



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Μελέτη δημιουργίας επιστρωμάτων μέσω απόθεσης υλικού και χρήσης
δέσμης Laser**

Study of coatings developed by Laser cladding technic

Συγγραφέας:

Αντώνιος Ι. Σπυριδάκος

A.M.: 19393012

Επιβλέπων: Σταύρος Κ. Χιονόπουλος, Επικ. Καθ. ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία:

«Μελέτη δημιουργίας επιστρωμάτων μέσω απόθεσης υλικού και χρήσης δέσμης Laser»

Συγγραφέας:

Αντώνιος Ι. Σπυριδάκος (Α.Μ.: 19393012)

Επιβλέπων:

Σταύρος Κ. Χιονόπουλος, Επικ. Καθ. ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης:

17/10/2024

Εξεταστική Επιτροπή:

Σταύρος Χιονόπουλος
Επικ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Σταματίνα Θεοχάρη
Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας, Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αντώνιος Σπυριδάκος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 19393012 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών 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 διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Αντώνιος Ι. Σπυριδάκος

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρωτίστως την οικογένειά μου για την αδιάκοπη στήριξη, την εμπιστοσύνη και την συναισθηματική υποστήριξη που μου έδειξαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς χωρίς αυτούς δεν θα είχα καταφέρει τίποτα. Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, Αποστόλη Σπυριδάκο, Γιάννη Μισόκαλο, Δημήτρη Παρασκευόπουλο, Γιώργο Μαντουδάκη και Θοδωρή Πατίλα, οι οποίοι με εμπύχωναν, με συμβούλευαν και μου έδειχναν την αγάπη τους και το ενδιαφέρον τους συνεχώς, κατά την διάρκεια την φοίτησής μου. Επιπλέον, ευχαριστώ τους φίλους που γνώρισα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, για την στήριξη και το ενδιαφέρον τους. Είμαι ειλικρινά ευγνώμων για την πολύτιμη βοήθεια της εταιρείας TK PITSIRIKOS, η οποία συνείσφερε στην παρασκευή των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για το τμήμα του Innovation Hub της ΔΕΗ που μου έδωσε την δυνατότητα να έχω πρόσβαση στον εργαστηριακό εξοπλισμό τους, ο οποίος ήταν απαραίτητος για την υλοποίηση των πειραμάτων. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Σταύρο Χιονόπουλο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς εμένα από την πρώτη στιγμή, για τις χρήσιμες συμβουλές του, για την καθοδήγηση και το ενδιαφέρον του, καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την μελέτη δημιουργίας επιστρωμάτων μέσω της απόθεσης υλικού και της χρήσης δέσμης laser (laser cladding). Αρχικά, θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη αναφορά στις τεχνολογίες επιγόμωσης που χρησιμοποιούνται γενικά στην ναυπηγική. Έπειτα, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η τεχνική του laser cladding, με την εμβάθυνση αυτή να περιλαμβάνει τα τμήματα του εξοπλισμού της, τους παράγοντες που την διαμορφώνουν, τις διαφορετικές εκδοχές της, τις διαφορετικές σκόνες που χρησιμοποιούνται, τους τύπους των υποστρωμάτων στους οποίους εφαρμόζεται, τις εφαρμογές της τεχνολογίας σε διάφορους τομείς και τέλος τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί η βιβλιογραφική επισκόπηση δύο επιστημονικών άρθρων, για την καλύτερη κατανόηση της τεχνικής. Κατά την πειραματική διαδικασία, θα γίνει περιγραφή της παρασκευής των δοκιμών και θα παρουσιαστεί ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας. Τα πειράματα που διεξήχθησαν, περιλαμβάνουν την μακροσκοπική μελέτη και την ανάλυση της μικροδομής, τόσο των επιστρώσεων που δημιουργήθηκαν στα δοκίμια, όσο και των υποστρωμάτων του κάθε ενός, με χρήση οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Επιπλέον, περιλαμβάνουν σκληρομετρήσεις και έλεγχο της σκληρότητας του κάθε δοκιμίου μέσω ειδικής διάταξης, με τα αποτελέσματα να παρίστανται γραφικά. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις παραπάνω μελέτες, θα σχολιαστούν και θα συγκριθούν μεταξύ τους, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους παρασκευής των επιστρώσεων, την ποιότητα και την αποτελεσματικότητά τους, αλλά και την επιρροή τους στο υπόστρωμα.

Λέξεις κλειδιά: ναυπηγική, επιγόμωση, εναπόθεση υλικού, μικροδομή, επιστρώματα, υποστρώματα, κράματα, μακροσκοπία, μικροσκοπία, σκληρότητα, σκληρομετρήσεις, δέσμη laser, laser cladding

Abstract

The present thesis focuses on the study of coating creation through material deposition and the use of a laser beam. Initially, a brief reference will be made to cladding technologies commonly used in shipbuilding. Subsequently, the laser cladding technique will be thoroughly presented, with this analysis including the components of the equipment, the factors that influence the process, its different variations, the various powders that are used, the types of substrates it is applied to, its applications in various fields, and finally, its advantages and disadvantages. Following that, a literature review of two scientific articles will be conducted for a deeper understanding of the technique. During the experimental process, a description of the preparation of the samples will be provided, along with a presentation of the laboratory equipment used for the purposes of this study. The experiments carried out include the macroscopic study and microstructure analysis of the coatings created on the samples and the substrates of each, using optical and electron microscopy. Additionally, hardness tests are involved, along with the results graphically represented. The outcomes of the aforementioned studies will be discussed and compared, in order to draw conclusions regarding the coating preparation parameters, their quality and effectiveness, as well as their impact on the substrate.

Key words: shipbuilding, cladding, material deposition, microstructure, coatings, substrates, alloys, macroscopy, microscopy, hardness, hardness measurements, laser beam, laser cladding

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1: Οι τεχνολογίες επιγύμωσης γενικά στην ναυπηγική	2
1.1. Εισαγωγή.....	2
1.2. Επένδυση συγκόλλησης (Weld Cladding).....	3
1.3. Θερμικός ψεκασμός (Thermal spray)	4
1.4. Ψεκασμός με φλόγα (Flame spray).....	5
1.5. Ψεκασμός με πλάσμα (Plasma spray).....	6
1.6. Χημική εναπόθεση ατμών (CVD).....	7
1.7. Φυσική εναπόθεση ατμών (PVD)	8
Κεφάλαιο 2: Τεχνολογία επιγύμωσης με χρήση δέσμης Laser (Laser Cladding)	9
2.1. Εισαγωγή.....	9
2.2. Ανάλυση των τμημάτων εξοπλισμού του Laser Cladding.....	10
2.2.1. Η ενεργειακή πηγή του Laser	10
2.2.2. Η κεφαλή επένδυσης	11
2.2.3. Εξοπλισμός ελέγχου κίνησης και χειρισμού	12
2.3. Οι παράγοντες που διαμορφώνουν της ποιότητα της επιγύμωσης	13
2.4. Οι διαφορετικές εκδοχές της τεχνικής του Laser Cladding	14
2.4.1. Επένδυση σκόνης με χρήση δέσμης laser	14
2.4.2. Επένδυση σύρματος με χρήση δέσμης laser.....	14
2.4.3. Επένδυση laser άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (DED).....	15
2.5. Οι διαφορετικές σκόνης που χρησιμοποιούνται στην επιγύμωση με Laser Cladding	16

2.5.1. Σκόνες κράματος αυτό-τήξης	16
2.5.2. Σύνθετες σκόνες	17
2.5.3. Κεραμικές σκόνες.....	17
2.5.4. Άλλες σκόνες.....	17
2.6. Οι τύποι των υποστρωμάτων που εφαρμόζεται η τεχνική του Laser Cladding.....	18
2.7. Οι εφαρμογές του Laser Cladding σε διάφορους τομείς.....	20
2.8. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής.....	22
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική επισκόπηση άρθρων	23
3.1. Εισαγωγή.....	23
3.2. Η τεχνική EHLA	24
3.2.1. Έρευνες με αριθμητικές προσομοιώσεις στην τεχνική EHLA.....	29
3.2.2. Επιλογή και προετοιμασία υλικών	30
3.2.3. Ανάλυση των ελαττωμάτων στα επιστρώματα	32
3.3. Η αντικατάσταση της σκληρής επιχρωμίωσης από τεχνικές laser cladding.....	34
3.3.1. Παρασκευή επιστρωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, πλούσιο σε χρώμιο.....	34
3.3.2. Αποτελέσματα της μικροδομής των επιστρώσεων.....	35
3.3.3. Ανάλυση της διαβρωτικής συμπεριφοράς των επιστρωμάτων	36
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία	38
4.1. Περιγραφή του υλικού βάσης	38
4.2. Περιγραφή των σκονών εναπόθεσης	40
4.2.1. Η σκόνη AISI 410L.....	40
4.2.2 Η σκόνη AISI 4140	41
4.3. Περιγραφή της δημιουργίας επιστρώσεων στα δοκίμια με την χρήση της τεχνικής του laser cladding.....	43

4.4. Παρουσίαση του εργαστηριακού εξοπλισμού	46
4.4.1. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και η φασματοσκοπία ακτίνων X με διασπορά ενέργειας (EDS)	56
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα	58
Συμπεράσματα	83
Μελλοντική εργασία	84
Βιβλιογραφία	86

Εισαγωγή

Στην ναυπηγική, η ανάγκη για την επισκευή εξαρτημάτων αλλά και τμημάτων του πλοίου, έναντι της αντικατάστασής τους είναι ένα ζήτημα που απασχολεί τον κλάδο όλο και περισσότερο. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ανακαλύπτονται όλο και πιο αποτελεσματικές αλλά και καινοτόμες τεχνικές επιδιόρθωσης των βλαβών και επαναφοράς των φθαρμένων τμημάτων του πλοίου. Μια τέτοια τεχνολογία, αποτελεί και η μέθοδος δημιουργίας επιστρωμάτων μέσω απόθεσης υλικού και χρήσης δέσμης laser (laser cladding). Η τεχνική αυτή επιφέρει αρκετά οφέλη όταν χρησιμοποιείται, καθώς εκτός από την επισκευή βλαβών, μπορεί να προσφέρει αντιδιαβρωτική προστασία αλλά και να ενισχύσει την επιφάνεια στην οποία πραγματοποιείται η επίστρωση του υλικού. Η παρασκευή επιστρωμάτων σε επιφάνεια, με την μέθοδο του laser cladding, συνδυάζει την εναπόθεση υλικού πλήρωσης, συνήθως σε μορφή σκόνης, την τήξη του μέσω δέσμης laser και έπειτα την ψύξη του ώστε να δημιουργηθούν επιστρώσεις. Η ποιότητα των παραγόμενων επιστρωμάτων με την μέθοδο του laser cladding, επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες, όπως την ταχύτητα, τον ρυθμό εναπόθεσης του υλικού πλήρωσης και την ισχύ του laser, οι οποίοι πρέπει να διαμορφώνονται κατάλληλα, ανάλογα με την επιφάνεια, το υλικό βάσης και τον τύπο του υλικού εναπόθεσης, ώστε να επιφέρουν το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας των παραγόμενων επιστρωμάτων, πραγματοποιείται μεταλλογραφικός έλεγχος και ανάλυση της μικροδομής των κόκκων, με σκοπό την εύρεση πιθανών ρωγμών ή ατελειών, ενώ η σκληρότητα και η αντοχή των επιστρώσεων ελέγχεται μέσω σκληρομετρήσεων. Συνεπώς, η τεχνολογία του laser cladding, είναι σημαντικό να αναλυθεί και να μελετηθεί εκτενώς, αφού κατέχει σημαντικό ρόλο στον τομέα της επιδιόρθωσης και της ενίσχυσης, του κλάδου της ναυπηγικής.

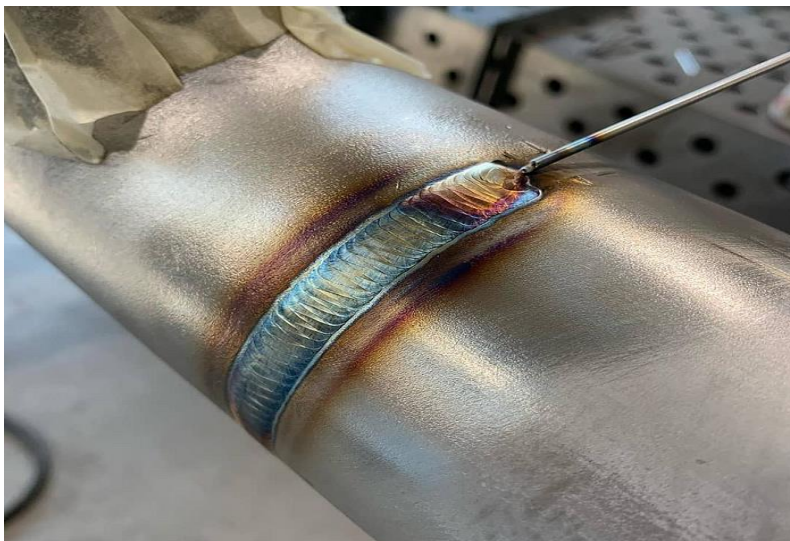
Κεφάλαιο 1: Οι τεχνολογίες επιγύμωσης γενικά στην ναυπηγική

1.1. Εισαγωγή

Η επιγύμωση, αποτελεί τεχνική η οποία χρησιμοποιείται πολύ συχνά στην ναυπηγική. Κατά την διαδικασία αυτή, επενδύεται υλικό επιλογής, σε μια επιφάνεια, με σκοπό την προστασία έναντι της διάβρωσης, την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την βελτίωση της απόδοσης. Παρατηρείται ποικιλία στις τεχνολογίες επιγύμωσης και η επιλογή της κατάλληλης κάθε φορά, εξαρτάται από παράγοντες που αφορούν το κόστος, την συμμόρφωση με τους κανονισμούς, τις γεωμετρικές δυσκολίες της δομής όπου θα γίνει η επένδυση, τις απαιτήσεις και τον σκοπό της επένδυσης. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές αυτές, διακρίνονται στην επένδυση συγκόλλησης (Weld Cladding), τον θερμικό ψεκασμό (Thermal spray), την χημική εναπόθεση ατμών (CVD), την φυσική εναπόθεση ατμών (PVD) και την επένδυση με τη χρήση δέσμης Laser (Laser Cladding), στην οποία θα γίνει εκτενής ανάλυση.

1.2. Επένδυση συγκόλλησης (Weld Cladding)

Αποτελεί μια απλή διαδικασία επένδυσης υλικού, κατά την οποία δημιουργούνται στρώματα επικάλυψης, μέσω της τήξης μετάλλου διαφορετικής σύστασης, συνήθως χάλυβα, από αυτήν του υλικού επιφάνειας. Για την τεχνική αυτή, γίνεται χρήση ηλεκτροδίου, το οποίο τήκεται, ενώ είναι απαραίτητη η ύπαρξη πηγής ενέργειας, μέσω της οποίας ρυθμίζεται η εναπόθεση του υλικού επίστρωσης. Έτσι, σχηματίζονται ισχυροί δεσμοί μεταξύ των μετάλλων κατά την επικάλυψη και το πάχος της κυμαίνεται σε τιμές μεγαλύτερες του 1 mm. Παρατηρείται υψηλή αραίωση και μεγάλο εύρος της περιοχής που επηρεάζεται από την θερμότητα (HAZ), ενώ δεν χρειάζεται σημαντική επανάληψη της διαδικασίας ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, αποτελεί διαδικασία που έχει μέτριο κόστος υλοποίησης. ^[1]



Εικόνα 1: «Επένδυση συγκόλλησης»

Πηγή: <https://medium.com/@whyweweld/getting-started-with-tig-welding-82ac654ca949>

1.3. Θερμικός ψεκασμός (Thermal spray)

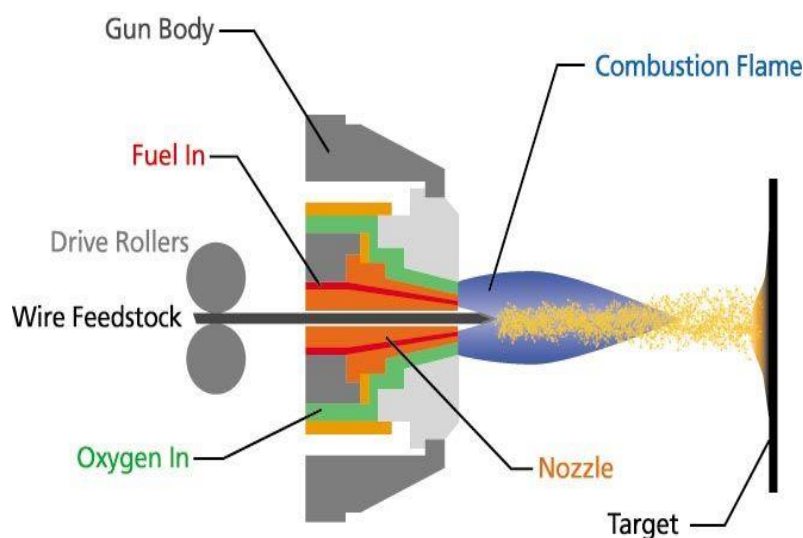
Ο θερμικός ψεκασμός, αποτελεί μια διαδικασία επιγόμωσης κατά την οποία, μεταλλικά ή κεραμικά υλικά θερμαίνονται και με ταχύτητα ψεκάζονται και προσκολλούνται στην επιφάνεια που πρόκειται να δημιουργηθεί η επίστρωση, σε μορφή σωματιδίων. Λόγω της θερμικής και της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που ψεκάζονται, δημιουργούνται επιστρώσεις στην επιφάνεια, χωρίς να εισέρχεται θερμότητα στο υπόστρωμα. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται μέτριας δυναμικότητας δεσμοί με μηδενική αραίωση και το πάχος της επικάλυψης που προκύπτει, ξεκινάει από 50μm και μπορεί να φτάσει μέχρι και κάποια mm ^[2]. Το εύρος της περιοχής που επηρεάζεται από την θερμότητα (HAZ), η ανάγκη επανάληψης της διαδικασίας και το κόστος διεξαγωγής της, είναι παρόμοια με αυτά της επένδυσης συγκόλλησης.^[3]



Εικόνα 2: «Ο θερμικός ψεκασμός»
Πηγή: <https://www.azom.com/article.aspx>

1.4. Ψεκασμός με φλόγα (Flame spray)

Ο ψεκασμός με φλόγα, αποτελεί μια οικονομική μέθοδο δημιουργίας επιστρώσεων, σε επιφάνειες που έχουν υποστεί φθορές από διαβρωτικούς παράγοντες και καταπονήσεις, με στόχο την βελτίωση της απόδοσης τους και την επέκταση της αντοχής τους. Η διαδικασία αυτή, αξιοποιεί την θερμότητα, η οποία εκπέμπεται σε μορφή φλόγας από την καύση ενός αερίου (συνήθως ακετυλενίου και προπανίου) με οξυγόνο, με σκοπό την τήξη του υλικού που επενδύεται για την δημιουργία επιστρώσεων. Τα υλικά επένδυσης που χρησιμοποιούνται είναι σκόνης από κράματα χαλκού, αλουμινίου, ψευδάργυρου, ανοξειδώτου χάλυβα, ενώ μπορεί να γίνει και χρήση σύρματος. Η μέθοδος του flame spray, εφαρμόζεται σε μεταλλικές και κεραμικές επιφάνειες. Τα επιστρώματα που παράγονται έχουν υψηλό πορώδες, με αποτέλεσμα να απορροφούν με επιτυχία τα προϊόντα λίπανσης που πιθανόν να εφαρμοστούν σε αυτά, ειδικά όταν η επένδυση υλικού γίνεται σε επιφάνειες ρουλεμάν ή αξόνων, όπου η λίπανση είναι απαραίτητη. Η μέθοδος αυτή, προτιμάται έναντι άλλων λόγω του φορητού εξοπλισμού της. ^[4]

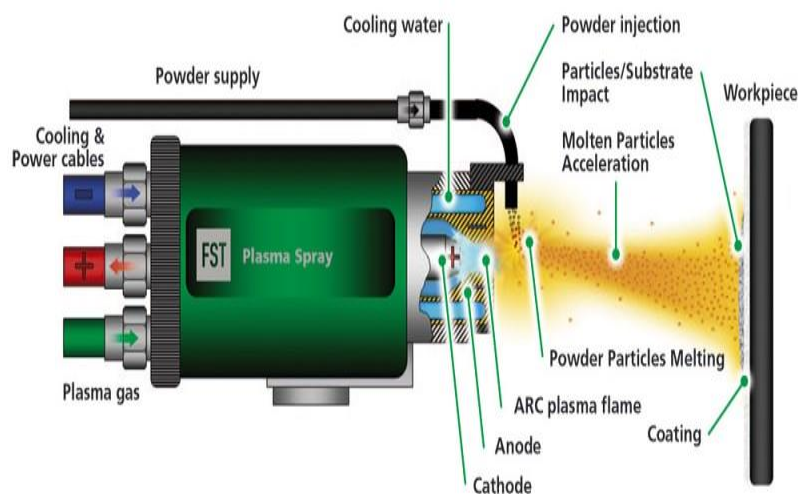


Εικόνα 3: «Η διαδικασία ψεκασμού με φλόγα»

Πηγή: <https://www.haydencorp.com/sprayed-coatings/flame-spray-and-arc-wire>

1.5. Ψεκασμός με πλάσμα (Plasma spray)

Ο ψεκασμός με πλάσμα (plasma spray), είναι μια πολύπλοκη μέθοδος παραγωγής επικαλύψεων με χρήση υλικών σε μορφή σκόνης. Κατά την διαδικασία αυτή, γίνεται χρήση ηλεκτρικού φορτίου για την δημιουργία πλάσματος αερίου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μια κάθοδος, κατασκευασμένη από βολφράμιο, μέσω της οποίας εκπέμπονται ηλεκτρόνια για τον ιονισμό του αερίου, το οποίο έπειτα καταλήγει, λόγω διαφοράς δυναμικού, σε μια άνοδο κατασκευασμένη από χαλκό, η οποία συλλέγει τα ηλεκτρόνια και δημιουργεί το πλάσμα. Το πλάσμα αερίου τελικά μεταφέρεται μέσω ακροφύσιου και δημιουργεί φλόγα που προκαλεί την τήξη της σκόνης εναπόθεσης. Η μέθοδος αυτή, βρίσκει εφαρμογή τόσο σε μεταλλικές όσο και κεραμικές επιφάνειες, τα υποστρώματα των οποίων προθερμαίνονται πριν από την δημιουργία των επιστρώσεων. Οι κόκκοι της σκόνης μεταφέρονται μέσω ακροφύσιου στο υπόστρωμα, αφού πρώτα τηχθούν από την φλόγα. Λόγω της ταχύτητάς τους, στερεοποιούνται με την κρούση τους στην επιφάνεια και στην συνέχεια δημιουργούν τα επιστρώματα. Το πάχος των επικαλύψεων, διαμορφώνεται ανάλογα με την γωνία και την απόσταση ψεκασμού, αλλά και με τον ρυθμό εναπόθεσης της σκόνης. Οι σκόνες εναπόθεσης που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνουν υλικά όπως μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή, ενώ συχνά πραγματοποιείται και ανάμειξη αυτών, για την παραγωγή επιστρώσεων με ενισχυμένη αντοχή στην διάβρωση και την φθορά. Η μέθοδος του plasma spray, δημιουργεί επικαλύψεις που είναι ανθεκτικές στην οξείδωση και την διάβρωση και προσφέρουν θερμική μόνωση στην επιφάνεια. [5]

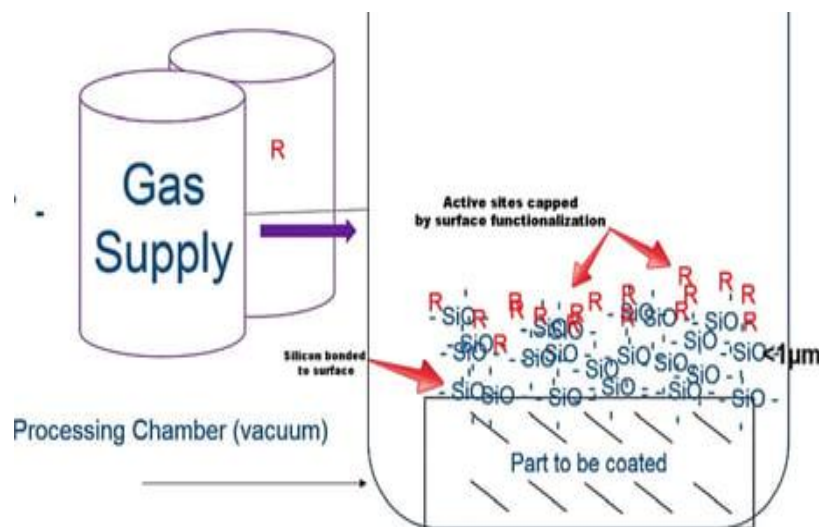


Εικόνα 4: «Η μέθοδος plasma spray»

Πηγή: <https://www.fst.nl>

1.6. Χημική εναπόθεση ατμών (CVD)

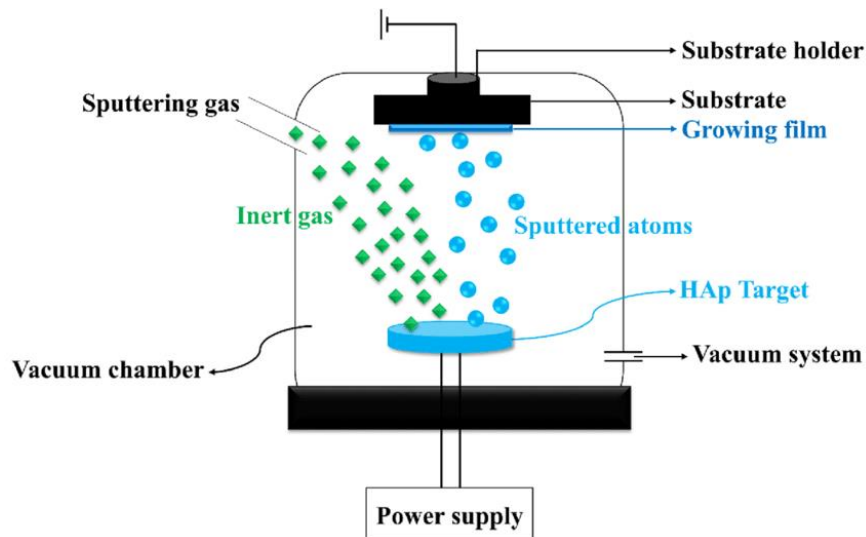
Η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), είναι μια τεχνική δημιουργίας επιστρωμάτων μέσω της αντίδρασης ενός πτητικού αερίου. Η αντίδραση αυτή, πραγματοποιείται μέσα σε θάλαμο, έπειτα από την έγχυση του αερίου και την θέρμανσή του έως ότου να πραγματοποιηθεί η διάσπαση. Έπειτα, το στοιχείο που διασπάται και πρόκειται να δημιουργήσει την επίστρωση, τοποθετείται σε όλη την έκταση της επιφάνειας και προκύπτει η επένδυση του υλικού. Μετά από την διάσπαση του αερίου οι ανεπιθύμητες ενώσεις απομακρύνονται και απομονώνεται το επιθυμητικό υλικό επικάλυψης. Στην συγκεκριμένη τεχνική, γίνεται χρήση ενώσεων πυριτίου, άνθρακα και νιτριδίων και η επιλογή του καταλληλότερου υλικού κάθε φορά, καθορίζει και την ποιότητα της επικάλυψης. Οι δεσμοί που σχηματίζονται δεν είναι τόσο ισχυροί και η αραίωση είναι μηδενική. Το πάχος της επένδυσης κυμαίνεται από 0.05 μm έως και 20 μm και το εύρος της περιοχής που επηρεάζεται από την θερμότητα (HAZ) είναι πολύ χαμηλό. Η ανάγκη για επανάληψη της διαδικασίας είναι υψηλή, όπως και το κόστος της. [6]



Εικόνα 5: « Η διαδικασία χημικής εναπόθεσης ατμών»
Πηγή: <https://www.silcotek.com/blog/what-is-a-cvd-coating>

1.7. Φυσική εναπόθεση ατμών (PVD)

Κατά την διαδικασία της φυσικής εναπόθεσης ατμών (PVD), το στερεό που βρίσκεται σε θάλαμο κενού και πρόκειται να δημιουργήσει την επίστρωση στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα άτομα του υλικού, εξατμίζονται και προσκολλούνται σε κάθε επιφάνεια που συναντούν, γεγονός που χρήζει απαραίτητη την περιστροφή και την σωστή τοποθέτηση του αντικειμένου, ώστε να γίνει πλήρης επικάλυψη της επιφάνειας. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την επιγύμωση αυτή, είναι το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το αλουμίνιο, ο χαλκός και ο χάλυβας και εφαρμόζονται σε επιφάνειες κατασκευασμένες από νάιλον, πλαστικό, γυαλί και μέταλλο. Σχηματίζονται δεσμοί χαμηλής ισχύος και η αραιώση είναι μηδενική. Το πάχος της επένδυσης κυμαίνεται από 0.05 μm έως και 10 μm και το εύρος της περιοχής που επηρεάζεται από την θερμότητα (HAZ) είναι πολύ χαμηλό. Η διαδικασία έχει υψηλό κόστος και χρειάζεται συχνή επανάληψη.^[7]



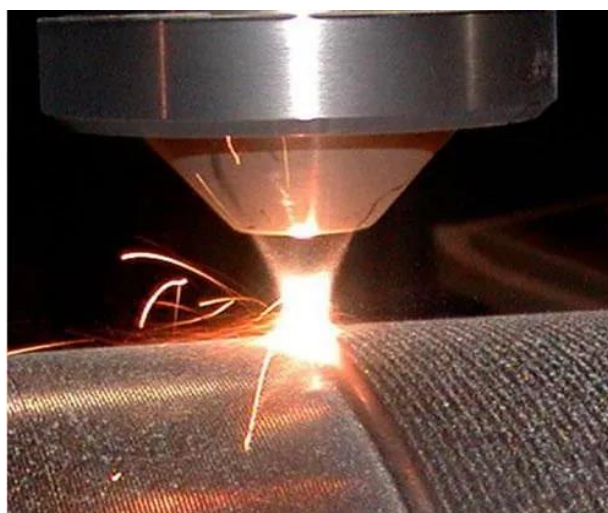
Εικόνα 6: «Ο μηχανισμός της φυσικής εναπόθεσης ατμών»

Πηγή: <https://www.researchgate.net>

Κεφάλαιο 2: Τεχνολογία επιγόμεωσης με χρήση δέσμης Laser (Laser Cladding)

2.1. Εισαγωγή

Η τεχνολογία της επιγόμεωσης με χρήση δέσμης Laser, συνδυάζει τους κατασκευαστικούς και σχεδιαστικούς αισθητήρες με την ρομποτική και την μεταλλουργία. Προσφέρει την δυνατότητα δημιουργίας ισχυρών επιστρωμάτων, μέσω χαμηλότερης θερμότητας και μικρότερων κόκκων που σχηματίζουν την κρυσταλλική δομή, συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Αυτός ο τύπος επιγόμεωσης, έχει ως βασικό χαρακτηριστικό μια δέσμη laser, υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, η οποία απορροφάται από το υλικό της βάσης που πρόκειται να γίνει η επίστρωση. Το υλικό αυτό θερμαίνεται, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια λιωμένη ζώνη, στην οποία τοποθετείται υλικό πλήρωσης, συνήθως σε μορφή σκόνης και προκύπτει ένας τύπος συγκόλλησης διάχυσης. Η διείδυση του laser, εξαρτάται από τον τύπο του υλικού της βάσης και την ενεργειακή πυκνότητα, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 10^4 έως 10^5 W/cm², ενώ σε περίπτωση που ξεπεράσει το 10^5 W/cm², τότε αυξάνεται και η διείδυση. Μέσω αυτής της διαδικασίας δημιουργίας επιστρωμάτων, δημιουργούνται ισχυροί δεσμοί, με χαμηλή αραίωση. Το πάχος των επιστρώσεων που προκύπτουν, κυμαίνεται από 50 μm μέχρι 2 mm και η ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα είναι μικρή. Η ανάγκη για επανάληψη της διαδικασίας είναι μέτρια και το κόστος της είναι υψηλό. ^[8]



Εικόνα 7: «Επιγόμεωση με χρήση δέσμης Laser»

Πηγή: <https://www.hardfacingfty.com/laser-cladding-guide/>

2.2. Ανάλυση των τμημάτων εξοπλισμού του Laser Cladding

Η επένδυση υλικού με την χρήση δέσμης Laser, δημιουργεί δεσμούς μεταξύ του υλικού βάσης και του υλικού που πραγματοποιεί την επίστρωση. Είναι σημαντικό, για την κατανόηση της διαδικασίας αυτής, να αναλυθούν τα επιμέρους τμήματα του μηχανισμού αλλά και διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα.

2.2.1. Η ενεργειακή πηγή του Laser

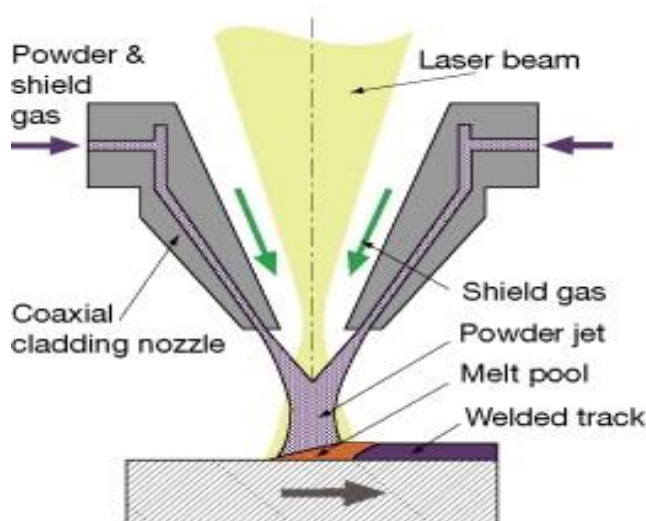
Η δέσμη του laser που προκαλεί την τήξη του υλικού επένδυσης στην επιφάνεια του υλικού βάσης και δημιουργεί μια ζώνη τήξης, προέρχεται από μια ενεργειακή πηγή. Το laser κατά την διαδικασία αυτή, έχει συνεχή μορφή και ανάλογα με τον τύπο που εκπέμπεται, καθορίζεται και η ποιότητα της επένδυσης και η ευκολία της διαμόρφωσης των επιστρωμάτων. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται, διακρίνονται σε laser CO₂, laser Nd:YAG, laser ινών και laser διόδου. Αρχικά, το laser CO₂ προέρχεται από την ανάμιξη αερίων, έχει μήκος κύματος 10.6 microns, με την μετάδοση να πραγματοποιείται μέσω καθρεπτών, παρέχοντας υψηλής ποιότητας επένδυση. Όσον αφορά τον τύπο Nd:YAG, χρησιμοποιεί κρυστάλλους σε στερεά κατάσταση, έχει μήκος κύματος 1.06 microns και η μετάδοση του γίνεται μέσω ινών πλάτους 0.4mm έως 0.6mm και έτσι προκύπτει χαμηλής ποιότητας επένδυση. Ο τύπος laser ινών, παράγεται μέσω οπτικών ινών, έχει μήκος κύματος 1.07 microns, με την μετάδοση να πραγματοποιείται μέσω μικρών ινών, πλάτους 0.05 mm έως 0.1 mm και το αποτύπωμα του laser έχει στρογγυλή μορφή, προσφέροντας υψηλής ποιότητας επιστρώματα. Τέλος, το laser διόδου, εκπέμπεται μέσω διόδων ημιαγωγών, έχει μήκος κύματος 0.8-1 microns και το αποτύπωμά του είναι ορθογωνικής μορφής. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κάθε φορά, εξαρτάται από τις απαιτήσεις των επιστρωμάτων που πρόκειται να δημιουργηθούν. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η επένδυση πρέπει να καλύψει μεγάλο εύρος περιοχής της βάσης, ενδείκνυται η επιλογή δέσμης laser με ορθογώνιο αποτύπωμα. ^[8]

Πίνακας 1: Διάφοροι τύποι Laser

Laser	Wavelength	Beam Quality	Beam Delivery
CO ₂	10.6 microns	high	free space (mirrors)
Nd:YAG	1.06 microns	low	large fiber (typ. 0.4–0.6 mm)
Fiber	1.07 microns	high	small fiber (typ. 0.05–0.1mm)
Direct diode	0.8–1 microns typ.	low	free space (typ. rectangular beam)

2.2.2. Η κεφαλή επένδυσης

Αποτελεί το εξάρτημα που ευθύνεται για την μετάδοση της δέσμης laser στην επιφάνεια που πρόκειται να γίνει η επένδυση υλικού. Περιέχει οπτικά μέσα για την εστίαση της δέσμης, μηχανισμό μεταφοράς και εναπόθεσης του υλικού πλήρωσης στην τηγμένη περιοχή του υλικού βάσης, ψυκτικά μέσα και σύστημα παροχής προστατευτικών αερίων, για την αποφυγή της οξείδωσης στην τηγμένη ζώνη αλλά και την εξασφάλιση της βέλτιστης ποιότητας για τα επιστρώματα. [8]

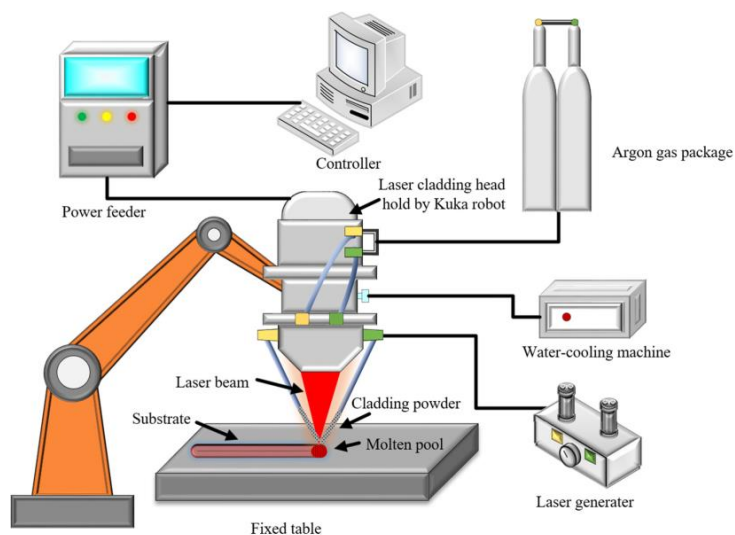


Εικόνα 8: «Ανάλυση της κεφαλής επένδυσης»

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/laser-cladding>

2.2.3. Εξοπλισμός ελέγχου κίνησης και χειρισμού

Ο εξοπλισμός της διαδικασίας επιγώμωσης με χρήση δέσμης laser, περιλαμβάνει ένα σύστημα ελέγχου, που περιέχει κινητήρες και μηχανισμούς κίνησης για τον χειρισμό τόσο της κεφαλής, όσο και του υποστρώματος. Μέσω αυτών, ελέγχεται η θέση του laser, ο προσανατολισμός του, η ταχύτητα της επένδυσης και η εναπόθεση του υλικού πλήρωσης. Επιπλέον, το σύστημα αυτό, εμπεριέχει σερβοκινητήρες και γραμμικούς ενεργοποιητές, οι οποίοι προσδίδουν ακρίβεια και έλεγχο στις γραμμικές και περιστροφικές κινήσεις της κεφαλής και της επιφάνειας που γίνεται η επένδυση υλικού. Ο προγραμματισμός της διαδικασίας, γίνεται μέσω λογισμικού, το οποίο περιέχει μεταβλητές και παραμέτρους. Τέλος, η μετάδοση και η ερμηνεία των εντολών και ο συντονισμός του συστήματος γίνεται με την βοήθεια υπολογιστικού ελεγκτή (CNC) που λειτουργεί ως εγκέφαλος για το σύστημα. [8]



Εικόνα 9: «Εξοπλισμός του Laser Cladding»
Πηγή: <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/4/438>

2.3. Οι παράγοντες που διαμορφώνουν της ποιότητα της επιγύμωσης

Η ποιότητα της επένδυσης υλικού, μέσω της τεχνολογίας του Laser Cladding, καθορίζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι είναι σημαντικό να ελέγχονται ώστε να επιφέρουν κάθε φορά το επιθυμητό και βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Ο τύπος του υποστρώματος και η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειάς του πριν την επένδυση υλικού αλλά και η κατάλληλη επιλογή υλικού εναπόθεσης, αποτελούν βασικές παραμέτρους για την διασφάλιση της ποιότητας των επιστρώματων. Επιπλέον, ο ρυθμός εναπόθεσης του υλικού, η ισχύς τροφοδοσίας του laser και η ταχύτητά του, επηρεάζουν σημαντικά το σχήμα της επένδυσης και την ποιότητά της. Η ισχύς πρέπει να ελέγχεται και να προγραμματίζεται σωστά, καθώς σε υψηλά όρια μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη τήξη και παχύτερα επιστρώματα με βαθύτερη διείσδυση, αλλά σε περίπτωση που αυξηθεί πολύ, είναι πιθανό να προκαλέσει ζημιές στην επιφάνεια της βάσης και να την καταστρέψει. Αντιθέτως, η χαμηλή ισχύς του laser, μπορεί να επιφέρει ως αποτέλεσμα μια αδύναμη επένδυση. Τέλος, η χαμηλή ταχύτητα του laser, προσφέρει καλύτερο έλεγχο, αλλά μπορεί να έχει και αρνητικές επιπτώσεις, σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ενώ αν βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, το τελικό αποτέλεσμα είναι πιθανό να έχει ατέλειες. Συνεπώς, τόσο η ισχύς όσο και η ταχύτητα, είναι σημαντικό να προγραμματίζονται σε κατάλληλες τιμές. ^[9]

2.4. Οι διαφορετικές εκδοχές της τεχνικής του Laser Cladding

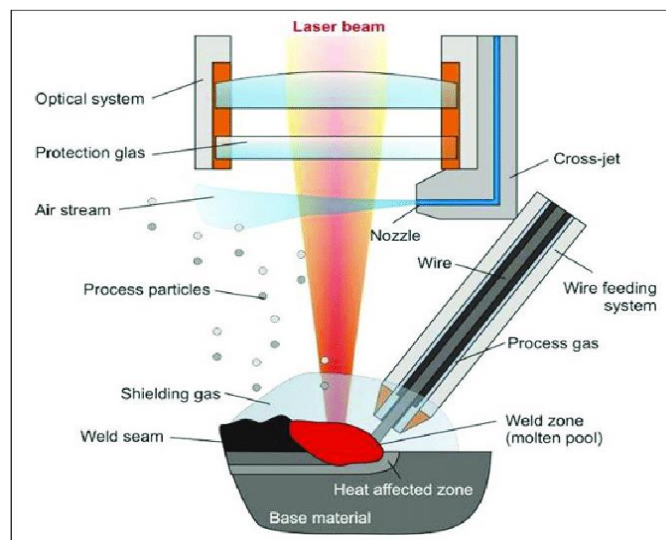
Η επιγώμωση με χρήση δέσμης laser, αποτελεί μια τεχνική επένδυσης υλικού που εμφανίζει παραλλαγές, ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται.

2.4.1. Επένδυση σκόνης με χρήση δέσμης laser

Κατά την διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται εναπόθεση σκόνης πλήρωσης, απευθείας στην διαδρομή του laser μέσω συστήματος τροφοδοσίας και τελικά στην επιφάνεια του υποστρώματος. Η σκόνη που εναποτίθεται στην επιφάνεια, θερμαίνεται και τήκεται και στην συνέχεια δημιουργεί επιστρώματα που βελτιώνουν την επιφάνεια και προστατεύουν το υλικό της βάσης.

2.4.2. Επένδυση σύρματος με χρήση δέσμης laser

Οι επιστρώσεις στην επιφάνεια του υποστρώματος προκύπτουν έπειτα από την τήξη μεταλλικού σύρματος, το οποίο λειτουργεί ως υλικό πλήρωσης και θερμαίνεται μέσω του laser. Η εναπόθεση του σύρματος πραγματοποιείται μέσω συνεχούς μηχανισμού τροφοδοσίας. Η τεχνική αυτή συστήνεται για περίπλοκες γεωμετρικές δομές επιφάνειας, ενώ παράλληλα προσφέρει συμπαγείς επιστρώσεις και καλύτερο έλεγχο εναπόθεσης υλικού.

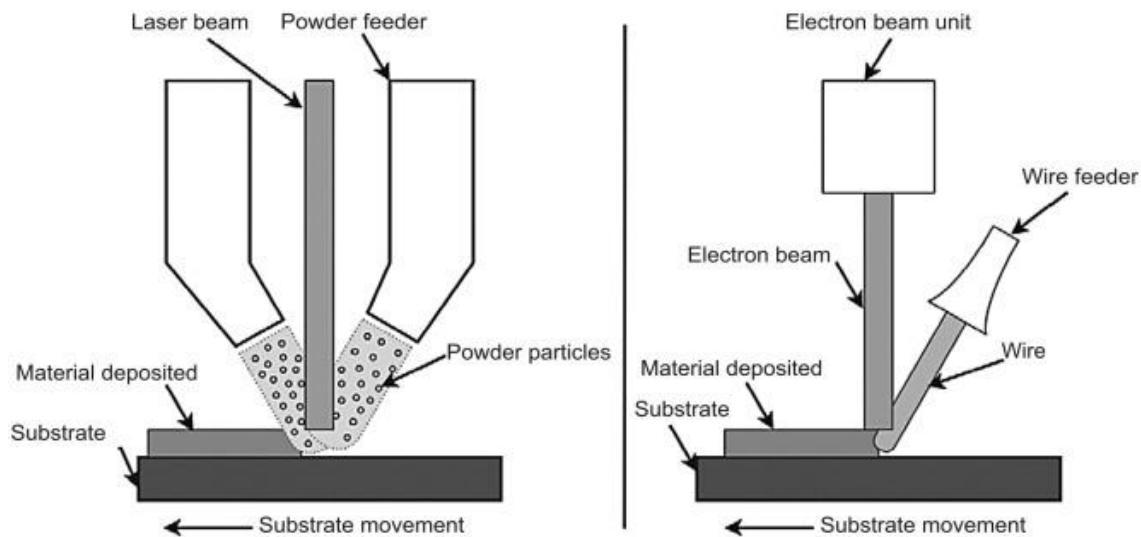


Εικόνα 10: «Laser Cladding με χρήση σύρματος»

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustration-of-laser-cladding-by-wire_fig1_257707087

2.4.3. Επένδυση laser άμεσης εναπόθεσης ενέργειας (DED)

Η τεχνική αυτή, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί για υλικό εναπόθεσης είτε σκόνη είτε μεταλλικό σύρμα, τα οποία τροφοδοτούνται στο υπόστρωμα με την βοήθεια ακροφύσιου και στην συνέχεια τήκονται. Σαν μέθοδος, προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή του υλικού αλλά και μεγαλύτερους ρυθμούς εναπόθεσης, με αποτέλεσμα η διαδικασία επιγόμωσης να πραγματοποιείται ταχύτερα, συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.



Εικόνα 11: «Εναπόθεση υλικού με την μέθοδο DED»

Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/directed-energy-deposition>

2.5. Οι διαφορετικές σκόνες που χρησιμοποιούνται στην επιγύμωση με Laser Cladding

Η επιλογή της κατάλληλης σκόνης κατά την επένδυση υλικού με χρήση δέσμης laser, καθορίζει σημαντικά την ποιότητα των επιστρωμάτων. Η σκόνη αρχικά θερμαίνεται και τήκεται κατά την τοποθέτηση της στην επιφάνεια του υποστρώματος και στην συνέχεια στερεοποιείται, με αποτέλεσμα να δημιουργεί επιστρώματα στο υλικό της βάσης. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στις σκόνες επικάλυψης, οι οποίες ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο τους. ^[10]

2.5.1. Σκόνες κράματος αυτο-τήξης

Τέτοιου είδους σκόνες, παράγονται από κράματα βάσης σιδήρου (Fe), νικελίου (Ni) ή κοβαλτίου (Co). Περιέχουν βόριο (B), πυρίτιο (Si) και έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr), γεγονός που αποτρέπει την οξείδωση του τηγμένου μετάλλου και βελτιώνει την ποιότητα των επιστρωμάτων. Συγκεκριμένα:

i. Σκόνη κράματος αυτο-τήξης με βάση το σίδηρο (Fe)

Οι σκόνες με βάση το σίδηρο, αποτελούν μια διαδομένη, οικονομική και ευέλικτη στην επεξεργασία της επιλογή για υλικό πλήρωσης. Διακρίνονται σε σκόνες οστενιτικού ανοξειδωτού χάλυβα και σε σκόνες χυτοσίδηρου υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο. Τα επιστρώματα που δημιουργούν τα κράματα αυτά, έχουν υψηλή αντοχή στην φθορά και την διάβρωση. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, εμφανίζουν αρκετά υψηλό σημείο τήξης και τα επιστρώματά τους εμφανίζουν ευαισθησία ως προς την σκληρότητά τους. Συνεπώς, για την αποφυγή των αρνητικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει η επένδυση του υλικού αυτού, στις σκόνες προστίθενται στοιχεία που τις βελτιώνουν και αυξάνουν την αποδοτικότητά τους.

ii. Σκόνη κράματος αυτο-τήξης με βάση το νικέλιο (Ni)

Τα κράματα με βάση το νικέλιο, διακρίνονται για την σταθερότητά τους, την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και στην διάβρωση, ενώ παράλληλα αποτελούν μια σχετικά οικονομική επιλογή. Συχνά, για την βελτίωση των ιδιοτήτων τους σε πολύ απαιτητικές επιγομώσεις, αναμιγνύονται με καρβίδια, βορίδια, και νιτρίδια.

iii. Σκόνη κράματος αυτο-τήξης με βάση το κοβάλτιο (Co)

Τέτοιου είδους κράματα, χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή στην θερμότητα, στην διάβρωση, στην οξείδωση, στην κρούση και στην φθορά. Έχουν χαμηλό σημείο τήξης και το Co

είναι το πρώτο από τα στοιχεία, όπου κατά την θέρμανση του, δημιουργεί πρώτο δεσμούς με το υποστρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του υποστρώματος κατά την διάρκεια της επένδυσης του υλικού.

2.5.2. Σύνθετες σκόνες

Οι σύνθετες σκόνες προκύπτουν με την ανάμειξη μετάλλων με καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, οξειδία και πυρίτιο. Η ανάμειξη αυτή, προσδίδει στις σκόνες που προκύπτουν ενισχυμένες μεταλλικές ιδιότητες και αυξάνουν την απόδοσή τους με στόχο την δημιουργία ανθεκτικών επιστρώσεων. Σε τέτοιου τύπου σκόνες, τα καρβίδια προστίθενται είτε απευθείας στην τηγμένη ζώνη του υλικού βάσης είτε αναμιγνύονται με την μεταλλική σκόνη πριν την εναπόθεσή της.

2.5.3. Κεραμικές σκόνες

Οι κεραμικές σκόνες προκύπτουν από την άλεση κεραμικών υλικών και κατά βάση είναι παράγωγα ανόργανων ενώσεων (CaO, SiO₂, TiO₂, κ.α.) . Διακρίνονται για την αντοχή τους στις υψηλές θερμοκρασίες και στην διάβρωση, αλλά και για την ηλεκτρική μόνωση που προσφέρουν και την σκληρότητά τους. Διαφέρουν με τις μεταλλικές σκόνες στην αγωγιμότητα, την θερμική διαστολή και την ελαστικότητα. Σε περίπτωση που δεν αναμειχθούν με κατάλληλα στοιχεία, τα επιστρώματά τους είναι πιθανό να εμφανίσουν ρωγμές και επιφανειακή φθορά.

2.5.4. Άλλες σκόνες

Επιπρόσθετα με τα υλικά που ήδη αναφέρθηκαν, οι σκόνες που χρησιμοποιούνται κατά την τεχνική επιγύμωσης με χρήση δέσμης laser, μπορούν να έχουν διάφορα άλλα υλικά βάσης. Συγκεκριμένα, υπάρχουν σκόνες που έχουν ως βασικό υλικό τον χαλκό (Cu-CuO) και δημιουργούν επιστρώσεις, αυτοδύναμων σωματιδίων, με μεγάλη αντοχή στην φθορά. Σκόνες με βάση το τιτάνιο (Ti), βελτιώνουν την βιοσυμβατότητα του υποστρώματος και το προστατεύουν από την διάβρωση και την φθορά. Τέλος, οι σκόνες με υλικό βάσης το αλουμίνιο (Al), δημιουργούν ισχυρούς δεσμούς όταν επενδύονται σε μεταλλικές επιφάνειες, ενώ σκόνες με βάση το ζirkόνιο (σκόνη κράματος ZrAlNiCu), ενισχύουν κατά την εναπόθεσή τους, την σκληρότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του υποστρώματος. ^[10]

2.6. Οι τύποι των υποστρωμάτων που εφαρμόζεται η τεχνική του Laser Cladding

Η τεχνολογία της επένδυσης υλικού με χρήση δέσμης laser, αποτελεί μια ευέλικτη διαδικασία, η οποία καλύπτει μεγάλο εύρος υποστρωμάτων, σε περίπτωση που αυτά ανταποκρίνονται στην θερμική ενέργεια που εκπέμπει η δέσμη. Ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος, επιλέγεται και η κατάλληλη σκόνη, για να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή ποιότητα στα επιστρώματα που προκύπτουν. Ειδικότερα, αυτή η τεχνική επιγύμωσης, εφαρμόζεται σε μεταλλικές επιφάνειες (κατασκευασμένες από χάλυβα, τιτάνιο, νικέλιο, κοβάλτιο, αλουμίνιο κ.α.), για την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους και των μεταλλικών ιδιοτήτων τους, την επιδιόρθωση φθορών και την βελτίωση της αντιδιαβρωτικής τους προστασίας. Μερικά παραδείγματα υποστρωμάτων που εφαρμόζεται επιγύμωση με laser είναι σε: χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, χάλυβα 42CrMo4, CM-247LC κράμα με βάση το νικέλιο, ανοξείδωτο χάλυβα 321, κράμα Ti-6Al-4V, κράμα Fe-42Ni-0.6C-3.5Mn-5Nb και σε πολλά άλλα. ^[9]



Εικόνα 12: «Δημιουργία επιστρωμάτων σε μεταλλική επιφάνεια»
Πηγή: https://proleantech.com/laser-cladding-process-a-comprehensive-overview/#Applications_of_Laser_Cladding

Στον παρακάτω πίνακα, διακρίνονται μερικά παραδείγματα υποστρωμάτων και οι σκόνες επικάλυψης που χρησιμοποιήθηκαν, μαζί με την εφαρμογή τους και τα αποτελέσματα των επιστρώσεων που προέκυψαν. ^[9]

Πίνακας 2: Σκόνη επιλογής, υλικό υποστρώματος, εφαρμογή και αποτελέσματα

Cladding material	Substrate	Applications	Concluding observation
NiCr-WC MMC	Low carbon steel	Steel frame buildings	Pore-free layers with good metallurgical bonding with the substrate.
Co-based alloy Deloro Stellite 21	42CrMo4 steel	Crankshafts	High cladding quality concerning dilution and the base metal.
Co-Cr-W-C and Ni-Cr-B-Si-C based hard micron coatings	316L-stainless steel	Nuclear, aerospace, and chemical industries	The Ni-based coating showed improved wear resistance compared to its counterpart.
TA15 (Ti-6.5Al-1Mo-1V-1.5Zr)	45CrNiMoY alloy steel	Key parts, for example, high-speed railway brake discs	The clad alloy steel showed good compressive mechanical properties.
Mixed Co50 and spherical WC powders	15MnNi4Mo	Cone bits	The cladding layer was uniform and compact. The bonding between the coating and the matrix was excellent.
CM-247LC gas atomized powder	CM-247LC nickel-based superalloy	Hot sections of gas turbine engines	The combination of laser cladding and preheating was successful in refurbishing the as-cast CM-247LC part.
WC-FeAl powders	321 Stainless steel	Variety of applications such as aerospace and chemical	Evaluation of the coating and substrate demonstrated improved mechanical properties with excellent metallurgical bonding.
Fe _{74.25} Nb _{8.25} B _{17.5} ultrafine eutectic coating	AISI 1020 steels	Structural applications such as cold headed bolts	The single laser track exhibited good quality with a decreased number of defects, no porosity was observed, and the dilution value corresponded with the standard for LC.
AISI 420 N-bearing martensitic stainless steel (MSS) atomized powder	AISI D2 harden steel	High chromium steels	The resultant coating on the steel exhibited good mechanical properties (UTS= 1900 MPa, and 7.3% elongation) with excellent corrosion resistance.
Ti-6Al-4V powder	Ti-6Al-4V alloy	Aircraft components	The heat-affected zone (HAZ) indicated refined Widmanstätten laths with decreased laser speed.
TiC metal matrix composite	Ti-6Al-4V alloy	High wear resistance applications	The results demonstrated the usefulness to solicit the fabrication process and mending high added-merit components for a variety of factory sectors.
Inconel 690 powder	Inconel 600 superalloy	Nuclear applications	The resultant laser melted cladded layer on the substrate illustrated excellent surface protection.
Ti-Al/TiB ₂ composites as a method of synthesizing pure-Ti of functionally gradient material	Pure-Ti substrate	Coatings technology	The laser surface of Ti-Al/TiB ₂ single-clad layers on the pure Ti substrate exhibited good wear resistance.
Nano-structured carbide strengthened Co-based cladding powders	Invar alloy (Fe-42Ni-0.6C-3.5Mn-5Nb) in wt%	Aeronautical, instrumentation telecommunications, aerospace, and cryogenic applications	The cladding layers enhanced oxidation and wear resistance on the Invar alloy aside from altering its coefficient of thermal expansion.

2.7. Οι εφαρμογές του Laser Cladding σε διάφορους τομείς

Η τεχνολογία της επένδυσης υλικού με χρήση δέσμης laser, είναι αρκετά διαδεδομένη σε διάφορες βιομηχανίες και κλάδους. Η αντικατάσταση των εξαρτημάτων στον χώρο της ναυπηγικής είναι ακριβή και ο χρόνος παραγγελίας τους είναι μεγάλος. Επομένως, η τεχνική του laser cladding, χρησιμοποιείται ευρέως για την επισκευή και την επιδιόρθωση εξαρτημάτων και τμημάτων του πλοίου (π.χ. άξονες πλοίου). Προσφέρει μια αξιόπιστη, οικονομική και άμεση λύση στην επισκευή εξοπλισμού στα πλοία, καθώς εξαλείφει την ανάγκη άμεσης αντικατάστασης των εξαρτημάτων, σε πολλές περιπτώσεις βλαβών, οι οποίες δεν είναι ολοκληρωτικές. Κατά την επένδυση υλικού πλήρωσης στις επιφάνειες αυτές, δημιουργούνται επιστρώματα που ενισχύουν τις μηχανικές ιδιότητες και αυξάνουν την αντοχή των εξαρτημάτων.

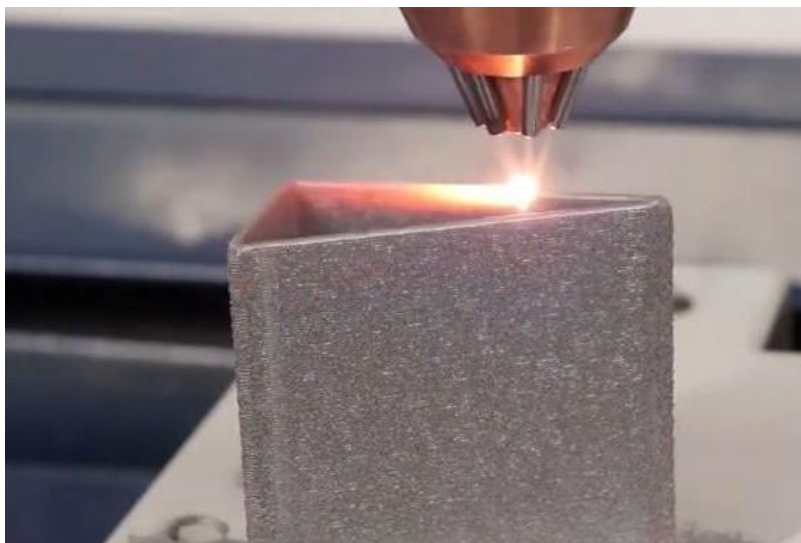
Επιπλέον, στην αεροναυπηγική βιομηχανία, η επιγύμωση με χρήση δέσμης laser, χρησιμοποιείται για την επένδυση προστατευτικών επικαλύψεων, για την αύξηση της αντοχής, της θερμικής σταθερότητας και της απόδοσης των ταλαιπωρημένων εξαρτημάτων (π.χ. επισκευή στροβίλων και πτερυγίων). Πέρα από την επένδυση υλικού με σκοπό την επισκευή και την επαναφορά των εξαρτημάτων στην αρχική τους κατάσταση, η αεροναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιεί την τεχνολογία του laser cladding για την παραγωγή πρόσθετων από την αρχή, όπως για παράδειγμα την δημιουργία πτερυγίων.

Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η επένδυση υλικού μέσω της χρήσης laser, βοηθά στην αποκατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα των μελών του κινητήρα, των εκκεντροφόρων αξόνων και του κιβωτίου ταχυτήτων. Έτσι, αυξάνεται το προσδόκιμο ζωής τους, ανακτούν την λειτουργικότητά τους και γίνονται πιο ανθεκτικά.

Στην βιομηχανία του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, η επισκευή του εξοπλισμού εξόρυξης, των αντλιών και των βαλβίδων, μπορεί να πραγματοποιηθεί με laser cladding. Με αυτόν τον τρόπο, αποκαθίσταται η λειτουργικότητά τους και μειώνεται ο χρόνος που χρειάζεται να παραμείνουν σε αδράνεια.

Τέλος, η ιατρική βιομηχανία, χρησιμοποιεί την επένδυση υλικού με χρήση δέσμης laser, εστιάζοντας στην επισκευή των προσθετικών μελών και των εμφυτευμάτων, μέσω βιοσυμβατών υλικών. Επιπλέον, γίνεται χρήση της τεχνολογίας αυτής, με στόχο την παραγωγή προσθετικών μελών για το ανθρώπινο σώμα, με την δημιουργία στρωμάτων από την αρχή, με συνεχείς επικαλύψεις και γεωμετρική ακρίβεια.

Πέρα από τους τομείς που αναφέρθηκαν και την εφαρμογή της τεχνολογίας του laser cladding στον κάθε ένα από αυτούς, η τεχνική αυτή έχει πολλαπλές χρήσεις γενικά. Συγκεκριμένα, δημιουργεί επιστρώματα σε επιφάνειες, ανθεκτικά στην φθορά και στην διάβρωση. Επιπρόσθετα, βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες και την σκληρότητα του υλικού βάσης και αποκαθιστά τις επιφανειακές φθορές αλλά και τις βλάβες σε διάφορα υλικά. Τέλος, χρησιμοποιείται για την κατασκευή πρόσθετων και την τρισδιάστατη δημιουργία εξαρτημάτων. ^{[11],[12],[13]}



Εικόνα 13: «Δημιουργία μεταλλικής κατασκευής με laser cladding»

Πηγή: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/infrared-camera-supports-real-time-process-control-for-laser-metal-deposition-and-cladding>

2.8. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής

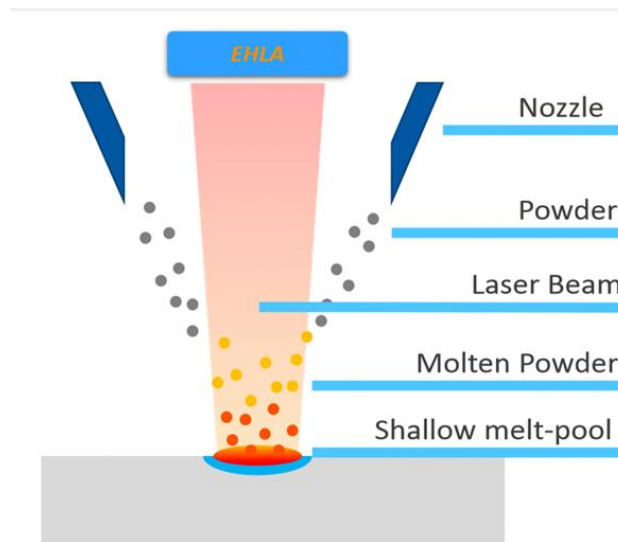
Η επιγύμωση με χρήση δέσμης laser, είναι τεχνική που προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα κατά την χρήση της. Ειδικότερα, η μέθοδος αυτή, επιτρέπει την ελεγχόμενη και με μεγάλη ακρίβεια, εναπόθεση υλικού πλήρωσης. Η επιλογή του υλικού που επενδύεται για την δημιουργία επιστρωμάτων, γίνεται μέσα από μεγάλη ποικιλία σκονών ή συρμάτων. Συνεπώς, η τεχνολογία αυτή προσφέρει μεγάλο εύρος επιλογών, ανάλογα με τις απαιτήσεις των επιστρωμάτων, ενώ παράλληλα είναι δυνατή και η ανάμειξή τους. Μέσω του laser cladding, αυξάνεται η αντοχή του υλικού βάσης στην φθορά, στην διάβρωση και στις καταπονήσεις. Ενισχύονται οι μηχανικές ιδιότητες της επιφάνειας και βελτιώνεται η απόδοση των μετάλλων, στα οποία πραγματοποιείται η επένδυση. Η διαδικασία αυτή, αξιοποιεί λογισμικά σχεδίασης και κατασκευής (CAM/CAD) και ελέγχεται μέσω κεντρικού υπολογιστή, με αποτέλεσμα να διασφαλίζεται η ποιότητα του επισκευασμένου υλικού. Τέλος, αποτελεί μια μέθοδο χαμηλού κόστους, σύντομης διάρκειας και υψηλής απόδοσης.

Αν και η τεχνολογία της εναπόθεσης υλικού με χρήση laser παρουσιάζει αρκετά θετικά στοιχεία, υπάρχουν και μερικά μειονεκτήματα. Αρχικά, το κόστος για την αγορά του εξοπλισμού είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με άλλες τεχνολογίες επιγύμωσης, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η απόκτησή του. Επιπλέον, οι ρυθμοί εναπόθεσης υλικού, είναι περιορισμένοι συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Τέλος, ο συντονισμός και η χρήση του μηχανισμού, απαιτούν ειδική εξειδίκευση και τεχνογνωσία και η ρύθμιση του συστήματος χειρισμού είναι πολύπλοκη, καθώς υπάρχουν πολλές παράμετροι που χρειάζεται να προγραμματιστούν.

Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική επισκόπηση άρθρων

3.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική επισκόπηση δύο επιστημονικών άρθρων που αφορούν την επένδυση υλικού με την τεχνολογία του laser cladding. Στο πρώτο άρθρο, γίνεται ανάλυση της διαδικασίας επένδυσης υλικού, με χρήση δέσμης laser υψηλής ταχύτητας, των παραμέτρων που την διαμορφώνουν, των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων και των αποτελεσμάτων των επιστρωμάτων που προέκυψαν. ^[14] Η τεχνολογία της επένδυσης υλικού με laser εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας (EHLA), αποτελεί μια διαδικασία δημιουργίας πυκνών επιστρωμάτων, μέσω δέσμης laser με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, με ταχύτητα σάρωσης που ξεπερνάει τα 20m/min και ρυθμό εναπόθεσης μεγαλύτερο από τα 120cm²/min. Το δεύτερο άρθρο, πραγματεύεται την ανάλυση των μικροδομών, των επιστρωμάτων που προκύπτουν από ανοξείδωτο χάλυβα πλούσιο σε χρώμιο και την συμπεριφορά τους στην διάβρωση. ^[15]



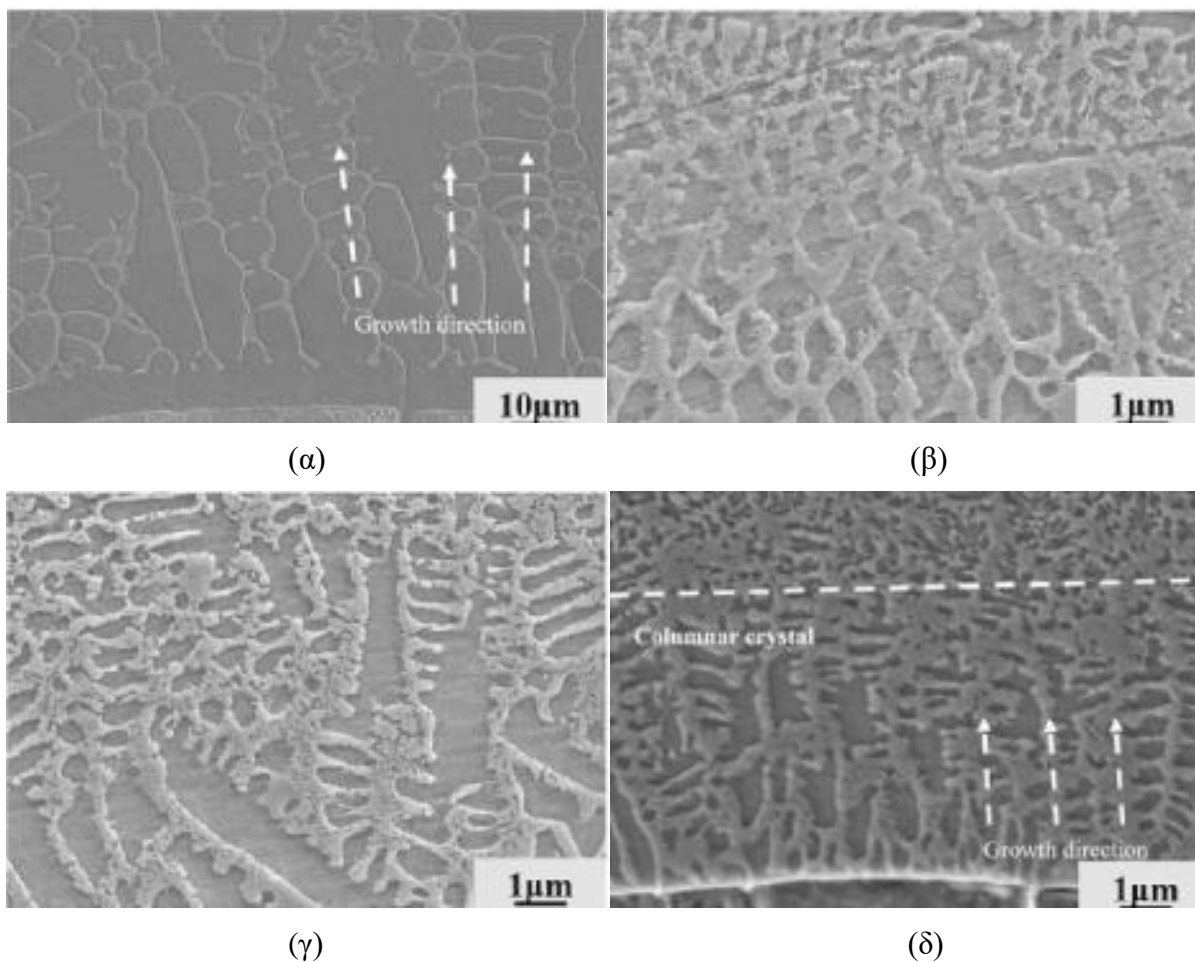
Εικόνα 14: «Η τεχνική EHLA»

Πηγή: <https://www.hornetlasercladding.com/ehla>

3.2. Η τεχνική EHLA

Ο έλεγχος και η σωστή επιλογή των παραμέτρων της επένδυσης υλικού, με χρήση laser εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας, διαμορφώνουν καθοριστικά τα χαρακτηριστικά των επιστρωμάτων που δημιουργούνται. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα σάρωσης και η ισχύς του laser, ελέγχουν την είσοδο της θερμότητας στο υπόστρωμα, ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης διαμορφώνει την γεωμετρία των επιστρωμάτων, όπως και ο ρυθμός επικάλυψης, ο οποίος ευθύνεται και για την ποιότητα της επένδυσης. Παρακάτω, θα αναλυθούν αυτές οι παράμετροι και θα χαρακτηριστούν οι επικαλύψεις που προέκυψαν, σύμφωνα με διάφορα πειράματα που πραγματοποιήσαν ερευνητές.

Αρχικά, η ταχύτητα σάρωσης του laser επηρεάζει την είσοδο της θερμότητας στο υπόστρωμα και συνεπώς τις μικροδομές που σχηματίζονται. Ο Yuan^[14], χρησιμοποίησε υλικό επένδυσης από Ni45 και δημιούργησε επιστρώματα με διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης. Οι μικροδομές που αναπτύχθηκαν, φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 15: (α) «Επίστρωση Ni45 με ταχύτητα 0.6 m/min», (β) «Επίστρωση Ni45 με ταχύτητα 37.68m/min», (γ) «Επίστρωση Ni45 με ταχύτητα 58.86 m/min», (δ) «Επίστρωση Ni45 με ταχύτητα 78.86 m/min», Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>

Παρατηρήθηκε πως οι δενδρίτες αναπτύχθηκαν με παρόμοιο τρόπο, όμως αυξάνοντας την ταχύτητα σάρωσης, οι χονδροειδείς κυλινδρικοί κρύσταλλοι έγιναν λεπτοί δενδρίτες. Παράλληλα, κατά την αύξηση της ταχύτητας, οι μικροδομές που προέκυψαν είχαν μικρότερη, συμπαγέστερη και πιο στενή απόσταση μεταξύ των κρυστάλλων που τις απαρτίζουν. Λόγω της συσσωρευμένης θερμότητας στο υπόστρωμα, ο απαιτούμενος χρόνος για την μεταφορά θερμότητας αυξήθηκε και ο ρυθμός ψύξης ήταν χαμηλός. Για τον υπολογισμό του ρυθμού ψύξης στην ζώνη του υποστρώματος, χρησιμοποιήθηκε η σχέση: $\frac{dT}{dt} = \frac{2\pi \times K \times v \times (T_m - T_0)^2}{a \times P}$, όπου:

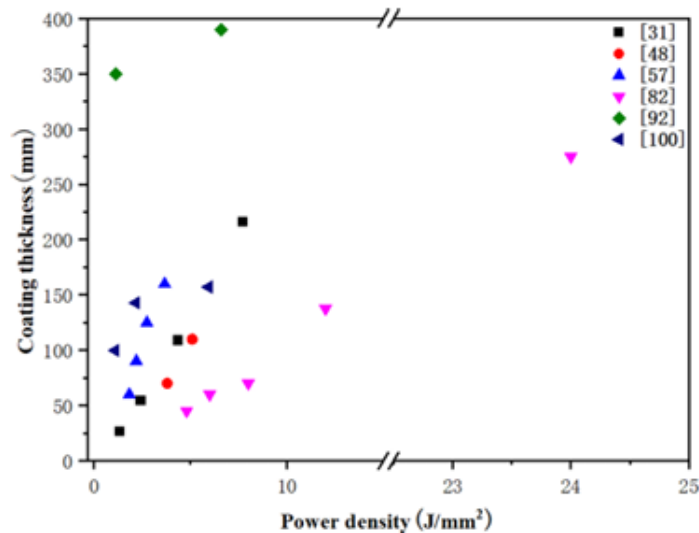
- $\frac{dT}{dt}$, είναι ο στιγμιαίος ρυθμός ψύξης
- K, είναι η θερμική αγωγιμότητα
- V, είναι η ταχύτητα σάρωσης του laser
- α, είναι ο συντελεστής αναρρόφησης
- P, είναι η ισχύς του laser
- T_m, είναι η θερμοκρασία τήξης
- T₀, είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Ο ρυθμός ψύξης, αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται νανοκρύσταλλοι στην επιφάνεια των επιστρωμάτων και να αυξάνεται η σκληρότητα. Με την μέθοδο EHLA, βελτιώνονται οι σχηματιζόμενες μικροδομές και δημιουργούνται επιστρώματα μέσω της αργής ανάπτυξης πρωτογενών κρυστάλλων και δενδριτικών ευτηκτικών δομών . Όταν η ταχύτητα σάρωσης κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, μειώνεται η αραίωση στο υπόστρωμα και αυξάνεται η αντιδιαβρωτική προστασία. Σε περίπτωση που η ταχύτητα αυτή αυξηθεί υπερβολικά, δημιουργούνται χαμηλής πυκνότητας και ποιότητας επιστρώματα.

Η ισχύς του laser, επηρεάζει σημαντικά την διαδικασία επένδυσης του υλικού, κατά την μέθοδο EHLA. Ο Yin^[14], για τον προσδιορισμό της ενεργειακής πυκνότητας, χρησιμοποίησε τον τύπο $E = \frac{P}{D \times V}$, όπου:

- E, είναι η ενεργειακή πυκνότητα
- P, είναι η ισχύς του laser
- D, είναι η διάμετρος του σημείου του laser
- V, είναι η ταχύτητα σάρωσης

Διαπιστώθηκε πως η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, οδήγησε στην αύξηση του πάχους των επιστρωμάτων, σε διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας και διαφορετικά υλικά επικάλυψης. Τα αποτελέσματα του Yin παρουσιάζονται σε μορφή γραφήματος, όπου ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στις τιμές ενεργειακής πυκνότητας του laser (J/mm²) και ο κατακόρυφος άξονας, αναφέρεται στο πάχος της επίστρωσης (mm).



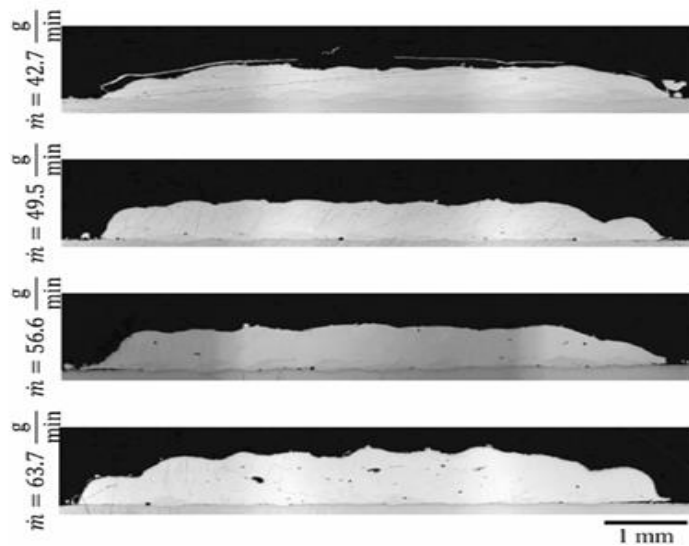
Εικόνα 16 : «Το πάχος της επένδυσης συναρτῆσει την ενεργειακῆς πυκνότητας»

Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>

Ο Leung^[14], διαπίστωσε πως ο σχηματισμός πόρων στα επιστρώματα, εξαρτάται από το μέγεθος της τηγμένης ζώνης στο υπόστρωμα. Η εμφάνιση ελαττωμάτων στην τεχνική EHLA, προκύπτει από τον λάθος συνδυασμό της ισχύς του laser και της ταχύτητας εναπόθεσης του υλικού πλήρωσης. Για παράδειγμα, η υψηλή ταχύτητα εναπόθεσης σκόνης, πρέπει να αντισταθμιστεί με την ισχύ του laser για την αποφυγή εμφάνισης ατελειών κατά την επένδυση υλικού. Ο Xu^[14], μέσα από δοκιμές, δημιούργησε διαφορετικές επιστρώσεις, διαμορφώνοντας κάθε φορά την ισχύ σε διαφορετικά επίπεδα. Συγκεκριμένα, σε χαμηλές τιμές ισχύς, παρατήρησε πως προέκυψαν επιστρώματα με μεγάλο πορώδες, ενώ σε πολύ υψηλές τιμές, διαπίστωσε την εμφάνιση πόρων που παρουσίαζαν χαμηλή ακρίβεια στο μέγεθός τους.

Στην διαμόρφωση των επιστρωμάτων και του πάχους τους, σημαντικό ρόλο κατέχει και ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης στο υπόστρωμα. Η ελεγχόμενη ροή των κόκκων της σκόνης, βοηθάει την καλύτερη τήξη από το laser. Παρόλα αυτά, σε περίπτωση που αυξηθεί πολύ ο ρυθμός τροφοδοσίας της σκόνης, θα πρέπει να αντισταθμιστεί από την ταχύτητα σάρωσης και την ισχύ, έτσι ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως η ατελής τήξη. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή ροή του υλικού πλήρωσης, είναι πιθανό να προκαλέσει ανεπιθύμητη συσσωρευμένη θερμότητα στην τηγμένη ζώνη του υποστρώματος. Ο Schaible^[14], επιχείρησε μέσα από δοκιμές, να βρει τον κατάλληλο ρυθμό τροφοδοσίας σκόνης, και μέσω αναλύσεων εξέτασε την αποτελεσματικότητά του. Παρατήρησε πως με την αύξηση του ρυθμού

τροφοδοσίας σε λογικά πλαίσια, αυξήθηκε το εσωτερικό πορώδες των επιστρωμάτων, σε επικαλύψεις με ίδιο πάχος και συμπέρανε πως η σωστή επιλογή του ρυθμού τροφοδοσίας της σκόνης και ο έλεγχος αυτού, διαμορφώνει την ομοιομορφία και το πόσο συμπαγής είναι η επικάλυψη. Παρακάτω, φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών του.



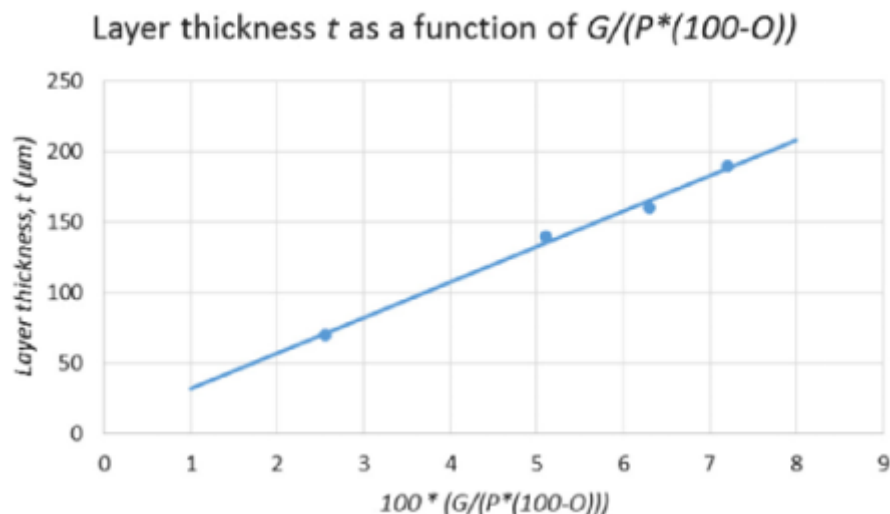
Εικόνα 17: «Διαφορετικοί ρυθμοί τροφοδοσίας σκόνης»

Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>

Τέλος, ο ρυθμός επικάλυψης επηρεάζει την πυκνότητα και την ποιότητα της επίστρωσης. Με την τεχνική EHLA, επιτυγχάνεται ποσοστό επικάλυψης που κυμαίνεται μεταξύ 50%-90%. Σε περίπτωση που το ποσοστό αυτό είναι χαμηλό, τότε επηρεάζεται αρνητικά τόσο η ποιότητα όσο και η πυκνότητα των επιστρωμάτων, χωρίς αυτό να σημαίνει πως σε υψηλούς ρυθμούς επικάλυψης επιτυγχάνεται το αντίθετο. Ο Lampra^[14], χρησιμοποίησε laser διόδων, με μέγιστη ισχύ 7 kW και με την μέθοδο EHLA, παράγαγε πυκνά επιστρώματα, χωρίς ρωγμές και πόρους. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποίησε σταθερή ταχύτητα σάρωσης 100 m/min, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις υπόλοιπες παραμέτρους. Συγκεκριμένα, για διαφορετικά πάχη, υπολόγισε τον λόγο $\frac{G}{(P \times (100 - O))}$ και έκανε γραφική αναπαράσταση, όπου:

- G, είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας σκόνης (kg/h)
- P, η ισχύς του laser (kW)
- O, ρυθμός επικάλυψης (%)

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το πάχος συνδέεται γραμμικά με την παραπάνω σχέση και αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας και την μείωση της ισχύος.



Εικόνα 18 : «Το πάχος επίστρωσης συναρτήσε του λόγου $\frac{G}{(P \times (100 - O))}$ »

Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>

Ο Yan^[14], πραγματοποίησε δοκιμές για την επίδραση του ρυθμού επικάλυψης στα επιστρώματα. Για ρυθμούς επικάλυψης μεταξύ 30% - 60%, το πάχος των επιστρωμάτων ήταν μικρότερο από 200 μm . Όταν κυμαινόταν μεταξύ 70% - 80%, το πάχος ήταν σε φυσιολογικές τιμές, αλλά οι επιφάνειες των επιστρώσεων, εμφάνιζαν κόκκους σκόνης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τραχύτητα στην επιφάνεια. Τέλος, για ποσοστά πάνω από 85%, παρατηρήθηκε πάλι τραχύτητα στις επιφάνειες, χωρίς όμως να παρατηρούνται ρωγμές ή ελαττώματα. Το πρόβλημα της τραχύτητας της επιφάνειας, λόγω των υψηλών ποσοστών του ρυθμού επικάλυψης, μπορεί να αποφευχθεί, βελτιώνοντας άλλες παραμέτρους, όπως την ταχύτητα σάρωσης και την ισχύ laser.

3.2.1. Έρευνες με αριθμητικές προσομοιώσεις στην τεχνική EHLA

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις, δεν αποτελούν τόσο ασφαλή μέθοδο για την επίλυση ζητημάτων στην διαδικασία της επένδυσης EHLA, όμως δίνουν μια καλύτερη προσέγγιση στην αντιμετώπισή τους και την απλοποίησή τους.

Ο Li^[14], επιχείρησε να προσομοιώσει την κατανομή της τάσης συναρτήσε του σχήματος της τηγμένης ζώνης στο υπόστρωμα. Σύγκρινε τις θερμικές καταπονήσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της δημιουργίας επίστρωσης υλικού. Συγκεκριμένα, ως $t=0\text{sec}$, θεώρησε την στιγμή που

η δέσμη laser ξεκίνησε να εκπέμπεται και ως $t=180$ sec την στιγμή που το υλικό που εναπόθεσε ψύχθηκε στους 100° C. Μέχρι τα 180 sec, η τάση του εφελκυσμού, είχε τιμές κοντά στα 300 Mpa στην ζώνη τήξης του υποστρώματος και η κατανομή της θερμοκρασίας ήταν άνιση, εξαιτίας της ανομοιόμορφης συσσώρευσης θερμότητας. Σε υψηλές ταχύτητες σάρωσης, το εύρος την τηγμένης ζώνης στο υπόστρωμα αυξήθηκε, όπως και οι θερμικές καταπονήσεις του υλικού. Έτσι, κατά την ψύξη, παρατηρήθηκε μεγάλη παραμόρφωση και υψηλή υπολειμματική τάση.

Ο Zhang^[14], πειραματίστηκε στην προθέρμανση του υποστρώματος, με σκοπό να εξαλειφθεί η υπολειμματική τάση του επενδυμένου τμήματος, κάτι το οποίο και κατάφερε. Παρατήρησε πως για προθέρμανση σε θερμοκρασία 500° C, οι αξονικές τάσεις μειώθηκαν κατά 16%, οι τάσεις στο περίγραμμα μειώθηκαν κατά 22% και οι Von Mises κατά 25%. Παράλληλα, όταν αύξησε την θερμοκρασία προθέρμανσης στους 800° C, διαπίστωσε πως οι αξονικές τάσεις μειώθηκαν κατά 28%, οι τάσεις στο περίγραμμα μειώθηκαν κατά 32% και οι Von-Mises κατά 46% και έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προθέρμανση του υποστρώματος σε κατάλληλες θερμοκρασίες, μπορεί να προστατεύσει την επιστροφή από την δημιουργία ρωγμών και πόρων.

Ο Song^[14], επικεντρώθηκε στην εύρεση μιας σχέσης αναλογίας μεταξύ της του πεδίου ροής και της εξασθένησης της ενέργειας κατά την επένδυση υλικού με την τεχνική EHLA, με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της εξασθένησης. Κατά την μέθοδο EHLA, χρησιμοποιούνται δύο ακροφύσια εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας εναπόθεσης σκόνης και τέσσερα ακροφύσια κανονικής ροής. Για μεγέθη κόκκων σκόνης από 30 μm έως 90 μm , παρατηρήθηκε εξασθένηση ενέργειας laser που ξεπερνούσε το 50% στα ακροφύσια μεγάλης ταχύτητας και χαμηλότερη σε αυτά κανονικής ταχύτητας. Για ρυθμούς εναπόθεσης υλικού μεταξύ 10 g/min και 42 g/min, παρατηρήθηκε 90% εξασθένηση στα δύο ακροφύσια και 20% εξασθένηση στα τέσσερα ακροφύσια, με αποτέλεσμα να μειωθεί η ζώνη του υποστρώματος που επηρεάζεται από την θερμότητα και τα επιστρώματα να έχουν μεγαλύτερη αραίωση. Συμπέρανε πως το μέγεθος των κόκκων της σκόνης διαμορφώνει σημαντικά το ποσοστό της εξασθένησης ενέργειας, καθώς όσο μικρότερο ήταν το μέγεθος, τόσο μεγαλύτερο ήταν το ποσοστό εξασθένησης.

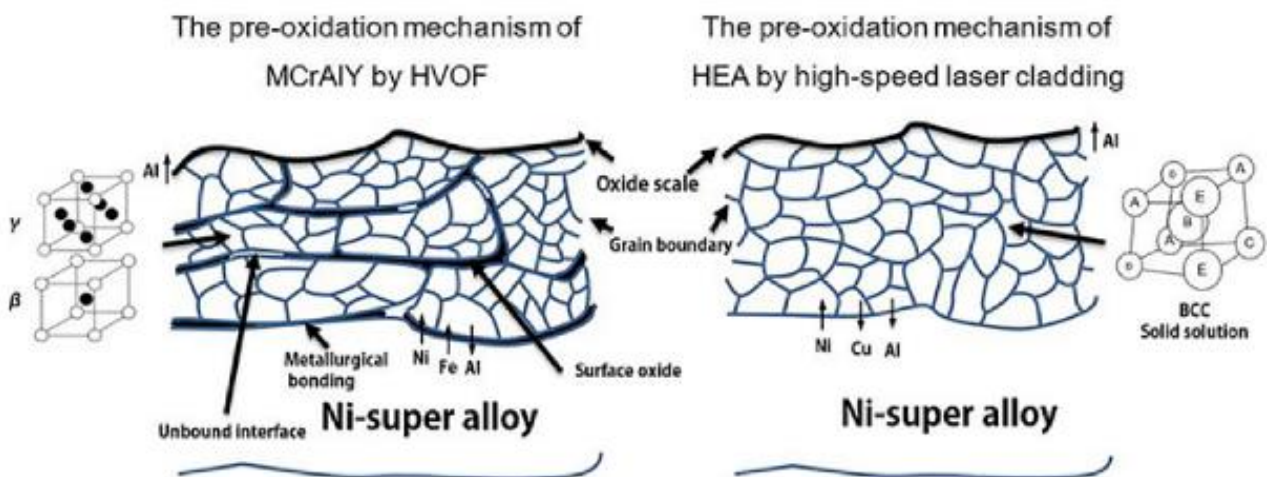
3.2.2. Επιλογή και προετοιμασία υλικών

Για την μέθοδο EHLA, είναι σημαντικό οι σκόνες που χρησιμοποιούνται, να έχουν μικρό μέγεθος κόκκων, καλή σφαιρικότητα και χαμηλό πορώδες και να είναι ανθεκτικές στην

οξειδωση και την διάβρωση. Κυρίως, γίνεται χρήση κραμάτων, άμορφων ή υψηλής εντροπίας, αλλά και συνδυασμός κραμάτων. Οι ερευνητές στοχεύουν στην εύρεση μεθόδων που θα βελτιώσουν την απόδοση και την ποιότητα των επιστρώσεων, με βελτιώσεις στα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την επένδυση EHLA.

Ο Li^[14], δημιούργησε υψηλής ποιότητας επιστρώματα από χάλυβα 431, σε υπόστρωμα υλικού 27SiMn, με ταχύτητα σάρωσης 150 m/min και ρυθμό επιφάνειας 1.14 m²/min, με αποτέλεσμα να προκύψουν μικροδομές από δενδρίτες με ομοιόμορφη κατανομή και αντοχή στην διάβρωση. Ο Xu, χρησιμοποίησε διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης και παρασκεύασε επιστρώματα από ανοξειδωτο χάλυβα με βάση το Fe, ώστε να ερευνήσει την συμπεριφορά τους στην διάβρωση από διάλυμα NaCl. Κατέληξε στο γεγονός ότι όσο υψηλότερη ήταν η ταχύτητα σάρωσης, τόσο πιο αργά αναπτύσσονταν τα φαινόμενα διάβρωσης στην επιφάνεια του υλικού. Ο Osama^[14], δημιούργησε επιστρώματα Ni60, σε υλικό βάσης από κράμα μαγνησίου και διαπίστωσε πως μέσω της επένδυσης αυτού του υλικού, ενισχύθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες της βάσης και η σκληρότητα της επιφάνειας αυξήθηκε κατά 8 φορές.

Σκόνες από κράματα υψηλής εντροπίας, έχουν σύσταση από πέντε ή περισσότερα υλικά, με διαφορετικές αναλογίες. Ο Xu, παρασκεύασε επιστρώσεις από CuAlNiCrFe με διαφορετικές μεθόδους. Με την μέθοδο EHLA, η επικάλυψη που προέκυψε, είχε διαφορετική δομή, καλύτερη αντιοξειδωτική συμπεριφορά και ταχύτερο χρόνο δημιουργίας προστατευτικής μεμβράνης στην επιφάνεια, συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνικές.



Εικόνα 19: «Επιστρώματα από κράματα υψηλής εντροπίας»

Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>

Ο Χiao^[14], δημιούργησε επιστρώματα από άμορφα κράματα, σε διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης και διαφορετικούς ρυθμούς τροφοδοσίας. Συμπέρανε πως με την αύξηση του ρυθμού σάρωσης, βελτιώθηκε η διαδικασία της ψύξης και το πάχος της επίστρωσης. Οι επικαλύψεις είχαν λιγότερες ρωγμές και πόρους και καλύτερη μικροδομή.

3.2.3. Ανάλυση των ελαττωμάτων στα επιστρώματα

Σε περίπτωση που στις επικαλύψεις με την μέθοδο EHLA, προκύψουν συγκεντρωμένες τάσεις, τότε είναι πιθανό να εμφανιστούν ρωγμές. Ο Li, παρασκεύασε επίστρωση από Fe-Co-B-Si-Nb, σε επιφάνεια με υλικό βάσης ανθρακούχο χάλυβα, χρησιμοποιώντας την τεχνική EHLA. Πειραματίστηκε σε διαφορετικές ταχύτητες σάρωσης, με τιμές 37,68 m/min, 52,75 m/min, 66,57 m/min και 80,38 m/min. Στην χαμηλότερη ταχύτητα, η επικάλυψη εμφάνισε ρωγμές και μικρότερη άμορφη φάση. Στις ενδιάμεσες ταχύτητες, ο αριθμός και το μέγεθος των ρωγμών μειώθηκαν και η άμορφη φάση αυξήθηκε, ενώ για ταχύτητα 80,38 m/min δεν εμφανίστηκαν ρωγμές. Κάτι τέτοιο, ήταν αποτέλεσμα της μειωμένης υπολειμματικής τάσης εφελκυσμού ($106,13 \pm 24,03$ MPa, συγκριτικά με την χαμηλότερη ταχύτητα που η τάση ήταν διπλάσια) και του χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής, που διαμορφώθηκαν κατάλληλα με την αύξηση της ταχύτητας σάρωσης. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο $\sigma_T = \frac{E \times \Delta\alpha \times \Delta T}{(1-\nu)}$, όπου:

- E, είναι το μέτρο ελαστικότητας του επενδυμένου υλικού
- $\Delta\alpha$, είναι η διαφορά του συντελεστή θερμικής διαστολής του επιστρώματος με το υπόστρωμα
- ν , είναι ο λόγος Poisson
- ΔT , είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας του χώρου και της θερμοκρασίας τήξεως

Σε έρευνα που πραγματοποίησε ο Du, δημιούργησε επιστρώματα από κράματα υψηλής εντροπίας σε υποστρώματα από υλικό C45 και παρατήρησε πως εμφανίζονταν ρωγμές, υψηλές τάσεις εφελκυσμού στο επενδυμένο υλικό και μειωμένη πλαστική παραμόρφωση στο υπόστρωμα.

Η εμφάνιση πόρων στα επιστρώματα, είναι αποτέλεσμα της συσσώρευσης αέρα, κατά την διάρκεια της επένδυσης υλικού με χρήση δέσμης laser, στην ζώνη τήξης μεταξύ του

υποστρώματος και του επενδυμένου υλικού. Ο αέρας, δεν απορρίπτεται τελείως εξαιτίας της γρήγορης στερεοποίησης του υλικού επένδυσης κατά την διάρκεια της ψύξης. Έτσι, σχηματίζονται πόροι που μειώνουν την ποιότητα και την ομοιομορφία του επιστρώματος και ευνοούν την ανάπτυξη ρωγμών. Στην εμφάνιση πόρων, συμβάλλει και η ενεργειακή ισχύς του laser, σε περίπτωση που βρίσκεται σε λάθος επίπεδα. Ο Hojjatzadeh, πραγματοποίησε έρευνα στην απομάκρυνση των πόρων που σχηματίζονται στην ζώνη τήξης και συμπέρανε πως σημαντικό ρόλο σε αυτήν την διαδικασία κατέχει η κλίση της θερμοκρασίας. Οι πόροι έχουν την τάση να κινούνται και να αποβάλλονται όταν τους ασκείται θερμική τριχοειδής δύναμη. ^[14]

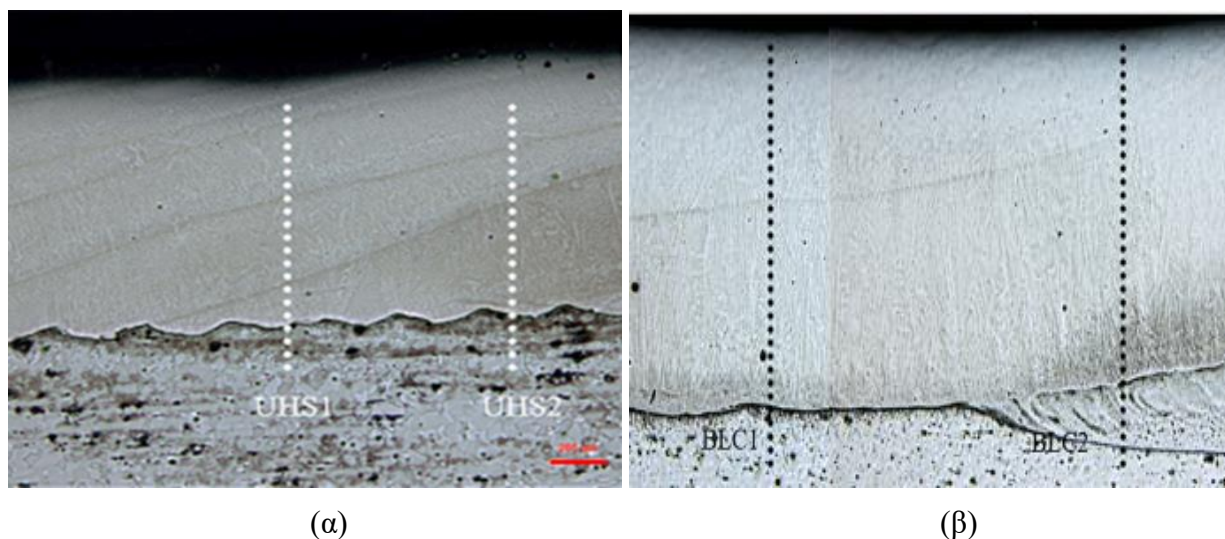
3.3. Η αντικατάσταση της σκληρής επιχρωμίωσης από τεχνικές laser cladding

Με στόχο την αντικατάσταση της σκληρής επιχρωμίωσης (μέθοδος HCP), ερευνητές χρησιμοποίησαν τεχνικές εναπόθεσης σκόνης από ανοξείδωτο χάλυβα, πλούσιο σε χρώμιο, με χρήση δέσμης laser, σε υποστρώματα κατασκευασμένα από 27SiMn. Η μέθοδος HCP, αποτελεί μια διαδικασία εναπόθεσης χρωμίου σε μορφή διαλύματος, σε επιφάνειες που έχουν υποστεί φθορές, με σκοπό να αυξηθεί το προσδόκιμο ζωής τους και να βελτιωθεί η αντοχή τους στην διάβρωση. Αν και η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική, υπάρχει η τάση να αντικατασταθεί, εξαιτίας της εκπομπής Cr^{6+} , το οποίο είναι τοξικό και καρκινογόνο. Συνεπώς, αρκετοί ερευνητές επιχείρησαν να ελέγξουν την αποτελεσματικότητα άλλων μεθόδων, ελέγχοντας την μικροδομή των επιστρωμάτων που κατασκεύασαν και την συμπεριφορά τους στην διάβρωση. Ειδικότερα, χρησιμοποίησαν laser εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας (μέθοδος UHS) και laser ευρείας δέσμης (μέθοδος BLC). Η μέθοδος UHS, χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα σάρωσης (3m/min έως 200 m/min) και η ζώνη τήξης που προκύπτει, βρίσκεται επιφανειακά του υποστρώματος. Το μέγεθος των κόκκων της σκόνης, κυμαίνεται μεταξύ 10 μ m και 70 μ m. Η μέθοδος BLC, προσφέρει δέσμη laser μεγαλύτερου πλάτους από την συμβατική μέθοδο, σε συμβατικές ταχύτητες, με αποτέλεσμα να καλύπτεται μεγαλύτερο εύρος της επιφάνειας στην οποία παρασκευάζεται η επίστρωση. Το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 53 μ m, μέχρι και 150 μ m

3.3.1. Παρασκευή επιστρωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, πλούσιο σε χρώμιο

Ερευνητές της εταιρείας Nanjing Huirui^[15], παρασκεύασαν επιστρώματα από ανοξείδωτο χάλυβα, με τις μεθόδους UHS και BLC, σε επιφάνειες από ράβδους κατασκευασμένες από 27SiMn. Κατά την μέθοδο UHS, έγινε χρήση laser τύπου Laserline 6 kw, με διάμετρο εστίασης 1,2 mm, διάμετρο κηλίδας 1,5 mm και με ταχύτητα σάρωσης 200 mm/s. Το υπόστρωμα κινούταν περιστροφικά, με ταχύτητα 50 rpm και η κεφαλή του laser κινούταν με ταχύτητα 0.4mm/s κατά την διαδικασία επένδυσης του υλικού. Το ακροφύσιο της σκόνης, τοποθετήθηκε 2mm από την επιφάνεια του υποστρώματος, με αποτέλεσμα η σκόνη εναπόθεσης να προθερμαίνεται από το laser, πριν φτάσει στην ζώνη τήξης. Ο ρυθμός εναπόθεσης σκόνης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν 24,5 g/min. Κατά την στερεοποίηση των κόκκων, προέκυψαν επιστρώματα λεπτού πάχους, 0,5mm, με ποσοστό επικάλυψης 75% .

Για την παρασκευή επιστρωμάτων με την μέθοδο BLC, χρησιμοποιήθηκε laser 10 kW με ταχύτητα σάρωσης 13 mm/s. Η σκόνη τοποθετήθηκε μέσω ακροφυσίου στην περιοχή που πραγματοποιήθηκε η επίστρωση, με ρυθμό εναπόθεσης 82,5 g/min και έπειτα τήχθηκε από το laser. Τα επιστρώματα που προέκυψαν, είχαν πάχος 1,2 mm, με ποσοστό επικάλυψης 50%.



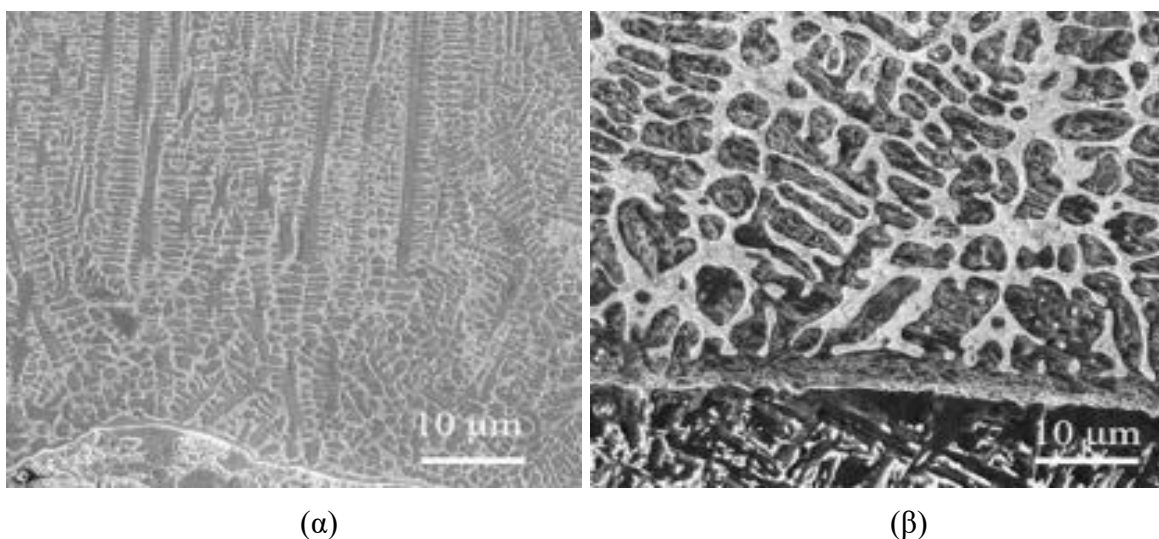
Εικόνα 20: (α) «Η επίστρωση με την μέθοδο UHS», (β) «Η επίστρωση με την μέθοδο BLC»

Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.044>

3.3.2. Αποτελέσματα της μικροδομής των επιστρώσεων

Για την ανάλυση των μικροδομών, ερευνητές της εταιρείας Carl Zeiss^[15], χρησιμοποίησαν οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και τα δείγματα ήταν τέτοια ώστε να διακρίνονται τόσο η ζώνη τήξης όσο και η περιοχή που επηρεάζεται από την θερμότητα και η ζώνη τήξης. Παρατηρήθηκε πως η μικροδομή των επιστρωμάτων που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο UHS, ήταν πολυστρωματική και στοιβαγμένη. Δεν παρατηρήθηκε διάχυση του χρωμίου στο υπόστρωμα, γεγονός που οφείλεται στα χαμηλά ποσοστά αραίωσης. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα των επιστρωμάτων που παρήχθησαν με την μέθοδο BLC, έδειξαν ανομοιογένεια στην μικροδομή και μεγαλύτερη διάχυση του χρωμίου στο υπόστρωμα, λόγω της υψηλής αραίωσης και του μεγαλύτερου εύρους της τηγμένης περιοχής που προέκυψε κατά την τροφοδοσία του laser. Η σκληρότητα ήταν υψηλότερη στα επιστρώματα που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο BLC, ενώ και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν παρόμοιοι μεταλλουργικοί

δεσμοί συγκόλλησης μεταξύ της επιφάνειας του υποστρώματος και του επενδυμένου υλικού, με δενδρίτες κυλινδρικής μορφής σε στήλες. Στην περιοχή του επιστρώματος που επενδύθηκε με την μέθοδο BLC, οι δενδρίτες είναι περισσότερο χονδροειδείς, συγκριτικά με εκείνους που προέκυψαν από την μέθοδο UHS. Γενικά, το μέγεθος των δενδριτών που δημιουργήθηκαν από την επένδυση υλικού με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα laser, ήταν μικρότερο και πιο λεπτό, εξαιτίας του ταχύτερου ρυθμού ψύξης.



Εικόνα 21: (α) «Η μικροδομή της επίστρωσης με την μέθοδο UHS », (β) «Η μικροδομή της επίστρωσης με την μέθοδο BLC», Πηγή: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.044>

3.3.3. Ανάλυση της διαβρωτικής συμπεριφοράς των επιστρωμάτων

Η μικροδομή των επιστρωμάτων που παρασκευάστηκαν με την μέθοδο UHS, παρουσίασε αρκετούς πόρους και κενά, εξαιτίας του γρήγορου ρυθμού ψύξης. Συνεπώς, είναι πιθανό να εμφανιστούν υπολειμματικές τάσεις εφελκυσμού, γεγονός που ευνοεί την εμφάνιση ρωγμών στις επιστρώσεις και την εξάπλωση των διαβρωτικών φαινομένων. Αντιθέτως, εξαιτίας της χαμηλότερης ταχύτητας σάρωσης και του βραδύτερου ρυθμού ψύξης, οι υπολειμματικές τάσεις στην μέθοδο BLC έχουν μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης, με αποτέλεσμα η δημιουργία ρωγμών να είναι πιο σπάνια. Η ανομοιομορφή διάχυση του χρωμίου σε όλη την έκτασή των επιστρωμάτων και η ανομοιογένεια των μικροδομών, είναι φαινόμενα που ευνοούν την εμφάνιση διάβρωσης στην διαδικασία BLC. Παρόλα αυτά, συμεριζόμενοι τους παράγοντες

κόστους και αποτελεσματικότητας, οι ερευνητές συμπέραναν πως η αντικατάσταση της διαδικασίας σκληρής επιχρωμίας, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με την βελτίωση και την εξέλιξη της μεθόδου BLC, για την παρασκευή επιστρωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, πλούσιο σε χρώμιο. ^[15]

Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία

4.1. Περιγραφή του υλικού βάσης

Για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, επιλέχθηκαν δύο δοκίμια, μορφής κυλινδρικού άξονα, με διάμετρο 80mm και μήκος 96mm το καθένα. Το υλικό της βάσης των αξόνων ήταν το 42CrMo4. Η χημική σύσταση (%) των δοκιμίων, παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα παρακάτω:

Πίνακας 3: Η χημική σύσταση των δοκιμίων

Χημική σύσταση %						
C	Ni	Mo	F	N	Cr	Mn
0.410	0.23	0.60	0.013	0.004	0.970	0.163

Το υλικό βάσης 42CrMo4, αποτελεί ένα κράμα χάλυβα χρωμίου-μολυβδαίνιου, το οποίο παρασκευάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου DIN EN ISO 683-2. Ανήκει στην κατηγορία των θερμικά επεξεργασμένων χαλύβων και χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα και υψηλή αντοχή στην κόπωση και την κρούση, σε χαμηλές θερμοκρασίες. Έχει χαμηλή συγκολλησιμότητα, ενώ σε περίπτωση συγκόλλησης, είναι απαραίτητος ο έλεγχος των παραμέτρων, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση ανεπιθύμητων μικροδομών. Κατά την διαδικασία της προθέρμανσης του χάλυβα 42CrMo4, είναι σημαντικό η θερμοκρασία να μην υπερβαίνει τους 300°C, καθώς είναι πιθανό να αλλοιωθεί το χρώμιο και να παρουσιαστούν φθορές. Οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, παρουσιάζονται παρακάτω, υπό μορφή πίνακα.

Πίνακας 4: Οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων

Όριο εφελκυσμού (N/mm ²)	Όριο διαρροής (N/mm ²)	Επιμήκυνση πριν την πλαστική παραμόρφωση (%)	Ποσοστό μείωσης της έκτασης (%)	Δοκιμή σκληρότητας (HRC)
905	1055	18	49	32-33

Τέλος, ο χάλυβας 42CrMo4, αποτελεί μια ευέλικτη επιλογή υλικού, που προτιμάται συχνά και ικανοποιεί στο μέγιστο τις μηχανικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις των εξαρτημάτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για την κατασκευή αξόνων, εξαρτημάτων και ανταλλακτικών που υπόκεινται σε υψηλά φορτία και καταπονήσεις (γρανάζια, ρουλεμάν, εξαρτήματα αυτοκινήτων και κινητήρων κ.α.), εργαλείων και στροβίλων. Παράλληλα, εμφανίζεται και σε μηχανισμούς κίνησης, εξόρυξης αλλά και σε γεωργικά μηχανήματα. [16], [17]



Εικόνα 22: «Δοκίμια κατασκευασμένα από 42CrMo4»

Πηγή: <https://www.tsmsteel.com/42crmo4.html>

4.2. Περιγραφή των σκονών εναπόθεσης

Στα δοκίμια του πειράματος, πραγματοποιήθηκε εναπόθεση υλικού σε μορφή σκόνης, για την δημιουργία επιστρώσεων με την τεχνική του laser cladding. Και στους δύο άξονες δημιουργήθηκαν οι ίδιες επιστρώσεις περιφερειακά. Συγκεκριμένα επενδύθηκε στο ένα τμήμα του κάθε άξονα σκόνη κράματος ανοξειδωτού χάλυβα AISI 410L ενώ στο δεύτερο τμήμα σκόνη που προέκυψε έπειτα από την μίξη των σκονών AISI 410L και AISI 4140, σε ίδια αναλογία (50% - 50%).



Εικόνα 23: «Οι σκόνες εναπόθεσης AISI 410L και AISI 4140»

4.2.1. Η σκόνη AISI 410L

Η σκόνη AISI 410L, αποτελεί έναν φερριτικό ανοξειδωτο χάλυβα, σε μορφή κόκκων, με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο. Παράγει επιστρώματα υψηλής αντοχής στην διάβρωση, στην φθορά και την οξείδωση. Προσφέρει καλή συγκολλησιμότητα και παράγει ισχυρούς μεταλλουργικούς δεσμούς μεταξύ του επενδυμένου επιστρώματος και του υποστρώματος και αποτελεί μια οικονομική επιλογή για την δημιουργία επιστρώσεων με την τεχνική του laser cladding. Προτιμάται συχνά σε περιπτώσεις επισκευής εξαρτημάτων, τα οποία έχουν υποστεί φθορές, αλλά και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επιφανειακή σκλήρυνση αντικειμένων^[18]. Επομένως, η εφαρμογή της σκόνης AISI 410L για την δημιουργία επιστρώσεων με την χρήση δέσμης laser,

μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες για επιδιόρθωση και ενίσχυση σε εξαρτήματα πολλών κλάδων, όπως της ναυτιλίας, της βιομηχανίας, της αεροναυπηγικής και της γεωργίας.

Η χημική ανάλυση της σκόνης AISI 410L που χρησιμοποιήθηκε για τις απαιτήσεις των πειραμάτων της εργασίας, παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα παρακάτω.

Πίνακας 5: Η χημική σύσταση της σκόνης AISI 410L (wt %)

Cr	S	C	Si	Ni	Fe
12.2	0.01	0.003	0.5	0.1	87.187

Το μέγεθος των κόκκων της σκόνης αυτής, κυμαίνεται από 45 microns έως 180 microns και η πυκνότητά της είναι 4,16 g/cm³.^[18]



Εικόνα 24: «Η σκόνη AISI 410L»

4.2.2 Η σκόνη AISI 4140

Η σκόνη AISI 4140, αποτελεί ένα χάλυβα κράματος χρωμίου και μολυβδαίνιου. Χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα και μεγάλη αντοχή στην φθορά, την κρούση και τον εφελκυσμό. Όταν χρησιμοποιείται ως υλικό επένδυσης στην τεχνική του laser cladding, προσφέρει επιστρώματα με ισχυρές μηχανικές ιδιότητες και βελτιώνει την αντοχή της επιφάνειας στην οποία επενδύεται, λόγω των ισχυρών μεταλλουργικών δεσμών που προκύπτουν.^[18] Αποτελεί μια σημαντική λύση

εξοικονόμησης κόστους, για την επιδιόρθωση φθορών σε εξαρτήματα (ρουλεμάν, άξονες, γρανάζια), ώστε να αποφευχθεί η αντικατάστασή τους. Συνεπώς, εφαρμόζεται για σκοπούς επισκευής και βελτίωσης εξαρτημάτων και μηχανημάτων στην ναυτιλία, τις βιομηχανίες, την αεροναυπηγική και την γεωργία.

Η χημική ανάλυση της σκόνης AISI 4140 που χρησιμοποιήθηκε για τις απαιτήσεις των πειραμάτων της εργασίας, παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6: Η χημική σύσταση της σκόνης 4140 (wt %)

Cr	Mn	C	Si	Mo	Fe
1.03	0.82	0.42	0.29	0.23	97.21



Εικόνα 25: «Η σκόνη AISI 4140»

4.3. Περιγραφή της δημιουργίας επιστρώσεων στα δοκίμια με την χρήση της τεχνικής του laser cladding

Η επένδυση του υλικού εναπόθεσης στα δοκίμια του πειράματος, πραγματοποιήθηκε με την χρήση του εξοπλισμού “LaserLine LDF 4000-100”. Ο μηχανισμός αυτός, χρησιμοποιεί laser διόδου, με ισχύ έως και 4000W, μήκος κύματος 900 nm -1070 nm και ποιότητα δέσμης 100 mm x mrad. Ο σύνδεσμος ινών είναι τύπου LLK-D (Laser Light Cable – D series) και η ελάχιστη διάμετρος της ίνας 100μm.



(α)



(β)



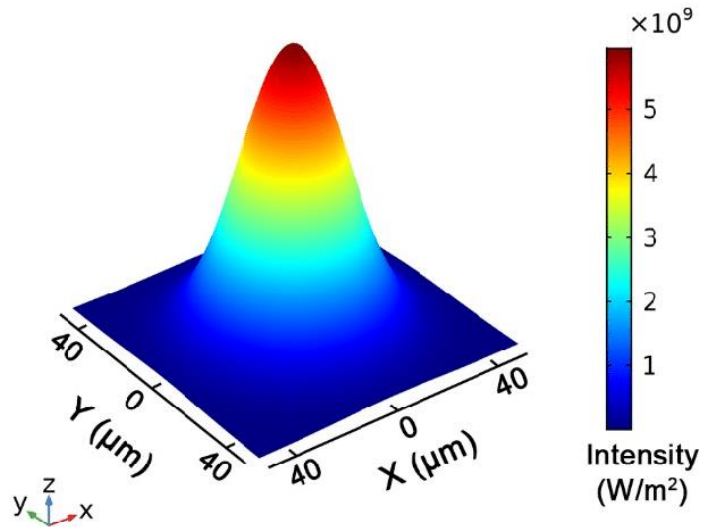
(γ)

Εικόνα 26: (α) «Η κεφαλή του laser» (β) « Ο κεντρικός υπολογιστής του Laserline LDF 4000-100»,
(γ) «Το μηχάνημα Laserline LDF 4000-100»

Για την παρασκευή των επιστρώσεων, η ισχύς του laser (P) τέθηκε στα 2400W ($P=2400W$) και η ταχύτητα πρόωσης laser (V) που χρησιμοποιήθηκε ήταν 12 mm/s ($V=12$ mm/s). Με τον υπολογισμό του λόγου $P / V = Q$, προκύπτει η θεωρητική τιμή της εισερχόμενης θερμότητας ($Q_{theor.} = P/V$), ενώ με τον υπολογισμό του γινομένου $n \times Q$ (όπου n ο βαθμός απόδοσης του laser), προκύπτει η πραγματική τιμή της εισερχόμενης θερμότητας ($Q_{actual} = n \times P/V$). Η ένταση του laser διόδου, σχετίζεται γραμμικά με την τάση εισόδου του ρεύματος. Το ποσοστό μετατροπής του ρεύματος σε ισχύς laser, ξεπερνάει το 50% και σε ιδανικές συνθήκες είναι πιθανό να φτάσει το 80%. Συνεπώς, ο βαθμός απόδοσης του laser διόδου κυμαίνεται σε τιμές από 0,5 έως 0,8.

Για την προετοιμασία των αξόνων, πραγματοποιήθηκε τορνίρισμα και καθαρισμός των επιφανειών των δοκιμίων με προπανόνη (C_3H_6O), τα οποία στην συνέχεια προθερμάνθηκαν στους 60°C, με την βοήθεια φλόγας. Έπειτα από την απαραίτητη προετοιμασία και προθέρμανση ακολούθησε η διαδικασία της επένδυσης υλικού με την χρήση δέσμης laser. Για την μεταφορά των κόκκων σκόνης στην επιφάνεια των δοκιμίων, έγινε χρήση τεσσάρων ακροφύσιων, με ρυθμό εναπόθεσης 14 g/min ($\dot{m}= 14$ g/min) και η εναπόθεση της σκόνης πραγματοποιήθηκε περιμετρικά των κυλίνδρων. Η δέσμη του laser που χρησιμοποιήθηκε για την τήξη των κόκκων είχε διάμετρο αποτυπώματος 3.5mm και η κατανομή της ήταν γκαουσιανή (Gaussian).

Η γκαουσιανή κατανομή είναι κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης και υποδηλώνει πως η δέσμη του laser εμφανίζει αυξημένη ένταση στο κέντρο, η οποία ελαττώνεται σταδιακά περιφερειακά από αυτό. Η μορφή της κατανομής αυτής είναι καμπύλη και εμφανίζεται παρακάτω:



Εικόνα 27: «Η γκαουσιανή κατανομή της δέσμης laser»

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-distribution-Gaussian-of-laser-beam-profile_fig1_350147335

Τελικά, στους άξονες παρασκευάστηκαν περιφερειακά επιστρώσεις από σκόνη AISI 410L και από μίξη σκονών AISI 4140/AISI 410L με τον ίδιο τρόπο, με βήμα 1,5 mm και πλάτος του κάθε κορδονιού 34 mm. Η απόσταση μεταξύ της επένδυσης με χρήση σκόνης AISI 410L και της επένδυσης από μίξη σκονών AISI 4140/AISI 410L ήταν 12mm.

4.4. Παρουσίαση του εργαστηριακού εξοπλισμού

Τα δοκίμια, έπειτα από την επένδυση υλικού με την μέθοδο του laser cladding, επεξεργάστηκαν κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθούν για τις απαιτήσεις του πειραματικού μέρους της εργασίας. Συγκεκριμένα, ο πρώτος άξονας επιλέχθηκε να υποστεί θερμική κατεργασία με την μέθοδο της ανόπτησης, ενώ ο άλλος άξονας παρέμεινε μη θερμικά κατεργασμένος. Ο άξονας που υπέστη θερμική κατεργασία με την μέθοδο της ανόπτησης, πραγματοποίησε θερμικό κύκλο αποτατικής ανόπτησης, με σκοπό να αποφευχθεί η εμφάνιση του φαινομένου της ψυχρής ριγμάτωσης (cold cracking). Ειδικότερα, προθερμάνθηκε σε θερμοκρασία 50°C και στην συνέχεια θερμάνθηκε στους 650°C συνεχόμενα για μια ώρα. Έπειτα από την θέρμανσή του άξονα, ο θερμικός κύκλος ολοκληρώθηκε με την ελεγχόμενη ψύξη του έως την θερμοκρασία των 300°C και τέλος με την ψύξη του με αέρα, έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 28: «Ο θερμικά κατεργασμένος άξονας»

Η διαδικασία της προετοιμασίας των δοκιμίων και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία, παρουσιάζονται παρακάτω με την σειρά.

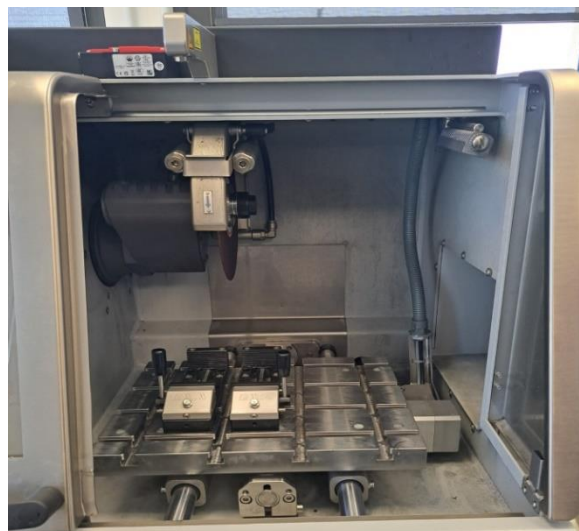
1^ο βήμα: Αρχικά, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία, με κοπή των αξόνων με χρήση της διάταξης Qcut 350 A. Το μηχάνημα αυτό, χρησιμοποιείται για την κοπή δοκιμίων, τα οποία έχουν μέγιστη διάμετρο τα 135 mm. Περιλαμβάνει έναν πίνακα ελέγχου και ένα θάλαμο κοπής, ο οποίος περιέχει το εξάρτημα κοπής και μια επιφάνεια από ανοξείδωτο χάλυβα, στην οποία τοποθετούνται τα δοκίμια που πρόκειται να επεξεργαστούν. Ο έλεγχος και ο προγραμματισμός των εντολών της κίνησης του κοπτικού εξαρτήματος, πραγματοποιείται ηλεκτρονικά και σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (άξονες x,y,z)



(α)



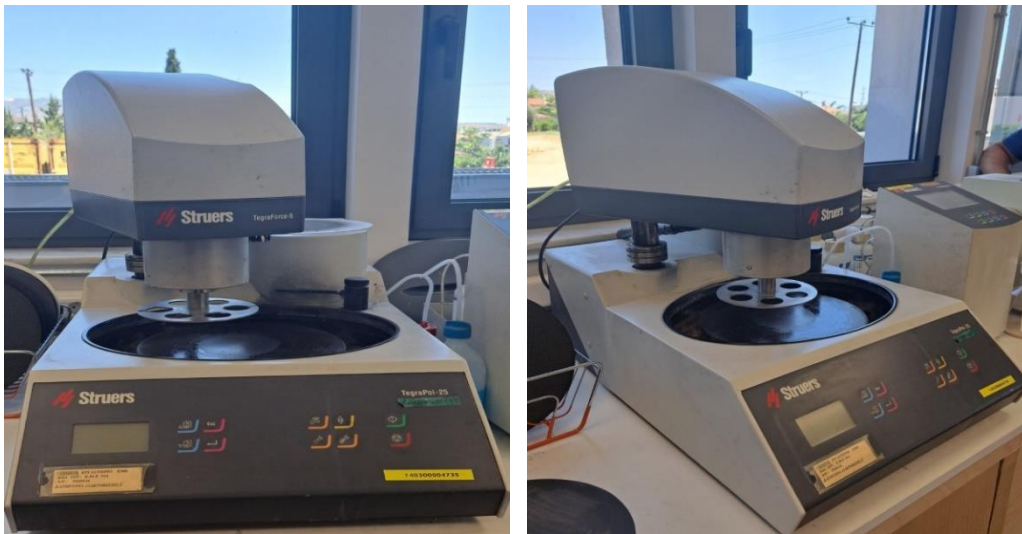
(β)



(γ)

Εικόνα 29: (α) «Η διάταξη Qcut 350A», (β) «Ο πίνακας ελέγχου της διάταξης Qcut 350A»,
(γ) «Το εργαλείο κοπής της διάταξης Qcut 350A»

2^ο βήμα: Έπειτα από την κοπή των αξόνων, τα δοκίμια που προέκυψαν τοποθετήθηκαν στην διάταξη Stuers-tegraforce 5, όπου υπέστησαν στίλβωση και λείανση.



(α)

(β)

Εικόνα 30: (α),(β) «Η διάταξη Stuers-tegraforce 5»

Τα μη θερμικά κατεργασμένα δοκίμια που προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία στις εργαστηριακές διατάξεις, παρουσιάζονται παρακάτω:



(α)

(β)



(γ)

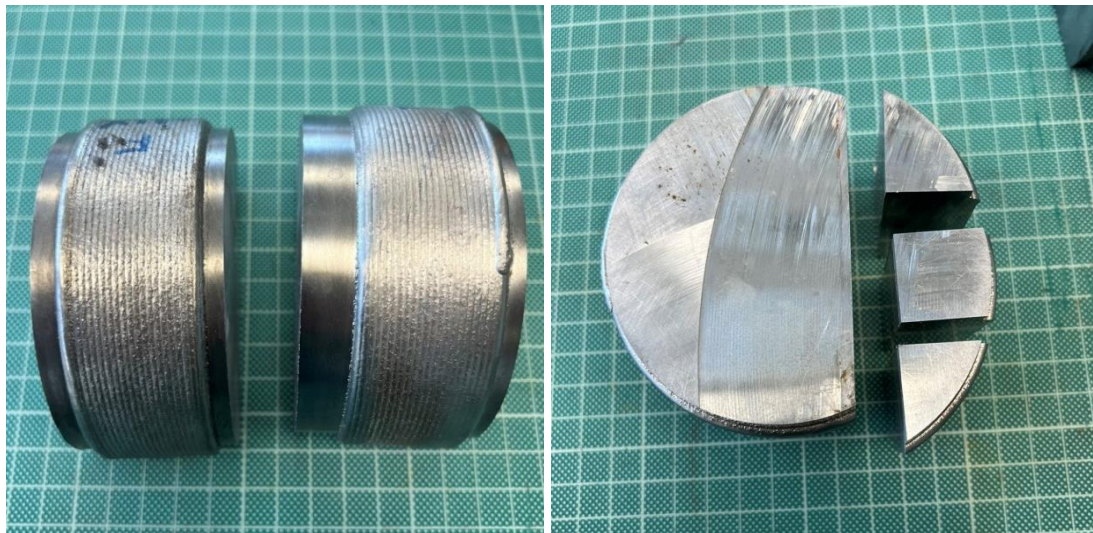
Εικόνα 31: (α), (β), (γ) «Τμήματα του άξονα και επεξεργασμένα δοκίμια»



(α)

(β)

Εικόνα 32: (α) «Επεξεργασμένο δοκίμιο με επένδυση σκόνης AISI 410L»,
(β) «Επεξεργασμένο δοκίμιο με επένδυση μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140»



(α)

(β)

Εικόνα 33 : (α) «Ο θερμικά κατεργασμένος άξονας κομμένος στην μέση», (β) «Τα θερμικά επεξεργασμένα δοκίμια»



Εικόνα 34: « Τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια και τα μη θερμικά κατεργασμένα δοκίμια έπειτα από την επεξεργασία τους στο εργαστήριο»

3^ο βήμα: Μετά την διαδικασία της στίλβωσης και της λείανσης των δύο δοκιμίων, ακολούθησε η χημική προσβολή τους με την χρήση αντιδραστηρίου NITAL 5% (5% νιτρικό οξύ HNO_3 σε αιθυλική αλκοόλη $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$). Η χρήση του αντιδραστηρίου NITAL 5%, βοηθάει στον εντοπισμό πιθανών ρωγμών στα δοκίμια και αποκαλύπτει τις διαφορετικές φάσεις της μικροδομής τους, ενισχύοντας έτσι την ορατότητα των χαρακτηριστικών που πρόκειται να μελετηθούν. Συνεπώς, η χημική προσβολή με αντιδραστήριο NITAL 5%, διευκολύνει τον μεταλλογραφικό έλεγχο των δοκιμίων.

Για την αποτελεσματικότερη μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια χημική προσβολή και με το χημικό αντιδραστήριο KALLINGS, το οποίο περιέχει αιθανόλη, υπερκαθαρό νερό, υδροχλωρικό οξύ και διένυδρο διχλωριούχο χαλκό.

4^ο βήμα: Αφού τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα, πραγματοποιήθηκε μακροσκοπική μελέτη με χρήση της διάταξης Olympus SZX10, σε συνδυασμό με ένα λογισμικό ανάλυσης εικόνας, μέσω ψηφιακής κάμερας που περιέχεται στο μικροσκόπιο. Η εικόνα από το στερεοσκοπικό μικροσκόπιο SZX10 μεταφέρεται αυτόματα σε υπολογιστή για την επεξεργασία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 35: «Η διάταξη Olympus SZX10»

5^ο βήμα: Για την αναλυτικότερη μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων και την μεταλλογραφική έρευνα, έγινε χρήση οπτικής μικροσκοπίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη ZEISS Axiotech, η οποία περιέχει ψηφιακές κάμερες για την λήψη και αποτύπωση των αποτελεσμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το μικροσκόπιο. Το μικροσκόπιο αυτό, περιέχει διαφορετικούς φακούς μεγέθυνσης οι οποίοι προσαρμόζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης.



Εικόνα 36: «Η διάταξη ZEISS Axiotech»

6^ο βήμα: Πραγματοποιήθηκε μελέτη της μικροσκληρότητας των δοκιμίων μέσω του εξοπλισμού Qness 60 A+^{EVO}. Η συγκεκριμένη διάταξη, προσφέρει έλεγχο σκληρότητας Brinell, Knoop, Vickers με υψηλή ακρίβεια και παρέχει ένα ευρύ φάσμα δυνάμεων δοκιμής, το οποίο κυμαίνεται από 0,25 g έως 62,5 g. Περιέχει κάμερα η οποία δίνει την δυνατότητα άμεσης λήψης των αποτελεσμάτων και στην συνέχεια την αποστολή τους σε υπολογιστή για την επεξεργασία των μετρήσεων και την ανάλυσή τους, μέσω του λογισμικού Qrix control. Τέλος, περιλαμβάνει οκτώ διαφορετικές επιλογές σε δοκιμαστικά διαμάντια και φακούς.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 37: (α), (β) «Η διάταξη Qness 60 A+^{EVO}» (γ) «Οι φακοί και τα διαμάντια δοκιμής της διάταξης Qness 60 A+^{EVO}»

7^ο βήμα: Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη της μικροδομής και στοιχειομετρική ανάλυση των δοκιμίων, με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και φασματογράφου περίθλασης ηλεκτρονίων, μέσω της διάταξης Thermo scientific phenom xl. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί την τεχνολογία SEM για την ανάλυση της μικροδομής και είναι εξοπλισμένη με φασματοσκοπία διασποράς ενέργειας EDS, για στοιχειομετρική ανάλυση. Ο εξοπλισμός προσφέρει μεγέθυνση έως και 100.000x και τα αποτελέσματα εμφανίζονται αυτομάτως σε οθόνη υπολογιστή. Χρησιμοποιεί έναν μηχανισμό εκπομπής ηλεκτρονίων, τα οποία σαρώνουν την επιφάνεια του δοκιμίου και συλλέγουν πληροφορίες, με αποτέλεσμα να αποτυπώνεται με υψηλή ακρίβεια η εικόνα της μικροδομής.



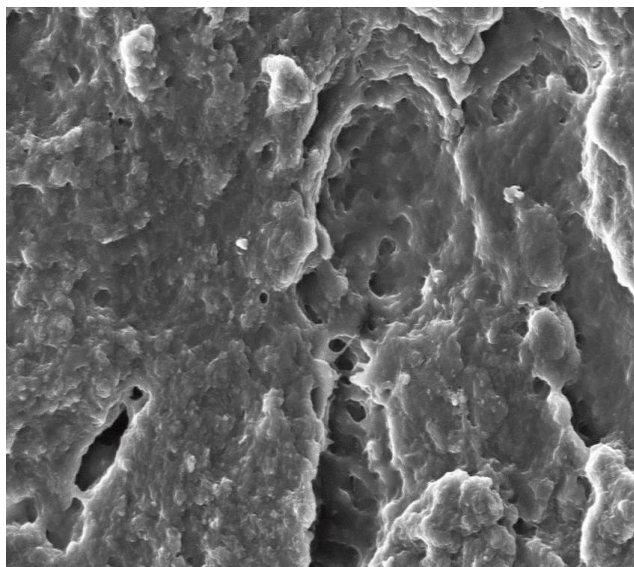
(α)

(β)

Εικόνα 38: (α), (β) «Η διάταξη Thermo scientific phenom xl»

4.4.1. Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) και η φασματοσκοπία ακτίνων X με διασπορά ενέργειας (EDS)

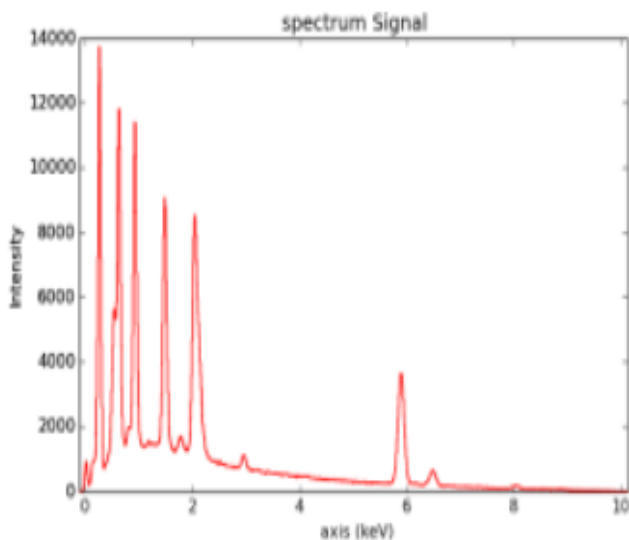
Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM), αποτελεί μια μέθοδο απεικόνισης της μικροδομής ενός δείγματος, βασισμένη στην αλληλεπίδραση διεγερμένων ηλεκτρονίων με την επιφάνεια του δοκιμίου που ερευνάται. Συγκεκριμένα, μια κάθοδος εκπέμπει ηλεκτρόνια, τα οποία κατευθύνονται με υψηλή τάση στην άνοδο, όπου και δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Έπειτα, τα ηλεκτρόνια σε μορφή δέσμης, κατευθύνονται προς την επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου στην οποία προσπίπτουν και αλληλεπιδρούν. Αφού σαρώσουν την επιφάνεια του δοκιμίου, ένας ανιχνευτής συλλέγει τις πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα και την θέση που προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια αλλά και την απορρόφηση μεταξύ των υλικών και αποτυπώνει την μορφή της μικροδομής λεπτομερώς. Είναι σημαντικό η διαδικασία αυτή να πραγματοποιείται υπό κενό, ώστε να αποφευχθεί η απορρόφηση των ηλεκτρονίων από την ατμόσφαιρα, αλλά και το εξεταζόμενο δοκίμιο να είναι αγωγός, ώστε να δημιουργείται ηλεκτρικό κύκλωμα. Η μέθοδος αυτή, προσφέρει υψηλότερη εστίαση και ανάλυση συγκριτικά με τα οπτικά μικροσκόπια.



Εικόνα 39: «Η μικροδομή επιφάνειας από καουτσούκ με χρήση SEM»

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/shows-the-results-of-Scanning-Electron-Microscope-SEM-of-natural-rubber-latex-surface_fig1_341880831

Το άτομο που αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια που συνεισφέρουν στην απεικόνιση της μικροδομής, ιονίζεται, με αποτέλεσμα να πρέπει να επιστρέψει στη θεμελιώδη κατάσταση. Σε αυτήν την περίπτωση, εκπέμπονται κβαντοποιημένα φωτόνια, όπως ορίζει ο νόμος διατήρησης της ενέργειας. Η ενέργεια αυτών των φωτονίων, συλλέγεται και μετριέται με την βοήθεια ενός ανιχνευτή (EDS), ο οποίος έχει κρυσταλλική μορφή ή βρίσκεται σε μορφή τσιπ. Ανάλογα με την αλληλεπίδραση της ενέργειας των φωτονίων με τον ανιχνευτή, σχηματίζεται ένα φάσμα ενεργειών, μέσω του οποίου προσδιορίζονται οι μέγιστες ενέργειες και οι μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων και στην συνέχεια συσχετίζονται με τα στοιχεία του υλικού του δείγματος. Σε συνδυασμό με την τεχνολογία SEM, μπορούν να αναλυθούν με ακρίβεια οι περιοχές υψηλών στοιχειακών συγκεντρώσεων στην μικροδομή του εξεταζόμενου δοκιμίου.



Εικόνα 40: «Παράδειγμα ενεργειακού φάσματος EDS»

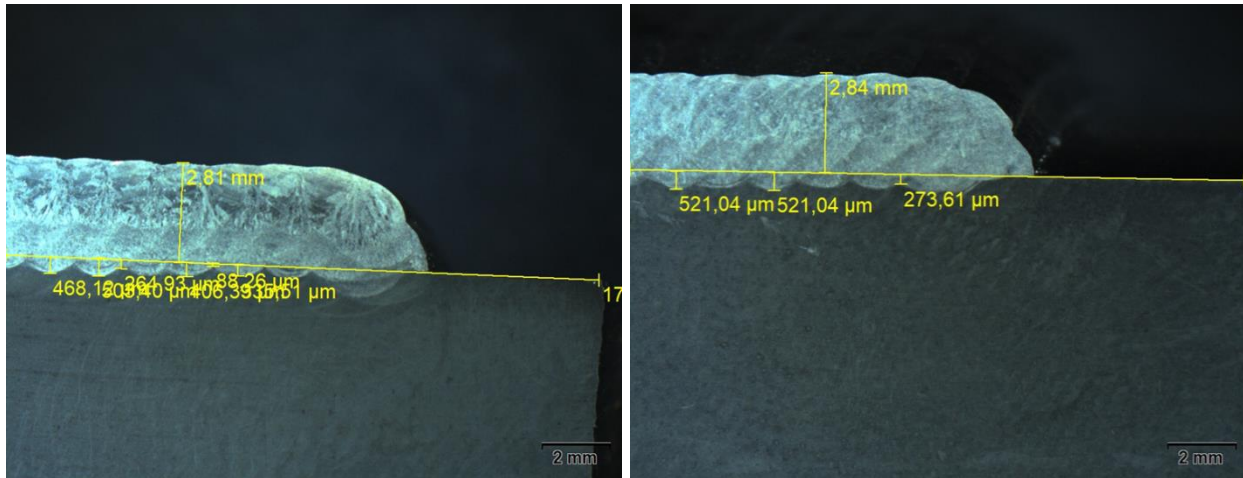
Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/shows-the-results-of-Scanning-Electron-Microscope-SEM-of-natural-rubber-latex-surface_fig1_341880831

Στην παραπάνω εικόνα, ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τις τιμές της ενέργειας των φωτονίων και ο οριζόντιος άξονας τις τιμές της τάσης σε keV.

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

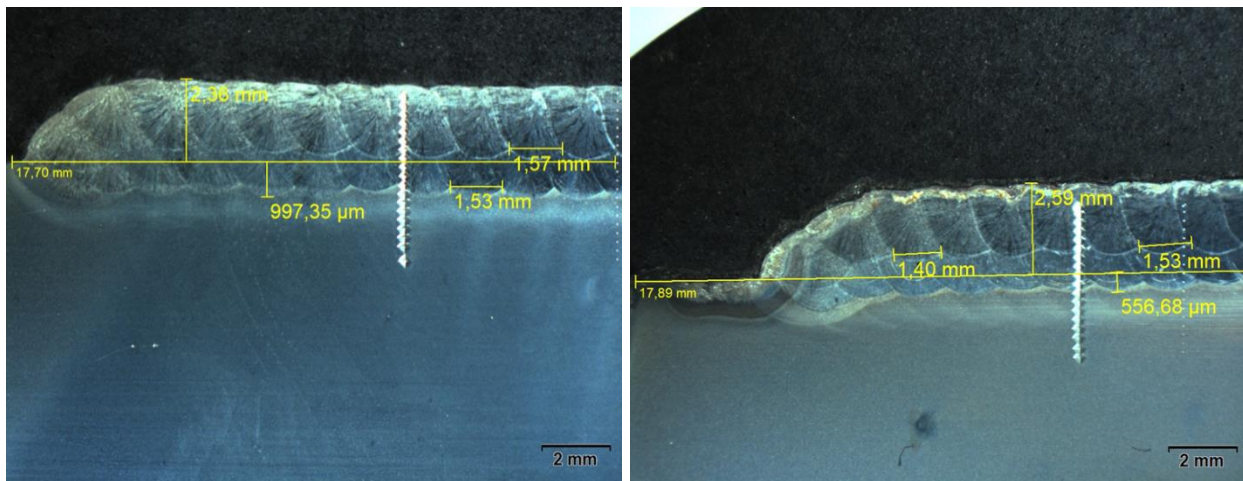
ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής μελέτης, προέκυψαν με την χρήση της διάταξης Olympus SZX10 και παρουσιάζονται παρακάτω:



(α)

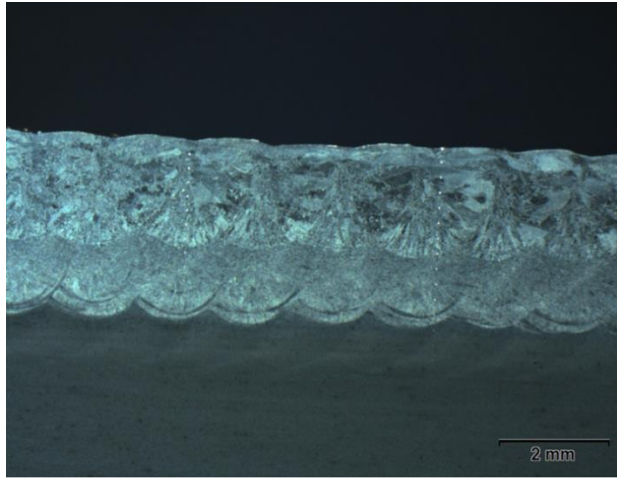
(β)



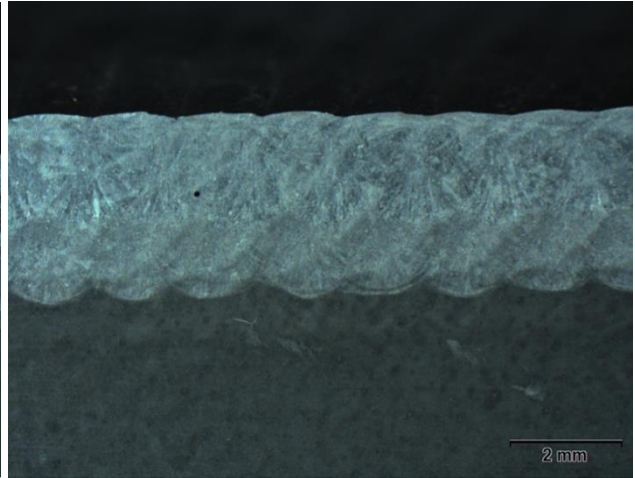
(γ)

(δ)

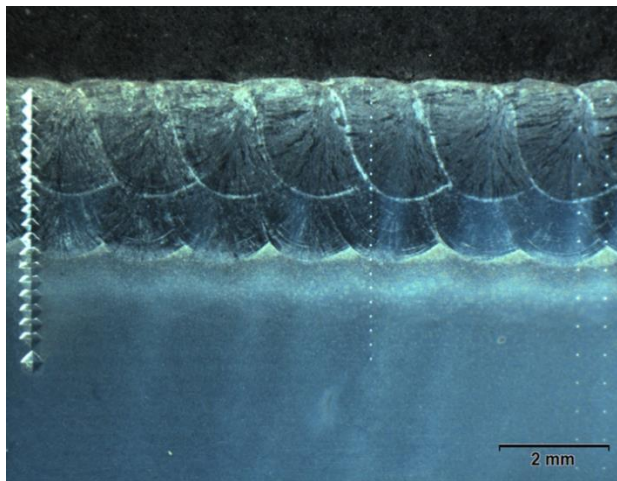
Εικόνα 41: (α) «Η επίστρωση σκόνης AISI 410L», (β) «Η επίστρωση σκόνης AISI 410L F», (γ) «Η επίστρωση της μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)», (δ) «Η επίστρωση της μίξης σκονών AISI 410L F και AISI 4140 F (MIX F)»



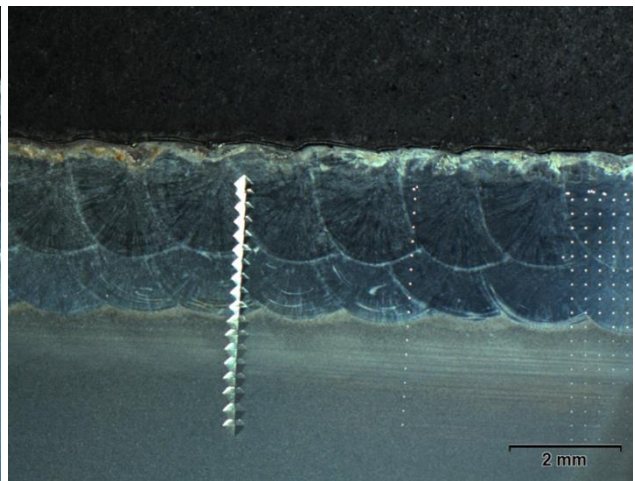
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 42: (α) «Η επίστρωση σκόνης AISI 410L», (β) «Η επίστρωση σκόνης AISI 410L F»,
(γ) «Η επίστρωση της μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)», (δ) «Η επίστρωση της μίξης
σκονών AISI 410L F και AISI 4140 F (MIX F)»

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Μέσω την στερεοσκοπικής ανάλυσης, καταγράφηκαν στοιχεία σχετικά με το πάχος επικάλυψης, το πάχος διείσδυσης και το πλάτος στρώσης, για τα υπό μελέτη δοκίμια. Συγκεκριμένα, το πάχος επικάλυψης υπολογίστηκε στο δοκίμιο 410 2,81 mm, στο δοκίμιο 410-F 2,84 mm, στο δοκίμιο MIX 2,36 mm και στο δοκίμιο MIX-F 2,59 mm (βλ. Εικόνα 41). Το πάχος διείσδυσης, υπολογίστηκε στο δοκίμιο 410 ως 0,468 mm, στο δοκίμιο 410-F ως 0,521 mm, στο δοκίμιο MIX 0,997 mm και στο δοκίμιο MIX-F 0,556 mm. Τέλος, το πλάτος της κάθε στρώσης, ήταν 2,5 mm στο δοκίμιο 410 και στο δοκίμιο 410-F και 2,8 mm στα δοκίμια MIX και MIX-F (βλ. Εικόνα 42). Η θερμική ισχύς της κατανομής του laser, καθώς πρόκειται για γκαουσιανή, φαίνεται πως δεν ήταν επαρκής, ώστε να προκαλέσει τήξη στα άκρα της. Έτσι, παρατηρείται απόκλιση περίπου 15% σε κάθε πλευρά, συγκριτικά με το πλάτος στρώσης και την διάμετρο του spot (2,5 με 3,5 και 2.8 με 3,5).

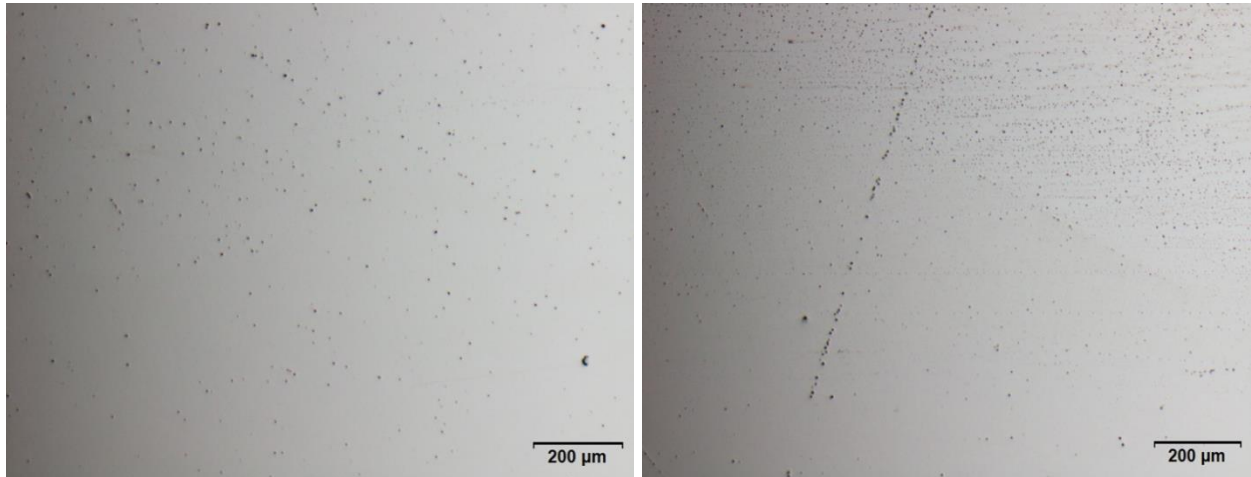
Πίνακας 7: «Μετρήσεις στις παρασκευασμένες επιστρώσεις»

	Δοκίμιο 410	Δοκίμιο 410-F	Δοκίμιο MIX	Δοκίμιο MIX-F
Πάχος επικάλυψης (mm)	2,81	2,84	2,36	2,59
Πάχος διείσδυσης (mm)	0,468	0,521	0,997	0,556
Πλάτος στρώσης (mm)	2,5	2,5	2,8	2,8
Διάμετρος spot (mm)	3,5			

ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

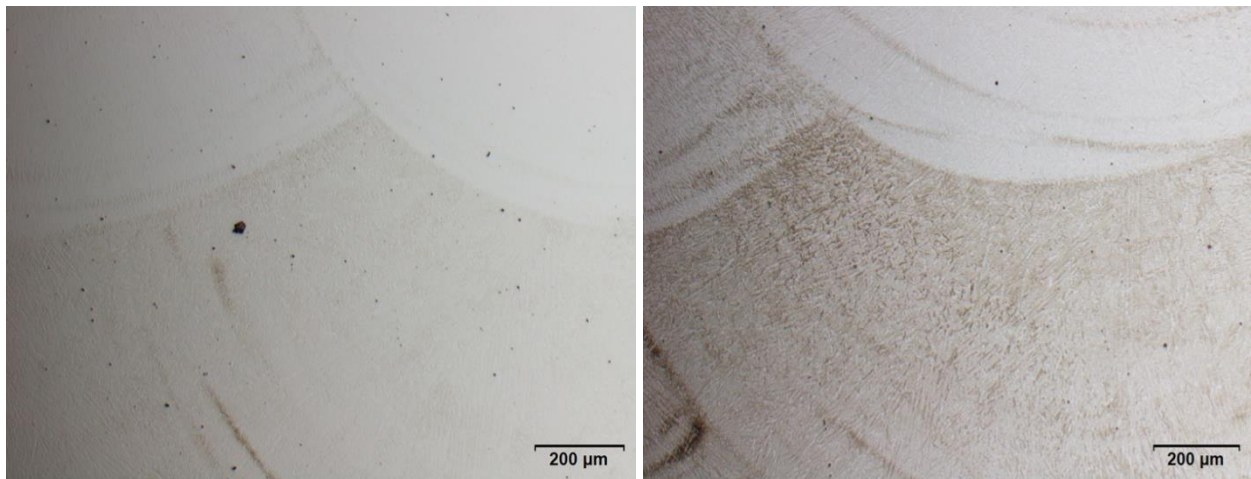
Τα αποτελέσματα της μελέτης των μικροδομών, προέκυψαν με την χρήση της διάταξης ZEISS AxioTech και παρουσιάζονται παρακάτω:

Για την μεγέθυνση x5, με χρήση του χημικού αντιδραστηρίου Nital 5%:



(α)

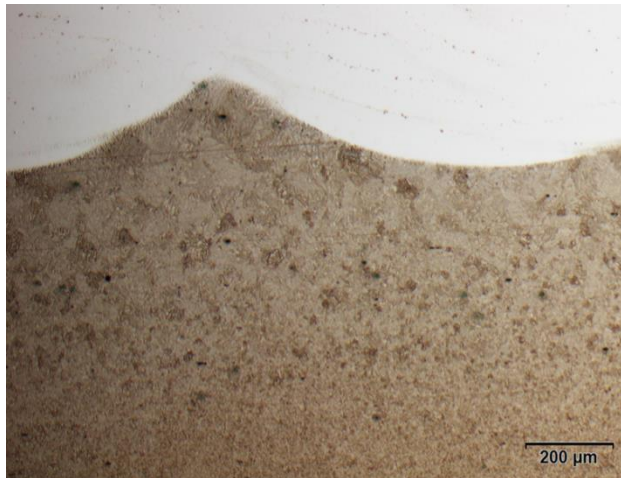
(β)



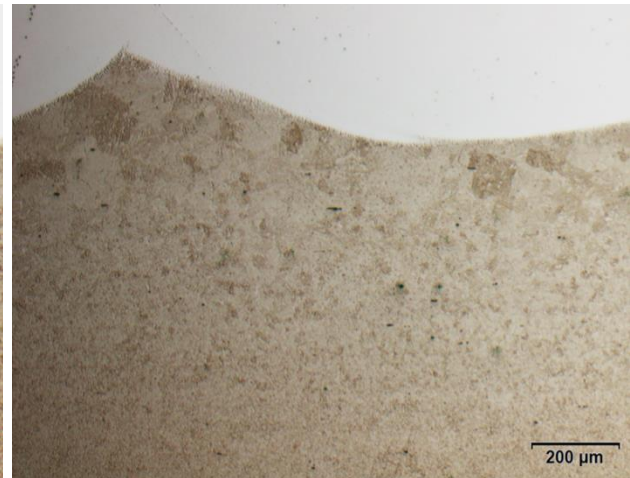
(γ)

(δ)

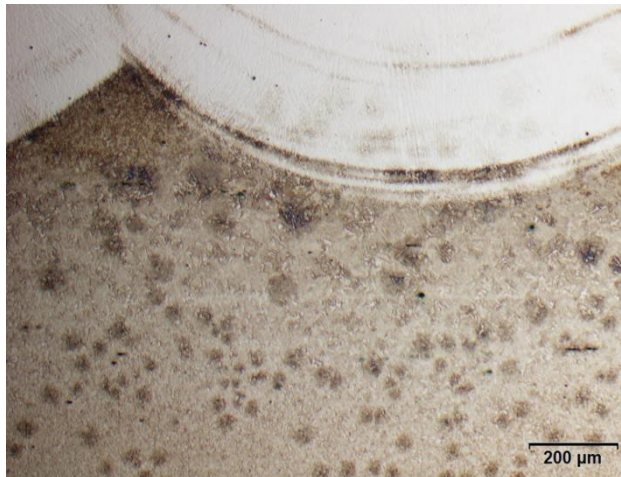
Εικόνα 43: (α) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης σκόνης AISI 410L», (β) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης σκόνης AISI 410L F», (γ) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)» (δ) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L F και AISI 4140 F (MIX F)»



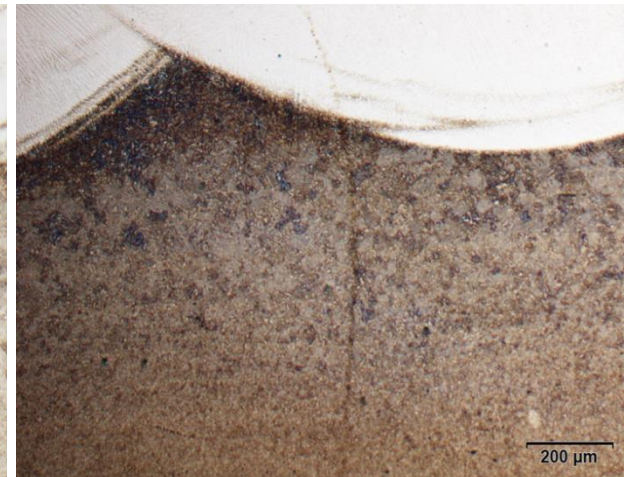
(α)



(β)

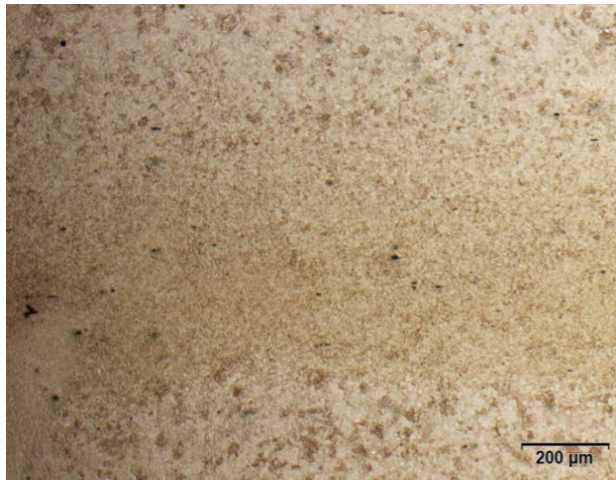


(γ)

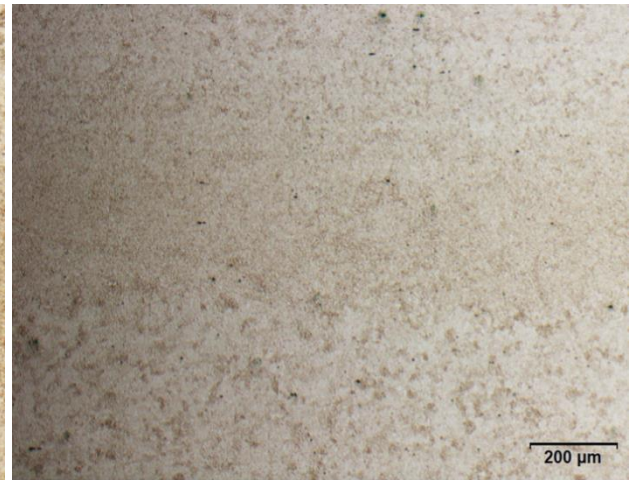


(δ)

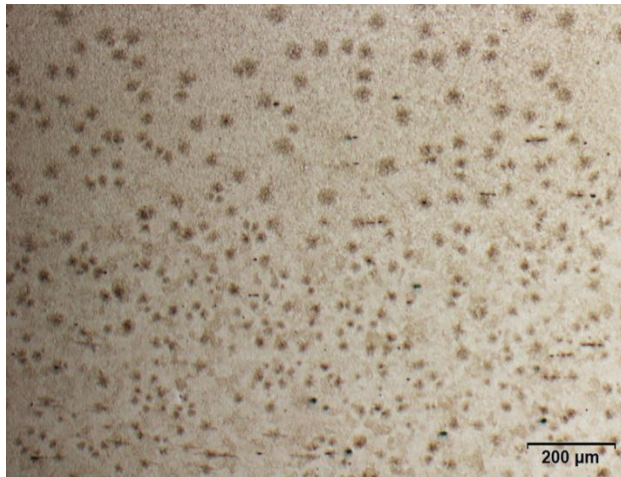
Εικόνα 44: (α) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L και του υλικού βάσης 42CrMo4», (β) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L F και του υλικού βάσης 42CrMo4», (γ) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX) και του υλικού βάσης 42CrMo4, (δ) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L F και AISI 4140 F (MIX F) και του υλικού βάσης 42CrMo4»



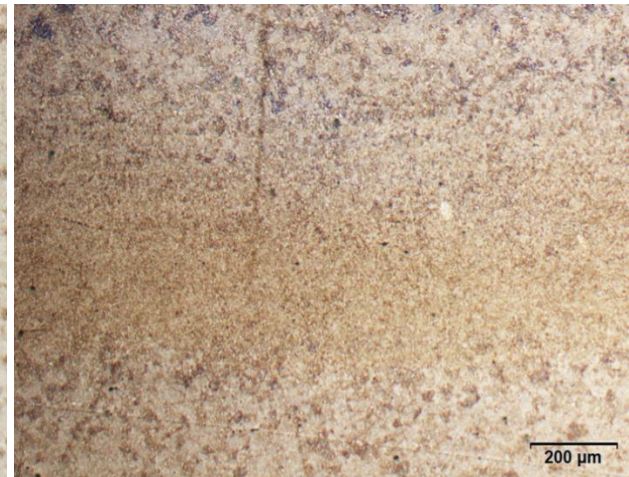
(α)



(β)



(γ)

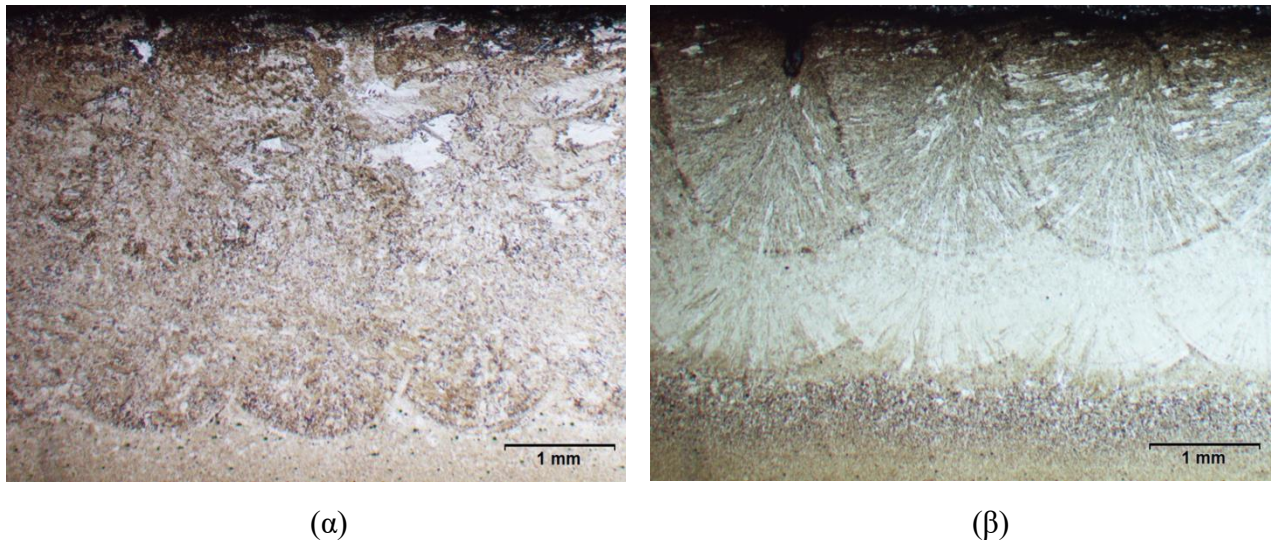


(δ)

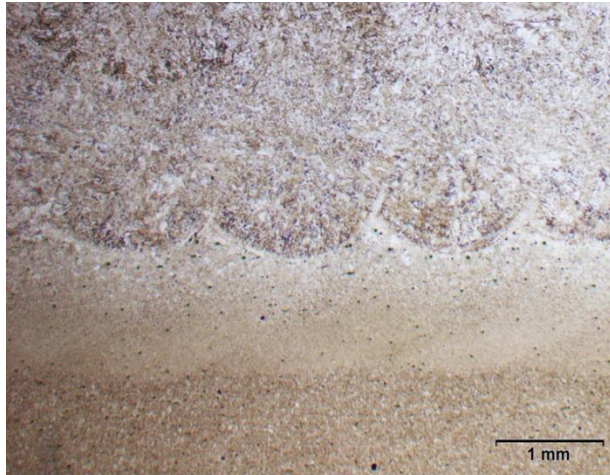
Εικόνα 45: (α) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (AISI 410L)», (β) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (AISI 410L F)», (γ) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (MIX)», (δ) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (MIX-F)»

Καθώς με το NITAL 5% πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή μόνο του υποστρώματος και όχι της επίστρωσης, εφαρμόστηκε στα δοκίμια το χημικό αντιδραστήριο KALLINGS, που πρόσφερε καλύτερα αποτελέσματα μικροδομής και έτσι η μελέτη συνεχίστηκε μόνο με αυτό. Αφού η θερμική κατεργασία που υπέστησαν τα δύο από τα τέσσερα δοκίμια δεν επηρέασε καθόλου την μικροδομή, ο έλεγχος της μικροδομής πραγματοποιήθηκε μόνο στα δοκίμια 410L και MIX.

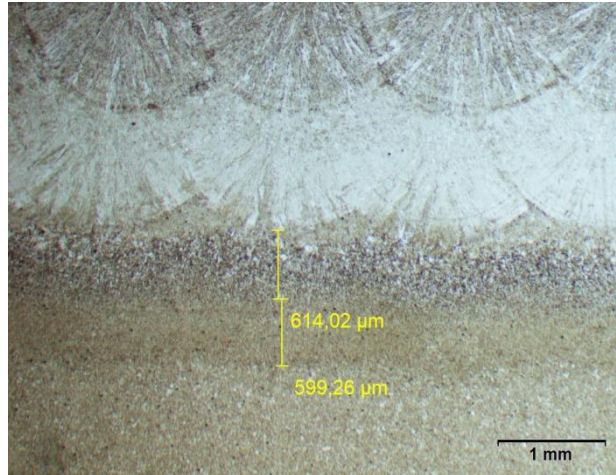
Για την μεγέθυνση $\times 1,25$, με χρήση του χημικού αντιδραστηρίου Kallings:



Εικόνα 46: (α) «Η επίστρωση σκόνης AISI 410L», (β) «Η επίστρωση μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)»



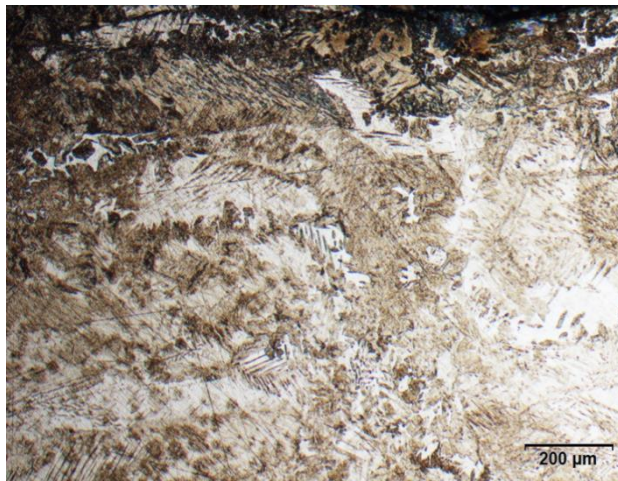
(α)



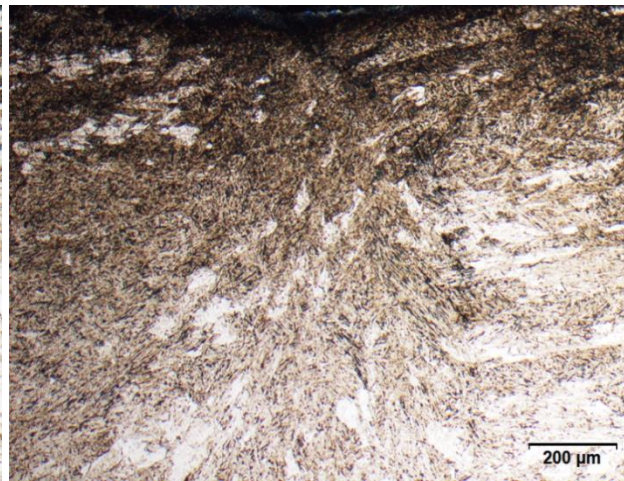
(β)

Εικόνα 47: (α) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L και του υλικού βάσης 42CrMo4», (β) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX) και του υλικού βάσης 42CrMo4»

Για την μεγέθυνση x5, με χρήση του χημικού αντιδραστηρίου Kallings:

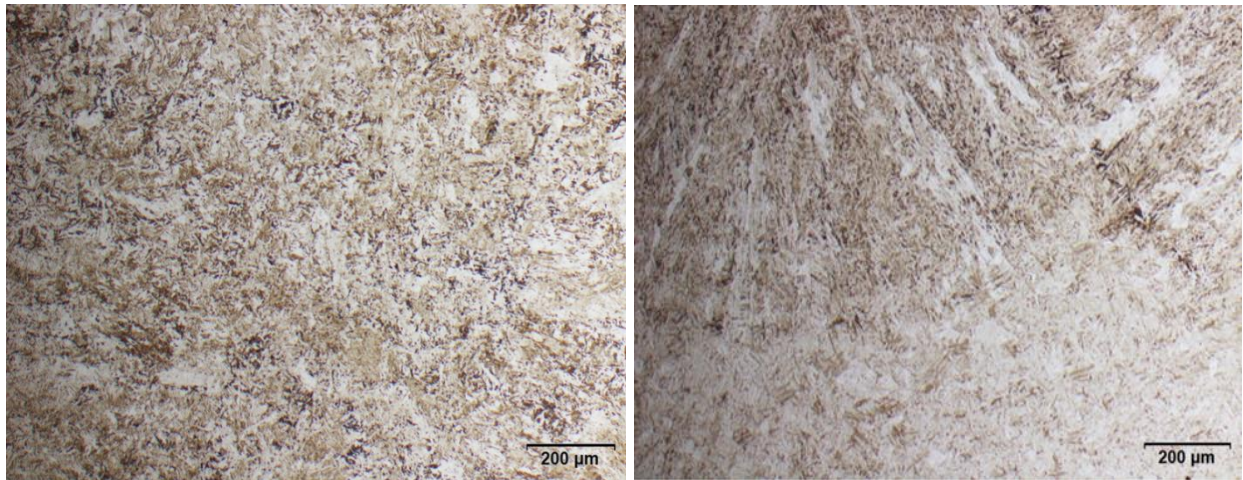


(α)



(β)

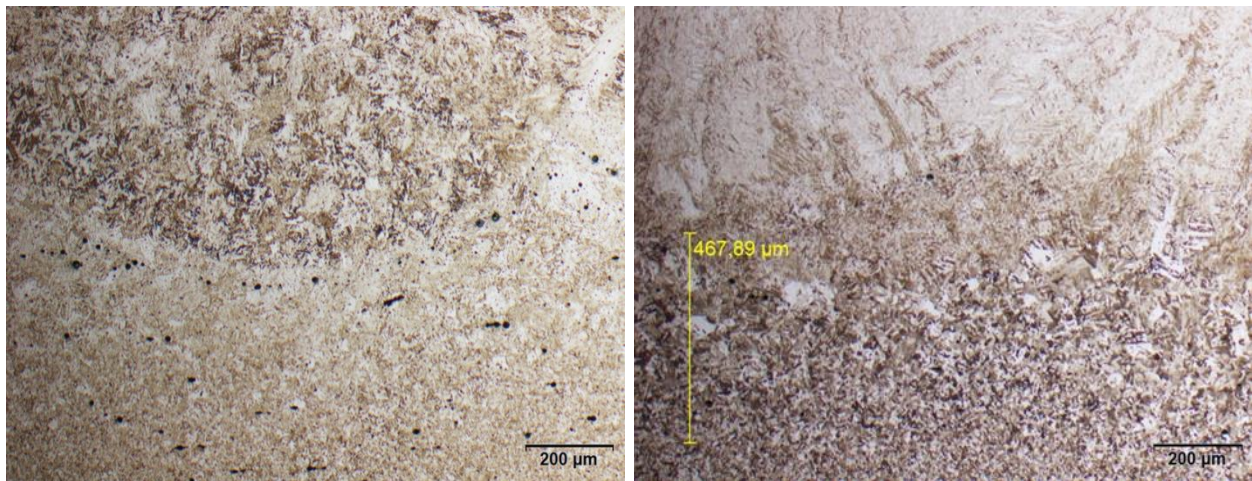
Εικόνα 48: (α) «Η επιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L», (β) «Η επιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)»



(α)

(β)

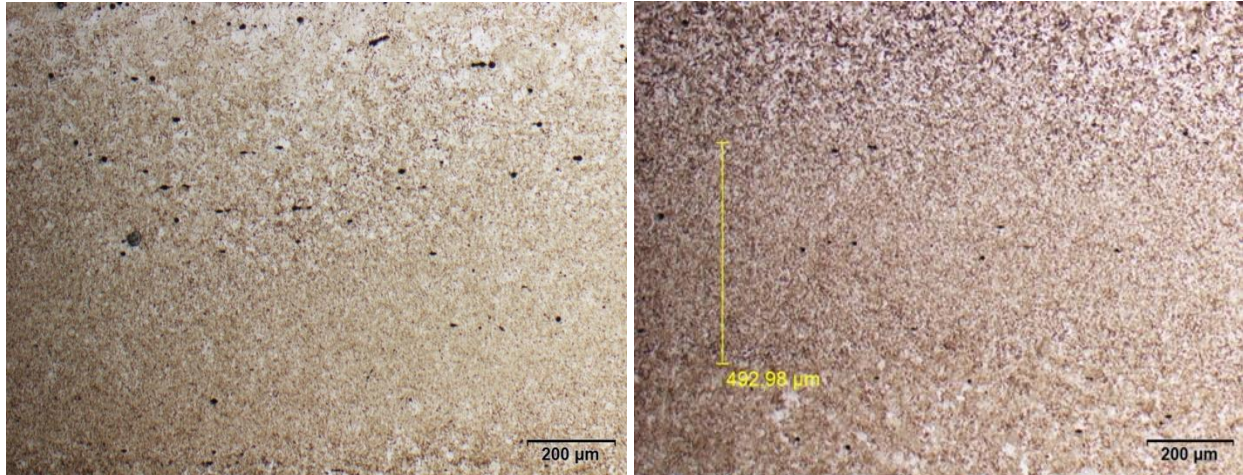
Εικόνα 49: (α) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης σκόνης AISI 410L», (β) «Η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο κορδονιών της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)»



(α)

(β)

Εικόνα 50: (α) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L και του υλικού βάσης 42CrMo4», (β) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX) και του υλικού βάσης 42CrMo4»

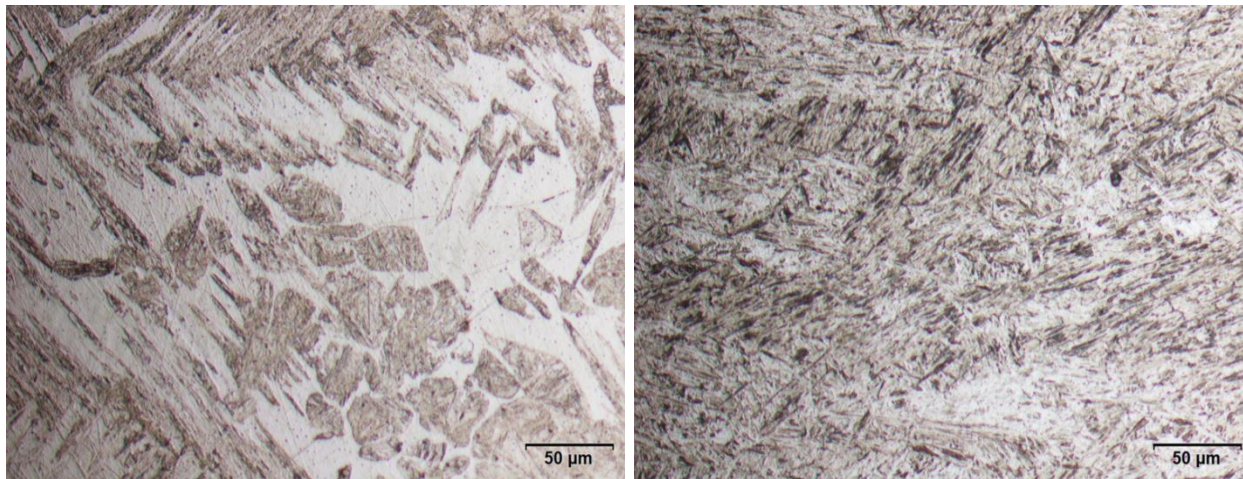


(α)

(β)

Εικόνα 51: (α) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (AISI 410L)»,
(β) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (MIX)»

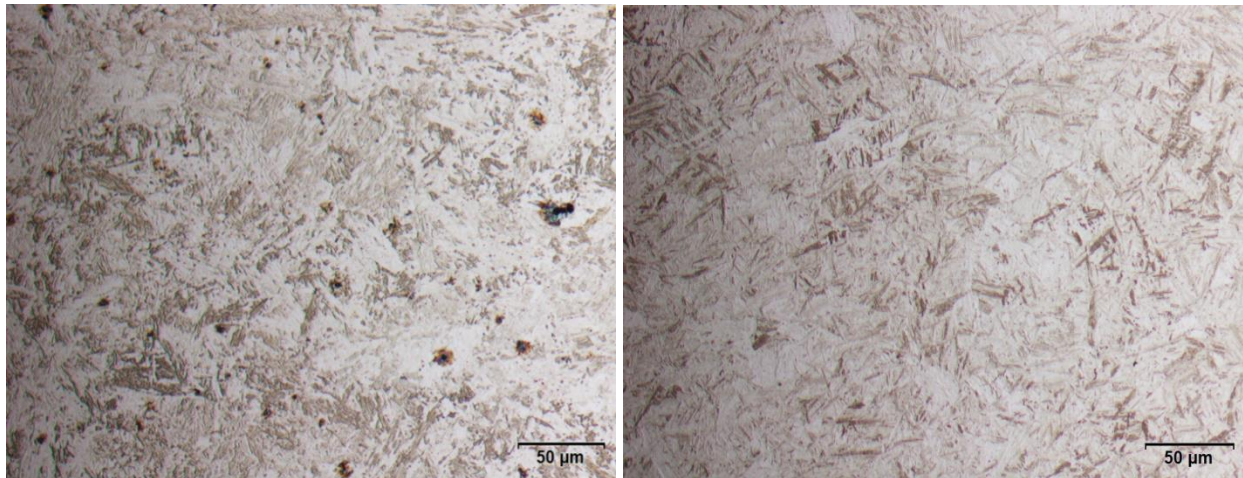
Για την μεγέθυνση x20, με χρήση του χημικού αντιδραστηρίου Kallings:



(α)

(β)

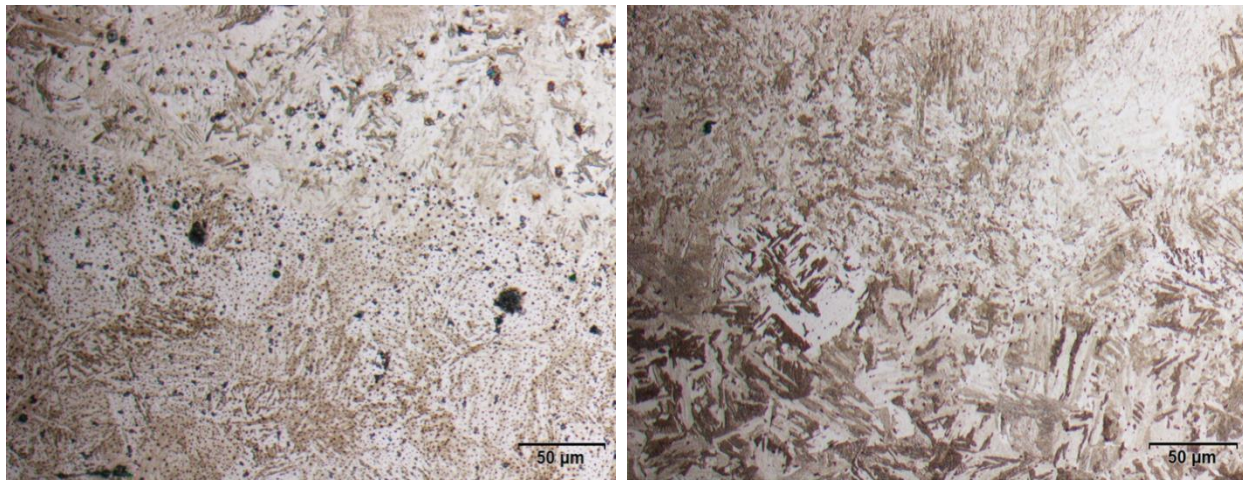
Εικόνα 52: (α) «Η επιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L», (β) «Η επιφάνεια της επίστρωσης
μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)»



(α)

(β)

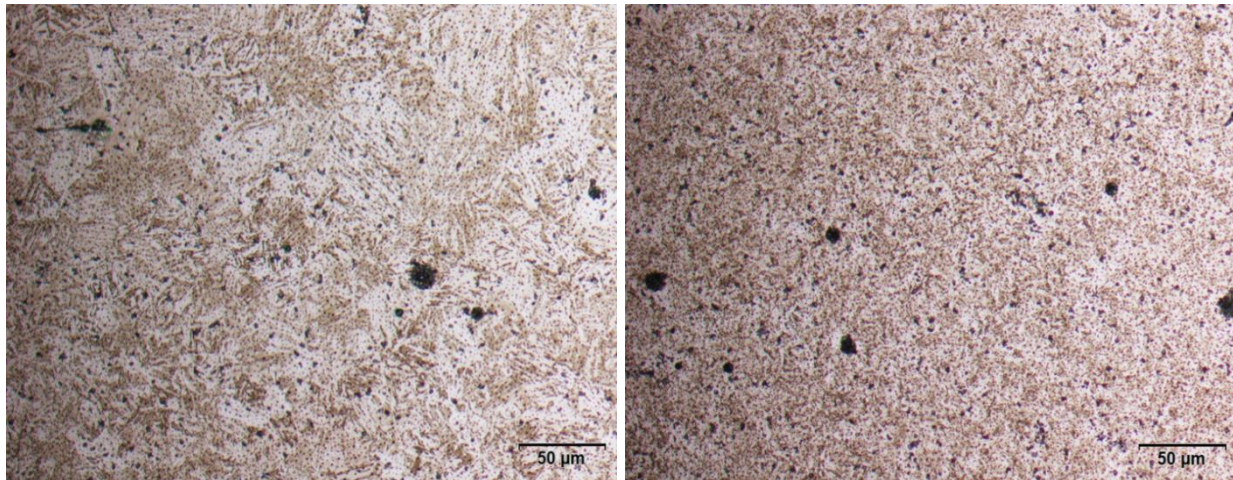
Εικόνα 53: (α) «Το εσωτερικό της επίστρωσης σκόνης AISI 410L», (β) «Το εσωτερικό της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX)»



(α)

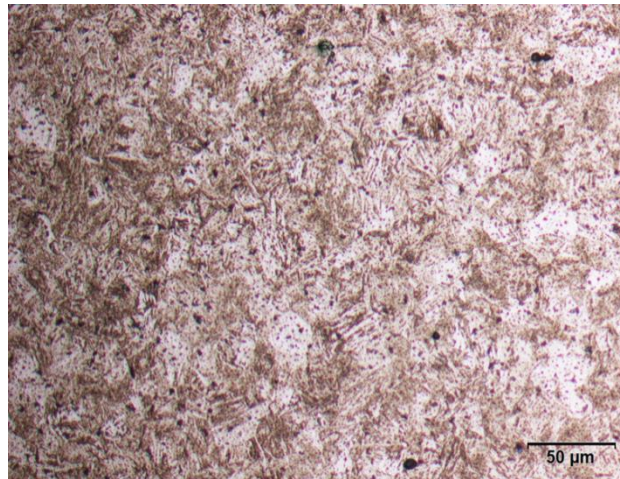
(β)

Εικόνα 54: (α) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης σκόνης AISI 410L και του υλικού βάσης 42CrMo4», (β) «Η διεπιφάνεια της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 (MIX) και του υλικού βάσης 42CrMo4»



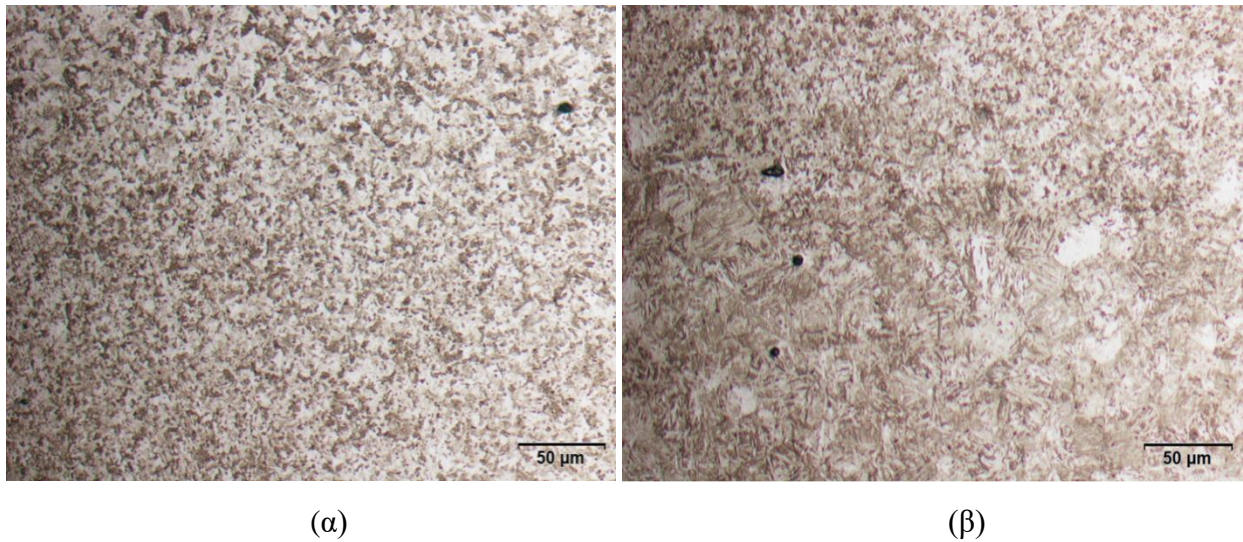
(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 55: (α),(β),(γ) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (AISI 410L)»



Εικόνα 56: (α),(β) «Το υλικό βάσης 42CrMo4 στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (MIX)»

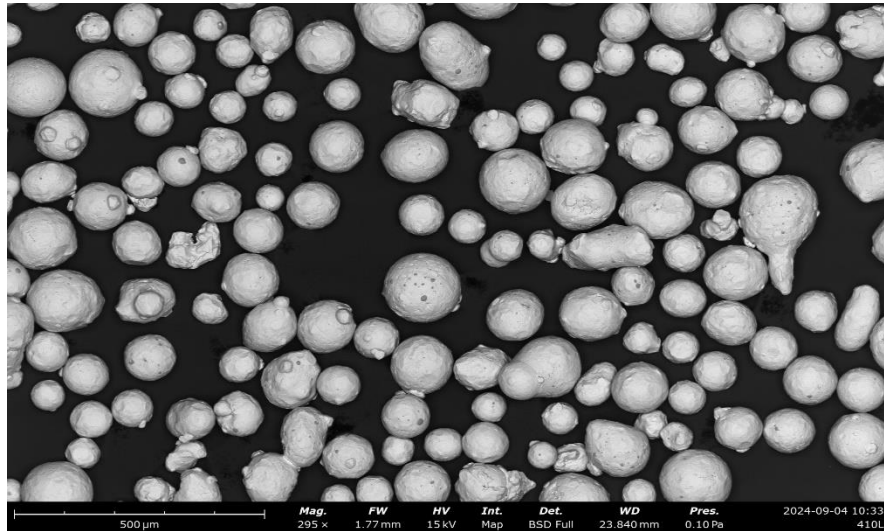
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

Η μικροδομή τόσο στο υλικό βάσης, όσο και στην κάθε επίστρωση των δοκιμίων, παραμένει μαρτενσιτική με κιονοειδείς δενδρίτιες, απουσία Δ-φερρίτη. Συνολικά, δεν εμφανίστηκαν ατέλειες στην μικροδομή, όπως πορώδες, ενδείξεις ατελούς τήξης, όπου δεν θα υπήρχε ομαλή σύνδεση μεταξύ των δύο κορδονιών και ενδείξεις ατελούς διείδυσης, όπου το υλικό πλήρωσης δεν θα είχε διεισδύσει άρτια στο βασικό υλικό. Η σκόνη AISI 4140 σε κατάσταση εξομάλυνσης, παρουσιάζει φερριτο-περλιτική δομή, ωστόσο, λόγω της ταχείας στερεοποίησης από την θερμική κατεργασία την οποία υπέστη, είχε ως αποτέλεσμα να εμφανίσει μαρτενσιτική δομή, κατά την ανάμιξή της με την σκόνη AISI 410L. Επιπλέον, η διαδικασία αποτατικής ανόπτησης δεν επηρέασε την μικροδομή. Αν και στο υλικό βάσης παρατηρείται αυτή η μετάβαση από χονδρόκοκκη δομή σε λεπτόκοκκη και ξανά σε χονδρόκοκκη, δεν σημειώθηκε μεταβολή στην φάση της μικροδομής. Στο υπόστρωμα του βασικού υλικού και συγκεκριμένα στην ζώνη που επηρεάζεται από την θερμότητα (HAZ), παρατηρήθηκε μέσω του οπτικού μικροσκοπίου σε όλα τα δοκίμια, η ύπαρξη μιας λεπτόκοκκης ζώνης, η οποία μετατρέπεται σε χονδρόκοκκη, στην ζώνη σύνδεσης του βασικού υλικού και της κάθε επίστρωσης. Η εμφάνιση της λεπτόκοκκης ζώνης στο υπόστρωμα, είναι αποτέλεσμα του ρυθμού ψύξης κατά την διάρκεια της δημιουργίας των επιστρωμάτων. Η χονδρόκοκκη δομή που παρουσιάζεται στην ζώνη σύνδεσης, είναι παρόμοια με την αρχική δομή του βασικού υλικού, πριν την κατεργασία και είναι αποτέλεσμα

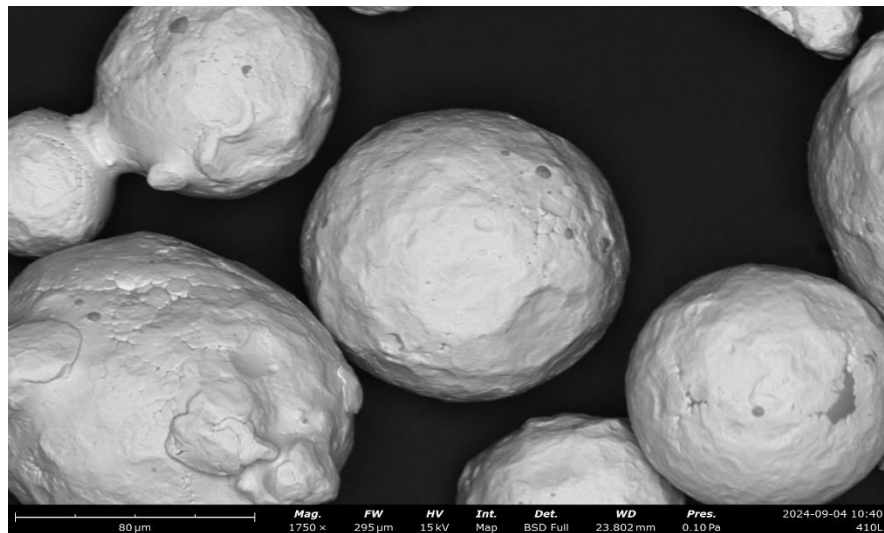
του πιο αργού ρυθμού ψύξης σε σχέση με την προηγούμενη ζώνη. Για την σκόνη AISI 410L, η λεπτόκοκκη ζώνη, στην ζώνη HAZ, είχε πλάτος 493,78 μm , ενώ για την μίξη σκονών, η αντίστοιχη περιοχή είχε πλάτος 599,26 μm (βλ. Εικόνα 47α). Όσον αφορά την χονδρόκοκκη ζώνη, η οποία βρίσκεται στην ζώνη HAZ και εκτείνεται από το πέρας της λεπτόκοκκης ζώνης έως και την διεπιφάνεια μεταξύ του υλικού βάσης και του πρώτου κορδονιού, το πάχος της στην σκόνη AISI 410L ήταν 528,78 μm , ενώ της μίξης σκονών ήταν 614,02 μm (βλ. Εικόνα 47β). Αντίστοιχα, όλες οι επιστρώσεις που παρασκευάστηκαν, παρουσιάζουν χονδρόκοκκη δομή σε όλο το πλάτος τους.

SEM-EDS

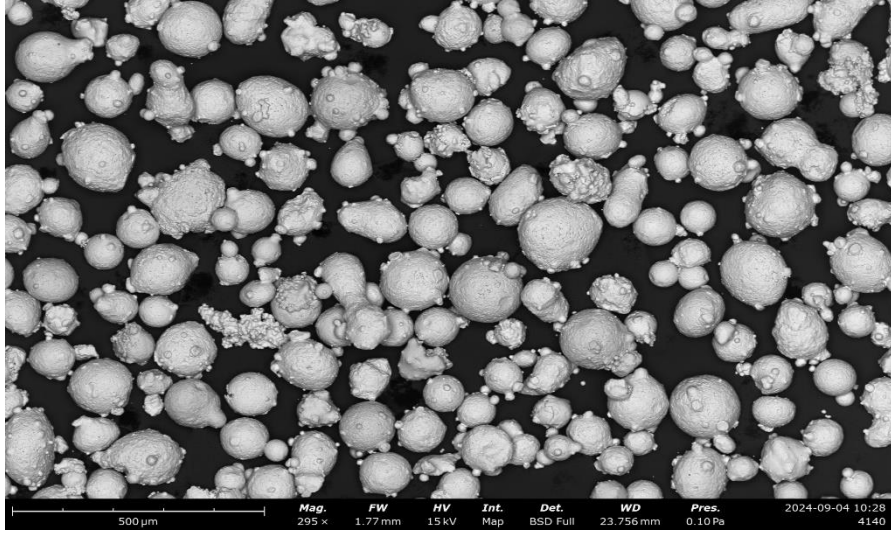
Τα αποτελέσματα της ηλεκτρονικής μικροσκοπικής σάρωσης (SEM) και της φασματοσκοπίας ακτίνων Χ με διασπορά ενέργειας (EDS), παρουσιάζονται παρακάτω:



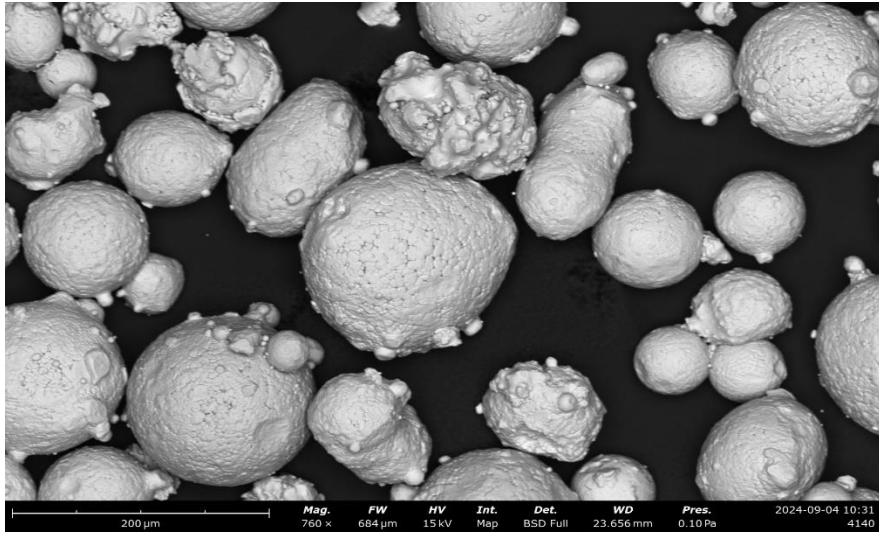
Εικόνα 57: «Η σκόνη AISI 410L, σε μεγέθυνση 295x»



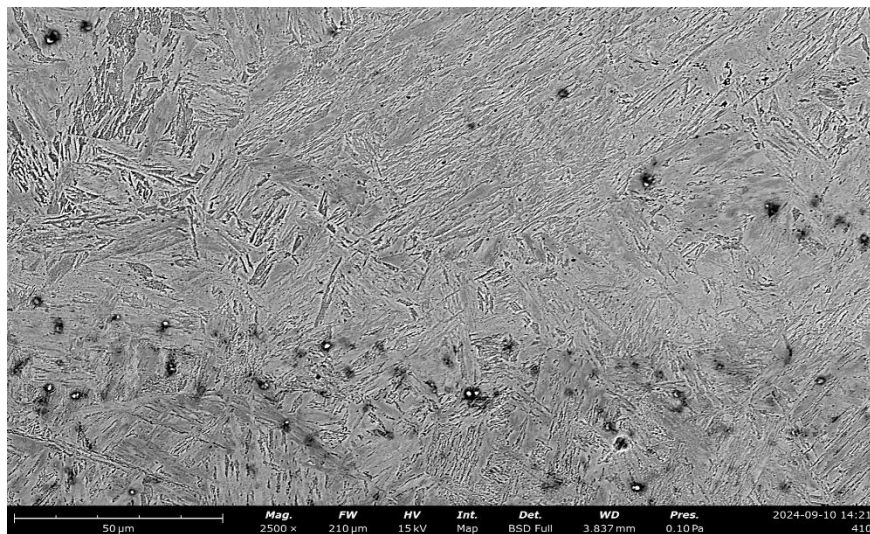
Εικόνα 58: «Η σκόνη AISI 410L, σε μεγέθυνση 1750x»



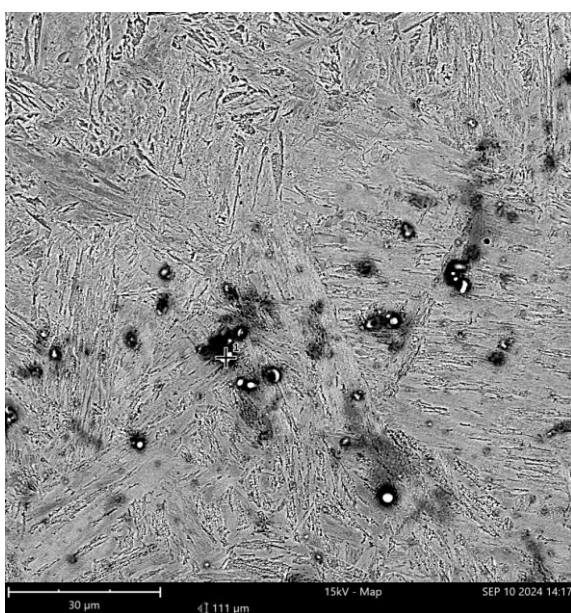
Εικόνα 59: «Η σκόνη AISI 4140, σε μεγέθυνση 295x»



Εικόνα 60: «Η σκόνη AISI 4140, σε μεγέθυνση 760x»

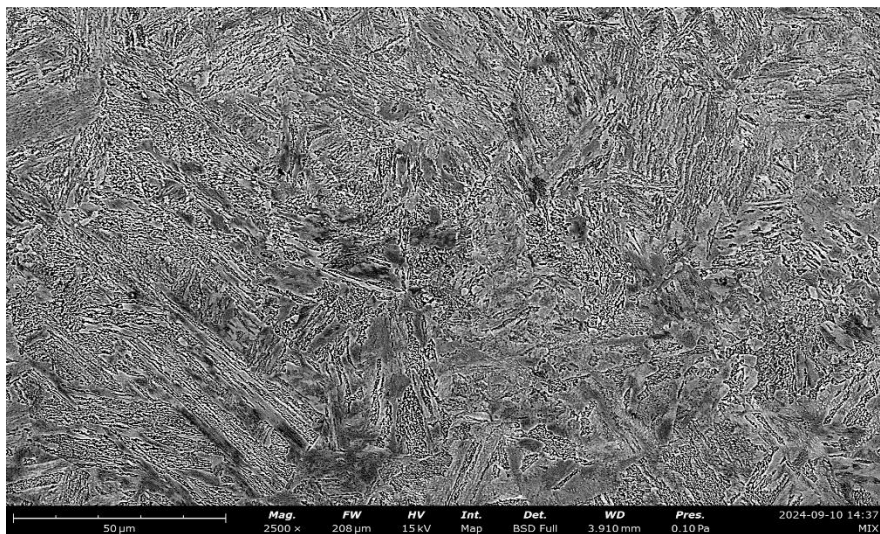


Εικόνα 61: «Η μικροδομή της επίστρωσης σκόνης AISI 410L»

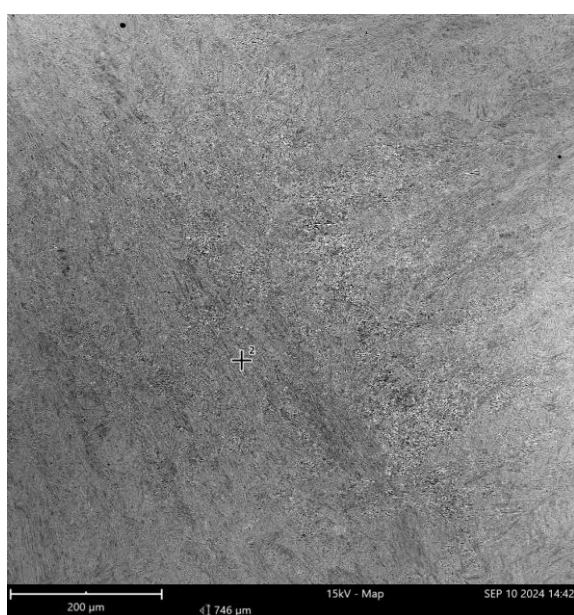


Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
Fe	11,11	29,47
C	48,24	27,52
F	26,44	23,86
Al	13,29	17,03
Cr	0,80	1,97
Si	0,12	0,15
Mn	0,00	0,00
Mo	0,00	0,00

Εικόνα 62: «Η χημική σύσταση της επίστρωσης σκόνης AISI 410L μέσω του EDS»



Εικόνα 63: «Η μικροδομή της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140»



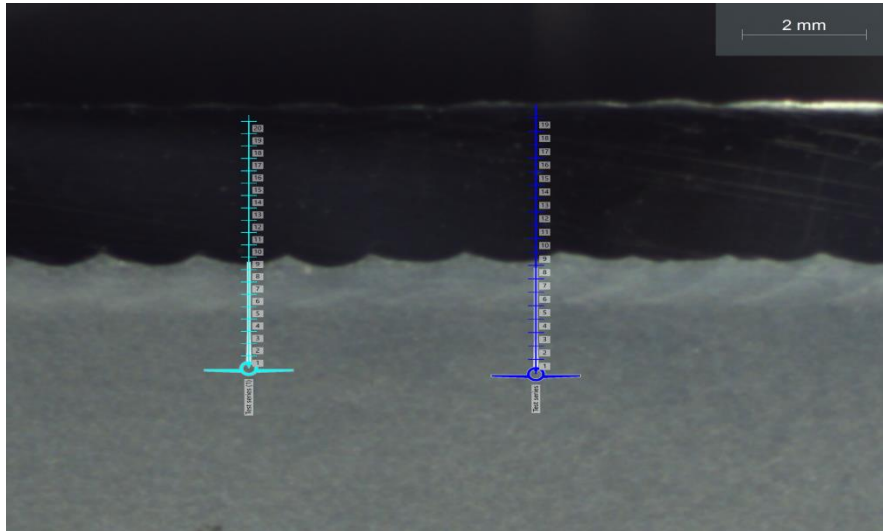
Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.
Fe	23,14	54,99
C	60,27	30,81
F	11,30	9,14
N	3,88	2,31
Cr	0,79	1,75
Mn	0,20	0,48
Si	0,26	0,32
S	0,15	0,21
Mo	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00

Εικόνα 64: ««Η χημική σύσταση της επίστρωσης μίξης σκονών AISI 410L και AISI 4140 μέσω του EDS»

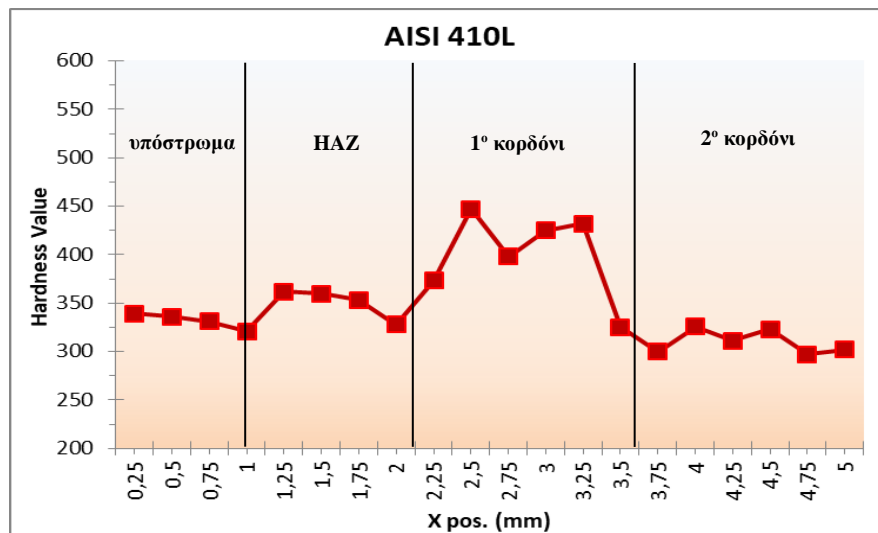
Μέσω της διάταξης SEM-EDS, επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις σχετικά με την μικροδομή, αλλά και η χημική σύσταση των σκονών και του βασικού υλικού.

ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

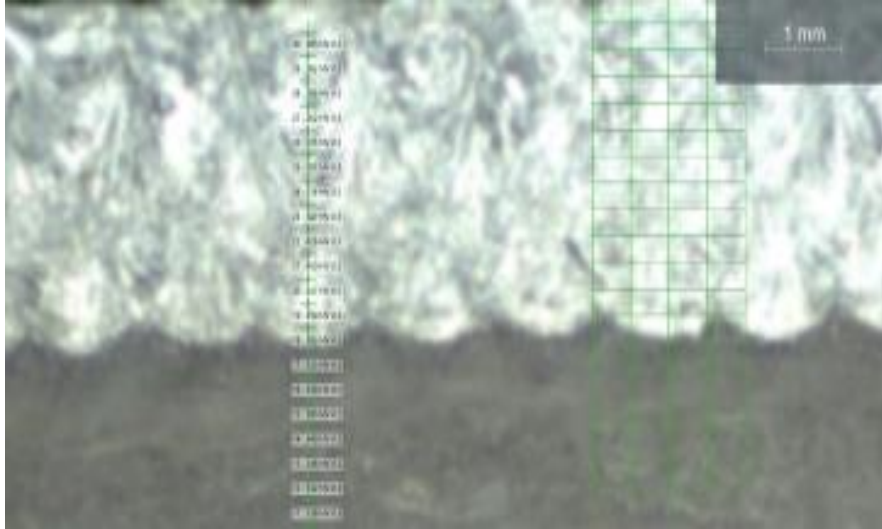
Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, προέκυψαν μέσω της διάταξης Qness 60 A+^{EVO}, στην οποία έγινε χρήση διαμαντιού σκληρότητας Vickers HV 0,3 και παρουσιάζονται παρακάτω:



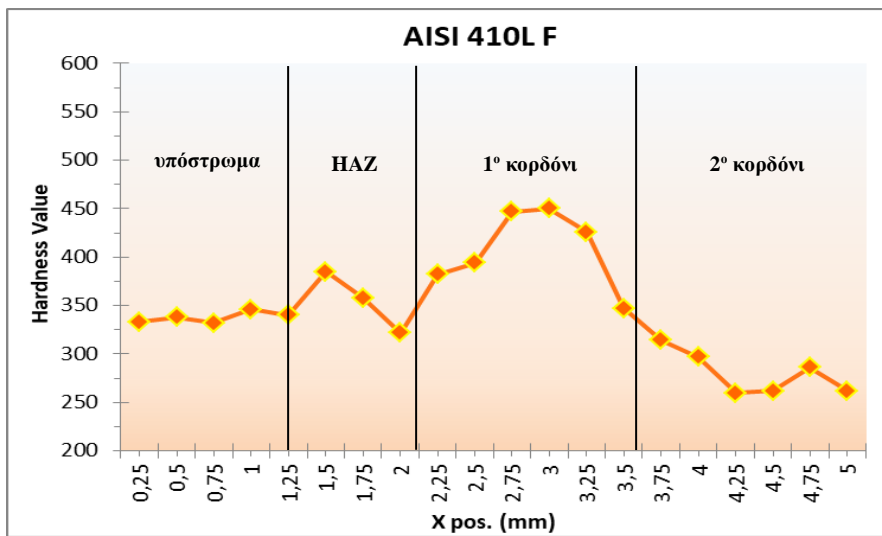
Εικόνα 65: «Οι σκληρομετρήσεις στο δοκίμιο 410L»



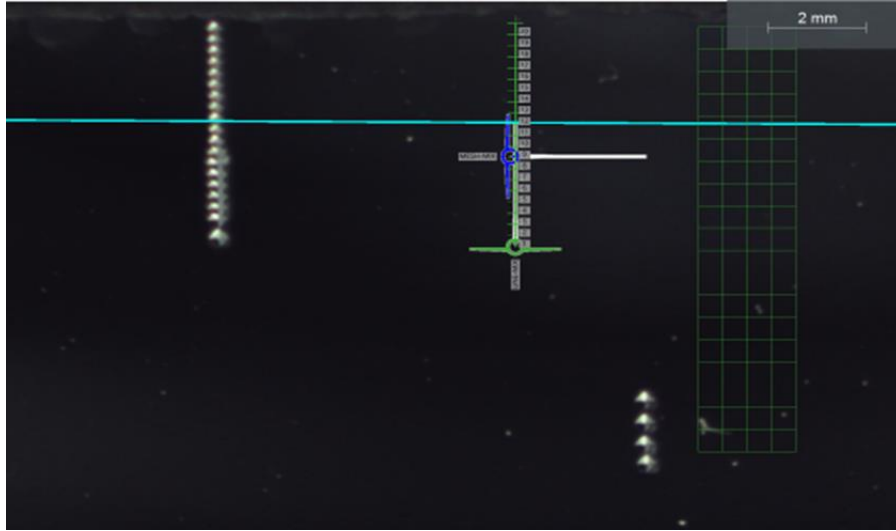
Εικόνα 66: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων του δοκιμίου 410L»



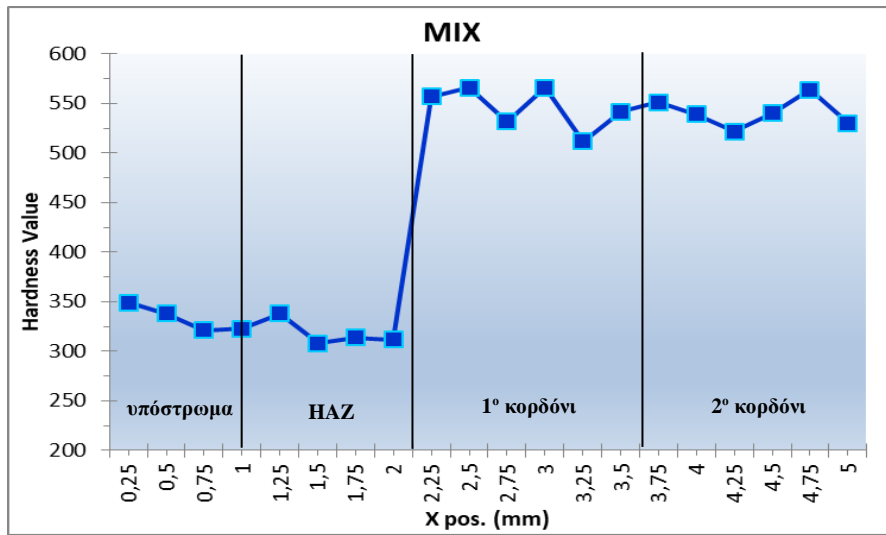
Εικόνα 67: «Οι σκληρομετρήσεις στο δοκίμιο 410L-F»



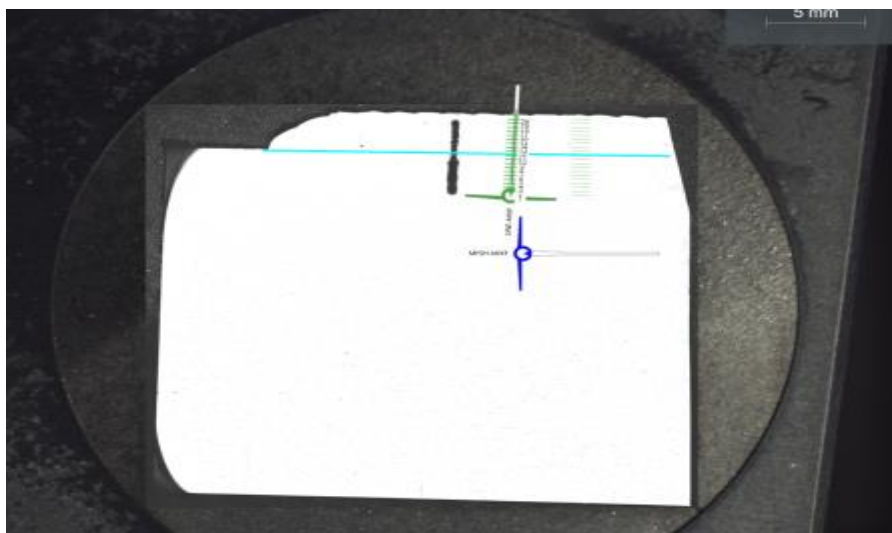
Εικόνα 68: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων του δοκιμίου 410L-F»



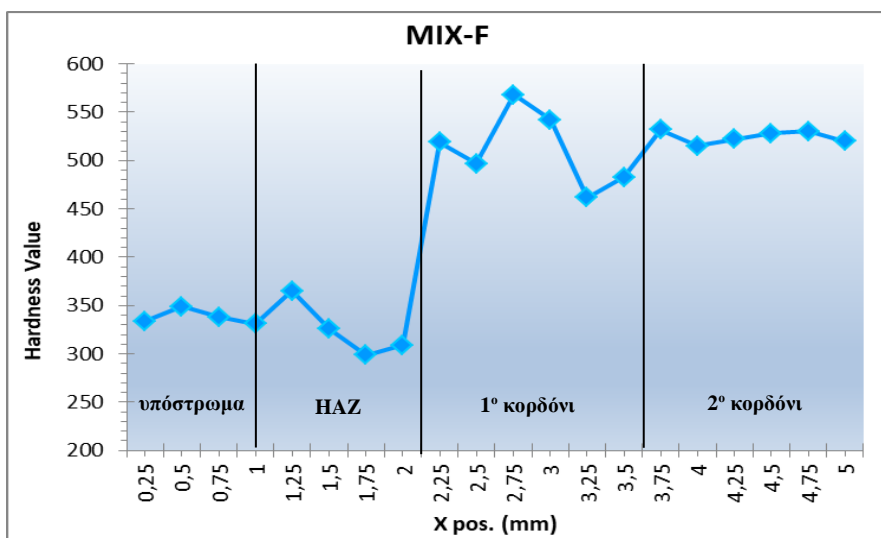
Εικόνα 69: «Οι σκληρομετρήσεις στο δοκίμιο MIX»



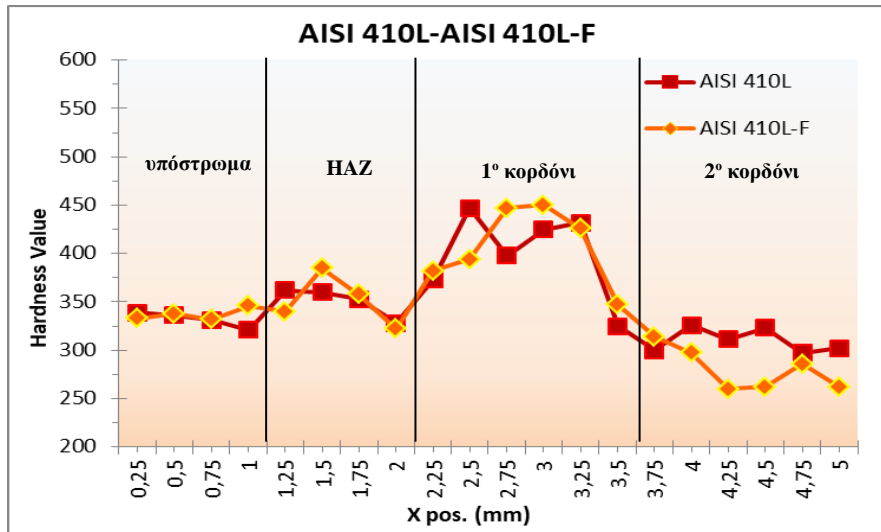
Εικόνα 70: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων του δοκιμίου MIX»



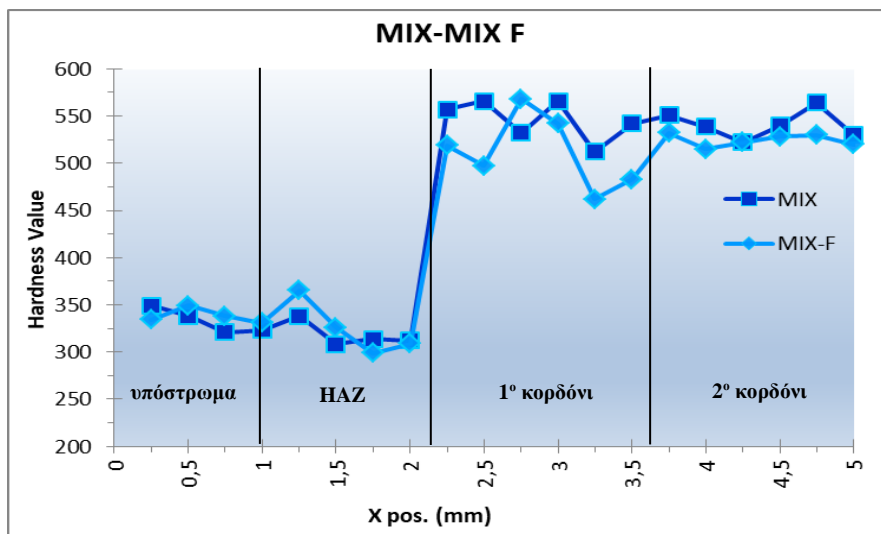
Εικόνα 71: «Οι σκληρομετρήσεις στο δοκίμιο MIX-F»



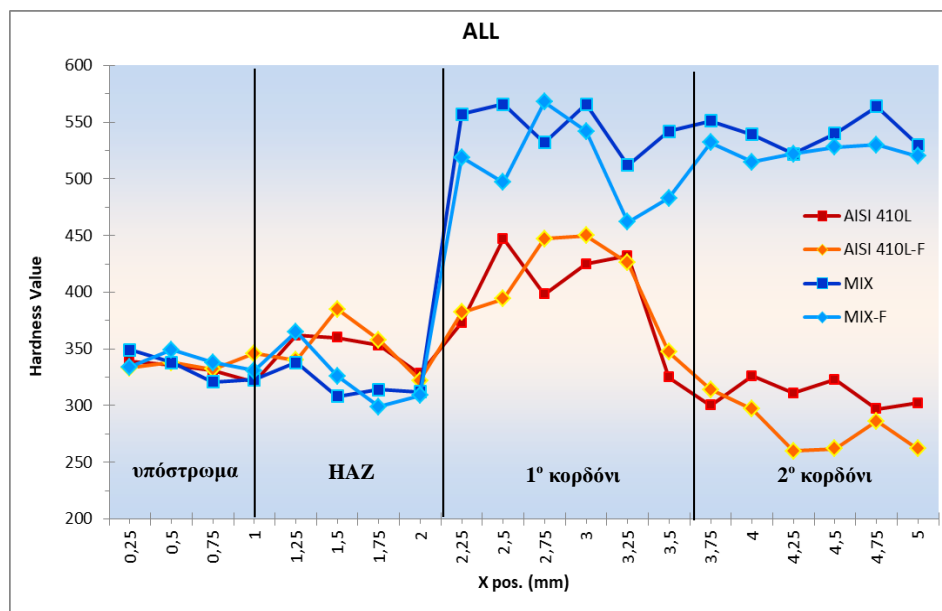
Εικόνα 72: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων του δοκιμίου MIX-F»



Εικόνα 73: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων των δοκιμίων 410L και 410L-F»



Εικόνα 74: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων των δοκιμίων MIX και MIX-F»



Εικόνα 75: «Το διάγραμμα των σκληρομετρήσεων όλων των δοκιμίων»

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Μέσω των σκληρομετρήσεων και της γραφικής τους αναπαράστασης, επιβεβαιώνεται η ύπαρξη της λεπτόκοκκης ζώνης στο υπόστρωμα των δοκιμίων, καθώς παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας κατά 50 HV, στην έκτασή της. Οι σκληρομετρήσεις των δοκιμίων MIX και MIX-F, έδειξαν υψηλότερες τιμές σκληρότητας HV στις επιστρώσεις τους, σε σχέση με τις σκληρομετρήσεις των δοκιμίων 410 και 410-F, με την διαφορά τους να κυμαίνεται μεταξύ των 100 HV-130 HV. Η μέγιστη σκληρότητα του δοκιμίου 410, παρουσιάστηκε στην έκταση του πρώτου κορδονιού και είχε τιμή 447 HV (βλ. Εικόνα 73), ενώ επίσης και η μέγιστη τιμή σκληρότητας του δοκιμίου 410-F εμφανίστηκε στην περιοχή του πρώτου κορδονιού με μέγιστη τιμή σκληρότητας 450 HV (βλ. Εικόνα 73). Τα δοκίμια MIX και MIX-F παρουσίασαν στην έκταση του πρώτου κορδονιού μέγιστες τιμές σκληρότητας 566 HV (βλ. εικόνα 74) και 568 HV αντίστοιχα (βλ. Εικόνα 74). Επιπλέον, μεταξύ των δύο κορδονιών, σε όλα τα δοκίμια παρατηρείται απότομη μείωση της σκληρότητας, η οποία οφείλεται σε μια μερική ανακρυστάλλωση λόγω θερμικής κατεργασίας, στην ζώνη σύνδεσης των δύο κορδονιών. Η μείωση αυτή κυμαίνεται σε τιμές 75 HV-100 HV για την σκόνη AISI 410L (βλ. Εικόνα 73), ενώ για την μίξη σκονών οι τιμές της πτώσης της σκληρότητας είναι της τάξης των 50 HV- 70 HV (βλ. Εικόνα 74). Παρατηρείται πως τα δοκίμια MIX και MIX-F εμφανίζουν πιο σταθερές τιμές

σκληρότητας στις επιστρώσεις τους συγκριτικά με τα άλλα δύο δοκίμια (βλ. Εικόνα 75). Συνεπώς, καθώς η μίξη σκονών είχε πιο ομοιογενή χαρακτηριστικά μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου κορδονιού, μια ενδεχόμενη φθορά, πιθανό να εκτινόταν και αυτή ομοιόμορφα και πιο ομαλά στο πάχος της επίστρωσης. Σχετικά με τις τιμές μικροσκληρότητας για τις ζώνες του υποστρώματος, της HAZ και του πρώτου κορδονιού, ως μέσος όρος τιμών, δεν προκύπτουν διαφορές. Αντιθέτως, στο δεύτερο κορδόνι, σαν μέσος όρος τιμών, παρατηρείται οριακή μείωση της σκληρότητας, για τα θερμικώς κατεργασμένα δοκίμια. Κάτι τέτοιο, αποδίδεται στην μεγαλύτερη χαλάρωση των τάσεων στην ζώνη του δεύτερου κορδονιού. Το γεγονός ότι η σκόνη AISI 4140 κατά την ανάμιξή της με την σκόνη AISI 410L και την θερμική κατεργασία που υπέστη εμφάνισε μαρτενσιτική δομή, είχε ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές σκληρότητας στις επιστρώσεις των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με μίξη σκονών, σε σχέση με αυτά που παρασκευάστηκαν αποκλειστικά με την σκόνη AISI 410L.

Συμπεράσματα

Το σύνολο των αποτελεσμάτων όπως παρατέθηκαν αποτελούν σημαντικά στοιχεία και δεδομένα για την πραγματοποίηση κατεργασιών απόθεσης με χρήση δέσμης laser, στοιχείων ναυτικών μηχανών (άξονες, κομβία, κουζινέτα κλπ). Η επιλογή της βέλτιστης σκόνης έχει να κάνει ακριβώς με τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργικότητα των στοιχείων αυτών.

Η παρούσα διπλωματική έδωσε μια πλήρη εικόνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά της κατεργασίας (βάθος διείσδυσης, πλάτος στρώσης, αλληλοεπικάλυψη στρώσεων κλπ), τα χαρακτηριστικά της μικροδομής αλλά και με την προκύπτουσα σκληρότητα, με αποτέλεσμα να αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την παρασκευή επιστρωμάτων είτε με τη χρήση σκόνης AISI 410L είτε με την μίξη σκονών AISI 4140 και AISI 410L.

Μελλοντική εργασία

Στα πλαίσια της μελλοντικής μελέτης, η παραπάνω εργασία θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με παραπάνω πειράματα ή και να τροποποιηθεί. Συγκεκριμένα, προτείνεται να πραγματοποιηθεί μεταλλογραφικός έλεγχος και σκληρομετρήσεις, σε δοκίμια που θα κατασκευαστούν μέσω διαφορετικών τεχνολογιών επιστρώσεων, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική και έχουν αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να επαναληφθούν τα πειράματα της εργασίας, σε δοκίμια τα οποία θα παρασκευαστούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές σκόνες, όπως για παράδειγμα σκόνες από καρβίδια βολφραμίου (WC) ή χρωμίου (Cr₃C₂), σκόνες από κράματα με βάση το τιτάνιο (Ti-6Al-4V) ή σκόνες από κράματα με βάση το κοβάλτιο (Stellite 6). Παράλληλα, θα μπορούσαν να παρασκευαστούν δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα και θα έχουν διαφορετικό υλικό βάσης, στα οποία θα επενδυθούν οι σκόνες AISI 410L και μίξη σκονών AISI 410L και AISI 4140, όπως πραγματοποιήθηκε και στα πειράματα της παρούσας εργασίας. Προτείνονται υλικά βάσης από χαλκό και κράματα χαλκού, από τιτάνιο ή χυτοσίδηρο. Τα αποτελέσματα από τα δοκίμια από διαφορετικές σκόνες ή διαφορετικά υλικά βάσης, μπορούν έπειτα να συγκριθούν με τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, με σκοπό την εύρεση της σκόνης που δημιουργεί πιο ισχυρές και αποδοτικές επιστρώσεις και την μελέτη και σύγκριση των διαφορετικών υλικών βάσης.

Ως μελλοντική επέκταση της εργασίας προτείνεται, τα υπάρχοντα δοκίμια να υποβληθούν σε μηχανικές καταπονήσεις και να πραγματοποιηθούν πειράματα του εφελκυσμού, της κάμψης, της στρέψης και της κόπωσης. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, θα συγκριθούν και θα αναλυθούν, ώστε να παρατηρηθεί ποια επίστρωση μεταξύ των θερμικά κατεργασμένων και μη θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή ανάλογα την καταπόνηση την οποία υφίστανται.

Προτείνεται επιπλέον, η δημιουργία επιστρώσεων με την τροποποίηση των παραμέτρων του laser για την παρασκευή δοκιμίων με διαφορετικό ρυθμό εναπόθεσης, διαφορετική ταχύτητα και ισχύ, συγκριτικά με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας. Έτσι, θα μελετηθούν οι διαφοροποιήσεις στα παραγόμενα επιστρώματα και θα παρατηρηθεί η επιρροή των παραμέτρων στην ποιότητα της επιγόμενης.

Τέλος, ως μελλοντική μελέτη, ενδείκνυται η εκτενής έρευνα της μεθόδου του laser cladding ως μέσο τρισδιάστατης εκτύπωσης (additive manufacturing), για την δημιουργία εξαρτημάτων και ανταλλακτικών.

Βιβλιογραφία

- [1] Anon, (n.d.). *Cladding - Weld Overlay: Polysoude*. [online] Available at: <https://www.polysoude.com/weld-overlay-cladding/>. [Accessed 03 May 2024].
- [2] Anon, (n.d.). *Protecting Ships and Trawlers from Corrosion - Metallisation Ltd*. [online] Available at: <https://www.metallisation.com/applications/protecting-ships-and-trawlers-from-corrosion/>. [Accessed 03 May 2024].
- [3] HTS Coatings. (n.d.). *Thermal Spray | What is Thermal Spray and How Does it Work?* [online] Available at: <https://htscoatings.com/pages/thermal-spray>. [Accessed 04 May 2024].
- [4] Home. (n.d.). *Flame Spraying - Surface Technology - Bodycote Plc*. [online] Available at: <https://www.bodycote.com/services/surface-technology/flame-spraying/>. [Accessed 07 May 2024].
- [5] IRS. (2021). *What is Plasma Spray Coating: How Plasma Spraying Works*. [online] Available at: <https://www.irsLtd.co.uk/what-is-plasma-spraying/>. [Accessed 07 May 2024].
- [6] Higgins, M. (n.d.). *What is a CVD Coating?* [online] www.silcotek.com. Available at: <https://www.silcotek.com/blog/what-is-a-cvd-coating>. [Accessed 04 May 2024].
- [7] Alcadyne (2019). *What Is PVD Coating | Physical Vapor Deposition | Alcadyne*. [online] Alcadyne. Available at: <https://alcadyne.com/what-is-pvd-coating-how-it-works/> [Accessed 04 May 2024].
- [8] Penn, W. (2008). *Laser cladding basics*. [online] Alabama Specialty Products. Available at: <https://www.alspi.com/WeldingJournalFeb08.pdf> [Accessed 21 May 2024]
- [9] www.sciencedirect.com. (n.d.). *Advanced Welding and Deforming | ScienceDirect*. [online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128220498/advanced-welding-and-deforming>. [Accessed 10 May 2024].

[10] www.linkedin.com. (n.d.). *Classification of Laser Cladding Material Powder and its Advantages and Disadvantages*. [online] Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/classification-laser-cladding-material-powder-its-advantages-zhang>. [Accessed 04 May 2024].

[11] Xu, W. (2021). *3 Things About Application of Laser Cladding Technology in Ship Repair*. [online] Medium. Available at: https://medium.com/@wendyxu_95197/3-things-about-application-of-laser-cladding-technology-in-ship-repair-a3229da4eff3 [Accessed 04 May 2024].

[12] Findik, F. (2023). Laser cladding and applications. *Sustainable Engineering and Innovation*, 5(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.37868/sei.v5i1.id186>. [Accessed 10 May 2024].

[13] www.xometry.com. (n.d.). *Laser Cladding: Definition, Process, Types, Applications, and Features*. [online] Available at: <https://www.xometry.com/resources/sheet/what-is-laser-cladding/>. [Accessed 10 May 2024].

[14] Liang, Y., Liao, Z.Y., Zhang, L.L., Cai, M.W., Wei, X.S. and Shen, J. (2023). A review on coatings deposited by extreme high-speed laser cladding: processes, materials, and properties. *Optics & Laser Technology*, [online] 164, pp.109472–109472. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109472>. [Accessed 15 May 2024].

[15] Sun, S., Wu, Z., Pang, M., Chang, J., Xuan, Y., Qi, H., Yang, R. and Wu, Y. (2024). *Microstructure and corrosion behavior of chromium-rich stainless steel coatings deposited by different laser cladding processes*. [online] ScienceDirect. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424003375?via%3Dihub> [Accessed 15 May 2024].

[16] He, J. (n.d.). *BS EN 42CrMo4 | 1.7225 Alloy Engineering Steel*. [online] Otai Special Steel. Available at: <https://www.astmsteel.com/product/42crmo4-alloy-steel/>. [Accessed 28 May 2024].

[17] Metinvestholding.com. (2024). *Steel 42CrMo4: characteristics, properties, analogues - Metinvest*. [online] Available at: <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/42crmo4> [Accessed 28 May 2024].

[18] Roussos, C., Deligiannis, S., D. Ioannidou, G. Papapanos and Tsakiridis, P.E. (2023). Microstructural and Mechanical Properties of Laser Cladding-Deposited AISI 1060 Steel with a Mixture of 410L Alloy and 4140 Alloy Powders. *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08767-8>. [Accessed 25 May 2024].