασικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής, είναι η αναπόφευκτη φθορά ή/και η θραύση των σφαιριδίων και η επιμόλυνσή τους από παραμένουσες ακαθαρσίες στην επιφάνεια κατεργασίας. Άλλη μια τεχνική, είναι η επιφανειακή έλαση, κατά την οποία εξαλείφονται τυχόν πόροι που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια, από την ύπαρξη κάποιας άλλης κατεργασίας. Η επιφανειακή έλαση βρίσκει εφαρμογή στην επιφανειακή κατεργασία χαλύβων, τιτανίου και κραμάτων νικελίου [1].

Οι θερμικές τεχνικές επιφανειακής τροποποίησης (τεχνικές επιφανειακής σκλήρυνσης ή βαφής), χρησιμοποιούνται κυρίως σε χάλυβες και χυτοσιδήρους, με σκοπό τη σκλήρυνση την επιφάνειας του υλικού. Είναι τεχνική παρόμοια με μία συμβατική

θερμική κατεργασία, με τη διαφορά ότι μια θερμική κατεργασία διαφοροποιεί όλο τον όγκο του στοιχείου, ενώ στην προκειμένη περίπτωση τροποποιείται μόνο η επιφάνεια. Η διαδικασία περιλαμβάνει ένα φλόγιστρο το οποίο θερμαίνει την επιφάνεια του δομικού στοιχείου, έως ότου εκείνη υπερβεί τη χαρακτηριστική θερμοκρασία ωστενιτοποίησης του χάλυβα. Έπειτα γίνεται ταχεία ψύξη του υλικού με ψεκασμό ή εμβάπτιση σε νερό ή λάδι, κατά την οποία η ωστενιτική φάση της επιφάνειας μετασχηματίζεται σε σκληρή μαρτενσιτική φάση. Τέλος, ακολουθεί ανόπτηση, με σκοπό να απομακρυνθούν τυχόν επιζήμιες εσωτερικές τάσεις και να σταθεροποιηθεί η μαρτενσιτική δομή. Κύριες τεχνικές είναι η φλογοβαφή, κατά την οποία η θέρμανση της επιφάνειας επιτυγχάνεται μέσω φλόγας, και εφαρμόζεται για την κατεργασία αντικειμένων με πολύπλοκη γεωμετρία, και η επαγωγική βαφή, η οποία χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα και δημιουργεί μεγαλύτερο βάθος βαφής από την προηγούμενη [1].

Τελευταία τεχνική επιφανειακής τροποποίησης είναι η θερμοχημική κατεργασία, κατά την οποία γίνεται εμπλουτισμός του επιφανειακού στρώματος ενός χάλυβα σε άνθρακα, άζωτο ή βόριο. Ο εμπλουτισμός γίνεται με τον μηχανισμό διάχυσης σε στερεή κατάσταση και σχετικά υψηλή θερμοκρασία, με τα επιφανειακά στρώματα της επικάλυψης να ονομάζονται «επικαλύψεις διάχυσης». Η κατεργασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση του δοκιμίου σε έναν αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας, όπου έρχεται σε άμεση επαφή με τον φορέα του στοιχείου διάχυσης, ο οποίος εισάγεται υπό τη μορφή σκόνης, αερίου ή τηγμένου άλατος. Οι συνηθέστερες κατεργασίες είναι η ενανθράκωση, η εναζώτωση, η ενανθρακαζώτωση και η βορίωση. Όλες οι προαναφερθείσες κατεργασίες είναι συμβατικές τεχνικές, ενώ μη συμβατικές είναι η εξέλιξη των συμβατικών, όπως είναι οι κατεργασίες με δέσμη laser, που αποσκοπεί σε μια εξαιρετικά λεπτόκοκκη μικροδομή, σε σκλήρυνση, και στη δημιουργία μιας επιφάνειας με υψηλή ποιότητα [1]. Άλλη μια μη-συμβατική κατεργασία, είναι η δέσμη συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας, όπου σκόνη καρβιδίων τοποθετείται πάνω σε χάλυβα και θερμαίνεται με δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας ως και το σημείο τήξης, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο μια επικάλυψη με αντοχή στη φθορά [5]. Επίσης, η κατεργασία ηλεκτρικής εκκένωσης (EDM), προσφέρει υψηλή σκληρότητα, αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση [6].

Στόχος αυτής της εργασίας, είναι η ανάλυση της τριβολογικής συμπεριφοράς χαλύβδινων δοκιμίων τα οποία επιστρώνονται με μολυβδαίνιο με τη χρήση της δέσμης συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Πρόκειται για μια καινοτόμα ανακάλυψη

καθώς η ανάγκη για χρήση των ΑΠΕ γίνεται εντονότερη και η ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται σε αφθονία στη φύση. Επίσης, η βιβλιογραφία για τη χρήση του μολυβδαινίου στα σύνθετα υλικά, είναι περιορισμένη. Μετά την εξέταση των δοκιμίων [5], προέκυψαν αισιόδοξα αποτελέσματα για την επιστήμη της μηχανικής επιφανειών, εφόσον όπως αναφέρθηκε, με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η σκληρότητα, η αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση.

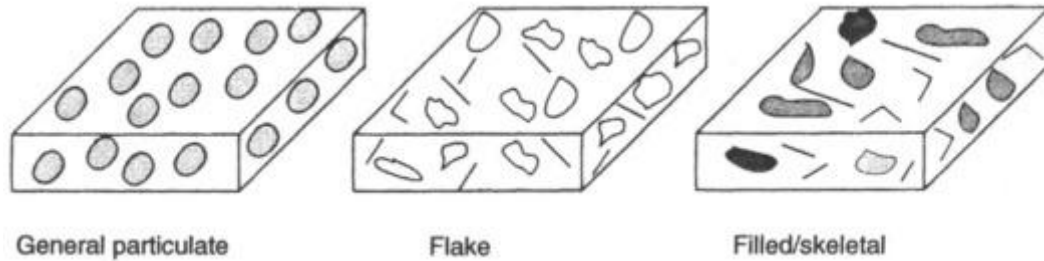
Κεφάλαιο 1 : Βιβλιογραφικό μέρος

1.1 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας με διασπορά σωματιδίων ενίσχυσης και τεχνικές παραγωγής

Σύνθετα υλικά

Ένα σύνθετο υλικό παράγεται όταν δύο ή περισσότερα υλικά ή φάσεις χρησιμοποιούνται μαζί ώστε να προκύψει ένας συνδυασμός ιδιοτήτων που διαφορετικά δεν θα ήταν δυνατό να επιτευχθούν. Γενικός κανόνας είναι, οι ιδιότητες του ενός από τα δύο υλικά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή. Το μέρος το οποίο έχει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, ονομάζεται «συστατικό ενίσχυσης», ενώ το συστατικό το οποίο έχει χαμηλότερη πυκνότητα και φροντίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του συστατικού ενίσχυσης, ονομάζεται «μήτρα» [7]. Η χρήση τους γίνεται όλο και περισσότερη στην αγορά, λόγω της μηχανικής αντοχής που προσφέρουν.

Τα υλικά αυτά, παράγονται με ενίσχυση σωματιδίων, ινών και στρωμάτων, τα οποία ονομάζονται στρωματικά σύνθετα. Τα σύνθετα υλικά με διασπορά σωματιδίων, περιέχουν μεταλλικά οξείδια διαμέτρου 10-250 nm, οποιουδήποτε σχήματος, τα οποία εισάγονται στη μήτρα με διαφορετικούς μηχανισμούς από εκείνους του μετασχηματισμού φάσης. Τα σωματίδια αυτά, συνήθως έχουν μικρή διαλυτότητα και δεν αντιδρούν χημικά με τη μήτρα, γεγονός που εμποδίζει την κίνηση διαταραχών προσφέροντας ενισχυμένη μηχανική αντοχή [3]. Συνήθως, κατασκευάζονται με βάση το αλουμίνιο, λόγω της χαμηλής του πυκνότητας, των καλών ισοτροπικών μηχανικών του ιδιοτήτων, της υψηλής του αντοχής στη διάβρωση και το κόστος του [8]. Επίσης, χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις νιφάδες (flake) και τα γεμιστά/σκελετικά (filled/skeletal). Οι νιφάδες, βρίσκονται στο σύνθετο με μεγάλες αναλογίες επιφάνειας και πάχους, αιωρούμενες σε ένα υλικό της μήτρας. Τα γεμιστά/σκελετικά, βρίσκονται σε μια σκελετική μήτρα, γεμάτη από ένα δεύτερο υλικό[9].



**Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση των σύνθετων υλικών με διασπορά σωματιδίων.
Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/particulate-composite>**

Η μήτρα, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη μορφοποίηση του σύνθετου υλικού, συνεπώς η επιλογή της, είναι ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Γενικά, μεταφέρει στο ενισχυτικό υλικό, τις μηχανικές τάσεις που ασκούνται στο σύνθετο. Βασικές ιδιότητες της μήτρας, αποτελούν η ολκιμότητα, η ανθεκτικότητα, η σχετική ευκαμψία και το σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία. Η μήτρα διακρίνεται βάσει του υλικού της, σε πολυμερική, μεταλλική και κεραμική. Το είδος που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία, είναι η μεταλλική μήτρα, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακούχων μητρών είναι 500 °C, ενώ σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες οξειδώνονται. Οι πιο διαδεδομένες μεταλλικές μήτρες κατασκευάζονται από αλουμίνιο, μαγνήσιο, τιτάνιο, με προσθήκη μετάλλων ή ιών [7]. Γενικά, η επιλογή της καταλληλότερης μήτρας, δεν γίνεται τυχαία. Η επιλογή της, γίνεται βάσει των κρυσταλλογραφικών αρχών του εκάστοτε υλικού. Δηλαδή, προτιμάται, να επιλέγονται μήτρα και ενίσχυση με μικρή διαφορά παραμέτρων πλέγματος, για να επιτυγχάνονται συνεκτικές διεπαφές, με σκοπό την καταπόνηση του πλέγματος σε δύο φάσεις[10].

Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα υλικά αυτά, ενδέχεται να έχουν χαμηλότερη μηχανική αντοχή, έναντι των παραδοσιακών σκληρυμένων με γήρανση κραμάτων τα οποία έχουν συμπαγή κατακρημνισμένη φάση. Καθώς, η αντοχή των σύνθετων υλικών μειώνεται μόνο προοδευτικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ, η αντοχή τους σε ερυσμό είναι υπέρτερη αυτής των μετάλλων και των κραμάτων.

Για να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες χρειάζεται να είναι γνωστές οι αναλογίες και οι ιδιότητες των προς ανάμειξη υλικών. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ο Νόμος των Μιγμάτων:

$$\rho_c = \sum (f_i \rho_i) = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n$$

Όπου:

ρ_c = πυκνότητα σύνθετου

$\rho_{1,2...}$ = πυκνότητες συστατικών

$f_{1,2...}$ = κλάσματα όγκου για τις αντίστοιχες πυκνότητες συστατικών

Σημαντικός παράγοντας που δεν αντικατοπτρίζεται στην παραπάνω εξίσωση είναι επίσης η συνδεσιμότητα των επί μέρους φάσεων.

Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων

Ένα σύστημα σύνθετων με ενίσχυση σωματιδίων, είναι τα συνενωμένα καρβίδια. Είναι σύνθετα που περιέχουν σκληρά κεραμικά σωματίδια, διεσπαρμένα σε μεταλλική μήτρα. Το συγκεκριμένο είδος υλικού συναντάται κυρίως σε κοπτικά εργαλεία κατασκευασμένα από καρβίδιο του βολφραμίου. Επειδή το καρβίδιο του βολφραμίου, είναι ένα δύστηκτο, σκληρό και δύσκαμπτο υλικό, συνδυάζεται με σκόνη κοβαλτίου, και θερμαίνονται έως τη θερμοκρασία τήξης του κοβαλτίου, με στόχο τη συνένωσή τους κατά την στερεοποίηση και δημιουργία τεμαχίων με αντοχή στην κρούση.

Επίσης, ένα άλλο παράδειγμα αποτελούν οι λειαντικοί και κοπτικοί τροχοί, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνα, καρβίδιο του πυριτίου ή κυβικό νιτρίδιο του βορίου. Τα συγκεκριμένα συνενώνονται μέσω υάλινης ή πολυμερικής μήτρας, για την πρόσδοση δυσθραυστότητας. Ωστόσο, τα αδαμάντινα λειαντικά, συνδέονται μεταξύ τους μέσω μεταλλικής μήτρας. Τα σκληρά σωματίδια φθείρονται, θρυμματίζονται ή εκριζώνονται από τη μήτρα, δημιουργώντας έτσι νέες κοπτικές αιχμές.

Μερικά από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Εφαρμογές επιλεγμένων ενισχυμένων με διασπορά συνθέτων [3].

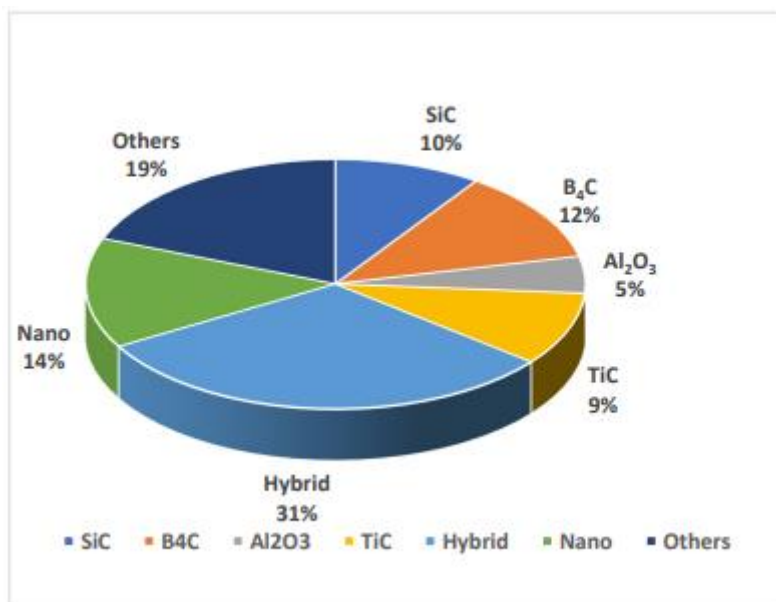
Σύστημα	Εφαρμογές
Ag-CdO	Υλικά ηλεκτρικών επαφών
Al-Al ₂ O ₃	Πιθανή χρήση σε πυρηνικούς αντιδραστήρες
Be-BeO	Αεροδιαστημική και πυρηνικοί αντιδραστήρες
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Πιθανά ανθεκτικά σε ερπυσμό μαγνητικά υλικά
Ni-20% Cr-ThO ₂	Εξαρτήματα στροβιλοκινητήρων
Pb-PbO	Δίκτυα μπαταριών

Διατίθεται μεγάλη ποικιλία μήτρας και οπλισμών, οι οποίοι προσθέτουν με τη συμβολή των κατεργασιών εξαιρετικές ιδιότητες στο εκάστοτε υλικό της μήτρας. Συνήθη υλικά της μήτρας είναι το αλουμίνιο, το μαγνήσιο ή το τιτάνιο, και για εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες το κοβάλτιο ή το κράμα κοβαλτίου-νικελίου. Πρόκειται για υλικά που επιτρέπουν τη ροή των οπλισμών σε κάθε σημείο της μήτρας, ενώ βασικές προϋποθέσεις για την επιλογή μήτρας/οπλισμού είναι α) να μην αντιδρά ο οπλισμός με τη μήτρα και β) η μήτρα να είναι ελαφρύτερη του οπλισμού. Συνηθέστερες, είναι οι μήτρες αλουμινίου, λόγω του μικρού τους κόστους, της υψηλής αντοχής τους, του ειδικού μέτρου τους, του χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής τους και του χαμηλού βάρους τους. Σκοπός της δημιουργίας σύνθετων, είναι να βελτιωθούν οι μηχανικές, θερμικές, τριβολογικές και φυσικές ιδιότητες της μήτρας αλουμινίου. Οι κεραμικοί οπλισμοί είναι κατά κόρον, το υλικό επιλογής επειδή διαθέτουν υψηλή σκληρότητα, υψηλή θερμική σταθερότητα και υψηλή αντοχή στη φθορά με έναντι του μονολιθικού αλουμινίου. Ως εκ τούτου, η ενίσχυση του αλουμινίου με κεραμικά παράγει ένα σύνθετο υλικό με καλή ολκιμότητα, υψηλή αντοχή, υψηλή ικανότητα μορφοποίησης, υψηλή θερμική αντοχή, αντοχή στη φθορά και υψηλή σκληρότητα.

Προηγμένα κεραμικά όπως αλουμίνα (Al₂O₃), νιτρίδιο αλουμινίου (AlN), ζirkόνιο (ZrO₂), καρβίδιο του πυριτίου (SiC), νιτρίδιο του πυριτίου (Si₃N₄), νιτρίδιο του βορίου (BN), καρβίδιο του βορίου (B₄C), νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), καρβίδιο του βολφραμίου (WC) και το καρβίδιο του τιτανίου (TiC) χρησιμοποιούνται για τη προσαρμογή του αλουμινίου σε συγκεκριμένες διαμορφώσεις κατάλληλες για συγκεκριμένες εφαρμογές. Επίσης, είναι γνωστό πως το αλουμίνιο είναι αφενός μεν ανθεκτικό στη διάβρωση, αφετέρου δε στο χλώριο. Συνεπώς, οι Mahesh et. al. [11], χρησιμοποίησαν μολυβδαίνιο (Mo) το οποίο είναι ανθεκτικό στην ύπαρξη χλωρίου και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως βελτιώνεται η αντίσταση στη διάβρωση λόγω της καθυστέρησης της διάδοσης χλωρίου στο αλουμίνιο.

Ωστόσο, ένα είδος οπλισμού μπορεί να μην επαρκεί για να καλυφθούν οι ανάγκες του κατασκευαστή, και κατά συνέπεια να χρειάζονται δύο ή και παραπάνω είδη οπλισμών, δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα σύνθετων. Τα πλεονεκτήματα των υβριδικών σύνθετων υλικών σε σχέση με τα συμβατικά περιλαμβάνουν ισορροπημένη αντοχή και ακαμψία, ισορροπημένη αντοχή σε κάμψη, ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, υψηλή και σταθερή θερμική αντίσταση, χαμηλό βάρος, μειωμένο κόστος, καλύτερη

αντοχή στην κόπωση, μειωμένη ευαισθησία στις εγκοπές, ενισχυμένη αντοχή σε θραύση και ικανότητα εξασθένησης ρωγμών με ενισχυμένη αντοχή στην κρούση. Οι Kareem et. al. [12] , έκαναν μια έρευνα για την κατασκευή σύνθετων αλουμινίου AA6061 με τους προαναφερθέντες οπλισμούς. Παρατήρησαν ότι η πιο διαδεδομένη τεχνική βάσει της βιβλιογραφίας, είναι τα υβριδικά σύνθετα [13],[12].



Εικόνα 1.2: Ποσοστό ερευνητικών μελετών που σχετίζονται με τύπους οπλισμού που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά AA 6061. Πηγή: *A Review on AA 6061 Metal Matrix Composites Produced by Stir Casting (nih.gov)*

Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας δημιουργούνται με διάφορους τρόπους, κάποιου από τους οποίους φαίνονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Τεχνικές δημιουργίας Σύνθετων Υλικών Μεταλλικής Μήτρας ενισχυμένα με νανοσωματίδια (MMNCs) [10].

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ MMNCs			
Κατεργασίες υγρής κατάστασης- state processes	υγρής Liquid	Κατεργασίες ημιστερεής κατάστασης -Semi-solid state processes	Κατεργασίες στερεής κατάστασης -Solid state processes
Χύτευση με ανάδευση- Stir casting			Κονομεταλλουργία - Powder metallurgies

Χύτευση με υπερήχους- Ultrasonic assisted casting	Κατεργασίες θιξοτροπίας ¹ -Thixo-processes	Μηχανική κραματοποίηση - Mechanical alloying
Τεχνικές διήθησης- Infiltration techniques	Rheo-processes	Πυροσυσσωμάτωση με μικροκύματα -Microwave sintering
Διαλυμένη εναπόθεση τήγατος -Disintegrated melt deposition		Κατεργασία ανάδευσης τριβής -Friction stir processing (FSP)
		Diffusion bonding- Συγκόλληση μέσω διάχυσης

Κατεργασίες υγρής κατάστασης-Liquid state processes

Χύτευση με ανάδευση- Stir casting

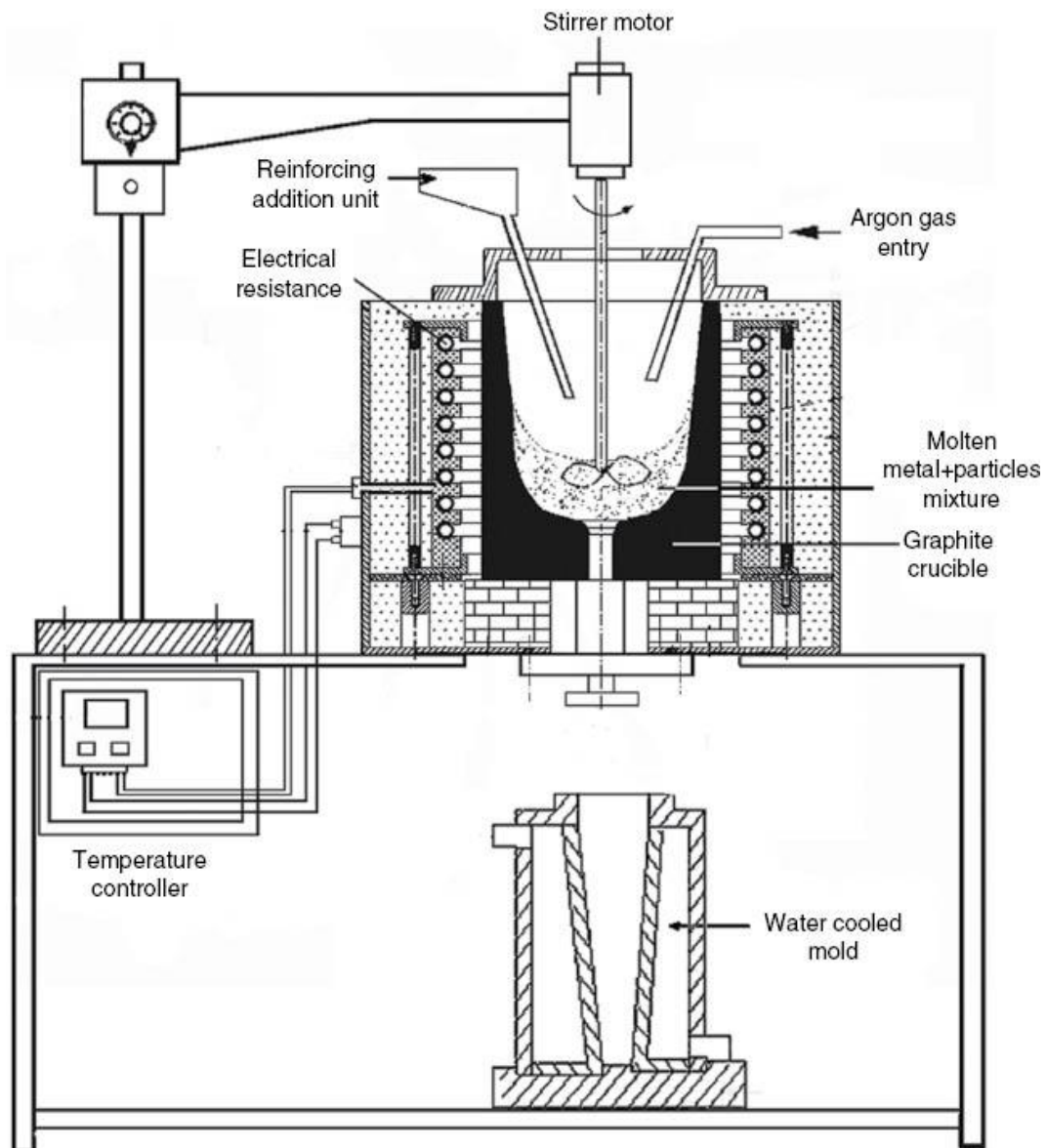
Η χύτευση με ανάδευση, γνωστή και ως «τεχνική vortex», είναι μια διαδικασία, κατά την οποία ενισχυτικές φάσεις (π.χ. κεραμικά σωματίδια ή μικρές ίνες) εισάγονται με μηχανική ανάδευση σε λιωμένο μέταλλο. Τα σωματίδια προθερμαίνονται, προστίθενται και αναμιγνύονται με το μηχανισμό ανάδευσης. Ο πολτός που σχηματίζεται θερμαίνεται ξανά μέχρι την υγρή κατάσταση. Ο αναδευτήρας, μπορεί να είναι μηχανικός, ηλεκτρομαγνητικός ή υπερηχητικός. Πρόκειται για μια οικονομική, αβίαστη και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική [14]. Χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή μεγάλων τεμαχίων, σε χαμηλό κόστος [15]. Βασικά μειονεκτήματα της διεργασίας αυτής, είναι η δυσκολία δημιουργίας η ομοιογενούς κατανομής του νανοοπλισμού. Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της χαμηλής διαβρεξιμότητας των σωματιδίων του οπλισμού στην τηγμένη μήτρα, τη συσσωμάτωση των σωματιδίων οπλισμού και τη διαφορά στην πυκνότητα των σωματιδίων οπλισμού και του τετηγμένου υλικού μήτρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια δυσμενή κατάσταση ομαδοποίησης των νανοσωματιδίων [10], [16]. Επιπλέον, ο περιστρεφόμενος αναδευτήρας εγκλωβίζει τον αέρα που οδηγεί σε υψηλό περιεχόμενο πορώδους στο

¹ Θιξοτροπία= Η ιδιότητα ενός υλικού να ελαττώνεται σημαντικά το ιξώδες του ως ρευστό, όταν διαταράσσεται η ηρεμία του.

σύνθετο και ενδέχεται να συμβούν ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις στη διεπιφάνεια μήτρας/ενίσχυσης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, τα σμήνη νανοσωματιδίων είναι χαλαρά τοποθετημένα και ο παγιδευμένος αέρας μέσα στο χώρο, μπορεί να χρησιμεύσει ως πυρήνας για τη σπηλαίωση [10].

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ομοιογένεια κατά τη στερεοποίηση του κατασκευασμένου υλικού είναι: i) η ταχύτητα και ο χρόνος ανάδευσης, ii) η γωνία της λεπίδας ανάδευσης, iii) η θερμοκρασία έκχυσης και ο ρυθμός στερεοποίησης, iv) το μέγεθος, το ποσοστό και η σχετική πυκνότητα του οπλισμού. Οι Prabu et. al., εξέτασαν την επιρροή της ταχύτητας και του χρόνου ανάδευσης στην κατασκευή του σύνθετου Al/105 SiC, και απέδειξαν πως για διάφορες ταχύτητες και χρόνους ανάδευσης η δομή και η σκληρότητα αλλάζουν. Συγκεκριμένα, επισήμαναν πως για τη συγκεκριμένη σύνθεση, η καλύτερες παράμετροι ανάδευσης, με σκοπό την επίτευξη της καλύτερης τιμής σκληρότητας και της καλύτερης κατανομής σωματιδίων, ήταν οι 600 rpm, για 10 λεπτά [16]. Επίσης, οι Deuis et. al., διαπίστωσαν πως η αύξηση της σκληρότητας των σύνθετων υλικών που περιέχουν σκληρά κεραμικά σωματίδια δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος του οπλισμού αλλά και από τη δομή του σύνθετου υλικού και την καλή σύνδεση της διεπαφής [17].

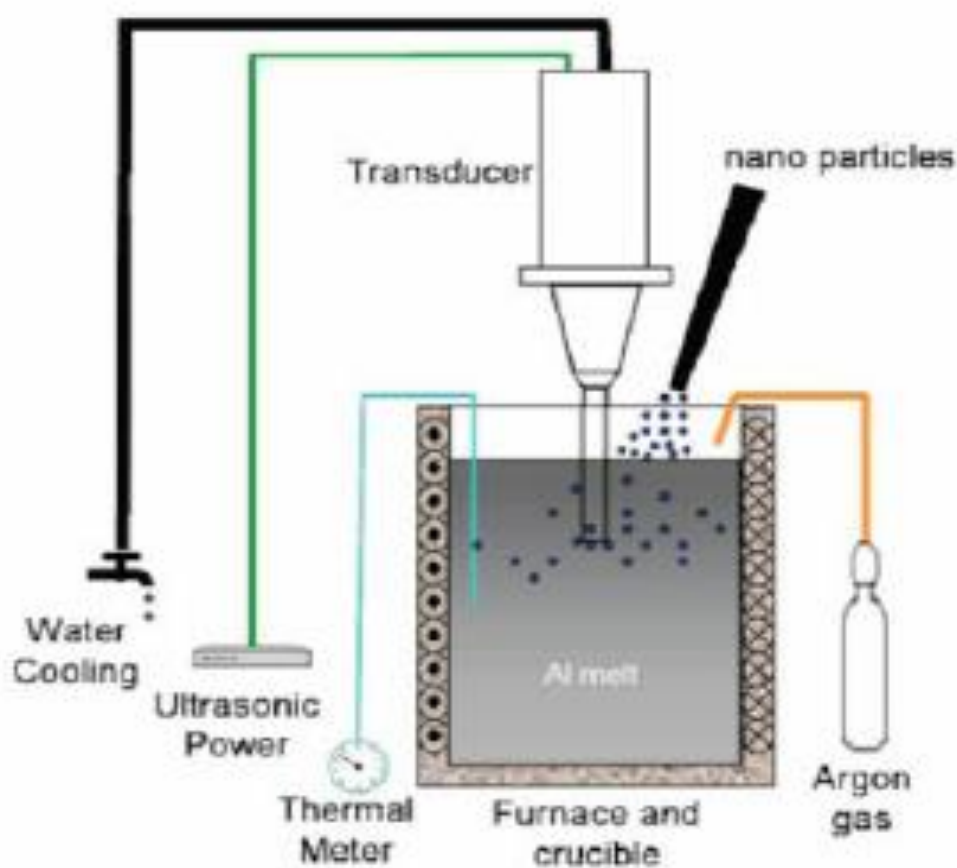
Επίσης, οι Canakci et. al., εξετάζοντας το σύνθετο με κράμα αλουμινίου (AA2024) με σωματίδια B₄C, παρατήρησαν πως με την αύξηση του κλάσματος όγκου των σύνθετων υλικών κατά το στάδιο της παραγωγής, απαιτείται ο μεγαλύτερος χρόνος προσθήκης σωματιδίων να συνδυάζεται με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων. Το επίπεδο πορώδους αυξήθηκε, καθώς αυξήθηκε η επιφάνεια επαφής σε επαφή με τον αέρα [18].



Εικόνα 1.3: Εγκατάσταση χύτευσης με ανάδευση. Πηγή: Physical and mechanical properties of stir-casting processed AA2024/B4Cp composites (degruyter.com)

Χύτευση με υπερήχους-Ultrasonic assisted casting

Η συγκεκριμένη διεργασία, είναι μια αναβαθμισμένη μορφή της προηγούμενης. Στη χύτευση με ανάδευση, η ομαδοποίηση των οπλισμών και η ύπαρξη οξειδίων, σε μερικές περιπτώσεις, ήταν αναπόφευκτες, έχοντας ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πορώδους. Αυτό συμβαίνει διότι τα μικρά σωματίδια στο τήγμα, έχουν πάντα την τάση να συγκεντρωθούν για να μειώσουν την ελεύθερη ενέργεια ολόκληρου το συστήματος. Συστάδες μικρών σωματιδίων σχηματίζονται εύκολα στα σύνθετα μεταλλικής μήτρας ενισχυμένα με σωματίδια.



Εικόνα 1.4: : Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης της χύτευσης με υπερήχους.

Πηγή: [Ultrasonic assisted cavitation setup.](#) / [Download Scientific Diagram](#) ([researchgate.net](#))

Η μηχανική ανάδευση μπορεί να διασπάσει μόνο μεγάλες ομάδες υλικών, αλλά δεν μπορεί να προσφέρει διατμητική τάση αρκετά μεγαλύτερη ώστε να διασπάσει

μικρότερες συστάδες σωματιδίων. Η ανάδευση με υπερήχους έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τον καθαρισμό, την απαέρωση και τον καθαρισμό του μεταλλικού τήγματος. Τα υπερηχητικά πεδία σε ένα υγρό προκαλούν μη γραμμικά φαινόμενα, όπως κοιλότητες και ακουστική ροή. Η ακουστική ροή είναι μια αναταραχή που εμφανίζεται κοντά σε εμπόδια ως αποτέλεσμα της απώλειας ενέργειας στα ηχητικά κύματα. Οι κοιλότητες στο υγρό εμφανίζονται ως αποτέλεσμα της παραγόμενης τάσης εφελκυσμού, από ένα ακουστικό κύμα στη φάση της αραιώσης. Αυτές οι κοιλότητες καταρρέουν υπό τη δράση των συμπιεστικών τάσεων, παράγοντας κρουστικά κύματα υψηλής έντασης στο ρευστό. Οι Gupta et. al., παράγοντας ένα σύνθετο από κράμα αλουμινίου A359/SiC, με τη συγκεκριμένη μέθοδο, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η ανάδευση με υπερήχους αποτρέπει τη συσσώρευση SiC και μειώνει τα επίπεδα πορώδους, ενώ η συνδυασμένη επίδραση της ανάδευσης με υπερήχους και του εμβολιασμού άνθρακα βελτιώνει τη σκληρότητα [19].

Οι Idrisi et. al., σύγκριναν τις κατεργασίες μηχανικής χύτευσης και της χύτευσης με υπερήχους, κατασκευάζοντας σύνθετα υλικά με προσθήκη μικροσωματιδίων SiC διαφόρων συγκεντρώσεων (3%, 5%, 8% και 10%) και μεγέθους 40 μm. Διεξήγαγαν αναλύσεις XRD, μικροδομής, δοκιμές εφελκυσμού, θλίψης, σκληρομέτρηση και μέτρηση πυκνοτήτων, και προέκυψε πως σε κάθε περίπτωση, τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν με υπερήχους, είναι υπέρτερα εκείνων που δημιουργήθηκαν με τη μηχανική ανάδευση. Η καλύτερη δομή των τεμαχίων αυτών, οφείλεται, στην καλύτερη ανάδευση των σωματιδίων και στην εξάλειψη των κενών [20].

Τεχνικές διήθησης -Infiltration techniques

Η διήθηση είναι μια τεχνική σύνθεσης σύνθετων υλικών σε υγρή μορφή, κατά την οποία μια προσχηματισμένη διεσπαρμένη φάση (κεραμικά σωματίδια, ίνες, υφαντά) εμποτίζεται σε ένα τετηγμένο μέταλλο μήτρας [15]. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το τετηγμένο μέταλλο γεμίζει τους πόρους του συμπαγούς που κατευθύνεται από μια εξωτερική δύναμη, δημιουργώντας έτσι υλικά υψηλής πυκνότητας. Η κινητήρια δύναμη μιας διαδικασίας διήθησης μπορεί να είναι είτε τριχοειδής δύναμη της διεσπαρμένης φάσης, δηλαδή χωρίς τη χρήση εξωτερικής δύναμης, (αυθόρμητη διήθηση) είτε μια εξωτερική πίεση (αέρια, μηχανική, ηλεκτρομαγνητική, φυγόκεντρη

ή υπερηχητική) που εφαρμόζεται στη φάση της υγρής μήτρας (αναγκαστική διήθηση) [21].

Το βάθος (H) και η ταχύτητα διήθησης (v) υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$H = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{\rho_{LM} \cdot g \cdot r}$$

Όπου:

H= Βάθος διείσδυσης

γ = Επιφανειακή τάση υγρού-αέρα

θ = γωνία επαφής

ρ_{LM} = πυκνότητα τετηγμένου μετάλλου

r= ακτίνα τριχοειδούς σωλήνα

$$v = \frac{r \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{\pi \cdot \eta} t$$

Όπου:

η = ιξώδες υγρού

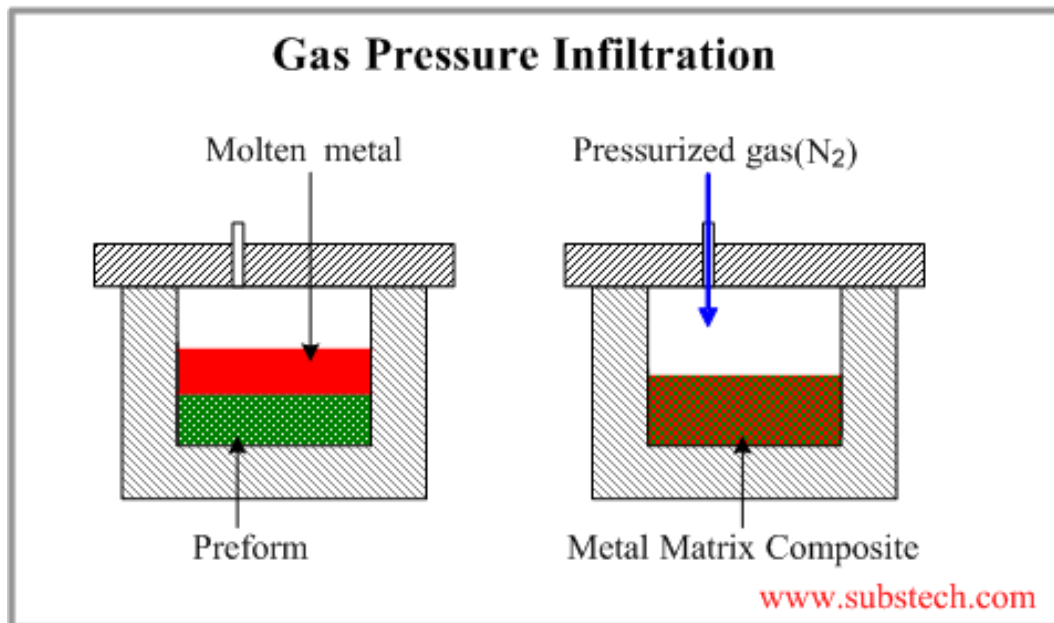
t= χρόνος διήθησης

Τα είδη της τεχνικής διείσδυσης είναι:

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διήθησης όπως η διήθηση με πίεση αερίου, η διήθηση CVD και η διήθηση με υπερήχους.

Διήθηση πίεσης αερίου-Gas pressure infiltration:

Η διήθηση με πίεση αερίου είναι μια μέθοδος εξαναγκασμένης διήθησης για την κατασκευή υγρής φάσης Σύνθετων Υλικών Μεταλλικής Μήτρας. Η διαδικασία ξεκινά με ένα προσχηματισμένο στο επιθυμητό σχήμα υλικό (π.χ. κεραμικό), και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας ένα πεπιεσμένο αδρανές αέριο για την άσκηση πίεσης στο τετηγμένο μέταλλο και την αναγκαστική διείσδυσή του σε μια προσχηματισμένη διεσπαρμένη φάση.



Εικόνα 1.5: Τεχνική διήθησης με πίεση αερίου. Πηγή: Liquid state fabrication of Metal Matrix Composites [SubsTech]

Η διαβροχή του μεταλλικού προσχήματος εξαρτάται από τη σύνθεση του κράματος, το υλικό διαμόρφωσης, τη μεταλλική επιφάνεια, την ατμόσφαιρα, τη θερμοκρασία και τον χρόνο. Η εξαιρετική γεωμετρική ακρίβεια είναι ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου. Η ζημιά στη φάση ενίσχυσης, συστολή του προπλάσματος, η παραμόρφωση της μικροδομής, η τραχύτητα των κόκκων και οι ανεπιθύμητες αντιδράσεις μεταξύ των φάσεων είναι μερικοί από τους περιορισμούς αυτής της διαδικασίας. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την παραγωγή μικρών και απλών εξαρτημάτων, όπως τα έμβολα κινητήρα. Επιπλέον, η διήθηση πίεσης αερίου χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή συρμάτων CF/Al. Σε σύγκριση με τη διήθηση υπερήχων, η διαδικασία αυτή χρειάζεται πολύπλοκο εξοπλισμό [15].

Διήθηση με υπερήχους - Ultrasonic infiltration

Η διήθηση με υπερήχους, είναι η απλούστερη για την κατασκευή των συρμάτων που είναι ενισχυμένα με συνεχείς ίνες άνθρακα σε μια μήτρα αλουμινίου (CF/Al). Η διήθηση υπερήχων έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σύνθετων υλικών Al₂O₃/Al, SiCw/Al και SiCp/Al [15].

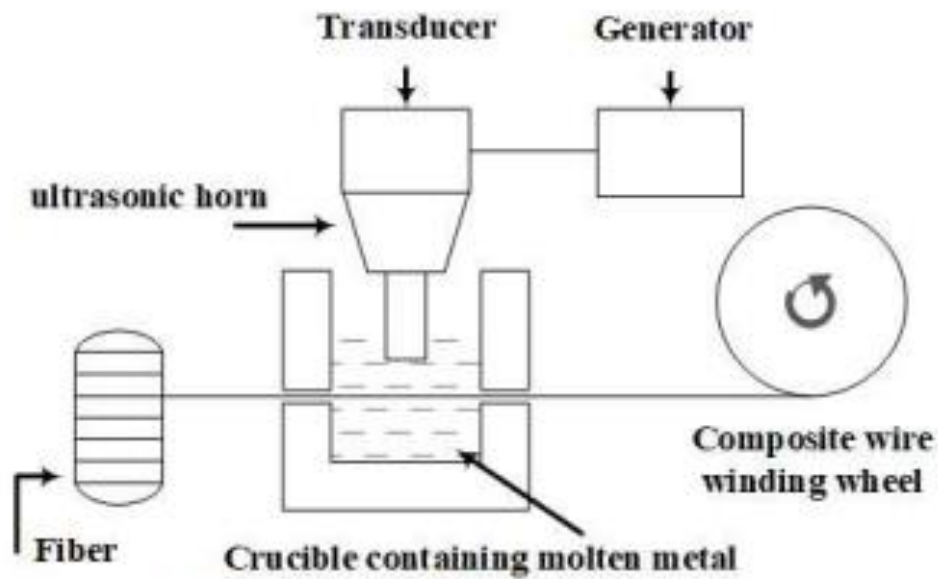


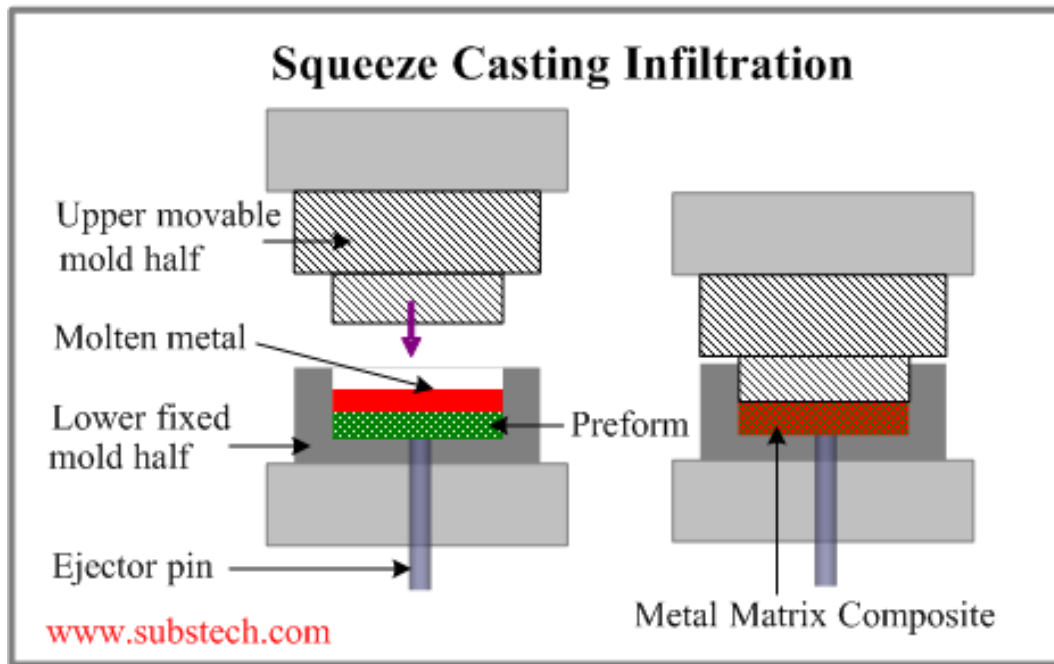
Fig 2: ultrasonic infiltration process

Εικόνα 1.6: Τεχνική διήθησης με υπερήχους. Πηγή: ResearchGate

Σε αυτή τη διαδικασία, συνεχείς ίνες εισάγονται πρώτα στο χωνευτήριο που περιέχει τηγμένο μέταλλο, μια υπερηχητική ενέργεια μεταφέρεται στο τήγμα από μια υπερηχητική δόνηση που συνδέεται με έναν μετατροπέα [15].

Διήθηση συμπιεσμένης χύτευσης- Squeeze casting infiltration

Η συγκεκριμένη τεχνική, είναι μια μέθοδος εξαναγκασμένης διείσδυσης για την κατασκευή υγρής φάσης των MMCs, χρησιμοποιώντας ένα κινητό τμήμα καλουπιού για την άσκηση πίεσης στο λιωμένο μέταλλο και την αναγκαστική διείσδυσή του σε μια εκτελούμενη διασκορπισμένη φάση, τοποθετημένη στο κάτω σταθερό τμήμα καλουπιού. Είναι παρόμοια με την τεχνική χύτευσης με συμπίεση που χρησιμοποιείται για τη χύτευση μεταλλικών κραμάτων. Η ποιότητα των προϊόντων της τεχνικής αυτής, εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο σπλισμός, η θερμοκρασία προθέρμανσης του τηγμένου μετάλλου, τα εργαλεία, η ποιότητα τήξης, τα στοιχεία του κράματος, η εξωτερική ψύξη, η πίεση και ο χρόνος. Η τεχνική αυτή δημιουργεί τεμάχια με ιδιότητες όπως η συγκολλησιμότητα, η υψηλή θερμική αγωγιμότητα, η εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας και η ακρίβεια στις διαστάσεις [15]. Παρόλα αυτά ενδέχεται να υπάρξει διαχωρισμός των φάσεων και αντίδραση μεταξύ της μήτρας/σπλισμού λόγω της αργής φύσης της διαδικασίας[22].

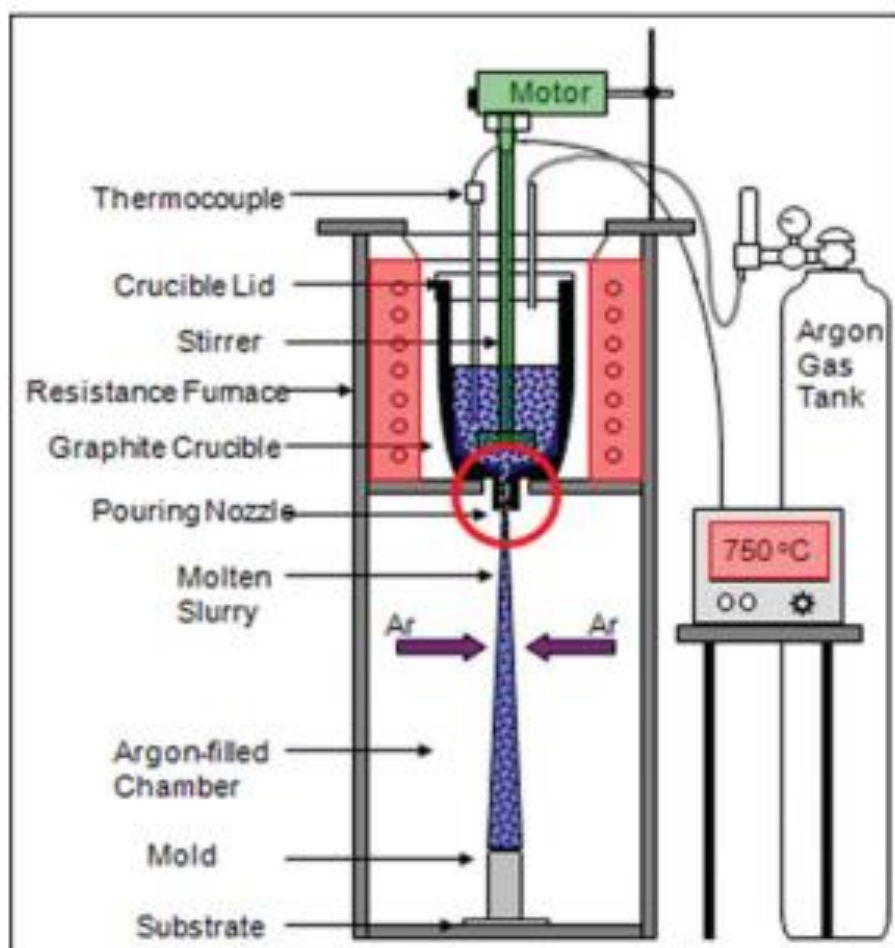


Εικόνα 1.7: Τεχνική διήθησης χύτευσης με συμπίεση. Πηγή: Liquid state fabrication of Metal Matrix Composites [SubsTech]

Σε γενικές γραμμές, η τεχνική διείσδυσης φαίνεται να είναι κατάλληλη για εξαρτήματα με πολύπλοκο σχήμα, όπου η ενίσχυση πρέπει να γίνεται επιλεκτικά σε εντοπισμένες περιοχές. Παρ' όλα αυτά, ο μεγάλος χρόνος διείσδυσης μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλό ρυθμό παραγωγής. Οι δυσκολίες που σχετίζονται με τη μεταλλουργία σκόνης αφορούν το υψηλό κόστος της σκόνης και την έκταση του πορώδους, που αναγκάζουν το υλικό να υποβληθεί σε ανάμειξη, συμπίεση και δευτερογενή επεξεργασία όπως εξώθηση, έλαση, σφυρηλάτηση ή πυροσυσσωμάτωση. Παράλληλα, απειλεί το μίγμα με μόλυνση, λόγω παγιδευμένων ακαθαρσιών, υποβαθμίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις μηχανικές του ιδιότητες [10].

Διαλυτοποιημένη εναπόθεση τήγματος -Disintegrated melt deposition

Η διαλυτοποιημένη εναπόθεση τήγματος, είναι μια μέθοδος επεξεργασίας υγρής κατάστασης. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει ανάδευση νανοσωματιδίων με προκαθορισμένη ταχύτητα και χρόνο ανάδευσης με χρήση πτερωτής όταν το μέταλλο/κράμα είναι σε τετηγμένη κατάσταση. Ο προκύπτων σύνθετος πολφός στη συνέχεια βγαίνει από τον πυθμένα ενός χωνευτηρίου, ακολουθούμενος από αποσύνθεση του τήγματος από πίδακες αδρανούς αερίου σε θερμοκρασία υπερθέρμανσης 750°C και τελικά εναποτίθεται σε μεταλλικό υπόστρωμα. Η διάσπαση του σύνθετου τήγματος, εξασφαλίζει υψηλότερο βαθμό στερεοποίησης και λεπτόκοκκη δομή [22].



Εικόνα 1.8: Σχηματική απεικόνιση της διαλυμένης εναπόθεσης τήγματος. Πηγή: Schematic of the disintegrated melt deposition technique. / Download Scientific Diagram (researchgate.net)

Η τεχνική αυτή εξασφαλίζει την αποτελεσματική εξάλειψη της εισόδου οξειδίων στα εναποτιθέμενα προϊόντα, την πλήρη χρήση του οπλισμού και υψηλότερους ρυθμούς στερεοποίησης λόγω αποσύνθεσης τετηγμένου μετάλλου από ένα αδρανές αέριο. Χαρακτηριστικά αυτής της διεργασίας είναι [22]:

- Τα συνδυασμένα πλεονεκτήματα δύο άλλων διεργασιών, αυτών της χύτευσης και του σχηματισμού ψεκασμού.
- Η εξάλειψη της ανάγκης χρήσης ξεχωριστών μονάδων τήξης και έκχυσης.
- Η αφαίρεση οξειδίων/ακαθαρσιών και η ελάχιστη σπατάλη μετάλλων.
- Η ευελιξία ενσωμάτωσης νανοσωματιδίων.
- Η μείωση καθίζησης των νανοοπλισμών στο χωνευτήριο.
- Οι υψηλές αποδόσεις διεργασίας.
- Η δημιουργία λεπτόκοκκων υλικών με ελάχιστο πορώδες.

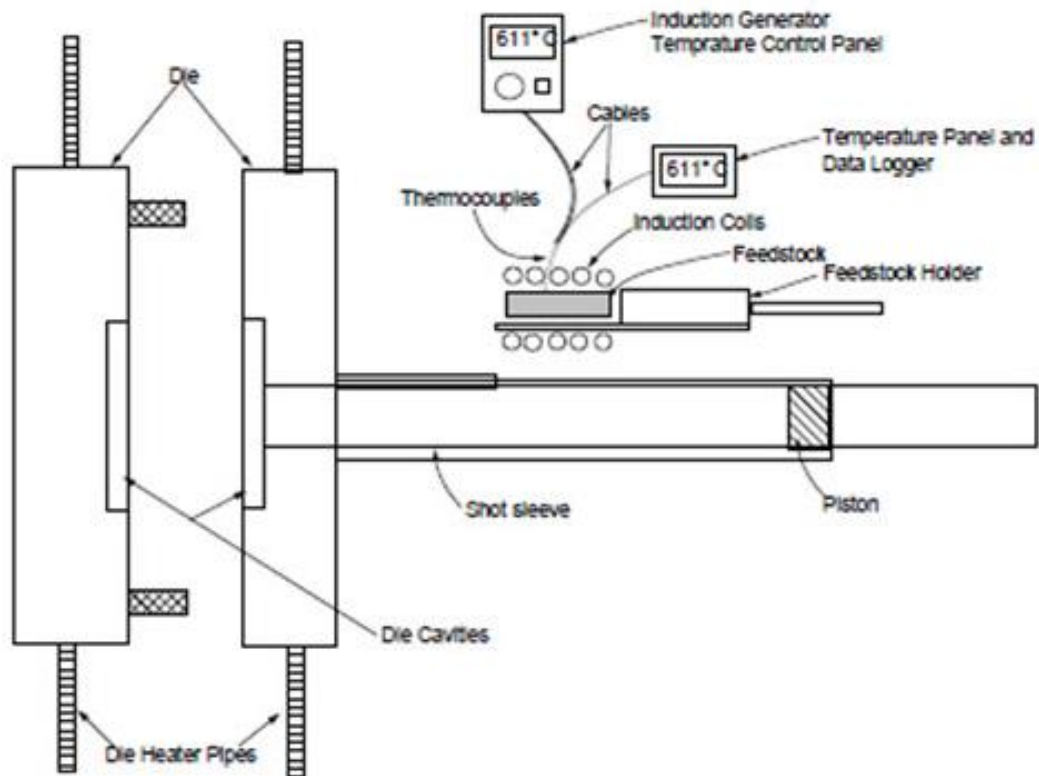
Συνήθως, μετά την διεργασία αυτή εξακολουθεί μια δευτερογενής διαδικασία, όπως η εξώθηση.

Κατεργασίες ημιστερεής κατάστασης -Semi-solid state processes

Thixocasting

Πρόκειται για την πρώτη τεχνική ημιστερεής κατάστασης. Η διαδικασία αυτή, χρησιμοποιεί ανάδευση του τήγματος κατά τη στερεοποίηση μιας συνεχούς χυτής ράβδου για να ληφθεί σφαιρική μικροδομή.

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα των τελικών προϊόντων είναι η θερμοκρασία υγρού κλάσματος/ημιστερεού, η ταχύτητα και η πίεση έγχυσης και η θερμοκρασία του καλουπιού.

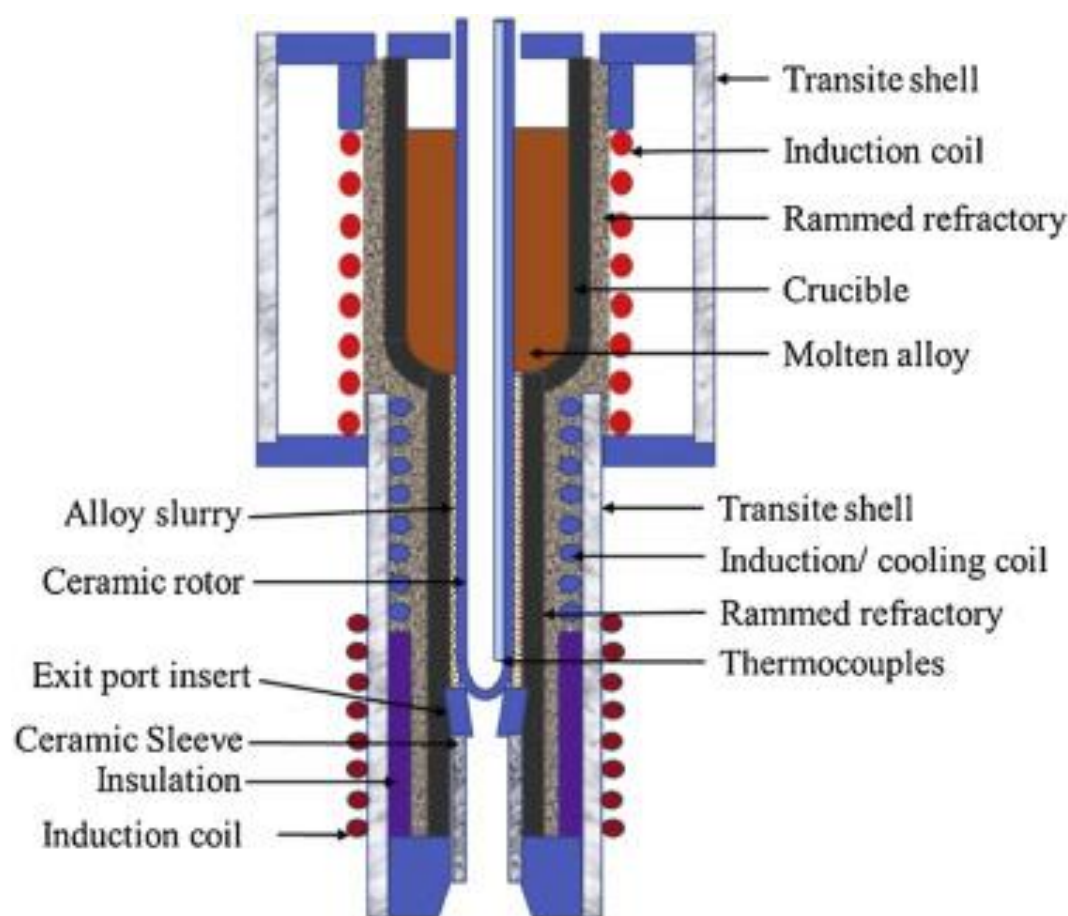


Εικόνα 1.9: Σχηματική απεικόνιση μίας πειραματικής διάταξης, για την τεχνική *thixocasting*. Πηγή: *Thixocasting :: Total Materia Article*

Η συγκεκριμένη τεχνική, παράγει προϊόντα υψηλής ποιότητας με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Βασικό μειονέκτημα, είναι το αρκετά μεγάλο κόστος παραγωγής, εξαιτίας της πρώτης ύλης. Η ράβδος που χρησιμοποιείται είναι συνήθως κατασκευασμένη από αλουμίνιο και ζυγίζει περίπου 23tn [23].

Rheocasting

Πρόκειται επίσης για μια τεχνική ημιστερεής κατάστασης, κατά την οποία, ένας ημιστερεός πολτός αναπτύσσεται από το τηγμένο κράμα μέσω διατμητικής ενέργειας. Για να εξασφαλιστεί η διαμόρφωση του επιθυμητού προϊόντος, ο προκύπτων πολτός συχνά μεταφέρεται σε μια μήτρα. Οι βασικές πτυχές που αφορούν την τεχνική της ρεοχύτευσης είναι τα εσωτερικά σκραπ, η ανακύκλωση και η εξοικονόμηση ενέργειας και το απόθεμα τροφοδοσίας όπως η ειδική ράβδος, η οποία συχνά απαιτείται για την τεχνική της θιξοχύτευσης. Η εφαρμογή πίεσης στον επιλεγμένο οπλισμό οδηγεί συχνά σε μια εξαιρετική μικροδομή σε συνδυασμό με εξαιρετικά εντοπισμένη εντατική διάτμηση που συμβάλλει με παρατηρήσιμο τρόπο στην ενίσχυση της κατανομής των ενισχυτικών σωματιδίων στην επιλεγμένη μεταλλική μήτρα του σύνθετου υλικού μετάλλου-μήτρας όπως συντίθεται[23], [24].



Εικόνα 1.10: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής rheocasting σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας. Πηγή: [Rheocasting - an overview / ScienceDirect Topics](#)

Ο οπλισμός δεν θα πρέπει μόνο να είναι σταθερός σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία αλλά και να μην αντιδρά καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ένα συστατικό χυτεύσεως υψηλής ποιότητας. Δηλαδή η τεχνική αυτή παράγει ένα υλικό χωρίς πορώδες, εξυπηρετεί την κατασκευή σύνθετων μερών, διαθέτει εξαιρετική πλήρωση μετάλλου, προσδίδει καλές μηχανικές ιδιότητες στο υλικό και καλό φινίρισμα επιφανείας. Παρόλα αυτά και αυτή η διεργασία, απαιτεί υψηλό κόστος λόγω προηγμένης τεχνολογίας [24].

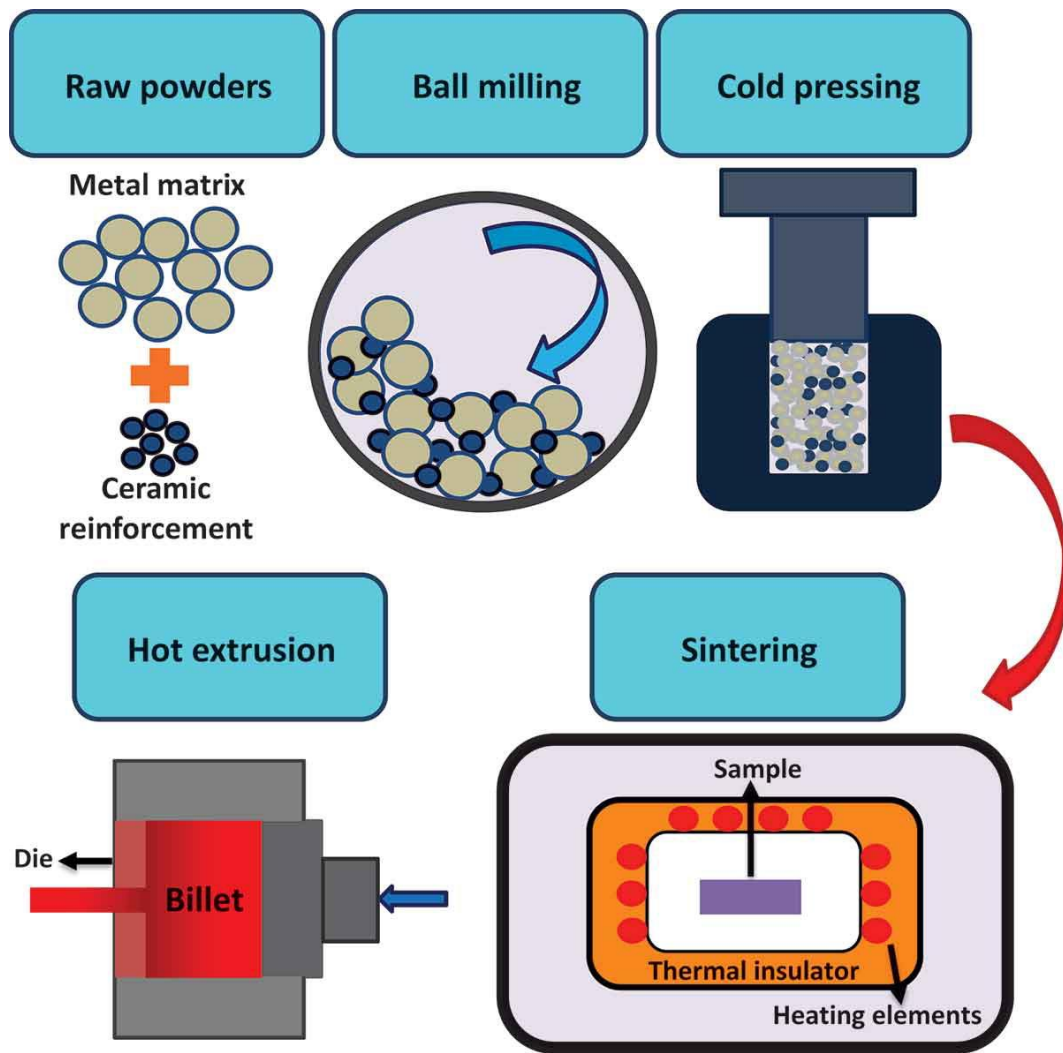
Κατεργασίες στερεής κατάστασης -Solid state processes

Κονιομεταλλουργία -Powder metallurgy

Η κονιομεταλλουργία, είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται με επιτυχία για την παρασκευή MMCs. Είναι μια τεχνολογία επεξεργασίας μετάλλων στην οποία τα εξαρτήματα παράγονται από μεταλλικές σκόνες. Ακολουθώντας μια σειρά εργασιών, οι σκόνες συμπιέζονται στο επιθυμητό σχήμα, και στη συνέχεια θερμαίνονται σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης, με σκοπό τη συγκόλληση των σωματιδίων μεταξύ τους, σε στερεά κατάσταση σε μία σκληρή μάζα. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου, είναι ότι η μήτρα και ο οπλισμός αναμειγνύονται σε στερεά κατάσταση, γεγονός που καθιστά εφικτή τη διαβροχή μεταξύ των οπλισμών και του υγρού μετάλλου, επομένως εμποδίζει τον σχηματισμό ανεπιθύμητων φάσεων [25]. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα, είναι η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας, η οποία μπορεί να αποφύγει ανεπιθύμητες διεπιφανειακές αντιδράσεις μεταξύ μήτρας και οπλισμού. Επίσης, επιτρέπει μεγάλο βαθμό ελευθερίας στην προσαρμογή της μικροδομής (π.χ. κλάσμα όγκου, μέγεθος και μορφολογία του οπλισμού) [26]. Επιπροσθέτως, η διαδικασία αυτή επιτρέπει σε ένα μεγάλο κλάσμα βάρους σωματιδίων, να ενσωματωθεί στο υλικό, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συστήματα παραγωγής παρτίδας, όπως είναι οι αυτοκινητοβιομηχανίες [27]. Μειονέκτημα αυτής της κατεργασίας, είναι ο διαχωρισμός των σωματιδίων κατά τη διαδικασία ανάμειξης, ο οποίος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής μεταξύ της μεταλλικής σκόνης και των σωματιδίων οπλισμού, και την τάση της ομαδοποίησης των σωματιδίων η οποία ελαχιστοποιεί την επιφανειακή τους ενέργεια. Τα χαρακτηριστικά

ροής των σωματιδίων μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη λιπαντικών. Τα σωματίδια λαμβάνονται σε διάφορες μορφές όπως σφαιρικά, στρογγυλεμένα, ακανόνιστα, πορώδη και γωνιακά. Το σχήμα των σωματιδίων εξαρτάται από τη μέθοδο παραγωγής σκόνης [25].

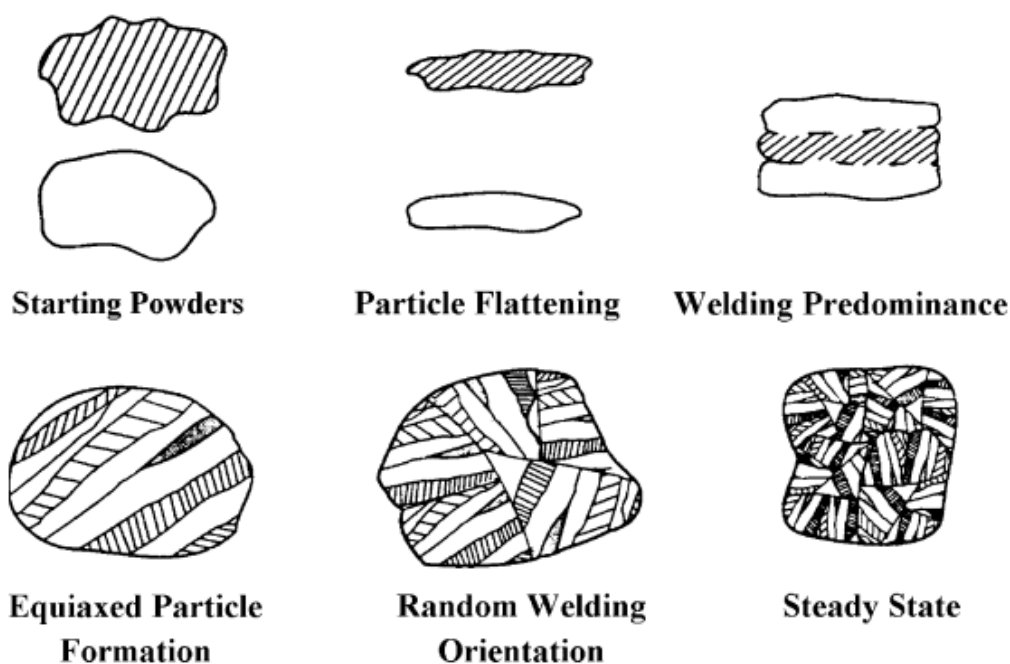
Οι Vijaya et. al., αναφέρουν πως στην κονιομεταλλουργία, είναι δυνατό να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή του οπλισμού στη μήτρα και καλύτερος έλεγχος της μικροδομής. Σε αντίθεση με άλλες διαδικασίες κατασκευής MMCs, όπου η συσσωμάτωση των σωματιδίων είναι το κύριο πρόβλημα στην κατασκευή από σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας ενισχυμένα με σωματίδια. Ένα τμήμα της κονιομεταλλουργίας, περιλαμβάνει μηχανική ανάμειξη κατά την οποία χρησιμοποιείται μια διαδικασία άλεσης με σφαίρα υψηλής ενέργειας όπου συμβαίνει η ψυχρή συγκόλληση, η θραύση και η επανασυγκόλληση των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, αυτή η τεχνική είναι η μηχανική κραματοποίηση και είναι ευνοϊκή κατά την παραγωγή των σύνθετων υλικών που ενισχύονται από κεραμικά σωματίδια νανομεγέθους για τη διάσπαση των συσσωματωμάτων και την ομοιογενή κατανομή των ενισχύσεων σε όλη τη μήτρα. Η ταχύτητα περιστροφής, ο χρόνος άλεσης καθώς και η αναλογία σφαίρας/σκόνης είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους κατά τη διάρκεια της άλεσης με μπίλια [25],[27].



Εικόνα 1.11: Σχηματική απεικόνιση κονομεταλλουργίας. Πηγή: Πλήρες άρθρο: Προσσωμάτωση μικροκυμάτων κεραμικών ενισχυμένων σύνθετων μεταλλικών μήτρας και οι ιδιότητές τους: μια ανασκόπηση (tandfonline.com)

Μηχανική κραματοποίηση -Mechanical alloying

Η μηχανική κραματοποίηση, είναι μια διεργασία όπου ένα μείγμα σκόνης τοποθετείται σε ένα μύλο με σφαιρίδια και υπόκειται σε σύγκρουση υψηλής ενέργειας από τις σφαίρες. Η διαδικασία πραγματοποιείται συνήθως σε αδρανή ατμόσφαιρα. Περιλαμβάνει μεταφορά υλικού για να ληφθεί ένα ομοιογενές κράμα μέσω επαναλαμβανόμενων μηχανισμών παραμόρφωσης/συγκόλλησης/θραύσης [28]. Πρόκειται για μια εναλλακτική τεχνική για την παραγωγή σωματιδίων μεταλλικής και κεραμικής σκόνης σε στερεή κατάσταση. Τα δύο πιο σημαντικά γεγονότα που εμπλέκονται στη διεργασία, είναι η επαναλαμβανόμενη συγκόλληση και θραύση του μίγματος σκόνης. Η διαδικασία κραματοποίησης μπορεί να συνεχιστεί μόνο εάν ο ρυθμός συγκόλλησης εξισορροπεί αυτόν της θραύσης και το μέσο μέγεθος σωματιδίων της σκόνης, παραμένει σχετικά χονδροειδές [29].

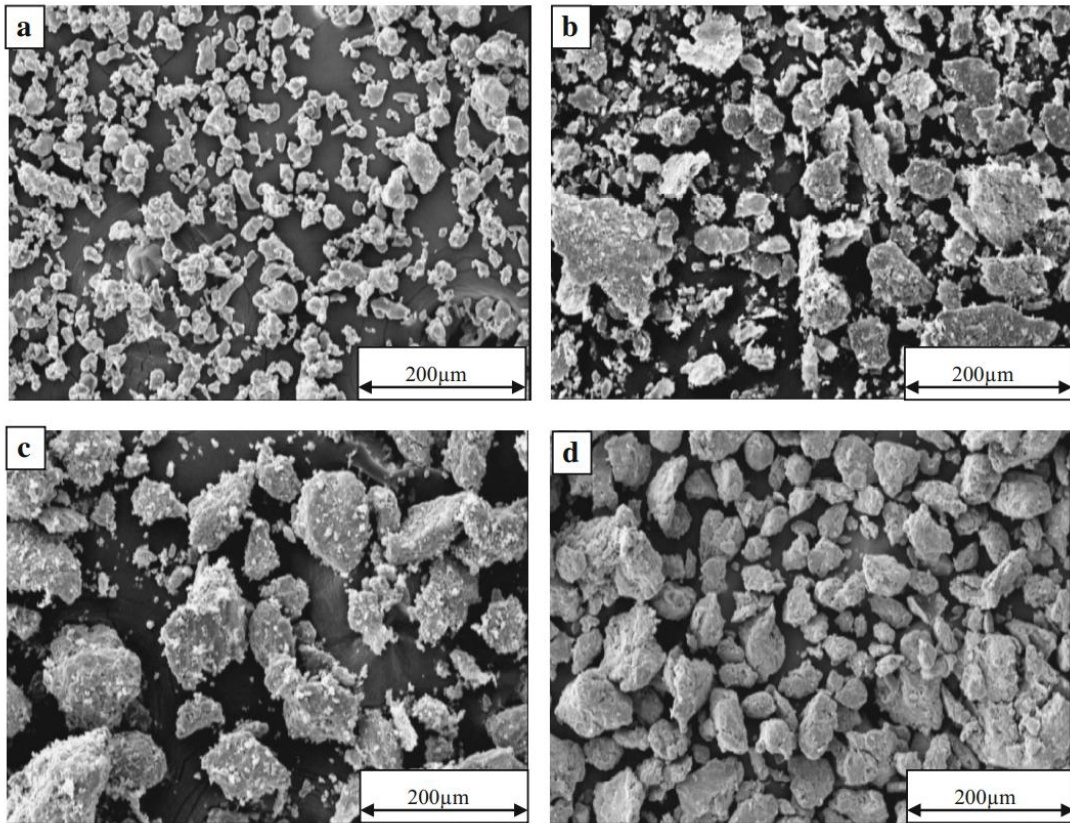


Εικόνα 1.12: Σχηματική απεικόνιση σταδίων μηχανικής κραματοποίησης, με την ανάμειξη δύο όγκιμων υλικών. Πηγή: Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders - ScienceDirect

Οι Aikin και Courtney, δημιούργησαν την παραπάνω εικόνα, με σκοπό να εξηγήσουν τα στάδια της μηχανικής κραματοποίησης δύο όλκιμων υλικών, βάσει των περιγραφών του Benjamin- ο οποίος ανακάλυψε την τεχνική αυτή [28], [29]. Αρχικά, τα σωματίδια υφίστανται παραμόρφωση και η μορφολογία τους αλλάζει από ισοαξονική σε πεπλατυσμένη. Το επόμενο στάδιο αφορά τον μηχανισμό συγκόλλησης προκαλώντας τον σχηματισμό ισοαξονικών σωματιδίων. Σε αυτό το σημείο, οι μηχανισμοί συγκόλλησης και θραύσης φτάνουν στην ισορροπία και στο σχηματισμό σωματιδίων με τυχαίο προσανατολισμό συγκόλλησης. Ο μηχανισμός σύγκρουσης δημιουργεί νιφάδες και νέες επιφάνειες επειδή τα μαλακά σωματίδια έχουν την τάση να συγκολλούνται μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα, το μέγεθος των σωματιδίων είναι μεγαλύτερο από το αρχικό [30]. Στο τελικό στάδιο, λαμβάνει χώρα η διαδικασία σταθερής κατάστασης, στην οποία η μικροδομική τελειοποίηση μπορεί να συνεχιστεί, όμως το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων παραμένουν ίδια.

Οι Pakseresht et. al., δημιούργησαν ένα σύνθετο υλικό (Al/2.5% SiC) με την τεχνική αυτή και προέκυψαν τα μορφολογικά αποτελέσματα της Εικόνας 1.13 [31]. Μετά από άλεση για 15 ώρες, τα σωματίδια Al ενσωματώνονται σε σχήμα τηγανίτας με μια διαδικασία μικροσφυρηλάτησης (Εικ. 2β), ενώ τα σωματίδια SiC θρυμματίζονται. Στο επόμενο στάδιο, αυτά τα πεπλατυσμένα σωματίδια συγκολλούνται εν ψυχρώ και σχηματίζουν ένα σύνθετο, που περιλαμβάνει θραυσμένα σωματίδια SiC τα οποία τείνουν να αποφράσσονται από τα στρώματα Al και παγιδεύονται σε αυτά. Μετά από 25 ώρες άλεσης, η σκληρότητα και κατά συνέπεια η ευθραυστότητα αυξάνεται και τα σωματίδια κατακερματίζονται με αποτέλεσμα να σχηματίζονται σωματίδια με πιο ισοαξονικές διαστάσεις που είναι σημάδια επίτευξης σταθερής κατάστασης άλεσης (Εικ. 2δ)[31].

Συμπερασματικά, και στην μηχανική κραματοποίηση, το μέγεθος σωματιδίων, το οποίο εξαρτάται από το υλικό και τον χρόνο άλεσης, και το κλάσμα όγκου, έχουν εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού μεταλλικής μήτρας ενισχυμένου με σωματίδια.



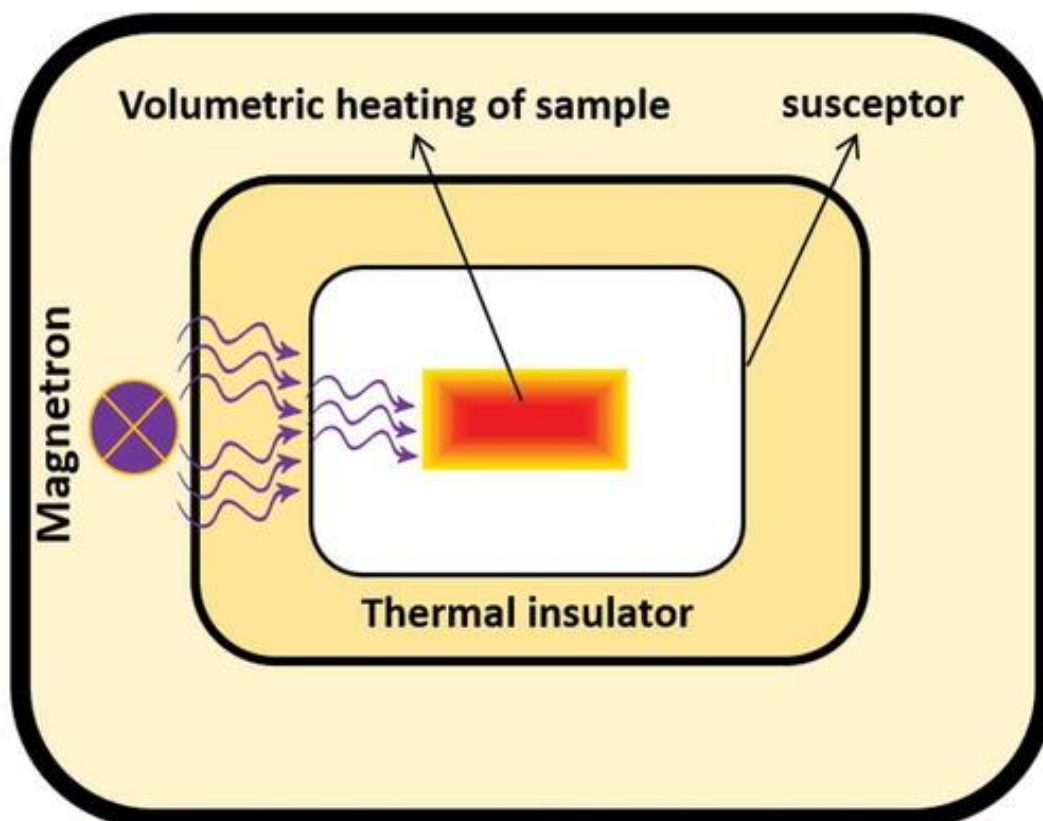
Εικόνα 1.13: Η εξέλιξη της μορφολογίας του σύνθετου Al/2.5wt.% SiC κατά τη διάρκεια της μηχανικής κραματοποίησης για διάρκεια: a) 2h, b)15h, c)20h και d)25h. Πηγή: Role of Different Fractions of Nano-size SiC and Milling Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-SiC Nanocomposites / SpringerLink

Πυροσυσσώματωση με μικροκύματα -Microwave sintering

Η πυροσυσσώματωση, είναι μια μέθοδος η οποία ακολουθείται μετά την μηχανική κραματοποίηση, με σκοπό τη συγκόλληση των στερεών σωματιδίων και τη δημιουργία μιας ομοιόμορφης δομής. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει θέρμανση του υλικού κοντά στη θερμοκρασία τήξης. Πολλές μέθοδοι έχουν επίσης εφευρεθεί για την επίτευξη αυτού του σκοπού, όπως η διπλή πυροσυσσώματωση διπλής πίεσης (DPDS), η θερμική πίεση (HP), η πυροσυσσώματωση πλάσματος σπινθήρων (SPS), η πυροσυσσώματωση με λέιζερ και η πυροσυσσώματωση με μικροκύματα (MW).

Είναι προτιμότερη η πυροσυσσώματωση με μικροκύματα έναντι της συμβατικής, εξαιτίας του μεγάλου ενεργειακού και οικονομικού κόστους που χρειάζεται για την

εκπόνηση της δεύτερης. Αναλυτικότερα, χρειάζονται πολλά θερμαντικά στοιχεία, πυρίμαχα υλικά, καύσιμα και χρήση των κλιβάνων σε υψηλές θερμοκρασίες, για αρκετή ώρα. Ωστόσο, με τη μέθοδο των μικροκυμάτων, η ενέργεια μεταφέρεται κατευθείαν στο υλικό, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον χρόνο κατεργασίας. Επίσης, γίνεται πιο ομοιόμορφα η κατανομή των κόκκων και δημιουργείται ένα πυκνότερο σώμα.



Εικόνα 1.14: Σχηματική απεικόνιση μιας καμίνου μικροκυμάτων. Πηγή: Πλήρες άρθρο: Πυροσυσσωμάτωση μικροκυμάτων κεραμικών ενισχυμένων σύνθετων μεταλλικών μήτρας και οι ιδιότητές τους: μια ανασκόπηση (tandfonline.com)

Ωστόσο, η μέθοδος MW, ενδέχεται να δημιουργήσει αστάθειες στο υλικό, λόγω την υψηλών θερμοκρασιών. Γι' αυτόν τον λόγο, προτιμάται μια υβριδική μέθοδος πυροσυσσωμάτωσης που περιλαμβάνει αμφίδρομη θέρμανση [32]. Επίσης, ενδέχεται να δημιουργήσει περιορισμένη πυκνότητα πυροσυσσωμάτωσης, και ενδιάμεση μόλυνση. Εξαιτίας αυτών δημιουργείται ανομοιόμορφη μικροδομή με εκλέπτυνση των κόκκων, υποβαθμίζοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του στοιχείου [10].

Οι Alem et. al. συγκέντρωσαν σε έναν πίνακα τις διάφορες μεθόδους πυροσυσσωμάτωσης:

Πίνακας 1.3: Είδη πυροσυσσωμάτωσης[32].

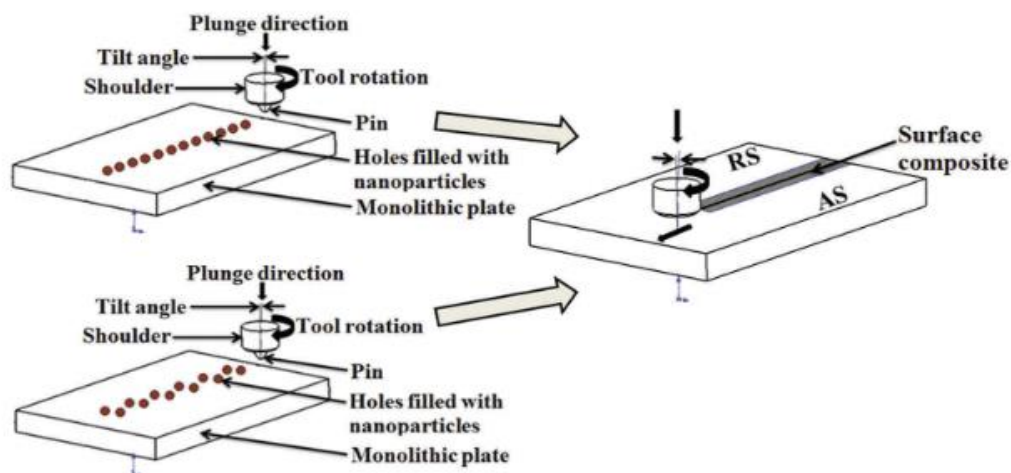
Μέθοδος	Ρυθμός θέρμανσης/χρόνος εμποτισμού	Χρήση πίεσης	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Συμβατική	Αργός	Όχι	Απλός εξοπλισμός	Υψηλό επίπεδο πορώδους, ανάπτυξη κόκκων και χαμηλή μηχανική απόδοση ως αποτέλεσμα διατήρησης για μεγάλο χρονικό διάστημα σε υψηλή θερμοκρασία.
Θερμή πίεση	Μέτριος	Ναι	Μείωση χρόνου κατεργασίας, υψηλότερη πυκνότητα, καλύτερες ιδιότητες.	Υψηλό κόστος εξοπλισμού, ανεπιθύμητη αντίδραση καλουπιού/υλικού. Δύσκολη ανάπτυξη κόκκων.

Λείζερ	Γρήγορος	Όχι	Μεγάλη πυκνότητα, λεπτόκοκκη δομή, φιλικό προς το περιβάλλον	Πολύπλοκος και πολύ ακριβός εξοπλισμός, τραχιά επιφάνεια, εγκλείσματα οξειδίων, διατήρηση της τάσεων.
Πλάσμα	Γρήγορος	Ναι	Μεγάλη πυκνότητα, λεπτόκοκκη δομή, ομοιόμορφη κατανομή οπλισμών, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τη μέθοδο MW.	Ανεπιθύμητη αντίδραση καλουπιού/υλικού , πολύπλοκος και πολύ ακριβός εξοπλισμός, περιορισμοί στις διαστάσεις
Μικροκυμάτω ν	Πολύ γρήγορος	Όχι	Μεγάλη πυκνότητα, λεπτόκοκκη δομή, εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας, ομοιόμορφη κατανομή οπλισμών.	Πολύπλοκος και πολύ ακριβός εξοπλισμός, περιορισμοί στις διαστάσεις

Κατεργασία ανάδευσης τριβής-Friction stir processing (FSP)

Η κατεργασία ανάδευσης τριβής, είναι μια τεχνική επεξεργασίας υλικού, η οποία αναπτύχθηκε το 1999 και προέρχεται από τη συγκόλληση με τριβή ανάδευσης (Friction Stir Welding). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί τοπική πλαστική παραμόρφωση περιστρέφοντας έναν εξειδικευμένο πείρο μέσα στο τεμάχιο εργασίας. Όσο ο πείρος βυθίζεται στο υπόστρωμα, η επεξεργασμένη περιοχή υφίσταται τοπική θέρμανση τριβής, μαλακώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το υλικό και βελτιώνοντας τις διάφορες ιδιότητές του. Η κεφαλή αυτή, ποικίλλει σε γεωμετρία, και υλικά, αναλόγως τη χρήση. Οι Khojastehnezhad et. al., ανέφεραν ότι πείροι με τετραγωνικό και τριγωνικό προφίλ οδήγησαν σε καλύτερη ανάδευση [10]. Υποχρεωτικά χαρακτηριστικά του πείρου, είναι η υψηλή σκληρότητα, αντοχή στη φθορά και η αντοχή θερμικής κόπωσης. Για παράδειγμα, για κατεργασία χάλυβα, τα καταλληλότερα υλικά, είναι το βολφράμιο και το μολυβδαίνιο. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιείται για βελτίωση της ροής υλικού ή αύξηση της θερμότητας τριβής και της πλαστικής παραμόρφωσης κατά μήκος της επεξεργασμένης περιοχής [33]. Αυτή η επεξεργασία στερεάς κατάστασης αποφεύγει το πορώδες υδρογόνου και τις διαμεταλλικές ενώσεις που ενδέχεται να προκύψουν κατά την κατασκευή κραμάτων αλουμινίου με υγρή επεξεργασία. Επίσης, διεγείρει τη δημιουργία λεπτών κόκκων στη ζώνη ανάδευσης με δυναμική ανακρυστάλλωση (DRX). Λόγω των θερμομηχανικών συνθηκών, δηλαδή υψηλή παραμόρφωση, θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης, η διαδικασία δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων με ή χωρίς την προσθήκη κατάλληλου οπλισμού[10]. Είναι μια διεργασία η οποία είναι προσιτή οικονομικά και ενεργειακά, έναντι άλλων κατεργασιών επιφανειακής μηχανικής [34].

Η διαδικασία περιλαμβάνει σημαντική πλαστική παραμόρφωση και ροή ιξωδοπλαστικού υλικού στη ζώνη ανάδευσης. Πρόκειται για μια εναλλακτική διεργασία ενσωμάτωσης σωματιδίων οπλισμού στη μεταλλική μήτρα για τη διαμόρφωση επιφάνειας, καθώς και χύδην σύνθετων υλικών. Ως αποτέλεσμα, το αναδεδυμένο υλικό μπορεί να γίνει σύνθετο ή ένα διαμεταλλικό κράμα με βελτιωμένες μηχανικές και/ή φυσικές, θερμικές, ηλεκτρικές ιδιότητες. Η ανάδευση στη στερεά κατάσταση βοηθά περαιτέρω στην ανάμειξη, τη διανομή αυτών των σωματιδίων και/ή των δευτέρων φάσεων στη μήτρα.



Εικόνα 1.15: Κατασκευή Σύνθετου Υλικού Μεταλλικής Μήτρας με ενίσχυση νανοσωματιδίων με FSP. Πηγή: <https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/10426914.2019.1605181?scroll=top&needAccess=true&role=tab>

Το επιθυμητό αποτέλεσμα μπορεί να ληφθεί με μικρορύθμιση των παραμέτρων της διαδικασίας. Τα σωματίδια ενίσχυσης, μπορούν να προστεθούν επιτόπου, ή εκτός θέσης. Στη μη επιτόπια προσέγγιση, η ενίσχυση προστίθεται στο υλικό της μήτρας. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής το υλικό της μήτρας ενδεχομένως να διαθέτει πορώδες, μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου, συσσώρευση σωματιδίων, κακή συνδεσιμότητα, διαβρεξιμότητα και ανεπιθύμητη διεπιφανειακή αντίδραση. Ωστόσο, η επί τόπου προσέγγιση περιλαμβάνει τη δημιουργία επιθυμητών οπλισμών κατά τη διάρκεια της ίδιας της διαδικασίας και το διαμεταλλικό που προκύπτει είναι θερμοδυναμικά σταθερό.

Επιπλέον, παρατηρείται ότι η ανάμειξη και η διασπορά του οπλισμού είναι συνήθως καλύτερη, λόγω της υψηλής πυκνότητας μετατόπισης η οποία οφείλεται στην πλαστική παραμόρφωση. Οι παράμετροι της κατεργασίας, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του δομικού στοιχείου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, πρόκειται για την ταχύτητα διέλευσης και περιστροφής εργαλείου, την αξονική δύναμη, τη γωνία κλίσης εργαλείου, το βάθος και τη γεωμετρία του εργαλείου. Πιο συγκεκριμένα, ένας συνδυασμός υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής και χαμηλότερης ταχύτητας διέλευσης έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη εισροή θερμότητας, ανάδευση υλικού και βελτίωση της κατανομής των σωματιδίων. Ενώ, χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής και υψηλότερη ταχύτητα διέλευσης τείνουν να αυξήσουν τη δημιουργία αξονικών

δυνάμεων. Αναλυτικότερα, η αύξηση του αξονικού φορτίου αυξάνει την τριβή μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου εργασίας και έτσι αυξάνει την παραγωγή θερμότητας. Το αξονικό φορτίο δημιουργεί σημαντική επίδραση στην προκύπτουσα σκληρότητα και μηχανική αντοχή των σύνθετων επιφανειών. Η γωνία κλίσης του εργαλείου μειώνει τη φθορά του εργαλείου μαζί με τη δύναμη αντίδρασης από την τριβή. Εκτός από αυτό, η παροχή γωνίας κλίσης εργαλείου επιτρέπει την εύκολη διείσδυση και κίνηση του εργαλείου στην επιθυμητή κατεύθυνση. Η γωνία κλίσης του εργαλείου επηρεάζει τη διασπορά των σωματιδίων του οπλισμού στη μήτρα. Η διάσταση του εργαλείου περιλαμβάνει το ύψος του πείρου, τη διάμετρο του πείρου και τη διάμετρο της κεφαλής. Αυτή η διάσταση του εργαλείου κυριαρχεί στο βάθος μαζί με το πλάτος των σύνθετων επιφανειών. Πιο συγκεκριμένα, οι διαστάσεις του πείρου εργαλείου διέπουν τη δράση ανάδευσης που απαιτείται για την κατασκευή σύνθετων επιφανειών. Το προφίλ του πείρου εργαλείου επηρεάζει την ποιότητα των σύνθετων επιφανειών ελέγχοντας την ανάμειξη των σωματιδίων οπλισμού με τη μήτρα και κατανέμοντας την παραγόμενη θερμότητα ομοιόμορφα. Τέλος, ο αριθμός των περασμάτων φροντίζει για τη βελτίωση των κόκκων, την ομοιογενή κατανομή των σωματιδίων οπλισμού, το σπάσιμο των συστάδων των σωματιδίων οπλισμού, την πλήρωση του κενού και άλλα ελαττώματα επεξεργασίας [35]. Οι Li et. al., ανέφεραν ότι η κατανομή των σωματιδίων μπορεί να επηρεαστεί και από την πρόωση περιστροφή του εργαλείου. Πρότειναν βήμα συγκόλλησης 0,5-0,75 φορές μεγαλύτερο των οπών που έχουν δημιουργηθεί, για την τοποθέτηση της σκόνης των νανοσωματιδίων [34].

Εν κατακλείδι, πρόκειται για μία διεργασία η οποία προσφέρει λύση σε πολλά προβλήματα που δημιουργούνται σε μηχανολογικές εφαρμογές. Η τεχνική αυτή, χρησιμοποιείται αρκετά συχνά, για την κατασκευή σύνθετων υλικών, με αλουμίνιο ως κύριο υλικό μήτρας, σε εφαρμογές αμυντικής σημασίας, κυρίως σε αεροπορία και ναυτικό [10].

1.2 Επιφανειακά στρώματα σύνθετων υλικών με διασπορά σωματιδίων και επικαλύψεις

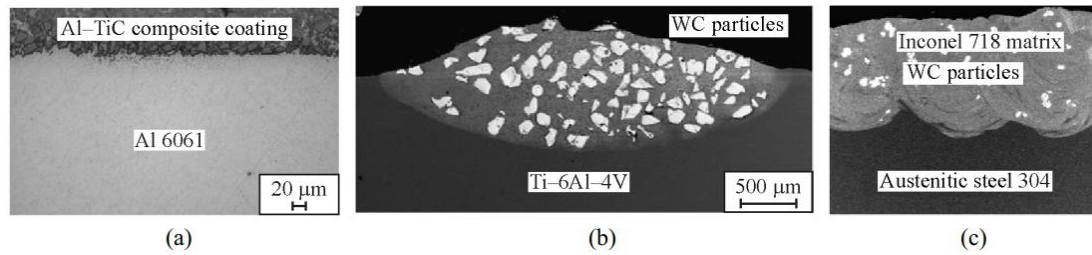
1.2.1 Επικαλύψεις

Με τον όρο «επίστρωση ή επικάλυψη» καλούνται οι επιφανειακές κατεργασίες, κατά τις οποίες υλικό διαφορετικής χημικής σύστασης από το μέταλλο βάσης, με ιδιότητες τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού αντικειμένου εναποτίθεται σχηματίζοντας επιπρόσθετο στρώμα [1]. Όλα τα προϊόντα, θα έχουν κάποια μειονεκτήματα ή αδυναμίες, οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν, με επιφανειακές τροποποιήσεις όπως η βαφή, οι θερμικές κατεργασίες και οι επικαλύψεις. Οι τελευταίες, παίζουν σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του κάθε στοιχείου. Επιστρώσεις χρησιμοποιούνται για προστασία, ενίσχυση ή διακόσμηση. Βασική διαφορά των επικαλύψεων και των επιφανειακών κατεργασιών, είναι ότι στις τελευταίες το εξωτερικό στρώμα του υλικού είναι αυτό που τροποποιείται, ενώ οι πρώτες τοποθετούνται πάνω σε ένα μέταλλο βάσης, χωρίς καμία επιρροή στις ιδιότητές του. Συνήθως, επικαλύπτεται το εξωτερικό μέρος ενός μετάλλου, με σκοπό την ενίσχυση των ιδιοτήτων και την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών στρωμάτων του.

Εφόσον, όπως αποδεικνύεται, η κατασκευή σύνθετων υλικών προσφέρει νέες ιδιότητες που δεν επιτυγχάνονταν διαφορετικά, γεννήθηκε και η ιδέα της ενίσχυσης της επιφάνειας με επιστρώσεις σύνθετων υλικών. Αυτός ο τύπος επίστρωσης αποτελείται από μια μήτρα μετάλλου ή κράματος μετάλλων που περιέχει νανοπληρωτικά οξειδία μετάλλων, καρβίδια ή άλλα οργανικά υλικά ως δευτερεύουσα φάση. Τα υλικά δευτερογενούς φάσης που ενσωματώνονται στη μεταλλική μήτρα έχουν γενικά τη μορφή εξαιρετικά λεπτών νανοσωματιδίων ή νανοσυρμάτων των οποίων οι ιδιότητες μπορούν να επηρεάσουν τις προκύπτουσες ιδιότητες και τις εφαρμογές των κατασκευασμένων επικαλύψεων. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα νανοπληρωτικά σε νανοςύνθετες επικαλύψεις μεταλλικής μήτρας είναι κεραμικά νανοσωματίδια όπως SiC , Cr_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 και CeO_2 . Επίσης, γίνονται έρευνες για τη χρήση του μολυβδαινίου (Mo) ως κύριο υλικό επικάλυψης ή σε συνδυασμό με άλλα υλικά, καθώς προσφέρει αντοχή στην θερμότητα, στη φθορά και την οξείδωση κεραμομετάλλων [36]. Είναι ένα ενδιαφέρον υλικό, διότι έχει χαμηλό συντελεστή διαστολής, είναι όλκιμο και ιδανικό για εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Οι Ramesh et. al.

[37], ανέφεραν επίσης ότι για την καταπολέμηση φθοράς σε επιφάνειες χάλυβα, πρέπει να μειωθεί ο συντελεστής τριβής της επιφάνειας, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση του μολυβδαινίου, που τονίζουν πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως λιπαντικό. Στην έρευνά τους, συνέκριναν δοκίμια χάλυβα, τα οποία είχαν επικαλυφθεί με Mo και Mo-SiC σε διαφορετικές περιεκτικότητες. Κατέληξαν στο συμπέρασμα, πως σε σχέση με τα μη-επιστρωμένα δοκίμια, αυξήθηκε η μικροσκληρότητα κατά 7,5% με τη χρήση Mo ενώ με τη χρήση Mo-10%SiC, αυξήθηκε στο 23% , ενώ παράλληλα μειώθηκε το πορώδες στο 2%. Επιπλέον, οι Zhang et. al. [36] στην έρευνα τους σε επιστρωμένα δοκίμια χάλυβα με διαφορετικές περιεκτικότητες Mo, παρατήρησαν βελτίωση της αντίστασης οξείδωσης και της αντοχής σε φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες, μείωση του ρυθμού οξείδωσης και του συντελεστή φθοράς.

Τα νανοσωματίδια που είναι ενσωματωμένα στη μεταλλική μήτρα γεμίζουν μικροτρύπες και ρωγμές και σχηματίζουν ένα ανώτερο παθητικό στρώμα που αντιστέκεται στην έναρξη και ανάπτυξη της διάβρωσης. Η τελική σύνθεση, η μικροδομή και η μορφολογία της επίστρωσης σχετίζονται στενά με τις παραμέτρους της διαδικασίας εναπόθεσης και τη σύνθεση του μίγματος ηλεκτρολυτικού λουτρού που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση διάβρωσης των επικαλύψεων. Επιπλέον, η τάση των νανοσωματιδίων να συσσωματώνονται όταν αναμειγνύονται με μεταλλική μήτρα, θα μπορούσε να δημιουργήσει κενά στη διεπιφάνεια οπλισμού/μήτρας που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη συμπεριφορά διάβρωσης του υποκείμενου μετάλλου και να προκαλέσει ρωγμές κατά τη φόρτωση, με συνέπεια να υποβαθμίσει τις επιφανειακές ιδιότητες του σύνθετου φιλμ. Ένας από τους τρόπους αντιμετώπισης του προαναφερθέντος ζητήματος είναι η ενσωμάτωση νανοϋλικών άνθρακα στη θέση των νανοπληρωτικών οξειδίων στη μεταλλική μήτρα, γεγονός που καθιστά την επίστρωση πιο λεπτή και βελτιώνει την αντοχή της στη διάβρωση [38]. Για να δημιουργηθεί η βέλτιστη σύνδεση μεταξύ επιφάνειας και επίστρωσης, είναι αναγκαίο να έχουν μελετηθεί πολύ καλά η επιφάνεια που θα τοποθετηθεί το στρώμα υλικού, οι επιθυμητές ιδιότητες, η τεχνική καθώς και ο τρόπος εκτέλεσής της διεργασίας επίστρωσης. Όταν δεν υπάρχει καλή συνδεσιμότητα επιφάνειας/επίστρωσης, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός αποκόλλησης σωματιδίων. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ξεκινήσει υπό τη μορφή ρωγμών, στην επιφάνεια φόρτισης ή ακόμα και στην διεπιφάνεια, οι οποίες διαδίδονται με αποτέλεσμα την απομάκρυνση σωματιδίων, κομματιών ή/και τη θραύση ολόκληρης της επικάλυψης [1].

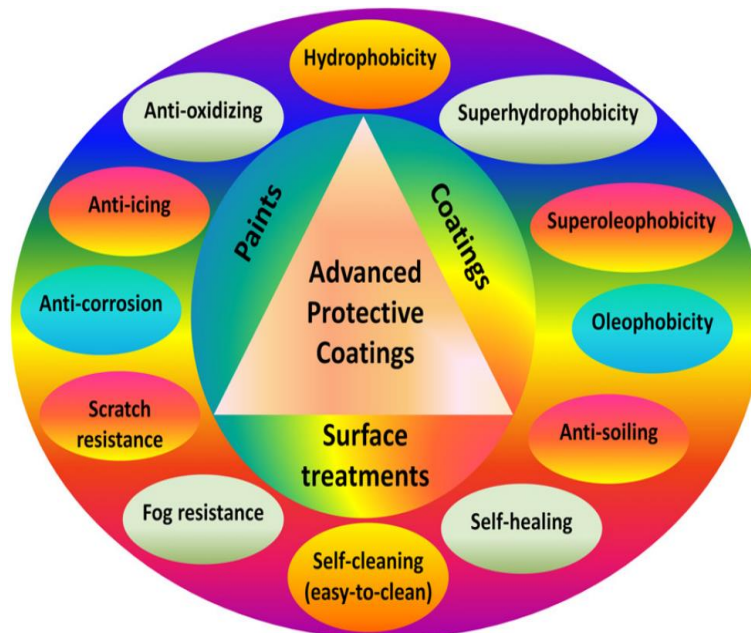


Εικόνα 1.16: Παραδείγματα δομικά ετερογενών υλικών με σύνθετες επικαλύψεις μεταλλικής μήτρας.

Πηγή:

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1029959920020058>

Ωστόσο, είναι εφικτή και η επιστροφή και των οπλισμών ενίσχυσης, όπου σύμφωνα με τους Karthik et. al. [39], αυξάνεται η συγκολλησιμότητά τους με τη μήτρα καθώς αυξάνεται και η διαβρεξιμότητα. Έτσι, γίνεται πιο ομοιόμορφη η κατανομή τους στη μήτρα, αυξάνοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, ενώ ταυτόχρονα μειώνοντας το πορώδες του, σε σύγκριση με σύνθετα με μη επιστρωμένους οπλισμούς. Τα σύνθετα υλικά, εκτός από εξαρτήματα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως επιστρώσεις σε άλλα υλικά [40].



Εικόνα 1.17: Προηγμένες προστατευτικές επιστρώσεις και οι λειτουργικές τους ιδιότητες.

Πηγή:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818118107?via%3Di>
hub

Αναλόγως τις ιδιότητες που απαιτούνται, υπάρχουν και οι αντίστοιχες τεχνικές επιφανειακής τροποποίησης:

Υδρόφοβες επικαλύψεις- Hydrophobic coatings

Οι επεξεργασίες υδροφοβικής επίστρωσης πραγματοποιούνται σε μέταλλα για να αποφευχθεί η απορρόφηση μορίων νερού στην επιφάνεια. Η υδρόφοβη επιφάνεια έχει γενικά χαμηλή επιφανειακή ενέργεια. Η διαβρεξιμότητα της επιφάνειας εξαρτάται επίσης από την τραχύτητα της επιφάνειας. Ορισμένες τεχνικές υδρόφοβης επίστρωσης αναφέρονται παρακάτω[41]:

- Τεχνική λιθογραφίας- Lithography technique.
- Τεχνική διαχωρισμού φάσης -Phase separation technique.
- Τεχνική επεξεργασίας προτύπων- Templating processing technique.
- Τεχνική χαρακτικής -Etching technique.
- Τεχνική Sol-gel -Sol-gel technique.
- Τεχνική ηλεκτροστατικής περιστροφής -Electrostatic spinning technique.
- Ηλεκτροαπόθεση- Electrodeposition.
- Ηλεκτροσυνεναπόθεση- Electro-co-deposition.

Υπερυδρόφοβες επικαλύψεις - Superhydrophobic coatings

Οι υπερυδρόφοβες επιφάνειες επίστρωσης είναι εξαιρετικά δύσκολο να βραχούν. Μια υπερυδρόφοβη επίστρωση στη μεταλλική επιφάνεια αποτελείται από τέτοια υδατοαπωθητικά υλικά πάνω στα οποία τα σταγονίδια νερού αναπηδούν σαν την αντίστροφη ανταπόκριση των ελαστικών σφαιρών. Μια υπερυδρόφοβη επίστρωση είναι ένα λεπτό στρώμα που εφαρμόζεται στην επιφάνεια με σκοπό να απωθεί έντονα μόρια νερού. Αυτό το είδος επιστρώσεων αποτελείται γενικά από σύνθετα υλικά όπου το ένα συστατικό αυξάνει την τραχύτητα και το άλλο συστατικό μειώνει την επιφανειακή ενέργεια. Οι τραχιές επιφάνειες μπορούν να ληφθούν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές όπως αναφέρονται παρακάτω.

- Στρώμα προς στρώμα και αυτοσυναρμολόγηση- Layer-by-layer and self-assembly.
- Επεξεργασία Sol-gel- Sol-gel processing.
- Χαλκογραφία- Etching.
- Μέθοδος Ηλεκτρονηματοποίησης- Electro-spinning method.

- Ηλεκτροχημική εναπόθεση -Electrochemical deposition.
- Εναπόθεση χημικών ατμών- Chemical vapor deposition.

Ηλεκτρόφοβες & Υπερηλεκτρόφοβες επικαλύψεις- Electrophobic & Super-electrophobic coatings

Οι έννοιες της ηλεκτροφοβικής και της υπερηλεκτροφοβικής αλληλεπίδρασης είναι ανάλογες με τις υδρόφοβες και τις υπερυδρόφοβες αλληλεπιδράσεις, αντίστοιχα. Περιγράφει τη φύση των ξένων ατόμων σε ένα μέταλλο, δηλαδή, γνωστό ως «διαλύτης ηλεκτρονίων». Αυτή η σύγχρονη τεχνική προάγει σημαντικά τη βασική γνώση και την ικανότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ακαθαρσιών διαλυμένων ουσιών στα μέταλλα.

Ελαιόφοβες επικαλύψεις- Oleophobicity coatings

Οι ελαιόφοβες επικαλύψεις στις μεταλλικές επιφάνειες μειώνουν αποτελεσματικά την επιφανειακή ενέργεια και τη διαβρεξιμότητα. Οι ελαιοφοβές επικαλύψεις απωθούν απωθούν το νερό, τη βρωμιά και την υγρασία. Έτσι, αυτή η επίστρωση καθιστά τις επεξεργασμένες επιφάνειες εξαιρετικά εύκολο να καθαριστούν, ειδικά το λάδι, το οποίο δεν μπορεί να προσκολληθεί ή να μουτζουρώσει σε αυτές τις επιφάνειες.

Επιστρώσεις κατά της βρωμιάς- Anti-soiling coatings

Η αντιλερωτική επίστρωση είναι μια νέα τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να μειώσει τη βρωμιά ή να διευκολύνει το πλύσιμο. Η υδρόφιλη αντιρυπαντική επίστρωση έχει μεγάλη επιφανειακή ενέργεια και παρέχει καθαριστική δράση με το ρέον νερό. Οι επιστρώσεις κατά της ρύπανσης μπορούν να είναι και οι δύο τύποι είτε υδρόφιλες είτε υδρόφοβες. Γενικά υποβοηθάται από ένα στρώμα φωτοδραστικής τιτανίας (TiO₂). Τα στρώματα TiO₂ μπορούν να διασπάσουν οργανικές αλυσίδες και να κάνουν την επιφάνεια ευκολότερη να καθαριστεί. Έχει τρομερή εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά (PV) ηλιακά πλαίσια όπου η ρύπανση του γυαλιού του καλύμματος της ηλιακής μονάδας μειώνει σημαντικά την ισχύ εξόδου της μονάδας. Η ρύπανση δημιουργεί συσσώρευση σκόνης και βρωμιάς στις φωτοβολταϊκές μονάδες.

Αυτο-θεραπευόμενες επιστρώσεις -Self-healing coatings

Η επίστρωση της αυτό-επούλωσης είναι ένας τύπος επιστρώσεων που μπορεί αυτόνομα να επισκευάσει και να αποτρέψει επιφανειακές επιθέσεις όπως η διάβρωση του υποκείμενου υποστρώματος. Μπορεί να δημιουργηθεί μέσω ομοιογενούς διασποράς μικροενθυλακωμένων θεραπευτικών παραγόντων σε ένα πολυμερές φιλμ.

Επιστρώσεις με αντίσταση στην ομίγλη- Fog-Resistance Coating

Η επίστρωση αυτή δημιουργήθηκε για να αποφευχθούν προβλήματα που δημιουργούνται λόγω υγρασίας ή της αλλαγής θερμοκρασίας όπως διάβρωση σε μεταλλικά υλικά ή θαμπώματα στα υαλώδη. Επίσης, τέτοιου είδους επιστρώσεις χρησιμοποιούνται στα τζάμια από τα διαστημόπλοια της NASA, για να μην θαμπώνουν κατά τη διάρκεια της εξερεύνησης του διαστήματος. Δημιουργείται με την τροποποίηση υδρόφιλων υλικών, με κατάλληλα επιφανειοδραστικά.

Επιστρώσεις με αντίσταση στις γρατζουνιές- Scratch Resistance Coating

Δεδομένου ότι πολλές μεταλλικές μήτρες είναι πολύ μαλακές, για παράδειγμα Cu, Mg, Al και ούτω καθεξής, η επίστρωση με αντοχή στις γρατσουνιές στο σύνθετο υλικό τους παίζει κρίσιμο ρόλο ιδιαίτερα στις εφαρμογές μηχανικής όπου είναι απαραίτητη η ιδιότητα υψηλής αντοχής στη φθορά. Για παράδειγμα, ορισμένα εξαρτήματα με βάση το αλουμίνιο 7075, όπως τα έμβολα του κινητήρα, παρουσιάζουν έντονη φθορά ενώ εργάζονται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Τέτοια εξαρτήματα απαιτούν επαρκή επιφανειακή επεξεργασία για να αυξηθεί η αντοχή στις γρατσουνιές ή στη φθορά μειώνοντας τον συντελεστή τριβής. Μερικές μέθοδοι που γίνεται η εναπόθεση της επίστρωσης αυτής είναι:

- Ηλεκτρο-συνεναπόθεση -Electro-co-deposition (ECD).
- Καύσιμο οξυγόνου υψηλής ταχύτητας- High-velocity oxygen(HVOF).
- Θερμικός ψεκασμός- Thermal spraying.
- Θερμή ισοστατική πίεση- Hot isostatic pressing (HIP) .

Η ECD είναι μια πιο ωφέλιμη τεχνική σε σύγκριση με άλλες μεθόδους επίστρωσης, όπως HVOF, HIP ή τον θερμικό ψεκασμό, λόγω της ικανότητάς της για συνεχή επεξεργασία, ταχύτερη εναπόθεση, ομοιογενή κατανομή, κανονική πίεση εργασίας, χαμηλή συντήρηση, ικανότητα αντιμετώπισης πολύπλοκης γεωμετρίας και μειωμένη παραγωγή απορριμμάτων. Μπορεί επίσης να βελτιώσει σημαντικά την αντοχή στη διάβρωση και τις τριβολογικές ιδιότητες του υποστρώματος.

Αντιπαγωτικές επιστρώσεις- Anti-Icing Coatings

Η εφαρμογή μιας υπερυδρόφοβης επίστρωσης σε επιφάνειες σύνθετων υλικών τα μετατρέπει σε ένα εξαιρετικά υγρό και υδατοαπωθητικό, εύκολο στο καθάρισμα και ενισχύει σημαντικά την απόδοσή τους κατά του πάγου. Η επίστρωση κατά του πάγου μειώνει την πρόσφυση του πάγου και του υγρού χιονιού (μερικές φορές: έως και 80%) στα υποκείμενα υποστρώματα. Ένα υλικό σύνθεσης χαμηλού ιξώδους, το οποίο μπορεί

να εξαπλωθεί γρήγορα στην επιφάνεια, χρησιμοποιείται γενικά ως υλικό επίστρωσης κατά του πάγου και εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υποστρώματος και έπειτα σκληραίνει γρήγορα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Αντιοξειδωτικές επιστρώσεις- Anti-Oxidation Coatings

Οι συγκεκριμένες επιστρώσεις παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές με υψηλές θερμοκρασίες. Μπορούν να μειώσουν σημαντικά την απώλεια μάζας λόγω της οξείδωσης του χάλυβα (σχεδόν έως και 85%). Προσφέρουν επίσης αντιδιαβρωτική προστασία στο υπόστρωμα των σύνθετων μεταλλικής μήτρας και των κραμάτων. Οι αντιοξειδωτικές κεραμικές επικαλύψεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή της μόνωσης, της θερμικής αγωγιμότητας, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE), της ανακλαστικότητας, της διάχυσης, των ιδιοτήτων των σύνθετων ή των κραμάτων χρησιμοποιώντας διαφορετικές κεραμικές επικαλύψεις που παράγονται από πολλές συμβατικές και μη τεχνικές. Κάποιες από τις μεθόδους επικάλυψης είναι οι εξής:

- Επικάλυψη φυσικής αποσύνθεσης ατμών- Physical vapor decomposition (PVD).
- Επικάλυψη χημικής αποσύνθεσης ατμών -Chemical vapor decomposition (CVD).
- Επικάλυψη ιόντων-Ion coating.
- Επικάλυψη με πιτσιλίσματα- Splash coating.
- Επίστρωση εξάτμισης δέσμης ηλεκτρονίων- Electron beam evaporation (EBE).
- Επίστρωση με σπρέι φλόγας - Flame spray (FS).
- Επικάλυψη με σπρέι πλάσματος- Plasma spray (PS) .
- Κεραμική επίστρωση με ψεκασμό με πλάσματος -Plasma sprayed ceramic (PSC).
- Επικάλυψη Sol-gel - Sol-gel coating (SG).
- Επικάλυψη πιστολιού έκρηξης-Detonation gun coating (DG).
- Επικάλυψη αντιδραστικών ιόντων - Reactive ion coating (RI).
- Επίστρωση θερμής ισοστατικής πρέσας - Hot isostatic press coating (HIP).
- Επικάλυψη κραμάτων επιφάνειας λέιζερ - Laser surface alloying coating (LSA).
- Οξυ-καύσιμο υψηλής ταχύτητας -High-velocity oxy-fuel (HVOF)
- Επικάλυψη θερμικού φραγμού -Thermal barrier coating (TB).

Η τελευταία, είναι πολύ σημαντική για εξαρτήματα μηχανών. Με ένα πρόσθετο καυσίμου, μειώνονται δραστικά οι εκπομπές καυσαερίων.

Κάποιες επιπλέον από τις μεθόδους εναπόθεσης επιστρώσεων, είναι οι εξής:

- Ψυχρός ψεκασμός με ψεκασμό αερίου πλάσματος- Cold spraying with plasma gas atomization [40].
- Συγκόλληση ραφής αντίστασης- Resistance seam welding [40].
- Πυροσυσσωμάτωση πλάσματος με σπινθήρα- Spark plasma sintering [40],[42].
- Παλμική εναπόθεση πλάσματος- Pulsed plasma deposition [40].
- Πυροσυσσωμάτωση με άμεσο περιορισμό σε μια επιφάνεια- Direct constrained sintering on a surface [40].
- Αυτοδιάδοση υψηλής σύνθεση θερμοκρασίας- Self-propagating high-temperature synthesis [40].
- Επιμετάλλωση με καθοδική διασκόρπιση- Sputtering (Sputter spray)[40], [41],[1].
- Επένδυση λειζερ- Laser cladding [41].
- Επένδυση με συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία – Solar cladding [5].

Η μέθοδος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, είναι η επίστρωση με τη χρήση συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Πρόκειται για μια μη συμβατική μέθοδο, η οποία αντικαθιστά τη δέσμη λέιζερ, με εξαιρετικά συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. Εκτός από επιστρώσεις, η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για σκλήρυνση, πυροσυσσωμάτωση, νιτρίωση, σύνθεση και συγκόλληση [43], [44].

Είναι μια τεχνική η οποία, προσφέρει τεμάχια με ενισχυμένα επιφανειακά στρώματα, τα οποία είναι δυνατό να κατεργαστούν με συμβατικές μηχανές, με σκοπό την βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους. Επίσης, σε σύγκριση με τεμάχια τα οποία έχουν δημιουργηθεί με την τεχνική FCAW, παρατηρήθηκε πως τα κατεργασμένα με Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ακτινοβολία παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε φθορά [45].

Για να πραγματοποιηθεί η παραπάνω κατεργασία, απαιτείται η χρήση ηλιακού φούρνου. Πρόκειται για μια εγκατάσταση η οποία αποτελείται από μια συλλογή από καμπυλωμένους καθρέφτες ή επιφάνειες που καθρεφτίζουν, οι οποίες συγκρατούν τις ακτίνες του ήλιου. Έπειτα, τις αντανακλούν σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η μεγαλύτερη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένας τέτοιος φούρνος είναι έως και τους 4000°C.

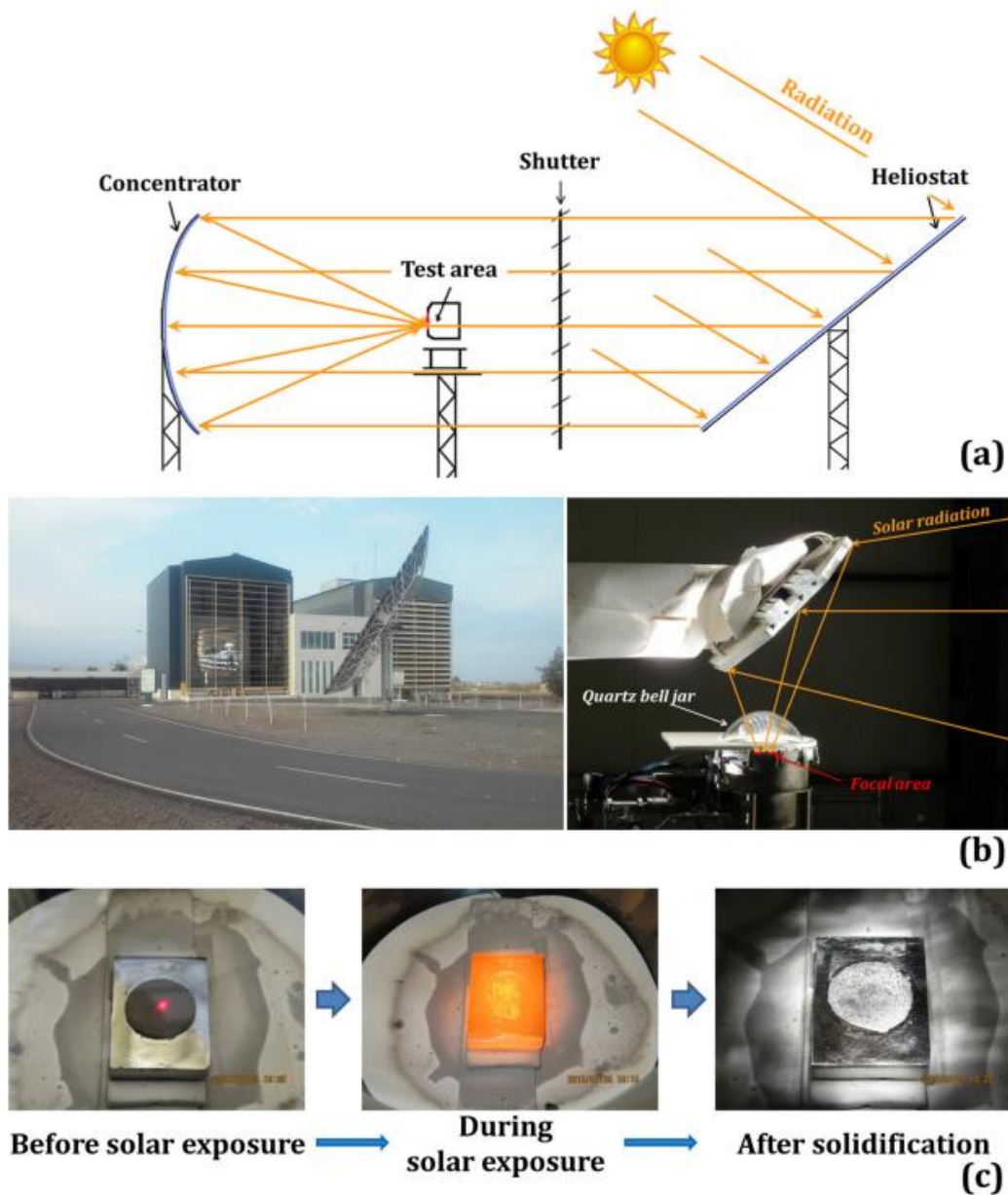
Πρόκειται για μια καινοτόμα τεχνολογία, η οποία έρχεται να λύσει το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης, και να μειώσει και τα απόβλητα. Τα κύρια πλεονεκτήματά της χρήση των ηλιακών φούρνων είναι η υψηλή ροή ακτινοβολίας, που επιτρέπει την επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών, η θέρμανση χωρίς ρύπανση από ορυκτά καύσιμα. Επίσης, διαθέτει φάσμα κατάλληλο για υλικά που απορροφούν στο ορατό, αποφεύγοντας την χρήση ειδικών επικαλύψεων [46]. Ωστόσο, δεν είναι ακόμα έτοιμη για χρήση στην βιομηχανία, διότι δεν είναι δυνατή η λειτουργία του φούρνου σε μη ηλιόλουστες μέρες. Μια λύση για το πρόβλημα αυτό, είναι η χρήση επιπλέον εξοπλισμού, με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας για χρήση της αργότερα.

Ο μεγαλύτερος ηλιακός φούρνος επί γης, είναι ο «Odeillo solar furnace», στη Γαλλία.



Εικόνα 1.18: Συνολική απεικόνιση του Odeillo solar furnace. Πηγή: [Odeillo Solar Furnace – Font-Romeu-Odeillo-Via, France - Atlas Obscura](#)

Έχει ύψος 54m και πλάτος 48m, με 63 ηλιοστάτες. Ο συγκεκριμένος, κατασκευάστηκε το διάστημα 1962-1967 και τέθηκε σε λειτουργία το 1970, με μέγιστη ισχύ 1MW. Τα δοκίμια που μελετώνται στη συγκεκριμένη εργασία, δημιουργήθηκαν στον ηλιακό φούρνο SF40 στην Plataforma Solar de Almería. Διαθέτει, 100m² επιφάνεια αντανάκλασης, 56,5m² παραβολικό συμπυκνωτή και ισχύ 40kW. Στην εικόνα 1.19, παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση της συνολικής εγκατάστασης μαζί με την αρχή λειτουργίας της, και ένα δείγμα πριν και μετά τη χρήση του ηλιακού φούρνου [5]. Συγκεκριμένα, η αρχή λειτουργίας της εγκατάστασης αυτής έχει ως εξής: ο ηλιοστάτης παρακολουθεί τον ήλιο και ανακλά τις ευθυγραμμισμένες ακτίνες του ήλιου οριζόντια και παράλληλα -χωρίς συγκέντρωση- με τον οπτικό άξονα του παραβολικού συμπυκνωτή. Ο τελευταίος με τη σειρά του, συγκεντρώνει τις εισερχόμενες ακτίνες στην εστία της παραβολής. Η ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ρυθμίζεται από το κλείστρο ροής με περσίδες [46].



Εικόνα 1.19: Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης συμπυκνωμένης ηλιακής ενέργειας, οριζόντιου ηλιακού φούρνου SF-40 στην Plataforma Solar de Almería (PSA) (a). Φωτογραφίες του ηλιοστάτη/σταθερού παραβολικού συμπυκνωτή και της λεπτομερούς συναρμολόγησης εξέδρας στην περιοχή ηλιακής επεξεργασίας (b). Αντιπροσωπευτικό δείγμα που τοποθετείται στο μονωτικό υπόστρωμα. πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την έκθεση στον ήλιο (c). Πηγή: Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels - ScienceDirect

1.3 Επιφανειακά στρώματα σύνθετων με διασπορά καρβιδίων

Για να χαρακτηριστούν τα επιφανειακά στρώματα ενός σύνθετου υλικού με διασπορά καρβιδίων, θα πρέπει να αναλυθούν η φυσική και χημική του σύνθεση, η δομή και η μικροδομή του, οι μηχανικές του ιδιότητες, η τριβολογική συμπεριφορά του καθώς επίσης και η επίδραση των τεχνικών επεξεργασίας πάνω σε αυτό. Ωστόσο, τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων παραμέτρων ποικίλλουν σύμφωνα με τα υλικά της μήτρας και των οπλισμών που χρησιμοποιούνται.

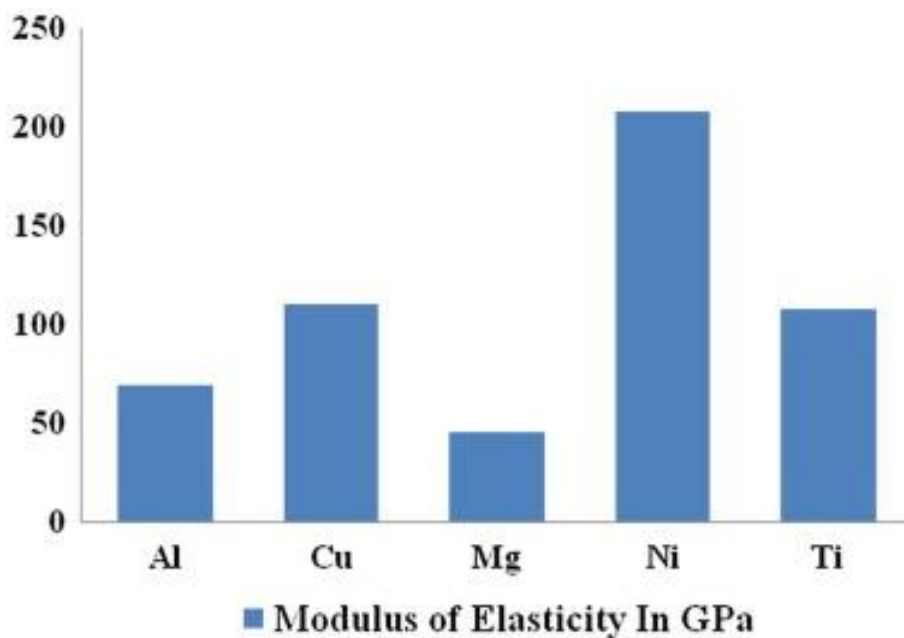
Αναλυτικότερα, τα στοιχεία που επηρεάζουν τον χαρακτηρισμό των επιφανειακών στρωμάτων των σύνθετων υλικών με διασπορά καρβιδίων, είναι:

1. Το υλικό της μήτρας: Είναι συνήθως κράμα ή μέταλλο και παρέχει το μεγαλύτερο μέρος των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού
2. Η ενίσχυση των σωματιδίων (οπλισμοί): Είναι συνήθως κεραμικά ή μεταλλικά σωματίδια και η επιλογή τους εξαρτάται από τις επιθυμητές ιδιότητες του σύνθετου.
3. Το μέγεθος των σωματιδίων και η κατανομή τους: Το μέγεθος κυμαίνεται τυπικά από μερικά μικρόμετρα έως αρκετές δεκάδες μικρόμετρα και η κατανομή μπορεί να είναι ομοιογενής ή προσαρμοσμένη για συγκεκριμένους σκοπούς.
4. Το κλάσμα όγκου: Η αναλογία του όγκου των οπλισμών προς τον συνολικό όγκο του σύνθετου συνολικά.
5. Η διεπιφανειακή συγκόλληση: Η ισχυρή διεπιφανειακή συγκόλληση μπορεί να ενισχύσει τη μεταφορά φορτίου, να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες και να αποτρέψει τη συσσωμάτωση ή την αποκόλληση σωματιδίων.
6. Τα πρόσθετα στοιχεία: Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα σύνθετα με διασπορά καρβιδίων ενδέχεται να περιέχουν πρόσθετα στοιχεία για τη βελτίωση συγκεκριμένων ιδιοτήτων ή την παροχή συγκεκριμένων λειτουργιών. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν πρόσθετα, επιφανειακές επεξεργασίες ή τροποποιητές για τον έλεγχο της διασποράς, τη διεπιφανειακή σύνδεση ή άλλες πτυχές του σύνθετου υλικού.

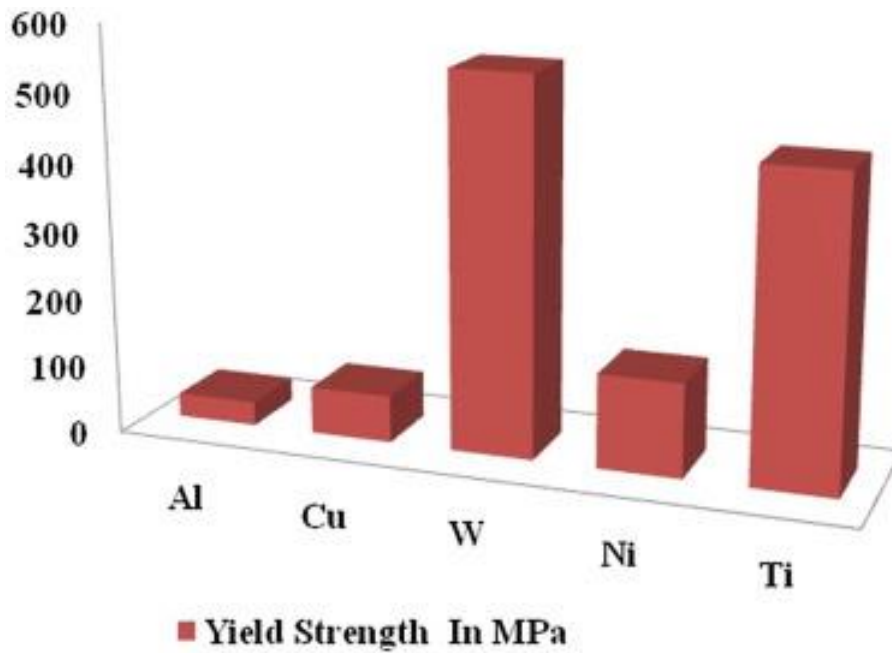
1.3.1 Μήτρα

Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, έχουν εξαιρετικές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες που περιλαμβάνουν καλή αντοχή στη φθορά και εξαιρετική θερμική

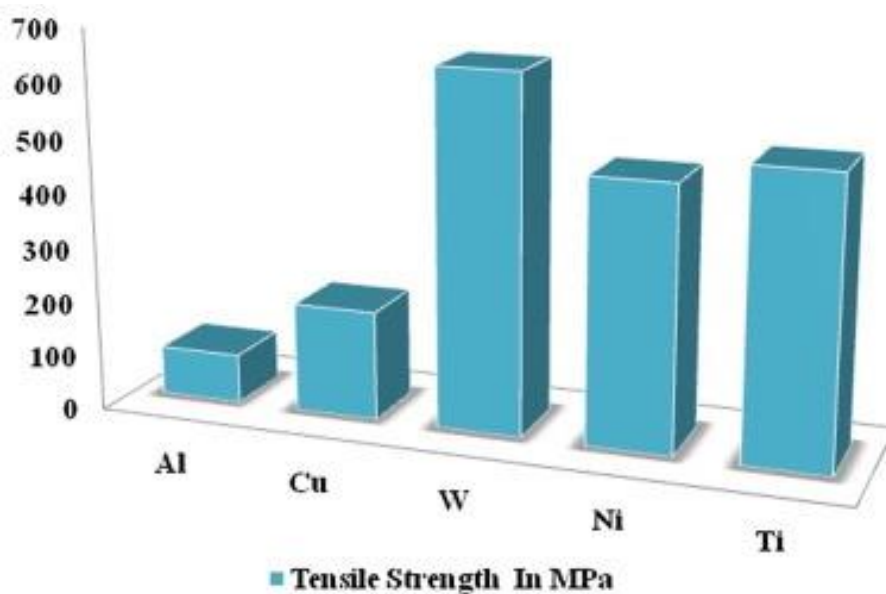
αγωγιμότητα. Παρακάτω, φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες των βασικότερων υλικών μήτρας (αλουμίνιο, χαλκός, σίδηρος, μαγνήσιο, νικέλιο, τιτάνιο), σύμφωνα με τους Sharma et. al [47].



Εικόνα 1.20: Μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου, του χαλκού, του μαγνησίου, του νικελίου και του τιτανίου, δηλαδή των υλικών που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337691>



Εικόνα 1.21: Όριο διαρροής του αλουμινίου, του χαλκού, του βολφραμίου, του νικελίου και του τιτανίου, δηλαδή των υλικών που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337691>



Εικόνα 1.22: Αντοχή σε εφελκυσμό του αλουμινίου, του χαλκού, του βολφραμίου, του νικελίου και του τιτανίου, δηλαδή των υλικών που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319337691>

Η επιλογή του υλικού της μήτρας, έχει άμεση εξάρτηση από τις απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως είναι οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες, η αντίσταση στη διάβρωση η θερμική αγωγιμότητα και το κόστος κατασκευής και συντήρησης.

- Αλουμίνιο (Al): Τα σύνθετα υλικά με βάση το αλουμίνιο είναι ελαφριά και διαθέτουν καλή αντοχή στη διάβρωση, υψηλή θερμική αγωγιμότητα και εξαιρετική αναλογία αντοχής προς βάρος. Βρίσκουν εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροδιαστημική και τις ηλεκτρονικές βιομηχανίες.
- Μαγνήσιο (Mg): Τα σύνθετα υλικά με βάση το μαγνήσιο προσφέρουν υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης και εξαιρετική ικανότητα χύτευσης. Χρησιμοποιούνται σε ελαφριά δομικά εξαρτήματα και αεροδιαστημικές εφαρμογές.
- Χαλκός (Cu): Τα σύνθετα υλικά με βάση τον χαλκό παρουσιάζουν εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, υψηλή αντοχή και καλή αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς συνδετήρες, ψύκτρες και ηλεκτρονικές συσκευασίες.
- Τιτάνιο (Ti): Τα σύνθετα υλικά με βάση το τιτάνιο προσφέρουν υψηλή αντοχή, χαμηλή πυκνότητα και εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Βρίσκουν εφαρμογές στην αεροδιαστημική, τη ναυτιλία και τη χημική βιομηχανία.
- Νικέλιο (Ni): Τα σύνθετα υλικά με βάση το νικέλιο έχουν αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία, καλή αντοχή στη διάβρωση και εξαιρετική αντοχή σε ερπυσμό. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν απόδοση υψηλής θερμοκρασίας, όπως αεριοστρόβιλοι και παραγωγή ενέργειας.
- Σίδηρος (Fe): Τα σύνθετα υλικά με βάση τον σίδηρο, όπως ο χάλυβας, προσφέρουν υψηλή αντοχή, καλή ολκιμότητα και ευρείες μηχανικές ιδιότητες. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αυτοκινητοβιομηχανίας, των κατασκευών και των μηχανημάτων.

Συνηθέστερα σύνθετα, είναι αυτά του αλουμινίου εξαιτίας της ευελιξίας τους στην επεξεργασία και στις εξαιρετικές μηχανικές και τριβολογικές τους ιδιότητες, καλύπτοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Από την άλλη, τα σύνθετα υλικά με βάση το μαγνήσιο προσέλκυσαν λιγότερο ενδιαφέρον, κυρίως λόγω της χαμηλής παραμόρφωσης σε θερμοκρασία δωματίου και χαμηλής αντοχής στη διάβρωση. Παρόλα αυτά, τα χαρακτηριστικά τους μπορεί να είναι συγκρίσιμα ή καλύτερα από τα σύνθετα με βάση το αλουμίνιο. Ωστόσο, ανταγωνιστική θέση έχουν

και οι χαλύβδινες μήτρες, λόγω του χαμηλού τους κόστους, της ευελιξίας τους και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων που προσφέρουν, ενδεχομένως, καλύτερες και από τα ελαφριά μέταλλα. Ο χάλυβας είναι ένα υλικό που σε σχέση με το αλουμίνιο, έχει υψηλότερη ακαμψία, αντοχή και σκληρότητα. Επίσης, έχει καλή μηχανική κατεργασία σε κατάσταση ανόπτηση, καλή συγκολλησιμότητα και οι περισσότερες ποιότητες χάλυβα, αντοχή στη διάβρωση. Τα σύνθετα χαλύβδινες μήτρας, κατασκευάζονται συνήθως με τη μέθοδο της κωνομεταλλουργίας, διότι παρέχει ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων και επιτρέπει τη χρήση σωματιδίων που ποικίλλουν σε μέγεθος και όγκο [38], [48], [49]. Οι ανοξείδωτοι χάλυβες, ιδιαίτερα οι ωστενιτικοί τύποι έχουν ανώτερη ολκιμότητα σε εφελκυσμό και αντοχή στη διάβρωση από τον σίδηρο. Ωστόσο, οι ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες έχουν επίσης ένα σημαντικό μειονέκτημα για χρήση σε ορισμένα τριβολογικά περιβάλλοντα. Έχουν σχετικά χαμηλή αντοχή στη φθορά λόγω της χαμηλής σκληρότητάς τους. Η σκληρότητα των ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά είτε με την εμφύτευση ιόντων είτε με την προσθήκη σκληρών κεραμικών σωματιδίων [50].

Οπλισμοί

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιλογή του οπλισμού, γίνεται βάσει των επιθυμητών ιδιοτήτων που χρειάζεται να επιτευχθούν. Δηλαδή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κεραμικοί (SiC [12], [19], [31], [50], B₄C [12], [14], [18], Al₂O₃ [12], [49], κ.α.), μεταλλικοί (W [40], Mo [11], [36], [37], Ni κ.α.) οπλισμοί. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ίνες ή νανοσωλήνες με βάση τον άνθρακα, όμως ο συγκεκριμένος τομέας δεν είναι μέρος αυτής της εργασίας.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται καρβίδια νιοβίου και του βαναδίου. Το νίοβιο, είναι ένα μέταλλο με υψηλό σημείο τήξης και υψηλή σκληρότητα, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως ως οπλισμός ενίσχυσης, και κυρίως συνδυασμένο με χάλυβα. Ο συνδυασμός χάλυβα και νιοβίου, είναι αποδοτικός εξαιτίας της παρόμοιας πυκνότητάς τους, η οποία αποτρέπει το φαινόμενο καθίζησης των οπλισμών στη μήτρα, γεγονός που επηρεάζει ομοιόμορφη κατανομή τους. Η χρήση σωματιδίων νιοβίου ως οπλισμών μήτρας, προσφέρει τεμάχια με βελτιωμένη αντοχή, σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχή στην κρούση και καλή συγκολλησιμότητα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί, πως με την προσθήκη 0,01% νιοβίου, αυξάνεται η σκληρότητα έως και 25%. Επιπλέον, με την προσθήκη του συγκεκριμένου καρβιδίου, επιβραδύνεται η αύξηση του μεγέθους των κόκκων κατά την κατεργασία, παρέχοντας την δυνατότητα επίτευξης των επιθυμητών ιδιοτήτων ευκολότερα. Τα κράματα αυτά,

βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην αεροδιαστημική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε δομικές εφαρμογές, στην εξόρυξη και επεξεργασία των ορυκτών [51].

Το βανάδιο είναι ένα σκληρό, όλκιμο και εύπλαστο μέταλλο μετάπτωσης που έχει καλή αντοχή στη διάβρωση. Ακόμα, έχει καλή διαβρεξιμότητα με μήτρες σιδήρου, με αποτέλεσμα οι οπλισμοί να κατανέμονται ομοιόμορφα στη μήτρα και να δημιουργείται διασύνδεση χωρίς ελαττώματα. Οι Wang et. al., παρατήρησαν πως σε τεστ ξηρής ολίσθησης το σύνθετο σιδήρου/βαναδίου έχει μεγάλη αντοχή στη φθορά, η οποία είναι 11,1 φορές μεγαλύτερη έναντι εκείνης του σκληρυμένου χάλυβα 1045 [52]. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων βαναδίου, επιτυγχάνεται η βελτίωση των κόκκων και η ενίσχυση της καθίζησης του χάλυβα, οδηγώντας σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία και της αντοχής στην κόπωση. Επιπλέον, αυξάνεται η αντοχή σε διάβρωση, διότι η προσθήκη βαναδίου δημιουργεί προστατευτικά στρώματα οξειδίου, προστατεύοντας έτσι το μέταλλο από διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως το θαλασσινό νερό. Αυτό καθιστά τα κράματα που περιέχουν βανάδιο κατάλληλα για εφαρμογές στη χημική επεξεργασία, στον ναυτιλιακό εξοπλισμό και στις βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Επίσης τα κράματα βαναδίου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή, όπως τα εξαρτήματα αυτοκινήτου, τα ελατήρια και τα εργαλεία. Ωστόσο, είναι δυνατή και η δημιουργία υβριδικών σύνθετων με τη χρήση καρβιδίων του νιοβίου και του βαναδίου. Με αυτόν το τρόπο συνδυάζονται οι ιδιότητες των στοιχείων αυτών δημιουργώντας υλικά με υψηλή αντοχή, αντοχή στη διάβρωση και σκληρότητα. Τα συγκεκριμένα υβριδικά σύνθετα, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, όπως η αεροδιαστημική και οι πυρηνικοί αντιδραστήρες.

Πρωτογενής και δευτερογενής κατεργασία

Ο όρος πρωτογενής κατεργασία σε σύνθετα μεταλλικής μήτρας, αναφέρεται στην αρχική επεξεργασία και παραγωγή του σύνθετου μέσω κατεργασιών που αφορούν την προσθήκη, τη διανομή και τη σύνδεση των ενισχυτικών οπλισμών στη μήτρα. Ενώ, η δευτερογενής κατεργασία σε σύνθετα μεταλλικής μήτρας αναφέρεται στην επεξεργασία και την τροποποίηση του ήδη κατασκευασμένου σύνθετου υλικού για να επιτευχθούν συγκεκριμένες ιδιότητες ή δομικές αλλαγές. Οι δευτερογενείς κατεργασίες εφαρμόζονται μετά την πρωτογενή κατασκευή του συνθέτου.

Οι δευτερογενείς κατεργασίες μπορούν να περιλαμβάνουν τις ακόλουθες διαδικασίες:

1. **Θερμική επεξεργασία:** Η θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει την έκθεση του συνθέτου σε υψηλές θερμοκρασίες για να επιτευχθούν δομικές αλλαγές, όπως η αποκατάσταση φάσεων και ο έλεγχος του μεγέθους των κόκκων.
2. **Επεξεργασία επιφάνειας:** Η επεξεργασία της επιφάνειας μπορεί να γίνει μέσω μηχανικών εργαλείων όπως η τριβή, η λείανση, για να προσδώσει επιθυμητές ιδιότητες στην επιφάνεια του συνθέτου, όπως αντίσταση στη φθορά και στη διάβρωση.
3. **Επικάλυψη:** Η επικάλυψη είναι μια διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζεται ένα επιπλέον υλικό στην επιφάνεια του συνθέτου για να προστατευτεί, να βελτιωθούν οι ιδιότητες της επιφάνειας.

Η επιλογή της κατάλληλης δευτερογενούς κατεργασίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και τις επιθυμητές ιδιότητες του συνθέτου, οι οποίες παίζουν και εκείνες με τη σειρά τους σημαντικό ρόλο, όπως για παράδειγμα, διαφορετικές οι ιδιότητες ενός σύνθετου επιστρωμένου με την τεχνική FCAW από εκείνες με την Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ακτινοβολία [45],[5]. Επίσης, οι Kumar et. al. [25], δημιούργησαν σύνθετο αλουμινίου AA6061 με τη μέθοδο της χύτευσης με μηχανική ανάδευση, που ακολουθείται από θερμή σφυρηλάτηση, και παρατήρησαν μετά το πέρας της δευτερογενούς κατεργασίας, μειώθηκε το πορώδες και η μικροδομή ήταν πυκνότερη και λεπτότερη. Επίσης, αφανίστηκαν τυχόν συσσωματώματα, το οποίο είναι ένα σύνθητες φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη χύτευση με ανάδευση, ενώ ταυτόχρονα αυξήθηκε και η σκληρότητα.

Μηχανικές ιδιότητες

Συγκρίνοντας τα σύνθετα με τα μονολιθικά μέταλλα, προκύπτει ότι τα πρώτα, έχουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες λόγω της ύπαρξης των οπλισμών. Η προσθήκη καρβιδίων, εμποδίζει τυχόν μετατοπίσεις, συμβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο στην ικανότητα μεταφοράς του φορτίου με αποτέλεσμα την αυξημένη αντοχή διαρροής, εφελκυσμού και σκληρότητας. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της σκληρότητας σημαίνει, αντοχή στη φθορά και την παραμόρφωση, δηλαδή και στην ακαμψία ενός υλικού. Επίσης, η ύπαρξη των σωματιδίων μέσα στη μήτρα, αναστέλλει τη διάδοση των ρωγμών ενισχύοντας έτσι την αντοχή στη θραύση [53]. Ωστόσο, μειώνεται η ολκιμότητα [54].

Όπως αναφέρθηκε, δεν είναι δυνατή η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας, χωρίς λεπτομέρειες για τα υλικά και τη

μικροδομή τους. Γι' αυτόν τον λόγο, υπάρχουν οι υπολογιστικές μικρομηχανικές μέθοδοι, κατά τις οποίες γίνεται αξιολόγηση των ιδιοτήτων του προς κατασκευή σύνθετου, βάσει αριθμητικών μοντέλων. Με αυτές τις μεθόδους, γίνονται γνωστές οι επιδράσεις του σχήματος, του μεγέθους, του προσανατολισμού του οπλισμού, και της αντοχής των φάσεων στην εξέταση μακροκλίμακας των υλικών. Επίσης, οι περιοχές τάσης-παραμόρφωσης μικροκλίμακας και η εξέλιξη αστοχίας κατά τη φόρτιση μπορούν να μελετηθούν λεπτομερώς με υπολογιστικές μικρομηχανικές μεθόδους. Η πειραματική διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με την επίδραση μικροδομικών πτυχών όπως το μέγεθος, το σχήμα και ο προσανατολισμός των σωματιδίων, η διεπιφανειακή ισχύς σωματιδίου/μήτρας, το πορώδες, η θερμική αναντιστοιχία μεταξύ σωματιδίου και μήτρας, κ.λ.π. [55].

Τριβολογική συμπεριφορά

Με τον όρο τριβολογική συμπεριφορά περιγράφεται η αλληλεπίδραση δύο ή/και περισσότερων επιφανειών υπό συνθήκες τριβής ή ολίσθησης. Τα σύνθετα με διασπορά καρβιδίων έχουν ενδιαφέρουσα τριβολογική συμπεριφορά, εξαιτίας της ύπαρξης των οπλισμών, πάντα σε σύγκριση με μονολιθικά μέταλλα. Οι τριβολογικές ιδιότητες των σύνθετων έχουν διερευνηθεί εκτενώς από διάφορους ερευνητές, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η απόδοση φθοράς τους είναι υψηλότερη από αυτή των μη ενισχυμένων μητρών. Οι μηχανισμοί φθοράς που ενδεχομένως εμφανιστούν σε επιφανειακά στρώματα, είναι:

- Φθορά πρόσφυσης (Adhesive wear): Μηχανισμός φθοράς που λαμβάνει χώρα όταν δύο λείες επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη και σχηματίζονται μοριακοί δεσμοί στα σημεία επαφής
- Φθορά λείανσης (Abrasive wear): Μηχανισμός φθοράς που λαμβάνει χώρα όταν μια τραχεία και σκληρή επιφάνεια ολισθαίνει σε μία μαλακότερη και δημιουργεί αυλακώσεις.
- Φθορά επιφανειακής κόπωσης (Surface fatigue wear): Μηχανισμός φθοράς που λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες συνεχόμενης φόρτισης. Εμφανίζεται με τη μορφή ρωγμών οι οποίες ενώνονται και οδηγούν στην απομάκρυνση των επιφανειακών στρωμάτων υλικού.

- Μηχανική διάβρωση: Μηχανισμός φθοράς που λαμβάνει χώρα όταν στερεά ή ρευστά σωματίδια προσκρούουν πάνω σε στερεή επιφάνεια.
- Χημική διάβρωση: Μηχανισμός φθοράς που λαμβάνει χώρα όταν η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με χημικά δραστικό περιβάλλον.

Αναλυτικότερα, τα σωματίδια μπορούν να λειτουργήσουν και ως στερεό λιπαντικό, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της τριβής μεταξύ των επιφανειών [54]. Επίσης, οι Tjong et. al. [50] συσχέτισαν την απώλεια όγκου του υλικού σε τριβολογικές δοκιμές, με το εφαρμοζόμενο φορτίο, την απόσταση ολίσθησης, τον συντελεστή φθοράς και την σκληρότητα του δείγματος. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, όσο αυξημένη είναι η σκληρότητα του υλικού, τόσο μειωμένη θα είναι η απώλεια όγκου, το οποίο συνεπάγεται σε αύξηση της αντίστασης στη φθορά. Συμπέρασμα το οποίο αποδεικνύεται από αρκετές τριβολογικές δοκιμές της βιβλιογραφίας, όπου αναφέρουν πως με την αύξηση των οπλισμών, μειώνεται και η φθορά του δείγματος.

Εν κατακλείδι, με την κατασκευή σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας, δημιουργούνται τεμάχια τα οποία παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα μονολιθικά μέταλλα, χωρίς οπλισμούς. Οι ιδιότητες που συναντώνται συχνότερα στα σύνθετα, είναι η αντοχή σε κρούση, ανθεκτικότητα στη φθορά και τη θερμοκρασία, καθώς επίσης και η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μηχανικές ιδιότητες και η τριβολογική συμπεριφορά εξαρτώνται άμεσα από τη φύση, τον όγκο, το μέγεθος, την κατανομή των οπλισμών και την συνδεσιμότητα μεταξύ οπλισμών/μήτρας.

Κεφάλαιο 2 : Πειραματικό μέρος

Στόχος της εργασίας αυτής, είναι η διερεύνηση της τριβολογικής συμπεριφοράς των σύνθετων δοκιμίων μεταλλικής μήτρας, τα οποία έχουν δημιουργηθεί με μη συμβατικές μεθόδους. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν δοκίμια **ανθρακούχου χάλυβα St37-2** (ή S235), με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0,17% και σκληρότητα 150HV10.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση του ανθρακούχου χάλυβα St37-2.

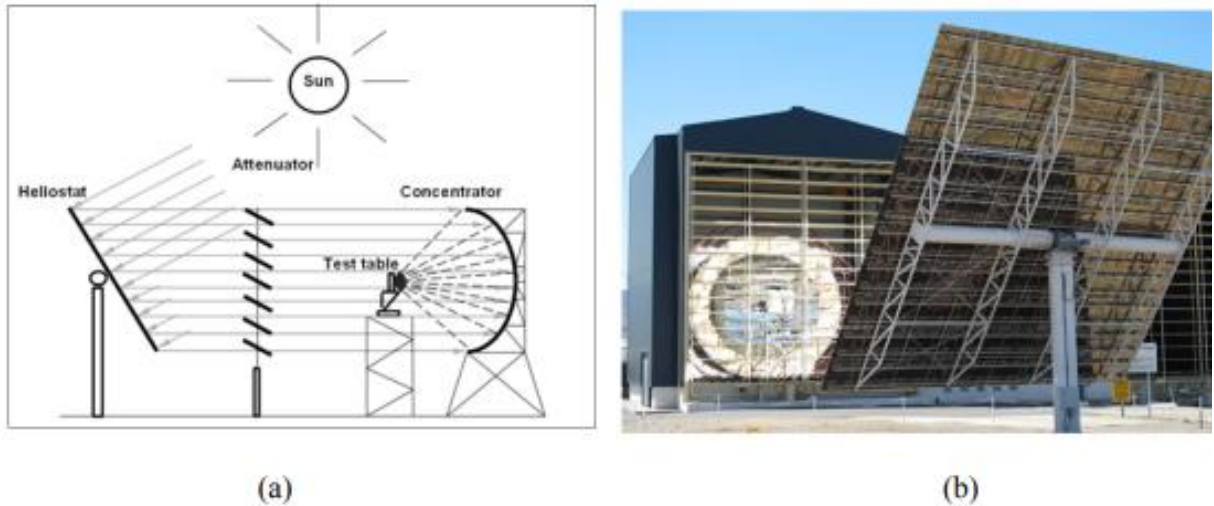
Χάλυβας	Ανθρακας, C %	Πυρίτιο, Si %	Μαγγάνιο, Mn %	Φώσφορος, P %	Θείο, S %	Άζωτο, N %
St37-2	0.20	0.35	0.75	0.050	0.050	0.011

Δείγματα πλακών με διαστάσεις $35 \times 70 \times 15 \text{mm}^3$ στιλβώθηκαν σε μέση τραχύτητα (Ra) $1,0 \pm 0,2 \mu\text{m}$ και, πριν από την ηλιακή επεξεργασία, καλύφθηκαν από ένα στρώμα σκόνης καρβιδίου, το οποίο πιέστηκε με το χέρι πάνω στον χάλυβα, ώστε να σχηματιστεί ένα στρώμα πάχους 1,5 mm σε κυκλικό σχήμα, σαν δίσκο, με διάμετρο 35 mm [5]. Τα καρβίδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν **βανάδιο (V)** και **νιόβιο (NbC)**. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο μηχανικής επιφανειών στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

2.1 Εξοπλισμός

Εξοπλισμός δημιουργίας σύνθετων δοκιμίων

Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε στις εγκαταστάσεις της Plataforma Solar de Almeria, PSA στην Ισπανία στον οριζόντιο ηλιακό φούρνο SF40. Η αρχή λειτουργίας του παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 1.2.

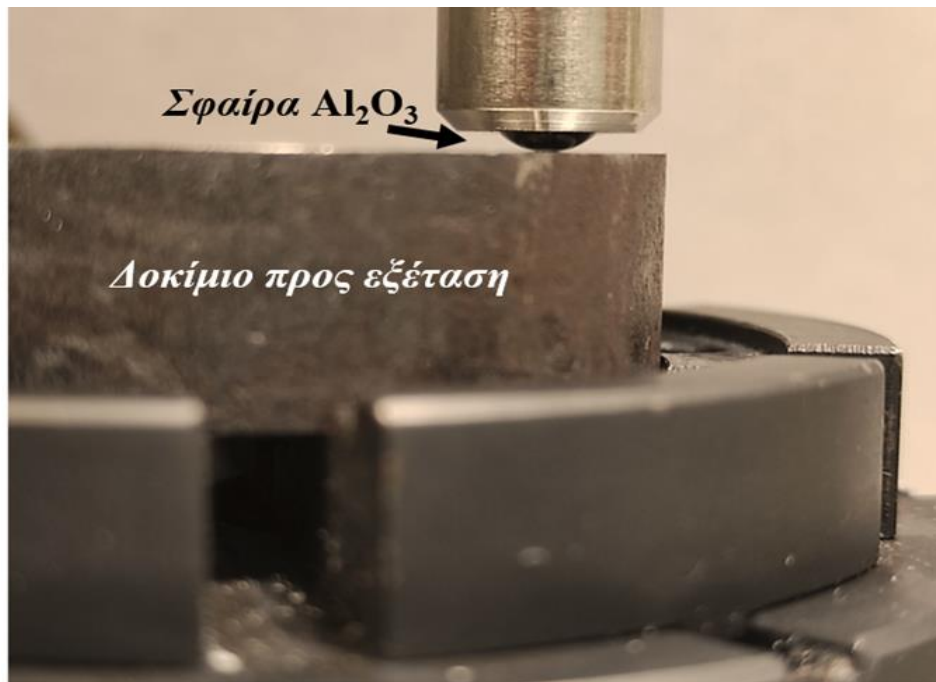


Εικόνα 2.1: *a) Λειτουργικό διάγραμμα του ηλιακού κλιβάνου SF40. (b) Ηλιακός φούρνος SF40 σε λειτουργία [46].*

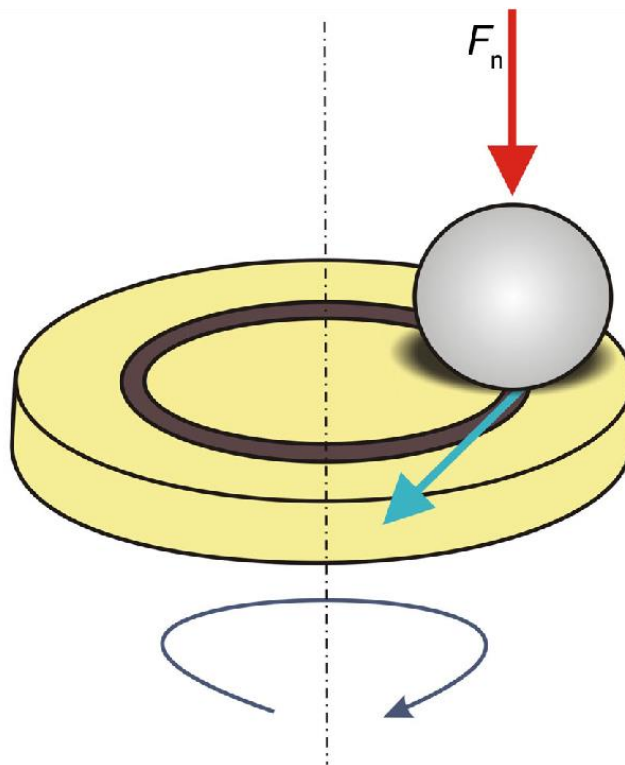
Εξοπλισμός χαρακτηρισμού των σύνθετων που προέκυψαν

Για τον χαρακτηρισμό της τριβολογικής συμπεριφοράς της επιφάνειας, μετά την επεξεργασία, τα δοκίμια στιλβώθηκαν σε επίπεδα τραχύτητας (Ra) $1,0 \pm 0,2 \mu\text{m}$. Έπειτα, δοκιμάστηκαν υπό συνθήκες τριβής ολίσθησης σε ξηρό αέρα, με θερμοκρασία δωματίου 25°C χρησιμοποιώντας το τριβόμετρο «Centre Suisse d' Electronique et de Microtechnique, CSEM» το οποίο επιτρέπει την καταγραφή του συντελεστή τριβής σε πραγματικό χρόνο. Για τα πειράματα (ball-on-disk), χρησιμοποιήθηκε σφαίρα αλουμίνας (Al_2O_3), διαμέτρου 6mm, υπό φορτία 5 και 10N. Η ταχύτητα ολίσθησης ήταν στα 20cm/s. Κάθε δοκιμή διήρκησε 200.000 περιστροφές.

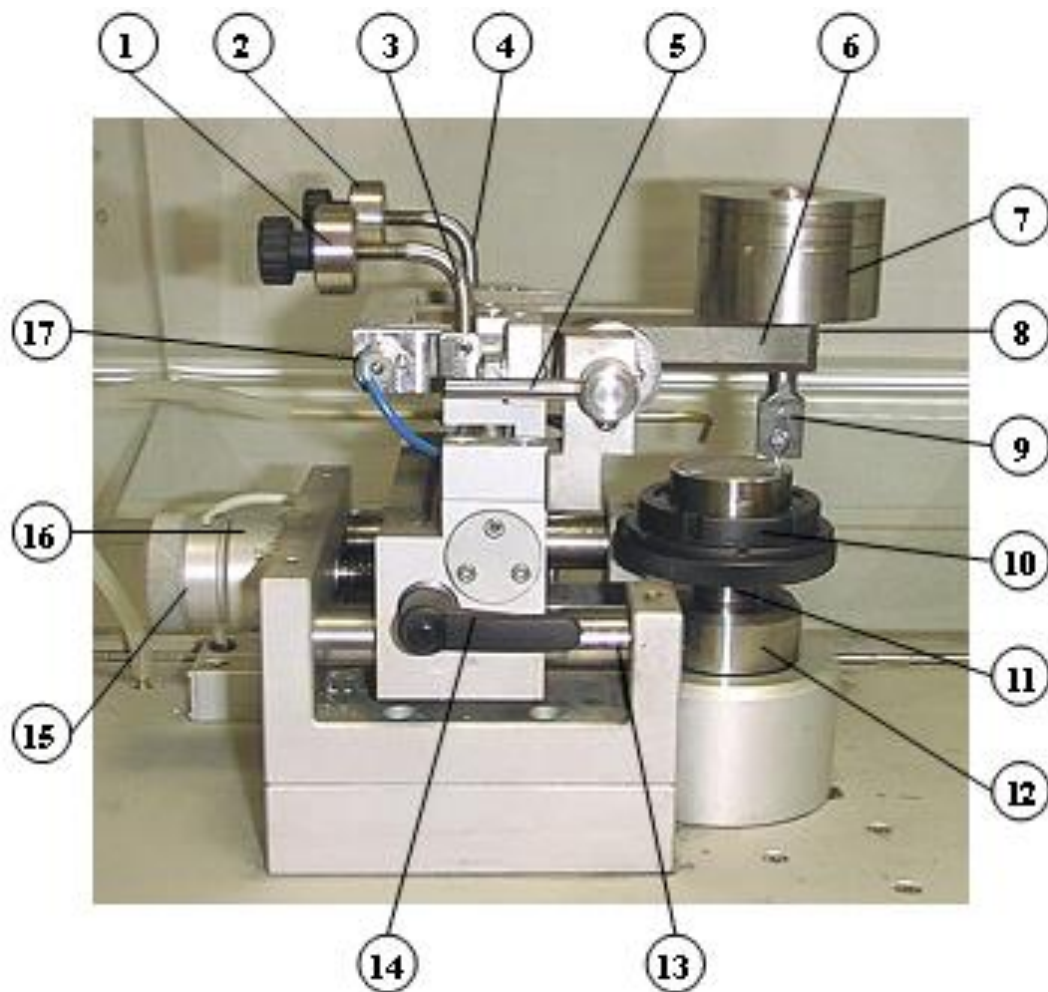
Για τη μέτρηση του ρυθμού φθοράς, έπρεπε να ληφθούν ενδιάμεσες μετρήσεις του όγκου του αποβαλλόμενου υλικού κατά τη διάρκεια των δοκιμών τριβής. Αυτό απαιτούσε την παύση των δοκιμών τριβής και τη μέτρηση του όγκου φθοράς εκείνη τη στιγμή, με χρήση του τραχύμετρου, χωρίς τη μετακίνηση του δοκιμίου-δίσκου από το τριβόμετρο.



Εικόνα 2.2: Απόσπασμα δοκιμής τριβομέτρησης, με σφαίρα αλουμίνας.



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση διεργασίας ball-on-disk. Πηγή: Schematic of the ball-on-disk wear test system [25] | Download Scientific Diagram (researchgate.net)



Εικόνα 2.4: Τριβόμετρο της εταιρίας CSM., τα αριθμημένα μέρη του τριβομέτρου επεξηγούνται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2.2: Επεξήγηση στοιχείων τριβόμετρου.

1,2- Αντίβαρα	12- Πρωτεύουσα άτρακτος
3,4- Βάση αντιβάρων	13- Βαθμονομημένος άξονας σε mm
5- Έκκεντρο ρύθμισης	14- Ασφαλιστικός μοχλός
6- Στέλεχος δυναμόμετρου	15- Στρόφαλο ρύθμισης ακτίνας αύλακας
7- Βαρίδι	16- Βερνιέρος
8- Ασφαλιστικός κοχλίας στυλίσκου	17- Αισθητήρας μέτρησης δύναμης τριβής LVDT.
9- Στυλίσκος	

10- Τσοκ
11-Δευτερεύουσα άτρακτος

Τα στοιχεία του όγκου φθοράς υπολογίστηκαν με τη χρήση ενός προφιλόμετρου γραφίδας (Taylor-Hobson). Αναλυτικά, λήφθηκαν συνολικά 7 διαφορετικές μετρήσεις ανά 5.000 περιστροφές, μετρώντας σε κάθε περίπτωση το ποσοστό της επιφάνειας που έχει χαθεί, κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Εικόνα 2.5: Προφιλόμετρο γραφίδας (Taylor-Hobson), εργαστηρίου ΠΑΔΑ.

Από τη κατατομή της αύλακας φθοράς υπολογίστηκε το εμβαδό της τομής της αύλακας μέσω Η/Υ και του ηλεκτρονικού προγράμματος επεξεργασίας των δεδομένων του ταχυμέτρου - κατατομόμετρου. Μετά από επεξεργασία των τιμών, ο όγκος φθοράς υπολογίστηκε με τον εξής τύπο:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot A$$

Όπου:

V = ο όγκος φθοράς σε mm³.

R = η τροχιά που χαράζει η σφαίρα στην εκάστοτε δοκιμή σε mm.

A = το εμβαδόν που έχει καλυφθεί σε κάθε περιστροφή σε μm².

Επίσης, ο συντελεστής φθοράς υπολογίζεται ως εξής:

$$W = \frac{V}{F \cdot s}$$

Όπου:

W = ο συντελεστής φθοράς σε $\text{m}^3/\text{N}\cdot\text{m}$.

V = ο όγκος φθοράς σε mm^3 .

F = το επιβαλλόμενο φορτίο σε N .

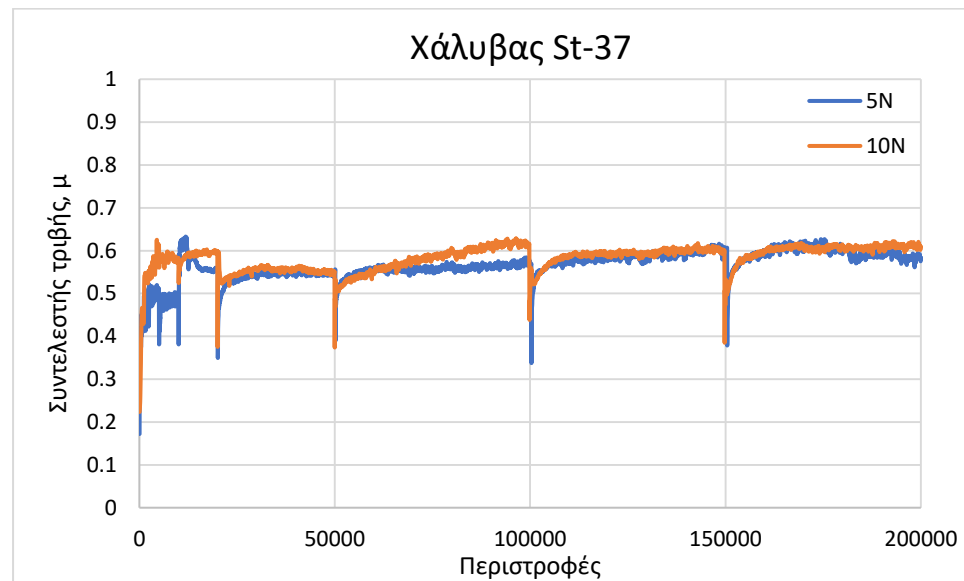
s = η απόσταση της σφαίρας σε κάθε περιστροφή σε m .

2.2 Αποτελέσματα και επεξεργασία

2.2.1 Συντελεστής τριβής – Friction coefficient (μ)

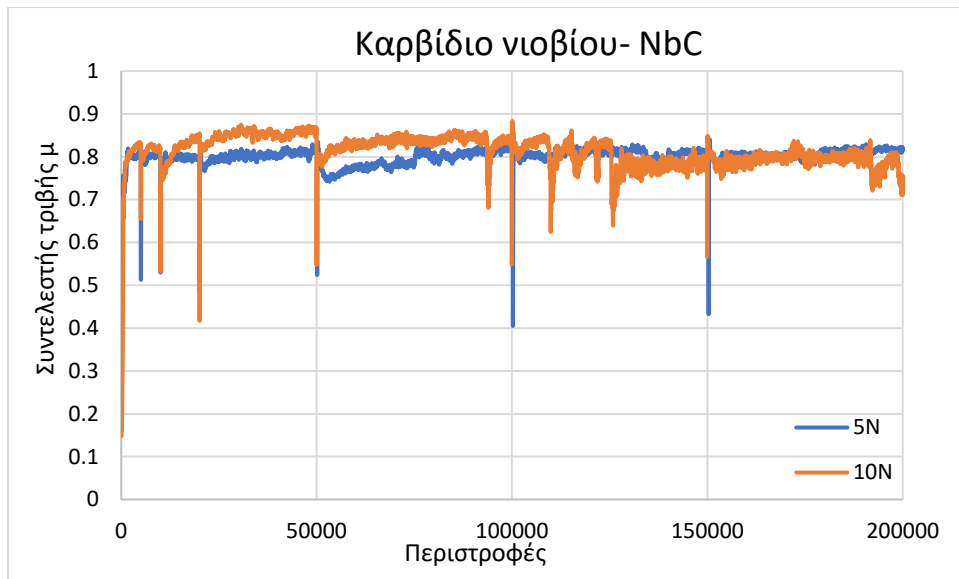
Βάσει των δεδομένων που προέκυψαν, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζουν τον συντελεστή τριβής, για το υπόστρωμα χάλυβα και για τα πλέον σύνθετα δοκίμια με καρβίδια του νιοβίου και βαναδίου.

Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα που αφορά το δοκίμιο χάλυβα:



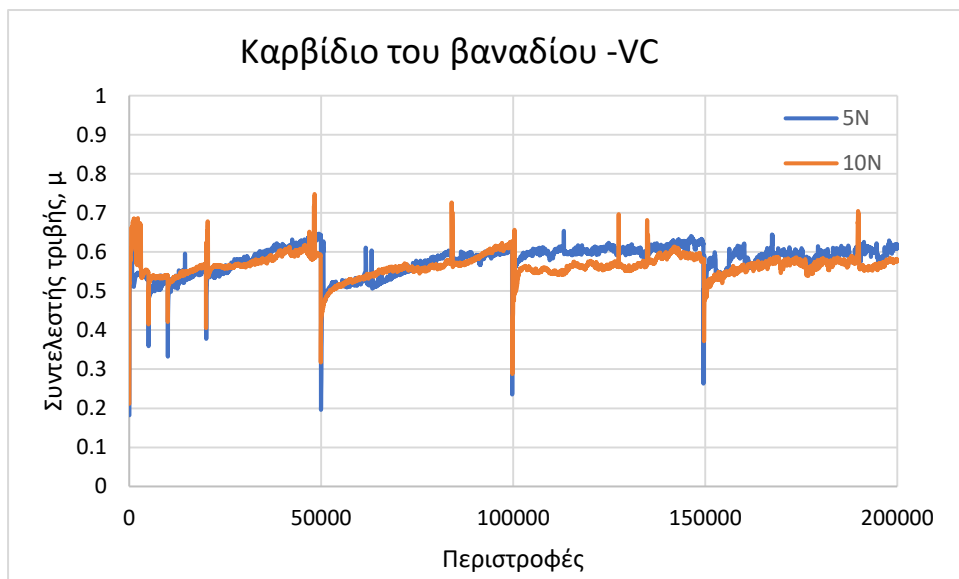
Διάγραμμα 2-1: Διάγραμμα συντελεστή τριβής του χαλύβδινου δοκιμίου συναρτήσει των περιστροφών, για φορτίο 5N και 10N.

Επίσης το γράφημα για το καρβίδιο του νιοβίου:



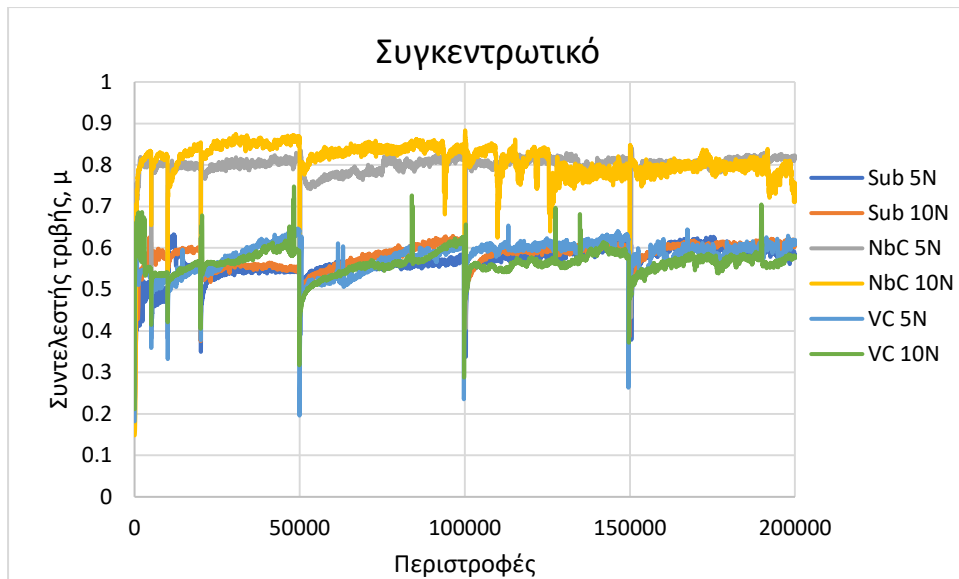
Διάγραμμα 2-2: Διάγραμμα συντελεστή τριβής του σύνθετου δοκιμίου με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου, συναρτήσε των περιστροφών, για φορτία 5N και 10N.

Και το διάγραμμα για το καρβίδιο του βαναδίου:



Διάγραμμα 2-3: Διάγραμμα συντελεστή τριβής του σύνθετου με διασπορά καρβιδίων του βαναδίου δοκιμίου, συναρτήσε των περιστροφών, για φορτία 5N και 10N.

Και για καλύτερη απεικόνιση και κατανόηση των αποτελεσμάτων παρατίθεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα για τα τρία είδη δοκιμίων.



Διάγραμμα 2-4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για τα τρία είδη δοκιμών, συναρτήσει των περιστροφών, για φορτία 5N και 10N.

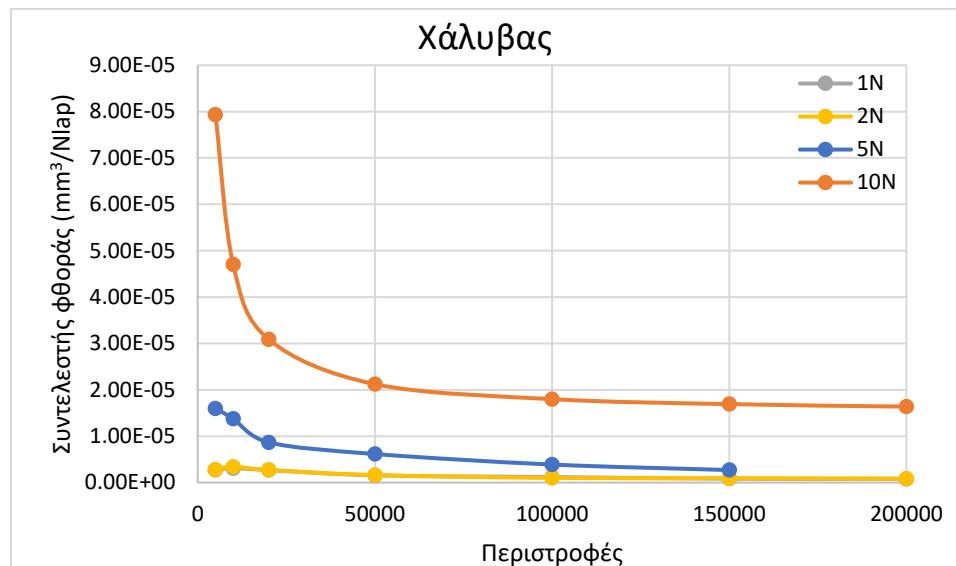
Από την παρατήρηση των παραπάνω διαγραμμάτων, προκύπτει πως ο υψηλότερος συντελεστής τριβής, παρουσιάζεται στα σύνθετα δοκίμια με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου. Συγκεκριμένα, και για τις δύο τιμές φορτίου, φαίνεται πως ο συντελεστής μ , για τα δοκίμια νιοβίου είναι αρκετά υψηλός και κυμαίνεται μεταξύ 0,75 με 0,87. Ωστόσο, για τα δοκίμια βαναδίου οι τιμές μ είναι μεταξύ 0,55 και 0,65, ενώ για τα δοκίμια χάλυβα πρόκειται για τιμές μεταξύ 0,51 και 0,62, οι οποίες είναι επίσης σχετικά υψηλές τιμές. Οι συγκεκριμένες τιμές υποδηλώνουν ότι υπάρχει σημαντική αντίσταση στην κίνηση και χρειάζεται σημαντική δύναμη για να ξεπεραστούν οι δυνάμεις τριβής και να ξεκινήσει ή να διατηρηθεί η σχετική κίνηση μεταξύ των επιφανειών. Γενικά οι τιμές του συντελεστή για κάθε δοκιμή ξεχωριστά, κυμαίνονται σε σταθερές τιμές, γεγονός που αποδίδεται στη σταθερή απόδοση κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι αιχμηρές κορυφές που παρουσιάζονται πάνω και κάτω, έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της διακοπής των πειραμάτων, έτσι ώστε να μετρηθεί ο όγκος φθοράς [5].

2.2.2 Ειδικός ρυθμός φθοράς – Specific wear rate (k)

Από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη δοκιμή ολίσθησης σε σφαίρα αλουμίνιας, δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα ειδικού ρυθμού φθοράς, συναρτήσει των περιστροφών της δοκιμής. Ειδικότερα, ο ειδικός ρυθμός φθοράς, είναι ένα μέτρο του ποσού της απώλειας υλικού ή της φθοράς που συμβαίνει

ανά μονάδα απόστασης ή χρόνου ολίσθησης. Προσδιορίζει ποσοτικά τον ρυθμό με τον οποίο το υλικό φθείρεται κατά τη διάρκεια μιας τριβολογικής διαδικασίας.

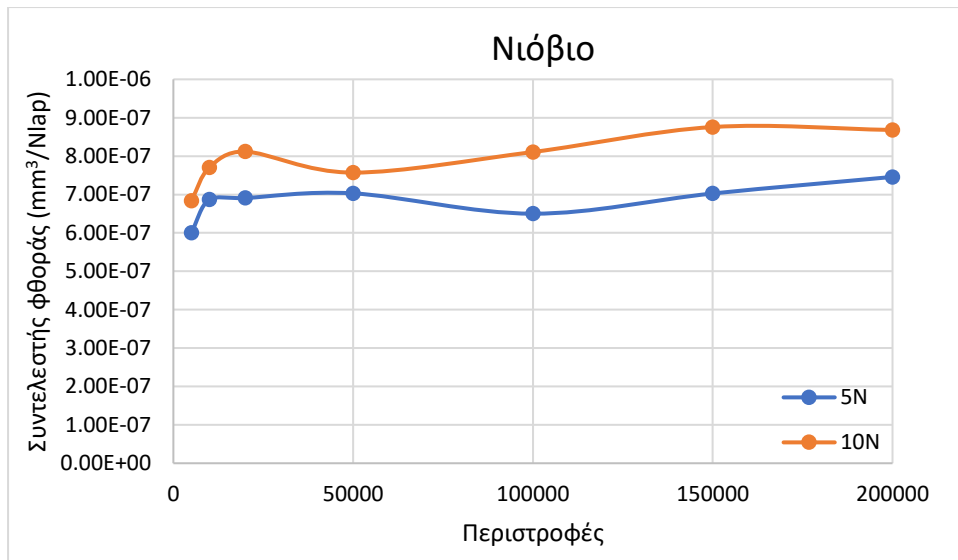
Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα που αφορά το δοκίμιο χάλυβα:



Διάγραμμα 2-5: Ειδικός ρυθμός φθοράς, για τα δοκίμια χάλυβα, συναρτήσει των περιστροφών της δοκιμής, για φορτία 1,2,5 και 10N.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται μείωση του συντελεστή φθοράς κατά την πάροδο των περιστροφών, ιδίως για τη δοκιμή φορτίου 10N. Αναλυτικότερα, παρατηρείται πως η πτώση του συντελεστή γίνεται ραγδαία έως και τις 50.000 περιστροφές, από $8,00 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ σε $2,20 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$. Ωστόσο, για τις υπόλοιπες τιμές περιστροφών ο συντελεστής κυμαίνεται σε σταθερές τιμές. Επίσης, φαίνεται πως για τις δοκιμές 1N και 2N ο συντελεστής είναι σχετικά σταθερός χωρίς μεγάλες αυξομειώσεις, ενώ για 5N παρατηρείται μια μικρή πτώση του συντελεστή από $1,60 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ στα $6,15 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ για 50.000 περιστροφές.

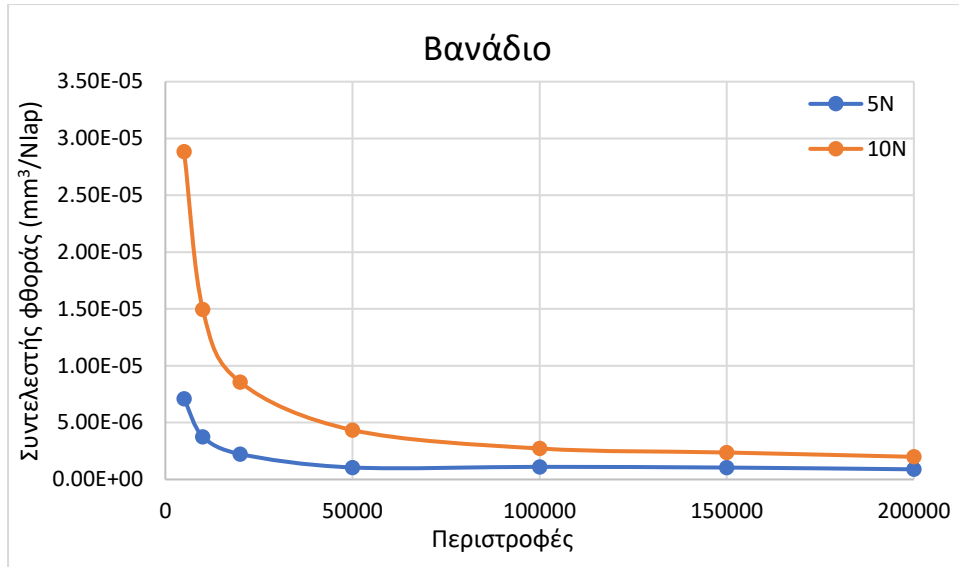
Επίσης το γράφημα για το καρβίδιο του νιοβίου:



Διάγραμμα 2-6: Ειδικός ρυθμός φθοράς για τα σύνθετα δοκίμια με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου, συναρτήσει των περιστροφών της δοκιμής, για φορτία 5N και 10N.

Σε αντίθεση με το διάγραμμα του δοκιμίου χάλυβα, το διάγραμμα αυτό φαίνεται να έχει διαφορετική μορφή. Αναλυτικότερα, παρατηρείται σχετικά σταθερός ρυθμός φθοράς με μέσο όρο $7,00 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ για τις δοκιμές των 5N και $8,28 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ για το φορτίο των 10N.

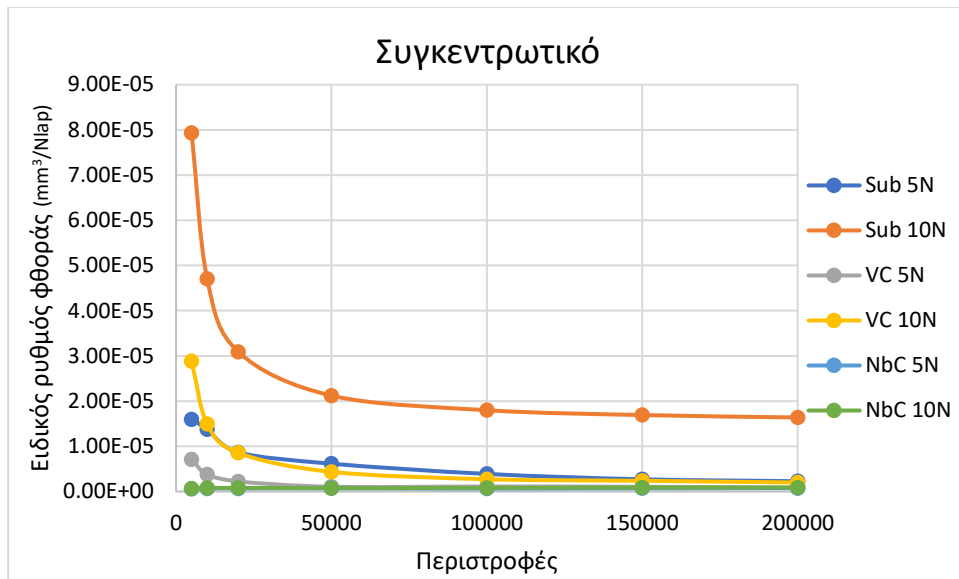
Και το διάγραμμα για το καρβίδιο του βαναδίου:



Διάγραμμα 2-7: Ειδικός ρυθμός φθοράς για τα σύνθετα δοκίμια με διασπορά καρβιδίων του βαναδίου, συναρτήσει των περιστροφών της δοκιμής, για φορτία 5N και 10N.

Το συγκεκριμένο γράφημα, ακολουθεί τη συμπεριφορά του διαγράμματος των δοκιμίων χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ραγδαία πτώση του συντελεστή από $2.90 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ έως $4.35 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ για το φορτίο 10N και από $7,10 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ στα $1,05 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nlap}$ για το φορτίο 5N στις 50.000 περιστροφές, ενώ φαίνεται ασυμπτωτική πτώση των καμπυλών για τους υπόλοιπους αριθμούς περιστροφών.

Για καλύτερη σύγκριση και κατανόηση των αποτελεσμάτων, ακολουθεί το συγκεντρωτικό διάγραμμα για όλες τις δοκιμές.



Διάγραμμα 2-8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ειδικού ρυθμού φθοράς συναρτήσει των περιστροφών των δοκιμών χάλυβα και των σύνθετων με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου και του βαναδίου, για τα φορτία των 5N και 10N.

Γενικά, σε όλες τις δοκιμές για όλα τα είδη δοκιμών, γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για επιφάνειες ανθεκτικές στη φθορά, λόγω του πολύ χαμηλού συντελεστή φθοράς. Παρατηρείται επίσης, πως ενώ το υπόστρωμα χάλυβα που έχει επιλεγεί ήταν ήδη πολύ ανθεκτικό στη φθορά, με την προσθήκη των καρβιδίων ο συντελεστής μειώθηκε αρκετά, δηλαδή η επιφάνεια έγινε ανθεκτικότερη από ότι ήταν. Επιπλέον, χαμηλότερο συντελεστή φθοράς παρουσιάζει το σύνθετο με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου, έναντι εκείνου του βαναδίου. Ωστόσο η διαφορά των τιμών είναι πολύ μικρή. Επιπροσθέτως, το παρατεταμένο στάδιο φθοράς σταθερής κατάστασης καθιστά τη συμπεριφορά αυτών των στρωμάτων προβλέψιμη, γεγονός που αποτυπώνει πως είναι επιθυμητά για τριβολογικές εφαρμογές [5].

Κεφάλαιο 3 : Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε την δημιουργία σύνθετων μεταλλικής μήτρας, με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου και του βαναδίου, με τη χρήση της μη συμβατικής μεθόδου της Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ακτινοβολίας. Αναλύθηκε η τριβολογική συμπεριφορά των δοκιμίων χάλυβα και έπειτα των σύνθετων που προέκυψαν.

Μετά το πέρας της έρευνας αυτής, έχει προκύψει το γεγονός ότι η μέθοδος Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ακτινοβολίας, είναι μια καινοτόμα ενέργεια, η οποία τείνει να λύσει το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης, μειώνοντας την απόρριψη των αποβλήτων από τα ορυκτά καύσιμα. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου κατεργασίας, αποτελεί η συνεχής ανάγκη για ηλιοφάνεια. Ωστόσο με την υποστήριξη μιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας, θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και σε βιομηχανικό επίπεδο.

Η κατεργασία αυτή, δημιουργεί τεμάχια με εξαιρετική αντοχή στη φθορά και σχετικά υψηλό συντελεστή τριβής. Επίσης, σε σύγκριση με παλαιότερη έρευνα, που είχαν δημιουργηθεί σύνθετα με τη μέθοδο FCAW, η οποία δημιουργεί τεμάχια με αποδεκτές μηχανικές ιδιότητες και χαμηλό συντελεστή φθοράς, προκύπτει πως τα “ηλιακά” σύνθετα είναι προτιμότερα [45]. Επιπλέον, σε σύγκριση με τον χάλυβα Hardox, ο οποίος είναι ανθεκτικός στη φθορά και ιδίως σε σκληρές συνθήκες, τα σύνθετα παρουσίασαν παρόμοια τριβολογική συμπεριφορά. Ωστόσο, τα σύνθετα με διασπορά καρβιδίων του νιοβίου, είναι ανθεκτικότερα στη φθορά, εξαιτίας του χαμηλότερου ρυθμού φθοράς. Συνεπώς, με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη βοήθεια της βιβλιογραφίας, η επιφάνεια και των δύο σύνθετων κρίθηκε κατάλληλη για χρήση τους σε απαιτητικές τριβολογικές εφαρμογές.

Ενδιαφέρουσα θα ήταν περαιτέρω έρευνα για τη μικροδομή, σκληρότητα και μικροσκληρότητα των δοκιμίων αυτών, καθώς επίσης η ανάλυση του πορώδους, για πιο ολοκληρωμένη εικόνα και διευκόλυνση της σύγκρισης μεταξύ των δύο οπλισμών. Επιπλέον, χρήσιμη θα ήταν και η έρευνα για δημιουργία υβριδικών σύνθετων με διασπορά καρβιδίων νιοβίου και βαναδίου, εφόσον πρόκειται για οπλισμούς που προσφέρουν πολλά με τη σειρά τους στις ιδιότητες των υλικών.

Βιβλιογραφία

- [1] Π. Ψυλλάκη and Π. Νικολακόπουλος, *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2021.
- [2] M. Mozetič, “Surface modification to improve properties of materials,” *Materials (Basel)*., vol. 12, no. 3, 2019, doi: 10.3390/MA12030441.
- [3] D. Askeland, *ΥΛΙΚΑ: ΔΟΜΗ, ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*., 7th ed. ΤΖΙΟΛΑ, 2020.
- [4] D. Siva Prasad and C. Shoba, “Hybrid composites – a better choice for high wear resistant materials,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 172–178, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.JMRT.2014.03.004.
- [5] A. Mourlas, E. Pavlidou, G. Vourlias, J. Rodríguez, and P. Psyllaki, “Concentrated solar energy for in-situ elaboration of wear-resistant composite layers. Part I: TiC and chromium carbide surface enrichment of common steels,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 377, no. August, p. 124882, 2019, doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.08.011.
- [6] M. Y. Khan, P. S. Rao, and B. S. Pabla, “A Framework for Surface Modification by Electrical Discharge Coating using Variable Density Electrodes,” *E3S Web Conf.*, vol. 309, p. 01093, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130901093.
- [7] Θ. Τριακίδου, “Αριστοτελειο Πανεπιστημιο Θεσσαλονικησ Πολυτεχνικη Σχολη Τμημα Μηχανολογων Μηχανικων Κατασκευαστικος ΤομΕργαλειομηχανών, Εργαστήριο Μηχανολογίας, Διαμορφωτικήζεασ,” *Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων ναοσύνθετων και μικροσύνθετων υλικών.*, 2014, [Online]. Available: [https://ikee.lib.auth.gr/record/271785/files/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΤΙΡΙΑΚΙΔΟΥ ΘΩΜΑΙΣ.pdf](https://ikee.lib.auth.gr/record/271785/files/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ_ΤΙΡΙΑΚΙΔΟΥ_ΘΩΜΑΙΣ.pdf)
- [8] G. Manohar, A. Dey, K. M. Pandey, and S. R. Maity, “Fabrication of metal matrix composites by powder metallurgy: A review,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1952, 2018, doi: 10.1063/1.5032003.
- [9] G. H. Staab, “INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS,” *Laminar Compos.*, pp. 1–16, Jan. 1999, doi: 10.1016/B978-075067124-8/50001-1.
- [10] P. A. Bajakke, V. R. Malik, and A. S. Deshpande, “Particulate metal matrix composites and their fabrication via friction stir processing—a review,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 8, pp. 833–881, 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1605181.
- [11] V. P. Mahesh, J. Alphonsa, and A. Arora, “Electrochemical Behavior of

- Aluminum-Molybdenum Surface Composites Developed by Friction Stir Processing,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 30, no. 11, pp. 8663–8676, 2021, doi: 10.1007/s11665-021-06050-2.
- [12] A. Kareem, J. A. Qudeiri, A. Abdudeen, T. Ahammed, and A. Ziout, “A review on aa 6061 metal matrix composites produced by stir casting,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 1, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/ma14010175.
- [13] D. V. Von Kallon, “Types of Aluminium Matrix Composites”.
- [14] S. Kant and A. Singh Verma#, “Stir Casting Process in Particulate Aluminium Metal Matrix Composite: A Review,” *Int. J. Mech. Solids*, vol. 12, no. 1, pp. 61–69, 2017, [Online]. Available: <http://www.ripublication.com/ijms.htm>
- [15] soroush shakiba jahromi and reza jahedi, “The production and sustainable role of particle composites in engineering structures Denmark-Copenhagen The production and sustainable role of particle composites in engineering structures,” no. September 2018, pp. 0–12, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/333787226>
- [16] S. B. Prabu, L. Karunamoorthy, S. Kathiresan, and B. Mohan, “Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 171, no. 2, pp. 268–273, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.071.
- [17] R. L. Deuis, C. Subramanian, and J. M. Yellup, “Abrasive wear of aluminium composites - A review,” *Wear*, vol. 201, no. 1–2, pp. 132–144, 1996, doi: 10.1016/S0043-1648(96)07228-6.
- [18] A. Canakci, F. Arslan, and T. Varol, “Physical and mechanical properties of stir-casting processed AA2024/B4Cp composites,” *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 4, pp. 505–515, 2014, doi: 10.1515/secm-2013-0118.
- [19] R. GUPTA, B. S. S. DANIEL, and G. P. CHAUDHARI, “Ultrasonic Assisted Casting of Aluminum Matrix Composite,” *Int. J. Appl. Res. Mech. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 246–250, 2013, doi: 10.47893/ijarme.2013.1094.
- [20] A. H. Idrisi and A. H. I. Mourad, “Conventional stir casting versus ultrasonic assisted stir casting process: Mechanical and physical characteristics of AMCs,” *J. Alloys Compd.*, vol. 805, pp. 502–508, 2019, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.07.076.
- [21] Y. Lin, E. J. Lavernia, and C. Materials, “Infiltration Method,” 2021.
- [22] S. Jayalakshmi, A. Singh, and M. Gupta, “Synthesis of Light Metal

- Nanocomposites: Challenges and Opportunities,” *Indian J. Adv. Chem. Sci.*, no. October, pp. 283–288, 2016.
- [23] S. P. Midson and A. Jackson, “A comparison of thixocasting and rheocasting,” *Inst. Cast Met. Eng. - 67th World Foundry Congr. wfc06 Cast. Futur.*, vol. 2, pp. 1081–1090, 2006.
- [24] D. Casting, M. Alloys, M. M. Composite, S. Casting, and A. E. W. Jarfors, “Rheocasting Semisolid Casting of Metallic Parts and Structures Two Phase Processing of Metal Matrix Composites,” 2022.
- [25] V. V. Vani and S. K. Chak, “The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy,” *Manuf. Rev.*, vol. 5, 2018, doi: 10.1051/mfreview/2018001.
- [26] S. Scudino *et al.*, “Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurgy,” *Acta Mater.*, vol. 57, no. 6, pp. 2029–2039, 2009, doi: 10.1016/j.actamat.2009.01.010.
- [27] M. M. Composite, T. D. Printing, and L. Bolzoni, “Sintering of Titanium Alloys . Process- ing and Properties An Insight Into Metal Matrix Compos- ites With Nano Size Reinforcement,” 2022.
- [28] J. B. Fogagnolo, F. Velasco, M. H. Robert, and J. M. Torralba, “Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 342, no. 1–2, pp. 131–143, 2003, doi: 10.1016/S0921-5093(02)00246-0.
- [29] I. To and M. Alloying, “(3" 1.2,” 1998.
- [30] S. Aktaş and E. A. Diler, “INTERNATIONAL ADVANCED RESEARCHES and ENGINEERING JOURNAL A review on the effects of micro-nano particle size and volume fraction on microstructure and mechanical properties of metal matrix composites manufactured via mechanical alloying,” *Int. Adv. Res. Eng. J.*, vol. 02, no. 01, pp. 68–074, 2018, [Online]. Available: www.dergipark.gov.tr
- [31] A. H. Pakseresht, H. Ahmadian Baghbaderani, and R. Yazdani-Rad, “Role of Different Fractions of Nano-size SiC and Milling Time on the Microstructure and Mechanical Properties of Al–SiC Nanocomposites,” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 69, no. 5, pp. 1007–1014, 2016, doi: 10.1007/s12666-015-0606-9.
- [32] S. A. A. Alem *et al.*, “Microwave sintering of ceramic reinforced metal matrix composites and their properties: a review,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 35, no. 3, pp. 303–327, 2020, doi: 10.1080/10426914.2020.1718698.

- [33] J. Gandra, "Friction stir processing," *Surf. Modif. by Solid State Process.*, pp. 73–111, 2014, doi: 10.1533/9780857094698.73.
- [34] B. Li, Y. Shen, L. Luo, and W. Hu, "Fabrication of TiCp/Ti-6Al-4V surface composite via friction stir processing (FSP): Process optimization, particle dispersion-refinement behavior and hardening mechanism," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 574, pp. 75–85, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2013.03.019.
- [35] V. K. Parikh, V. Patel, D. P. Pandya, and J. Andersson, "Jo ur na f," *HELIYON*, p. e13558, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13558.
- [36] M. Zhang, S. S. Liu, S. X. Luo, and K. L. Qu, "Effect of molybdenum on the high-temperature properties of TiC-TiB₂ reinforced Fe-based composite laser cladding coatings," *J. Alloys Compd.*, vol. 742, pp. 383–390, 2018, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.01.275.
- [37] C. S. Ramesh, H. Adarsha, A. Chaturvedi, and N. Nair, "Investigations on the Effect of Molybdenum (Mo) and Molybdenum Silicon Carbide (Mo-10% Sic) Composite Coatings on Mild Steel Substrate using HVOF Technique," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 24422–24427, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.238.
- [38] A. K. Hussain, U. M. Basheer, and A. Naib, "Review article Recent developments in graphene based metal matrix composite coatings for corrosion protection application: A review," vol. 29, no. 3, pp. 1–9, 2019, doi: 10.14456/jmmm.2019.27.
- [39] K. B M, G. M C, S. Sharma, P. Hiremath, M. Shettar, and N. Shetty, "Coated and uncoated reinforcements metal matrix composites characteristics and applications—A critical review," *Cogent Eng.*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1856758.
- [40] Y. Chabak *et al.*, "Structural and Tribological Studies of '(TiC + WC)/Hardened Steel' PMMC Coating Deposited by Air Pulsed Plasma," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 2, pp. 1–24, 2022, doi: 10.3390/met12020218.
- [41] D. K. Rajak, P. H. Wagh, P. L. Menezes, A. Chaudhary, and R. Kumar, "Critical Overview of Coatings Technology for Metal Matrix Composites," *J. Bio- Tribo- Corrosion*, vol. 6, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s40735-019-0305-x.
- [42] Z. Cao *et al.*, "Effect of Si-coated diamond on the relative density and thermal conductivity of diamond/W composites prepared by SPS," *Vacuum*, vol. 209, no. December 2022, p. 111728, 2023, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111728.

- [43] P. D. Sonawane and V. K. Bupesh Raja, “Concentrated solar energy in materials processing,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 41, no. 10, pp. 1201–1207, 2020, doi: 10.1080/01430750.2018.1493398.
- [44] A. Ferriere, C. Sanchez Bautista, G. P. Rodriguez, and A. J. Vazquez, “Corrosion resistance of stainless steel coatings elaborated by solar cladding process,” *Sol. Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1338–1343, 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.06.009.
- [45] A. Mourlas, P. Psyllaki, and G. Vourlias, “Δημιουργία σύνθετων επιφανειακών στρωμάτων υψηλής αντιτριβικής συμπεριφοράς με χρήση Συγκεντρωμένης Ηλιακής Ακτινοβολίας,” no. December, 2016.
- [46] J. Rodriguez, I. Cañadas, and E. Zarza, “New PSA high concentration solar furnace SF40,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1734, no. July 2019, 2016, doi: 10.1063/1.4949175.
- [47] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, and R. Rimašauskiene, “Matrix materials used in composites: A comprehensive study,” *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 1559–1562, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.086.
- [48] R. R. Balokhonov *et al.*, “Formation of Bulk Tensile Regions in Metal Matrix Composites and Coatings under Uniaxial and Multiaxial Compression,” *Phys. Mesomech.*, vol. 23, no. 2, pp. 135–146, 2020, doi: 10.1134/S1029959920020058.
- [49] E. Pagounis and V. K. Lindroos, “Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 246, no. 1–2, pp. 221–234, 1998, doi: 10.1016/s0921-5093(97)00710-7.
- [50] S. C. Tjong and K. C. Lau, “Abrasion resistance of stainless-steel composites reinforced with hard TiB₂ particles,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60, no. 8, pp. 1141–1146, 2000, doi: 10.1016/s0266-3538(00)00008-7.
- [51] W. H. Kan *et al.*, “Fabrication and characterization of microstructure of stainless steel matrix composites containing up to 25 vol% NbC,” *Mater. Charact.*, vol. 119, pp. 65–74, 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.07.019.
- [52] J. Wang and S. Fu, “Production of in situ vanadium carbide particulate reinforced iron matrix composite,” *Medziagotyra*, vol. 20, no. 4, pp. 409–413, 2014, doi: 10.5755/j01.ms.20.4.6445.
- [53] R. Chen, B. Li, and K. Xu, “Effect of particle morphology on fatigue crack propagation mechanism of TiB₂-reinforced steel matrix composites,” *Eng.*

- Fract. Mech.*, vol. 274, no. August, p. 108752, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108752.
- [54] P. L. Menezes, S. P. Ingole, M. Nosonovsky, S. V. Kailas, and M. R. Lovell, *Tribology for scientists and engineers: From basics to advanced concepts*, vol. 9781461419, no. March 2015. 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-1945-7.
- [55] G. V. Jagadeesh and S. Gangi Setti, “A review on micromechanical methods for evaluation of mechanical behavior of particulate reinforced metal matrix composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 23, pp. 9848–9882, 2020, doi: 10.1007/s10853-020-04715-2.