

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ» ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ, ΣΧΟΛΗ Μ.Μ.Μ.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ ΜΕ LASER CLADDING

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΡΟΥΣΣΟΣ

Πτυχιούχου Μηχανικού Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΕΤΡΟΣ ΤΣΑΚΙΡΙΔΗΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Ε.Μ.Π., ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ» ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ, ΣΧΟΛΗ Μ.Μ.Μ.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥΧΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΜΕΣΩ ΑΝΑΓΟΜΩΣΗΣ ΜΕ LASER CLADDING

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΡΟΥΣΣΟΣ

Πτυχιούχου Μηχανικού Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : Π. ΤΣΑΚΙΡΙΔΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. Γ. ΦΟΥΡΛΑΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π. Α. ΖΕΡΒΑΚΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Ε.Μ.Π., ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2023

Copyright © Ρούσσος Χρήστος, 2023 Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

<u>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</u>

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της ακόλουθης εργασίας είναι η ανάπτυξη και μελέτη μικτών σιδηρούχων επικαλύψεων, μέσω της ανάμειξης δύο μεταλλικών πουδρών (χάλυβες AISI 410L και AISI 4140) σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, πάνω σε υπόστρωμα χάλυβα AISI 1060, μέσω αναγόμωσης με την τεχνική Laser Cladding. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις επιλεχθείσες παραμέτρους της τεχνικής και τη διαφορετική αναλογία των πουδρών που χρησιμοποιήθηκε προς επικάλυψη, η μελέτη συμπεριέλαβε: α) τον χαρακτηρισμό της μικροδομής τους, β) την ταυτοποίηση των προκύπτοντων μικρογραφικών συστατικών και φάσεων, γ) την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, μέσω σκληρομετρήσεων, δ) την έρευνα της αντίστασής τους στη φθορά και ε) την διερεύνηση της επιφανειακής τους τραχύτητας.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κύριο Π. Τσακιρίδη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, για την καθοριστική του συμβολή στην εκπόνηση της και για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση και αρωγή του κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, την οποία και επέβλεψε με αμέριστο ενδιαφέρον.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρία ΤΚ Πιτσιρίκος που εδρεύει στην Κερατέα του Νομού Αττικής και συγκεκριμένα στον υπεύθυνο Μηχανικό Έρευνας και Ανάπτυξης κ. Παπαπάνο Γεώργιο για τη σημαντική ευκαιρία που μου προσφέρθηκε έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί στο χώρο τους η εφαρμογή της τεχνικής laser cladding deposition, καθώς και για τη συμβολή και βοήθεια του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Σ. Δεληγιάννη, ο οποίος ανήκει στο Εργαστηριακό και Διδακτικό Προσωπικό (Ε.Δι.Π.) της Σχολής Μ.Μ.Μ., για την καθοδήγησή του σε θέματα θεωρητικού περιεχομένου με τη διάθεσή του για δημιουργία επιστημονικών συζητήσεων, αλλά και πρακτικού περιεχομένου, καθώς μου μεταλαμπάδευσε χρήσιμες πληροφορίες κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Ν. Ι. Μακρή, κ. Α. Ι. Καλδέλλη και κα Δ. Ιωαννίδου για την στήριξη και την πολύτιμη βοήθειά τους σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ι. Χαρλαμπίτα για την αδιάλειπτη ενασχόληση του με θέματα εύρυθμης λειτουργίας του εργαστηριακού εξοπλισμού.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στον Καθηγητή κ. Γ. Φούρλαρη και στην Επίκουρη Καθηγήτρια κα Α. Ζερβάκη που απαρτίζουν την επιτροπή εξέτασης της μεταπτυχιακής εργασίας, για την τιμή και το χρόνο που διέθεσαν. Ευχαριστίες θα ήθελα να παραθέσω επίσης στους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος για τη διδασκαλία τους και για όλες τις γνώσεις που απλόχερα προσέφεραν.

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>

Στην ακόλουθη μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η απόθεση μέσω της τεχνικής Laser Cladding Deposition-LCD δύο τροποποιημένων μεταλλικών πουδρών, ενός φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα AISI 410L και ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα AISI 4140, σε ένα ελαφρά κραματωμένο χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 1060. Οι μεταλλικές πούδρες AISI 410L και AISI 4140 αναμείχθηκαν και αποτέθηκαν στο υπόστρωμα AISI 1060, σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, με το ποσοστό της πούδρας 410L να αυξάνεται, ενώ της 4140 να μειώνεται: A) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 50:50, B) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 80:20 και Γ) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 90:10.

Η τεχνική Laser Cladding (LC) ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων προσθετικής κατασκευής (AM) και πιο συγκεκριμένα στην κατηγορία των τεχνικών απόθεσης μέσω άμεσης κατευθυνόμενης ενέργειας (DED). Ουσιαστικά, η τεχνική LC αποτελεί μια δικαδικασία τήξης και στερεοποίησης ενός υλικού προς απόθεση σε μία επιφάνεια του ίδιου ή ενός άλλου υλικού, διαθέτοντας ως πηγή θερμότητας το λέιζερ. Αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική τεχνική σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, διότι οδηγεί σε αποτελεσματική μεταλλουργική συνοχή μεταξύ των υλικών, με μικρότερα και ελεγχόμενα ποσοστά διαλυτότητας, μικρότερες θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες και τη μείωση ή και εξάλειψη του πορώδους, παρέχοντας τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.

Η τεχνική LC συναντάται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθώς χρησιμοποιείται είτε για την επισκευή, είτε την ενίσχυση διαφόρων μηχανικών μερών και εξαρτημάτων τα οποία δουλεύουν υπό πολλούς κύκλους λειτουργίας, σε υψηλές θερμοκρασίες, σε έντονα οξειδωτικές και διαβρωτικές συνθήκες. Τέτοια μηχανικά εξαρτήματα μπορεί να είναι γρανάζια, στροφαλοφόροι κινητήρες πλοίων, εκκεντροφόροι άξονες, έμβολα, κυλινδροκεφαλές, τροχοί σιδηροδρομικού δικτύου, τα οποία βρισκουν εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε διυλιστήρια, σε εργοστάσια παραπάνω μηχανικά μέρη είναι σημαντικό να διαθέτουν την κατάλληλη επιφάνεια από πλευράς τραχύτητας και αντίστασης σε φθορά και τριβή, την απαραίτητη αντίσταση σε διάβρωση και οξείδωση και σημαντικές μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή μηχανική αντοχή, σκληρότητα, δυσθραυστότητα, αντοχή σε κόπωση. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, όπως προαναφέρθηκε, εναποτέθηκαν δύο μεταλλικές πούδρες, ανοξείδωτου χάλυβα AISI 410L και ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα AISI 4140, σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, πάνω σε χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 1060.

Ο χάλυβας 410L είναι ένας φερριτικός ανοξείδωτος χάλυβας, ο οποίος περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε Cr και συνήθως μικρότερες περιεκτικότητες σε Si, S, Mn και Ni. Χρησιμοποιείται ευρέως, στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. συστήματα εξάτμισης) και σε άλλες βιομηχανίες (π.χ. δεξαμενές αποθήκευσης, θαλάμους καύσης λέβητα), διότι παρουσιάζει πολύ καλή καμπτική συμπεριφορά, ολκιμότητα, αντοχή σε κόπωση και αντίσταση στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, χάρη στις μηχανικές του ιδιότητες, στην αντίσταση του στη διάβρωση και στην εξαιρετική συγκολλησιμότητα και συμβατότητα του μέσω λέιζερ, επιλέγεται συνήθως για την επισκευή εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών (π.χ. σιδηροδρομικό δίκτυο) και στη ναυπηγική.

Ο χάλυβας 4140 έχει ενδιάμεση περιεκτικότητα σε C και είναι ένας ελαφρά κραματωμένος χάλυβας με μικρές περιεκτικότητες σε Mn, Cr, Mo and Si. Χάρη στην υψηλή μηχανική αντοχή, την επαρκή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα, την καλή συμπεριφορά του ως προς τις θερμικές κατεργασίες με στόχο την αύξηση της σκληρότητας μέσω σχηματισμού μαρτενσιτικής δομής, αντοχή στην κόπωση, κατεργασιμότητα και αντοχή στη φθορά που παρουσιάζει, χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά εξαρτήματα, όπως γρανάζια, ρότορες, άξονες γεννητριών, στροφαλοφόροι άξονες αυτοκινήτων, αρμούς σωλήνων διάτρησης βαθιών φρεατίων, υλικών θωράκισης κ.α.

Η απόθεση ανοξείδωτων χαλύβων σε χάλυβες με υψηλά ποσοστά άνθρακα μέσω της τεχνικής laser cladding, αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής και επισκευής εξαρτημάτων και μηχανικών μερών, διότι συνδυάζει σημαντικές ιδιότητες, αντίσταση στη διάβρωση και μηχανική αντοχή, σε σχετικά χαμηλά κόστη. Ένας τόσο διαδεδομένος χάλυβας, υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα που χρησιμοποιείται σε πολλά εξαρτήματα, όπως άξονες, δακτύλιοι, πιστόνια, ελατήρια, γεωργικά εργαλεία χειρός, συνδετικά μέρη σωλήνων, εξαρτήματα σιδηροδρομικού δικτύου, στροφαλοφόρους άξονες κινητήρα και κυλινδροκεφαλές στη ναυπηγική, είναι ο AISI 1060. Για αυτό το λόγο και χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα.

Η τεχνική laser cladding deposition έλαβε χώρα στην εταιρία ΤΚ Πιτσιρίκος που εδρεύει στην Κερατέα του Νομού Αττικής. Η απόθεση των πουδρών πραγματοποιήθηκε με ένα λέιζερ γρανάτη αλουμινίου-υττρίου με προσθήκη νεοδυμίου (Nd:Yag laser), χρησιμοποιώντας κάθε φορά τις ίδιες παραμέτρους.

Ο χαρακτηρισμός των μικροδομών και η χημική ανάλυση των φάσεων του κάθε δοκιμίου πραγματοποιείται μέσω Οπτικής Μικροσκοπίας (LOM), Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (SEM) και Φασματόμετρου Ακτίνων Χ Διασπειρόμενης Ενέργειας (EDS). Η ανάλυση της κρυσταλλικής δομής των μικροδομικών χαρακτηριστικών διεξάγεται μέσω Περιθλασιμετρίας Ακτίνων Χ (XRD). Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υπό εξέταση δοκιμίων, μέσω μακροσκληρομετρήσεων και μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers. Τέλος, η μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων εκτιμάται με ένα τραχύμετρο και η ανάλυση της συμπεριφοράς των δοκιμίων σε συνθήκες φθοράς διεξάγεται με δοκιμή φθοράς λόγω εκτριβής. Με αυτό τον τρόπο, αναλύεται η συσγέτιση της προκύπτουσας σκληρότητας των δοκιμίων με τη μικροδομή τους και τα αποτελέσματα της αντίστασης τους στη φθορά και της επιφανειακής τους τραχύτητας. Συνεπώς, θα εκτιμηθεί ποια αναλογία θεωρείται η βέλτιστη, έτσι ώστε να μπορέσει το επικαλυμμένο εξάρτημα να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες, κυρίως έντονα αποξεστικές, ενώ ταυτόχρονα να είναι και οικονομικά βιώσιμο.

ABSTRACT

The following master thesis investigates the laser cladding deposition of customized ferritic stainless steel AISI 410L powder combined with customized medium carbon microalloyed steel AISI 4140 powder on high carbon microalloyed steel AISI 1060 substrate. Three different ratios of the metallic powders mixtures were selected: A) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 50:50, B) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 80:20 και C) AISI 410L:AISI 4140 \rightarrow 90:10.

Laser Cladding Deposition (LCD) is an additive manufacturing process and more specifically, belongs to the direct energy deposition techniques. LCD is a process where individual weld beads are aligned and stacked onto a substrate material. The treated area is heated by the absorption of energy delivered by the laser beam. LCD has been proven a promising alternative to conventional electric arc welding and cladding methods since the confined heat input results in effective metallurgical fusion bonding with smaller, controlled dilution zones and narrower heat-affected zones, while reducing or even diminishing the porosity effect and providing promising mechanical properties.

LCD process is performed to repair and improve the properties of metallic machine parts used in various applications and especially under many operating cycles, at high temperatures and in strongly oxidizing, abrasive or corrosive environments. Gears, marine engine crankshafts, camshafts, pistons, cylinder heads, and railway wheels are some regular steel-made machine parts, which find applications in marine and automotive industry, refineries, power plants, railway network. Therefore, it is necessary, all of the above metallic machine parts having suitable surface (e.g., roughness, corrosion resistance, wear resistance), and significant mechanical properties (e.g., mechanical strength, hardness, toughness, fatigue strength), allowing continuous operation.

As mentioned above, three different ratios of two customized metallic powders, stainless steel AISI 410L and microalloyed steel AISI 4140, were deposited on high carbon steel AISI 1060 substrate.

AISI 410L steel is a ferritic stainless steel containing a high amount of Cr and usually smaller quantities of Si, S, Mn, and Ni. 410L is widely used in automobile exhaust gas treatment devices and boiler combustion chambers because of its excellent

bending performance, ductility, fatigue strength and high-temperature oxidation resistance. Furthermore, due to its mechanical properties, corrosion resistance, good welding performance and laser compatibility, 410L is usually selected for repair applications on the railway network and marine industry.

AISI 4140 is a medium carbon low alloy steel containing mainly Mn, Cr, Mo and Si. Due to its high strength, sufficient ductility and toughness, good hardenability, fatigue behavior, machinability and wear resistance, the alloy is widely used in industrial components such as gears, rotors, generator spindles, automotive crankshafts, oil drill pipe joints of deep well, armor materials and other applications.

LCD of various stainless steel grades on high carbon steels is a widespread method of producing and restoring materials that provide a good compromise between corrosion resistance and mechanical strength at a relatively low cost. A widespread high carbon steel used in many components, such as shafts, bushings, connecting rods, springs, agricultural hand tools, pipe fittings, railway network components and marine industry's engine crankshafts and cylinder heads, is the AISI 1060. For this reason, in the present study, AISI 1060 is used as the laser-cladded substrate.

Laser cladding deposition was carried out via a Nd:Yag Laser by TK Pitsirikos Company, which is located in Keratea, Attiki, Greece. Laser cladding process parameters are the same for every deposition experiment.

The samples' microstructural observation was carried out through light optical microscopy and scanning electron microscopy analysis, as well as energy dispersive spectroscopy to conduct phase chemical compositions microanalyses. The identification of phase crystal structure was accomplished through X-Ray Diffraction. To assess the mechanical properties of the as-cladded specimens, Vickers hardness and microhardness testing was conducted. Furthermore, surface evaluation was conducted via a roughness measurement tester and Taber abrasion tests were performed to assess wear resistance. In this way, the correlation of the value of hardness tests, combined with the microstructure analysis, wear resistance behavior and roughness results, is achieved. Thus, the optimal powder ratio will stand out, so the laser-cladded component can be used in a tense and abrasive environment, while ending up comparing the value of reconditioning over replacing.

HEPIEXOMENA

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ПЕРІАНҰН	iii
ABSTRACT	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xxix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
1.1 Χάλυβες και Βασικές Κατηγορίες Χαλύβων	1
1.2 Μετασταθές Διάγραμμα Σιδήρου-Σεμεντίτη (Fe-Fe ₃ C)	4
1.3 Φάσεις και Μικρογραφικά Συστατικά των Χαλύβων	7
1.4 Επίδραση Κραματικών Στοιχείων στους Χάλυβες	13
1.4.1 Διάγραμμα Σιδήρου-Χρωμίου για Ανοξείδωτους Χάλυβες	25
1.4.2 Διάγραμμα Schaeffler DeLong για Ανοξείδωτους Χάλυβες	28
1.5 Διαγράμματα ΤΤΤ και CCT	29
1.6 Τεχνική Ανάπτυξης Επικαλύψεων μέσω Laser (Laser Cladding Process)	33
1.6.1 Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing Processes)	33
1.6.2 Απόθεση μέσω Άμεσης Κατευθυνόμενης Ενέργειας (Directed Energy I DED)	Deposition-
1.6.3 Ανάλυση Τεχνικής Laser Cladding	
1.6.4 Μεταλλουργική Δομή και Παράμετροι Τεχνικής Laser Cladding	38
1.6.4.1 Μορφολογία Επικάλυψης-Ζώνες-Παράμετροι Διάταξης Laser	38
1.6.4.2 Παράμετροι Πούδρας	
1 6 4 3 Ελαττώματα	46
1.0. 1.5 Exarticipation	-
1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή	50
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 	
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 	ag Laser - 50
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 1.7.1 Αντοχή σε Φθορά 	ag Laser - 52
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 1.7.1 Αντοχή σε Φθορά 1.7.1.1. Φθορά λόγω Εκτριβής (Abrasive Wear) 	ag Laser - 52
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 1.7.1 Αντοχή σε Φθορά 1.7.1.1. Φθορά λόγω Εκτριβής (Abrasive Wear)	ag Laser - 52 53 53
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 1.7.1 Αντοχή σε Φθορά	ag Laser - 52 53 53 53 60 64
 1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή 1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Ya Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet) 1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης 1.7.1 Αντοχή σε Φθορά	ag Laser - 52 53 53 53 60 64

1.7.3.1 Ορισμός Σκληρότητας	72
1.7.3.2 Σκληρομέτρηση κατά Vickers	73
1.8 Χάλυβες AISI 410L, AISI 4140 και AISI 1060	74
1.8.1 AISI 410L (EN 1.4003 ή X2CrNi12)	74
1.8.2 AISI 4140 (EN 1.7225 ή 42CrMo4)	75
1.8.3 AISI 1060 (EN 1.1221 ή DIN Ck60)	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	78
2.1 Περιγραφή Υλικών	78
2.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας	78
2.2.1 Προετοιμασία Δοκιμίων	82
2.2.1.1 Εγκιβωτισμός Δοκιμίων	83
2.2.1.2 Λείανση Δοκιμίων	83
2.2.1.3 Καθαρισμός Δοκιμίων	84
2.2.1.4 Στίλβωση Δοκιμίων	84
2.2.1.5 Χημική Προσβολή Δοκιμίων	86
2.2.2 Οπτική Μικροσκοπία (Light Optical Microscopy-LOM)	86
2.2.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy-SI	E M) 88
2.2.4 Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ (X-Ray Diffraction-XRD)	92
2.2.5 Σκληρομετρήσεις κατά Vickers (Vickers Hardness Test)	95
2.2.6 Μέτρηση Επιφανειακής Τραχύτητας (Roughness Measurement Test)	96
2.2.7 Δοκιμές Φθοράς λόγω Εκτριβής (Taber Abrasion Test)	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	
3.1 Οπτική Μικροσκοπία – LOM	
3.1.1 Δοκίμια πούδρας AISI 410L και AISI 4140	
3.1.2 Δοκίμια as received υπόστρωμα AISI 1060 και ανοπτημένο υπόστρωμα στους 560°C για 1h	AISI 1060
3.1.3 Δοκίμιο A(1) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	103
3.1.4 Δοκίμιο B(1) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	110
3.1.5 Δοκίμιο Γ(1) (410L:4140 → 90:10, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	116
3.1.6 Δοκίμιο A(2) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων XZ)	122
3.1.7 Δοκίμιο B(2) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων XZ)	128
3.1.8 Δοκίμιο Γ(2) (410L:4140 → 90:10, στο σύστημα αξόνων XZ)	134
3.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης – SEM	139
3.2.1 Δοκίμια πούδρας AISI 410L και AISI 4140	140

3.2.2 Δοκίμια υποστρώματος as received AISI 1060 και ανοπτημένου AI 560°C για 1h	SI 1060 στους 142
3.2.3 Δοκίμιο A(1) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	146
3.2.4 Δοκίμιο B(1) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	154
3.2.5 Δοκίμιο Γ(1) (410L:4140 → 90:10, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)	164
3.2.6 Δοκίμιο Α(2) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων ΧΖ)	172
3.2.7 Δοκίμιο B(2) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων XZ)	181
3.2.8 Δοκίμιο Γ(2) (410L:4140 → 90:10, στο σύστημα αξόνων XZ)	190
3.3 Περιθλασιμετρία Ακτίνων X-XRD (X-Ray Diffraction)	199
3.4 Σκληρομετρήσεις κατά Vickers (Hardness Vickers Test)	201
3.4.1 Μακροσκληρότητες κατά Vickers (Macrohardness Vickers Test)	201
3.4.2 Μικροσκληρότητες κατά Vickers (Microhardness Vickers Test)	203
3.5 Μέτρηση Επιφανειακής Τραχύτητας (Roughness Measurement Test)	206
3.6 Δοκιμές Φθοράς λόγω Εκτριβής (Taber Abrasion Test)	207
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	208
4.1 Συνδυασμός αποτελεσμάτων LOM, SEM και EDS	208
4.2 Αποτελέσματα XRD	220
4.3 Αποτελέσματα Σκληρομετρήσεων κατά Vickers	221
4.3.1 Μακροσκληρότητες κατά Vickers	221
4.3.2 Μικροσκληρότητες κατά Vickers	224
4.4 Αποτελέσματα Επιφανειακής Τραχύτητας	227
4.5 Αποτελέσματα Δοκιμών Φθοράς λόγω Εκτριβής	228
Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	229
Κεφάλαιο 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	235

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe ₃ C [10]6
Εικόνα 2 Μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe ₃ C (συνεχείς γραμμές) και Σταθερό διάγραμμα Fe-C
(διακεκομμένες γραμμές) [2]
Εικόνα 3 Υποευτηκτοειδής Χάλυβας με 0.38% wt (635x). Φαίνεται αρκετά καλά η φάση του
προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης [12]
Εικόνα 4 Υπερευτηκτοειδής γάλυβας με 1.4% wt (1000x). Φαίνεται αρκετά καλά η φάση του
ποοευτηκτοειδή σεμεντίτη και του πεολίτη [12]
F_{1} μόνα 5 Πεολιτική δομή σε ευτηκτοειδή γάλυβα (0.8%wt) (650x) [13] 10
Εικόνα 5 Περιτενσίτης με μορφολογία λεπτών πλακιδίων (plate-like) σε γάλυβα Fe-20Ni-
1 2C μετά από απόνωξη στους 4Κ [13]
Fixóva 7 a) Άνω μπαινίτης σε χάλυβα Fe-0 478C-4 87Ni wt% στους 400°C β) Κάτω
$\mu\pi\alpha\nu/\pi^{2}$ π^{2}
Εικόνα 8 Κατηγοριοποίηση κοαματικών στοινείων σε 3 ομάδες βάση της διαλυτότητας τους
E(k) =
σ κροσταλικό πλεγμα του στοπρού και του είσους του στερεού σταλοματός που $σ$ πρωστίζουν [1]
expanded field: (a) aloged field: (d) contracted field [15]
$E_{\text{restrict}} = 10 \text{ (C) closed} = \text{Held}; (C) contracted = \text{Held} [15].$
Εικονα 10 Ωστενιτικοί ρρογχοί σε ποικιλα οιφασικά οιαγραμματά σιοηρού με οιαφορα
κραματικα στοιχεια [15]1/
Εικονα Π Επιρροή των κραματικών στοιχείων, σε ποικιλές συγκεντρώσεις, στον ωστενιτικό
βρόγχο: (a) Τί, (b) Cr [15]
Εικόνα 12 Ενθαλπίες σχηματισμού καρβιδίων, νιτριδίων και βοριδίων [15]
Εικόνα 13 Ατομικά ποσοστά διαλυτότητας νιτριδίων και καρβιδίων στον ωστενίτη, σε
συνάρτηση με τη θερμοκρασία [15]24
Εικόνα 14 Διαγράμματα ισορροπίας Fe-Cr [5],[7]
Εικόνα 15 Η επίδραση της περιεκτικότητας σε C στο διάγραμμα φάσης για ένα χάλυβα 18Cr-
8Ni % κ.β. [5]
Εικόνα 16 Διάγραμμα Schaeffler για ανοξείδωτους χάλυβες σε θερμοκρασία δωματίου [9]. 29
Εικόνα 17 Διαγράμματα ΤΤΤ για τους χάλυβες: α) AISI 4140, β) AISI 4340 [19]
Εικόνα 18 Διαγράμματα CCT για τους χάλυβες: a) AISI 4140, b) AISI 4340 [19]
Εικόνα 19 Τεχνική laser cladding: α) με πλευρική τροφοδοσία πούδρας, β) με λεπτό σύρμα
ως υλικό τροφοδοσίας [38]
Εικόνα 20 α) Ομοαξονική παροχή (coaxial supply), β) Πλευρική παροχή (lateral or off-axis
supply) [32]
Εικόνα 21 Μικροδομή κάθετης τομής χάλυβα AISI 1018 ο οποίος έχει επικαλυφθεί με
μεταλλική πούδρα μαρτενσιτικού ανοξείδωτου γάλυβα 420 μέσω της τεγνικής laser cladding.
Η εικόνα έχει ληφθεί από οπτικό μικροσκόπιο [39]
Εικόνα 22 Μικροδομή κάθετης τομής υλικού με μονοστρωματική επικάλυψη, στο οποίο
φαίνεται η ζώνη διαλυτοποίησης [40]
εικόνα 23 Εικόνα κάθετης τομής υλικού με μονοστοωματική επικάλυνη, στο οποίο
π_{00} σδιοοίζονται τα νεωμετοικά ναοακτροιστικά της επικάλυψης [32] 42
= 24 Κάθετη τομή μικορδομής δείνματος Hastellov C όπου διακοίνεται αύξηση των
π εριογών επικάλυψης διαλυτοποίησης και θεριμκά επηρεασμέψης ζώψης [40]
F_{1} μέτο ματάματα μλικών που υποβλήθηκαν στην τεννική laser cladding σε
$\Delta \kappa = 25$ Exercise for the end of the end
μικρυκλιμακα [51]
Δικόνα 20 το φαινόμενο του πιει-ταπροιοsity [52]

Εικόνα 27 Διάγραμμα της τοπικής μεταβολής της θερμοκρασίας με την απόσταση (G) σε
συνάρτηση με το ρυθμό αύξησης των κόκκων (R) για την επίδραση τους στη μορφολογία και
στο μέγεθος των κόκκων της προκύπτουσας μικροδομής [48]
Εικόνα 28 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και λειτουργίας του Nd: Yag laser [52] 53
Εικόνα 29 Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος [56]
Εικόνα 30 Φθορά λόγω εκτριβής. (α) εκτριβή 2 σωμάτων, (β) εκτριβή 3 σωμάτων [59] 55
Εικόνα 31 Φθορά λόγω πρόσφυσης [56]
Εικόνα 32 Φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων [56]
Εικόνα 33 Φθορά λόγω παλινδρόμησης [57]
Εικόνα 34 Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης [56]
Εικόνα 35 Κατηγορίες φθοράς υλικών σε επαφή ανάλογα με τον τρόπο της σχετικής κίνησής
είος [50]. Εικόνα 36 Διάνοαμμα αναπαράστασης της επιρροής του ασκούμενου φορτίου και της
τανύτητας ολίσθησης στη φθορά ολίσθησης, όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά [60]
Γικόνα 37 Σνηματική αναπαράσταση τοιών διαφορετικών τρόπων αφαίρεσης υλικού στο
$\frac{1}{2}$
$F_{\mu\nu}$
$\Delta t = \frac{1}{2} $ Διαγραμμα αντιστασης στη φυσρα χογω εκτριρης σε σχεση με τη σκληροτητα για διάφορος καταγορίες υλικών στα πλαίσια εκτριβής δύο σομάτων [60]
$F_{\rm uclus}$ 20 Η διάταξη της μεθέδου tabor abrasion [55]
Eukova 39 II ola tačji tije peododo tabel abrasion [55]
Encover 40 Δ uerperinte encoverence encoverence encoverence $(59]$
Eukova 41 Avanapaotaoli tov žapaktipiotikov tij ξ eniquveiakij ξ opij ξ [59]
Εικονά 42 Διάγραμμα επιφανειακού προφιλ $Z(x)$ [39]
Eίκονα 45 Διαγραμμα επιφανείακου προφιλ $y(x)$ και απεικονισή του υπολογισμού της μεσης
$F_{\mu\nu}(\mu\alpha, \Lambda_{a}[56], \dots, 71)$
Elkova 44 $\Delta o kulua A, B kal 1 akpipol μετά την τεχνική laser cladding$
Elkova 45 Δ lokotopog tohoo Struers Discotom. 82
Eικονα 46 Διαδικάσια εγκιρωτισμου
Εικονα 4/ Περιστρεφομένος υσροψυκτός αυτοματός και ημιαυτοματός διόκος στον οποίο
πραγματοποιείται το σταοίο της λειανσης και της στιλρωσης
Eικονα 48 Οπτικο Μικροσκοπίο Olympus BX41M με ενσωματωμένη καμέρα
Εικονά 49 Βασικά μερη ηλεκτρονικου μικροσκοπιου σαρωσης [101]
Εικονα 50 Οι τυποι της εκπεμπομενης ακτινοβολιας και των διεγερμενών ηλεκτρονιών που
ανιχνεύονται στο SEM, καθώς και ο διαχωρισμός τους ως προς το βάθος ανίχνευσης τους στο δοκίμιο προς εξέταση [13]
Εικόνα 51 α) Ενίσχυση της έντασης των ακτίνων Χ κατά την πρόσπτωσή τους σε ένα
κρύσταλλο. β) Σχηματικό διάγραμμα περιθλασίμετρου ακτίνων Χ [4]
Εικόνα 52 α) μικροσκληρόμετρο HV-1000Ζ, β) μακροσκληρόμετρο HV-50Ζ
Εικόνα 53 Μέτρηση επιφανειακής τραχύτητας των, πλέον, πλανισμένων 3 δοκιμίων μέσω
του φορητού τραχυμέτρου
Εικόνα 54 Δοκιμή φθοράς λόγω εκτριβής στο μηχάνημα Carl Frank Taber type abrasion
tester
Εικόνα 55 Μικρογραφία LOM δοκιμίου πούδρας AISI 410L σε μεγέθυνση x200.
Παρατηρούνται σε κάποιους πιο ευμεγέθεις κόκκους τα πλακίδια του φερρίτη και η ύπαρξη πορώδους (πράσινα βέλη)
Εικόνα 56 Μικοονοαφία LOM δοκιμίου πούδοας AISI 4140 σε μενέθυνση x200 Στους
ποοσβεβλημένους κόκκους μπορούν να παρατηρηθούν οι βελόνες του μαρτευσίτη Σε
κάποιους κόκκους παρατηρείται η ύπαρξη πορώδους (πράσινα βέλη) 100
The second

Εικόνα 57 Μικρογραφία LOM δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου) και περλίτης (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου). Σε μερικά όρια ανάπτυξης περλίτη μπορούν να φανούν καλύτερα τα εναλλασσόμενα πλακίδια ευτηκτοειδή φερρίτη και ευτηκτοειδή Εικόνα 58 Μικρονραφία LOM δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έγει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου) και περλίτης (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου). Σε μερικά όρια ανάπτυξης περλίτη μπορούν να φανούν καλύτερα τα Εικόνα 59 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer Εικόνα 60 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) (εντός των μαύρων βελών) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεγνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαξονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε Εικόνα 61 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαξονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου...... 105 Εικόνα 62 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ισαξονικός Εικόνα 63 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και

Εικόνα 64 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία. Με μια πρώτη ματιά, ο σεμεντίτης Εικόνα 65 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface HAZ-SUB) μεταξύ της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) και του υποστρώματος (substrate-SUB) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται η μετάβαση από τη HAZ στο υπόστρωμα, με τον περλίτη να επιστρέφει στην αρχική μορφολογία του, Εικόνα 66 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται, αλλά όχι τόσο έντονα, πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer Εικόνα 67 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x500, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. a) Δενδρίτες σε στήλες (columnar dendrites) κοντά στη διεπιφάνεια BZ-HAZ και β) Ισαξονικοί δενδρίτες (equiaxed dendrites) στο άνω μέρος της Εικόνα 68 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, η μικροδομή είναι λεπτοκρυσταλλική και αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και Εικόνα 69 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η μικροδομή είναι λεπτοκρυσταλλική και αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου, σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα και Εικόνα 70 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών

AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και Εικόνα 71 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται και κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς Εικόνα 72 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά Εικόνα 73 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου $\Gamma(1)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σγηματίζουν δενδριτικές περιογές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται, αλλά όχι τόσο έντονα, πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or Εικόνα 74 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαξονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου...... 117 Εικόνα 75 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και ΑΙSΙ 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Τέλος, ως επί το πλείστων στο άνω μέρος της ΗΑΖ η μικροδομή είναι πιο Εικόνα 76 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και

Εικόνα 77 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται κυρίως λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται και κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς Εικόνα 78 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποίηση σεμεντίτη)...... 121 Εικόνα 79 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or Εικόνα 80 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Το δοκίμιο έγει ημιπροσβληθεί, ώστε να διακριθεί καλά η διεπιφάνεια και ιδιαίτερα η πλευρά της HAZ. Για αυτό το λόγο, οι δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης δε διακρίνονται σε αυτή τη μεγέθυνση. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή και όπως στα δοκίμια των αξόνων ΨΖ, αυτή αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Για την εξακρίβωση της θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο Εικόνα 81 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, όπου φέρει κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, σύμφωνα και με τα δοκίμια των αξόνων ΨΖ. Για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα Εικόνα 82 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται παρόμοια

λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, όπου φέρει κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Για

την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του Εικόνα 83 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι, προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης, με τη διαφορά ότι πλησιάζοντας προς το κάτω μέρος της HAZ, παρατηρούνται πιο ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη. Για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του Εικόνα 84 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποιημένος σεμεντίτης). 127 Εικόνα 85 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity Εικόνα 86 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμοι) και περλίτη (σκουρόχρωμος), αν και για την εξακρίβωση της θα χρειαστεί λεπτομερέστερη ανάλυση του Εικόνα 87 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτη. Βέβαια, για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση Εικόνα 88 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται παρόμοια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Βέβαια, για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί Εικόνα 89 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης, με τη διαφορά ότι πλησιάζοντας προς το κάτω μέρος της HAZ, παρατηρούνται πιο ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη. Για την εξακρίβωση των μικροδομικών γαρακτηριστικών θα γρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του Εικόνα 90 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης Εικόνα 91 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου $\Gamma(2)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν κυρίως ισαξονικούς δενδρίτες. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing Εικόνα 92 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται ευμεγέθης περλίτης και περικρυσταλλικά Εικόνα 93 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρείται πιο ευμεγέθης περλίτης, περικρυσταλλικά των οποίων έχει κατακρημνιστεί προευτηκτοειδής φερρίτης βελονοειδούς ή/και γωνιώδους μορφολογίας, μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου, σε σύγκριση αντιστοίγως με τη μικροδομή κοντά στη Εικόνα 94 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικρότερου Εικόνα 95 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου $\Gamma(2)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται κυρίως λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς Εικόνα 96 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία. Επιπλέον, πιθανόν να υπάρχει και ένα άλλο μικρογραφικό συστατικό, καθώς παρατηρούνται κάποιοι κόκκοι πιο ανάγλυφοι με πιο έντονη ανοιχτόγρωμη αντίθεση πεδίου. Υπάρχει πιθανότητα, επίσης, αυτή η δομή και το χρώμα να έχει προκύψει από τη μεταλλογραφική προετοιμασία (στίλβωση και προσβολή). Συνεπώς, για την εξακρίβωση αυτού του προβληματισμού χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο Εικόνα 97 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου πούδρας AISI 410L: a) Low Vacuum σε μεγέθυνση x50 και β) High Vacuum σε μεγέθυνση x100...... 140 Εικόνα 98 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου πούδρας AISI 4140: a) Εικόνα 99 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (σκουρόγρωμη αντίθεση πεδίου) και ευμεγέθης περλίτης (ανοιγτόγρωμη αντίθεση πεδίου). Εικόνα 100 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x1000. Παρατηρούνται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης. Σε αυτή τη μεγέθυνση, στα όρια ανάπτυξης του περλίτη φαίνονται τα Εικόνα 101 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έχει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (σκουρόγρωμη Εικόνα 102 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έχει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x1000. Παρατηρούνται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης. Σε αυτή τη μεγέθυνση, στα όρια ανάπτυξης του περλίτη φαίνονται τα εναλλασσόμενα πλακίδια Εικόνα 103 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σγετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect) και νάνοκατακρημνίσεις καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη) στο εσωτερικό ορισμένων μαρτενσιτικών Εικόνα 104 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης και φαίνεται στο πάνω μέρος της μικρογραφίας. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ισαξονικός Εικόνα 105 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(1), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους Εικόνα 106 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιγειακή ανάλυση του δοκιμίου A(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιγειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιγειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του Εικόνα 107 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου και ισαξονικός Εικόνα 108 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Αναλυτικότερα, διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης μικρότερου μεγέθους, σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως. 151 Εικόνα 109 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο σεμεντίτης έχει υποστεί σφαιροποίηση. Η κυκλωμένη

Εικόνα 110 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x5000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Φαίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, μέρος των Εικόνα 111 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect) και νάνοκατακρημνίσεις καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη) στο εσωτερικό ορισμένων μαρτενσιτικών Εικόνα 112 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέγεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαξονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου......155 Εικόνα 113 Τοπική στοιγειακή ανάλυση του δοκιμίου B(1), μέσω EDS, το οποίο έγει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. α) Περιοχή επικάλυψης, β) ΗΑΖ πολύ κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας και Εικόνα 114 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιγειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιγειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του Εικόνα 115 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου.

Εικόνα 116 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και σφαιροποιημένος σεμεντίτης στο εσωτερικό του περλίτη (μπλε βέλη). Τέλος, παρατηρούνται και όρια ανάπτυξης που υποδηλώνουν πιθανόν την ύπαρξη μπαινιτικής μικροδομής (κόκκινα βέλη).

Εικόνα 117 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και Εικόνα 118 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000 του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται και εδώ ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και Εικόνα 119 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο Εικόνα 120 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης εντός των Εικόνα 121 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing Εικόνα 122 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η

άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη). Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται Εικόνα 123 Τοπική στοιγειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(1), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. α) Περιοχή επικάλυψης και β) ΗΑΖ......166 Εικόνα 124 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του Εικόνα 125 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Επίσης, στο εσωτερικό ορισμένων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη, απαντώνται νάνο-Εικόνα 126 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικρότερου μεγέθους, πιθανόν σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως. Επιπροσθέτως, όπως και στην προηγούμενη εικόνα, φαίνονται ενδοκρυσταλλικά νάνοκατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) Εικόνα 127 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου $\Gamma(1)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Διακρίνονται καλύτερα τα ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και ο Εικόνα 128 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου $\Gamma(1)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο Εικόνα 129 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν ισαξονικούς δενδρίτες. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or Εικόνα 130 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους μαρτενσιτικούς δενδρίτες, εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη). Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται Εικόνα 131 Τοπική στοιγειακή ανάλυση του δοκιμίου A(2), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. α) Περιοχή επικάλυψης και β) ΗΑΖ......174 Εικόνα 132 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, Εικόνα 133 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Εικόνα 134 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των

Εικόνα 136 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις και μικρότερου μεγέθους, ισαξονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και όρια περλίτη. Πιο συγκεκριμένα, εντός των περλιτών διακρίνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη και εντός κάποιων κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη, η κατακρήμνιση καρβιδίων σε νάνο-κλίμακα. Η κυκλωμένη περιοχή φαίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στην επόμενη μικρογραφία.... 179 Εικόνα 137 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Φαίνονται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση τα καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός του περλίτη (μπλε βέλη) και η νάνοκατακρήμνιση των καρβιδίων εντός των κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη).

Εικόνα 138 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).

Εικόνα 141 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, Εικόνα 142 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μικρότερου μεγέθους, γωνιώδους μορφολογίας και ισαξονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαξονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Εικόνα 143 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Κατά κύριο λόγο, διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης παρόμοιου μεγέθους, με παρόμοιο κλάσμα όγκου. Επίσης, σε ορισμένους κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σημειώνεται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (κίτρινα βέλη) και σε ορισμένα όρια ανάπτυξης περλίτη ανιχνεύεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης (μπλε βέλη). Τέλος, ορισμένα όρια ανάπτυξης, όπως αυτά της Εικόνα 144 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Φαίνονται α) κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, στο εσωτερικό των οποίων απαντώνται νάνο-κατακρημνίσεις καρβιδίων (κίτρινα βέλη), β) λιγότερο εμφανώς, καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός του περλίτη (μπλε βέλη) και γ) πιθανόν μπαινιτικός σχηματισμός, όπως αυτός που υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος...... 187 Εικόνα 145 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις και μικρότερου μεγέθους, γωνιώδεις κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη (πράσινα βέλη) και ισαξονικό περλίτη. Πιο συγκεκριμένα, εντός του περλίτη διακρίνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη (μπλε βέλη) και εντός κάποιων κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη, η κατακρήμνιση Εικόνα 146 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις ισαξονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθη περλίτη, οι οποίες θυμίζουν τη μικροδομή του υποστρώματος με τη μόνη διαφορά, ότι ο περλίτης αποτελείται από σφαιροποιημένο Εικόνα 147 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect). Τέλος, ανιγνεύονται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, ομοιόμορφα Εικόνα 148 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και ΑΙSΙ 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέγεια έγει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους μαρτενσιτικούς δενδρίτες, εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όγι ισαζονικοί, κάποιοι από τους οποίους φέρουν στο εσωτερικό τους κατακρημνίσεις καρβιδίων (κίτρινα βέλη). Επίσης, παρατηρείται και περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Τέλος, ακριβώς στη διεπιφάνεια του δοκιμίου, κατά μήκος της, έχουν κατακρημνιστεί, πιθανόν, καρβίδια Εικόνα 149 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(2), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. α) Περιοχή επικάλυψης β) ΗΑΖ πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω......192 Εικόνα 150 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιγειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιγειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άξονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άξονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη ΗΑΖ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, Εικόνα 151 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Λίγο πιο κάτω από τη διεπιφάνεια, εντός της ΗΑΖ, σχετικά με την προηγούμενη φωτογραφία, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη (πράσινα βέλη),

μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Φαίνονται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, γωνιώδους μορφολογίας, όπου στο εσωτερικό ορισμένων έχουν κατακρημνιστεί καρβίδια (πράσινα βέλη). Επίσης, διακρίνονται πιθανόν όρια ανάπτυξης που υποδηλώνουν την ύπαρξη της μπαινιτικής μικροδομής (κόκκινα βέλη), καθώς διαφέρουν από την περλιτική δομή, η οποία στο εσωτερικό της μπορεί να φέρει και σφαιροποιημένο σεμεντίτη (μπλε βέλη)...... 196 Εικόνα 154 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Κατά κύριο λόγο, διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης μικρότερου μεγέθους. Επίσης, σε ορισμένους κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σημειώνεται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (κίτρινα βέλη) και σε ορισμένα όρια ανάπτυξης περλίτη ανιχνεύονται καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη (μπλε βέλη). Τέλος, ορισμένα όρια ανάπτυξης, όπως αυτά της παραπάνω κόκκινης κυκλωμένης

Εικόνα 155 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου $\Gamma(2)$ το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται, κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (πράσινα βέλη), γωνιώδους μορφολογίας, ισαξονικός περλίτης (μπλε βέλη), ορισμένα όρια ανάπτυξης του οποίου φέρουν καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη στο εσωτερικό τους και πιθανόν όρια ανάπτυξης που υποδηλώνουν την ύπαρξη της μπαινιτικής δομής (κόκκινα βέλη)...... 198 Εικόνα 156 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κάτω τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΧΖ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις ισαξονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, οι οποίες θυμίζουν τη μικροδομή του υποστρώματος με τη μόνη διαφορά, ότι ο περλίτης αποτελείται από σφαιροποιημένο Εικόνα 157 Συγκριτικά διαγράμματα XRD του as-received υποστρώματος AISI 1060 και του

Εικόνα 158 Συγκριτικά διαγράμματα XRD του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060 και
της επικάλυψης των δοκιμίων Α (50:50), Β (80:20) και Γ (90:10)
Εικόνα 159 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers του δοκιμίου as-received
υποστρώματος και του ανοπτημένου υποστρώματος
Εικόνα 160 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB
των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1)
Εικόνα 161 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB
των δοκιμίων Α(2), Β(2) και Γ(2)
Εικόνα 162 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των πουδρών AISI 410L
και AISI 4140
Εικόνα 163 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων
A(1), B(1) και Γ(1)
Εικόνα 164 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ
και SUB των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1)
Εικόνα 165 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων
Α(2), Β(2) και Γ(2)
Εικόνα 166 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ
και SUB των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2)
Εικόνα 167 Συγκριτικά διαγράμματα της αθροιστικής απώλειας βάρους (g) σε συνάρτηση με
τη συνολική απόσταση που διανύθηκε (m) κατά τη διάρκεια της δοκιμής φθοράς για το κάθε
ένα από τα τρία δοκίμια A(1) (μπλε χρώμα), B(1) (κόκκινο χρώμα) και Γ(1) (πράσινο
χρώμα)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Κατάταξη σε κατηγορίες των σημαντικότερων ιδιοτήτων ενός προϊόντος της
τεχνικής laser cladding [32]
Πίνακας 2 Τυπική χημική σύσταση των μεταλλικών πουδρών AISI 410L και AISI 414078
Πίνακας 3 Τυπική χημική σύσταση και στοιχειακή ανάλυση (EDS) χαλύβδινου
υποστρώματος AISI 1060
Πίνακας 4 Αναλογία των προστιθέμενων χαλύβδινων πουδρών
Πίνακας 5 Παράμετροι τεχνικής Laser Cladding Deposition
Πίνακας 6 Παράμετροι της μεθόδου μέτρησης επιφανειακής τραχύτητας
Πίνακας 7 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της πούδρας 410L 140
Πίνακας 8 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της πούδρας 4140 141
Πίνακας 9 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, του δοκιμίου as received
AISI 1060
Πίνακας 10 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, του ανοπτημένου δοκιμίου
AISI 1060
 ΑΙSΙ 1060
AISI 1060
ΑΙSΙ 1060

Πίνακας 15 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του
δοκιμίου Γ(1)
Πίνακας 16 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης και β) HAZ,
του δοκιμίου Γ(1)
Πίνακας 17 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του
δοκιμίου Α(2)
Πίνακας 18 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης και β) HAZ,
του δοκιμίου Α(2)
Πίνακας 19 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του
δοκιμίου B(2)
Πίνακας 20 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης, β) HAZ
πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω, του δοκιμίου Β(2)
Πίνακας 21 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του
δοκιμίου Γ(2)
Πίνακας 22 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης, β) HAZ
πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω, του δοκιμίου Γ(2)
Πίνακας 23 Αποτελέσματα μέτρησης επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων Α, Β και Γ. 206
Πίνακας 24 Αποτελέσματα δοκιμής φθοράς λόγω εκτριβής για τα δοκίμια Α,Β και Γ 207

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</u>

1.1 Χάλυβες και Βασικές Κατηγορίες Χαλύβων

Με το πέρασμα των χρόνων, μία μεγάλη ομάδα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα μεταλλικά υλικά, η οποία απαντάται σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών σε ποικίλους τομείς, είναι αυτή των χαλύβων. Η καταιγιστική τους χρήση οφείλεται στο χαμηλό τους κόστος σε συνδυασμό με την αλλοτροπία του σιδήρου και τους μετασχηματισμούς φάσεων, οι οποίοι εξαρτώνται από την επιλογή των κραματικών στοιχείων και της προστιθέμενης ποσότητας αυτών, από τα οποία απαρτίζεται η χημική σύσταση ενός χάλυβα, καθώς και από την επιλογή των διεργασιών παραγωγής και διαμόρφωσής τους. Ο προαναφερόμενος συνδυασμός στοχεύει στη δημιουργία πολυποίκιλων μικροδομών και στην απόκτηση κατάλληλων ιδιοτήτων (π.χ. μηχανικών, ηλεκτρικών, κ.α.), τα οποία αποτελούν καθοριστικά χαρακτηριστικά για ένα χάλυβα και τον καθιστούν κατάλληλο για πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, ναυπηγική, αρχιτεκτονική, κ.α.).

Πιο συγκεκριμένα, χάλυβες ονομάζονται τα κράματα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C) με ποσοστιαία περιεκτικότητα σε άνθρακα έως 2.1% στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο σίδηρος, το κύριο κραματικό στοιχείο των χαλύβων, συναντάται κάτω από το σημείο τήξης σε τρεις αλλοτροπικές μορφές, τον α-Fe, το γ-Fe και το δ-Fe. Αυτές οι μορφές διαφέρουν ως προς την κρυσταλλική τους δομή. Ο α-Fe και ο δ-Fe κρυσταλλώνονται στη χωροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (body-centered cubic, bcc) και ο γ-Fe στην εδροκεντρωμένη κυβική κρυσταλλική δομή (facecentered cubic, fcc). Η bcc δομή σταθεροποιείται μέχρι τους 912°C και σε θερμοκρασιακό εύρος από τους 1394°C έως το σημείο τήξης, στους 1530°C. Στο εύρος 1394°C-1530°C ο σίδηρος ονομάζεται δ-Fe. Η fcc δομή σταθεροποιείται από τους 912°C έως τους 1394°C. **[1-2]**

Ο σίδηρος σε κάθε μία από τις τρεις μορφές του (α, γ, δ) σχηματίζει στερεά διαλύματα παρεμβολής με άτομα μικρότερων ατομικών ακτινών, όπως ο άνθρακα, το άζωτο, το βόριο και το υδρογόνο. Εστιάζοντας στον άνθρακα, ο οποίος είναι το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο παρεμβολής στο πλέγμα του σιδήρου, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι σε κάθε αλλοτροπική μορφή του σιδήρου, η διαλυτότητα του άνθρακα είναι διαφορετική. Δηλαδή, στο σίδηρο γ (γ-Fe) η διαλυτότητα του άνθρακα φθάνει μέγιστη τιμή 2.1% κατά βάρος και το στερεό διάλυμα άνθρακα στο

γ-Fe ονομάζεται ωστενίτης (γ). Αντιστοίχως, στο σίδηρο α (α-Fe) η διαλυτότητα του άνθρακα κυμαίνεται από 0.008% έως 0.025% κατά βάρος και το στερεό διάλυμα άνθρακα στον α-Fe ονομάζεται φερρίτης (α). Στο θερμοκρασιακό εύρος 1394°C-1530°C, στο σίδηρο δ (δ-Fe), λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, το πλέγμα διαστέλλεται και η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα είναι μεγαλύτερη, μέχρι και το ποσοστό των 0.10% κατά βάρος. Το στερεό διάλυμα άνθρακα στον δ-Fe ονομάζεται φερρίτης-δ. [1-2]

Ο άνθρακας, λοιπόν, σχηματίζει στερεό διάλυμα παρεμβολής με το σίδηρο και είναι το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο παρεμβολής στο πλέγμα αυτού, διότι επηρεάζει την κινητική των μετασχηματισμών και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Δηλαδή, σε χάλυβες οι οποίοι απαιτούν υψηλή ολκιμότητα, δυσθραυστότητα και καλή συγκολλησιμότητα, το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα είναι χαμηλό, ενώ σε χάλυβες που απαιτούν αυξημένη αντοχή, υψηλή σκληρότητα και σημαντική αντίσταση σε κόπωση και σε φθορά, το ποσοστό του άνθρακα είναι υψηλό. [2]

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες δύο γενικές κατηγορίες:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες: Περιέχουν, εκτός από άνθρακα, προσμίξεις άλλων κραματικών στοιχείων σε ποσοστό μικρότερο από 1% με 1.5% κ.β.. Τέτοια κραματικά στοιχεία μπορεί να είναι το μαγγάνιο (Mn), το πυρίτιο (Si), το θείο (S), ο φώσφορος (P). Επίσης, οι κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες υποδιαιρούνται, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες (0.025-0.8% κ.β. σε C), στους ευτηκτοειδείς χάλυβες (0.8% κ.β. σε C) και στους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες (0.8-2.1% κ.β. σε C).
- Κραματωμένοι χάλυβες: Περιέχουν, εκτός από άνθρακα, προσμίξεις κραματικών στοιχείων σε ποσοστό μεγαλύτερο από 1.5% κ.β. και διακρίνονται στους ελαφρά κραματωμένους (με προσμίξεις <2% κ.β.), στους μέτρια κραματωμένους (με προσμίξεις από 2%-10%κ.β.) και στους ισχυρά κραματωμένους (με προσμίξεις >10% κ.β.)

Επιπροσθέτως, οι κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες, σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα :

- Μαλακοί χάλυβες ή χάλυβες χαμηλού άνθρακα (mild steels or low-carbon steels): Διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες, στους χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 0.15% κ.β. και στους χάλυβες με 0.15%-0.30% C κ.β.. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντοχή και σκληρότητα και από καλή εν ψυχρώ διαμορφωσιμότητα και συγκολλησιμότητα. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ελασμάτων.
- Χάλυβες μετρίου άνθρακα (medium-carbon steels): Η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα ανέρχεται σε εύρος 0.30-0.60% κ.β.. Συνδυάζουν καλή ολκιμότητα και αντοχή, ενώ η τελευταία μπορεί να αυξηθεί με θερμικές κατεργασίες. Χρησιμοποιούνται κυρίως στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας (π.χ. κατασκευή αξόνων).
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα (high-carbon steels): Η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα κυμαίνεται σε εύρος 0.60-1% κ.β. και διακρίνονται για την υψηλή αντοχή τους και την καλή αντίστασή τους στη φθορά.
- Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high-carbon steels): Η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα κυμαίνεται από 1.25% έως 2% κ.β.. Χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή αντοχή και καλή ολκιμότητα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες παρουσιάζουν υπερπλαστική συμπεριφορά. [2-3]

Τέλος, οι χάλυβες βάση των εφαρμογών τους διακρίνονται στους ανοξείδωτους χάλυβες, στους χάλυβες κατασκευής, στους εργαλειοχάλυβες και στους χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών. Οι χάλυβες κάθε κατηγορίας διακρίνονται από τις κατάλληλες μηχανικές, αντιδιαβρωτικές, ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στις αντίστοιχες εφαρμογές. [4]

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες αποτελούν μια κατηγορία των ισχυρά κραματωμένων χαλύβων, οι οποίοι περιέχουν το λιγότερο 11% Cr, χαρακτηριστικό το οποίο τους καθιστά αρκετά ανθεκτικούς στη διάβρωση, λόγω του σχηματισμού ενός παθητικοποιημένου στρώματος οξειδίου του χρωμίου (Cr₂O₃) με την παρουσία του οξυγόνου. Επιπλέον, οι ανοξείδωτοι χάλυβες μπορούν να περιέχουν σημαντικές περιεκτικότητες σε Ni, Mo, Mn, Si, C,Cu, Ti, Al, S, N, Nb, έτσι ώστε να συμβάλλουν στη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση και οξείδωση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες, της συγκολλησιμότητας, της μηχανικής αντοχής και άλλων ιδιοτήτων. Ο άνθρακας, συνήθως, κυμαίνεται σε ποσότητες, λιγότερο από 0,03% έως πάνω από
1,0% σε ορισμένες κατηγορίες μαρτενσιτικών χαλύβων. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε Cr και σημαντικών περιεκτικοτήτων σε άλλα κραματικά στοιχεία, οι ανοξείδωτοι χάλυβες βασίζονται στο διάγραμμα Fe-Cr και στο διάγραμμα Schaeffler, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω σε άλλο κεφάλαιο. [5-9]

Οι κατηγορίες των ανοξείδωτων χαλύβων είναι πέντε, α) φερριτικοί, β) μαρτενσιτικοί, γ) ωστενιτικοί, δ) διφασικοί και ε) χάλυβες με σκλήρωση από κατακρήμνιση. Οι τέσσερις πρώτες διακρίνονται με βάση τη χαρακτηριστική κρυσταλλική δομή και μικροδομή τους και η τελευταία βασίζεται, κυρίως, στο είδος της κατεργασίας που χρησιμοποιείται και αφορά χάλυβες που υφίστανται σκλήρωση μέσω γήρανσης. [6-8],[10],[14]

1.2 Μετασταθές Διάγραμμα Σιδήρου-Σεμεντίτη (Fe-Fe₃C)

Το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη Fe-Fe₃C, που παρουσιάζεται παρακάτω στην *Εικόνα 1*, περιγράφει τη μικροδομή που μπορεί να έχει ένας κοινός ή ανθρακούχος χάλυβας ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται μετασταθές γιατί ο σεμεντίτης είναι μια μετασταθής ένωση η οποία απαντάται στους χάλυβες, σε σύγκριση με το γραφίτη ο οποίος αποτελεί μια σταθερή ένωση και συναντάται στους χυτοσιδήρους. Για αυτό το λόγο και το μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C περιγράφει τους χάλυβες, ενώ το σταθερό διάγραμμα Fe-C περιγράφει τα κράματα σιδήρου, τα οποία περιέχουν τον άνθρακα σε μορφή γραφίτη, συνεπώς και τους χυτοσιδήρους. Τα δύο αυτά διαγράμματα απεικονίζονται στην *Εικόνα 2*.

Στον άξονα χ, το διάγραμμα ξεκινά από τον καθαρό σίδηρο με 0% περιεκτικότητα σε άνθρακα κ.β. και σταματά μέχρι η περιεκτικότητα σε άνθρακα να φτάσει το ποσοστό των 6.67% κ.β. που αντιστοιχεί στη χημική σύνθεση του σεμεντίτη (Fe₃C). Το διάγραμμα αναφέρεται στους σιδήρους με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 0.025% κ.β., στους χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.025% έως 2.1% και στους λευκούς χυτοσιδήρους με περιεκτικότητα σε άνθρακα μεγαλύτερη του 2.1%. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα εστιάσει στους χάλυβες.

Όσον αφορά τους χάλυβες, λοιπόν, εντός του διαγράμματος, παρατηρούνται κάποιες μονοφασικές, κάποιες διφασικές και κάποιες τριφασικές περιοχές. Οι μονοφασικές

περιοχές πέραν του σιδήρου (με 0% κ.β. C) και του σεμεντίτη (με 6.67% κ.β. C) είναι: α) το τήγμα L στις υψηλές θερμοκρασίες, β) το στερεό διάλυμα παρεμβολής άνθρακα στο δ-σίδηρο (δ-φερρίτης), γ) το στερεό διάλυμα παρεμβολής άνθρακα στο γ-σίδηρο (ωστενίτης) και δ) το στερεό διάλυμα παρεμβολής άνθρακα στον α-σίδηρο (α-φερρίτης). Οι διφασικές περιοχές περιορίζονται δεξιά και αριστερά από τις προαναφερθείσες μονοφασικές περιοχές και είναι: α) η ισορροπία μιας στερεάς φάσης με τήγμα (δ+L, γ+L) και β) η ισορροπία μεταξύ δύο στερεών φάσεων (δ+γ, α+γ, α+Fe₃C). [**10**]

Τα σημεία του μετασταθούς διαγράμματος στα οποία παρατηρείται τριφασική ισορροπία για τους χάλυβες είναι τα ακόλουθα δύο :

<u>Περιτηκτικό σημείο</u>: Στους 1492°C τήγμα περιεκτικότητας σε άνθρακα 0.55% κ.β. και δ-φερρίτης με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.10% κ.β. αντιδρούν και μετασχηματίζονται ισοθερμοκρασιακά σε ωστενίτη (γ) με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.18% κ.β..

1492°C : L(0.55%C) + δ(0.10%C) → γ(0.18%C)

Ευτηκτοειδές σημείο: Στους 723°C ωστενίτης με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.8% κ.β. διασπάται ισοθερμοκρασιακά σε α-φερρίτη με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.025% κ.β. και σε σεμεντίτη (6.67% κ.β. σε C). Το μικρογραφικό συστατικό που προκύπτει ονομάζεται περλίτης.

 $723^{\circ}C: \gamma(0.8\%C) \rightarrow \alpha(0.025\%C) + Fe_{3}C$ [10]



Εικόνα 1 Μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C [10].



Εικόνα 2 Μετασταθές διάγραμμα Fe-Fe₃C (συνεχείς γραμμές) και Σταθερό διάγραμμα Fe-C (διακεκομμένες γραμμές) [2].

1.3 Φάσεις και Μικρογραφικά Συστατικά των Χαλύβων

Οι πιο συνήθεις φάσεις που απαντώνται στους χάλυβες είναι ο ωστενίτης, ο αφερρίτης, ο δ-φερρίτης και ο μαρτενσίτης. Τα μικρογραφικά συστατικά τα οποία παρατηρούνται σε πολλά είδη χαλύβων είναι ο περλίτης και ο μπαινίτης.

<u>Ωστενίτης (γ)</u>: Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο κεφάλαιο 1.1, αποτελεί το στερεό διάλυμα άνθρακα στο γ-Fe, ο οποίος είναι μία αλλοτροπική μορφή του σιδήρου η οποία κρυσταλλώνεται στην fcc δομή και σταθεροποιείται στο θερμοκρασιακό εύρος 912°C-1394°C. Οι θέσεις παρεμβολής του άνθρακα στον ωστενίτη είναι οκταεδρικής μορφής. Ο ατομικός παράγοντας πλήρωσης των ατόμων στην εδροκεντρωμένη κυβική δομή είναι 74%. Επίσης, η διαλυτότητά του άνθρακα στο γ-Fe είναι υψηλή σε σχέση με το φερρίτη και φθάνει μέχρι τη μέγιστη τιμή 2.1% στη θερμοκρασία των 1147°C. Τέλος, ο ωστενίτης είναι παραμαγνητικός. **[10]** <u>α-Φερρίτης (α):</u> Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο κεφάλαιο 1.1, αποτελεί το στερεό διάλυμα άνθρακα στον α-Fe, ο οποίος είναι μία αλλοτροπική μορφή του σιδήρου η οποία κρυσταλλώνεται στη bcc δομή και σταθεροποιείται σε θερμοκρασία μέχρι τους 912°C. Οι θέσεις παρεμβολής του άνθρακα στον α-Fe είναι τετραεδρικής μορφής. Ο ατομικός παράγοντας πλήρωσης των ατόμων στην χωροκεντρωμένη κυβική δομή είναι 68%. Επίσης, η διαλυτότητά του άνθρακα στον α-Fe, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0.008%, ενώ η μέγιστη διαλυτότητα παρατηρείται στη θερμοκρασία των 723°C και είναι 0.025%. Τέλος, ο α-φερρίτης είναι μαγνητικός σε θερμοκρασίες έως τους 768°C, καθώς αυτή η θερμοκρασία αποτελεί τη θερμοκρασία Curie, κάτω από την οποία ο φερρίτης διαθέτει μαγνητικές ιδιότητες, ενώ πάνω από αυτήν τις χάνει. [**10-11**]



Εικόνα 3 Υποευτηκτοειδής Χάλυβας με 0.38% wt (635x). Φαίνεται αρκετά καλά η φάση του προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης [12].

<u>δ-Φερρίτης (δ-Fe)</u>: Όπως, επίσης, αναφέρθηκε παραπάνω στο κεφάλαιο 1.1, αποτελεί το στερεό διάλυμα άνθρακα στο δ-Fe, ο οποίος είναι μία αλλοτροπική μορφή του σιδήρου η οποία κρυσταλλώνεται στη bcc δομή και σταθεροποιείται στο θερμοκρασιακό εύρος 1394°C-1530°C. Οι θέσεις παρεμβολής του άνθρακα στο δ-Fe είναι τετραεδρικής μορφής. Ο ατομικός παράγοντας πλήρωσης των ατόμων στην χωροκεντρωμένη κυβική δομή είναι και εδώ 68%. Βέβαια, σε αντίθεση με τον αφερρίτη, η μέγιστη διαλυτότητά του άνθρακα στο δ-Fe είναι το πλέγμα υφίστανται φαινόμενα διαστολής, λόγω των υψηλότερων

θερμοκρασιών στις οποίες συναντάται. Για τον ίδιο λόγο, ο δ-φερρίτης είναι μη μαγνητικός καθώς ξεπερνά τη θερμοκρασία των 768°C. [10-11]

Σεμεντίτης (Fe₃C): Αποτελεί ενδομεταλλικό συστατικό με αυστηρή στοιχειομετρική ένωση και κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό σύστημα. Ως καρβίδιο χαρακτηρίζεται από μεγάλη σκληρότητα της τάξεως των 850HV έως 1100HV, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά ψαθυρός. Η περιεκτικότητά του σε άνθρακα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι 6.67% κ.β.



Εικόνα 4 Υπερευτηκτοειδής χάλυβας με 1.4% wt (1000x). Φαίνεται αρκετά καλά η φάση του προευτηκτοειδή σεμεντίτη και του περλίτη [12].

<u>Περλίτης</u>: Αποτελεί ένα μικρογραφικό συστατικό των χαλύβων και αποτελείται από εναλλασσόμενα πλακίδια α-φερρίτη και σεμεντίτη. Πιο συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του ξεκινά με την εμφάνιση φύτρων σεμεντίτη στα όρια των κόκκων του ωστενίτη και τα φύτρα αυτά αναπτύσσονται προχωρώντας υπό μορφή πλακιδίων προς το εσωτερικό των κόκκων του ωστενίτη. Στη συνέχεια, επειδή η ανάπτυξη του φύτρου σεμεντίτη σε πλακίδιο απαιτεί μεγάλη ποσότητα άνθρακα, οι γειτονικές ωστενιτικές περιοχές του απεμπλουτίζονται σε άνθρακα σε μεγάλο ποσοστό, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται δύο φύτρα φερρίτη σε επαφή με το αναπτυσσόμενο πλακίδιο σεμεντίτη. Συνεπώς, η ανάπτυξη φύτρων φερρίτη αποβάλλει ποσότητα άνθρακα προς το γειτονικό ωστενίτη ο οποίος επανεμπλουτίζεται σε άνθρακα, ωθώντας στο σχηματισμό δύο νέων φύτρων σεμεντίτη. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς και έτσι προκύπτουν τα εναλλασσόμενα πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη, τα οποία χαρακτηρίζονται από συνεκτική διεπιφάνεια και κοινό κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό. [10-11]



Εικόνα 5 Περλιτική δομή σε ευτηκτοειδή χάλυβα (0.8%wt) (650x) [13].

Μαρτενσίτης: Αποτελεί μία μετασταθή φάση, η οποία είναι στερεό διάλυμα σε υπέρκορη κατάσταση και προέρχεται από το μετασχηματισμό του ωστενίτη, ο οποίος είναι ασταθής σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ο μετασχηματισμός αυτός δεν πραγματοποιείται μέσω διαχυσιακών φαινομένων, αλλά με τη διάτμηση του πλέγματος του ωστενίτη, συνοδευόμενη από τη διαστολή του όγκου του, ώστε να αλλάξει η κρυσταλλική του δομή και να ληφθεί μια νέα η οποία μοιάζει περισσότερο στη δομή του φερρίτη. Για αυτό το λόγο, συνήθως η κρυσταλλική δομή του μαρτενσίτη μπορεί να είναι είτε χωροκετρωμένη κυβική (bcc), είτε χωροκεντρωμένη τετραγωνική (body-centered tetragonal, bct) και του έχει δοθεί το όνομα α΄. Πιο συγκεκριμένα, η τετραγωνικότητα του πλέγματος εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα, καθώς αυτή αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, λόγω της διάταξης των ατόμων μέσα στην κυψελίδα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός στους χάλυβες, πραγματοποιείται αθερμικά, καθώς, οφείλεται στην απότομη απόψυξη (βαφή) μέσα σε ένα δραστικό ψυκτικό μέσο (συνήθως νερό ή λάδι) κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία Ms (θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, συνήθως γύρω στους 250°C). Για αυτό το λόγο και δεν περιγράφεται από το μετασταθές διάγραμμα του σιδήρου-σεμεντίτη, αλλά από άλλα διαγράμματα τα οποία θα συζητηθούν στο κεφάλαιο 1.5. Ένας άλλος λόγος που

αποδεικνύει το μη διαχυσιακό χαρακτήρα του μετασχηματισμού, είναι ότι η χημική σύσταση του μαρτενσίτη είναι πανομοιότυπη με αυτή του ωστενίτη (διατηρεί την περιεκτικότητα σε άνθρακα). Η συνήθης μορφολογία που παρατηρείται είναι αυτή των βελονών ή των πλακοειδών σχηματισμών. Όταν ο σχηματισμός του μαρτενσίτη περιορίζεται, συνήθως δομούνται λεπτά δισκοειδή πλακίδια (platelets) ή λεπτά πλακίδια (laths), ώστε να μειωθεί η ενέργεια που οφείλεται στην παραμόρφωση του ωστενίτη. Επιπροσθέτως, σημειώνονται και άλλα είδη μορφολογιών, όπως η φακοειδής (lenticular) και η μορφή "πεταλούδας" (butterfly). Τα είδη των μαρτενσιτικών μορφολογιών που μπορούν να προκύψουν εξαρτώνται από το συνδυασμό της θερμοκρασίας έναρξης και παύσης της θερμικής κατεργασίας, του ρυθμού απόψυξης και της περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα και σε άλλα κραματικά στοιχεία (π.χ. Ni, Cr). Τέλος, η φάση του μαρτενσίτη προσδίδει υψηλή σκληρότητα σε ένα χάλυβα αλλά μειώνει τη δυσθραυστότητα. Συνεπώς, αρκετές φορές οι χάλυβες υποβάλλονται στο στάδιο της επαναφοράς σε θερμοκρασίες 150°C-650°C, ώστε να επιτευχθεί ένας συνδυασμός μικρότερης σκληρότητας και μεγαλύτερης ολκιμότητας και δυσθραυστότητας, ανάλογα με τις προοριζόμενες εφαρμογές. [5],[11]



Εικόνα 6 Μαρτενσίτης με μορφολογία λεπτών πλακιδίων (plate-like) σε χάλυβα Fe-20Ni-1.2C μετά από απόψυξη στους 4K [13].

<u>Μπαινίτης</u>: Αποτελεί μικρογραφικό συστατικό το οποίο σχηματίζεται, όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε θερμοκρασίες ανώτερες από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και στη συνέχεια ψυχθεί σε θερμοκρασίες χαμηλότερες, περίπου, από τους 550°C, αλλά υψηλότερες από τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s). Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός, όπως ο μαρτενσιτικός, περιγράφεται και αυτός από τα διαγράμματα που θα αναφερθούν στο κεφάλαιο 1.5. Η δομή του διακρίνεται από στενόμακρα πλακίδια φερρίτη με διάσπαρτα λεπτά καρβίδια στο εσωτερικό ή στα όρια τους. Ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού του μπαινίτη γίνεται ο διαχωρισμός του σε ανώτερο και κατώτερο μπαινίτη. Δηλαδή, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εύρους (400°C-550°C) περίπου, σχηματίζεται ο ανώτερος μπαινίτης, του οποίου η μορφολογία, συνήθως, αποτελείται από γειτονικούς στενόμακρους κόκκους φερρίτη οι οποίοι δομούνται σαν λεπτά πλακίδια (laths, lath shaped ferrite) ή πιο μεγεθυμένα πλακίδια (plackets), φέρουν καρβίδια στα όριά τους (κυρίως σεμεντίτη) και μοιάζουν με τη μορφή φτερού (feather like morphology). Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, εύρους (400°C-250°C) περίπου, σχηματίζεται ο κατώτερος μπαινίτης, του οποίου η μορφολογία, συνήθως, αποτελείται από λεπτότερους στενόμακρους κόκκους φερρίτη με τη μορφή βελονών (needle-like ferrite) ή με τη μορφή "δισκοειδών πλακιδίων" (platelets, plate-like ferrite) οι οποίοι φέρουν στο εσωτερικό τους μεγαλύτερο κλάσμα όγκου καρβιδίων και μικρότερου μεγέθους (κυρίως σεμεντίτη) σε σύγκριση με αυτά του ανώτερου μπαινίτη. Λόγω της λεπτότερης μορφολογίας και των πολυπληθέστερων καρβιδίων ο κατώτερος μπαινίτης χαρακτηρίζεται από καλύτερη αντοχή και δυσθραυστότητα. Επίσης, οι δύο τύποι μπαινίτη διαφέρουν ως προς την έναρξη φύτρωσης του φερρίτη, καθώς στον άνω, ο σχηματισμός των φύτρων του φερρίτη ξεκινά από τα όρια του ωστενίτη, ενώ στον κάτω ξεκινά και από τα όρια και από τα κέντρα των ωστενιτικών κόκκων. Τέλος, σε αντίθεση με τον περλίτη όπου τα πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη αναπτύσσονται ταυτόχρονα με τον ίδιο ρυθμό, στο μπαινίτη αναπτύσσονται ανεξάρτητα. [10-11],[14]



Εικόνα 7 α) Άνω μπαινίτης σε χάλυβα Fe-0.478C-4.87Ni wt% στους 400°C, β) Κάτω μπαινίτης σε χάλυβα 4360 (8000x) στους 345°C [13].

1.4 Επίδραση Κραματικών Στοιχείων στους Χάλυβες

Οι χάλυβες ως κράματα, εκτός από σίδηρο (Fe) και άνθρακα (C), ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση τους, περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία. Οι κύριες κατηγορίες των κραματικών στοιχείων είναι οι ακόλουθες τρεις : α) αυτά που σχηματίζουν με το σίδηρο στερεά διαλύματα παρεμβολής (interstitial solutions), (β) αυτά που σχηματίζουν στερεά διαλύματα αντικατάστασης (substitutional solutions) και (γ) αυτά που δε μπορούν να διαλυτοποιηθούν στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου (no solubility) (*Εικόνα 8*). Επίσης, το ποσοστό της διαλυτότητας κάποιου κραματικού στοιχείου στο σίδηρο μπορεί να αλλάξει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Οι εμπορικοί χάλυβες πάντα περιέχουν κραματικά στοιχεία από τις δύο πρώτες ομάδες, είτε εσκεμμένα για την κατακρήμνιση επιθυμητών φάσεων, είτε ακούσια κατά τη διάρκεια της παραγωγής και διαμόρφωσης του χάλυβα. Κάποια συνηθισμένα μη επιθυμητά κραματικά στοιχεία, ή περιεχόμενα σε μη επιθυμητές συγκεντρώσεις, είναι το άζωτο (N) (από την ατμόσφαιρα), το θείο (S), ο φώσφορος (P) και το αρσενικό (As) (από τις πρώτες ύλες) και το υδρογόνο (από την ατμόσφαιρα και τη διαδικασία της αποξήρανσης). [1]

Solubility of the elements in the crystal lattices of iron.

Н 1																	He 3
Li 3	Be 2											В 1	C 1	N 1	0 1	F 3	Ne 3
Na 3	Mg 3											A1 2	Si 2	P 2	S 3	Cl 3	Ar 3
К 3	Ca 3	Sc 3?	Ti 2	V 2 ^b	Cr 2 ^b	Mn 2 ^b	Fe	Со 2 ^ь	Ni 2 ^b	Cu 2	Zn 2	Ga 2	Ge 2	As 2	Se 3	Br 3	Kr 3
Rb 3	Sr 3	Y 3?	Zr 2	Nb 2	Mo 2	Tc 2	Ru 2	Rh 2 ^b	Pd 2 ^b	Ag 3	Cd 3	In 3	Sn 2	Sb 2	Te 3	I 3	Xe 3
Cs 3	Ba 3	La 3?	Hf 2?	Ta 2	W 2	Re 2	Os 2	Ir 2 ^b	Pt 2 ^b	Au 2	Hg 3	TI 3	Pb 3	Bi 3	Po 3?	At 3	Rn 3
Fr 3	Ra 3	Ac 3?	Th 3?	Pa 3?	U 3	Np 3?	Pu 3?	Am 3?	Cm 3?	Bk 3?	Cf 3?						
1. inte	1. interstitial elements P may be interstitial in the fcc structure.																

substitutional elements 3. practically no solubility complete solubility at certain temperatures.

Εικόνα 8 Κατηγοριοποίηση κραματικών στοιγείων σε 3 ομάδες βάση της διαλυτότητας τους στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου και του είδους του στερεού διαλύματος που σχηματίζουν [1].

Τα κραματικά στοιχεία επιδρούν σημαντικά στην κινητική των αντιδράσεων, συνεπώς στους μετασχηματισμούς που υφίσταται η μικροδομή και άρα στις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Εν γένει, τα διμερή διαγράμματα ισορροπίας του σιδήρου χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες : (α) ανοιχτούς ωστενιτικούς βρόγχους (open γ-field systems), (β) κλειστούς ωστενιτικούς βρόγχους (closed γ-field systems), (γ) διευρυμένους ωστενιτικούς βρόγχους (expanded γ-field systems) και (δ) συμπιεσμένους ωστενιτικούς βρόγχους (contracted γ-field systems) (Εικόνα 9). Αυτή η προσέγγιση υποδεικνύει ότι τα κραματικά στοιχεία επηρεάζουν τα διαγράμματα φάσης με δύο τρόπους :

- Διευρύνουν τον ωστενιτικό βρόγγο (γ-field) και προωθούν το σχηματισμό του ωστενίτη σε μεγαλύτερο εύρος χημικών συγκεντρώσεων. Για αυτό τα κραματικά στοιχεία ονομάζονται γ-φερογόνα.
- > Μικραίνουν τα όρια του ωστενιτικού βρόγχου, προωθώντας έτσι το σχηματισμό του α-φερρίτη σε μεγαλύτερο εύρος χημικών συγκεντρώσεων. Για αυτό τα κραματικά στοιχεία ονομάζονται α-φερογόνα. [15]

Η μορφή του διαγράμματος βασίζεται, επίσης, σε κάποιο βαθμό, στην ηλεκτρονιακή δομή των κραματικών στοιχείων η οποία είναι συνδεδεμένη με τη θέση τους στον περιοδικό πίνακα. Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω, προκύπτουν οι τέσσερις προαναφερθείσες κατηγορίες, οι οποίες περιγράφονται πιο λεπτομερώς στη συνέχεια.

<u>Ανοιχτός ωστενιτικός βρόγχος (open γ-field)</u> : Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν κάποια σημαντικά κραματικά στοιχεία, όπως το νικέλιο (Ni), το μαγγάνιο (Mn), το κοβάλτιο (Co), καθώς και κάποια ευγενή μέταλλα, όπως το ρουθήνιο (Ru), το ρόδιο (Rh), το παλλάδιο (Pd), το όσμιο (Os), το ιρίδιο (Ir) και ο λευκόχρυσος (Pt). Αυτά τα κραματικά στοιχεία διευρύνουν το θερμοκρασιακό εύρος της σταθεροποίησης του ωστενίτη, μειώνοντας τις θερμοκρασίες για τον γ-α μετασχηματισμό και αυξάνοντας τις θερμοκρασίες για τον γ-α μετασχηματισμό και αυξάνοντας τις θερμοκρασίες για τον γ-α μετασχηματισμό και αυξάνοντας το Νi και το Mn προστεθούν σε επαρκώς υψηλές συγκεντρώσεις, περιορίζουν τη φάση του α-φερρίτη και τον αντικαθιστούν, μέχρι και σε θερμοκρασίες δωματίου με την ωστενιτική φάση. Συνεπώς, το Ni και το Mn «κατεβάζουν» τις καμπύλες A1 και A3 του μετασταθούς διαγράμματος σιδήρου-σεμεντίτη (*Εικόνα 1*) και με αυτό τον τρόπο, προκύπτει η απόκτηση μετασταθούς ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου, ο οποίος είναι χρήσιμος σε διάφορα είδη χαλύβων. [5],[15]

Διευρυμένος ωστενιτικός βρόγχος (expanded γ -field) : Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν κάποια πολύ σημαντικά κραματικά στοιχεία, όπως ο άνθρακας (C) και το άζωτο (N) και άλλα, όπως ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) και ο χρυσός (Au). Ο ωστενιτικός βρόγχος είναι διευρυμένος, αλλά το εύρος του περιορίζεται, λόγω του σχηματισμού ενώσεων (*Εικόνα 9 b*). Η διεύρυνση του ωστενιτικού βρόγχου από τον C και το N αποτελεί τη βάση για όλες τις θερμικές κατεργασίες των χαλύβων, επιτρέποντας το σχηματισμό ενός ομογενούς στερεού διαλύματος (ωστενίτης) που περιλαμβάνει έως 2.0 % κ.β. C ή 2.8 % κ.β. N. [5],[15]

<u>Κλειστός ωστενιτικός βρόγχος (closed γ-field)</u> : Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν το πυρίτιο (Si), το αλουμίνιο (Al), το βηρύλλιο (Be), ο φώσφορος (P), μαζί με τα ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία, τιτάνιο (Ti), βανάδιο (V), μολυβδαίνιο (Mo) και χρώμιο (Cr). Δρουν, περιορίζοντας το σχηματισμό του ωστενίτη και προκαλώντας τη συστολή του ωστενιτικού βρόγχου (*Εικόνα 9 c*). Συνεπώς, προωθείται ο σχηματισμός του φερρίτη και η περιοχή σχηματισμού α-φερρίτη και δ-φερρίτη γίνεται ενιαία. Τα κράματα, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαγράμματα κλειστού ωστενιτικού βρόγχου, δεν υποβάλλονται στις συνήθεις θερμικές κατεργασίες που περιλαμβάνουν απόψυξη από την ωστενιτική στη φερριτική φάση. Κάποιες φορές είναι χρήσιμο να αποφευχθεί ο

σχηματισμός της ωστενιτικής φάσης, όπως στην εφαρμογή ηλεκτρικών μετασχηματισμών, όπου η χονδρόκοκκη φερριτική δομή είναι αναγκαία. [5],[15]

Συμπιεσμένος ωστενιτικός βρόγχος (contracted γ-field) : Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα καρβιδιογόνα στοιχεία, ταντάλιο (Ta), ζιρκόνιο (Zr) και νιόβιο (Nb), και το πιο σημαντικό στοιχείο, το βόριο (B). Ο ωστενιτικός βρόγχος είναι πολύ περιορισμένος, αλλά συνοδεύεται από το σχηματισμό ενώσεων (*Εικόνα 9 d*). [5],[15]

Επιπροσθέτως, στην Εικόνα 10, παρουσιάζονται ωστενιτικοί βρόγχοι σε διάφορα διφασικά συστήματα του σιδήρου με άλλα κραματικά στοιχεία, επισημαίνοντας την επιρροή αυτών και των συγκεντρώσεών τους στο σχηματισμό της ωστενιτικής φάσης. Μεγάλη σημασία στη συστολή ή διαστολή του ωστενιτικού βρόγχου δεν έχει μόνο η επιλογή του κραματικού στοιχείου αλλά και η κατάλληλη συγκέντρωση αυτού. Η Εικόνα 11 εστιάζει στη διαμόρφωση του ωστενιτικού βρόγχου ανάλογα με την προσθήκη σε Τi και Cr σε διάφορες συγκεντρώσεις.



Εικόνα 9 Κατηγοριοποίηση των διαγραμμάτων φάσεων του σιδήρου : (a) open γ-field, (b) expanded – field; (c) closed –field; (d) contracted –field [15].



Εικόνα 10 Ωστενιτικοί βρόγχοι σε ποικίλα διφασικά διαγράμματα σιδήρου με διάφορα κραματικά στοιχεία [15].



Εικόνα 11 Επιρροή των κραματικών στοιχείων, σε ποικίλες συγκεντρώσεις, στον ωστενιτικό βρόγχο: (a) Ti, (b) Cr [15].

Γενικά, στους χάλυβες, τα κραματικά στοιχεία συναντώνται στις ακόλουθες μορφές [15] :

- Σε ελεύθερη μορφή (free state), όπως ο Cu σε περιεκτικότητες > 7%.
- Σχηματίζουν στερεό διάλυμα με το σίδηρο (Solid solution form)
- Σχηματίζουν καρβίδια (carbide form)

- Σχηματίζουν νιτρίδια, βορίδια, σουλφίδια (nitride, boride, sulfide form)
- Σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις με το σίδηρο ή με κάποιο άλλο κραματικό στοιχείο (intermetallic compounds)
- Σχηματίζουν οξείδια (oxide form)

Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου κραματικού στοιχείου σε συνδυασμό με τη συγκέντρωσή του, τη θερμοκρασία, το ρυθμό απόψυξης, την υπόλοιπη χημική σύσταση ενός χάλυβα καθορίζουν τη μικροδομή, τις προκύπτουσες φάσεις, ενδομεταλλικές ενώσεις και περαιτέρω κατακρημνίσεις, το μέγεθός των κόκκων τους και συνεπώς, τις μηχανικές ιδιότητες. Στην πορεία θα αναφερθεί εκτενέστερα η γενικευμένη δράση κάποιων από τα σημαντικότερα κραματικά στοιχεία. Στην πράξη από χάλυβα σε χάλυβα μπορεί να διαφοροποιούνται κάποια χαρακτηριστικά των κραματικών στοιχείων σε συνδυασμό και με την υπόλοιπη χημική σύσταση.

<u>Άνθρακας (C)</u>: Αποτελεί το σημαντικότερο κραματικό στοιχείο στους χάλυβες, καθώς είναι υπεύθυνο για το σχηματισμό ποικίλων φάσεων και καρβιδίων. Είναι σημαντικός σταθεροποιητής του ωστενίτη. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, επιτυγχάνεται η αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής, της εμβαπτότητας. Βέβαια, ταυτόχρονα μειώνεται η ολκιμότητα, η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητα. Επίσης, ο άνθρακας έχει την τάση να παρουσιάζει μεγαλύτερο διαφορισμό λόγω διάχυσης, σε σύγκριση με άλλα κραματικά στοιχεία. Τέλος, μειώνει την αντίσταση στην περικρυσταλλική διάβρωση που προκαλείται από το σχηματισμό των καρβιδίων.

<u>Άζωτο (N)</u>: Είναι σημαντικός σταθεροποιητής του ωστενίτη, ο οποίος αυξάνει τη μηχανική αντοχή. Επίσης, αυξάνει την αντοχή στην τοπική διάβρωση, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το μολυβδαίνιο. Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να σχηματίσει διασπορά νιτριδίων (π.χ. με το Al), τα οποία να παρεμποδίσουν την ανάπτυξη των κόκκων.[**3**],[**6**]

<u>Φώσφορος (P)</u>: Συμβάλλει στην αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής, ενώ ταυτόχρονα στη μείωση της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και της αντοχής σε κρούση. Επίσης, η προσθήκη του μπορεί να επιλεχθεί για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας και της αντίστασης σε διάβρωση. [3]

<u>Βόριο (B)</u>: Προστίθεται στους χάλυβες βαφής και επαναφοράς (quenched and tempered), με σκοπό τη βελτίωση της δυσθραυστότητας, χωρίς τη μείωση της μηχανικής αντοχής. [3]

<u>Πυρίτιο (Si)</u>: Είναι ένα από τα βασικά κραματικά στοιχεία που προστίθεται για την αποξείδωση του χάλυβα. Για αυτό αυξάνει την αντίσταση στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και σε ισχυρά οξειδωτικά περιβάλλοντα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπροσθέτως, προωθεί τη φερριτική δομή και αυξάνει τη μηχανική αντοχή της, χωρίς όμως να προκαλεί σοβαρή μείωση της ολκιμότητάς της. Τέλος, το πυρίτιο έχει μικρή τάση διαφορισμού. **[3],[6]**

<u>Θείο (S):</u> Έχει μεγάλη τάση να διαφορίζεται σε σύγκριση με άλλα κραματικά στοιχεία. Προστίθεται σε ορισμένους ανοξείδωτους χάλυβες για να αυξηθεί η κατεργασιμότητα, αλλά κυρίως προκαλεί μείωση στην ολκιμότητα, στη συγκολλησιμότητα, στη διαμορφωσιμότητα και στην αντίσταση σε διάβρωση. [3],[6]

<u>Μαγγάνιο (Mn)</u>: Λειτουργεί ως σταθεροποιητής του ωστενίτη και βοηθά και αυτός στην αποξείδωση του χάλυβα. Μαζί με το θείο, σχηματίζει σουλφίδια του μαγγανίου (MnS), τα οποία αυξάνουν την κατεργασιμότητα του χάλυβα. Η προσθήκη του συνεισφέρει στην σκληρότητα και τη μηχανική αντοχή, αλλά η αύξηση της ποσότητάς του μετά από κάποιο σημείο, προκαλεί τη μείωση της ολκιμότητας και της συγκολλησιμότητας. Μεγάλη προσθήκη μαγγανίου μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ωστενιτικού χάλυβα με υψηλή αντίσταση στη φθορά και στην τριβή. Επίσης, έχει μικρή τάση διαφορισμού. Επιπλέον, χρησιμοποιείται στους ανοξείδωτους χάλυβες για βελτίωση της ολκιμότητας και μπορεί να αυξήσει τη διαλυτότητα του αζώτου, με αποτέλεσμα την παραγωγή διφασικών και ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο. Παρόλο που ανήκει στην ομάδα των γ-φερογόνων, σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργεί ως σταθεροποιητής του ωστενίτη αλλά σε υψηλές λειτουργεί ως σταθεροποιητής του φερρίτη. [3],[6]

<u>Αλουμίνιο (Al)</u>: Η προσθήκη του σε σημαντική ποσότητα βελτιώνει την αντίσταση σε οξείδωση. Επίσης, προστίθεται σε ορισμένη συγκέντρωση για το σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων οι οποίες δρουν, αυξάνοντας τη μηχανική αντοχή και ελέγχοντας το μέγεθος των κόκκων. [3],[6]

<u>Χρώμιο (Cr)</u>: Πρόκειται για το πιο σημαντικό κραματικό στοιχείο το οποίο προσφέρει αυξημένη αντίσταση σε διάβρωση και επιπλέον, αυξάνει την αντίσταση σε οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ανήκει στην κατηγορία των α-φερογόνων και κατά συνέπεια προωθεί τη φερριτική μικροδομή. Επίσης, αποτελεί ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο, με αποτέλεσμα τα σχηματιζόμενα καρβίδια να αυξάνουν τη σκληρότητα, τη μηχανική αντοχή και τις αντιτριβικές ιδιότητες του χάλυβα. **[3],[6]**

Νικέλιο (Ni): Ανήκει στην ομάδα των γ-φερογόνων και προωθεί το σχηματισμό του ωστενίτη. Επιπλέον, αυξάνει την ολκιμότητα και τη δυσθραυστότητα των χαλύβων και δρα μειώνοντας το ρυθμό διάβρωσης, καθιστώντας το επιθυμητό σε οξειδωτικά περιβάλλοντα. Επιπροσθέτως, σε κάποιες κατηγορίες χαλύβων, η προσθήκη του νικελίου έχει ως στόχο το σχηματισμό ενδομεταλλικών ενώσεων, προκαλώντας σκλήρωση μέσω κατακρήμνισης και αύξηση της μηχανικής αντοχής. [3],[6]

<u>Μολυβδαίνιο (Mo):</u> Πρόκειται για ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο, το οποίο αυξάνει τη σκληρότητα, τη μηχανική αντοχή και την εμβαπτότητα των χαλύβων. Ανήκει στην κατηγορία των α-φερογόνων, προωθώντας το σχηματισμό του φερρίτη. Ακόμη, αυξάνει την αντίσταση σε γενική και τοπική διάβρωση. Ωστόσο το μολυβδαίνιο αυξάνει το ρίσκο σχηματισμού δευτερογενών φάσεων στους φερριτικούς, διφασικούς και ωστενιτικούς χάλυβες. [3],[6]

<u>Χαλκός (Cu)</u>: Έχει μέτρια τάση να διαφορίζεται και προωθεί το σχηματισμό του ωστενίτη. Ένα άλλο του χαρακτηριστικό είναι ότι αυξάνει την αντίσταση σε διάβρωση σε συγκεκριμένα οξέα. Μπορεί, επίσης, να προστεθεί για να μειώσει τη σκλήρωση με ενδοτράχυνση, βελτιώνοντας την κατεργασιμότητα και τη διαμορφωσιμότητα. [**3**],[**6**]

<u>Κοβάλτιο (Co)</u>: Δε σχηματίζει καρβίδια και μειώνει την εμβαπτότητα των χαλύβων. Διατηρεί τη μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη των κόκκων και την αποκατάσταση των αταξιών κατά την ανόπτηση ή την επαναφορά των χαλύβων. Ακόμη, χρησιμοποιείται σε μαρτενσιτικούς χάλυβες για να αυξήσει τη σκληρότητα και τη θερμοκρασία επαναφοράς, κυρίως, σε υψηλές θερμοκρασίες. [**3**],[**6**]

<u>Βολφράμιο (W):</u> Αποτελεί ισχυρά καρβιδιογόνο στοιχείο και προωθεί το σχηματισμό της φερριτικής δομής. Σε κάποιες κατηγορίες χαλύβων σχηματίζουν ενδομεταλλικές

ενώσεις προκαλώντας σκλήρωση μέσω κατακρήμνισης και αύξηση της μηχανικής αντοχής. Προστίθεται σε κάποιους ανοξείδωτους χάλυβες για τη βελτίωση της αντίστασης τους στην τοπική διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion). [3],[6]

<u>Τιτάνιο (Ti), Νιόβιο (Nb) και Βανάδιο (V):</u> Αποτελούν ισχυρά καρβιδιογόνα στοιχεία και προωθούν το σχηματισμό της φερριτικής δομής. Σε κάποιες κατηγορίες χαλύβων σχηματίζουν ενδομεταλλικές ενώσεις προκαλώντας σκλήρωση μέσω κατακρήμνισης και αύξηση της μηχανικής αντοχής. Επίσης βοηθούν στον έλεγχο μεγέθους των κόκκων σε υψηλές θερμοκρασίες. Προστίθενται σε κάποιες κατηγορίες ανοξείδωτων χαλύβων για τη βελτίωση της αντίστασης σε περικρυσταλλική διάβρωση (Ti και Nb), τη βελτίωσης της δυσθραυστότητας, της διαμορφωσιμότητας και την αύξηση της θερμοκρασίας (Ti, Nb, V). **[3],[6]**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετά κραματικά στοιχεία τα οποία ανάλογα με την περιεκτικότητά τους στους χάλυβες, το ποσοστό διαλυτότητάς τους στο σίδηρο, τη χημική συγγένεια με άλλα κραματικά στοιχεία, όπως ο C, το N, S, B, το O, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία και το ρυθμό απόψυξης, μπορούν να σχηματίσουν καρβίδια, νιτρίδια, βορίδια, σουλφίδια, οξείδια. Για παράδειγμα, κραματικές προσθήκες, όπως το Al, Si, V, Ti, οι οποίες έχουν μεγαλύτερη συγγένεια με το οξυγόνο από ότι με το σίδηρο, οδηγούν στο σχηματισμό οξειδίων. Για αυτό και χρησιμοποιούνται συχνά για την αποξείδωση των χαλύβων. Αντίστοιχα, κραματικά στοιχεία που έχουν μεγαλύτερη χημική συγγένεια με το θείο από ότι με το σίδηρο, όπως το Mn, σχηματίζουν σουλφίδια. Επίσης, επειδή η διαλυτότητα του N στο φερρίτη είναι περιορισμένη, σε περιεκτικότητες πάνω από 0,015% σχηματίζει νιτρίδια με κάποια κραματικά στοιχεία, όπως το V, Al, Ti, Cr. [15]

Τα καρβιδιογόνα κραματικά στοιχεία ανάλογα με τη διαθέσιμη περιεκτικότητά τους σε ένα χάλυβα και την περιεκτικότητα αυτού σε άνθρακα, μπορούν να σχηματίσουν είτε καρβίδια, είτε στερεό διάλυμα με το σίδηρο. Δηλαδή, εάν ένας χάλυβας περιέχει, σχετικά, μικρή ποσότητα άνθρακα και μεγάλη ποσότητα ενός καρβιδιογόνου κραματικού στοιχείου, τότε ο άνθρακας θα δεσμευθεί για την κατακρήμνιση καρβιδίων και θα υπάρξει περίσσεια του κραματικού στοιχείου, το οποίο θα βρεθεί σε στερεό διάλυμα με το σίδηρο. Αντιθέτως, αν ένας χάλυβας περιέχει μεγάλη ποσότητα άνθρακα και μικρή περιεκτικότητα σε κάποιο καρβιδιογόνο στοιχείο, τότε αυτό θα δεσμευτεί, κυρίως, για το σχηματισμό καρβιδίων. Τα περισσότερα κραματικά στοιχεία, εκτός από τον C, το N, O, B και τα μεταλλοειδή, τα οποία βρίσκονται μακριά από το σίδηρο στον περιοδικό πίνακα, διαλυτοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες σε αυτόν. Τα κραματικά στοιχεία, τα οποία βρίσκονται στα δεξιά του σιδήρου, όπως Co, Ni, Cu, κ.α., σχηματίζουν στερεά διαλύματα με το σίδηρο και όχι καρβίδια. Τα κραματικά στοιχεία που είναι υπεύθυνα για την κατακρήμνιση καρβιδίων, βρίσκονται στον περιοδικό πίνακα αριστερά από το σίδηρο, όπως Cr, Mo, W, Ti, Nb, V, Ta, κ.α. [5],[15].

Οι πιο συνήθεις μορφές καρβιδίων που απαντώνται στους χάλυβες είναι οι εξής [5],[15]:

- MC (π . χ . TiC, WC, NbC, VC, TaC, MoC)
- \succ M₂C (π.χ. Mo₂C, W₂C)
- Μ₃C (π.χ. Fe₃C-σεμεντίτης)
- ▶ M₇C₃ (π.χ. Cr₇C₃)
- \succ M₂₃C₆ (π.χ. Cr₂₃C₆)
- $\blacktriangleright M_6C (\pi.\chi. Mo_6C)$

Οι πρώτες δύο μορφές καρβιδίων έχουν απλή κρυσταλλική δομή, ενώ οι υπόλοιπες έχουν πιο σύνθετες. Η σταθερότητα κάποιων καρβιδίων, νιτριδίων και βοριδίων στους χάλυβες σε σχέση με αυτή του σεμεντίτη φαίνεται στην Εικόνα 12, όπου απεικονίζονται οι ενθαλπίες σχηματισμού (ΔHf), με την ενθαλπία του σεμεντίτη να αποτελεί σημείο αναφοράς, δηλαδή, ΔH_{f-cementite}=0. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αποτελεσματικότητα των καρβιδίων στη σκλήρωση των χαλύβων εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφολογία των κατακρημνισμάτων και το κλάσμα όγκου τους. Το πόσο λεπτοκρυσταλλικά μπορεί να είναι τα κατακρημνίσματα, βασίζεται στο φράγμα ενέργειας ενεργοποίησης (ΔG^*) που απαιτείται για τη φύτρωση τους, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού τους, τη διαφασική ενέργεια και τη κρυσταλλογραφική συγγένεια με τη διεπιφάνεια φύτρωσής τους. Για παράδειγμα, τα καρβίδια με σύνθετες κρυσταλλικές δομές και χαμηλές ενθαλπίες σχηματισμού, όπως M₇C₃, M₆C και M₂₃C₆, αποτελούν, γενικά, σχετικά χονδροειδή κατακρημνίσματα. Αντιθέτως, καρβίδια, όπως, VC, NbC, TiC, TaC και HfC σχηματίζονται σε υψηλότερες ενθαλπίες σχηματισμού, έχουν πιο απλή κρυσταλλική δομή και είναι λεπτοκρυσταλλικά [5],[15].



Enthalpy of formation at 298.15 K $\Delta H_f/KJ$ mol⁻¹

Εικόνα 12 Ενθαλπίες σχηματισμού καρβιδίων, νιτριδίων και βοριδίων [15].

Επίσης, το κλάσμα όγκου των καρβιδίων εξαρτάται από τη διαλυτότητα των αντίστοιχων κραματικών στοιχείων στον ωστενίτη πριν από την απόψυξη, η οποία είναι διαφορετική στο φερρίτη. Η παρακάτω *Εικόνα 13* παρουσιάζει τη διαλυτότητα διαφόρων καρβιδίων και νιτριδίων στον ωστενίτη, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Αυτές οι διαλυτότητες στο φερρίτη είναι πολύ χαμηλότερες, συνεπώς, μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση ίσες. Έτσι, ενώ το Cr, Mo και V εμφανίζουν υψηλά ποσοστά διαλυτότητας στον ωστενίτη, κατακρημνίζονται σε μεγάλα κλάσματα όγκου στο φερρίτη [5],[15].



Εικόνα 13 Ατομικά ποσοστά διαλυτότητας νιτριδίων και καρβιδίων στον ωστενίτη, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [15].

<u>TCP Φάσεις (Topologically Close Packed phases)</u>

Επιπροσθέτως, χάλυβες που περιέχουν υψηλές περιεκτικότητες σε Cr, Mo, Ni, Mn, Si, Ti και Nb και θερμαίνονται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες για παρατεταμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να εμφανίσουν στη μικροδομή τους ενδομεταλλικές φάσεις πλούσιες στα παραπάνω κραματικά στοιχεία. Αυτές ονομάζονται tcp φάσεις και συνήθως είναι σκληρές και ψαθυρές φάσεις οι οποίες είναι ανεπιθύμητες γιατί δρουν, υποβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων. Επίσης, λόγω της κατακρήμνισης τέτοιων φάσεων, η μητρική δομή των χαλύβων μπορεί να υποστεί σε ορισμένες περιοχές απεμπλουτισμό από τα προαναφερόμενα κραματικά στοιχεία, όπως Cr, Mo με αποτέλεσμα να υποβαθμιστεί, τοπικά, η αντίστασή της στη διάβρωση. Οι πιο γνωστές tcp φάσεις που απαντώνται στους χάλυβες είναι η σ, η χ (chi) και η Laves. Για τη σ θα γίνει εκτενής αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο 1.4.1 στο διάγραμμα Fe-Cr. Η χ φάση είναι παρόμοια με τη σ, με τη διαφορά ότι περιέχει Mo σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες και έχει κυβική κρυσταλλική δομή. Η χ μπορεί να συνυπάρξει με τη σ και σχηματίζεται στο ίδιο θερμοκρασιακό εύρος. Επίσης, μπορεί να κατακρημνιστεί στα όρια φερρίτη-ωστενίτη. Η Laves έχει στοιχειομετρικό τύπο A₂B, όπου A είναι ο Fe και B συνήθως το Mo, Nb και σχηματίζεται και αυτή μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασιακό εύρος 550-650°C. [8-9]

1.4.1 Διάγραμμα Σιδήρου-Χρωμίου για Ανοξείδωτους Χάλυβες

Το διμερές διάγραμμα φάσης σιδήρου-χρωμίου (Εικόνα 14) υποδεικνύει ότι το χρώμιο περιορίζει τον ωστενιτικό βρόγχο, ο οποίος δεν υφίσταται σε περιεκτικότητες άνω του 12.7% κ.β. Cr και κυριαρχεί η φερριτική δομή. Επίσης, η ύπαρξη του ωστενιτικού βρόγχου καταγράφεται σε θερμοκρασίες 912°C-1394°C. Στο εύρος συγκεντρώσεων 12 με 12.7% κ.β. Cr υπάρχει μια στενή περιοχή όπου συνυπάρχει ο ωστενίτης με το φερρίτη. Σε υψηλές θερμοκρασίες παρατηρείται πλήρης διαλυτοποίηση του Cr στο σίδηρο. Επιπλέον, σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτω από την καμπύλη solidus, το bcc Cr σχηματίζει στερεό διάλυμα με το χωροκεντρωμένο δφερρίτη, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζει στερεό διάλυμα με το bcc αφερρίτη. Επίσης, η προσθήκη άνθρακα σε περιεκτικότητες μεγαλύτερες από 0.3% κ.β. διευρύνουν τον ωστενιτικό βρόγχο και τη ζώνη συνύπαρξης α+γ ακόμα και σε μεγάλες περιεκτικότητες χρωμίου (>12.7% κ.β.Cr). [5],[7],[16-17]

Για περιεκτικότητες σε Cr ανώτερες του 14% κ.β. εμφανίζεται η σ φάση (sigma phase), η οποία κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο τετραγωνικό σύστημα (bct) και συνήθως, στοιχειομετρικά, γράφεται ως FeCr. Βέβαια, η σύσταση της μπορεί να είναι αρκετά πιο περίπλοκη, ανάλογα και με τα λοιπά κραματικά στοιχεία και τις περιεκτικότητές τους [5], [7-8]. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να κυμαίνεται στοιχειομετρικά από B₄A έως BA₄, όπου A μπορεί να είναι τα κραματικά στοιχεία Ti, V, Cr, Mo και B το Mn, Fe, Ni, Co [8]. Βέβαια, σημειώνονται και χημικοί τύποι, όπως (CrMo)35, (FeNi)65 [9]. Συνεχίζοντας με ένα άλλο παράδειγμα, στους χυτούς ανοξείδωτους χάλυβες (cast stainless steels) η προσθήκη πυριτίου προωθεί την κατακρήμνιση της σ φάσης, για αυτό και μπορεί να προκύψει η τριμερής σύνθεση 43Fe-43Cr-14Si (at%) [8]. Η προσθήκη αζώτου, όμως μπορεί να καταστείλει το σχηματισμό της [9]. Η σ φάση σχηματίζεται πιο εύκολα σε περιεκτικότητες σε Cr από 18-20% κ.β. και πάνω, ιδιαίτερα αν υπάρχει και Μο. Επειδή η σ εμφανίζεται σε θερμοκρασίες 600°C-821°C και η κινητική φύτρωσής της είναι αρκετά αργή, απαιτείται αρκετή ώρα, ώστε να σχηματιστεί σε μεγάλο κλάσμα όγκου. Επιπλέον, ο σχηματισμός της σ φάσης διευκολύνεται και πραγματοποιείται πιο γρήγορα μέσω της

φερριτικής δομής, συγκριτικά με την ωστενιτική, διότι έχουν παρόμοια χημική σύσταση και ο φερρίτης χαρακτηρίζεται από υψηλότερους διαχυσιακούς ρυθμούς των κραματικών στοιχείων σε σύγκριση με τον ωστενίτη. Αρκετά προτιμητέα περιοχή σχηματισμού είναι και η διεπιφάνεια φερρίτη/ωστενίτη. Εν γένει, η σ φάση δεν είναι επιθυμητή, καθώς χαρακτηρίζεται από σκληρή και ψαθυρή συμπεριφορά και δρα μειώνοντας την ολκιμότητα, τη δυσθραυστότητα και την αντοχή σε ερπυσμό των χαλύβων. Επιπροσθέτως, η σ φάση είναι πλούσια σε κραματικά στοιχεία, όπως Cr και Mo, με αποτέλεσμα να συνδέεται με τον απεμπλουτισμό περιοχών της μικροδομής των χαλύβων, επηρεάζοντας τη διαδικασία σκλήρωσης μέσω κατακρήμνισης καρβιδίων και την αντίσταση σε διάβρωση. [5],[7-9]

Στο κάτω μέρος της περιοχής του σχηματισμού της σ φάσης (διάγραμμα Εικόνας 14), έχει μια διακεκομμένη γραμμή, κάτω από την οποία (475°C και κάτω), μία άλλη φάση σχηματίζεται, η α΄. Ένα γνωστό φαινόμενο, με το όνομα ευθραυστότητα στους 475°C (475°C embrittlement) προκύπτει από το σχηματισμό κατακρημνισμάτων πλούσιων σε Cr εντός της α-φερριτικής δομής, τα οποία είναι συνεκτικά με αυτή. Αυτά τα κατακρημνίσματα ονομάζονται alpha prime-α΄ και διαφέρουν από το μαρτενσίτη (martensite) [9]. Σχηματίζεται σε θερμοκρασιακό εύρος 300°C-525°C, σε περιεκτικότητες σε χρώμιο από 14% Cr κ.β. και πάνω, προκαλώντας σοβαρά φαινόμενα ψαθυρότητας στους χάλυβες. Τέλος, η κινητική σχηματισμού της α΄ είναι και αυτή αργή, για αυτό και δεν προβλέπεται ο σχηματισμός της σε θερμικές κατεργασίες, όπως ανόπτηση και συγκόλληση, αλλά σε γηράνσεις. Βέβαια, μπορεί να επιταχυνθεί, ανάλογα με την προσθήκη άλλων κραματικών στοιχείων. [7],[9]

Στη συνέχεια, εάν το Νi προστεθεί σε έναν χάλυβα με χαμηλή ποσότητα C και 18% κ.β. Cr, ο ωστενιτικός βρόγχος θα διευρυνθεί και όταν φτάσει σε περιεκτικότητα Ni από 8% κ.β. και πάνω η ωστενιτική φάση παραμένει στη θερμοκρασία δωματίου. Χάρη σε αυτή τη μικρή περιεκτικότητα σε Ni, παράγεται μία γνωστή ομάδα των ωστενιτικών χαλύβων με περιεκτικότητες 18Cr-8Ni % κ.β. (*Εικόνα 15*). Για αυτό το λόγο όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε Cr σε ένα χάλυβα, για να διατηρηθεί ωστενίτης σε θερμοκρασία δωματίου, απαιτείται η αύξηση της περιεκτικότητας σε Ni. Ακόμη, επειδή το Mn δρα και αυτό ως γ-φερογόνο, μπορεί να αντικαταστήσει το Ni, αλλά θα χρειαστούν μεγαλύτερες ποσότητες αυτού, επειδή είναι λιγότερο αποτελεσματικό, σύμφωνα και με το διάγραμμα Schaeffler που θα αναλυθεί στο ακόλουθο κεφάλαιο. [5],[7-8],[16-17]



Εικόνα 14 Διαγράμματα ισορροπίας Fe-Cr [5],[7].



Εικόνα 15 Η επίδραση της περιεκτικότητας σε C στο διάγραμμα φάσης για ένα χάλυβα 18Cr-8Ni % κ.β. [5].

1.4.2 Διάγραμμα Schaeffler DeLong για Ανοξείδωτους Χάλυβες

Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στη μικροδομή των ανοξείδωτων χαλύβων μπορεί να συνοψισθεί στο εμπειρικό διάγραμμα Schaeffler DeLong, το οποίο βασίζεται στον προαναφερόμενο διαχωρισμό των κραματικών στοιχείων σε α και γφερρογόνα (*Εικόνα 16*). Τα α-φερρογόνα, τα οποία προωθούν τη φερριτική δομή αναφέρονται ως ισοδύναμα κραματικά στοιχεία του Cr, ενώ τα γ-φερρογόνα που προωθούν την ωστενιτική δομή αναφέρονται ως ισοδύναμα του Ni και το κάθε ένα εκφράζεται με ένα συγκεκριμένο συντελεστή βαρύτητας.

Τα πιο συνηθισμένα α-φερρογόνα εκφράζονται από τη σχέση :Cr equivalent = (Cr) + 2(Si) + 1.5(Mo) + 5(V) + 5.5(Al) + 1.75(Nb) + 1.5(Ti) + 0.75(W)

Τα πιο συνηθισμένα γ-φερρογόνα εκφράζονται από τη σχέση :Ni equivalent = (Ni) + (Co) + 0.5(Mn) + 0.3(Cu) + 25(N) + 30(C)

Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί στο διάγραμμα η μεγάλη επίδραση του C και του N σε σχέση με αυτή των υπόλοιπων κραματικών στοιχείων. Το διάγραμμα είναι πολύ

χρήσιμο για τον προσδιορισμό της μικροδομής των ανοξείδωτων χαλύβων, όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός, πλήρως, ωστενιτικού σε θερμοκρασία δωματίου. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της συγκόλλησης χαλύβων είναι αρκετά σημαντική η πρόβλεψη της μικροδομής, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν ελαττώματα συγκόλλησης και φαινόμενα έντονης τοπικής διάβρωσης, καθώς οι χάλυβες υπόκεινται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (τήξης) και μεγάλους ρυθμούς απόψυξης. Για αυτό, άλλωστε, η ανάγκη για τη δημιουργία αυτού του διαγράμματος, σηματοδοτήθηκε μέσω του τομέα των συγκολλήσεων. Επίσης, το διάγραμμα είναι χρήσιμο και για την πρόβλεψη της μικροδομής ανοξείδωτων χαλύβων που υπόκεινται σε διαμόρφωση και ανόπτηση. Γενικά, στην πορεία κατασκευάσθηκαν και άλλα διαγράμματα με κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τα ισοδύναμα κραματικά στοιχεία, τους συντελεστές βαρύτητας και τις προκύπτουσες φάσεις. [5-6]



Εικόνα 16 Διάγραμμα Schaeffler για ανοξείδωτους χάλυβες σε θερμοκρασία δωματίου [9].

<u>1.5 Διαγράμματα ΤΤΤ και CCT</u>

Το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη ισχύει με την προϋπόθεση ότι η απόψυξη γίνεται με πολύ αργό ρυθμό, ώστε οι διάφοροι μετασχηματισμοί που προβλέπονται να έχουν τον χρόνο να πραγματοποιηθούν μέσω διαχυσιακών φαινομένων. Στην περίπτωση που η ταχύτητα απόψυξης είναι μεγάλη, δεν υφίστανται υποχρεωτικά οι μετασχηματισμοί που προβλέπονται από το διάγραμμα και λαμβάνει χώρα η δημιουργία φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας. Για αυτό το λόγο ιδιαίτερης σημασίας χρήζουν τα διαγράμματα τα οποία εκφράζουν τη θερμοκρασία σε συνάρτηση με το χρόνο. Τέτοια διαγράμματα είναι το διάγραμμα TTT (Time-Temperature-Transformation or Isothermal Transformation Diagram) και το διάγραμμα CCT (Continuous-Cooling-Transformation). Τα πρώτο διάγραμμα λαμβάνεται υπόψη όταν μια θερμική κατεργασία πραγματοποιείται ισοθερμοκρασιακά και το δεύτερο, όταν υφίσταται υπό συνεχή απόψυξη.

Πιο συγκεκριμένα, το διάγραμμα TTT (*Εικόνα 17*), από άποψη κινητικών μηχανισμών διάσπασης του ωστενίτη, χωρίζεται σε τρεις περιοχές : α) την περλιτική περιοχή που βρίσκεται στην ανώτερη θερμοκρασιακή περιοχή, β) τη μπανιτική περιοχή που βρίσκεται στην ενδιάμεση θερμοκρασιακή περιοχή και γ) τη μαρτενσιτική περιοχή που βρίσκεται στην κατώτερη θερμοκρασιακή περιοχή. [10],[18-19]

Για τον περλίτη και το μπαινίτη υπάρχουν σιγμοειδείς καμπύλες στο διάγραμμα που αντιπροσωπεύουν την έναρξη και το τέλος του σχηματισμού τους. Επίσης, ενδιάμεσα από την περλιτική και τη μπαινιτική περιοχή βρίσκεται το λεγόμενο ωστενιτικό νησίδιο (austenite bay), συνήθης σε κάποιους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες που περιέχουν αξιόλογες ποσότητες καρβιδιογόνων κραματικών στοιχείων, όπως το Cr και το Mo. Όσον αναφορά το μαρτενσίτη, υπάρχουν δύο καμπύλες (οριζόντιες ευθείες), η M_s που σηματοδοτεί την έναρξη δημιουργίας του μαρτενσίτη και η M_f που σηματοδοτεί το τέλος της δημιουργίας του μαρτενσίτη. [10],[18-19]

Εν γένει, για να προκύψει η δημιουργία της μαρτενσιτικής δομής είναι σημαντικό να τηρούνται τρεις προϋποθέσεις. Αρχικά, οφείλει να υπάρχει ωστενιτική φάση στο χάλυβα. Επίσης, η απόψυξη από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης μέχρι τη θερμοκρασία ισοθερμοκρασιακής βαφής χρειάζεται να γίνει αρκετά γρήγορα, ώστε η καμπύλη απόψυξης να περάσει μπροστά από την περλιτική και τη μπαινιτική περιοχή, χωρίς να τις τμήσει. Με βάση το διάγραμμα ΤΤΤ μπορεί να ορισθεί ως κρίσιμη ταχύτητα απόψυξης, η καμπύλη απόψυξης που εφάπτεται στο αριστερότερο σημείο της καμπύλης έναρξης των μετασχηματισμών. Συνεπώς, η ταχύτητα απόψυξης του χάλυβα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη ταχύτητα θερμοκρασία απόψυξης του χάλυβα να περάσει τη θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί η καμπύλη M_s (καμπύλη έναρξης δημιουργίας μαρτενσίτη). [10],[18-19]

Όσον αφορά τα διαγράμματα CCT, παρέχουν δεδομένα για κάθε μετασχηματισμό φάσης και το κλάσμα όγκου του κάθε προϊόντος μετασχηματισμού, σχετιζόμενα με τις θερμοκρασίες και το ρυθμό απόψυξης σε σχέση με το χρόνο, σε περιπτώσεις θερμικών κατεργασιών που πραγματοποιούνται υπό συνεχή απόψυξη. Τα διαγράμματα CCT μπορούν να διαβαστούν μόνο κατά μήκος των ισόθερμων καμπυλών για διαφορετικούς ρυθμούς απόψυξης. Επιπλέον, αποτελεί ένα πιο σύνθετο διάγραμμα, καθώς ο ρυθμός απόψυξης διαφέρει από περιοχή σε περιοχή ενός υλικού, σχετιζόμενος με το σχήμα, τις διαστάσεις του και την πυκνότητά του. Για αυτό το λόγο, τα χαρακτηριστικά του ρυθμού απόψυξης διαφέρουν στην άκρη σε σύγκριση με το κέντρο του ίδιου υλικού. Ακόμη, οι καμπύλες σε ένα CCT διάγραμμα παρουσιάζουν αλλαγές για την απόψυξη του ίδιου τμήματος ενός χάλυβα σε περίπτωση χρήσης διαφορετικών ψυκτικών μέσων, όπως νερό, λάδι, υδατικό πολυμερές. Συνεπώς, θα ληφθούν και σχηματισμοί διαφορετικών φάσεων ή σε διαφορετικά κλάσματα όγκου. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ένα CCT διάγραμμα για το χάλυβα AISI 4140, όπου υποδεικνύονται οι περιοχές σχηματισμού του φερρίτη, του περλίτη, του μπαινίτη και η θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού Ms. Παρατηρείται, ότι η θερμοκρασία Ms δεν είναι σταθερή, όταν ο σχηματισμός μαρτενσίτη προηγείται του μπαινιτικού σχηματισμού, αλλά μειώνεται σε μεγαλύτερους χρόνους. [10],[18-19]

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των ΤΤΤ και CCT είναι η ύπαρξη μιας "μύτης" ("nose") η οποία αντιπροσωπεύει την έναρξη του περλιτικού μετασχηματισμού. Ο ρυθμός απόψυξης στη συγκεκριμένη περιοχή ονομάζεται κρίσιμος ρυθμός απόψυξης ενός χάλυβα, καθώς είναι ο χαμηλότερος ρυθμός απόψυξης στον οποίο ο χάλυβας μπορεί να αποψυχθεί και παρόλα αυτά να σκληρυνθεί τελείως ή αλλιώς ο χαμηλότερος ρυθμός απόψυξης στον οποίο πραγματοποιείται 100% μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Για την απόκτηση του μέγιστου ποσοστού σε μαρτενσίτη είναι αναγκαίο ο ρυθμός απόψυξης να είναι τόσο μεγάλος, ώστε να αποφευχθεί η περιοχή της "μύτης". Μια σημαντική διαφορά των δύο διαγραμμάτων είναι ότι η προαναφερόμενη περιοχή της "μύτης" βρίσκεται πιο κάτω και δεξιά στο διάγραμμα CCT σε σχέση με το διάγραμμα TTT, το οποίο δείχνει ότι υπάρχει περισσότερος χρόνος για το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό στο διάγραμμα CCT. Για αυτό στο διάγραμμα TTT φαίνεται εσφαλμένα ότι χρειάζεται πιο μεγάλος ρυθμός απόψυξης για τον πλήρη μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Επίσης, επειδή διαφέρουν χρονικά, η καθυστέρηση των μετασχηματισμών στο διάγραμμα CCT φαίνεται ιδιαίτερα στο μπαινίτη, ο οποίος παρατηρείται πιο δεξιά και σχηματίζεται πιο καθυστερημένα σε σχέση με την εμφάνιση του μπαινιτικού μετασχηματισμού στο διάγραμμα TTT. [18-19]

Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα παραπάνω δύο διαγράμματα εξαρτώνται από τη χημική σύσταση των χαλύβων και μπορούν να μεταβληθούν, εάν μεταβληθεί η περιεκτικότητα σε κάποιο ή κάποια από τα κραματικά στοιχεία. Δηλαδή, τα κραματικά στοιχεία ωθούν τις καμπύλες του διαγράμματος ΤΤΤ προς τα δεξιά και συγχρόνως αλλάζουν τη μορφή του διαγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα σε άνθρακα έχει μεγάλη επίδραση, όχι τόσο τη μορφή, αλλά κυρίως στη θέση των καμπυλών ΤΤΤ σε σχέση με τους άξονες. Για παράδειγμα, στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες, (Εικόνα 17) η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα εξωθεί τις καμπύλες προς τα δεξιά. Τα καρβιδιογόνα στοιγεία, όπως το Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, όντας α-φερρογόνα, ωθούν τις καμπύλες TTT προς τα δεξιά και ξεχωρίζουν τις δύο προεξοχές, περλιτική και μπαινιτική. Το Μο, επίσης, έχει την ιδιότητα να εξωθεί περισσότερο προς τα δεξιά την περλιτική παρά τη μπαινιτική περιοχή, διευκολύνοντας έτσι το μπαινιτικό μετασχηματισμό, χαρακτηριστικό το οποίο είναι χρήσιμο σε ορισμένες εφαρμογές. Τα κραματικά στοιχεία, όπως Ni, Cu, Mn και N, όντας γ-φερρογόνα στοιγεία, ωθούν τις καμπύλες ΤΤΤ προς τα δεξιά, αλλά χωρίς να επηρεάσουν σημαντικά τη μορφή τους. Ιδιόμορφη συμπεριφορά έχει το Co, το οποίο, αν και γ-φερογόνο, σπρώχνει τις καμπύλες ΤΤΤ προς τα αριστερά, μειώνοντας έτσι την εμβαπτότητα [10],[15].



Εικόνα 17 Διαγράμματα ΤΤΤ για τους χάλυβες: α) AISI 4140, β) AISI 4340 [19].



Continuous-cooling transformation diagrams for AISI (a) 4140 and (b) 4340 steels

Εικόνα 18 Διαγράμματα CCT για τους χάλυβες: a) AISI 4140, b) AISI 4340 [19].

1.6 Τεχνική Ανάπτυξης Επικαλύψεων μέσω Laser (Laser Cladding Process)

1.6.1 Μέθοδοι Προσθετικής Κατασκευής (Additive Manufacturing Processes)

Η τεχνική Laser Cladding (LC) ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων προσθετικής κατασκευής (additive manufactuing-AM). Σύμφωνα με το ISO-ASTM 52900, AM ορίζεται η μέθοδος ένωσης/σύζευξης υλικών, συνήθως ανά στρώμα, με στόχο την

κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων/εξαρτημάτων, σε αντίθεση με τις κατεργασίες αφαίρεσης υλικού ή διαμόρφωσης [20]. Για αυτό το λόγο, οι μέθοδοι AM είναι και ευρέως γνωστοί με την ονομασία τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) [20-26]. Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές, οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων εξαρτημάτων-δομών σε ένα βήμα, χωρίς την ανάγκη διεκπεραίωσης συμβατικών πολυπληθών βημάτων μέσω της χρήσης εξοπλισμού, όπως καλούπια χύτευσης. Ταυτόχρονα, ανάλογα με την επιλεχθείσα μεθοδο προσθετικής κατασκευής, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος κατασκευής, καθώς και το ενεργειακό κόστος και τα υλικά προς απόρριψη [21-22],[24-29]. Γενικά, βρίσκουν εφαρμογή στους τομείς της ιατρικής (π.χ. κατασκευή εμφυτευμάτων, ιστών), οδοντιατρικής, αυτκινηβιομηχανίας, ναυπηγικής, αεροναυπηγικής, ηλεκτρονικών ειδών [20-21], [23-27]. Μέσω των τεχνικών ΑΜ κατασκευάζονται πολυμερικά, κεραμικά και μεταλλικά εξαρτήματα [20],[23-28]. Επιπλέον, μπορούν να κατασκευαστούν και σύνθετα υλικά [24-26].

Οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής διακρίνονται, βάσει του γενικού μηχανισμού σύνδεσης που χρησιμοποιούν, σε επτά κύριες κατηγορίες, α) χρήση φωτοπολυμερικής ρητίνης σε ειδική δεξαμενή (vat photopolymerisation-VPP), β) έκχυση υλικού (material jetting-MJT), γ) απόθεση μέσω τήξης πούδρας η οποία διατίθεται σε μια επιφάνεια (powder bed fusion- PBF), δ) απόθεση μέσω άμεσης κατευθυνόμεσης ενέργειας (directed energy deposition-DED), ε) εξώθηση υλικού (material extrusion-MEX), στ) έκχυση συνδετικού υλικού (binder jetting-BJT) και ζ) ένωση λεπτών φύλλων (sheet lamination-SHL). [20],[23-24],[26]

1.6.2 Απόθεση μέσω Άμεσης Κατευθυνόμενης Ενέργειας (Directed Energy Deposition-DED)

Η τεχνική Laser Cladding ανήκει στην κατηγορία DED. Η τεχνική απόθεσης μέσω άμεσης κατευθυνόμενης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προσθετικές κατασκευές και για λόγους επισκευής κάποιου εξαρτήματος, με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής του και τη μέιωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα προέκυπταν από την εκ νέου παραγωγή του. Πιο συγκεκριμένα, ως μέθοδος περιλαμβάνει την τήξη, και στερεοποίηση ενός αποτιθέμενου υλικού πάνω σε μία επιφάνεια, μέσω χρήσης κατευθυνόμενης δέσμης ενέργειας. Το αποτιθέμενο υλικό μπορεί να είναι πολυμερές, κεραμικό, μεταλλικό. Η τροφοδοσία μεταλλικού υλικού προς απόθεση γίνεται με τη μορφή σκόνης ή με τη μορφή σύρματος. Το υπόστρωμα μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε αμετάβλητο σύστημα 3 αξόνων, είτε σε περιστρεφόμενο σύστημα 5 αξόνων [20],[22-25],[28],[30]. Εν γένει, στη DED η τήξη του τροφοδοτούμενου υλικού πραγματοποιείται, συνήθως, είτε με δέσμη λέιζερ (laser beam), είτε δέσμη ηλεκτρονίων (electron-beam), ή τόξο πλάσματος (plasma arc) ή ηλεκτρικό τόξο (electric arc) [20],[22],[24-25],[30]. Τα λείζερ που επιλέγονται είναι, α) λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ laser), β) λέιζερ γρανάτη αλουμινίου-υττρίου με προσθήκη νεοδυμίου (Nd:Yag laser - neodymium-doped yttrium aluminium garnet), γ) λέιζερ οπτικών ινών με προσμίξεις σπάνιων γαιών (fiber laser), δ) λέιζερ κρυστάλλου σε σχήμα δίσκου με προσμίξεις σπάνιων γαιών (disk laser), ε) διοδικό λέιζερ (diode laser). Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής της DED γρησιμοποιούνται λέιζερ τα οποία έχουν χαρακτηριστικό μήκος κύματος κοντά στο 1μm, εξαιτίας της βελιτωμένης απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο φάσμα του εγγύς υπερύθρου από τα μεταλλικά υλικά και της μετάδοσης της μέσω οπτικής ίνας [20]. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε αδρανή ατμόσφαιρα για την αποφυγή οξειδώσεων [20], [22-25], [28], [30].

Σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες ΑΜ, μπορεί να αποθέσει μεγάλες ποσότητες υλικού, όπως στην περίπτωση τροφοδοσίας με σύρμα, μέχρι και 508 έως 1016 cm³/min. Επίσης, μπορεί να επιτευχθεί συνδυασμός των υλικών προς απόθεση, είτε με ανάμιξη αυτών στην κατάλληλη αναλογία, είτε μέσω της παροχής τους από διαφορετικά ακροφύσια. Βέβαια, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μέθοδος DED χρησιμοποιέιται πιο δύσκολα για την επεξεργασία και κατασκευή πολύπολκων γεωμετρικών δομών, όπως στενές εσωτερικές κυλινδρικες διαδρομές και κοιλότητες. Επιπροσθέτως, αρκετές φορές τα παραχθέντα προιόντα χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία (θερμικές και μηχανουργικές κατεργασίες), η οποία μπορεί να αποβεί χρονοβόρα και κοστοβόρα [20]. Επίσης, στις κατηγορίες DED και PBF εξασφαλίζονται χαμηλότερα ποσοστά πορώδους σε σχέση με τις άλλες τεχνικές AM [23].

1.6.3 Ανάλυση Τεχνικής Laser Cladding

Εν συνεχεία, εστιάζοντας στην τεχνική του laser cladding, αυτή ξεκίνησε σιγά σιγά με την έναρξη της τεχνολογίας του λέιζερ το 1960. Εκείνη την εποχή, λόγω του αρχικού υψηλού κόστους και της χαμηλής απόδοσης των πηγών δέσμης λέιζερ, η μέθοδος του laser cladding καθυστέρησε να εδραιωθεί ευρέως στο βιομηχανικό τομέα, γεγονός το οποίο σηματοδοτήθηκε τη δεκαετία του 1980 [**31**]. Αποδείχθηκε, βέβαια, ότι ήταν μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική τεχνική σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης, διότι οδηγεί σε αποτελεσματική μεταλλουργική συνοχή μεταξύ των υλικών, με μικρότερα και ελεγχόμενα ποσοστά διαλυτότητας, μικρότερες θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες και τη μείωση ή και εξάλειψη του πορώδους, παρέχοντας τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες [**25**],[**31-34**].

Η τεχνική LC συναντάται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, καθώς χρησιμοποιείται είτε για την επισκευή, είτε την ενίσχυση διαφόρων μηχανικών μερών και εξαρτημάτων τα οποία δουλεύουν υπό πολλούς κύκλους λειτουργίας, σε υψηλές θερμοκρασίες, σε έντονα οξειδωτικές και διαβρωτικές συνθήκες. Τέτοια μηχανικά εξαρτήματα μπορεί να είναι γρανάζια, στροφαλοφόροι κινητήρες πλοίων, εκκεντροφόροι άξονες, έμβολα, κυλινδροκεφαλές, τροχοί σιδηροδρομικού δικτύου, τα οποία βρισκουν εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε διυλιστήρια, σε εργοστάσια παραπάνω μηχανικά μέρη είναι σημαντικό να διαθέτουν την κατάλληλη επιφάνεια από πλευράς τραχύτητας και αντίστασης σε φθορά και τριβή, την απαραίτητη αντίσταση σε διάβρωση και οξείδωση και σημαντικές μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή μηχανική αντοχή, σκληρότητα, δυσθραυστότητα, αντοχή σε κόπωση. [31-32],[35-37]

Ουσιαστικά, η τεχνική LC αποτελεί μια δικαδικασία τήξης και στερεοποίησης ενός υλικού προς απόθεση σε μία επιφάνεια του ίδιου ή ενός άλλου υλικού, διαθέτοντας ως πηγή θερμότητας το λέιζερ. Το υλικό προς απόθεση μπορεί να είναι είτε με τη μορφή πούδρας είτε με τη μορφή λεπτού σύρματος (*Εικόνα 19*). Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται μεταλλικές πούδρες. Το λέιζερ, δηλαδή, δρα, τήκοντας την τροφοδοτούμενη μεταλλική πούδρα και δημιουργεί μια ζώνη τήξης (melt pool) στην οποία συνεχίζει να τήκεται η επιπλέον προστιθέμενη πούδρα. Οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλές, αφού πραγματοποιείται τήξη του υλικού προς απόθεση και ακολούθως, είναι αρκετά γρήγορος και ο ρυθμός απόψυξης της

αποτιθέμενης επιφάνειας **[31-32],[37-38]**. Ο ρυθμός απόψυξης μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 10⁶ K/s **[39]**. Συνήθως, χρησιμοποιέιται για την επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών με άλλα μεταλικά υλικά και καρβίδια **[31-32],[37-38]**.

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική LC περιλαμβάνει τη διάταξη του λέιζερ, ένα ρομποτικό σύστημα ελέγχου κίνησης, το σύστημα παροχής της πούδρας και το ακροφύσιο από όπου εξέρχεται και το σύστημα παροχής αδρανούς αερίου, συνήθως αργού (Ar), για τη μεταφορά της πούδρας και τη δημιουργία συνθηκών αδρανούς ατμόσφαιρας, με στόχο την προστασία της επιφάνειας του υλικού από τυχόν οξείδωση κατά τη διάρκεια της απόθεσης. Η παροχή της πούδρας μπορεί να επιτευχθεί και με τη δύναμη της βαρύτητας. Η συνήθης ισχύς ανάλογα με την επιλογή του laser, οι κατηγορίες του οποίου αναφέρθηκαν παραπάνω, κυμαίνεται στα 0,5-3kW. Επιπλέον, το σύστημα τροφοδοσίας μπορεί να βρίσκεται μαζί με την παροχή του λέιζερ σε 90° μοίρες με το υπόστρωμα (coaxial) ή να διαφοροποιείται από αυτή, να μην είναι ομοαζονικά και να βρίσκεται πλευρικά, συνήθως σε εύρος 30° έως 60° μοιρών με το υπόστρωμα (off-axis) (*Εικόνα 20*). Με τον πρώτο τρόπο, δε χρειάζεται ρύθμιση της γωνίας παροχής της πούδρας και επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος για πιο αποτελεσματική τήξη της πούδρας και μια πιο ομοιόμορφη απόθεση. [31-32],[37-38]



Εικόνα 19 Τεχνική laser cladding: α) με πλευρική τροφοδοσία πούδρας, β) με λεπτό σύρμα ως υλικό τροφοδοσίας [38].



Εικόνα 20 α) Ομοαζονική παροχή (coaxial supply), β) Πλευρική παροχή (lateral or off-axis supply) [32].

1.6.4 Μεταλλουργική Δομή και Παράμετροι Τεχνικής Laser Cladding

1.6.4.1 Μορφολογία Επικάλυψης-Ζώνες-Παράμετροι Διάταξης Laser

Ιδιαίτερα μεγάλης σημασίας χρήζουν οι παράμετροι της μεθόδου, καθώς μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας και πιο συγκεκριμένα την ποιότητα της εναποτιθέμενης επιφάνειας και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Εν γένει, οι ιδιότητες που μπορούν να καθοριστούν παρουσιάζονται πιο συγκεντρωμένα στον ακόλουθο *Πίνακα 1*. Κάποιες από τις ιδιότητες, επίσης, επηρεάζουν η μία την άλλη, όπως, για παράδειγμα, η μικροδομή επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 1 Κατάταξη σε κατηγορίες των σημαντικότερων ιδιοτήτων ενός προϊόντος της τεχνικής laser cladding [32].

Επιφανειακές/Γεωμετρικές	Μηχανικές	Μεταλλουργικές	Ιδιότητες
Ιδιότητες	Ιδιότητες	Ιδιότητες	Ποιότητας
(Surface/Geometrical	(Mechanical	(Metallurgical	(Qualitative
Properties)	Properties)	Properties)	Properties)
Διαστάσεις επικάλυψης (Clad dimensions)	Σκληρότητα (Hardness)	Μικροδομή σε όλες τις ζώνες (Microstructure)	Πορώδες (Porosity)
Διαστάσεις ζώνης διαλυτοποίησης (Dilution zone dimensions)	Παραμένουσες τάσεις (Residual stress)	Μέγεθος κόκκων (Grain size)	Δημιουργία ρωγμών (Cracking)
Διαστάσεις θερμικά	Αντίσταση στη	Ομοιογένεια	
επηρεασμένης ζώνης (HAZ	φθορά (Wear	(Homogeneity)	

dimensions)	resistance)		
Τραχύτητα (Roughness)	Αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength)	Αντίσταση στην οξείδωση και διάβρωση (Oxidation and corrosion resistance)	
	Αντοχή στην κόπωση (fatigue strength)		

Για να γίνει πιο κατανοητή παρακάτω, η επίδραση των παραμέτρων στην ποιότητα της επικάλυψης, χρειάζεται να αναφερθεί η μορφολογία της μικροδομής και από ποιές ζώνες αποτελείται. Σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές και πειραματικές αναφορές, η επικάλυψη ενός στρώματος, από μια φωτογραφία στην τομή της, φαίνεται ότι αποτελείται από πολλές ημιελλειπτικές κοιλότητες (beads) οι οποίες εξέχουν προφανώς από την επιφάνεια του υποστρώματος. Για αυτό και η επικάλυψη μπορεί να ονομαστεί και ως bead zone-bz. Ανάλογα με το ποσοστό διαλυτοποίησης, το οποίο επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες που θα αναλυθούν στη συνέχεια, καθορίζεται η ζώνη διαλυτοποίησης (dilution zone-dz) και συνεπώς το βάθος στο οποίο θα εισχωρήσει το κάτω μέρος της κοιλότητας της επικάλυψης στο εσωτερικό του υποστρώματος. Στη ζώνη διαλυτοποίησης αναμένεται αλλοίωση της χημικής σύστασης της επικάλυψης από αυτή του υποστρώματος. Στη συνέχεια, κάτω από τη ζώνη διαλυτοποίησης βρίσκεται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat affected zonehaz) η οποία αντιπροσωπεύει το επηρεασμένο υπόστρωμα από την έντονη θερμική κατεργασία του laser cladding. Τέλος, κάτω από τη HAZ βρίσκεται το υπόστρωμα άθικτο, χωρίς καμία μεταβολή στη μικροδομή του. Μία αντιπορσωπευτική εικόνα για την περαιτέρω κατανόηση της μορφολογίας της μικροδομής ενός υλικού (π.χ. χάλυβας) που υποβληθηκε στην τεχνική laser cladding μπορεί να δοθεί από το ερευνητή κ. Alam και τους συναδέλφους του (Εικόνα 21) [39].


Εικόνα 21 Μικροδομή κάθετης τομής χάλυβα AISI 1018 ο οποίος έχει επικαλυφθεί με μεταλλική πούδρα μαρτενσιτικού ανοζείδωτου χάλυβα 420 μέσω της τεχνικής laser cladding. Η εικόνα έχει ληφθεί από οπτικό μικροσκόπιο [**39**].

Η τεχνική του laser cladding, ως επιτυχημένο αποτέλεσμα, θεωρεί την ισχυρή μεταλλουργική συνοχή μεταξύ του υλικού απόθεσης και του υποστρώματος, χωρίς να υπάρχουν μεγάλα ποσοστά διαλυτοποίησης [32]. Ποσοστό διαλυτοποίησης ονομάζεται το ποσοστό των κραματικών στοιχείων του υποστρώματος που έχει αναμιχθεί με την τηγμένη πούδρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάμειξη, αυξάνεται και το ποσοστό διαλυτοποίησης. Ένα στρώμα επικάλυψης με χαμηλό ποσοστό διαλυτοποίησης μπορεί να παραχθεί, όταν η πούδρα τήκεται και στερεοποιείται με αμελητέα ανάμειξη με το υπόστρωμα. Με άλλα λόγια, όταν η ζώνη διαλυτοποίησης (dilution zone) είναι αρκετά μικρή [40]. Επιτυχημένο συνολικό ποσοστό μπορεί να θεωηρθεί το 2-5% του υποστρώματος [33],[40-41]. Η διαλυτοποίηση σαν μέγεθος χτησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό της ποιότητας των προϊόντων αυτής της Επιπροσθέτως, για να επιτευχθεί πλήρης επικάλυψη του τεχνικής [32]. υποστρώματος, οι ημιελλειπτικές κοιλότητες (beads), συνήθως, αλληλοεπικαλύπτονται μεταξύ τους σε ποσοστό 50% του συνολικού τους πλάτους **[40]**.



Εικόνα 22 Μικροδομή κάθετης τομής υλικού με μονοστρωματική επικάλυψη, στο οποίο φαίνεται η ζώνη διαλυτοποίησης [40].

Η διαλυτοποίηση μπορεί να μετρηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος βασίζεται στη γεωμετρία της επικάλυψης και προϋποθέτει ότι έχει προηγηθεί σε αυτή ομογενοποιημένη διασπορά των κραματικών στοιχείων. Η διαλυτοποίηση ορίζεται ως ο λόγος του βάθους της επικάλυψης μέσα στο υπόστρωμα (d_c) προς το συνολικό της ύψος (t_c), d_c/t_c (*Εικόνα 23*). Επίσης, ως ύψος της επικάλυψης μέχρι την επιφάνεια του υποστρώματος θεωρείται το h_c και ως συνολικό πλάτος της επικάλυψης η οποία συγκρίνεται με τη χημική σύσταση του υλικού απόθεσης και του υποστρώματος πριν την έναρξη της διαδικασίας. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό του ποσοστού της διαλυτοποίησης κατά μήκος και κατά πλάτος της επικάλυψης το κοκοπικάλυψης και δεν απαιτεί την ύπαρξη ομογενοποιημένης διασποράς των κραματικών στοιχείων, όπως η πρώτη μέθοδος.

Ο λόγος d_c/t_c που αναφέρθηκε παραπάνω, μαζί με το λόγο h_c/w_c (αναλογία απεικόνισης της επικάλυψης-aspect ratio) αποτελούν δύο σημαντικούς συντελεστές αξιολόγησης της ποιότητας επικάλυψης οι οποίοι επηρεάζονται από την επιλογή των παραμέτρων του laser cladding [42]. Είναι πιθανό να προκύψουν δύο ακραίες περιπτώσεις, ως προς το ποσοστό διλαυτοποίησης. Η πρώτη περίπτωση αφορά φαινόμενα πολύ υψηλών ποσοστών διαλυτοποίησης (high dilution and keyholing phenomenon), εξαιτίας της εφαρμογής υψηλής ισχύος ή/και χαμηλού ρυθμού τροφοδοσίας της πούδρας, όπου το βάθος της επικάλυψης d_c είναι πολύ μεγαλύτερο

από το ύψος h_c. Η δεύτερη περίπτωση αφορά φαινόμενα πολύ χαμηλών ποσοστών διαλυτοποίησης (low dilution and lack of fusion phenomenon), εξαιτίας της εφαρμογής χαμηλής ισχύος ή/και υψηλού ρυθμού τροφοδοσίας της πούδρας, όπου το βάθος της επικάλυψης d_c είναι πολύ μικρότερο από το ύψος h_c [22].



Εικόνα 23 Εικόνα κάθετης τομής υλικού με μονοστρωματική επικάλυψη, στο οποίο προσδιορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επικάλυψης [32].

Οι πιο σημαντικοί παράμετροι σχετιζόμενοι με τη διάταξη του laser cladding και οι μονάδες μέτρησής τους με τις οποίες, συνήθως, εκφράζονται παρουσιάζονται ακολούθως [25-26],[31-32]:

- η ισχύς του λέιζερ (laser power) (σε W ή kW)
- η ταχύτητα του λέιζερ (laser scanning speed) σε (mm/s)
- η διάμετρος της δέσμης του λέιζερ (laser spot diameter) (σε mm)
- το ύψος ή αλλιώς η απόσταση μεταξύ του λέιζερ και του υποστρώματος (laser height) (σε mm)
- η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών στρωμάτων (hatch spacing) (σε μm)
- η παροχή τροφοδοσίας της πούδρας (powder flow rate) (σε g/min)
- η γωνία παροχής της πούδρας μεταξύ ακροφυσίου και υποστρώματος (powder injection angle) (σε μοίρες)
- η παροχή του αδρανούς αερίου (shielding gas flow rate) (lt/min)

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που προκύπτει από κάποιες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι η ειδική ενέργεια (specific energy, E) ή αλλιώς ενεργειακή πυκνότητα (laser energy density). Η ειδική ενέργεια είναι η ενέργεια που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί το επιθυμητό ποσοστό διαλυτοποίησης για την επιτυχημένη μεταλλουργική συνοχή και το μέγιστο δυνατό πάχος της επικάλυψης. Δίνεται από την ακόλουθη σχέση (eq.1) [32],[42].

Specific energy, E (J/mm²) = $\frac{\text{Laser power (W)}}{\text{Laser spot diameter (mm) x Laser scanning speed }}$ (eq.1)

Αλλάζοντας τις προαναφερόμενες παραμέτρους, σε συνδυασμό με τα έντονα και πολύπλοκα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνουν χώρα (μεταφορά θερμότητας μεταξύ στερεής, υγρής και αέριας φάσης) επηρεάζονται το ύψος και πλάτος της απόθεσης (bead height), το πάχος της επικάλυψης (clad thickness), το βάθος της περιοχής τήξης της πούδρας (melt pool depth), το ποσοστό διαλυτοποίησης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής διαλυτοποίησης (dilution zone-DZ) και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (heat affected zone-HAZ), οι λόγοι d_c/t_c και h_c/w_c, η προκύπτουσα μικροδομή, στοιχεία τα οποία θα επηρεάσουν με τη σειρά τους τις μετέπειτα μηχανικές ιδιότητες και την ποιότητα της επιφάνειας. **[31-32]**

Επιπλέον, κατά την παραγωγή ενός συνεχούς στρώματος επικάλυψης υπάρχει διαφορά στην ποιότητα του στην αρχή της λειτουργίας του laser cladding σε σύγκριση με τη συνέχεια. Στην αφετηρία, η θερμότητα που διοχετεύεται δεν είναι τόσο ισορροπημένη όσο στη συνέχεια, με αποτέλεσμα να υπάρχει διαβάθμιση της συσσωρευόμενης θερμότητας και κατά συνέπεια, να επηρεάζεται και το πάχος των ζωνών επικάλυψης, διαλυτοποίησης και θερμικά επηρεασμένης ζώνης (*Εικόνα 24*). Δηλαδή, στην αρχή το πάχος τους είναι μικρότερο, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται. Συνεπώς και εδώ τίθεται το ζήτημα της σωστής παραμετροποίησης της διαδικασίας για ένα ποιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα. [40]



Εικόνα 24 Κάθετη τομή μικροδομής δείγματος Hastelloy C, όπου διακρίνεται αύζηση των περιοχών επικάλυψης, διαλυτοποίησης και θερμικά επηρεασμένης ζώνης **[40]**.

1.6.4.2 Παράμετροι Πούδρας

Μαζί με τις παραμέτρους της διάταξης, εξίσου απαραίτητος, για τους ίδιους λόγους, είναι και ο προσδιορισμός των κατάλληλων παραμέτρων σχετικά με τα χαρακτηριστικά της πούδρας, δηλαδή: α) την πυκνότητά της (powder density), β) τη χημικής της σύσταση (chemical composition), γ) την αναλογία της (powder ratio) αν πρόκειται για συνδυασμό πουδρών, δ) το εύρος του μεγέθους των κόκκων της (particle size distribution) και ε) το σχήμα τους (particle shape) **[23-26],[28],[31-32]**. Για αυτό το λόγο, ο συνδυασμός των παραμέτρων σχετικά με την πούδρα και τα χαρακτηριστικά της διάταξης αποτελεί βαρυσήμαντη προϋπόθεση για την εύρυθμη και αποτελεσματική επικάλυψη ενός υλικού με τις επιθυμητές ιδιότητες.

Πιο αναλυτικά, είναι σημαντικό να υπάρχει ποικιλία στο μέγεθος των κόκκων, έτσι ώστε οι μικρότεροι, σε μέγεθος, κόκκοι να κλείνουν τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πυκνότητα της πούδρας και να μειώνονται τα κενά μεταξύ τους. Η ύπαρξη κενών στις πούδρες μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της επικάλυψης προωθώντας τη δημιουργία πορώδους. Επίσης, οι κόκκοι με μικρό μέγεθος, έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, οπότε απορρόφούν μεγαλύτερα ποσα θερμότητας κατά τη διάρκεια του laser cladding και έτσι τήκονται πιο εύκολα ή σε περίπτωση πολύ μικρού μεγέθους, μπορεί και να εξατμιστούν και να μην προλάβουν να στερεοποιηθούν. Για αυτό, οι αρκετά μεγάλοι κόκκοι μπορεί να μην τηχθούν πλήρως και να υποβαθμιστεί έτσι η επικάλυψη και οι μηχανικές της ιδιότητες. Η τραχύτητα, επίσης, των κόκκων παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς οι κόκκοι με μεγάλη τραχύτητα συσσωρεύονται, σχηματίζοντας λιγότερο πυκνές διατάξεις, συνεπώς έχουν μικρότερη πυκνότητα και προκύπτουν περισσότεροι κενοί χώροι μεταξύ των κόκκων, δηλαδή εν δυνάμει πόροι [23],[28]. Όσον αφορά το σχήμα των κόκκων της πούδρας, προτιμάται το σφαιρικό σχήμα, γιατί έτσι εξασφαλίζεται μεγαλύτερη πυκνότητα. Βέβαια, ανάλογα με τη μέθοδο παρασκευής τους μπορεί να προκύψουν και πιο μακρόστενα σχήματα, αλλά και μορφολογίες, όπως α) συσσωματώματα (agglomerates) (δύο ή περισσότεροι κόκκοι τήκονται εν μέρει και συνενώνονται δημιουργώντας συσσωματώματα που έχουν υποστεί παραμόρφωση και πλέον έχουν ακανόνιστο σχήμα), β) μορφολογία δορυφόρου (satellites) (μικρότεροι κόκκοι λόγω της θέρμανσης ενώνονται με μεγάλα σωματίδα χωρίς ενδείξεις τήξης και παραμόρφωσης) και γ) μεμονωμένα περιστατικά κόκκων που έχουν υποστεί μερική τήξη και έχουν παραμορφωθεί. Αυτές οι μορφολογίες προκύπτουν και κατά τη διάρκεια του laser cladding. Επιπροσθέτως, οι τεχνικές παραγωγής των πουδρών μπορεί να επηρεάσουν τη χημική σύσταση τους, σε περίπτωση οξείδωσης ή επιμόλυνσης καθώς και την ύπαρξη εγκλεισμάτων ή πόρων στο εσωτερικό κάποιων κόκκων τους [23],[28]. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της πούδρας είναι η ρευστότητα (flowability) των κόκκων της, διότι καθορίζει την κίνησή τους και πόσο εύκολα μπορεί να γίνει η τροφοδοσία τους, συνεπώς την παρογή της πούδρας. Η καλή ρευστότητα μιας πούδρας μπορεί να εξασφαλίσει τη σταθερή παρογή της και να αποφευγθούν φαινόμενα ανεπαρκούς διαλυτοποίησης. Η ρευστότητα εξαρτάται από τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των κόκκων. Για αυτό το λόγο η ύπαρξη υγρασίας, η υψηλή τραχύτητα και η ύπαρξη πολλών κόκκων μικρού μεγέθους, αυξάνει τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ τους και δυσχεραίνει την κινητικότητα τους [28].

Συνήθως, οι πούδρες που προορίζονται για τεχνικές, όπως αυτή του laser cladding, παρασκευάζονται μέσω της διαδικασίας ψεκασμού ενός τηγμένου μετάλλου με μίγμα αερίων υψηλής ταχύτητας και πίεσης (π.χ. αργό, ήλιο, υδρογόνο, άζωτο), με αποτέλεσμα την στερεοποίηση των τηγμένων σταγόνων (gas atomization) [24],[28],[40],[43]. Άλλες δύο μέθοδοι παραγωγής πουδρών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικό επίπεδο, οι οποίες διαφέρουν με την τεχνική gas atomization ως προς το μέσο με το οποίο ψεκάζεται το τηγμένο μέταλλο, είναι ο ψεκασμός με νερό (water atomization) και ο ψεκασμός με πλάσμα (plasma atomization) [28]. Ανάλογα με την επιλεγόμενη παραγωγική διαδικασία και την παραμετροποίηση της προκύπτουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πούδρας και η ποιότητά της σχετικά με την ύπαρξη ή μη πόρων ή εγκλεισμάτων στους κόκκους της [28],[43]. Για παράδειγμα, οι κόκκοι

μεγαλύτερο ποσοστό οξυγόνου. Μέσω της τεχνικής gas atomization παράγονται πούδρες με σχετικά σφαιρικούς κόκκους και μικρότερα ποσοστά υγρασίας. Με τη μέθοδο plasma atomization παράγονται πούδρες υψηλής ποιότητας γιατί έχουν αυστηρά σφαιρικό σχήμα [28].

<u>1.6.4.3 Ελαττώματα</u>

Όπως προαναφέρθηκε, ο καθορισμός όλων των παραπάνω παραμέτρων σε συνδυασμό με την επιλογή του υλικού προς απόθεση και του υποστρώματος, πρέπει να πραγματοποιηθεί σοφά, ώστε να αποφευχθούν ελαττώματα (*Εικόνα 25*) που μπορούν να οδηγήσουν στην υποβάθμιση των μηχανικών ιιδοτήτων και στην αστοχία του επεξεργαζόμενου εξαρτήματος. Τέτοια ελαττώματα είναι: a) η δημιουργία και διάδοση εσωτερικών ρωγμών κατά τη στερεοποίηση (solidification cracking), β) η συσσώρευση τάσεων (residual stress), γ) η ανεπαρκής διαλυτοποίηση (insufficient dilution) με αποτέλεσμα τη μη επαρκή μεταλλουργική συνάφεια και συνοχή (bonding defect), δ) η δημιουργία πορώδους (porosity) και εγκλεισμάτων (inclusions), ε) φαινόμενα μικροδιαφορισμού (microsegregation) και στ) αλλαγές στη χημική σύσταση. [22-23],[25],[27-28],[31-32],[42]





<u>Μικροδιαφορισμός</u>: Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται κατά τη στερεοποίηση, λόγω των διαφορετικών ποσοστών διαλυτοποίησης των κραματικών στοιχείων στη μητρική δομή ενός υλικού, όταν βρίσκεται σε στερεή και υγρή φάση. Δηλαδή, κατά τη στερεοποίηση, περίσσεια ποσότητα διαλυμένων κραματικών στοιχείων απορρίπτεται από τη στερεή φάση στην υγρή και κατά συνέπεια παγιδεύεται σε διάφορες περιοχές μέσα στη μικροδομή. Αυτή η μη ομογενοποιημένη συγκέντρωση κάποιων κραματικών στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε κατακρήμνιση μη επιθυμητών φάσεων και στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού. Ο μικροδιαφορισμός μπορεί να μειωθεί μέσω της αύξησης του ρυθμού απόψυξης, ή μέσω θερμικών κατεργασιών ομογενοποίησης ή άλλων κατεργασιών εν θερμώ. Συνήθως το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. [20],[22]

Πορώδες-Εγκλείσματα: Αποτελούν ανεπιθύμητα φαινόμενα, καθώς υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αφού μπορούν να αποτελέσουν κέντρα έναρξης ρωγμών, ιδιαίτερα σε περίπτωση που υποβληθούν σε εφελκυστικές τάσεις. Η εμφάνιση οπών στο στρώμα της επικάλυψης ονομάζεται πορώδες και μπορεί να προκληθεί με πολλούς τρόπους. Η δημιουργία πορώδους μπορεί να προκύψει εξαιτίας της κακής ποιότητας της πούδρας, όπως αναλύθηκε πιο πάνω στις παραμέτρους, της μη επιτυχής παραμετροποίησης της τεχνικής LC και κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι σχηματισμού πορώδους, α) ο σχηματισμός πορώδους στο στρώματος και του υποστρώματος (interlayer porosity) και β) ο σχηματισμός πορώδους στο εσωτερικό των διαφόρων στρωμάτων της επικάλυψης (intralayer porosity). [20],[22-23],[32]

Ο πρώτος τύπος οφείλεται, είτε στην επιλογή ακατάλληλης ποιότητας ή κοκκομετρίας της πούδρας (π.χ. ύπαρξη πολλών χονδρομερών κόκκων, ύπαρξη κενών, κ.α.), είτε στη μη επαρκή θερμική ενέργεια ή στην αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας της πούδρας ή σε συνδυασμό τους, όπου συμπεριλαμβανομένου και του γρήγορου ρυθμού απόψυξης, πραγματοποιείται μερική τήξη της πούδρας, δημιουργούνται μη τηγμένες περιοχές και προκύπτουν μικρά και ανεπαρκή ποσοστά διαλυτοποίησης. Αυτές οι περιοχές έχουν ακανόνιστο σχήμα και σχετικά μεγάλο μέγεθος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται και δημιουργία πορώδους λόγω ανεπαρκούς διαλυτοποίησης (lack of fusion porosity) [20],[22-23],[27-28]. Επιπλέον, στην περίπτωση τροφοδοσίας με μεγάλη ποσότητα πούδρας, μπορεί να σχηματιστούν κενά ή να παγιδευτούν φυσσαλίδες μεταξύ των ημιελλειπτικών κοιλοτήτων (beads) που αποτίθενται, στις αλληλοεπικαλυπτόμενες περιοχές τους. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται inter-run porosity (*Εικόνα 26*) [32],[41].

Αντιθέτως, ο δεύτερος τύπος σχηματισμού πορώδους προκύπτει από την παγίδευση φυσσαλίδων του αδρανούς αερίου μέσα στη τηγμένη περιοχή. Συνήθως, απαντάται σε

περιοχές με χαμηλότερους ρυθμούς στερεοποίησης και υψηλά ποσοστά διαλυτοποίησης, λόγω εφαρμογής υψηλής ισχύος. Οι πόροι έχουν σφαιρικό σχήμα, μικρότερο μέγεθος και μπορούν να εξαληφθούν με δόνηση του υποστρώματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται keyholing porosity effect. Το ίδιο μπορεί να συμβεί εάν εγκλωβιστούν φυσσαλίδες αέρα σε περίπτωση μη επιτυχούς αδρανούς ατμόσφαιρας. Επίσης, εάν η στερεοποίηση προχωρήσει προς διαφορετικές κατευθύνσεις ανομοιόμορφα, κάποιες περιοχές μπορεί να παραμείνουν τηγμένες, οι οποίες όταν στερεοποιηθούν με τη σειρά τους, να συσταλλούν, με αποτέλεσμα να προκαλέσουν εφελκυστικές τάσεις στο αποτιθέμενο στρώμα και να προκληθεί η δημιουργία οπών. [22-23],[27-28],[32]

Αντίστοιχα, σε διάφορες περιοχές της επικάλυψης μπορεί να δημιουργηθούν εγκλείσματα τα οποία να υποβαθμίσουν και αυτά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση εισροής ατμοσφαιρικών συνθηκών, εγκυμονεί η δημιουργία εγκλεισμάτων οξειδίου, λόγω της μεγάλης χημικής συγγένειας αρκετών κραματικών στοιχείων με το οξυγόνο [20],[32]. Επιπροσθέτως, η ύπαρξη ακαθαρσιών και επιμολύνσεων, όπως το γράσο, το οποίο παρεμβάλλεται στη διεπιφάνεια, επηρεάζει την επιφανειακή τάση, την πρόσφυση και τη συνοχή της επικάλυψης πάνω στο υπόστρωμα με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν εγκλείσματα [32]. Ακόμη, στην περίπτωση μεγάλου βάθους της ζώνης διαλυτοποίησης, λόγω των υψηλών επιφανειακών τάσεων του τηγμένου μετάλλου και της ροής του ρευστού προς το εσωτερικό μπορούν να παγιδευτούν μη επιθυμητά οξείδια ή άλλα σωματίδια και να σχηματιστούν εγκλείσματα [22].



Εικόνα 26 Το φαινόμενο του inter-run porosity [32].

Παραμένουσες τάσεις (Residual stress): Λόγω της υψηλής θέρμανσης και γρήγορης απόψυξης του υλικού δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις, οι οποίες δρουν υποβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητές του, διότι μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικές παραμορφώσεις, τοπικές αποκολλήσεις της επικάλυψης, στρεβλώσεις του υποστρώματος, απώλεια γεωμετρικής ανοχής και δημιουργία και διάδοση ρωγμών. Οι παραμένουσες τάσεις υφίστανται σε διάφορες περιοχές και μάλιστα έχουν και διαφορετική συμπεριφορά. Δηλαδή, μελέτες έχουν δείξει ότι κοντά στην περιοχή της επιφάνειας της επικάλυψης οι παραμένουσες τασεις είναι εφελκυστικές, ενώ πλησιάζοντας προς τη διεπιφάνεια επικάλυψης-υποστρώματος είναι θλιπτικές. Επιπλέον, οι παραμένουσες τάσεις αυξάνονται στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής LC μεταξύ διαφορετικών υλικών. Για τη μείωση των τάσεων αυτών συνήθως προηγείται του laser cladding κάποιο στάδιο προθέρμανσης του υποστρώματος ή/και υφίσταται κάποιο στάδιο θερμικής κατεργασίας μετά την υλοποίηση της επικάλυψης [20],[22-23],[44-45]. Ένας αρκετά σημαντικός προληπτικός παράγοντας για την εξάλειψη των τάσεων είναι η πούδρα και το υπόστρωμα να έχουν παρόμοιους συντελεστές θερμικής διαστολής, χωρίς ιδιαίτερες αποκλίσεις [20], [23], [32].

Δημιουργία ρωγμών (cracking propagation), φαινόμενα αποκόλλησης (delamination), φουσκώματος (swelling), στρέβλωσης (warping): Η δημιουργία και διάδοση ρωγμών οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες, κάποιοι από τους οποίος έχουν ήδη αναφερθεί, όπως οι περιεχόμενες παραμένουσες τάσεις, η ύπαρξη πορώδους και εγκλεισμάτων [22-23],[27-28]. Ωστόσο, μπορεί να προκληθούν ρωγμές, διότι κατά τη στερεοποίηση παράγονται τάσεις μεταξύ της τηγμένης φάσης και των στεροποιημένων κόκκων οι οποίες δε σχετίζονται μόνο με τη θερμοκρασία και το ρυθμό στερεοποίησης, αλλά και με τη μορφολογία της στερεοποιημένης μικροδομής και την ομοιόμορφη ή μη πορεία της στερεοποίησης (solidification cracking). Επίσης, σημειώνονται και ρωγμές στα όρια των κόκκων (grain boundary cracking), η ύπαρξη των οποίων συνδέεται με τα φαινόμενα μικροδιαφορισμού, τη μορφολογία των ορίων των κόκκων και την τυχόν κατακρήμνιση μη επιθυμητών ενδομεταλλικών φάσεων [23].

Το φαινόμενο της αποκόλλησης (delamination) είναι η αποκόλληση ή ο διαχωρισμός μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων της επικάλυψης, το οποίο οφείλεται, είτε σε μη επαρκή τήξη της πούδρας, είτε σε μη επαρκή επανάληψη της τήξης του αμέσως προηγούμενου στρώματος, ώστε να προκύψει ισχυρή μεταλλουργική συνοχή με το

επόμενο. Επιπροσθέτως, η γεωμετρία της ζώνης τήξης σε συνδυασμό με τις θερμικές και επιφανειακές τάσεις του τηγμένου μετάλλου σε διάφορα σημεία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία στεροποιημένων σφαιρών αντί επίπεδου στρώματος (melt ball formation), ή στη δημιουργία φουσκώματος του στερεοποιημένου μετάλλου πάνω από τη ζώνη τήξης (swelling). Οι υψηλές θερμοκρασίες και η πιθανή διαφορά στους συντελεστές της θερμικής διαστολής του υποστρώματος και του υλικού προς απόθεση, μπορεία να προκαλέσουν στρέβλωση του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της τεχνικής laser cladding (warping). [23]

<u>Αλλαγή στη χημική σύσταση</u>: Λόγω της εφαρμογής υψηλών θερμοκρασιών σε συνδυασμό με την υψηλή πίεση του αδρανούς αερίου μπορεί να παρατηρηθεί αλλαγή στη χημική σύσταση του υλικού προς απόθεση και του υποστρώματος στην περιοχή τήξης της πούδρας (melt pool), καθώς, είναι πιθανό κάποια κραματικά στοιχεία να εξατμιστούν, όπως το αλουμίνιο, το μαγγάνιο, ο ψευδάργυρος. Αυτές οι αλλαγές, επίσης, μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες αλλαγές στις ιδιότητες του τελικού υλικού. Ο προσδιορισμός της κατάλληλης ενεργειακής πυκνότητας και της ταχύτητας σκαναρίσματος μπορεί να επιφέρει σταθερότητα στην περιεκτικότητα των πτητικών κραματικών στοιχείων. [20],[22],[27]

1.6.4.4 Επιρροή Θερμοκρασίας και Ρυθμού Απόψυξης στη Μικροδομή

Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, οι γρήγορες και υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τους μεγάλους ρυθμούς απόψυξης που λαμβάνουν χώρα, διαδραματίζουν καθορστικό ρόλο στη διαμόρφωση της μικροδομής ενός υλικού κατά τη στερεοποίηση. Για αυτό έχει δημιουργηθεί ένα διάγραμμα στερεοποίησης (*Εικόνα* 27) το οποίο συσχετίζει τη μορφολογία και το μέγεθος της προκύπτουσας μικροδομής, καθώς μεταβάλονται δύο σημαντικοί παράγοντες, η τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας με την απόσταση (dt/dx - temperature gradient, G) στη διεπιφάνεια τηγμένης/στερεοποιημένης περιοχής και ο ρυθμός στερεοποίησης ή ανάπτυξης των κόκκων (solidification rate or grain growth rate, R). Έτσι, έχουν προκύψει άλλα δύο σημαντικά μεγέθη, ο λόγος G/R ο οποίος ορίζει τον τύπο της μορφολογίας κατά την στερεοποίηση και το γινόμενο GxR ή αλλιώς ο ρυθμός απόψυξης (cooling rate) που ορίζει την κλίμακα-μέγεθος των κόκκων της μικροδομής. [20],[34],[44],[46-48]

Στη διεπιφάνεια τηγμένης/στερεοποιημένης περιοχής (liquid/solid interface), η μορφολογία της μικροδομής μπορεί να είναι επίπεδη (planar), κυψελοειδής (cellular),

κυψελοειδής-δενδριτική (cellular dendritic), επιμηκυμένη-δενδριτική (columnar dendtritic) και ισαξονική δενδριτική (equiaxed dendritic). Σύμφωνα, λοιπόν, με το παρακάτω διάγραμμα, όταν ο παράγοντας G είναι υψηλός και ο παράγοντας R χαμηλός οι κόκκοι εμφανίζουν επίπεδη μικροδομή, ενώ όταν συμβαίνει το ακριβώς αντίστροφο, εμφανίζουν ισαξονική δενδριτική. Γενικά, όσο αυξάνεται ο ρυθμός στερεοποίησης η δομή της μορφολογίας αλλάζει από επίπεδη σε κυψελοειδής, μετά σε επιμήκη μορφή στηλών και τέλος σε ισαξονική δενδριτική. Επίσης, όσο αυξάνεται το γινόμενο GxR η μορφολογία είναι πιο λεπτόκκοκη.

Για παράδειγμα, οι Kaibin Li et al. [34] αναφέρουν ότι στη διεπιφάνεια μεταξύ της ζώνης τήξης (molten pool) και της θερμικά επηρεαζόμενης περιοχής (HAZ), δηλαδή επικάλυψης-HAZ, η τοπική μεταβολή G είναι πολύ μεγάλη και ο ρυθμός στρεοποίησης R είναι πολύ μικρός, οπότε αναμένεται η εμφάνιση λίγων επίπεδων κόκκων. Προχωρώντας, όμως, προς την επιφάνεια της επικάλυψης, ο παράγοντας G μειώνεται και παράγοντας R αυξάνεται, με αποτέλεσμα να κάνουν την εμφάνισή τους οι διάφορες δενδτριτικές μορφές [34]. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί, ότι το άνω μέρος της επικάλυψης έρχεται και σε επαφή με την ατμόσφαιρα, το οποίο επιδρά στα μεγέθη G και R και άρα στη μορφολογία της μικροδομής [34]. Για αυτό το λόγο, επειδή οι παραπάνω παράγοντες διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, δηλαδή άνω, κάτω και ενδιάμεσο μέρος επικάλυψης και αντίστοιχα στα διάφορα μέρη της θερμικά επηρεασμένης ζώνης, παρατηρούνται διαφορετικές μορφολογίες και μεγέθη στη μικροδομή, αλλαγές οι οποίες είναι πολύ σημαντικές καθώς μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. [20],[34],[44],[46-48]



Εικόνα 27 Διάγραμμα της τοπικής μεταβολής της θερμοκρασίας με την απόσταση (G) σε συνάρτηση με το ρυθμό αύξησης των κόκκων (R) για την επίδραση τους στη μορφολογία και στο μέγεθος των κόκκων της προκύπτουσας μικροδομής [48].

1.6.5 Laser Γρανάτη Αλουμινίου-Υττρίου με Προσθήκη Νεοδυμίου (Nd:Yag Laser - Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet)

Ο συγκεκριμένος τύπος λέιζερ χρησιμοποιήθηκε και για την υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έχει μήκος κύματος 1064nm στο φάσμα υπερύθρου, υψηλή απόδοση ισχύος και υψηλή απόδοση ακτίνας [49-50]. Μπορεί επίσης να εκπέμψει ακτίνα λέιζερ και σε άλλα μήκη κύματος, όπως 1440nm, 1320nm, 1120nm, 940nm [50]. Η παραγωγή της ακτίνας του λέιζερ συγκεκριμένου μήκους κύματος προέρχεται από ένα κρύσταλλο γρανάτη αλουμινίου (Al)-υττρίου (Y) (Y₃Al₅O₁₂) με προσθήκη νεοδυμίου (Nd) [49-50] ο οποίος λαμβάνει, ως πηγή ενέργειας, την ακτινοβολία που εκπέμπεται από λαμπτήρες ηλεκτρικού τόξου ξένου (Xe) ή κρυπτού (Kr) (flash lamps) [49],[51]. Τα, πλέον, εκπεμπόμενα φωτόνια από τον κρύσταλλο περνούν μέσα από ένα ενισχυτή δύο καθρεφτών (twomirror resonator) και ενισχύεται το σήμα. Ο ένας καθρέφτης είναι πλήρους ανάκλασης και ο δεύτερος μερικής από όπου διέρχεται η παραγόμενη ακτίνα λέιζερ από τον κρύσταλλο. Στη συνέχεια, η διάδοση της ακτίνας πραγματοποιείται μέσω εύκαμπτων καλωδίων οπτικών ινών (fiber optic cable) και εστιάζεται μέσω δύο συμβατικών οπτικών φακών (conventional lens), ώστε να φτάσει στο υλικό προς απόθεση. [49],[51-52]

Για την εξασφάλιση υψηλών αποδόσεων πολλά Nd:Yag laser χρησιμοποιούν ενισχυτές. Η απόκλιση της δέσμης της ακτίνας αυξάνεται με την αύξηση της εξερχόμενης ισχύος, φαινόμενο το οποίο περιορίζει την ελάχιστη διάμετρο ακτίνας και μειώνει την απόσταση διάδοσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται καλώδια οπτικών ινών και συμβατικοί οπτικοί φακοί. [49]



Εικόνα 28 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης και λειτουργίας του Nd: Yag laser [52].

1.7 Ιδιότητες Επικάλυψης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις μηχανικές και επιφανειακές ιδιότητες που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

<u>1.7.1 Αντοχή σε Φθορά</u>

Η έννοια της φθοράς είναι στενά συνδεδεμένη με την έννοια της τριβής και της λίπανσης [53]. Αυτές οι τρεις έννοιες αποτελούν διακριτά φαινόμενα τα οποία συντελούν την επιστήμη της τριβολογίας [53]. Πιο συγκεκριμένα η τριβή και η φθορά αντιπροσωπεύουν την απόκριση ενός ζεύγους υλικών σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, υπό κάποιες επιβαλλόμενες δυνάμεις, η οποία προκαλεί κάποια σχετική κίνηση μεταξύ των υλικών [54]. Η συμπεριφορά των υλικών ως προς τη φθορά και την τριβή, λοιπόν, σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας τους και της σχετικής τους κίνησης, την πίεση λόγω της επαφής τους, την ακαμψία τους, τις συνθήκες θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια τους, τη διάρκεια επαφής τους και την ύπαρξη ή μη κάποιου τρίτου υλικού με το οποίο έρχονται σε επαφή [54].

Στη συνέχεια, το κεφάλαιο θα εστιάσει στην αντίσταση σε φθορά, αφού αυτή εξετάζεται παρακάτω στην πειραματική διαδικασία. Ως φθορά ενός στερεού μπορεί να οριστεί η προοδευτική απώλεια υλικού, εξαιτίας της μετατόπισης και αποκόλλησης μέρους της επιφάνειάς του που οφείλεται στη σχετική της κίνηση με μία άλλη επιφάνεια με την οποία έρχεται σε επαφή [4],[55]. Τις περισσότερες φορές, το φαινόμενο της φθοράς παρατηρείται σε υλικά μεγάλης σκληρότητας [55]. Η φθορά ενός υλικού μπορεί να οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του [4],[56-57]. Σε ένα σύστημα, το φαινόμενο της φθοράς εξαρτάται από όλα τα στοιχεία που λαμβάνουν μέρος, α) το εξεταζόμενο υλικό, β) το υλικό αναφοράς (ανταγωνιστικό υλικό) ως προς το οποίο μελετάται η φθορά του εξεταζόμενου, γ) τα παραμένοντα προϊόντα της φθοράς στο σύστημα και δ) το περιβάλλον του συστήματος (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, λίπανση, κ.λπ.) [4],[56-57].



Εικόνα 29 Συστατικά μέρη ενός τριβοσυστήματος [56].

Οι κυριότεροι μηχανισμοί φθοράς είναι οι ακόλουθοι πέντε:

<u>η φθορά λόγω εκτριβής (abrasive wear)</u>: προκαλείται όταν μια επιφάνεια βρίσκεται σε επαφή με σκληρά σωματίδια, τα οποία αποτελούν είτε το ανταγωνιστικό μέσο, είτε τα προϊόντα φθοράς των δύο επιφανειών [58],[55-57]. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη φθορά της διεπιφάνειας, εξαιτίας πλαστικής παραμόρφωσης ή δημιουργίας ρωγμών ή ακόμα και ψαθυρής θραύσης, η οποία παρατηρείται στα ψαθυρά υλικά με μικρή αντοχή στη θραύση [59]. Ο ρυθμός φθοράς λόγω εκτριβής μειώνεται με τη μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου και την αύξηση της μικροσκληρότητας του φθειρόμενου υλικού [57]. Αποτελεί, γενικά, το συνηθέστερο μηχανισμό φθοράς. Σύμφωνα με την *Εικόνα 30* στην περίπτωση (α) μία μαλακή επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τα σκληρά σωματίδια μίας σκληρότερης επιφάνειες έρχονται σε επαφή με τα προϊόντα φθοράς τους (εκτριβή τριών σωμάτων) [55-58].



Εικόνα 30 Φθορά λόγω εκτριβής. (α) εκτριβή 2 σωμάτων, (β) εκτριβή 3 σωμάτων [59].

<u>η φθορά λόγω πρόσφυσης (adhesive wear)</u>: παρατηρείται όταν δύο ομαλές επιφάνειες ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, ενώ τμήματα της μιας αποκόβονται και προσφύονται στην άλλη. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, μεταξύ των ατόμων, στη διεπιφάνεια των δύο υλικών που έρχονται σε επαφή, εμφανίζονται δυνάμεις πρόσφυσης και αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί οι οποίοι καταστρέφονται και επαναδημιουργούνται. Έτσι, τμήματα του ενός υλικού μεταφέρονται στο άλλο και αποβάλλονται ως παραπροϊόντα της διεργασίας επαφής [56-57],[59]. Τα τελευταία έχουν την ίδια χημική σύσταση

με τα φθειρόμενα υλικά, εξαιτίας όμως φαινομένων ενδοτράχυνσης, πολλές φορές παρουσιάζουν υψηλότερη μικροσκληρότητα [57].



Εικόνα 31 Φθορά λόγω πρόσφυσης [56].

<u>η φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων (erosive/oxidative wear):</u> πραγματοποιείται σε συστήματα που οξειδώνονται ή διαβρώνονται εύκολα και για αυτό παράγονται στη διεπιφάνεια τους προϊόντα διαφορετικής χημικής σύστασης [56-57].



Εικόνα 32 Φθορά λόγω τριβοχημικών αντιδράσεων [56].

<u>η φθορά λόγω παλινδρόμησης (fretting wear)</u>: προκύπτει κατά την παλινδρομική κίνηση δύο επιφανειών. Στη διεπιφάνεια τους παρατηρούνται μικρές κοιλότητες, ως αποτέλεσμα της φθοράς λόγω παλινδρόμησης. Αυτός ο μηχανισμός φθοράς προωθείται από συνθήκες διάβρωσης και μπορεί να συνδυαστεί με φαινόμενα εκτριβής και πρόσφυσης. [55],[57]



Εικόνα 33 Φθορά λόγω παλινδρόμησης [57].

<u>η φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης (surface fatigue)</u>: οφείλεται στις κυκλικές φορτίσεις στις οποίες υποβάλλονται τα υλικά και οδηγεί στην επιφανειακή τους ρωγμάτωση [56-57].



Εικόνα 34 Φθορά λόγω επιφανειακής κόπωσης [56].

Όλοι οι μηχανισμοί της φθοράς, εκτός από αυτόν της κόπωσης, πραγματοποιούνται με σταδιακή αφαίρεση υλικού [59]. Συνήθως, σε μηχανικά εξαρτήματα τα οποία λειτουργούν σε ένα σύστημα μιας εφαρμογής, μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα φθοράς τα οποία οφείλονται στο συνδυασμό περισσότερων από έναν από τους παραπάνω μηχανισμούς. Αυτό οφείλεται στις συνθήκες λειτουργίας τους καθώς, για παράδειγμα, μπορεί να υφίστανται εκτριβή και ταυτόχρονα να βρίσκονται σε ισχυρά διαβρωτικά ή οξειδωτικά περιβάλλοντα [55],[59]. Τέτοια εξαρτήματα μπορεί να είναι ρουλεμάν, γρανάζια, άξονες, έκκεντρα, τμήματα σιδηροδρομικών γραμμών. Τα 2/3 όλων των περιπτώσεων φθοράς που παρατηρούνται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις οφείλονται στους μηχανισμούς της πρόσφυσης και της εκτριβής [59].

Επίσης, η ομαδοποίηση της φθοράς, ανάλογα με τον τρόπο σχετικής κίνησης δύο υλικών σε επαφή αναφέρεται ως ακολούθως [4],[55-57]:

- <u>Φθορά λόγω ολίσθησης</u>: παρατηρείται στις επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή και ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, με ή χωρίς την παρουσία αποξεστικών σωματιδίων ή λιπαντικού στη διεπιφάνεια τους.
- <u>Φθορά λόγω κύλισης</u>: παρατηρείται κατά την κύλιση μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου σε μια στερεή επιφάνεια.
- <u>Φθορά λόγω παλινδρόμησης</u>: οφείλεται στην παλινδρομική κίνηση υψηλής συχνότητας και μικρής έντασης.
- <u>Φθορά λόγω πρόσκρουσης</u>: οφείλεται στην πρόσκρουση στερεών σωματιδίων ή σταγόνων πάνω στην επιφάνεια. Η παρουσία ηλεκτρολυτών επιταχύνει τη φθορά ενός μεταλλικού υλικού, λόγω της συνέργειας φαινομένων χημικής διάβρωσης.
- <u>Φθορά λόγω μηχανικής διάβρωσης</u>: προκαλείται από την πρόσπτωση στερεών σωματιδίων στην επιφάνεια ενός υλικού, τα οποία μεταφέρονται μέσω ενός ρευστού.
- <u>Φθορά λόγω δόνησης</u>: οφείλεται στην ταυτόχρονη φόρτιση παλινδρόμησης και ολίσθησης των υλικών που έρχονται σε επαφή. Στις φθειρόμενες επιφάνειες εμφανίζονται κοιλότητες και εσοχές οι οποίες περιβάλλονται από τα προϊόντα της φθοράς.



Εικόνα 35 Κατηγορίες φθοράς υλικών σε επαφή ανάλογα με τον τρόπο της σχετικής κίνησής τους [56].

Κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της φθοράς σε ένα υλικό είναι: η ύπαρξη ή μη κρυσταλλικότητας του, ο κρυσταλλογραφικός του προσανατολισμός, η ανισοτροπία που παρουσιάζει στις μηχανικές του ιδιότητες, η χημική του σύσταση, η τραχύτητα και η γεωμετρία της επιφάνειάς του, οι συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται (θερμοκρασία, υγρασία, λίπανση, διαβρωτικές ουσίες, οξυγόνο), η παρουσία επιφανειακού στρώματος (π.χ. λιπαντικά, οξείδια, ρύποι), η σχετική ταχύτητα ολίσθησης, το είδος των δυνάμεων που

ασκούνται σε αυτό και η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των επιφανειών, αν υπάρχει [55],[57].

Επιπροσθέτως, σημαντικό ρόλο παίζει και ο συντελεστής τριβής, καθώς ναι μεν δεν χαρακτηρίζει ένα υλικό, αλλά εκφράζεται ως προς ένα ανταγωνιστικό υλικό (επιφάνεια αναφοράς) για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και το ανταγωνιστικό αυτό υλικό μπορεί να καθορίζει κάποιες φορές το μηγανισμό με τον οποίο η διεργασία της τριβής θα προκαλέσει φθορά και απώλεια μάζας [4],[56]. Η τριβή, επίσης, μπορεί να οδηγήσει σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και έτσι να επιταχύνει τη φθορά [59]. Πιο συγκεκριμένα, η τραχύτητα αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους, γιατί καθορίζει την πραγματική επιφάνεια των υλικών που έρχονται σε επαφή, επηρεάζοντας έτσι το μηγανισμό φθοράς. Η ύπαρξη, για παράδειγμα, προεξοχών μειώνει την επιφάνεια στην οποία διανέμεται το επιβαλλόμενο φορτίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στα σημεία αυτά και συνεπώς, φθείρονται πρώτα και πιο γρήγορα από τη μέση φθορά του υλικού. Τα απόβλητα της φθοράς μπορούν να επηρεάσουν τη διεργασία της φθοράς, διότι κάποια ίσως παραμείνουν και παρέμβουν σε αυτή [4],[56]. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις σύγκρισης υλικών της ίδιας κατηγορίας, οι χαμηλοί ρυθμοί φθοράς συσχετίζονται με υψηλές τιμές σκληρότητας [56],[60].

Πιο αναλυτικά, στην *Εικόνα 36* παρουσιάζεται πως επιδρά το ασκούμενο φορτίο και η ταχύτητα ολίσθησης, στη θερμοκρασία της διεπιφάνειας δύο μεταλλικών υλικών και στη φθορά τους λόγω ολίσθησης. Ουσιαστικά, η αύξηση του φορτίου προσκαλεί την αύξηση των τάσεων με αποτέλεσμα την ενίσχυση της φθοράς, πιθανόν, λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, ή κυρίως λόγω ψαθυρής θραύσης. Επίσης, το φορτίο και η ταχύτητα ολίσθησης επηρεάζουν τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια. Η ταχύτητα ολίσθησης καθορίζει τη μεταφορά θερμότητας μακριά από τη διεπιφάνεια. Ακόμη, η αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια προκαλεί αύξηση του ρυθμού χημικής αντίδρασης των επιφανειών, με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας ή τυχόν υδρατμούς και μείωση της μηχανικής αντοχής των προεξοχών των επιφανειών. [56],[60]



Εικόνα 36 Διάγραμμα αναπαράστασης της επιρροής του ασκούμενου φορτίου και της ταχύτητας ολίσθησης στη φθορά ολίσθησης, όσον αφορά τα μεταλλικά υλικά [60].

1.7.1.1. Φθορά λόγω Εκτριβής (Abrasive Wear)

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο μηχανισμός της εκτριβής μπορεί να προκαλέσει τη φθορά ενός υλικού, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, είτε θραύσης [59].

Όσον αφορά τη φθορά μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, η αφαίρεση υλικού από μία επιφάνεια μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, κατά τη διάρκεια της εκτριβής μπορεί να συμβεί με πολλούς τρόπους, όπως το «όργωμα» (plowing), ο σχηματισμός σφήνας (wedge formation) και μια διαδικασία που παρομοιάζεται με κοπή (cutting) [58-59].

Μέσω της διαδικασίας του «οργώματος» δημιουργούνται μια σειρά από αυλακώσεις ως αποτέλεσμα της πλαστικής ροής (plastic flow) του μαλακότερου υλικού. Επίσης, επειδή μέρος του υλικού μετατοπίζεται στα πλάγια, για να σχηματιστούν οι αυλακώσεις, χωρίς να αφαιρεθεί, η διαδικασία αυτή ονομάζεται και σχηματισμός κορυφογραμμής (ridge formation). Αφού βέβαια έχει επαναληφθεί η διαδικασία αρκετές φορές, μπορεί να αφαιρεθεί μέρος της επιφάνειας του υλικού, εξαιτίας της κόπωσης που υφίσταται (low-cycle fatigue). Δηλαδή, οι κορυφογραμμές σιγά-σιγά θα ισοπεδωθούν και θα αποκοπούν από το υλικό. Η πλαστική παραμόρφωση που θα προκύψει λόγω του «οργώματος» μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία και διάδοση ρωγμών. Η περαιτέρω κόπωση του υλικού, προωθεί ακόμα περισσότερο τη διάδοση των ρωγμών, η οποία διευκολύνεται από την πιθανότητα ύπαρξης μικροκενών, με αποτέλεσμα να ενωθούν με άλλες γειτονικές ρωγμές σε κάποιο βάθος της επιφάνειας και να παρέλθει η διάτμηση κάποιων τμημάτων αυτής. Σε αρκετά μαλακά μεταλλικά υλικά, όπως ο μόλυβδος, η ποσότητα των υπολειμμάτων της φθοράς είναι μικρή και παρατηρείται μετατόπιση της παραμορφωμένης επιφάνειας κατά μήκος των πλευρών των αυλακώσεων.

Στην περίπτωση του σχηματισμού σφήνας, στο τέλος της σχηματιζόμενης αυλάκωσης, κάποιο τμήμα της επιφάνειας του υλικού μετατοπίζεται στα πλάγια και δημιουργείται μια περιοχή σε σχήμα σφήνας. Συμβαίνει, γενικά, όταν ο λόγος της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας προς τη διατμητική αντοχή του υλικού είναι υψηλός (περίπου 0,5-1). Στην περίπτωση της κοπής, στην περιοχή των σχηματιζόμενων αυλακώσεων αφαιρούνται τμήματα της επιφάνειας του υλικού τα οποία μοιάζουν με «κορδέλες», σαν αυτά που προκύπτουν από τις διεργασίες κοπής των μετάλλων. Για αυτό και ο τρόπος αφαίρεσης υλικού ονομάζεται κοπή. [58-59]



Εικόνα 37 Σχηματική αναπαράσταση τριών διαφορετικών τρόπων αφαίρεσης υλικού στο μηχανισμό φθοράς λόγω εκτριβής, οι οποίες προκαλούν πλαστική παραμόρφωση [59].

Οι τρεις προαναφερόμενοι τρόποι παραμόρφωσης ενός υλικού εξαρτώνται από το είδος των υλικών, τη γωνία στην οποία θα έρθει σε επαφή το ανταγωνιστικό υλικό με ένα άλλο υλικό, το πόσο μυτερό ή λείο θα είναι, συνεπώς σε ποιο βάθος θα διεισδύσει και τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Για παράδειγμα, ένα μυτερό ανταγωνιστικό μέσο, πιο εύκολα θα παραμορφώσει ένα άλλο υλικό, αφαιρώντας του επιμηκυμένα και ασυνεχή τμήματα.

Επίσης, ο ρυθμός φθοράς (wear rate) ενός υλικού, στην περίπτωση εκτριβής δύο σωμάτων, εν γένει, είναι αντιστρόφως ανάλογος με την τιμή της σκληρότητας του και

ανάλογος με το ασκούμενο φορτίο και την απόσταση ολίσθησης την οποία διανύει. Σε περίπτωση που ένα υλικό έχει μεγαλύτερη σκληρότητα από το υλικό αναφοράς η φθορά που παρατηρείται είναι πολύ μικρότερη, αμελητέα [59]. Για αυτό και παίζουν σημαντικό ρόλο το μέγεθος και σχήμα των κόκκων και των επιφανειακών κατακρημνισμάτων (π.χ. καρβίδια). Τα πιο επιθυμητά χαρακτηριστικά τους για μεγάλη αντίσταση στη φθορά είναι να έχουν κυβοειδές σχήμα και υψηλή τιμή σκληρότητας και δυσθραυστότητας. Αυτός ο συνδυασμός θα τα εμποδίσει να κοπούν, να δημιουργηθούν και να διαδοθούν ρωγμές και εν τέλει να αστοχήσει το υλικό [58]. Ιδιαίτερα στα μεταλλικά υλικά, η μεγάλη τιμή της σκληρότητας και η ύπαρξη λεπτόκοκκων καρβιδίων συνεκτικών με το υπόλοιπο υλικό αποτελούν ευεργετικά χαρακτηριστικά για την αντίσταση στη φθορά.

Δεν έχει βέβαια σημασία μόνο η τιμή της σκληρότητας, αλλά ο συνδυασμός της με τη δυσθραυστότητα, το μέτρο ελαστικότητας, την αντοχή στο σημείο διαρροής και την ενδοτράχυνση του υλικού. Για αυτό, σε μεταλλικά υλικά στα οποία παρατηρείται και αύξηση της αντοχής διαρροής, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης κατά την εκτριβή τους, εμφανίζουν αυξημένη αντίσταση στη φθορά. Όμως, αν ξεπεράσουν κάποιο όριο σκληρότητας, τα υλικά μπορούν να γίνουν αρκετά ψαθυρά, διότι θα υποβαθμιστεί η δυσθραυστότητα τους και συνεπώς, θα αυξηθεί ο ρυθμός φθοράς τους και θα επέλθει ψαθυρή θραύση [59-60]. Επιπλέον, η σημασία του συνδυασμού των παραπάνω ιδιοτήτων μπορεί να παρατηρηθεί στο διάγραμμα της Εικόνας 38, όπου υλικά τελείως διαφορετικών κατηγοριών, ενώ μπορεί να έχουν παρόμοιες τιμές σκληρότητες εμφανίζουν μεγάλη διαφορά στην αντίστασή τους στη φθορά. Φυσικά για τη μέτρηση της αντίστασης στη φθορά των υλικών είναι σημαντικό το υλικό αναφοράς να έχει μεγαλύτερη σκληρότητα για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή της φθοράς. Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα για τη φθορά δύο σωμάτων το οποίο συγκρίνει την αντίσταση που παρουσιάζουν διάφορες κατηγορίες υλικών στη φθορά λόγω εκτριβής σε σχέση με τη σκληρότητα τους [60].



Εικόνα 38 Διάγραμμα αντίστασης στη φθορά λόγω εκτριβής σε σχέση με τη σκληρότητα για διάφορες κατηγορίες υλικών στα πλαίσια εκτριβής δύο σωμάτων [60].

Στη συνέχεια, συνήθως στα μεταλλικά υλικά, με εξαίρεση το αλουμίνιο και τον χαλκό, η αύξηση της θερμοκρασίας δρα αυξάνοντας τη φθορά λόγω εκτριβής, διότι μειώνεται η σκληρότητα και η αντοχή διαρροής και μπορεί να εκκινήσει φαινόμενα οξείδωσης ή/και διάβρωσης. Επίσης, ο ρυθμός της φθοράς ενός υλικού, έχει βρεθεί, ότι υφίσταται μια μικρή αύξηση, εάν η ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ των επιφανειών αυξηθεί στο εύρος 0-2.5m/s. Επιπροσθέτως, είναι αρκετά αμφιλεγόμενα και πολλές φορές αντικρούονται, τα αποτελέσματα της επίδρασης της υγρασίας στη συμπεριφορά ως προς τη φθορά ενός υλικού. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιηθούν ως υλικό αναφοράς στη δοκιμή φθοράς, καρβίδια του πυριτίου (SiC), σε συνθήκες σχετικής υγρασίας πάνω από 65%, παρατηρείται, συνήθως, αύξηση και της φθοράς. Άλλοι ερευνητές έχουν βρει ότι η αύξηση της υγρασίας, μειώνει τη φθορά λόγω εκτριβής στο σίδηρο και στους μαλακούς χάλυβες, διατηρεί σταθερή τη συμπεριφορά στη φθορά του τιτανίου, ενώ αυξάνει τη φθορά στο χαλκό. Τέλος, η ύπαρξη διαβρωτικών παραγόντων μπορεί να επιταχύνει αρκετά το ρυθμό φθοράς ενός υλικού. [58] Ένα άλλο παράδειγμα άξιο αναφοράς, το οποίο μπορεί να διαχωρίσει εάν η φθορά λόγω εκτριβής προκαλείται από πλαστική παραμόρφωση, ή θραύση είναι το ακόλουθο. Όταν ασκούνται χαμηλά φορτία, η επαφή ενός ψαθυρού υλικού με ένα τραχύ αντικείμενο αναφοράς, θα προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση του υλικού και επομένως τη φθορά του. Σε υψηλότερα, όμως, φορτία μετά από κάποιο κρίσιμο οριακό φορτίο, θα προκληθεί φθορά λόγω ψαθυρής θραύσης, μέσω δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών. Σε αυτό το φαινόμενο μπορεί να βοηθήσει η ύπαρξη τυχόν παραμενουσών τάσεων [59].

1.7.1.2 Δοκιμή Φθοράς λόγω Εκτριβής (Abrasive Wear Test)

Εν γένει, οι δοκιμές φθοράς λόγω εκτριβής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτή της υψηλής πίεσης, και αυτή της χαμηλής πίεσης. Στην πρώτη, ανήκουν κυρίως μέθοδοι που μελετούν τη συμπεριφορά στη φθορά μεταξύ τριών υλικών με την επιβολή σε αυτά υψηλών φορτίων. Για παράδειγμα, η συμπεριφορά σφαιρών που έρχονται σε επαφή με δύο στερεές επιφάνειες, όπως στην περίπτωση ενός μύλου άλεσης. Τα μεγάλα και έντονα φορτία λειτουργούν διευκολύνοντας την αφαίρεση υλικού, μέσω συνδυασμού κοπής, πλαστικής παραμόρφωσης και επιφανειακής θραύσης σε μικροκλίμακα, καθώς και φαινομένων κόπωσης και ξεφλουδίσματος στη μακροκλίμακα. Στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν κυρίως μέθοδοι που μελετούν τη συμπεριφορά στη φθορά μεταξύ δύο υλικών με την επιβολή πιο ήπιων φορτίων. Στην προκειμένη περίπτωση, τα χαμηλότερα φορτία δρουν προκαλώντας στην επιφάνεια προς μελέτη φαινόμενα εκτριβής που προωθούν την πλαστική της παραμόρφωση μέσω δημιουργίας αυλακώσεων και κοπής σε μικροκλίμακα και οδηγούν σε αφαίρεση υλικού [54].

Όπως αναφέρθηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια της φθοράς, σαν φαινόμενο εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους, σε μία ή σε κάποιες από τις οποίες οι μέθοδοι εστιάζουν. Αυτοί οι παράμετροι κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις ομάδες [54].

- Παράμετροι των υλικών (material parameters): περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του υλικού προς εξέταση, όπως χημική σύσταση, μικροδομή, μέγεθος και σχήμα κόκκων, μηχανικές ιδιότητες, φυσικές ιδιότητες, τραχύτητα και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του υλικού αναφοράς.
- Παράμετροι του σχεδιασμού της μεθόδου (design parameters): όπως το επιλεγόμενο φορτίο, η ταχύτητα, το είδος της κίνησης (π.χ. ολίσθηση,

κύλιση), ο αριθμός των κύκλων εφαρμογής της μεθόδου, η ύπαρξη ή μη δόνησης.

- Παράμετροι του περιβάλλοντος εφαρμογής της μεθόδου (environmental parameters): σχετικά με τις συνθήκες περιβάλλοντος της μεθόδου, όπως η επιλογή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, των ατμοσφαιρικών συνθηκών, το pH, σε υγρό ή ξηρό περιβάλλον, ύπαρξη ή μη διαβρωτικών παραγόντων ή/και ακαθαρσιών.
- Παράμετροι λίπανσης (lubrication parameters): όπως το είδος του λιπαντικού και διάφορα χαρακτηριστικά του, η σταθερότητά, οι φυσικοχημικές ιδιότητές του.

Σημαντικά μεγέθη, ο υπολογισμός των οποίων δίνει πληροφορίες για την εκτίμηση ενός υλικού ως προς την αντοχή του στη φθορά, είναι, η απώλεια μάζας (mass loss), η απώλεια βάρους (weight loss), η απώλεια όγκου (volume loss), το πλάτος και βάθος των δημιουργούμενων αυλακώσεων (scar width and depth), ο δείκτης φθοράς (wear index) και ο ρυθμός φθοράς (wear rate) [53-54],[59].

Η τεχνική η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των δοκιμίων ως προς τη συμπεριφορά τους στη φθορά, στο πειραματικό μέρος, είναι μια μέθοδος στην οποία ασκούνται χαμηλά φορτία μέσω δύο κυλινδρικών τροχών αρκετά υψηλής σκληρότητας, συνήθως φτιαγμένα από καρβίδιο του πυριτίου SiC (taber abrasion test). Αυτοί οι τροχοί μπορεί να είναι ελαστικοί ή μη και ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού, το οποίο είναι επίπεδο και είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο (*Εικόνα 39*) [55].



Εικόνα 39 Η διάταζη της μεθόδου taber abrasion [55].

Στην τεχνική αυτή συνήθως μετριέται η απώλεια μάζας (mass loss), από την οποία μαζί με την πυκνότητα μπορεί να υπολογισθεί η απώλεια όγκου (volume loss). Επίσης, υπολογίζονται ο δείκτης φθοράς (wear index) και ο ρυθμός φθοράς (wear rate). Ο ρυθμός φθοράς ορίζεται συνήθως ως ο όγκος του υλικού (m³) που απομακρύνθηκε ανά μονάδα εφαρμοζόμενου φορτίου (N) και ανά την απόσταση που διανύθηκε (m) (m³/N*m). Ο δείκτης φθοράς ορίζεται ως η απώλεια μάζας προς την απόσταση που διανύθηκε ή τον συνολικό αριθμό κύκλων που διάνυσε (mg/m or mg/cycle). [55],[59]

Κανονικά, ο ρυθμός της φθοράς δεν αποτελεί ένα σταθερό μέγεθος, αλλά αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου κατά τη διάρκεια της μεθόδου. Σε κάποιες περιοχές ο ρυθμός της φθοράς μεταβάλλεται και σε άλλες παραμένει σταθερός. Για παράδειγμα, στο ακόλουθο διάγραμμα της *Εικόνας 40* υπάρχουν διάφορες περιοχές κατά τη διάρκεια της μεθόδου φθοράς στις οποίες ο ρυθμός φθοράς συμπεριφέρεται διαφορετικά. Δηλαδή, στην αρχή αυξάνεται, ενώ στη συνέχεια διατηρείται σταθερός για κάποιο χρονικό διάστημα, μέχρι που επέρχεται κάποια αστοχία του υλικού. Η περιοχή στην οποία αυξάνεται ο ρυθμός φθοράς ονομάζεται run-in period ή break-in period και βασίζεται στην αρχική δομή, τραχύτητα και μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια, λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται η επιφάνεια, τροποποιούνται τα χαρακτηριστικά της και σταματά να μεταβάλλεται ο ρυθμός φθοράς. Για αυτό και το υλικό μεταβαίνει σε μία λεγόμενη σταθερή κατάσταση (steady-state condition) [**59**].



Εικόνα 40 Διάγραμμα απεικόνισης της μεταβολής του δείκτη φθοράς [59].

1.7.2 Τραγύτητα (Roughness)

Η τραγύτητα αποτελεί ιδιότητα της επιφάνειας ενός υλικού, χαρακτηριστικό το οποίο είναι αρκετά σημαντικό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, καθώς επηρεάζει την αντίσταση ενός υλικού στη φθορά και γενικά αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στις τριβολογικές του ιδιότητες. Εν γένει, η υφή/δομή μιας επιφάνειας (surface texture) σχετίζεται με την ύπαρξη, σε αυτή, «ανωμαλιών» (irregularities) που έχουν προκύψει από κάποια μέθοδο κατεργασίας του υλικού. Οι «ανωμαλίες» αυτές μπορεί να είναι είτε περιοχές κορυφών (peaks), είτε περιοχές κοιλάδων (valleys). Κατά σύμβαση, η υφή μιας επιφάνειας περιλαμβάνει δύο χαρακτηριστικά, την τραχύτητα (roughness) και τον κυματισμό (waviness) [53],[58]. Βέβαια, μέρος της επιφανειακής υφής αποτελεί, επίσης, ολόκληρο το επιφανειακό στρώμα (lay) το οποίο φέρει όλες τις ιδιομορφίες και τυχόν ελαττώματα (flaws) που έχουν προκύψει από κάποια κατεργασία [53],[59]. Πιο αναλυτικά, η τραχύτητα αποτελείται από τις λεπτότερες «ανωμαλίες», δηλαδή αρκετά μικρότερες περιοχές κορυφών και κοιλάδων, οι οποίες δε διακρίνονται λεπτομερώς, τόσο εύκολα, με γυμνό μάτι. Από την άλλη, ο κυματισμός αποτελείται από μεγαλύτερες και ευρύτερες «ανωμαλίες», οι οποίες είναι εμφανείς στη μακροκλίμακα [53],[58]. Συνήθως, οι ορολογίες, υφή επιφάνειας και

τραχύτητα, συγχέονται, καθώς η τραχύτητα μετριέται πολύ πιο συχνά από τον κυματισμό [58].



Εικόνα 41 Αναπαράσταση των χαρακτηριστικών της επιφανειακής υφής [59].

Υπάρχουν δύο ειδών τεχνικές ανάλυσης της επιφανειακής υφής, ανάλογα με το αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται κατά μήκος μιας γραμμής (profile methods) ή κατά μήκος πολλών γραμμών σε μια εξεταζόμενη περιοχή (raster area methods or surface maps) [58-59]. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται κάθετα στην κατεύθυνση του επιφανειακού στρώματος (lay) [53]. Οι τεχνικές, επίσης, μπορεί να χωριστούν ανάλογα με το αν έρχονται σε επαφή με το δείγμα, στις μεθόδους επαφής και στις μεθόδους χωρίς επαφή. Στις πρώτες μεθόδους, συνήθως, χρησιμοποιείται αισθητήρας υψηλής ανάλυσης, μια ειδική ακίδα (stylus) η οποία διανύει μια απόσταση σε επαφή με το δείγμα, ενώ στις δεύτερες ανήκουν, για παράδειγμα, οπτικές τεχνικές [53],[58-59]. Ο υπολογισμός των τραχυτήτων στα δοκίμια πραγματοποιήθηκε με τεχνική επαφής. Για τον χαρακτηρισμό της τραχύτητας και συνεπώς της επιφάνειας ενός υλικού, υπάρχουν αρκετές παράμετροι οι οποίες χωρίζονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες [53],[58-59]:

- Παράμετροι ύψους (height or amplitude parameters) : οι μετρήσεις των κατακόρυφων χαρακτηριστικών των επιφανειακών αποκλίσεων.
- Παράμετροι μήκους κύματος-απόστασης (wavelength or spacing parameters) : οι μετρήσεις πλάτους μεταξύ των κορυφών και των κοιλάδων κατά μήκος της επιφάνειας, ανεξάρτητα από το ύψος τους.
- Παράμετροι σχήματος (shape parameters) : διαφορετικά σχήματα των προφίλ των επιφανειών, π.χ. κατά πόσο είναι συμμετρικό το επιφανειακό προφίλ με τη μέση γραμμή.
- Συνδυασμός παραμέτρων (hybrid parameters) : η ανάλυση του συνδυασμού του ύψους και της απόστασης των κορυφών και κοιλάδων.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν οι παράμετροι ύψους, διότι αυτοί υπολογίζονται και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μελέτες και για αυτό επιλέχθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

<u>1.7.2.1 Παράμετροι Ύψους (Height or Amplitude Parameters)</u>

Αρχικά, για τη μέτρηση των παραμέτρων, θεωρείται εάν επιφανειακό προφίλ (π.χ. z(x) ή y(x)) με δειγματοληπτικό μήκος (sampling length) L και μια γραμμή αναφοράς (reference line), από όπου μετριούνται τα αρχικά ύψη και βάθη των κορυφών και κοιλάδων αντίστοιχα. Επίσης, είναι σημαντικό να οριστεί μία μέση γραμμή (mean or center line) η οποία χωρίζει το προφίλ σε δύο ίσα μέρη (άνω και κάτω) (*Εικόνα 42*).



Εικόνα 42 Διάγραμμα επιφανειακού προφίλ z(x) [59].

Ένας από τους πιο συχνούς και σημαντικούς παραμέτρους ύψους που υπολογίζονται είναι η μέση τραχύτητα (roughness average-R_a). Ουσιαστικά, είναι η μέση τιμή των αποκλίσεων, κατά απόλυτη τιμή, του ύψους και του βάθους των κορυφών και των κοιλάδων, αντίστοιχα, από τη μέση γραμμή, εντός του δειγματοληπτικού μήκους (L). Μία άλλη παράμετρος ύψους, πιο ευαίσθητη από την R_a στις επιφανειακές διακυμάνσεις, είναι η ενδεικνυόμενη τιμή της τραχύτητας, R_q ή RMS (root mean square), η οποία μετρά την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των αποκλίσεων των κορυφών και κοιλάδων από τη μέση γραμμή, εντός του δειγματοληπτικού μήκους (L). Οι τύποι τους είναι οι ακόλουθοι (eq.2),(eq.3). Σύμφωνα και με το διάγραμμα της *Εικόνας 43*, y(x) είναι το προφίλ της επιφάνειας, L είναι το δειγματοληπτικό μήκος, N το πλήθος των εξεταζόμενων σημείων μέσα στο δειγματοληπτικό μήκος και η διακεκομμένη γραμμή είναι η μέση γραμμή. [58-59]

$$R_{a} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} |y(x)| dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |y_{i}|$$
(eq.2)
$$R_{q} = \left[\frac{1}{L} \int_{0}^{L} y^{2}(x) dx\right]^{\frac{N}{2}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} y_{i}^{2}\right]^{\frac{N}{2}}$$
(eq.3)



 R_a = Average absolute deviation of profile y(x) from the mean line = total shaded area/L

Εικόνα 43 Διάγραμμα επιφανειακού προφίλ y(x) και απεικόνιση του υπολογισμού της μέσης τραχύτητας R_a [58].

Συνήθως η τραχύτητα R_q ή RMS λαμβάνεται υπόψη για το χαρακτηρισμό οπτικών υλικών [58-59]. Γενικά, όσο μικρότερη είναι η RMS, τόσο λιγότερο είναι το ποσοστό της ακτινοβολίας που αποκλίνει, οπότε η οπτικές ιδιότητες του υλικού είναι καλύτερες [58]. Η τραχύτητα R_a χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε μεταλλουργικές βιομηχανίες για τον προσδιορισμό της επιφάνειας υλικών μετά από διάφορες κατεργασίες, όπως φινίρισμα, τόρνευση [58-59]. Για αυτό και στην πειραματική διαδικασία της διπλωματικής, ο προσδιορισμός της τραχύτητας των δοκιμίων εστίασε στην μέση τραχύτητα R_a .

Υπάρχουν και άλλες παράμετροι ύψους τραχύτητας, όπως η μέγιστη τραχύτητα (R_t ή R_{max}) και η μέση μέγιστη τραχύτητα μεταξύ των 5 υψηλότερων κορυφών και των 5 χαμηλότερων κοιλάδων (R_z). Η πρώτη ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση μεταξύ της κορυφής με το μεγαλύτερο ύψος και της κοιλάδας με το μεγαλύτερο βάθος, μέσα στο καθορισμένο δειγματοληπτικό μήκος L. Η δεύτερη ορίζεται ως η μέση τραχύτητα της διαφοράς του αθροίσματος των 5 χαμηλότερων κοιλάδων από το άθροισμα των 5 υψηλότερων κορυφών, μέσα στο δειγματοληπτικό μήκος L [53],[58-59]. Στις μετρήσεις είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη το συνολικό μήκος αξιολόγησης της επιφάνειας του υλικού και το μήκος κίνησης της ακίδας. Το μήκος αξιολόγησης ή αλλιώς ενεργό μήκος (evaluation length) ισοδυναμεί με το μήκος του προφίλ τα οποία ισούνται με ένα αριθμό δειγματοληπτικών μηκών, ο οποίος καθορίζεται από τον κανονισμό που ακολουθείται. Επίσης, κατά την αποτίμηση της τραχύτητας το

δειγματοληπτικό μήκος L λαμβάνεται ίσο με το μήκος κύματος αποκοπής λ_c (cut off wavelength). Για παράδειγμα, στον κανονισμό ISO 1997 το μήκος της αξιολόγησης περιέχει 5 δειγματοληπτικά μήκη. Τέλος, το μήκος κίνησης της ακίδας είναι μεγαλύτερο από το ενεργό μήκος, λόγω προσθήκης κάποιου μήκους εκκίνησης και τερματισμού του οργάνου.

1.7.3 Σκληρότητα (Hardness)

1.7.3.1 Ορισμός Σκληρότητας

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που εισέρχεται στην επιφάνεια του, με την επιβολή συγκεκριμένου φορτίου και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Το σώμα ονομάζεται διεισδυτής ή εντυπωτής και το γεωμετρικό σχήμα και οι μηχανικές ιδιότητες του είναι γνωστές. Επίσης, ο διεισδυτής μπορεί να έχει διάφορα γεωμετρικά σχήματα, όπως σφαιρικός (δοκιμή Brinell), σχήμα πυραμίδας (δοκιμή Vickers και Knoop) και κωνικός (δοκιμή Rockwell). Στις 3 πρώτες μεθόδους η τιμή της σκληρότητας ορίζεται ως το ασκούμενο φορτίο προς τη μονάδα επιφάνειας του αποτυπώματος και εκφράζεται σε kgf/mm² (1kgf=9,80665N). Μια μαθηματική σχέση, λοιπόν, με την οποία θα μπορούσε να εκφρασθεί η σκληρότητα είναι η εξής: H=P/A (N/mm²), όπου P, η εφαρμοζόμενη δύναμη και Α, η επιφάνεια του αποτυπώματος. Στην τεχνική Rockwell, όμως, το βάθος της διείσδυσης που προκύπτει από ένα προκαθορισμένο φορτίο μετατρέπεται σε μια αδιάστατη τιμή σκληρότητας. [10],[54]

Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος, που δημιουργεί ο διεισδυτής στο υλικό. Αν το αποτύπωμα αυτό είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διείσδυση και επομένως έχει υψηλή τιμή σκληρότητας, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό εμφανίζει μικρότερη αντίσταση και συνεπώς έχει μικρότερη τιμή σκληρότητας. Ουσιαστικά, δηλαδή η σκληρότητα και το βάθος διείσδυσης είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης ισοδυναμεί με μεγαλύτερο αποτύπωμα και μικρότερη τιμή σκληρότητας. Εν γένει, υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι σκληρομέτρησης, η μέθοδος Brinell, η Knoop, η Rockwell και η Vickers. [10],[54]

1.7.3.2 Σκληρομέτρηση κατά Vickers

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας εφαρμόσθηκε στα δοκίμια η σκληρομέτρηση κατά Vickers. Εφαρμόσθηκαν μακροσκληρομετρήσεις και μικροσκληρομετρήσεις κατά Vickers. Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως διεισδυτή πυραμίδα διαμαντιού, ανοίγματος 136°. Όσον αφορά τις μακροσκληρομετρήσεις, τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από 1 kgf ή kp και φθάνουν μέχρι 120 kgf ή kp . Συνήθως το ασκούμενο φορτίο υφίσταται για 10 με 15 δευτερόλεπτα. Με τη διείσδυση της πυραμίδας, μέσα στο υλικό, δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, το αποτύπωμα που δημιουργείται είναι σχήματος ρόμβου και οφείλεται στη μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού. Η τιμή της σκληρότητας δίνεται μαθηματικά από τον τύπο: $HV=2P \sin(136°/2)/d^2=1,8544 P/d^2$, όπου, P, η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kgf ή kp και d, ο μέσος όρος των διαγωνίων (=(d₁+d₂)/2) του αποτυπώματος (mm)). Το αριθμητικό αποτέλεσμα έχει μονάδες kgf/mm² ή απλώς HV (HV: μονάδα σκληρότητας κατά Vickers). [10],[54]

Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers προτιμάται για ένα μεγάλο εύρος υλικών, λόγω της ποικιλίας φορτίων που χρησιμοποιεί. Η δυνατότητα χρήσης επίσης πολύ μικρών φορτίων (μάζας μερικών μόλις γραμμαρίων) κάνει τη μέθοδο Vickers κατάλληλη για μικροσκληρομέτρηση υλικών, η οποία είναι πολύ βασική για τη μελέτη της κατανομής της σκληρότητας, αλλά και για τη μέτρηση της σκληρότητας των διαφόρων φάσεων από τις οποίες αποτελείται η μικροδομή του υλικού. Οι διαστάσεις αποτυπωμάτων, στις μικροσκληρομετρήσεις, μετρούνται στο των οπτικό μικροσκόπιο. Όσον αφορά το εφαρμοζόμενο φορτίο κυμαίνεται από 1 έως 1000gf, για παρόμοιο χρονικό διάστημα 10-15s. Η τιμή της σκληρότητας υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο. Στη μέθοδο κατά Vickers και στις δύο περιπτώσεις, είναι σημαντικό να φτιαχτεί ένα κάναβος μετρήσεων, όπου η κάθε μέτρηση απέχει από την επόμενη, τουλάχιστον, το διπλάσιο της διαγωνίου της πυραμίδας. Με αυτό τον τρόπο, καθίσταται σίγουρο ότι η προηγούμενη μέτρηση δε θα αλλοιώσει το αποτέλεσμα της επόμενης. [10],[54]

1.8 Χάλυβες AISI 410L, AISI 4140 και AISI 1060

1.8.1 AISI 410L (EN 1.4003 ή X2CrNi12)

Ο χάλυβας 410L είναι ένας φερριτικός ανοξείδωτος χάλυβας (ferritic stainless steel). Γενικά, οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες είναι σιδηρομαγνητικοί, περιέχουν Cr από 11% έως 30%, μικρές περιεκτικότητες σε γ-φερρογόνα κραματικά στοιχεία, όπως C, Ν, Νi, και σε άλλα α-φερρογόνα, όπως Mo, Si, Al, Ti, Nb. Επιπλέον, μπορεί να προστεθεί και S για τη βελτίωση της κατεργασιμότητας. Η εφαρμογή τους εξαρτάται από την περιεκτικότητά τους σε χρώμιο, η οποία τους κατατάσσει και σε τρεις κατηγορίες, α) χαμηλής περιεκτικότητας σε Cr (11-15%), β) μέτριας περιεκτικότητας σε Cr (16-18%) και γ) υψηλής περιεκτικότητας σε Cr (19-30%) [8],[61]. Ο 410L είναι ένας χαμηλής περιεκτικότητας σε Cr χάλυβας, καθώς περιέχει περίπου 11,5-13,5% κ.β. Cr. Επίσης, περιέχει πολύ μικρή ποσότητα C (μέχρι 0,03%) και μικρές ποσότητες Si, S, Mn και ίσως Ni [35-36],[62-63]. Οι, χαμηλής περιεκτικότητας σε Cr, φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες χαρακτηρίζονται από σημαντική αντίσταση στη διάβρωση και οξείδωση, καλή ολκιμότητα και δυνατότητα κατεργασιμότητας με χαμηλό κόστος και χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα εξάτμισης αυτοκινήτων [8].

Πιο συγκεκριμένα, ο 410L εμφανίζει πολύ καλή αντίσταση στη φθορά, στη διάβρωση και στην οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχή στην κόπωση και εξαιρετική συγκολλησιμότητα και συμβατότητα μέσω λέιζερ. Επίσης, παρουσιάζει καλή ολκιμότητα και καμπτική συμπεριφορά (bending performance). Λόγω των προαναφερόμενων ιδιοτήτων του, βρίσκει, κυρίως, ευρεία εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών (π.χ. σιδηροδρομικό δίκτυο, βαγόνια), στην αυτοκινητοβιομηχανία (π.χ. συστήματα εξάτμισης), σε άλλες βιομηχανίες (π.χ. δεξαμενές αποθήκευσης, θαλάμους καύσης λέβητα) και στον κατασκευαστικό τομέα, σε δομικά στοιχεία [35],[62],[64-65]. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ευρέως, σε μορφή πούδρας για την επικάλυψη εξαρτημάτων, μέσω της τεχνικής laser cladding, με στόχο την επισκευή τους, τα οποία χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εφαρμογές αλλά και στη ναυπηγική. Μάλιστα τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα μπορεί να είναι άλλοι τύποι χαλύβων ή ο ίδιος ο 410L [35],[62-64].

Ωστόσο, επειδή είναι απαραίτητη η προσοχή κατά τη διαδικασία τεχνικών συγκόλλησης φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων, ώστε να μην προκύψουν φαινόμενα ψαθυρότητας, λόγω κατακρήμνισης μη επιθυμητών ενδομεταλλικών φάσεων και

φαινόμενα μεγέθυνσης των κόκκων στις περιοχές του συγκολλημένου μετάλλου και στη HAZ, τα οποία θα υποβαθμίσουν τις μηχανικές τους ιδιότητες, είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση και στις παραμέτρους των μεθόδων επικάλυψης με λέιζερ [61],[66]. Για παράδειγμα, στην τεχνική συγκόλλησης με λέιζερ, αναφέρεται ότι το πρόβλημα μεγέθυνσης των κόκκων μπορεί να λυθεί εν μέρει, μέσω της επιλογής εφαρμογής υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και γρήγορου ρυθμού απόψυξης [61],[67]. Επίσης, ο συνδυασμός χαμηλής εισαγόμενης θερμότητας και γρήγορου ρυθμού απόψυξης, μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό του φαινομένου ευαισθητοποίησης (sensitization) των φερριτικών χαλύβων, ο οποίος συνήθως οφείλεται στον τοπικό απεμπλουτισμό της μητρικής φάσης από Cr (συνήθως στη HAZ), λόγω της κατακρήμνισης καρβιδίων Cr23C6 και Cr7C3, με αποτέλεσμα την ευαισθησία τους σε φαινόμενα τοπικής διάβρωσης στα όρια των κόκκων και σε φαινόμενα ψαθυρότητας [68]. Όμως, σύμφωνα με τους ερευνητές Balsaraf et al. οι αρκετά μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης μπορούν να προωθήσουν το φαινόμενο ευαισθητοποίησης στους φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες, για αυτό και είναι σημαντικός ο σωστός έλεγχος και συνδυασμός παραμέτρων, όπως η ταχύτητα συγκόλλησης, η παρεχόμενη θερμότητα και ο ρυθμός απόψυξης [69]. Τέτοια φαινόμενα ευαισθητοποίησης έχουν παρατηρηθεί και στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη του συγκολλημένου φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα 410S [66],[70].

1.8.2 AISI 4140 (EN 1.7225 ή 42CrMo4)

Ο χάλυβας 4140 έχει ενδιάμεση περιεκτικότητα σε C (περίπου 0,38-0,43%) και είναι ένας ελαφρά κραματωμένος χάλυβας (medium carbon low alloy steel) με μικρές περιεκτικότητες σε Mn, Cr, Mo and Si. Χάρη στην υψηλή μηχανική αντοχή, την επαρκή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα, την καλή συμπεριφορά του ως προς τις θερμικές κατεργασίες με στόχο την αύξηση της σκληρότητας μέσω σχηματισμού μαρτενσιτικής δομής (hardenability), αντοχή στην κόπωση, κατεργασιμότητα και αντοχή στη φθορά που παρουσιάζει, χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά εξαρτήματα, όπως γρανάζια, ρότορες, άξονες γεννητριών, στροφαλοφόροι άξονες αυτοκινήτων, αρμούς σωλήνων διάτρησης βαθιών φρεατίων, υλικών θωράκισης κ.α. [71-77]. Για αυτό το λόγο, μπορεί να επιλεγεί και για την επισκευή τέτοιων εξαρτημάτων, μέσω της επικάλυψής τους με την τεχνική laser cladding, σε μορφή
πούδρας. Όπως και στο χάλυβα 410L, τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα μπορεί να είναι άλλοι τύποι χαλύβων ή ο ίδιος ο 4140. Οι βιβλιογραφικές αναφορές, βέβαια, στις οποίες χρησιμοποιείται ως υλικό επικάλυψης με τη μορφή πούδρας αντί για υπόστρωμα προς επισκευή, είναι λίγες και μάλιστα δεν ερευνούν τόσο την προκύπτουσα μικροδομή [71],[78-79].

Η μικροδομή του 4140 αποτελείται από περλίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη ως υποευτηκτοειδής χάλυβας, αλλά ανάλογα με την επιλογή των κατάλληλων θερμικών κατεργασιών μπορεί να προκύψει μορφολογία διφασικού χάλυβα, π.χ. από κόκκους φερρίτη και βελονοειδείς σχηματισμούς μαρτενσίτη ή μπαινίτη εμπλουτισμένο σε φερρίτη [76]. Για αυτό, κατασκευάζεται συμβατικά, με βαφή και επαναφορά (quenched and tempered), ώστε να έχει αυξημένη μηχανική αντοχή, διατηρώντας ικανοποιητική ολκιμότητα και δυσθραυστότητα [76-77],[80]. Βέβαια, επειδή στις τεχνικές συγκολλήσεων χάλυβα 4140 ή παρόμοιας κατηγορίας (π.χ. AISI 4340) με κάποιο ανοξείδωτο χάλυβα μπορεί να λάβουν χώρα ανεπιθύμητα φαινόμενα μικροδιαφορισμού (εμπλουτισμός και απεμπλουτισμός περιογών με κάποια κραματικά στοιχεία, όπως Cr, C), τα οποία να υποβαθμίσουν τις μηχανικές ιδιότητες (μείωση αντοχής σε κόπωση-fatigue strength, περικρυσταλλική διάβρωσηintergranular corrosion, διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση-stress corrosion cracking), χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων στις τεχνικές επικάλυψης με λέιζερ [81-82]. Ενώ, για παράδειγμα στην περίπτωση συγκόλλησης χάλυβα 4140 με ένα χάλυβα, επίσης, ενδιάμεσης περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 1050, τα αποτελέσματα είναι επιτυχή, ως προς την ποιότητα της συγκολλημένης επιφάνειας, χωρίς παρουσία μικρορωγμών και εγκλεισμάτων, αλλά και ως προς τις προκύπτουσες μηγανικές ιδιότητες (ικανοποιητική αντοχή σε εφελκυσμό και σκληρότητα) [83].

1.8.3 AISI 1060 (EN 1.1221 ή DIN Ck60)

Σύμφωνα με τον ερευνητή R. Vilar η εφαρμογή της τεχνικής laser cladding σε χάλυβες με υψηλά ποσοστά άνθρακα ως κύριο τους κραματικό στοιχείο (carbon steels) ή σε ελαφρά κραματωμένους, με επιλογή επιστρώματος ανοξείδωτους χάλυβες, αποτελεί μια, ευρέως διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής αλλά και επισκευής εξαρτημάτων και μηχανικών μερών, διότι συνδυάζει σημαντικές ιδιότητες, αντίσταση στη διάβρωση και μηχανική αντοχή, σε σχετικά χαμηλά κόστη [33]. Ένας τόσο διαδεδομένος χάλυβας, υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (περίπου 0,6%), που χρησιμοποιείται σε πολλά εξαρτήματα, όπως άξονες, δακτύλιοι, πιστόνια, ελατήρια, γεωργικά εργαλεία χειρός, συνδετικά μέρη σωλήνων, εξαρτήματα σιδηροδρομικού δικτύου, στροφαλοφόρους άξονες κινητήρα και κυλινδροκεφαλές στη ναυπηγική, είναι ο AISI 1060 [84-86]. Για αυτό το λόγο και χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα, στο οποίο πραγματοποιούνται τεχνικές επισκευής [33],[35].

Ωστόσο, είναι πιθανό να υπάρξουν διαχυσιακά φαινόμενα μεταφοράς του άνθρακα από το, πλούσιο σε άνθρακα, υπόστρωμα στα υλικά επικάλυψης (χαμηλότερης περιεκτικότητας σε C) κατά την τεχνική laser cladding, καθώς αυτό παρατηρείται και στις μεθόδους συγκόλλησης και μάλιστα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις μηγανικές ιδιότητες [87]. Επιπλέον, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των Azizieh et al., ο Ck60 λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε C, έχει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από ένα χάλυβα με μικρότερη περιεκτικότητα σε C (ST37) με τον οποίο συγκολλάται (μέσω friction welding), με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται μη ομογενοποιημένη μετάδοση της θερμότητας, να σημειώνονται υψηλότερες θερμοκρασίες στον Ck60, συνεπώς έντονα φαινόμενα τοπικής παραμόρφωσης και μείωσης της σκληρότητάς του (softening) [88]. Ο χάλυβας 1060 χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα και μηχανική αντοχή, εξαιρετική αντίσταση στη φθορά, μέτρια συμπεριφορά ως προς τις θερμικές κατεργασίες με στόχο την αύξηση σκληρότητας μέσω σχηματισμού μαρτενσιτικής δομής (hardenability), χαμηλή ολκιμότητα και δεν είναι εύκολα κατεργάσιμος λόγω του υψηλού ποσοστού σε άνθρακα. Για την ενίσχυση των προαναφερόμενων ιδιοτήτων, συνήθως, χρησιμοποιείται, αφού έχει υποστεί βαφή σε λάδι και επαναφορά [89]. Η μικροδομή του αποτελείται κυρίως από περλίτη και προευτηκτοειδή φερρίτη ως υποευτηκτοειδής χάλυβας, αλλά ανάλογα με την επιλογή των κατάλληλων θερμικών κατεργασιών για την προβλεπόμενή του εφαρμογή, μπορεί να χαρακτηρίζεται, για παράδειγμα, από μαρτενσιτική μορφολογία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Περιγραφή Υλικών

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η απόθεση μέσω λέιζερ (Laser Cladding Deposition-LCD) δύο τροποποιημένων μεταλλικών πουδρών, ενός φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα AISI 410L και ενός χαμηλά κραματωμένου χάλυβα με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα AISI 4140, σε ένα ελαφρά κραματωμένο χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 1060. Η χημική σύσταση των τριών χαλύβων αναφέρεται παρακάτω στους *Πίνακες 2* και 3.

Πίνακας 2 Τυπική χημική σύσταση των μεταλλικών πουδρών AISI 410L και AISI 4140.

Πούδρες	С	Si	Mn	Cr	Мо	S	Р	Ni	Fe
AISI	max	max	-	11.5-	-	max	-	max	Balance
410L	0.03	1.0		13.5		0.03		0.9	
AISI	0.38-	0.15-	0.75-	0.8-1.1	0.15-	0.04	0.035	-	Balance
4140	0.43	0.30	1.00		0.25				

Πίνακας 3 Τυπική χημική σύσταση και στοιχειακή ανάλυση (EDS) χαλύβδινου υποστρώματος AISI 1060.

Υπόστρωμα	С	Si	Mn	Cr	Мо	S	Р	Ni	Fe
AISI 1060	0.61	max	0.75	max	max	max	max	max	Balance
(Τυπική)		0.40		0.40	0.10	0.035	0.03	0.40	
AISI 1060	0.60	0.28	0.74	0.17	0.07	-	-	0.31	Balance
(EDS)									

2.2 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Οι μεταλλικές πούδρες AISI 410L και AISI 4140 αναμείχθηκαν και αποτέθηκαν στο υπόστρωμα AISI 1060, σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, με το ποσοστό της πούδρας 410L να αυξάνεται, ενώ της 4140 να μειώνεται (Πίνακας 4). Η κατανομή μεγέθους των κόκκων και των δύο πουδρών κυμαίνεται από 50 έως 150μm. Το υπόστρωμα έχει κυλινδρικό σχήμα, με διάμετρο 13.5 cm και πάχος 9.06 mm. Με την τεχνική LCD αποτέθηκαν δύο στρώματα για κάθε μία από τις τρεις αναλογίες, τα οποία έχουν ορθογώνιο σχήμα, διαστάσεων 8.5cm x 9.0cm και βρίσκονται σχεδόν στο κέντρο του

υποστρώματος (*Εικόνα 44*). Η απόθεση του δεύτερου στρώματος πραγματοποιήθηκε σε διεύθυνση παράλληλη με το πρώτο.



Εικόνα 44 Δοκίμια Α, Β και Γ ακριβώς μετά την τεχνική laser cladding.

Δοκίμια	Δοκίμιο Α(1,2)	Δοκίμιο Β(1,2)	Δοκίμιο Γ(1,2)
AISI 410L	50%	80%	90%
AISI 4140	50%	20%	10%

Πίνακας 4 Αναλογία των προστιθέμενων χαλύβδινων πουδρών.

Η τεχνική laser cladding deposition έλαβε χώρα στην εταιρία ΤΚ Πιτσιρίκος που εδρεύει στην Κερατέα του Νομού Αττικής. Η απόθεση των πουδρών πραγματοποιήθηκε με ένα λέιζερ γρανάτη αλουμινίου-υττρίου με προσθήκη νεοδυμίου, ισχύος 2kW (Nd:Yag laser neodymium-doped yttrium aluminium garnet), το οποίο αποτελείται από ένα βιομηχανικό ρομποτικό σύστημα (industrial robot), ένα σύστημα ελέγχου κίνησης 3 αξόνων (a 3-axis motion control system) και ένα σύστημα τροφοδοσίας των πουδρών, πλευρικά υπό καθορισμένη γωνία (off-axis powder feed system). Για την παροχή των πουδρών και την προστασία τους από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη μεταφορά και έξοδό τους από το ακροφύσιο τροφοδοσίας επιλέχθηκε αδρανές αέριο, το αργό (Ar). Οι παράμετροι της τεχνικής LCD παρουσιάζονται στον ακόλουθο *Πίνακα 5*.

Πίνακας 5 Παράμετροι τεχνικής Laser Cladding Deposition.

Παράμετροι Τεχνικής LCD Τιμή Μονάδα Μέτρησης	
--	--

Ισχύς λέιζερ (Laser power)	2	kW
Ταχύτητα λέιζερ (Laser scanning speed)	12	mm/s
Απόσταση λέιζερ-υποστρώματος ((Laser height)	15	mm
Διάμετρος δέσμης λέιζερ (Laser spot diameter)	5	mm
Παροχή πουδρών (Powder flow rate)	15	g/min
Γωνία παροχής πούδρας (Powder injection angle)	60°	Μοίρες
Παροχή αδρανούς αερίου (Gas flow rate)	9	lt/min

Προηγήθηκε της διαδικασίας LCD, η σωστή ανάμειξη και ξήρανση των πουδρών, καθώς και ο καθαρισμός του υποστρώματος με αιθανόλη, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν οργανικές επιμολύνσεις ή σκόνη και να διασφαλιστεί η επιτυχής απόθεση. Έπειτα, το υπόστρωμα προθερμάνθηκε με φλόγα προπανίου στη θερμοκρασία των 160°C, στοχεύοντας στην μείωση των προκύπτοντων παραμενουσών τάσεων, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και ταχέων ρυθμών απόψυξης, στους οποίους υποβάλλονται τα δοκίμια κατά τη διάρκεια του LCD.

Μετά το πέρας της διαδικασίας LCD τα τρία κυλινδρικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε ένα στάδιο ανόπτησης, όπου θερμάνθηκαν στους 560°C για 1 ώρα και ακολούθησε απόψυξη στο φούρνο. Η συνολική άνοδος της θερμοκρασίας μέχρι τους 560°C διήρκησε 30 λεπτά. Το στάδιο της ανόπτησης πραγματοποιήθηκε σε ένα φούρνο RHF 15/15 Carbolite, στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Αυτή η θερμική κατεργασία αποσκοπεί στη μείωση των παραμενουσών τάσεων, όπως και το στάδιο της προθέρμανσης, αλλά και στην επαναφορά των προκύπτοντων μαρτενσιτικών μετασχηματισμών της επικάλυψης, ώστε να εξασφαλιστεί ο συνδυασμός υψηλών σκληροτήτων αλλά και ικανοποιητικής ολκιμότητας και δυσθραυστότητας. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζονται και οι πιθανότητες δημιουργίας και διάδοσης ρωγμών, σε περίπτωση που υποβληθεί το υλικό σε ισχυρές εφελκυστικές τάσεις, είτε φαινόμενα κόπωσης, ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας του [**45**],[**62**],[**90-91**].

Αφού ολοκληρώθηκε και η διαδικασία της ανόπτησης, τα τρία δοκίμια υπέστη πλάνισμα με ένα βιομηχανικό τόρνο, στην εταιρία ΤΚ Πιτσιρίκος, ώστε να αποκτήσουν παρόμοιες τιμές τραχύτητας, προσομοιάζοντας την προετοιμασία που θα ακολουθούσαν ως μηχανικά εξαρτήματα τα οποία θα προορίζονταν για τη λειτουργίας τους σε έντονα αποξεστικά περιβάλλοντα (π.χ. στροφαλοφόροι άξονες πλοίου σε επαφή με τσιμούχες). Επίσης, η παρόμοια αφετηρία και των τριών δοκιμίων, όσον αφορά τις τιμές τραχυτήτων τους, θα βοηθήσει και στην πιο επιτυχή σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από τις δοκιμές φθοράς λόγω εκτριβής και τις σκληρομετρήσεις, για την τελική αξιολόγηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της αντίστασής τους στη φθορά.

Τέλος, όπως φαίνεται και παραπάνω στον Πίνακα 4, κάθε ένα από τα τρία δοκίμια Α, Β, Γ, κόπηκαν με τη βοήθεια ενός δισκοτόμου τύπου Struers Discotom (Εικόνα 45), για να προκύψουν δύο μικρότερα δοκίμια για την κάθε αναλογία πουδρών, A(1,2), B(1,2) και Γ(1,2), ορθογώνιου σχήματος, διαστάσεων 2 cm x 1.5 cm. Η κοπή πραγματοποιήθηκε μέσω ενός δίσκου ο οποίος αποτελείται από καρβίδια πυριτίου (Si). Υπάρχουν διάφορα είδη δίσκων ανάλογα με τη σκληρότητα των υλικών που μπορούν να κόψουν. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε δίσκος για κοπή υλικών με μέγιστη σκληρότητα μέχρι τα 500 Vickers. Το νούμερο 1 των δοκιμίων συμβολίζει αυτά τα οποία κόπηκαν κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του λέιζερ, στους άξονες ΥΖ, ενώ ο αριθμός 2 αντιπροσωπεύει τα δοκίμια τα οποία κόπηκαν παράλληλα στη διεύθυνση κίνησης του λέιζερ, στους άξονες ΧΖ. Αυτός ο διαγωρισμός γίνεται, καθώς, σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, υπάργουν διαφορές ανάλογα με την κατεύθυνση του λέιζερ κατά την απόθεση των πουδρών ως προς το υπόστρωμα, σε συνδυασμό με τις συνθήκες απότομων μεταβολών θερμοκρασιών και υψηλών ρυθμών απόψυξης. Συνεπώς, μπορούν να παρατηρηθούν διαφορετικά κλάσματα όγκου και μεγέθη των ίδιων φάσεων, ή και κατακρήμνιση διαφορετικών φάσεων σε περιοχές διαφορετικού προσανατολισμού, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του και της μηγανικές ιδιότητες του υλικού [92-98].

Πέραν των παραπάνω 6 δοκιμίων, κόπηκαν με το δισκοτόμο δύο δοκίμια από το υπόστρωμα AISI 1060 (Ck60). Το ένα από τα δύο τοποθετήθηκε στο φούρνο για ανόπτηση, ακριβώς στις ίδιες συνθήκες (560°C για 1h). Συνεπώς, θα αναλυθεί η μικροδομή και οι μηχανικές ιδιότητες του υποστρώματος πριν και μετά την ανόπτηση και θα διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποια μεταβολή. Επίσης, λήφθηκε αντιπροσωπευτικό δείγμα από την κάθε πούδρα, αποσκοπώντας στην ανάλυσή τους μέσω οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, καθώς και μικροσκληρομετρήσεων, ώστε να ληφθούν πληροφορίες για την ποιότητά τους και τις μηχανικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 45 Δισκοτόμος τύπου Struers Discotom.

Συνοψίζοντας, λοιπόν, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στοχεύει στη μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και της μικροδομής (ζώνη επικάλυψης, θερμικά επηρεασμένη ζώνη) του χαλύβδινου υποστρώματος AISI 1060 στην επιφάνεια του οποίου έχουν αποτεθεί τρεις διαφορετικές αναλογίες συνδυασμού των δύο χαλύβδινων πουδρών AISI 410L και AISI 4140. Πιο συγκεκριμένα, θα εκτιμηθεί ποια αναλογία θεωρείται η βέλτιστη, έτσι ώστε να μπορέσει το επικαλυμμένο εξάρτημα να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες κυρίως έντονα αποξεστικές και ταυτόγρονα να είναι και οικονομικά βιώσιμο. Ο γαρακτηρισμός των μικροδομών του κάθε δοκιμίου πραγματοποιείται μέσω Οπτικής Μικροσκοπίας (Light Optical Microscope-LOM), Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy-SEM) και Φασματόμετρου Ακτίνων Χ Διασπειρόμενης Ενέργειας (Energy-Dispersive Spectroscopy-EDS). Η κρυσταλλική δομή των μικροδομικών χαρακτηριστικών (X-Ray Ακτίνων Х επιβεβαιώνεται μέσω Περιθλασιμετρίας Diffraction-XRD). Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υπό εξέταση δοκιμίων, μέσω μακροσκληρομετρήσεων και μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers. Τέλος, η μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων εκτιμάται με ένα τραχύμετρο (Roughness Measurement Tester) και η ανάλυση της συμπεριφοράς των δοκιμίων σε συνθήκες φθοράς διεξάγεται με δοκιμή φθοράς λόγω εκτριβής (Taber Abrasion Test).

2.2.1 Προετοιμασία Δοκιμίων

Η μελέτη της μικροδομής των δοκιμίων μέσω οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, προϋποθέτει, πρώτα, την κατάλληλη προετοιμασία τους, η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Εγκιβωτισμός δοκιμίων
- Λείανση δοκιμίων
- Καθαρισμός δοκιμίων
- Στίλβωση δοκιμίων
- Καθαρισμός δοκιμίων
- Χημική προσβολή δοκιμίων

2.2.1.1 Εγκιβωτισμός Δοκιμίων

Ο εγκιβωτισμός πραγματοποιήθηκε εν ψυχρώ. Τα δοκίμια και οι πούδρες τοποθετήθηκαν σε καλούπια χωρητικότητας 15ml. Συνεπώς, σε κάθε καλούπι προστέθηκαν 15ml ρητίνης και 2.1ml σκληρυντή, ώστε αυτή να στερεοποιηθεί.





2.2.1.2 Δείανση Δοκιμίων

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε ένα περιστρεφόμενο υδρόψυκτο δίσκο, ημιαυτόματης και αυτόματης λείανσης (*Εικόνα 47*), με την επιλογή ειδικών λειαντικών χαρτιών από καρβίδιο πυριτίου (SiC), τα οποία ποικίλουν ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε κόκκους του καρβιδίου. Το όνομά τους τυποποιείται με ένα αριθμό και τη λέξη GRIT. Δηλαδή ένα χαρτί με όνομα 220 GRIT σημαίνει ότι έχει 220 κόκκους καρβιδίου του πυριτίου ανά τετραγωνική ίντσα. Επίσης, ο δίσκος φέρει ένα ακροφύσιο το οποίο τροφοδοτεί με νερό τη διαδικασία της λείανσης. Το νερό είναι απαραίτητο, για να καθαρίζεται το χαρτί και το δοκίμιο από τα ρινίσματα που προέρχονται λόγω της τριβής, κατά τη διάρκεια της λείανσης. Επιπροσθέτως, η χρήση του νερού αποσκοπεί στην αποφυγή μετασχηματισμού κάποιας φάσης της μικροδομής του δοκιμίου, διότι με την άσκηση τριβής αυξάνεται η θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόκκων καρβιδίου, η τριβή από χονδρομερή αρχίζει να γίνεται πιο λεπτομερή. Για αυτό, αρχικά υποβλήθηκαν τα δοκίμια και οι εγκιβωτισμένες πούδρες σε λείανση, χρησιμοποιώντας χαρτιά 220 GRIT, ώστε να φύγει το στρώμα ρητίνης και να εμφανιστεί η επιθυμητή, προς εξέταση, επιφάνεια. Στη συνέχεια, η λείανση πραγματοποιήθηκε με λειαντικά χαρτιά 400, 800, 1200 και 2000 GRIT.

2.2.1.3 Καθαρισμός Δοκιμίων

Όλα τα δοκίμια περνούν από το στάδιο του καθαρισμού. Ο καθαρισμός είναι πολύ σημαντικός, προκειμένου τα δοκίμια, πριν την εισαγωγή τους στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας, να έχουν ευδιάκριτες επιφάνειες, χωρίς υπολείμματα από το προηγούμενο στάδιο επεξεργασίας. Επιπλέον, ο καθαρισμός αποτελεί ένα μέσο ελέγχου, αν έχει επιτευχθεί αποτελεσματικά το αμέσως προηγούμενο στάδιο. Το στάδιο του καθαρισμού πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο. Αρχικά, ξεπλένεται το δοκίμιο με νερό, καθώς τρίβεται ταυτόχρονα με βαμβάκι. Έπειτα, εμποτίζεται το δοκίμιο με αιθανόλη, ώστε να αποφευχθεί η τυχόν οξείδωση του, λόγω της επαφής του με νερό. Βέβαια, λόγω της προσθήκης της πούδρας ανοξείδωτου χάλυβα 410L, η οξείδωση των δοκιμίων δεν είναι τόσο εφικτή. Τέλος, το δοκίμιο στεγνώνεται με αέρα.

2.2.1.4 Στίλβωση Δοκιμίων

Η στίλβωση των δοκιμίων χωρίζεται σε τρία στάδια στην προκειμένη περίπτωση. Τα δύο πρώτα πραγματοποιήθηκαν στον περιστρεφόμενο δίσκο με τη βοήθεια ειδικών πανιών από βελούδο, τη χρήση αδαμαντόπαστας και στιλβωτικού υγρού, χωρίς την τροφοδοσία νερού. Το τελευταίο πραγματοποιήθηκε με χρήση coloidal silica, πάλι στον υδρόψυκτο δίσκο με τη χρήση ενός ειδικού πανιού και απιονισμένου νερού. Εν γένει, τα δοκίμια που προορίζονται για SEM υποβάλλονται σε αυτή τη διαδικασία, καθώς είναι απαραίτητο να εξαλειφθούν οι γραμμές από τη λείανση και να μετατραπεί η επιφάνεια των δοκιμίων σε καθρέφτη για τον επιθυμητό αποτελεσματικό έλεγχο.

Κατά το πρώτο στάδιο της στίλβωσης, εγκαθίσταται το ειδικό πανί στο δίσκο, τοποθετείται η αδαμαντόπαστα 6μm (διαμάντια μεγέθους 6μm), απλώνεται καλά στο πανί, ώστε να μη δημιουργηθούν συσσωματώματα και χαράξουν την επιφάνεια του δοκιμίου και προστίθεται και στιλβωτικό υγρό. Τοποθετείται το δοκίμιο πάνω στο πανί και τίθεται ο δίσκος σε λειτουργία. Γίνεται σταδιακός έλεγχος στο οπτικό μικροσκόπιο, αν η επιφάνεια του δοκιμίου έχει απαλλαγεί από τις γραμμές και έχει γίνει καθρέφτης. Μόνο τότε, αφού επαναληφθεί και το στάδιο του καθαρισμού, όπως αναφέρθηκε, λαμβάνει χώρα το δεύτερο στάδιο.

Κατά το δεύτερο μέρος επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται αδαμαντόπαστα 1μm για λεπτομερέστερη στίλβωση. Όταν, πάλι, παρατηρηθεί η επιθυμητή επιφάνεια του δοκιμίου στο οπτικό μικροσκόπιο, προορίζεται για καθαρισμό και για το επόμενο στάδιο της στίλβωσης. Οι αδαμαντόπαστες και το στιλβωτικό υγρό που χρησιμοποιείται είναι της εταιρίας Struers.

Στο τρίτο στάδιο γίνεται αλλαγή του πανιού στο δίσκο και χρησιμοποιείται το επονομαζόμενο ccoloidal silica της εταιρίας Akasel, το οποίο αποτελεί άμορφο αιώρημα οξειδίων πυριτίου μεγέθους 50nm. Τίθεται ο δίσκος σε λειτουργία, τοποθετείται το jel στο πανί και χρησιμοποιείται τακτικά απιονισμένο νερό για να διαλυθεί το αιώρημα και να μην κρυσταλλωθεί, είτε πάνω στο δοκίμιο, είτε πάνω στο πανί και δημιουργήσει ανωμαλίες στην επιφάνεια. Το τελευταίο, αυτό στάδιο, ιδιαίτερα, στοχεύει σε μία πολύ καλά στιλβωμένη επιφάνεια. Τέλος, επαναλαμβάνεται το στάδιο του καθαρισμού.



Εικόνα 47 Περιστρεφόμενος υδρόψυκτος αυτόματος και ημιαυτόματος δίσκος στον οποίο πραγματοποιείται το στάδιο της λείανσης και της στίλβωσης.

2.2.1.5 Χημική Προσβολή Δοκιμίων

Σ αυτό το στάδιο υφίστανται χημική προσβολή όλα τα δοκίμια που θα εξετασθούν στη συνέχεια στο SEM. Τοποθετείται το αντιδραστήριο σε ένα κυκλικό δοχείο και εμβαπτίζεται το δοκίμιο μέσα σε αυτό για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετός για να προσβληθούν τα δοκίμια και να θαμπώσουν οι επιφάνειές τους. Επίσης, ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω προσβολή της επικάλυψης των δοκιμίων περιλάμβανε τη χρήση βαμβακιού το οποίο είχε εμβαπτιστεί στο αντιδραστήριο και στη συνέχεια την εφαρμογή και πίεση του πάνω στην επιφάνειά τους (swabbing). Με αυτό τον τρόπο ασκούνται τάσεις στην επιφάνεια που βοηθούν τη διαδικασία της προσβολής των δοκιμίων. Η χημική προσβολή στοχεύει στη διάβρωση των ορίων των κόκκων, διότι είναι ενεργειακά αναβαθμισμένα, ώστε να διακρίνονται οι κόκκοι και να διαχωρίζονται οι φάσεις. Μετά το πέρας κάποιων χημικών προσβολών ελέγχονται τα δοκίμια στο οπτικό μικροσκόπιο για να εξετασθεί, αν γίνεται διακριτή η μικροδομή τους ή χρειάζεται να επαναληφθεί κάποια διαδικασία προσβολής.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια πρώτα το αντιδραστήριο Nital 2% v/v (νιτρικού οξέος (HNO₃) και αιθανόλης) και έπειτα για περαιτέρω προσβολή της επικάλυψης, με την τεχνική swabbing, επιλέχθηκε το αντιδραστήριο Kalling's no 1, το οποίο περιέχει 1.5 g ένυδρου CuCl₂, 33ml H₂O, 33ml αιθανόλης και 33ml υδροχλωρίου (HCl). Η προσβολή των δοκιμίων που έγινε με σταδιακές εμβαπτίσεις στο κυκλικό δοχείο, διαρκούσε περίπου 10 sec με 12 sec. Η χημική προσβολή που πραγματοποιούταν, ασκώντας τάσεις με το βαμβάκι στο δοκίμιο διαρκούσε περίπου 2 sec με 6 sec. Για τη χημική προσβολή των εγκιβωτισμένων πουδρών πραγματοποιήθηκε διαφορετική διαδικασία. Η πούδρα 410L προσβλήθηκε μόνο με το Kalling's no 1, για περίπου 6sec με 10sec και για την πούδρα 4140, χρησιμοποιήθηκε μόνο το Nital 2%, για περίπου ίδιο χρονικό διάστημα. Ο χρόνος δεν είναι συνεχόμενος, αλλά περιλαμβάνει και διαλείμματα στα οποία γινόταν έλεγχος στο οπτικό μικροσκόπιο για την πρόσδο της προσβολής.

2.2.2 Οπτική Μικροσκοπία (Light Optical Microscopy-LOM)

Μέσω του οπτικού μικροσκοπίου διεξάγεται η παρατήρηση των δοκιμίων υπό μεγέθυνση, με τη βοήθεια του φωτός. Αποτελεί σημαντικό στάδιο καθώς εξετάζονται

τα δοκίμια στα στάδια της λείανσης, της στίλβωσης και της χημικής προσβολής, ώστε να ελεγχθεί αν η επεξεργαζόμενη επιφάνεια είναι η κατάλληλη.

Εν γένει, υπάρχουν απλά μικροσκόπια, με ένα μόνο μεγεθυντικό φακό, με μέγιστη μεγέθυνση της τάξης του 20x και πιο σύνθετα με μέγιστη μεγέθυνση της τάξης του 2000x. Η διακριτική ικανότητα ενός οπτικού μικροσκοπίου είναι περίπου 200nm και το βάθος πεδίου της ίδιας περίπου τάξης μεγέθους. Τα σύνθετα, πλέον ευρείας χρήσης, οπτικά μικροσκόπια αποτελούνται από τα ακόλουθα μέρη: (α) μία πηγή φωτός, (β) ένα συγκεντρωτικό φακό, (γ) έναν αντικειμενικό φακό, (δ) έναν προσοφθάλμιο φακό, (ε) μία τράπεζα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς παρατήρηση δοκίμιο και (στ) διατάξεις που ρυθμίζουν την ένταση και τη συγκέντρωση του φωτός. [4],[99]

Το οπτικό μικροσκόπιο λειτουργεί ως εξής. Το, προς παρατήρηση, δοκίμιο τοποθετείται κοντά στον αντικειμενικό φακό. Η πηγή εκπέμπει λευκό φως το οποίο προσπίπτει πάνω στο δοκίμιο. Ο συγκεντρωτικός φακός εστιάζει την ακτινοβολία της πηγής στο παρατηρούμενο δοκίμιο. Το ανακλώμενο φως συγκεντρώνεται από τον αντικειμενικό φακό, ο οποίος συνθέτει την εικόνα. Στη συνέχεια, η εικόνα αυτή, δηλαδή το είδωλο του δοκιμίου, μεγεθύνεται από τον προσοφθάλμιο φακό και έτσι διαμορφώνεται η εικόνα που φτάνει στα μάτια του παρατηρητή. Μέσω των διατάξεων που ρυθμίζουν τη συγκέντρωση του φωτός και την εστιακή απόσταση πραγματοποιείται και η εστίαση της μεγεθυμένης εικόνας. [4],[99]

Η μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με το οπτικό μικροσκόπιο, Olympus BX41M.



Εικόνα 48 Οπτικό Μικροσκόπιο Olympus BX41M με ενσωματωμένη κάμερα.

2.2.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy-SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιείται για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης (electron probe microanalysis – EPMA) για τη στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών της υπό παρατήρηση εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα μεταλλικά δοκίμια, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μικροδομής τους, δηλαδή την παρατήρηση των φάσεων και των κραματικών στοιχείων τους. [4],[10],[13]

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη : (α) τη στήλη του μικροσκοπίου, (β) το σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης, (γ) το θάλαμο του δοκιμίου, (δ) το σύστημα δημιουργίας κενού (αντλία κενού), (ε) το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου (ανιχνευτές) και (στ) το σύστημα εικόνας. Το δείγμα, προς ανάλυση, τοποθετείται στο θάλαμο δοκιμίου. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρησιμοποιεί λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας (1-50 keV) η οποία παράγεται, στο άνω μέρος της στήλης, μέσω της θέρμανσης, με φαινόμενο Joule, ενός λαμπτήρα βολφραμίου. Η θέρμανση αυτή επιτυγχάνεται χάρη στο ρεύμα, μικρής τάσης, που διαρρέει το λαμπτήρα βολφραμίου. Η δέσμη ηλεκτρονίων που παράγεται, για να φθάσει στο δείγμα, κατευθύνεται μέσα από τη στήλη και έτσι τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και αποκτούν μεγάλη κινητική ενέργεια. Εν γένει, εάν το

μήκος της στήλης είναι μεγάλο, διευκολύνει την ανάπτυξη μεγάλης κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων, διότι λόγω της μεγάλης διαδρομής που έχουν να διανύσουν, προλαβαίνουν να αυξήσουν την ταχύτητά τους. [4],[10],[13],[100]

Η διαμόρφωση και η διαδρομή της δέσμης μέσα στη στήλη προσδιορίζεται από δύο συστήματα ηλεκτρονικών φακών. Καθώς, λοιπόν, τα ηλεκτρόνια διέρχονται από τη στήλη, στο άνω μέρος της, υπάρχουν δύο συγκεντρωτικοί φακοί οι οποίοι παράγουν δύο διαδοχικές συγκλίσεις της δέσμης των ηλεκτρονίων. Η δέσμη αυτή εστιάζεται σε ένα σημείο στην επιφάνεια του δοκιμίου από τον αντικειμενικό φακό που βρίσκεται στο κάτω μέρος της στήλης, ακριβώς πάνω από το δοκίμιο. Με τον παραπάνω τρόπο, τα ηλεκτρόνια της δέσμης προσπίπτουν στην επιφάνεια του δοκιμίου και πραγματοποιείται διέγερση των ηλεκτρονίων των ατόμων του υλικού, η οποία οδηγεί σε ιονισμό του δοκιμίου και τέλος στη δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας. Επιπροσθέτως, ανιχνεύεται και εκπομπή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, κατά το βομβαρδισμό των ηλεκτρονίων της δέσμης πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, για τα οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω. Στη σάρωση του δείγματος βοηθούν τα λεγόμενα πηνία σάρωσης τα οποία βρίσκονται στο εσωτερικό της στήλης και μέσω του μαγνητικού τους πεδίου μετακινείται η δέσμη των ηλεκτρονίων, της οποίας το εστιασμένο σημείο σαρώνει την επιφάνεια που έχει επιλεχθεί. [4],[10],[13],[100]



Εικόνα 49 Βασικά μέρη ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης [101].

Εν γένει, λοιπόν, το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα του υλικού. Συνεπώς, μπορεί να είναι : α) δευτερογενή ηλεκτρόνια, β) οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, γ) ηλεκτρόνια Auger και δ) ακτίνες Χ. [4],[13],[100]

Τα εκπεμπόμενα δευτερογενή ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας προέρχονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων, σε βάθος 1-10nm. Έχουν ενέργεια 50eV και δίνουν πληροφορίες για την τοπογραφία της εξεταζόμενης επιφάνειας του δοκιμίου. Τα ηλεκτρόνια αυτά, συλλέγονται από έναν ανιχνευτή και μετατρέπονται σε τάση η οποία ενισχύεται σε ενισχυτή. Η ενισχυμένη τάση διοχετεύεται στον καθοδικό σωλήνα όπου και βρίσκεται μία φθορίζουσα οθόνη. Η λειτουργίας της στηρίζεται στην μεταβολή της έντασης της δέσμης που προσπίπτει πάνω της, ανάλογα με την ένταση της δέσμης των εκπεμπόμενων δευτερογενών ηλεκτρονίων. Έτσι επάνω στη φθορίζουσα οθόνη σχηματίζεται ανάγλυφη η εικόνα της επιφάνειας του δοκιμίου που σαρώνεται. Η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό και τις ανωμαλίες της επιφάνειας. Για να λειτουργήσει η παραπάνω διαδικασία με επιτυχία, είναι απαραίτητο στο θάλαμο του δοκιμίου να επικρατεί κατάσταση κενού και όχι αέριο περιβάλλον. Το απαιτούμενο κενό εξασφαλίζεται μέσω μιας αντλίας κενού. Εάν η μικροσκοπία εφαρμοσθεί στην ατμόσφαιρα του περιβάλλοντος, η δέσμη ηλεκτρονίων δε θα μπορεί να δημιουργηθεί και να κρατηθεί σταθερή σε αυτή, γιατί κατά τις συγκρούσεις του ηλεκτρονίων με τα άτομα του αέρα θα συνέβαιναν ενεργειακές ανταλλαγές με αποτέλεσμα σπινθήρες, ιονισμό του αέρα και διάχυση των ηλεκτρονίων προς διάφορες κατευθύνσεις. Επιπροσθέτως, το νήμα του λαμπτήρα βολφραμίου θα καιγόταν αμέσως, εν παρουσία του αέριου περιβάλλοντος. [4],[10],[13],[100]

αναφέρθηκε, Όπως προηγουμένως, πραγματοποιείται και εκπομπή οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, τα οποία προέρχονται από τις ελαστικές συγκρούσεις των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τα άτομα των επιφανειακών στρωμάτων, σε βάθος 0,1-1μm. Συλλέγονται από ένα δεύτερο ανιχνευτή, αυτόν του EDS (Φασματόμετρο Ακτίνων Χ Διασπειρόμενης Ενέργειας ή Energy Dispersive Spectroscopy) και δίνουν ποσοτικές και ποιοτικές πληροφορίες για τα στοιχεία του δοκιμίου, κάνοντας στοιχειακή ανάλυση, τοπογραφικά, σε ένα συγκεκριμένο μέρος του. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τα φωτόνια που εκπέμπει κάθε κραματικό στοιχείο, συλλέγονται πληροφορίες από ποια κραματικά στοιχεία και σε τι ποσοστό, αποτελούνται οι φάσεις του δοκιμίου. Έγουν ενέργεια από 5eV-50eV και η ένταση του σήματος εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των στοιγείων της επιφάνειας και από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό. Επιπλέον, στοιχεία με μεγάλη μέση ατομική μάζα εμφανίζονται ως ανοιχτόχρωμες περιοχές, ενώ τα στοιχεία με μικρή μέση ατομική μάζα παρουσιάζονται ως πιο σκουρόχρωμες περιοχές, πράγμα χρήσιμο για το διαχωρισμό τους. [4],[10],[13],[100]

Όσον αφορά τα ηλεκτρόνια Auger, προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ηλεκτρονίων με τις υποστοιβάδες των επιφανειακών ατόμων, σε βάθος μέχρι 1nm. Το φάσμα που προκύπτει είναι κατάλληλο για στοιχειακές χημικές αναλύσεις της επιφάνειας του υλικού. Τέλος, μπορούν να ανιχνευτούν και ακτίνες X, οι οποίες παράγονται από τις ανελαστικές συγκρούσεις των ηλεκτρονίων της προσπίπτουσας δέσμης με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του δοκιμίου προς εξέταση, σε βάθος έως και 2μm. Πιο συγκεκριμένα, οι ακτίνες X είναι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία που προκύπτει από τη μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου από μια υψηλότερη στοιβάδα σε μια χαμηλότερη, για να καλύψει το "κενό" που δημιουργήθηκε, επειδή πρωτίστως ένα άλλο ηλεκτρόνιο εγκατέλειψε την εσωτερική χαμηλότερη στοιβάδα. Συνεπώς, αυτή η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι χαρακτηριστική για το κάθε άτομο. [4],[13],[100]



Εικόνα 50 Οι τύποι της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας και των διεγερμένων ηλεκτρονίων που ανιχνεύονται στο SEM, καθώς και ο διαχωρισμός τους ως προς το βάθος ανίχνευσής τους στο δοκίμιο προς εζέταση [13].

Με τη μέθοδο SEM και EDS εξετάζονται όλα τα δοκίμια και οι πούδρες όντας εγκιβωτισμένες και μη. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης που χρησιμοποιείται είναι το JEOL JSM-6380LV, με τάση επιτάχυνσης 20kV. Οι στοιχειακές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης Oxford INCA ENERGY 250.

2.2.4 Περιθλασιμετρία Ακτίνων X (X-Ray Diffraction-XRD)

Η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ είναι η βασικότερη τεχνική ανάλυσης της κρυσταλλικής δομής και χαρακτηρισμού των υλικών, διότι επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική ταυτοποίηση των φάσεων, τον προσδιορισμό της κρυσταλλικής δομής,

και τη μελέτη τυχόν κρυσταλλογραφικών παραμορφώσεων λόγω εσωτερικών τάσεων. Η μέθοδος αυτή στηρίζει τη λειτουργίας της στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Χ, γνωστού μήκους κύματος (λ) πάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος του εξεταζόμενου υλικού και έπειτα στον προσδιορισμό μέσω της αντίστοιχης γωνίας θ, των εσωτερικών διαστημάτων d των επιπέδων, με εφαρμογή του γνωστού τύπου του Bragg: nλ=2dημθ, όπου n=1,2,3... είναι η τάξη περίθλασης, λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, d η πλεγματική απόσταση των κρυσταλλογραφικών επιπέδων ανάκλασης και θ η γωνία ανάκλασης [4],[102-104].

Κατά την πρόσπτωση ακτίνων X συγκεκριμένου μήκους κύματος (λ), σε ένα κρυσταλλικό στερεό παραλλήλων επιπέδων (hkl), υπάρχουν δύο περιπτώσεις: α) οι διάφορες ανακλώμενες δέσμες να μην είναι ομοφασικές, οπότε δεν παρατηρείται ενίσχυση της έντασης της ακτινοβολίας και β) οι διάφορες ανακλώμενες δέσμες για κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, θ (γωνία Bragg) να είναι ομοφασικές και να συμβάλλουν, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της εξερχόμενης ακτινοβολίας. Βέβαια, η πλεγματική απόσταση d θα πρέπει να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος (λ) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας-X [4].

Η ποιοτική ταυτοποίηση μιας φάσης ενός υλικού διεξάγεται μέσω του προσδιορισμού των εσωτερικών διαστημάτων d των κρυσταλλογραφικών επιπέδων, καθώς είναι χαρακτηριστικά για κάθε κρυσταλλική ένωση. Η ποσοτική ταυτοποίηση μιας φάσης του εξεταζόμενου υλικού λαμβάνει χώρα μέσω της μέτρησης της έντασης της περιθλόμενης ακτίνας σε προσδιορισμένη γωνία θ [4],[102-103].

Η πειραματική διάταξη XRD αποτελείται από: α) πηγή ακτίνων X συγκεκριμένου μήκους κύματος, β) ανιχνευτή ακτίνων X (απαριθμητής) και γ) γωνιόμετρο. Πιο αναλυτικά, η παραγωγή των ακτίνων X πραγματοποιείται εντός καθοδικών σωλήνων υπό κενό, με την πρόσκρουση της δέσμης ηλεκτρονίων πάνω σε ένα μεταλλικό στόχο την άνοδο. Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται από τη θέρμανση νήματος βολφραμίου (W) με τη διέλευση μερικών δεκάδων mA, τα οποία επιταχύνονται, με τάση μερικών δεκάδων kV προς την άνοδο. Το μέταλλο της ανόδου είναι αυτό που καθορίζει το μήκος κύματος των ακτίνων X. Προκειμένου η εκπεμπόμενη ακτινοβολία X να είναι αυστηρά μονοχρωματική, επιλέγεται κατάλληλο φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση της ακτινοβολίας με καθορισμένο μήκος κύματος. Το φίλτρο είναι το μέταλλο το οποίο βρίσκεται αμέσως πριν από το στοιχείο της ανόδου στον περιοδικό πίνακα και έχει πολύ λεπτό πάχος. Το δοκίμιο τοποθετείται στο κέντρο του γωνιόμετρου, το οποίο περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα επί του επιπέδου της ανάκλασης των ακτίνων Χ. Η δέσμη ακτινοβολίας Χ προσπίπτει υπό γωνία θ στην επιφάνεια του δοκιμίου και ανακλάται. Ο ανιχνευτής μετράει την ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας και μέσω ενός ενισχυτή καταγράφεται το σήμα [4],[102-104].



Εικόνα 51 α) Ενίσχυση της έντασης των ακτίνων Χ κατά την πρόσπτωσή τους σε ένα κρύσταλλο. β) Σχηματικό διάγραμμα περιθλασίμετρου ακτίνων Χ [4].

Η ταυτοποίηση των φάσεων του υποστρώματος, ανοπτημένου και μη, καθώς και της επικάλυψης των δοκιμίων που υποβλήθηκαν στην τεχνική laser cladding, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του περιθλασίμετρου Bruker D8-Focus, το οποίο φέρει, ως άνοδο, λάμπα χαλκού (Cu-Ka) με φίλτρο νικελίου (Ni). Η μονοχρωματική ακτινοβολία που δημιουργήθηκε, είχε μήκος κύματος λ=1.5406 Å. Η εφαρμοζόμενη τάση ήταν 40kV και η ένταση 40mA. Η σάρωση έλαβε χώρα με εφαρμοζόμενη γωνία 2θ από 10° έως 100° με βήμα 0.02°/sec. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι περιορισμοί αναφορικά με το κλάσμα όγκου, τη λεπτοκρυσταλλικότητα και τη διασπορά των συμμετεχουσών φάσεων ενδέχεται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα και να μην καταστήσουν δυνατή την ταυτοποίηση όλων των φάσεων του υλικού, οι οποίες παρατηρούνται με τη σάρωση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.

2.2.5 Σκληρομετρήσεις κατά Vickers (Vickers Hardness Test)

Για την αξιολόγηση των μηγανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων που έχουν υποβληθεί στην τεχνική LCD, πραγματοποιήθηκαν μακροσκληρομετρήσεις και μικροσκληρομετρήσεις κατά Vickers. Επίσης, τα δοκίμια του υποστρώματος, του ανοπτημένου και μη, υποβλήθηκαν σε δοκιμές μακροσκληρομετρήσεων, ενώ τα δοκίμια των πουδρών σε δοκιμές μικροσκληρομετρήσεων. Όσον αφορά τις μακροσκληρομετρήσεις, διεξήχθησαν σε ένα σκληρόμετρο HV-50Z, uε εφαρμοζόμενο φορτίο 196Ν και χρόνο διείσδυσης 15 sec. Σχετικά με τις μικροσκληρομετρήσεις, έλαβαν χώρα σε ένα μικροσκληρόμετρο HV-1000Z, με εφαρμοζόμενο 1.96Ν και γρόνο διείσδυσης 15 φορτίο sec. Για τις μικροσκληρομετρήσεις των πουδρών χρησιμοποιήθηκε μικρότερο φορτίο, 0.981Ν για 15 sec, ώστε να μπορέσουν να σκληρομετρηθούν κόκκοι ποικίλου μεγέθους, για πιο αντιπροσωπευτικά δεδομένα. Αναλυτικότερα, στα δοκίμια του ανοπτημένου ανοπτημένου υποστρώματος και του μη πραγματοποιήθηκαν 10 μακροσκληρομετρήσεις στο κάθε ένα και στην κάθε μία πούδρα διεξήχθησαν 20 Στα δοκίμια μεθόδου μικροσκληρομετρήσεις. της LCD ελήφθησαν μακροσκληρομετρήσεις και στις 3 υποπεριοχές, επικάλυψη (BZ), θερμικά επηρεασμένη ζώνη (HAZ) και υπόστρωμα (SUB). Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν 5 μετρήσεις για την επικάλυψη και το υπόστρωμα, καθώς αποτελούν, ως προς τη μικροδομή τους, ομοιόμορφες περιοχές. Αντιθέτως, για τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, επιλέχθηκαν 10 μετρήσεις, καθώς παρατηρούνται διαφορές ως προς τη μικροδομή και παρουσιάζει μεγάλο πάχος συγκριτικά με αυτό του συνολικού δοκιμίου. Τέλος, η διεκπεραίωση των μικροσκλημετρήσεων των παραπάνω δοκιμίων έγινε καθ' ύψος και στις τρεις προαναφερόμενες υποπεριοχές σε συνάρτηση με την απόσταση, από το πάνω μέρος (επικάλυψη) προς τα κάτω (υπόστρωμα). Συνεπώς, οι μετρήσεις στην περιοχή της επικάλυψης ήταν 6 και πραγματοποιήθηκαν ανά 200μm με 250μm, στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη ήταν 7 ανά 400μm και στο υπόστρωμα ήταν 6, ανά 800μm. Σε όλες τις σκληρομετρήσεις βασική προϋπόθεση αποτελούσε ότι η κάθε μέτρηση απείχε από την προηγούμενη, τουλάχιστον το διπλάσιο της διαγωνίου της πυραμίδας.



Εικόνα 52 α) μικροσκληρόμετρο HV-1000Ζ, β) μακροσκληρόμετρο HV-50Ζ.

2.2.6 Μέτρηση Επιφανειακής Τραχύτητας (Roughness Measurement Test)

Η μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας πραγματοποιείται στα αρχικά 3 κυλινδρικά δοκίμια πριν αυτά κοπούν στο δισκοτόμο. Οι μετρήσεις διεξάγονται με το φορητό τραχύμετρο Mitutoyo SJ-210, σύμφωνα με το πρότυπο ISO-1997 (*Πίνακας 6*). Επιλέχθηκαν 4 αντιδιαμετρικές περιοχές για το κάθε ένα από τα τρία δοκίμια, ώστε να εξασφαλιστούν πιο αντιπροσωπευτικά δεδομένα. Τα μεγέθη που καταγράφονται είναι: α) η μέση τραχύτητα (mean roughness value-Ra), β) η μέση μέγιστη τραχύτητα μεταξύ των 5 υψηλότερων κορυφών και των 5 χαμηλότερων κοιλάδων (mean measured roughness depth-Rz) και γ) η ενδεικνυόμενη τιμή της τραχύτητας (root mean square-RMS or Rq).

ISO-1997	Τιμή (Value)	
Profile	R	
Filter	Gauss	
Τιμή αποκοπής Ls	2.5µm	
Δειγματοληπτικό Μήκος = Μήκος	0.8 mm	
κύματος αποκοπής (Lc)		
Ν	5	
Μήκος αξιολόγησης (Evaluation length)	4.0mm	
Μήκος κίνησης γραφίδας (Spike's	4.8mm	
movement length)		

Πίνακας 6 Παράμετροι της μεθόδου μέτρησης επιφανειακής τραχύτητας.



Εικόνα 53 Μέτρηση επιφανειακής τραχύτητας των, πλέον, πλανισμένων 3 δοκιμίων μέσω του φορητού τραχυμέτρου.

2.2.7 Δοκιμές Φθοράς λόγω Εκτριβής (Taber Abrasion Test)

Η μελέτη της συμπεριφοράς ως προς τη φθορά πραγματοποιείται στα αρχικά 3 κυλινδρικά δοκίμια πριν αυτά κοπούν στο δισκοτόμο και αφού έχει μετρηθεί η τραχύτητά τους. Η δοκιμή φθοράς λόγω εκτριβής διεξάγεται σε ένα μηχάνημα Carl Frank Taber type abrasion tester. Στη δοκιμή αυτή, ασκείται φορτίο, 5N (500g), μέσω δύο κυλινδρικών τροχών αρκετά υψηλής σκληρότητας, συνήθως φτιαγμένα από καρβίδιο του πυριτίου SiC. Οι τροχοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι μη ελαστικοί (non-resilient) τύπου H-18 (Taber H-18 Calibrade wheels). Αυτοί οι τροχοί τοποθετούνται σε δύο αντιδιαμετρικές θέσεις του δοκιμίου και ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού, το οποίο είναι επίπεδο και τοποθετημένο πάνω σε ένα περιστρεφόμενο δίσκο. Κάθε ένα από τα τρία δοκίμια υφίστανται τη δοκιμή για 1000, 2000, 3000 και 4000 κύκλους.

Σημαντικά μεγέθη, τα οποία υπολογίζονται και δίνουν πληροφορίες για την εκτίμηση των δοκιμίων, ως προς την αντοχή τους στη φθορά, είναι: α) η αθροιστική απώλεια βάρους (cumulative weight loss), β) η απώλεια όγκου (volume loss), γ) ο δείκτης φθοράς (wear index) και δ) ο ρυθμός φθοράς (wear rate). Πιο συγκεκριμένα, για τη μέτρηση της απώλειας βάρους των δοκιμίων, πριν και μετά τη δοκιμή φθοράς για κάθε αριθμό κύκλων, χρειάστηκε ο καθαρισμός και η ξήρανση τους, ώστε να ζυγιστούν σωστά. Από τον υπολογισμό της απώλειας βάρους και την πυκνότητα του υλικού της επικάλυψης, υπολογίστηκε η απώλεια όγκου. Ο δείκτης φθοράς (W) ορίζεται ως η απώλεια μάζας προς την απόσταση που διανύθηκε ή τον συνολικό αριθμό κύκλων που διάνυσε (mg/m or mg/cycle) (eq.4). Ο ρυθμός φθοράς (Kw) ορίζεται συνήθως ως ο όγκος του υλικού (cm³) που απομακρύνθηκε ανά μονάδα εφαρμοζόμενου φορτίου (N) και ανά την απόσταση που διανύθηκε (m) (cm³/N*m) (eq.5). Τέλος, κατασκευάσθηκε για το κάθε δοκίμιο, διάγραμμα της αθροιστικής απώλειας βάρους σε συνάρτηση με την αθροιστική απόσταση που διανύθηκε, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό αριθμό των κύκλων.

and

$$W = \frac{A-B}{C} \text{ (eq. 4)}$$

W, wear index (mg/cycle)

- A, weight before abrasion (mg) B, weight after abrasion (mg)
- C, number of cycles

 $Kw = \frac{Vw}{P*L}$ (eq. 5)

Kw, wear rate (cm³/Nm) Vw, wear volume loss (cm³) P, normal load applied (N)

L, slidding distance (m)



Εικόνα 54 Δοκιμή φθοράς λόγω εκτριβής στο μηχάνημα Carl Frank Taber type abrasion tester.

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ</u> <u>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ</u>

<u>3.1 Οπτική Μικροσκοπία – LOM</u>

Σε ορισμένες μικρογραφίες LOM, στο δεξί τους μέρος υπάρχει ένα μαύρο βέλος το οποίο υποδεικνύει την κατεύθυνση της διερεύνησης του δοκιμίου από την περιοχή της επικάλυψης προς το υπόστρωμα.



3.1.1 Δοκίμια πούδρας AISI 410L και AISI 4140

Εικόνα 55 Μικρογραφία LOM δοκιμίου πούδρας AISI 410L σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται σε κάποιους πιο ευμεγέθεις κόκκους τα πλακίδια του φερρίτη και η ύπαρζη πορώδους (πράσινα βέλη).



Εικόνα 56 Μικρογραφία LOM δοκιμίου πούδρας AISI 4140 σε μεγέθυνση x200. Στους προσβεβλημένους κόκκους μπορούν να παρατηρηθούν οι βελόνες του μαρτενσίτη. Σε κάποιους κόκκους παρατηρείται η ύπαρζη πορώδους (πράσινα βέλη).

3.1.2 Δοκίμια as received υπόστρωμα AISI 1060 και ανοπτημένο υπόστρωμα AISI 1060 στους 560°C για 1h



Εικόνα 57 Μικρογραφία LOM δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου) και περλίτης (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου). Σε μερικά όρια ανάπτυξης περλίτη μπορούν να φανούν καλύτερα τα εναλλασσόμενα πλακίδια ευτηκτοειδή φερρίτη και ευτηκτοειδή σεμεντίτη.



Εικόνα 58 Μικρογραφία LOM δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έχει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου) και περλίτης (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου). Σε μερικά όρια ανάπτυξης περλίτη μπορούν να φανούν καλύτερα τα εναλλασσόμενα πλακίδια ευτηκτοειδή φερρίτη και ευτηκτοειδή σεμεντίτη.

3.1.3 Δοκίμιο A(1) (410L:4140 \rightarrow 50:50, στο σύστημα αξόνων ΨZ)



Εικόνα 59 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 60 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) (εντός των μαύρων βελών) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 61 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%: 50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 62 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ισαξονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους, σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως.



Εικόνα 63 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης.



Εικόνα 64 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία. Με μια πρώτη ματιά, ο σεμεντίτης φαίνεται να έχει υποστεί σφαιροποίηση.



Εικόνα 65 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface HAZ-SUB) μεταζύ της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) και του υποστρώματος (substrate-SUB) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται η μετάβαση από τη HAZ στο υπόστρωμα, με τον περλίτη να επιστρέφει στην αρχική μορφολογία του, αποτελούμενος από εναλλασσόμενα πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη.

3.1.4 Δοκίμιο B(1) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)



Εικόνα 66 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται, αλλά όχι τόσο έντονα, πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 67 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x500, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια

έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. a) Δενδρίτες σε στήλες (columnar dendrites) κοντά στη διεπιφάνεια BZ-HAZ και β) Ισαζονικοί δενδρίτες (equiaxed dendrites) στο άνω μέρος της επικάλυψης.



Εικόνα 68 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταζύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected
zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, η μικροδομή είναι λεπτοκρυσταλλική και αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και περλίτη, με τον τελευταίο να έχει μικρότερο μέγεθος και κλάσμα όγκου.



Εικόνα 69 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Η μικροδομή είναι λεπτοκρυσταλλική και αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου, σε σχέση με την προηγούμενη εικόνα και περλίτη, πιθανόν μεγαλύτερου μεγέθους και κλάσματος όγκου.



Εικόνα 70 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης, πιθανόν μικρότερου μεγέθους.



Εικόνα 71 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται και κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη πιο ευμεγέθεις, όσο κατευθύνεται η διερεύνηση προς το υπόστρωμα.



Εικόνα 72 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποιημένος σεμεντίτης).

<u>3.1.5 Δοκίμιο Γ(1) (410L:4140 \rightarrow 90:10, στο σύστημα αξόνων ΨΖ)</u>



Εικόνα 73 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται, αλλά όχι τόσο έντονα, πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 74 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 75 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Τέλος, ως επί το πλείστων στο άνω μέρος της HAZ η μικροδομή είναι πιο χονδρόκοκκη, αν και τη διαδέχονται κάποιες πιο λεπτόκοκκες περιοχές.



Εικόνα 76 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης.



Εικόνα 77 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται κυρίως λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται και κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη πιο ευμεγέθεις, όσο κατευθύνεται η διερεύνηση προς το υπόστρωμα.



Εικόνα 78 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποίηση σεμεντίτη).

3.1.6 Δοκίμιο A(2) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων XZ)



Εικόνα 79 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 80 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%: 50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Το δοκίμιο έχει ημιπροσβληθεί, ώστε να διακριθεί καλά η διεπιφάνεια και ιδιαίτερα η πλευρά της HAZ. Για αυτό το λόγο, οι δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης δε διακρίνοται σε αυτή τη μεγέθυνση. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή και όπως στα δοκίμια των αξόνων ΨΖ, αυτή αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Για την εξακρίβωση της θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 81 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, όπου φέρει κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, σύμφωνα και με τα δοκίμια των αζόνων ΨΖ. Για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 82 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%: 50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται παρόμοια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, όπου φέρει κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Για την εξακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 83 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι, προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης, με τη διαφορά ότι πλησιάζοντας προς το κάτω μέρος της HAZ, παρατηρούνται πιο ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη. Για την εζακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 84 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποιημένος σεμεντίτης).

3.1.7 Δοκίμιο B(2) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων XZ)



Εικόνα 85 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 86 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή, η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη (ανοιχτόχρωμοι) και περλίτη (σκουρόχρωμος), αν και για την εξακρίβωση της θα χρειαστεί λεπτομερέστερη ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 87 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται μια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτη. Βέβαια, για την εζακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 88 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Σε αυτή την εικόνα, όπως και την προηγούμενη, παρατηρείται παρόμοια λεπτοκρυσταλλική μικροδομή η οποία αποτελείται από κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Βέβαια, για την εζακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 89 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης, με τη διαφορά ότι πλησιάζοντας προς το κάτω μέρος της HAZ, παρατηρούνται πιο ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη. Για την εζακρίβωση των μικροδομικών χαρακτηριστικών θα χρειαστεί περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.



Εικόνα 90 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία (σφαιροποιημένος σεμεντίτης).

3.1.8 Δοκίμιο $\Gamma(2)$ (410L:4140 \rightarrow 90:10, στο σύστημα αξόνων XZ)



Εικόνα 91 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν κυρίως ισαζονικούς δενδρίτες. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 92 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τη μαρτενσιτική μικροδομή της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνεται ευμεγέθης περλίτης και περικρυσταλλικά παρατηρείται η ανάπτυξη προευτηκτοειδούς φερρίτη βελονοειδούς μορφολογίας.



Εικόνα 93 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται πιο ευμεγέθης περλίτης, περικρυσταλλικά των οποίων έχει κατακρημνιστεί προευτηκτοειδής φερρίτης βελονοειδούς ή/και γωνιώδους μορφολογίας, μικρότερου μεγέθους και κλάσματος όγκου, σε σύγκριση αντιστοίχως με τη μικροδομή κοντά στη διεπιφάνεια.



Εικόνα 94 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του άνω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικρότερου μεγέθους.



Εικόνα 95 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται κυρίως λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης. Επίσης, φαίνονται κάποιοι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη πιο ευμεγέθεις, όσο κατευθύνεται η διερεύνηση προς το υπόστρωμα.



Εικόνα 96 Μικρογραφία LOM, σε μεγέθυνση x200, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι ο περλίτης εσωτερικά παρουσιάζει διαφορετική μορφολογία. Επιπλέον, πιθανόν να υπάρχει και ένα άλλο μικρογραφικό συστατικό, καθώς παρατηρούνται κάποιοι κόκκοι πιο ανάγλυφοι με πιο έντονη ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου. Υπάρχει πιθανότητα, επίσης, αυτή η δομή και το χρώμα να έχει προκύψει από τη μεταλλογραφική προετοιμασία (στίλβωση και προσβολή). Συνεπώς, για την εξακρίβωση αυτού του προβληματισμού χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση του δοκιμίου στο SEM.

3.2 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης – SEM

Σε ορισμένες μικρογραφίες SEM, στο δεξί τους μέρος υπάρχει ένα μαύρο βέλος το οποίο υποδεικνύει την κατεύθυνση της διερεύνησης του δοκιμίου από την περιοχή της επικάλυψης προς το υπόστρωμα.

3.2.1 Δοκίμια πούδρας AISI 410L και AISI 4140



Εικόνα 97 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου πούδρας AISI 410L: a) Low Vacuum σε μεγέθυνση x50 και β) High Vacuum σε μεγέθυνση x100.

Πίνακας 7	Γουικουμόνη	στοινειακή	aválvan	με τη χοήση	EDS	της πούδοας	<i>1</i> 101
miranas /	ι ενικευμενη	στοιχειακη	αναλύση,	με τη χρηση	LDS,	της πουορας	410L.

Elements	Weight %
Si	0.67
Cr	13.19
Mn	0.36
Ni	0.26
Мо	0.21
Fe	85,31
Total	100,00





Εικόνα 98 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου πούδρας AISI 4140: a) Low Vacuum σε μεγέθυνση x50 και β) High Vacuum σε μεγέθυνση x100.

Elements	Weight %
Si	0.38
Cr	1.18
Mn	1.39
Ni	0.34
Мо	0.38
Fe	96.33
Total	100,00

Πίνακας 8 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της πούδρας 4140.



3.2.2 Δοκίμια υποστρώματος as received AISI 1060 και ανοπτημένου AISI 1060 στους 560°C για 1h



Εικόνα 99 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου) και ευμεγέθης περλίτης (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου).



Εικόνα 100 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 σε μεγέθυνση x1000. Παρατηρούνται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης. Σε αυτή τη μεγέθυνση, στα όρια ανάπτυζης του περλίτη φαίνονται τα εναλλασσόμενα πλακίδια ευτηκτοειδή φερρίτη και ευτηκτοειδή σεμεντίτη.

Πίνακας 9 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, του δοκιμίου as received AISI 1060.

Elements	Weight %
Si	0.28
Cr	0.17
Mn	0.74
Ni	0.31
Мо	0.07
Fe	98.43
Total	100,00





Εικόνα 101 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έχει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x200. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (σκουρόχρωμη αντίθεση πεδίου) και ευμεγέθης περλίτης (ανοιχτόχρωμη αντίθεση πεδίου).



Εικόνα 102 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων δοκιμίου as received AISI 1060 το οποίο έχει υποβληθεί στο στάδιο ανόπτησης στους 560°C για 1h, σε μεγέθυνση x1000. Παρατηρούνται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη και ο περλίτης. Σε αυτή τη μεγέθυνση, στα όρια ανάπτυζης του περλίτη φαίνονται τα εναλλασσόμενα πλακίδια ευτηκτοειδή φερρίτη και ευτηκτοειδή σεμεντίτη.

Πίνακας 10	Γενικευμένη	στοιχειακή	ανάλυση,	με	τη	χρήση	EDS,	του	ανοπτημένου	δοκιμίου
AISI 1060.										

Elements	Weight %
Si	0.32
Cr	0.20
Mn	0.70
Ni	0.28
Мо	0.11
Fe	98.39
Total	100,00



3.2.3 Δοκίμιο A(1) (410L:4140 \rightarrow 50:50, στο σύστημα αξόνων ΨZ)



Εικόνα 103 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%: 50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect) και νάνο-κατακρημνίσεις καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη) στο εσωτερικό ορισμένων μαρτενσιτικών βελονών.

Πίνακας 11 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου A(l).

Elements	Weight %
Cr	6.11
Fe	93.89
Total	100,00





Εικόνα 104 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης και φαίνεται στο πάνω μέρος της μικρογραφίας. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ισαξονικός περλίτης μικρότερο κλάσμα όγκου.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από την επικάλυψη και καταλήγοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.


Εικόνα 105 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(1), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. α) Περιοχή επικάλυψης και β) Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη.

Πίνακας 12 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, α) της επικάλυψης και β) της θερμικά επηρεασμένης ζώνης κοντά στη διεπιφάνεια του δοκιμίου A(1).

Elements	Weight %
Cr	4.57
Fe	95.43
Total	100,00



Elements	Weight %
Fe	99.25
Mn	0.75
Total	100,00





Εικόνα 106 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του C.



Εικόνα 107 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου και ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 108 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Αναλυτικότερα, διακρίνονται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης μικρότερου μεγέθους, σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως.



Εικόνα 109 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικροδομή η οποία θυμίζει αυτή του υποστρώματος, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο σεμεντίτης έχει υποστεί σφαιροποίηση. Η κυκλωμένη περιοχή φαίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στην επόμενη μικρογραφία.



Εικόνα 110 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x5000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Φαίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, μέρος των ορίων ανάπτυξης του περλίτη, εστιάζοντας στο σφαιροποιημένο σεμεντίτη.

3.2.4 Δοκίμιο B(1) (410L:4140 \rightarrow 80:20, στο σύστημα αξόνων ΨZ)



Εικόνα 111 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Πιο συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, στο εσωτερικό της επικάλυψης διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect) και νάνο-κατακρημνίσεις καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη) στο εσωτερικό ορισμένων μαρτενσιτικών βελονών.



Εικόνα 112 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη της επικάλυψης. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της ΗΑΖ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.

Πίνακας 13 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου B(1).

Elements	Weight %
Cr	7.74
Fe	92.26
Total	100,00



Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από την επικάλυψη και καταλήγοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 113 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(1), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. α) Περιοχή επικάλυψης, β) HAZ πολύ κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας και γ) HAZ πιο κάτω.

Πίνακας 14 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης, β) ΗΑΖ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω, του δοκιμίου B(1).

Elements	Weight %	Elements	Weight %	Elements	Weight %
Cr	6.12	Cr	0.97	Fe	99.14
Fe	93.88	Fe	99.03	Mn	0.86
Total	100,00	Total	100,00	Total	100,00







Εικόνα 114 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του C.



Εικόνα 115 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 116 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και σφαιροποιημένος σεμεντίτης στο εσωτερικό του περλίτη (μπλε βέλη). Τέλος, παρατηρούνται και όρια ανάπτυζης που υποδηλώνουν πιθανόν την ύπαρξη μπαινιτικής μικροδομής (κόκκινα βέλη).



Εικόνα 117 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης ίσως μεγαλύτερου μεγέθους, σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως.



Εικόνα 118 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000 του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται και εδώ ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και σφαιροποιημένος σεμεντίτης στο εσωτερικό του περλίτη (μπλε βέλη).



Εικόνα 119 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο σεμεντίτης έχει σφαιροποιηθεί πλήρως.



Εικόνα 120 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης εντός των ορίων ανάπτυξης του περλίτη.

3.2.5 Δοκίμιο $\Gamma(1)$ (410L:4140 \rightarrow 90:10, στο σύστημα αξόνων ΨZ)



Εικόνα 121 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 122 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους δενδρίτες του μαρτενσίτη εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη). Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαξονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.

Πίνακας 15 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου Γ(1).

Elements	Weight %
Cr	8.98
Fe	91.02
Total	100,00



Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από την επικάλυψη και καταλήγοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 123 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(1), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. α) Περιοχή επικάλυψης και β) HAZ.

Πίνακας 16 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης και β) HAZ, του δοκιμίου Γ(1).

Elements	Weight %
Cr	6.62
Fe	92.38
Total	100,00

Elements	Weight %
Fe	98.87
Mn	1.13
Total	100,00







Εικόνα 124 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(1), κάθετα στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου και άνθρακα. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr και στοιχειώδη αύξηση του C.



Εικόνα 125 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Επίσης, στο εσωτερικό ορισμένων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη, απαντώνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (κίτρινα βέλη).



Εικόνα 126 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης, μικρότερου μεγέθους, πιθανόν σε παρόμοιο κλάσμα όγκου, αντιστοίχως. Επιπροσθέτως, όπως και στην προηγούμενη εικόνα, φαίνονται ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και σφαιροποιημένος σεμεντίτης στο εσωτερικό του περλίτη (μπλε βέλη).



Εικόνα 127 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Διακρίνονται καλύτερα τα ενδοκρυσταλλικά νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, εντός κάποιων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη) και ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης στο εσωτερικό του περλίτη (μπλε βέλη).



Εικόνα 128 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(1) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΨΖ. Παρατηρούνται ευμεγέθεις ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με τη διαφορά ότι εντός του περλίτη, ο σεμεντίτης έχει υποστεί πλήρως σφαιροποίηση.

3.2.6 Δοκίμιο A(2) (410L:4140 → 50:50, στο σύστημα αξόνων XZ)



Εικόνα 129 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x1000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας. Συγκεκριμένα, οι βελόνες μαρτενσίτη σχηματίζουν ισαζονικούς δενδρίτες. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 130 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους μαρτενσιτικούς δενδρίτες, εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη). Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.

Πίνακας 17 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου A(2).

Elements	Weight %
Cr	6.79
Fe	93.21
Total	100,00



Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και καταλήγοντας στην επικάλυψη.



Εικόνα 131 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(2), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. α) Περιοχή επικάλυψης και β) HAZ.

Πίνακας 18 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης και β) HAZ, του δοκιμίου A(2).

Elements	Weight %
Cr	4.92
Fe	95.08
Total	100,00

Elements	Weight %
Fe	98.91
Mn	1.09
Total	100,00







Electron Image 1



Εικόνα 132 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου A(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, στοιχειώδη αύζηση του C και μείωση του Mn.



Εικόνα 133 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη παρόμοιου μεγέθους με την προηγούμενη εικόνα, κυρίως ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου.



Εικόνα 134 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Αναλυτικότερα, διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, στο εσωτερικό των οποίων απαντώνται νάνο-κατακρημνίσεις καρβιδίων (κίτρινα βέλη) και λιγότερο εμφανώς, σφαιροποιημένος σεμεντίτης εντός του περλίτη (μπλε βέλη).



Εικόνα 135 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Αναλυτικότερα, διακρίνονται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης παρόμοιου μεγέθους, με το κλάσμα όγκου του τελευταίου να είναι λίγο μεγαλύτερο.



Εικόνα 136 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις και μικρότερου μεγέθους, ισαζονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και όρια περλίτη. Πιο συγκεκριμένα, εντός των περλιτών διακρίνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη και εντός κάποιων κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη, η κατακρήμνιση καρβιδίων σε νάνο-κλίμακα. Η κυκλωμένη περιοχή φαίνεται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση στην επόμενη μικρογραφία.



Εικόνα 137 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου A(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 50%:50% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Φαίνονται σε μεγαλύτερη μεγέθυνση τα καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός του περλίτη (μπλε βέλη) και η νάνο-κατακρήμνιση των καρβιδίων εντός των κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη (κίτρινα βέλη).

3.2.7 Δοκίμιο B(2) (410L:4140 → 80:20, στο σύστημα αξόνων XZ)



Εικόνα 138 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις βελόνες μαρτενσίτη να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect).



Εικόνα 139 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους μαρτενσιτικούς δενδρίτες, εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων (πορτοκαλί βέλη). Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί. Επίσης, παρατηρείται και ισαζονικός περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου.

Πίνακας 19 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου B(2).

Elements	Weight %
Cr	9.34
Fe	90.66
Total	100,00



Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από την επικάλυψη και καταλήγοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 140 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(2), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. α) Περιοχή επικάλυψης β) HAZ πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) HAZ πιο κάτω.

Πίνακας 20 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης, β) ΗΑΖ πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω, του δοκιμίου B(2).

Elements	Weight %
Cr	5.81
Fe	94.89
Total	100,00



Elements	Weight %
Cr	2.69
Fe	97.31
Total	100,00








Εικόνα 141 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου B(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, στοιχειώδη αύζηση του C και μείωση του Mn.



Εικόνα 142 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μικρότερου μεγέθους, γωνιώδους μορφολογίας και ισαζονικοί, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Σε κάποια όρια ανάπτυζης περλίτη διακρίνεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης.



Εικόνα 143 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Κατά κύριο λόγο, διακρίνονται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης παρόμοιου μεγέθους, με παρόμοιο κλάσμα όγκου. Επίσης, σε ορισμένους κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σημειώνεται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (κίτρινα βέλη) και σε ορισμένα όρια ανάπτυζης περλίτη ανιχνεύεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης (μπλε βέλη). Τέλος, ορισμένα όρια ανάπτυζης, όπως αυτά της παραπάνω κυκλωμένης περιοχής, θυμίζουν μπαινιτική μικροδομή.



Εικόνα 144 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Φαίνονται α) κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, στο εσωτερικό των οποίων απαντώνται νάνο-κατακρημνίσεις καρβιδίων (κίτρινα βέλη), β) λιγότερο εμφανώς, καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός του περλίτη (μπλε βέλη) και γ) πιθανόν μπαινιτικός σχηματισμός, όπως αυτός που υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος.



Εικόνα 145 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κάτω τμήματος του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις και μικρότερου μεγέθους, γωνιώδεις κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη (πράσινα βέλη) και ισαζονικό περλίτη. Πιο συγκεκριμένα, εντός του περλίτη διακρίνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη (μπλε βέλη) και εντός κάποιων κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη, η κατακρήμνιση καρβιδίων σε νάνοκλίμακα. Πιθανή είναι και η ύπαρζη μπαινιτικού σχηματισμού.



Εικόνα 146 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κατώτερου τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου B(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 80%:20% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις ισαζονικούς

κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθη περλίτη, οι οποίες θυμίζουν τη μικροδομή του υποστρώματος με τη μόνη διαφορά, ότι ο περλίτης αποτελείται από σφαιροποιημένο σεμεντίτη.



3.2.8 Δοκίμιο Γ(2) (410L:4140 > 90:10, στο σύστημα αξόνων XZ)

Εικόνα 147 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της επικάλυψης (bead zone-BZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, με τις μαρτενσιτικές βελόνες να σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Επιπλέον, διακρίνονται πόροι σφαιρικού μεγέθους, μικρής διαμέτρου, σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (spherical intralayer pores or keyholing porosity effect). Τέλος, ανιχνεύονται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων, ομοιόμορφα διασκορπισμένα (πορτοκαλί βέλη).



Εικόνα 148 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Η άνω πλευρά της διεπιφάνειας αποτελείται από τους μαρτενσιτικούς δενδρίτες, εντός των οποίων παρατηρούνται νάνο-κατακρημνίσματα καρβιδίων. Στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας, εντός της HAZ, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, σε ορισμένες περιπτώσεις γωνιώδους μορφολογίας και όχι ισαζονικοί, κάποιοι από τους οποίους φέρουν στο εσωτερικό τους κατακρημνίσεις καρβιδίων (κίτρινα βέλη). Επίσης, παρατηρείται και περλίτης μικρότερου μεγέθους και σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Τέλος, ακριβώς στη διεπιφάνεια του δοκιμίου, κατά μήκος της, έχουν κατακρημνιστεί, πιθανόν, καρβίδια (πορτοκαλί βέλη).

Πίνακας 21 Γενικευμένη στοιχειακή ανάλυση, με τη χρήση EDS, της επικάλυψης του δοκιμίου Γ(2).

Elements	Weight %
Cr	10.27
Fe	89.73
Total	100,00



Επίσης, πραγματοποιήθηκε τοπική στοιχειακή ανάλυση σε κοντινή περιοχή της επικάλυψης πάνω από την διεπιφάνεια BZ-HAZ και σε κοντινή περιοχή ακριβώς από κάτω. Τέλος, ακολούθησε για περαιτέρω επιβεβαίωση, γραμμική στοιχειακή ανάλυση κάθετα στη διεπιφάνεια, ξεκινώντας από την επικάλυψη και καταλήγοντας στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη.



Εικόνα 149 Τοπική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(2), μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες ΧΖ. α) Περιοχή επικάλυψης β) HAZ πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) HAZ πιο κάτω.

Πίνακας 22 Τοπική στοιχειακή ανάλυση, με την χρήση EDS, α) της επικάλυψης, β) ΗΑΖ πολύ κοντά στη διεπιφάνεια και γ) ΗΑΖ πιο κάτω, του δοκιμίου Γ(2).

Elements	Weight %	Elements	Weight %	1	Elements	Weight %
Cr	7.60	Cr	2.57	1	Fe	98.97
Fe	92.40	Fe	97.43	1	Mn	1.03
Total	100,00	Total	100,00	7	Total	100,00







Εικόνα 150 α) Εικόνα από τη γραμμική στοιχειακή ανάλυση του δοκιμίου Γ(2), κάθετα στη διπεφάνεια BZ-HAZ, μέσω EDS, το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. β) Γράφημα της γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης το οποίο παρουσιάζει την ποιοτική και ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση χρωμίου, άνθρακα και μαγγανίου. Ο κάθετος άζονας δείχνει την ποσόστωση και ο οριζόντιος άζονας το μήκος της επιλεγμένης γραμμικής στοιχειακής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, από την επικάλυψη προς τη HAZ παρατηρείται σημαντική μείωση του Cr, στοιχειώδη αύζηση του C και μείωση του Mn.



Εικόνα 151 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, της διεπιφάνειας (interface BZ-HAZ) μεταξύ της επικάλυψης (bead zone-BZ) και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άξονες XZ. Λίγο πιο κάτω από τη διεπιφάνεια, εντός της HAZ, σχετικά με την προηγούμενη φωτογραφία, διακρίνονται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη (πράσινα βέλη), κυρίως βελονοειδούς μορφολογίας, κάποιοι από τους οποίους φέρουν στο εσωτερικό τους κατακρημνίσεις καρβιδίων.



Εικόνα 152 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Διακρίνονται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη (πράσινα βέλη) μικρότερου μεγέθους, γωνιώδους μορφολογίας, αλλά σε μικρότερο κλάσμα όγκου. Αντίθετα, παρατηρείται ισαζονικός περλίτης μεγαλύτερου μεγέθους και σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου. Σε ορισμένα όρια ανάπτυζης του περλίτη διακρίνεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης (μπλε βέλη).



Εικόνα 153 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x3000, του άνω μέρους της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Φαίνονται καλύτερα οι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, γωνιώδους μορφολογίας, όπου στο εσωτερικό ορισμένων έχουν κατακρημνιστεί καρβίδια (πράσινα βέλη). Επίσης, διακρίνονται πιθανόν όρια ανάπτυζης που υποδηλώνουν την ύπαρζη της μπαινιτικής μικροδομής (κόκκινα βέλη), καθώς διαφέρουν από την περλιτική δομή, η οποία στο εσωτερικό της μπορεί να φέρει και σφαιροποιημένο σεμεντίτη (μπλε βέλη).



Εικόνα 154 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Κατά κύριο λόγο, διακρίνονται ισαζονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτης μικρότερου μεγέθους. Επίσης, σε ορισμένους κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, σημειώνεται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (κίτρινα βέλη) και σε ορισμένα όρια ανάπτυζης περλίτη ανιχνεύονται καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη (μπλε βέλη). Τέλος, ορισμένα όρια ανάπτυζης, όπως αυτά της παραπάνω κόκκινης κυκλωμένης περιοχής, θυμίζουν μπαινιτική μικροδομή.



Εικόνα 155 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x4000, του κέντρου της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται, κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη (πράσινα βέλη), γωνιώδους μορφολογίας, ισαζονικός περλίτης (μπλε βέλη), ορισμένα όρια ανάπτυζης του οποίου φέρουν καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη στο εσωτερικό τους και πιθανόν όρια ανάπτυζης που υποδηλώνουν την ύπαρζη της μπαινιτικής δομής (κόκκινα βέλη).



Εικόνα 156 Μικρογραφία SEM δευτερογενών ηλεκτρονίων, σε μεγέθυνση x2000, του κάτω τμήματος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (heat-affected zone-HAZ) του δοκιμίου Γ(2) το οποίο έχει υποβληθεί στην τεχνική laser cladding και έχει επικαλυφθεί με το συνδυασμό των πουδρών AISI 410L και AISI 4140 σε αναλογία 90%:10% και στη συνέχεια έχει κοπεί ως προς τους άζονες XZ. Παρατηρούνται περιοχές με ευμεγέθεις ισαζονικούς κόκκους προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, οι οποίες θυμίζουν τη μικροδομή του υποστρώματος με τη μόνη διαφορά, ότι ο περλίτης αποτελείται από σφαιροποιημένο σεμεντίτη.

3.3 Περιθλασιμετρία Ακτίνων X-XRD (X-Ray Diffraction)

Η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια, as-received υπόστρωμα AISI 1060, ανοπτημένο υπόστρωμα AISI 1060, στα δοκίμια A (50:50), B (80:20) και Γ (90:10). Πιο συγκεκριμένα, στα τελευταία 3 δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν στην τεχνική laser cladding, η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ εφαρμόσθηκε στην περιοχή της επικάλυψης.

Παρακάτω, στην Εικόνα 157 παρατίθενται, συγκριτικά, τα διαγράμματα XRD του as-received υποστρώματος AISI 1060 και του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060.



Εικόνα 157 Συγκριτικά διαγράμματα XRD του as-received υποστρώματος AISI 1060 και του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060.

Στην *Εικόνα 158* παρατίθενται, συγκριτικά, τα διαγράμματα XRD του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060 και της επικάλυψης των δοκιμίων Α, Β και Γ.



Εικόνα 158 Συγκριτικά διαγράμματα XRD του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060 και της επικάλυψης των δοκιμίων Α (50:50), Β (80:20) και Γ (90:10).

3.4 Σκληρομετρήσεις κατά Vickers (Hardness Vickers Test)

3.4.1 Μακροσκληρότητες κατά Vickers (Macrohardness Vickers Test)

Τα αποτελέσματα των μακροσκληρομετρήσεων κατά Vickers παρατίθενται παρακάτω, χωρισμένα σε τρία ραβδογράμματα ανάλογα με τα εξεταζόμενα δοκίμια. Αναλυτικότερα στην *Εικόνα 159* παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές σκληροτήτων του as-received υποστρώματος και του ανοπτημένου υποστρώματος. Στις *Εικόνες 160,161* παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές σκληροτήτων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(1), B(1), Γ(1) και A(2), B(2), Γ(2), αντίστοιχα.



Εικόνα 159 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers του δοκιμίου as-received υποστρώματος και του ανοπτημένου υποστρώματος.



Εικόνα 160 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1).



Εικόνα 161 Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2).

3.4.2 Μικροσκληρότητες κατά Vickers (Microhardness Vickers Test)

Τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers παρατίθενται παρακάτω, χωρισμένα σε τρία ραβδογράμματα και δύο διαγράμματα ανάλογα με τα εξεταζόμενα δοκίμια. Αναλυτικότερα στην *Εικόνα 162* παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές μικροσκληροτήτων των δύο πουδρών, AISI 410L και AISI 4140. Στις *Εικόνες 163,164* και *165,166* παρουσιάζονται συγκριτικά το προφίλ μικροσκληρομετρήσεων συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του δοκιμίου μέχρι το υπόστρωμα και οι τιμές μικροσκληροτήτων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(1), B(1), Γ(1), και A(2), B(2), Γ(2), αντιστοίχως.



Εικόνα 162 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των πουδρών AISI 410L και AISI 4140.



Εικόνα 163 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1).



Εικόνα 164 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1).



Εικόνα 165 Προφίλ μικροσκληρομετρήσεων των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2).



Εικόνα 166 Αποτελέσματα μικροσκληρομετρήσεων κατά Vickers των περιοχών BZ, HAZ και SUB των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2).

3.5 Μέτρηση Επιφανειακής Τραχύτητας (Roughness Measurement <u>Test)</u>

Τα αποτελέσματα της μέτρησης της επιφανειακής τραχύτητας, η οποία πραγματοποιήθηκε στα αρχικά επικαλυμμένα δοκίμια A (50:50), B (80:20), Γ(90:10), πριν αυτά κοπούν και πριν δρομολογηθούν για τη δοκιμή φθοράς, παρουσιάζονται στον ακόλουθο *Πίνακα 23*. Για τη σύγκριση των τραχυτήτων τους λαμβάνεται, κυρίως υπόψη, η τιμή της μέσης τραχύτητας, Ra.

Πίνακας 23 Αποτελέσματα μέτρησης επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων Α, Β και Γ.

Δοκίμια	Ra	Rq (RMS)	Rz
А	0.138 ± 0.013	0.173	0.768
В	0.120 ± 0.011	0.147	0.644
Γ	$\boldsymbol{0.118 \pm 0.011}$	0.153	0.686

3.6 Δοκιμές Φθοράς λόγω Εκτριβής (Taber Abrasion Test)

Τα αποτελέσματα της δοκιμής φθοράς, η οποία πραγματοποιήθηκε στα αρχικά επικαλυμμένα δοκίμια A, B, Γ, πριν αυτά κοπούν, παρουσιάζονται στον ακόλουθο *Πίνακα 24*. Πιο αναλυτικά αναγράφονται ο ρυθμός φθοράς, ο δείκτης φθοράς και η αθροιστική απώλεια βάρους για το κάθε ένα από τα τρία δοκίμια μετά την εφαρμογή της δοκιμής μέχρι και τους 4000 κύκλους. Επίσης, στην *Εικόνα 167* παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα της αθροιστικής απώλειας βάρους (g) σε συνάρτηση με τη συνολική απόσταση που διανύθηκε (m) (μέχρι και 4000 κύκλους) κατά τη διάρκεια της δοκιμής φθοράς για το κάθε ένα από τα τρία δοκίμια Α, Β και Γ.

Πίνακας 24 Αποτελέσματα δοκιμής φθοράς λόγω εκτριβής για τα δοκίμια Α,Β και Γ.

Δοκίμια	Wear	Index	Wear	Rate	Cumulative Weight
	(mg/Cycle)		$(cm^3/N \cdot m)$		Loss (mg)
Α	0.1625		1.85.10-5		650
В	0.1625		1.86.10-5		650
Γ	0.1575		1.81·10 ⁻⁵		630



Εικόνα 167 Συγκριτικά διαγράμματα της αθροιστικής απώλειας βάρους (g) σε συνάρτηση με τη συνολική απόσταση που διανύθηκε (m) κατά τη διάρκεια της δοκιμής φθοράς για το κάθε ένα από τα τρία δοκίμια A(1) (μπλε χρώμα), B(1) (κόκκινο χρώμα) και Γ(1) (πράσινο χρώμα).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ακόλουθη μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η απόθεση μέσω της τεχνικής Laser Cladding Deposition-LCD δύο τροποποιημένων μεταλλικών πουδρών, ενός φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα AISI 410L και ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα AISI 4140, σε ένα ελαφρά κραματωμένο χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα AISI 1060. Οι μεταλλικές πούδρες AISI 410L και AISI 4140 αναμείχθηκαν και αποτέθηκαν στο υπόστρωμα AISI 1060, σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, με το ποσοστό της πούδρας 410L να αυξάνεται, ενώ της 4140 να μειώνεται: A) AISI 410L:AISI 4140→50:50, B) AISI 410L:AISI 4140→80:20 και Γ) AISI 410L:AISI 4140→90:10. Με κάθε επιφύλαξη, η ακόλουθη συζήτηση των αποτελεσμάτων γίνεται, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανάπτυξη κάθε επικάλυψης πραγματοποιήθηκε σταθερά στις ίδιες συνθήκες από την εταιρία TK Πιτσιρίκος.

4.1 Συνδυασμός αποτελεσμάτων LOM, SEM και EDS

Σχετικά με τις πούδρες AISI 410L και AISI 4140:

Από το συνδυασμό των μικρογραφιών της οπτικής μικροσκοπίας και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης σχετικά με τις πούδρες AISI 410L και AISI 4140, οι οποίες έχουν κατανομή μεγέθους 50μm έως τα 150μm, επιβεβαιώνονται τα ακόλουθα.

Οι κόκκοι της πούδρας 410L παρουσιάζουν, κατά μέσο όρο, μικρότερο μέγεθος από τους κόκκους της πούδρας 4140 και φαίνεται να έχουν πιο καλοσχηματισμένο σφαιρικό σχήμα, χωρίς συσσωματώματα με άλλους κόκκους (π.χ. satellites, agglomerates) (*Εικόνες 55,56,97,98*). Επίσης, και στις δύο πούδρες, σε ορισμένους κόκκους μπορούν να παρατηρηθούν πόροι που έχουν προκύψει από τη διαδικασία παραγωγής τους (*Εικόνες 55,56*). Σύμφωνα με τις μικρογραφίες παρατηρείται η φερριτική μικροδομή των κόκκων της πούδρας 410L και οι μαρτενσιτικές βελόνες των κόκκων της πούδρας 4140. Η γενικευμένη σύσταση της πούδρας 410L (*Πίνακας* 7) επιβεβαιώνει τον ανοξείδωτό της χαρακτήρα, αφού το ποσοστό της σε Cr κυμαίνεται στα 13,19% κατά βάρος. Η γενικευμένη σύσταση της πούδρας 4140

(Πίνακας 8) επιβεβαιώνει την περιεκτικότητας της σε μικροκραματικές προσθήκες, όπως Cr, Ni, Mo.

Σχετικά με το as-received υπόστρωμα και το ανοπτημένο υπόστρωμα, AISI 1060:

Το as received υπόστρωμα AISI 1060 πριν και μετά το στάδιο της αποτατικής ανόπτησης στους 560°C για 1h, αποτελείται από ισαξονικούς κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη και ισαξονικό περλίτη παρόμοιου μεγέθους, με τον τελευταίο να απαντάται σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου (Εικόνες 57,58,99,101). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον κανόνα του μοχλού και χωρίς να ληφθούν υπόψη οι μικροκραματικές προσθήκες του σε Ni, Cr και Mo, ο χάλυβας AISI 1060 με 0.6 % περιεκτικότητα σε C, αποτελείται από 28.57 % προευτηκτοειδή φερρίτη και 71.43 % περλίτη. Αν και ο προαναφερόμενος κανόνας εφαρμόζεται σε κοινούς χάλυβες και όχι σε ελαφρά κραματωμένους, οπότε στην πραγματικότητα δεν υφίστανται επακριβώς τα παραπάνω ποσοστά, η προσέγγιση αυτή εξηγεί γιατί το κλάσμα όγκου του περλίτη είναι μεγαλύτερο από το κλάσμα όγκου του προευτηκτοειδή φερρίτη. Τέλος, η γενικευμένη τους σύσταση (Πίνακες 9,10) σύμφωνα με το EDS είναι παρόμοια μεταξύ τους, όπως αναμενόταν και αρκετά κοντά στην τυπική χημική σύσταση του ελαφρά κραματωμένου χάλυβα AISI 1060. (Πίνακας 3). Δηλαδή αποτελείται κατά κύριο λόγο από Si και Mn και σε μικρότερα ποσοστά από Ni, Cr, Mo.

Σχετικά με τα δοκίμια A(1), B(1) και Γ(1) (των αξόνων ΨΖ) και τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2) (των αξόνων XΖ) :

Εν γένει, στα δοκίμια A(1,2), B(1,2) και Γ(1,2) οι περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όσον αφορά τα μικρογραφικά τους χαρακτηριστικά, είναι η περιοχή της επικάλυψης (bead zone-BZ), η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (heat-affected area-HAZ) και η διεπιφάνεια μεταξύ της επικάλυψης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (interface BZ-HAZ). Για αυτό το λόγο και οι περισσότερες μικρογραφίες οπτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης διερευνούν τις παραπάνω περιοχές. Το υπόστρωμα των δοκιμίων είναι το ίδιο με το ανοπτημένο δοκίμιο AISI 1060, κατά συνέπεια ίδιο μικροδομικά. Επίσης, η διεπιφάνεια μεταξύ του υποστρώματος και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης

απαντώνται ακριβώς ίδια μικρογραφικά χαρακτηριστικά και στα άλλα δύο δοκίμια. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τις παραπάνω μικρογραφίες η θερμικά επηρεασμένη ζώνη μπορεί να χωριστεί σε 4 υποπεριοχές : α) την περιοχή ακριβώς από κάτω από τη διεπιφάνεια BZ-HAZ, β) το άνω μέρος της HAZ, γ) το κέντρο της HAZ και δ) το κάτω μέρος της HAZ.

Σχετικά με την επικάλυψη, και στα έξι δοκίμια παρατηρείται μαρτενσιτική μικροδομή, βελονοειδούς μορφολογίας, οι οποίες βελόνες σχηματίζουν δενδριτικές περιοχές. Αναλυτικότερα, σε κάποιες περιοχές της επικάλυψης, σε κάθε ένα από τα δοκίμια, λαμβάνοντας υπόψη τη δενδριτική μορφολογία από τη διεπιφάνεια BZ-HAZ προς το πάνω μέρος της επικάλυψης, διακρίνεται η μετατροπή της μορφολογίας των δενδριτών από δενδρίτες διατεταγμένους σε στήλες (columnar dendrites) σε ισαξονικούς δενδρίτες (equiaxed dendrites) (π.χ. Εικόνα 67). Αυτό το φαινόμενο, το οποίο έχει αναφερθεί και στο υποκεφάλαιο 1.6.4.4, οφείλεται στο συνδυασμό της μεταβολής δύο σημαντικών παραγόντων, την τοπική μεταβολή της θερμοκρασίας με την απόσταση (dt/dx - temperature gradient, G) στη διεπιφάνεια τηγμένης/στερεοποιημένης περιοχής και το ρυθμό στερεοποίησης ή ανάπτυξης των кокком (solidification rate or grain growth rate, R).

Γενικά, κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας BZ-HAZ, κατά τη διάρκεια της τεχνικής laser cladding, βρίσκεται η ζώνη τήξης (molten pool area), όπου ο παράγοντας G είναι ο μέγιστος και ο παράγοντας R, ο ελάχιστος. Για αυτό το λόγο, στο κατώτερο μέρος της επικάλυψης απαντώνται δενδρίτες διατεταγμένοι σε στήλες. Διασχίζοντας, καθοδικά την περιοχή από το κάτω μέρος της τηγμένης ζώνης μέχρι το άνω μέρος της επικάλυψης, ο παράγοντας G μειώνεται και ο παράγοντας R αυξάνεται. Συνεπώς, οι δενδρίτες μετατρέπονται σε ισαξονικούς.

Στο παραπάνω φαινόμενο, σημαντικό ρόλο παίζει και η αναθέρμανση που υφίσταται το πρώτο στρώμα κατά την εναπόθεση του δεύτερου στρώματος, αφού επηρεάζει τους παράγοντες G και R, με αποτέλεσμα την προώθηση της μεταβολής της δενδριτικής μορφολογίας η οποία προκαλείται από την επιρροή του θερμοκρασιακού προφίλ και του ρυθμού απόψυξης. Γι'αυτό, δενδρίτες διατεταγμένοι σε στήλες μπορούν να ανιχνευθούν και σε ορισμένες περιοχές στο κεντρικό τμήμα της επικάλυψης. Οι δενδριτικές μορφολογίες και η ανάπτυξή τους μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή στην οποία σχηματίζονται σε συνάρτηση με τη διεύθυνση του λέιζερ, καθώς οι παράγοντες G και R δεν μεταβάλλονται το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις x,ψ,z, με αποτέλεσμα ο ρυθμός απόψυξης να είναι διαφορετικός και έτσι τα μεγέθη ή/και η μορφολογία των μαρτενσιτικών βελονών να αλλάζουν. Στην προκειμένη περίπτωση, οι μικρογραφίες LOM και SEM δεν κατέστησαν κάτι τέτοιο σαφές, συγκρίνοντας τα δοκίμια που κόπηκαν ως προς τους άξονες ΨΖ και ΧΖ.

Τέλος, σε ορισμένες περιοχές της επικάλυψης, συνήθως κοντά στη διεπιφάνεια, κυρίως στα δοκίμια A(2), B(2), Γ(2), παρατηρείται κατακρήμνιση λεπτοκρυσταλλικών καρβιδίων εντός των μαρτενσιτικών βελονών (Εικόνες 103,122,130,139,147,148). Πιθανόν να πρόκειται για καρβίδια πλούσια σε Cr και Mo (M23C6, M7C3), τα οποία κατάφεραν να κατακρημνιστούν εξαιτίας των πιο αργών ρυθμών απόψυξης μετά την αναθέρμανση του πρώτου στρώματος λόγω της εναπόθεσης του δεύτερου και του ακόμα πιο αργού ρυθμού απόψυξης μετά τη διαδικασία της ανόπτησης που ακολούθησε. Αυτό δικαιολογεί και το γεγονός ότι απαντώνται κυρίως κοντά στη διεπιφάνεια της επικάλυψης με τη HAZ, δηλαδή στο πρώτο στρώμα. Υπάρχει, επιπλέον, και μία ακόμα πιο μικρή πιθανότητα, κάποια από τα λεπτοκρυσταλλικά καρβίδια που παρατηρήθηκαν να είναι καρβίδια Fe₃Cσεμεντίτης, λόγω της ανόπτησης, αν και το Cr και το Mo είναι πολύ πιο ισχυρά καρβιδιογόνα κραματικά στοιχεία, ενώ ο Fe αποτελεί ένα από τα πιο ασθενή, συνεπώς προτιμάται η δέσμευση του άνθρακα από το Cr και το Mo. Βέβαια, για την εξακρίβωση και επιβεβαίωση των προαναφερόμενων ισχυρισμών είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυσή των δοκιμίων μέσω TEM και EBSD.

Επιπροσθέτως, σε μικρογραφίες με μεγαλύτερη μεγέθυνση, διακρίνονται και τα όρια των μητρικών ωστενιτικών κόκκων, εντός των οποίων αναπτύσσονται οι βελόνες του μαρτενσίτη (π.χ. Εικόνα 67). Τέλος, εσωτερικά της επικάλυψης και στα έξι δοκίμια, παρατηρούνται πόροι σφαιρικού σχήματος, μικρής διαμέτρου, οι οποίοι είναι σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι (Εικόνες 59,66,73,79,85,91,103,111,121,129,138,147). Πιο συγκεκριμένα, το κλάσμα όγκου των πόρων, για τα έξι δοκίμια υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος ImageJ, με τη χρήση μικρογραφιών SEM και παρουσίασε παρόμοιες τιμές και στα τρία δοκίμια. Για τα δοκίμια A(1), B(1) και Γ(1) το κλάσμα όγκου κυμαινόταν από 0.43%-0.50% ±0.08 και για τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2), από 0.40%-0.55% ±0.06. Αυτό το φαινόμενο, το οποίο επίσης έχει αναφερθεί σε προηγούμενιο κεφάλαιο (1.6.4.3) ονομάζεται keyholing porosity effect και οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, οι πιο συνηθισμένοι από τους οποίους είναι : η παγίδευση, εντός της επικάλυψης, αδρανούς αερίου (inert gas entrapment), η χρήση υψηλής ισχύος του λέιζερ (high laser power input), η χρήση υψηλής ταχύτητας του λέιζερ (high laser scanning speed), και η επιλογή όχι τόσο κατάλληλων παραμέτρων της πούδρας (π.χ. κατανομή μεγέθους σωματιδίων, σχήμα, πόροι κόκκων) (non-suitable powder properties).

Όσον αφορά τη HAZ, και συγκεκριμένα για την υποπεριοχή ακριβώς κάτω από τη διεπιφάνεια BZ-HAZ, στα δοκίμια A(1), B(1) και Γ(1), παρατηρούνται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, συχνότερα γωνιώδους μορφολογίας, σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου από τον περλίτη που απαντάται, ο οποίος έχει και μικρότερο μέγεθος (*Εικόνες 60,68,74,104,112,122*). Είναι λογικό ο περλίτης να είναι μικρότερος σε μέγεθος και να έχει μικρότερο κλάσμα όγκου, καθώς κοντά στη διεπιφάνεια BZ-HAZ, η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρότερη από αυτή του υποστρώματος λόγω της μεγάλης τάσης διαφορισμού που έχει, συνεπώς και της διάχυσής του προς την επικάλυψη κατά τη διάρκεια της τεχνικής laser cladding.

Στη συνέχεια, στο ανώτερο μέρος της ΗΑΖ, ενώ στο δοκίμιο A(1) (*Εικόνες 61,107*) και Γ(1) (*Εικόνες 75,125*) παρατηρείται αύξηση του μεγέθους και του κλάσματος όγκου του περλίτη και μείωση του κλάσματος όγκου του προευτηκτοειδή φερρίτη, στο B(1) (*Εικόνες 69,115*) απαντώνται λεπτοκρυσταλλικοί κόκκοι προευτηκτοειδή φερρίτη και λεπτοκρυσταλλικός περλίτης (περίπου στα 10μm σε σχέση με τα άλλα δύο). Βέβαια, το δοκίμιο Γ(1) φαίνεται να φέρει λίγο πιο ευμεγέθη μικροδομή από το A(1) (περίπου στα 5μm), στο άνω μέρος της HAZ. Επίσης, μέσω της μικρογραφίας LOM (*Εικόνα 75*), στο άνω μέρος του δοκιμίου Γ(1) παρατηρείται εναλλαγή περιοχών με ευμεγέθης μικροδομή και περιοχών με λεπτοκρυσταλλική μικροδομή. Τέλος, στα δοκίμια B(1) και Γ(1), παρατηρείται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων, πιθανόν πλούσιων σε Cr ή/και Mo, εντός ορισμένων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη (*Εικόνες 115,116,125*). Σύμφωνα με τη μικρογραφία SEM (*Εικόνα 116*), στο δοκίμιο B(1), ανιχνεύεται σφαιροειδούς μορφολογίας σεμεντίτης, καθώς και όρια ανάπτυξης των οποίων η μορφολογία παραπέμπει στο σχηματισμό μπαινίτη.

Στο κέντρο της HAZ, σύμφωνα μόνο με τις μικρογραφίες του οπτικού μικροσκοπίου και στα τρία δοκίμια (*Εικόνες 62,63,70,76*) παρατηρείται ομοιόμορφα λεπτόκοκκη μικροδομή, αποτελούμενη από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, ενώ καθώς η διερεύνηση προχωρά καθοδικά, παρατηρούνται πιο μεγάλοι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μέσα στη λεπτόκοκκη μικροδομή (*Εικόνες 71,77*).

Βέβαια, μέσω των μικρογραφιών μέσω SEM, ενώ στα δοκίμια A(1) (*Εικόνα 108*) και Γ(1) (*Εικόνα 126*) ανιχνεύεται μικροδομή, αποτελούμενη από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, με μικρότερο μέγεθος (διαφορά περίπου στα 3μm για το A(1) και περίπου στα 5μm για το Γ(1)) και παρόμοιο κλάσμα όγκου συγκριτικά με το άνω μέρος της HAZ, αντιστοίχως για το κάθε ένα από τα δύο, στο δοκίμιο B(1) (*Εικόνα 117*) διακρίνεται η ίδια μικροδομή με παρόμοιο κλάσμα όγκου, αλλά μεγαλύτερο μέγεθος (περίπου 5μm) σε σχέση με τη μικροδομή του άνω μέρους της HAZ. Γενικά, δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά ως προς το μέγεθος των μικροδομικών χαρακτηριστικών μεταξύ των τριών δοκιμίων, σχετικά με το κέντρο της HAZ. Πιο συγκεκριμένα, στα δοκίμια B(1) (*Εικόνες 117,118*) και Γ(1) (*Εικόνες 126,127*) παρατηρείται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων εντός ορισμένων κόκκων του προευτηκτοειδή φερρίτη και σε κάποια όρια ανάπτυξης του περλίτη ανιχνεύεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης.

Στη συνέχεια, καθώς η διερεύνηση προχωρά προς τα κάτω και στα τρία δοκίμια, παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, στο εσωτερικό ορισμένων από τους οποίους έχουν κατακρημνιστεί καρβίδια και περλίτης, εντός των ορίων ανάπτυξης του οποίου ανιχνεύεται σεμεντίτης πλήρως σφαιροποιημένος (π.χ. Εικόνα 128). Πιο κάτω, ανιχνεύονται πιο μεγάλοι ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη ενώ η υπόλοιπη μικροδομή είναι παρόμοια με την προαναφερόμενη (π.χ. Εικόνες 119,120). Τέλος, στο κάτω μέρος της HAZ, η μικροδομή θυμίζει αυτή του υποστρώματος, καθώς απαντώνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με μόνη διαφορά ότι ο σεμεντίτης έχει υποστεί πλήρη σφαιροποίηση και είναι πιο μεγεθυμένος (π.χ. Εικόνες 64,72,78,109,110).

Όσον αφορά τη HAZ, και συγκεκριμένα για την υποπεριοχή ακριβώς κάτω από τη διεπιφάνεια BZ-HAZ, στα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2), παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, γωνιώδους ή/και βελονοειδούς μορφολογίας, σε μεγαλύτερο κλάσμα όγκου από τον περλίτη που απαντάται, ο οποίος έχει και μικρότερο μέγεθος (*Εικόνες 80,86,92,129,138,147*). Ιδιαίτερα στο δοκίμιο Γ(2) οι κόκκοι φερρίτη γωνιώδους ή/και βελονοειδούς μορφολογίας απαντώνται συχνά και σε μεγάλο βαθμό (*Εικόνες 92,147*).

Στη συνέχεια, στο ανώτερο μέρος της HAZ, ενώ στο δοκίμιο A(2) (Εικόνες 81,133) και B(2) (Εικόνες 87,142) παρατηρείται μείωση του μεγέθους (περίπου στα 5μm) του περλίτη και του προευτηκτοειδή φερρίτη κατά κύριο λόγο ισαξονικής μορφολογίας, στο Γ(2) (Εικόνες 94,152) απαντώνται ευμεγέθεις κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, γωνιώδους ή/και βελονοειδούς μορφολογίας, και ευμεγέθης περλίτης (κυρίως τα όρια ανάπτυξης του περλίτη παρουσιάζουν διαφορά μεγέθους περίπου 10μm). Επίσης, και στα τρία δοκίμια, παρατηρείται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (πιθανόν Cr ή/και Mo) εντός ορισμένων κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη, καθώς και σε κάποια όρια ανάπτυξης του περλίτη ο σεμεντίτης έχει υποστεί σφαιροποίηση (Εικόνες 133,134,142,152,153). Στην Εικόνα 153 του δοκιμίου Γ(2) ανιχνεύονται επίσης όρια ανάπτυξης των οποίων η μορφολογία μοιάζει με αυτή του περλίτη, αλλά πιθανόν υποδεικνύουν την ύπαρξη μπαινίτη.

Στο κέντρο της HAZ, σύμφωνα με τις μικρογραφίες του οπτικού μικροσκοπίου και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης και στα τρία δοκίμια (Εικόνες 82,88,94, 135,143,154) παρατηρείται μικροδομή, αποτελούμενη από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, με παρόμοιο μέγεθος και ίσως παρόμοιο κλάσμα όγκου συγκριτικά με το άνω μέρος της HAZ, αντιστοίχως για το κάθε ένα. Στο δοκίμιο Γ(2) διακρίνεται η ίδια μικροδομή με παρόμοιο κλάσμα όγκου και μέγεθος με τη μικροδομή του άνω μέρους της HAZ, αλλά μεγαλύτερο μέγεθος, συγκριτικά με των δύο άλλων δοκιμίων (διαφορά περίπου 5 έως 10μm) (Εικόνες 135,143,154). Σύμφωνα με την οπτική μικροσκοπία και εδώ, καθώς η διερεύνηση προχωρά προς τα κάτω, παρατηρούνται πιο μεγάλοι κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη μέσα στη λεπτόκοκκη μικροδομή (Εικόνες 83,89,95). Επίσης, σύμφωνα με το SEM, παρατηρείται ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων εντός αρκετών κόκκων προευτηκτοειδή φερρίτη και σε αρκετά όρια ανάπτυξης του περλίτη ανιχνεύεται σφαιροποιημένος σεμεντίτης (Εικόνες 135,143,154). Τέλος, μπορούν να παρατηρηθούν όρια ανάπτυξης διαφορετικής μορφολογίας οι οποίο θυμίζουν αυτή του περλίτη, αλλά πιθανόν δηλώνουν της ύπαρξη μπαινίτη (Εικόνες 143, 144,154,155).

Στη συνέχεια, καθώς η διερεύνηση προχωρά προς τα κάτω και στα τρία δοκίμια, παρατηρούνται κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη, στο εσωτερικό ορισμένων από τους οποίους έχουν κατακρημνιστεί καρβίδια και περλίτης εντός των ορίων ανάπτυξης του οποίου ανιχνεύεται σεμεντίτης πλήρως σφαιροποιημένος (π.χ. *Εικόνες 136,137*). Πιο κάτω, ανιχνεύονται πιο μεγάλοι ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη ενώ η υπόλοιπη μικροδομή είναι παρόμοια με την προαναφερόμενη (π.χ. *Εικόνα 156*). Τέλος, στο κάτω μέρος της HAZ, η μικροδομή θυμίζει αυτή του υποστρώματος, καθώς απαντώνται ευμεγέθεις ισαξονικοί κόκκοι προευτηκτοειδούς φερρίτη και ευμεγέθης περλίτης, με μόνη διαφορά ότι ο σεμεντίτης έχει υποστεί πλήρη σφαιροποίηση (*Εικόνες 84,90,96,146*).

Βέβαια, για την εξακρίβωση και επιβεβαίωση μικρογραφικών συστατικών, όπως οι διάφορες νάνο-κρυσταλλικές κατακρημνίσεις καρβιδίων και η πιθανή ύπαρξη μπαινιτικού σχηματισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυσή των δοκιμίων μέσω ΤΕΜ και EBSD.

Λαμβάνοντας υπόψη τις γενικευμένες στοιχειακές αναλύσεις των επικαλύψεων δοκιμίων (Πίνακες 11,13,15,17,19,21) γίνεται φανερό ότι οι περιεκτικότητες των επικαλύψεων των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2) είναι πιο πλούσιες σε χρώμιο από αυτές των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1), γεγονός το οποίο και αυτό επιβεβαιώνει ότι τα διαχυσιακά φαινόμενα μεταβάλλονται διαφορετικά ανάλογα με τους άξονες που κινήθηκε η δέσμη του λέιζερ. Επίσης, γενικά, οι περιεκτικότητες σε χρώμιο και των έξι δοκιμίων παρουσιάζουν μικρότερα ποσά, κατά 1% με 2% σε σχέση με τις προδιαγραμμένες, βάση μαθηματικών υπολογισμών, σύμφωνα με την ανάμειξη των δύο πουδρών. Αυτό, πιθανόν, οφείλεται σε κάποιον ή κάποιους από τους πολυάριθμους παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνική laser cladding και έχουν αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαιο (1.6.4) (π.χ. υψηλή ταχύτητα κίνησης δέσμης του λέιζερ, εξάτμιση μέρους των κραματικών στοιχείων λόγω υψηλής ισχύος, αποφυγή τήξης των λεπτοκρυσταλλικών κόκκων της πούδρας διότι δεν κατάφεραν να φτάσουν στην περιοχή δράσης του λέιζερ, κ.α.).

Επιπροσθέτως, μέσω της τοπικής στοιχειακής ανάλυσης κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας BZ-HAZ και των έξι δοκιμίων (*Εικόνες 105,113,123,131,140,149*) παρατηρείται ότι το ποσοστό διαλυτοποίησης της επικάλυψης εντός του υποστρώματος είναι αρκετά μικρό, καθώς ανιχνεύονται πολύ μικρές ή συνήθως μηδενικές περιεκτικότητες σε χρώμιο στο κάτω μέρος της διεπιφάνειας (*Πίνακες 12,14,16,18,20,22*). Επίσης, παρατηρείται μείωση της περιεκτικότητας σε χρώμιο, ήδη στο άνω μέρος τη διεπιφάνειας από την πλευρά της επικάλυψης (*Πίνακες 12,14,16,18,20,22*). Οι παραπάνω τοπικές στοιχειακές αναλύσεις επιβεβαιώνονται και από τις γραμμικές στοιχειακές αναλύσεις που ακολούθησαν για κάθε δοκίμιο (*Εικόνες 106,114,124,132,141,150*) οι οποίες έδειξαν τη σημαντική μείωση που υφίσταται η περιεκτικότητα σε χρώμιο κάθετα στην περιοχή της διεπιφάνειας της επικάλυψης μέχρι το άνω μέρος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Επιπροσθέτως, σημειώθηκε η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα και η μείωση της περιεκτικότητας σε μαγγάνιο, κατά μήκος της προαναφερόμενης διεύθυνσης. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα (που ποιοτικά προκύπτει από το φάσμα EDS) αποτελεί αναμενόμενο αποτέλεσμα, διότι πλησιάζει την αρχική περιεκτικότητα σε άνθρακα που έχει το υπόστρωμα. Βέβαια, αναμένεται, επίσης, η περιεκτικότητα σε άνθρακα κοντά στη διεπιφάνεια να είναι μικρότερη από αυτή του υποστρώματος λόγω της μερικής διάχυσής του προς την επικάλυψη. Επιπλέον, η μείωση του μαγγανίου κοντά στη διεπιφάνεια, δεδομένου ότι το υπόστρωμα έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Mn από την επικάλυψη, επιβεβαιώνει ότι παρά τη μικρή τάση διαφορισμού που έχει, υφίσταται μερική διάχυση προς την επικάλυψη λόγω της εφαρμογής των υψηλών θερμοκρασιών.

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1.6.4, στην τεχνική laser cladding γίνονται επιθυμητά τα μικρά ποσοστά διαλυτοποίησης, ώστε τα κραματικά στοιχεία του μετάλλου βάσης να μην αναμιγνύονται σε μεγάλο βαθμό με το υλικό της επικάλυψης για να μην επηρεαστούν οι μηχανικές ιδιότητες της κάθε περιοχής. Για την επίτευξη επιτυχούς ποσοστού διαλυτοποίησης παίζει σημαντικό ρόλο η εφαρμοζόμενη ειδική ενέργεια, η οποία στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς συνδυάζεται ναι μεν υψηλή ισχύς του λέιζερ, αλλά με υψηλή ταχύτητα και μικρή διάμετρο δέσμης.

<u>Σύγκριση δοκιμίων A(1),B(1), Γ (1) με A(2),B(2), Γ (2), σχετικά με την επικάλυψη :</u>

Γενικά, το πάχος της επικάλυψης κατά μέσο όρο σε όλα τα δοκίμια ισούται με 1.2mm. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ τους είναι ότι τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2) εμφανίζουν περισσότερες περιοχές εντός της επικάλυψης, όπου παρατηρούνται κατακρημνίσεις καρβιδίων στο εσωτερικό, είτε περικρυσταλλικά των μαρτενσιτικών βελονών. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα καρβίδια αυτά πιθανόν να είναι πλούσια σε Cr ή/και Mo. Για την εξακρίβωση και επιβεβαίωση τους είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυσή των δοκιμίων μέσω TEM και EBSD.

Σύγκριση δοκιμίων A(1),B(1),Γ(1) με A(2),B(2),Γ(2), σχετικά με τη θερμικά επηρεασμένη ζώνη :

Το πάχος της HAZ κατά μέσο όρο σε όλα τα δοκίμια ισούται με 3mm, δηλαδή καταλαμβάνει το 1/3 του αρχικού πάχους τους (9.06mm). Αυτό οφείλεται στην απορρόφηση υψηλής θερμικής ενέργειας από το υπόστρωμα και μπορεί να εξηγηθεί

από το συνδυασμό κάποιων παραμέτρων, δηλαδή, τη μεγάλη ισχύ του λέιζερ, τη διάμετρο της δέσμης του λέιζερ και το, περίπου, 50% ποσοστό αλληλοεπικάλυψης των αποτιθέμενων ημιελλειπτικών κοιλοτήτων (beads), σε συνδυασμό, όμως, με το μικρό πάχος του υποστρώματος. Οι πιο σημαντικές διαφορές οι οποίες σημειώνονται μεταξύ των παραπάνω δοκιμίων είναι ότι στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2), ανιχνεύονται σε μεγαλύτερο βαθμό και σε μεγαλύτερη έκταση τα ακόλουθα μικρογραφικά χαρακτηριστικά: φερριτικοί κόκκοι με γωνιώδη ή/και βελονοειδή μορφολογία, η ενδοκρυσταλλική κατακρήμνιση καρβιδίων (πιθανόν πλούσια σε Cr ή/και Mo) στο εσωτερικό των φερριτικών κόκκων και καρβίδια σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός του περλίτη. Επίσης, κατά κύριο λόγο, σχεδόν μόνο στα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2) ανιχνεύεται πιθανός μπαινιτικός σχηματισμός. Επιπροσθέτως, κυρίως στα δοκίμια που έχει αυξηθεί η προσθήκη της αναλογίας της πούδρας, πλούσιας σε Cr, 410L (Β και Γ) ανιχνεύονται πιο ευδιάκριτα και σε μεγαλύτερο βαθμό τα λεπτοκρυσταλλικά κατακρημνίσματα καρβιδίων. Βέβαια, για την εξακρίβωση και επιβεβαίωση όλων των παραπάνω είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυσή των δοκιμίων μέσω TEM και EBSD. Επίσης, η μικροδομή των δοκιμίων A(2) και B(2) παρατηρείται πιο λεπτόκκοκη από τη μικροδομή των δοκιμίων A(1) και B(1). Εξαίρεση αποτελεί το δοκίμιο Γ, όπου παρατηρείται το αντίστροφο φαινόμενο.

Γενικά, τα διαχυσιακά φαινόμενα από τα οποία προκύπτει η μικροδομή, καθορίζονται από τις διαστάσεις του δοκιμίου, το θερμοκρασιακό προφίλ, το ρυθμό απόψυξης, τα περιεχόμενα κραματικά στοιχεία, άρα και από τους παράγοντες της τοπικής μεταβολή της θερμοκρασίας με την απόσταση (dt/dx - temperature gradient, G) στη διεπιφάνεια τηγμένης/στερεοποιημένης περιοχής και του ρυθμού στερεοποίησης ή ανάπτυξης των κόκκων (solidification rate or grain growth rate, R) σε συνδυασμό και με τη διεύθυνση της στερεοποίησης των κόκκων σε σχέση με τη διεύθυνση κίνησης του λέιζερ. Όλα τα παραπάνω εξηγούν τις διαφορές μεταξύ των δοκιμίων A(1), B(1), Γ(1) και A(2), B(2), Γ(2), καθώς σε διαφορετικό σύστημα αξόνων, οι συνθήκες θερμοκρασίας και απόψυξής θα είναι διαφορετικοί, με αποτέλεσμα να κατακρημνιστούν και να αναπτυχθούν είτε ίδιες φάσεις σε διαφορετικό κλάσμα όγκου ή/και σε διαφορετικά μεγέθη (π.χ. πιο απότομος ρυθμός απόψυξης να οδηγήσει σε γωνιώδεις ή/και βελονοειδείς φερρίτες και καρβίδια μεγαλύτερου κλάσματος όγκου στα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2)), είτε ακόμα και διαφορετικές φάσεις (π.χ. η πιθανή ύπαρξη μπαινίτη στα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2))).

Στο συνδυασμό όλων των παραπάνω παραγόντων οφείλεται και η διαβάθμιση του μεγέθους των κόκκων στη ΗΑΖ. Συνήθως στα περισσότερα δοκίμια οι κόκκοι του προευτηκτοειδούς φερρίτη και ο περλίτης είναι πιο μεγάλοι σε μέγεθος κοντά στη διεπιφάνεια BZ-HAZ και στο κατώτερο μέρος της HAZ σε σύγκριση με το κέντρο της, ως αποτέλεσμα του θερμοκρασιακού προφίλ, των αναθερμάνσεων και των πιο αργών ρυθμών απόψυξης. Για παράδειγμα στο κατώτερο μέρος της ΗΑΖ το θερμοκρασιακό προφίλ μέσα από τις θερμικές κατεργασίες για την απόθεση των στρωμάτων παραμένει σε χαμηλά εύρη με αργους ρυθμούς απόψυξης και το μέγεθος των κόκκων δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Κοντά στη διεπιφάνεια της HAZ το μέγεθος των κόκκων οφείλεται στην αναθέρμανσή τους κατά την απόθεση του δεύτερου στρώματος σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά με αργότερο ρυθμό απόψυξης. Αντίθετα στο κέντρο μπορεί οι κόκκοι να υφίστανται κατά την απόθεση του δεύτερου στρώματος πιο αργές συνθήκες απόψυξης αλλά έχουν θερμανθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Στα παραπάνω φαινόμενα βοηθά στην πορεία και το στάδιο της ανόπτησης με την αργή απόψυξη εντός του φούρνου. Για αυτό το λόγο κιόλας δεν αποκλείεται, εάν είχε υλοποιηθεί μόνο η απόθεση ενός στρώματος το μέγεθος των κόκκων της HAZ να ήταν πιο μικρό και ομοιόμορφο στο μεγαλύτερο μέρος της.

Επιπλέον, η σφαιροποίηση του σεμεντίτη λαμβάνει χώρα στο θερμοκρασιακό εύρος των 600°C με 700°C, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφασική ενέργεια μεταξύ φερρίτη και σεμεντίτη. Συνεπώς, οι σφαιροποιημένοι σεμεντίτες μπορούν να δώσουν μια εικόνα για το θερμοκρασιακό προφίλ σε εκείνη ή εκείνες τις περιοχές του δοκιμίου που έχουν ανιχνευτεί. Βέβαια το θερμοκρασιακό εύρος της σφαιροποίησης του σεμεντίτη μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την αύξηση ή μείωση των κραματικών προσθηκών. Για παράδειγμα με την αύξηση της περιεκτικότητας σε χρώμιο, το οποίο αποτελεί και α-φερρογόνο, αφού περιορίζεται ο ωστενιτικός βρόγχος και προωθείται η φερριτική δομή, οι καμπύλες A₁ και A₃ του μετασταθούς διαγράμματος Fe-Fe₃C ανεβαίνουν πιο πάνω, σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συνεπώς και η σφαιροποίηση του σεμεντίτη θα πραγματοποιηθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, σε συνδυασμό φυσικά με το γεγονός ότι το δοκίμιο επαναθερμαίνεται μετα το πέρας του πρώτου στρώματος, ώστε να επικαλυφθεί το δεύτερο. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εξηγείται ότι : α) στις χαμηλές περιοχές της HAZ,

218

τα εναλλασσόμενα πλακίδια φερρίτη και σεμεντίτη του υποστρώματος, κατά τη θέρμανσή του για την απόθεση του πρώτου στρώματος, μετατρέπονται σε φερριτικούς κόκκους με σφαιροποιημένους σεμεντίτες, β) στις υψηλότερες περιοχές της HAZ οι σφαιροποιημένοι σεμεντίτες προέρχονται από τη δεύτερη θέρμανση του δοκιμίου για την απόθεση του δεύτερου στρώματος, γ) οι σφαιροποιημένοι σεμεντίτες της κάτω περιοχής της HAZ είναι πιο παχυμένοι από αυτούς των πιο πάνω περιοχών, μετά την αναθέρμανσή τους λόγω της απόθεσης του δεύτερου στρώματος, δ) όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χρώμιο απαντώνται σφαιροποιημένοι σεμεντίτες σε περιοχές της HAZ πιο ψηλά, αλλά πιθανόν είναι και πιο λεπτοκρυσταλλικοί, σε αντίθεση με τις κάτω περιοχές της HAZ, όπου απαντώνται πιο παχυμένοι.

Ακόμη, σε κανένα από τα παραπάνω δοκίμια δεν παρατηρούνται σημάδια ανεπαρκούς διαλυτοποίησης, έντονα φαινόμενα μικροδιαφορισμού των κραματικών στοιχείων (π.χ. πλήρως απεμπλουτισμένες περιοχές) και ενδείξεις για έναρξη και ανάπτυξη ρωγμών. Βάση των αναλύσεων με EDS, επιβεβαιώνεται σε όλα τα δοκίμια και στα δύο συστήματα αξόνων ΨΖ και ΧΖ επιτυχές ποσοστό διαλυτοποίησης, καθώς στη διεπιφάνεια BZ-HAZ παρατηρούνται αρκετά μικρά ή μηδενικά ποσοστά σε χρώμιο και στην περιοχή της HAZ κοντά στη διεπιφάνεια αύξηση του άνθρακα και ελάχιστη μείωση του μαγγανίου.

Επιπροσθέτως, σχετικά με τους φερριτικούς κόκκους που απαντώνται κυρίως κοντά στη διεπιφάνεια της HAZ και έχουν διαφορετική μορφολογία, γωνιώδη ή βελονοειδή, θα μπορούσαν να είναι είτε κόκκοι acicular ferrite, είτε κόκκοι Widmanstätten ferrite, αντιστοίχως. Ενώ ο Widmanstätten ferrite, ευνοείται με ταχεία απόψυξη από αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης καθώς και από την παρουσία ορισμένων κραματικών προσμίζεων (π.χ. Mn) [10], ο acicular ferrite σχηματίζεται σε χαμηλότερο θερμοκρασιακό εύρος, μετά από πιο αργούς ρυθμούς απόψυξης, συνήθως ενδοκρυσταλλικά εντός των μητρικών ωστενιτικών κόκκων και προωθείται από την ύπαρξη μη μεταλλικών εγκλεισμάτων (π.χ. καρβίδια ή νιτρίδια τιτανίου) και από περιεκτικότητες μαγγανίου 0.6-1.8% wt [105-106]. Συγκεκριμένα γίνεται λόγος ότι η κατακρήμνιση μεγάλου κλάσματος όγκου acicular ferrite πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες κάτω των 500 °C και με ρυθμό απόψυξης μεταξύ του 1°C/s και των 10°C/s [105]. Επίσης οι Farrar και Harrison αναφέρουν ότι σε συγκολλήσεις με ενδιάμεσους ρυθμούς απόψυξης, για παράδειγμα 15°C/s από τους
800°C έως τους 500°C, παρατηρήθηκε μεγεθυμένος acicular ferrite [106]. Τέλος, οι Bhadeshia και Honeycombe [107] αναφέρουν ότι ο acicular ferrite δε μπορεί να σχηματιστεί σε θερμοκρασίες πάνω από αυτή που σηματοδοτεί την έναρξη σχηματισμού του μπαινίτη και ότι δεν αναπτύσσεται διαχυσιακά αλλά μέσω του υπερκορεσμού του σε άνθρακα. Ο υπολειπόμενος άνθρακας διαχέεται στον παραμένοντα ωστενίτη. Λαμβάνοντας υπόψη, όλα τα παραπάνω και δεδομένου, ότι ο φερρίτης που ανιχνεύεται είναι κατακρημνισμένος περικρυσταλλικά, χωρίς να ανιχνεύονται τριγύρω μη μεταλλικά εγκλείσματα ή παραμένων ωστενίτης σε συνδυασμό με ότι η τεχνική laser cladding συνεπάγεται πολύ γρήγορους ρυθμούς απόψυξης, παρά την αναθέρμανση του υλικού λόγω της απόθεσης του δεύτερου στρώματος, ο φερρίτης είναι, λογικά, τύπου Widmanstätten.

4.2 Αποτελέσματα XRD

Στην Εικόνα 157 παρατίθενται, συγκριτικά, τα διαγράμματα XRD του as-received υποστρώματος AISI 1060 και του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060. Αναλυτικότερα, ταυτοποιήθηκε η μικρογραφική φάση του φερρίτη, είτε κάνουμε λόγο για προευτηκτοειδή φερρίτη, είτε για ευτηκτοειδή φερρίτη, καθώς και οι δύο τύποι φερρίτη χαρακτηρίζονται από χωροκεντρωμένο κυβικό κρυσταλλογραφικό σύστημα (bcc), οπότε ανιχνεύονται οι ίδιες κορυφές και δεν υπάρχει δυνατότητα διαχωρισμού. Επίσης, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά, σχετικά με τα διαγράμματα XRD, μεταξύ του as-received υποστρώματος και του μη ανοπτημένου, αποτέλεσμα αναμενόμενο, καθώς έχουν την ίδια μικροδομή.

Στην Εικόνα 158 παρατίθενται, συγκριτικά, τα διαγράμματα XRD του ανοπτημένου υποστρώματος AISI 1060 και της επικάλυψης των δοκιμίων A(50:50), B(80:20) και Γ(90:10). Ανιχνεύονται, σχεδόν, ίδιες κορυφές μεταξύ των 3 δοκιμίων και του ανοπτημένου υποστρώματος, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει, την ύπαρξη μίας άλλης φάσης με παρόμοιο κρυσταλλογραφικό σύστημα με το χωροκεντρωμένο κυβικό της φερριτικής φάσης. Μία τέτοια φάση, η οποία επιβεβαιώνει και την ύπαρξη της στις μικρογραφίες της οπτικής μικροσκοπίας και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, είναι ο μαρτενσίτης (α'). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω στο κεφάλαιο 1.3, ο μαρτενσίτης προκύπτει από διατμησιακό φαινόμενο του πλέγματος του ωστενίτη και διαστολή του όγκου του, με αποτέλεσμα να αποκτά κρυσταλλογραφική

δομή παρόμοια με του φερρίτη. Συνεπώς, κρυσταλλώνεται είτε στο χωροκεντρωμένο κυβικό κρυσταλλογραφικό σύστημα (bcc), είτε στο χωροκεντρωμένο τετραγωνικό κρυσταλλογραφικό σύστημα (bct).

Συγκεκριμένα, αξίζει να σημειωθεί ότι οι κορυφές των 3 δοκιμίων είναι ελαφρώς μετατοπισμένες σε σχέση με αυτές του ανοπτημένου υποστρώματος, στοιχείο το οποίο δείχνει την ύπαρξη της τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη. Σε περίπτωση παραπλήσιων κρυσταλλογραφικών συστημάτων και συνεπώς παρόμοιων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων και εν τέλει παρόμοιων ανιχνεύσιμων κορυφών, η δοκιμή XRD δε μπορεί να προβεί στον ξεκάθαρο διαχωρισμό τους.

Τέλος, από τα διαγράμματα XRD δεν ανιχνεύτηκε κάποια άλλη φάση (π.χ. καρβίδια M₂₃C₆), διότι τα κατακρημνισμένα καρβίδια βρίσκονται σε πολύ μικρά κλάσματα όγκου και συνήθως έχουν σύνθετες κυβικές κρυσταλλικές δομές.

4.3 Αποτελέσματα Σκληρομετρήσεων κατά Vickers

4.3.1 Μακροσκληρότητες κατά Vickers

Η τιμή της σκληρότητας του as-received υποστρώματος (186.71 HV \pm 2.32) και του ανοπτημένου υποστρώματος (185.04 HV \pm 3.74) δείχνει ότι η διαδικασία της ανόπτησης δεν έχει επηρεάσει την σκληρότητα του, καθώς η διαφορά τους είναι αμελητέα (*Εικόνα 159*). Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μικρογραφίες της οπτικής μικροσκοπίας και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης, όπου δεν παρατηρείται κάποια διαφορά σχετικά με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής τους.

Στην Εικόνα 160 παρουσιάζονται οι τιμές σκληροτήτων των περιοχών της επικάλυψης (BZ), της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ) και του υποστρώματος (SUB), για κάθε ένα από τα δοκίμια A(1), B(1) και Γ (1). Το δοκίμιο B(1) ξεχωρίζει με την υψηλότερη τιμή σκληρότητας, σχετικά με τη BZ (426.36 HV ± 9.80), αν και η HAZ του έχει μικρότερη τιμή σκληρότητας (203.34 HV ± 10.09), με ελάχιστη διαφορά, από αυτή της HAZ του δοκιμίου A(1) (205.39 HV ± 10.73). Οι τιμές των σκληροτήτων του υποστρώματος και των τριών δοκιμίων είναι παρόμοιες, στοιχείο το οποίο δείχνει ότι δεν επηρεάστηκε θερμικά κατά τη διάρκεια του laser cladding. Εν γένει, η συμπεριφορά των δοκιμίων ως προς τη σκληρότητα, φαίνεται να είναι

παρόμοια, συγκρίνοντας, αντίστοιχα, τις τρεις περιοχές, εξαιρώντας μόνο την επικάλυψη του δοκιμίου A(1) η οποία σημειώνει τη χαμηλότερη τιμή σκληρότητας (394.00 HV ± 9.19).

Αυτή η διαφορά των 30 HV, κατά μέσο όρο, πιθανόν, οφείλεται σε ένα συνδυασμό παραγόντων, σχετικά με τα διαχυσιακά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του laser cladding, τα οποία καθορίζονται από το θερμοκρασιακό προφίλ και τις διαφορές στη χημική σύσταση. Πιο συγκεκριμένα, ο συνδυασμός μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα και υψηλότερης σε χρώμιο μεταβάλλει τις θερμοκρασίες Ms and Mf πιο ψηλά. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη ότι το χρώμιο είναι ένα ισχυρά καρβιδιογόνο κραματικό στοιχείο και ότι οι συνθήκες αναθέρμανσης και οι θερμικές συνθήκες που επικρατούν, κατά τη διάρκεια της απόθεσης του δεύτερου στρώματος και της ανόπτησης αντίστοιχα, ιδιαίτερα στις περιοχές αλληλοεπικάλυψης των αποτιθέμενων στρωμάτων (bead's overlapping areas), μπορούν, δυνητικά, να οδηγήσουν στην κατακρήμνιση λεπτότερων μαρτενσιτικών βελονών και λεπτοκρυσταλλικών καρβιδίων πλούσια σε χρώμιο, αυξάνοντας έτσι την τιμή της σκληρότητας. Επιπροσθέτως, τα, πλούσια σε Cr, καρβίδια θα λειτουργήσουν, καθηλώνοντας το νάνο-κατακρημνισμένο σεμεντίτη που είναι βέβαια λιγότερο πιθανό να σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια της αναθέρμανσης και αργής απόψυξης του πρώτου στρώματος, λόγω της απόθεσης του δεύτερου στρώματος και της ανόπτησης, αποτρέποντας έτσι την πάχυνσή του [15],[107-108]. Συνεπώς, εάν έχει κατακρημνιστεί ο σεμεντίτης, θα παραμείνει λεπτοκρυσταλλικός, βελτιώνοντας και αυτός με τη σειρά του την τιμή της σκληρότητας. Βέβαια, μέσω του SEM, δεν ήταν εμφανή όλα τα παραπάνω μικροδομικά χαρακτηριστικά, καθώς το μέγεθος των βελονών δεν παρουσίασε ιδιαίτερη διαφορά ανά τα δοκίμια και τα κατακρημνίσματα είναι τόσο λεπτοκρυσταλλικά και δυσδιάκριτα που χρειάζονται περαιτέρω ανάλυση μέσω ΤΕΜ για να ανιχνευτούν. Επιπλέον, η διαφορά στη σκληρότητα, σε συνδυασμό με τις παραπάνω αιτιολογήσεις, οφείλεται στην πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο, μέρος του οποίου δεσμεύει τον άνθρακα για το σχηματισμό καρβιδίων, αλλά υπάρχει και ένα ποσοστό που θα παραμείνει διαθέσιμο και θα διαλυτοποιηθεί στη μητρική φάση, προκαλώντας σκλήρυνση μέσω δημιουργίας στερεού διαλύματος αντικατάστασης με το σίδηρο. Βέβαια είναι γνωστό ότι ο άνθρακας είναι αυτό το κραματικό στοιχείο το οποίο κατά κύριο λόγο συμβάλει στην σκλήρωση ενός χάλυβα και στην προκειμένη περίπτωση η περιεκτικότητα σε άνθρακα μειώνεται από δοκίμιο

σε δοκίμιο. Όμως συγκριτικά, η διαφορά ως προς την περιεκτικότητα σε άνθρακα σε κάθε δοκίμιο είναι πολύ μικρότερη από τις μεγάλες διαφορές που ανιχνεύονται, μεταξύ των δοκιμίων, ως προς την περιεκτικότητά τους σε χρώμιο. Τέλος, η αύξηση της περιεκτικότητας σε Cr, μεταξύ των δοκιμίων, συγκρίνοντας το δοκίμιο A(1) με τα δοκίμια B(1) και Γ(1), σε συνδυασμό με την ανόπτηση στους 560°C για 1 ώρα, την οποία ακολούθησε απόψυξη στο φούρνο, πιθανόν να οδήγησε σε φαινόμενα δευτερογενούς σκλήρωσης, τα οποία να δικαιολογούν τη διαφορά των 30HV.

Στην Εικόνα 161 παρουσιάζονται οι τιμές σκληροτήτων των περιοχών της επικάλυψης (BZ), της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ) και του υποστρώματος (SUB), για κάθε ένα από τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ (2). Το δοκίμιο B(2) ξεχωρίζει με την υψηλότερη τιμή σκληρότητας, σχετικά με τη BZ (423.94 HV ± 9.86), και τη HAZ (215.06 HV ± 11.62). Οι τιμές των σκληροτήτων του υποστρώματος και των τριών δοκιμίων είναι παρόμοιες, στοιχείο το οποίο δείχνει ότι δεν επηρεάστηκε θερμικά κατά τη διάρκεια του laser cladding. Εν γένει, η συμπεριφορά των δοκιμίων ως προς τη σκληρότητα, φαίνεται να είναι παρόμοια, συγκρίνοντας, αντίστοιχα, τις τρεις περιοχές, εξαιρώντας μόνο την επικάλυψη του δοκιμίου A(2) η οποία σημειώνει τη χαμηλότερη τιμή σκληρότητας (399.00 HV ± 5.73). Αυτή η διαφορά κατά μέσο όρο των 21 HV πιθανόν να οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τις τιμές των σκληροτήτων των περιοχών των δοκιμίων A(1), B(1) και Γ(1) με τις αντίστοιχες των δοκιμίων A(2), B(2) και Γ(2), φαίνεται ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές. Ίσως, η μόνη μικρή διαφορά που να αξίζει να αναφερθεί είναι οι, κατά 13-15 HV, μεγαλύτερες τιμές σκληροτήτων της HAZ των δοκιμίων B(2) και Γ(2) σε σχέση με αυτές της HAZ των δοκιμίων B(1) και Γ(1), αποτέλεσμα το οποίο πιθανόν να οφείλεται στην ύπαρξη μεγαλύτερου κλάσματος όγκου φερρίτη γωνιώδους ή/και βελονοειδούς μορφολογίας, στην κατακρήμνιση λεπτοκρυσταλλικών καρβιδίων σε μεγαλύτερη έκταση, καθώς και πιθανού μπαινιτικού σχηματισμού που ανιχνεύθηκαν στα πρώτα δύο δοκίμια μέσω SEM. Βέβαια, ιδιαίτερα για την επιβεβαίωση των παραπάνω ισχυρισμών θα χρειαστεί και περαιτέρω ανάλυση των δοκιμίων μέσω TEM και EBSD.

Συνοψίζοντας, οι διαφορές στις τιμές των μακροσκληροτήτων μεταξύ των αντίστοιχων ζωνών των δοκιμίων A(1,2), B(1,2), Γ(1,2) (ιδιαίτερα για το B και Γ) που αναφέρθηκαν παραπάνω και για τις οποίες δόθηκαν κάποιες εξηγήσεις, λαμβάνοντας υπόψη και το σφάλμα, είναι μικρές. Αυτή είναι μία παρατήρηση η οποία οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι παρά την επιλογή διαφορετικής ανάμιξης των πουδρών (AISI 410L και AISI 4140) η συμπεριφορά των δοκιμίων ως προς τη σκληρότητα είναι παρόμοια, χωρίς ιδιαίτερα μεγάλες διαφοροποιήσεις.

4.3.2 Μικροσκληρότητες κατά Vickers

Αρχικά, στην Εικόνα 162, παρουσιάζονται συγκριτικά οι τιμές μικροσκληρότητας των δύο πουδρών, AISI 410L και AISI 4140, που αναμείχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ως υλικό επικάλυψης με την τεχνική laser cladding. Η τιμή της σκληρότητας της πούδρας AISI 4140 σημειώνεται αρκετά υψηλότερη, αποτέλεσμα λογικό λόγω της μαρτενσιτικής δομής της σε σχέση με τη φερριτική δομή των κόκκων της πούδρας AISI 410L, όπως επιβεβαιώθηκαν και από τις μικρογραφίες της οπτικής μικροσκοπίας και της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης.

Στην *Εικόνα 163* παρουσιάζεται το προφίλ των μικροσκληροτήτων, σχετικά με τις περιοχές της επικάλυψης (BZ), της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ) και του υποστρώματος (SUB) σε συνάρτηση με το βήμα που διανύθηκε από το άνω μέρος του δοκιμίου (άνω μέρος επικάλυψης) μέχρι το κάτω μέρος του υποστρώματος, για κάθε ένα από τα δοκίμια A(1), B(1) και Γ(1) και στην *Εικόνα 164* παρατίθενται πιο συγκεντρωτικά οι τιμές των μικροσκληροτήτων για την κάθε περιοχή των δοκιμίων αυτών. Το δοκίμιο B(1) φαίνεται να έχει την υψηλότερη τιμή σκληρότητας, σχετικά με τη BZ (450.42 HV ± 6.33) και όσον αφορά τη HAZ να έχει σχεδόν ίση τιμή σκληρότητας (219.71 HV ± 5.86), με αυτή της HAZ του δοκιμίου Γ(1) (220.34 HV ± 5.60). Οι τιμές των μικροσκληροτήτων του υποστρώματος και των τριών δοκιμίων είναι και εδώ παρόμοιες. Οι μόνες σημαντικές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των τριών δοκιμίων, είναι στο δοκίμιο A(1) του οποίου η BZ (415.53 HV ± 4.50) και η HAZ (208.21 HV ± 11.54) σημειώνουν τις μικρότερες τιμές μικροσκληροτήτων.

Η διαφορά, κατά μέσο όρο των 30 HV, που παρατηρείται στη BZ του A(1) σε σχέση με τα άλλα δύο δοκίμια λογικά οφείλεται στους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, σχετικά με την πιθανή κατακρήμνιση λεπτότερων μαρτενσιτικών βελονών και λεπτοκρυσταλλικών καρβιδίων πλούσια σε χρώμιο, αυξάνοντας έτσι την τιμή της σκληρότητας. Επίσης, η μικρή διαφορά των 12 HV που παρατηρείται στη HAZ του A(1) σε σχέση με τα άλλα δύο δοκίμια, πιθανόν να οφείλεται στην κατακρήμνιση σφαιροποιημένου σεμεντίτη σε μεγαλύτερο μέρος της HAZ στα δοκίμια B(1) και Γ(1), καθώς και σε λεπτοκρυσταλλικά κατακρημνίσματα καρβιδίων που ανιχνεύθηκαν εντός κόκκων φερρίτη κυρίως στα δύο τελευταία δοκίμια.

Εν γένει, τα τρία δοκίμια, ως προς τις μικροσκληρότητες, ακολουθούν σχεδόν ίδιο μοτίβο με τις τιμές των μακροσκληρότητών τους. Φυσικά και είναι λογικό να σημειώνονται υψηλότερες τιμές στις μικροσκληρομετρήσεις, καθώς η ακίδα του διεισδυτή στοχεύει στη μικροκλίμακα, σε συγκεκριμένους κόκκους και κατακρημνίσματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν οι μεγαλύτερες τιμές των μικροσκληρομετρήσεων του υποστρώματος από τις τιμές των μακροσκληρομετρήσεων, λόγω του μεγάλου κλάσματος όγκου του περλίτη στο χάλυβα AISI 1060.

Στην Εικόνα 165 παρουσιάζεται το προφίλ των μικροσκληροτήτων, σχετικά με τις περιοχές της επικάλυψης (BZ), της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ) και του υποστρώματος (SUB) σε συνάρτηση με το βήμα που διανύθηκε από το άνω μέρος του δοκιμίου (άνω μέρος επικάλυψης) μέχρι το κάτω μέρος του υποστρώματος, για κάθε ένα από τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2) και στην Εικόνα 166 παρατίθενται πιο συγκεντρωτικά οι τιμές των μικροσκληροτήτων για την κάθε περιοχή των δοκιμίων αυτών.

Το δοκίμιο B(2) φαίνεται να έχει την υψηλότερη τιμή σκληρότητας, σχετικά με τη BZ (510.48 HV \pm 15.86), και τη HAZ (239.16 HV \pm 22.15). Οι τιμές των μικροσκληροτήτων του υποστρώματος και των τριών δοκιμίων είναι και εδώ παρόμοιες. Παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών δοκιμίων, σχετικά με την τιμή της μικροσκληρότητας της BZ, καθώς η τιμή της στο δοκίμιο B(2) φαίνεται να ξεπερνά κατά μέσο όρο 67 HV αυτή του δοκιμίου A(2) (442.53 HV \pm 12.91) και κατά 40 HV αυτή του δοκιμίου Γ(2) (468.86 HV \pm 12.77). Η διαφορά μεταξύ των τιμών των μικροσκληρομετρήσεων του δοκιμίου A(2) και των άλλων δύο, σχετικά με τη ΒΖ, πιθανόν οφείλεται στο συνδυασμό των παραγόντων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Όμως η μεγάλη διαφορά (40 HV) πλέον μεταξύ της τιμής της μικροσκληρότητας της BZ του δοκιμίου B(2) από αυτή του δοκιμίου Γ(2), παρόλο που το τελευταίο έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χρώμιο αλλά και μικρότερη σε άνθρακα, ίσως δείχνει ότι υπάρχει ένας βέλτιστος συνδυασμός των περιεκτικοτήτων αυτών των δύο κραματικών στοιχείων για την επίτευξη υψηλότερης τιμής σκληρότητας, ο οποίος να εφαρμόζεται επιτυχώς στο δοκίμιο B(2).

Επίσης σημειώνεται και μια λιγότερο αισθητή διαφορά, σχετικά με την τιμή της μικροσκληρότητας της HAZ του δοκιμίου A(2) (224.40 HV ± 10.65) η οποία είναι η μικρότερη εκ των HAZ των τριών δοκιμίων. Αυτή η διαφορά, πιθανόν να εξηγείται σε συνδυασμό με τις μικρογραφίες του SEM, όπου στα δοκίμια B(2) και Γ(2) ανιχνεύθηκαν συχνότερα λεπτοκρυσταλλικά κατακρημνίσματα εντός κόκκων φερρίτη και πιθανός μπαινιτικός σχηματισμός.

Εν γένει και αυτά τα τρία δοκίμια ως προς τις μικροσκληρότητες, ακολουθούν σχεδόν ίδιο μοτίβο με τις τιμές των μακροσκληρότητών τους, φυσικά με τις τιμές των μικροσκληρομετρήσεων να σημειώνονται υψηλότερες. Επιπροσθέτως, η κατανομή των σκληροτήτων, σύμφωνα με τα προφίλ των μικροσκληρομετρήσεων όλων των δοκιμίων, ξεκινώντας από την επικάλυψη και πλησιάζοντας το υπόστρωμα διατηρεί φθίνουσα πορεία, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών των αντίστοιχων ζωνών του κάθε δοκιμίου μεμονωμένα και διατηρώντας ομαλή μετάβαση μεταξύ υποστρώματος και ΗΑΖ.

Τέλος, συγκρίνοντας τις τιμές των μικροσκληροτήτων των περιοχών των δοκιμίων A(1), B(1) και $\Gamma(1)$ με τις αντίστοιχες των δοκιμίων A(2), B(2) και $\Gamma(2)$, φαίνεται ότι παρατηρούνται κάποιες διαφορές. Η κύρια διαφορά είναι μεταξύ των τιμών των μικροσκληροτήτων της BZ των δοκιμίων, καθώς τα δοκίμια A(2), B(2) και Γ(2) εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές. Αυτή η διαφορά, ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι κατάφεραν να παρατηρηθούν σε μεγαλύτερη έκταση, μέσω SEM, στα τελευταία δοκίμια, λεπτοκρυσταλλικά κατακρημνίσματα καρβιδίων εντός των μαρτενσιτικών βελονών. Επίσης μία άλλη διαφορά μικρότερης σημασίας είναι μεταξύ των τιμών των μικροσκληροτήτων της ΗΑΖ των δοκιμίων, καθώς τα δοκίμια Α(2), Β(2) και Γ(2) εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές. Αυτό, πιθανόν, εξηγείται από τα λεπτοκρυσταλλικά κατακρημνίσματα εντός των φερριτικών κόκκων και τους κόκκους φερρίτη με γωνιώδη ή/και βελονοειδή μορφολογία που παρατηρήθηκαν μέσω SEM, πιο έντονα και σε συγνότερη βάση και από την ύπαρξη του μπαινιτικού σχηματισμού. Βέβαια, για την επιβεβαίωση αυτών των ισχυρισμών θα χρειαστεί και περαιτέρω ανάλυση των δοκιμίων μέσω ΤΕΜ και EBSD. Τέλος, ένας άλλος πιο γενικός παράγοντας ο οποίος έγει αναφερθεί σε παραπάνω κεφάλαιο (2.2) και μπορεί να εξηγήσει σε πιο ευρύ φάσμα τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δοκιμίων που κόπηκαν ως προς διαφορετικούς άξονες, είναι το γεγονός ότι υπάρχουν διαφορές ανάλογα με την κατεύθυνση του λέιζερ ως προς την απόθεση των πουδρών σε

συνδυασμό με τις συνθήκες απότομων μεταβολών θερμοκρασιών και υψηλών ρυθμών απόψυξης στο υπόστρωμα. Συνεπώς, μπορούν να παρατηρηθούν διαφορετικά κλάσματα όγκου των ίδιων φάσεων, ή και κατακρήμνιση διαφορετικών φάσεων και μικρογραφικών χαρακτηριστικών σε περιοχές διαφορετικού προσανατολισμού, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του και της μηχανικές ιδιότητες του υλικού [92-98].

Βέβαια, οι μακροσκληρότητες κατά Vickers αποτελούν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τον χαρακτηρισμό των σκληροτήτων των δοκιμίων, διότι μελετούν τη σκληρότητα της μικροδομής σε πιο ευρύ φάσμα, σε σύγκριση με τις μικροσκληρότητες οι οποίες εστιάζουν σε συγκεκριμένες φάσεις στο εσωτερικό των κόκκων. Για αυτό το λόγο, για παράδειγμα, ενώ οι μακροσκληρότητες μεταξύ της επικάλυψης των δοκιμίων B(1) με Γ(1) και B(2) με Γ(2) παρουσιάζουν αμελητέες διαφορές στις τιμές τους, στις μικροσκληρότητες οι διαφορές αυξάνονται και γίνονται αισθητές.

4.4 Αποτελέσματα Επιφανειακής Τραχύτητας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, τα τρία δοκίμια A, B και Γ υπέστη πλάνισμα με ένα βιομηχανικό τόρνο, προετοιμασία που θα ακολουθούσαν ως μηχανικά εξαρτήματα τα οποία θα προορίζονταν για λειτουργία σε έντονα αποξεστικά περιβάλλοντα, ώστε να αποκτήσουν τιμές τραχύτητας που προσομοιάζουν τις απαιτούμενες σε ρεαλιστικές εφαρμογές. Συνεπώς, είναι σημαντικό η τιμή των τραχυτήτων των δοκιμίων να είναι παρόμοια μεταξύ τους, διότι θα αποτελέσει σημαντικό δεδομένο αφετηρίας για τη σύγκριση των τριών δοκιμίων σχετικά με την αντίστασή τους στη φθορά. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της μέτρησης της επιφανειακής τραχύτητας των δοκιμίων Α (50:50), B (80:20) και Γ(90:10) που παρατίθενται στον Πίνακα 23 και εστιάζοντας στην τιμή της μέσης τραχύτητας Ra, η οποία είναι παρόμοια και για τα τρία δοκίμια, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι αποδεκτά.

4.5 Αποτελέσματα Δοκιμών Φθοράς λόγω Εκτριβής

Σύμφωνα με τον Πίνακα 24 το δοκίμιο Γ παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά ως προς την αντίσταση στη φθορά, διότι συνδυάζει το μικρότερο δείκτη φθοράς (0.1575 mg/cycle), το χαμηλότερο ρυθμό φθοράς ($1.81 \cdot 10^{-5}$ cm³/N·m) και την πιο χαμηλή αθροιστική απώλεια βάρους (630 mg), μετά τους 4000 κύκλους. Η συμπεριφορά, αυτή, του δοκιμίου Γ μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το διάγραμμα της Εικόνας 167. Επιπροσθέτως, λαμβάνοντας υπόψη την κλίση των καμπυλών στο διάγραμμα της Εικόνας 167, η απώλεια βάρους και των τριών δειγμάτων δείχνει αυξανόμενη γραμμική συμπεριφορά στα πρώτα 300m. Στη συνέχεια, μεταξύ περίπου των 300m και 700m, η απώλεια βάρους μειώνεται λόγω της αύξησης της πυκνότητας των διαταραχών (increased dislocation density), οι οποίες συσσωρεύονται εξαιτίας της παραμόρφωσης που υφίστανται τα δοκίμια από την ασκούμενη δύναμη. Για αυτό το λόγο, η επιφάνεια υφίσταται επιφανειακά ενδοτράχυνση και η αντοχή στη φθορά αυξάνεται. Τέλος, στα τελευταία 200m περίπου, η απώλεια βάρους παρουσιάζει πάλι αυξανόμενη συμπεριφορά, και η αντοχή στη φθορά όλων των δειγμάτων μειώνεται. Τα δοκίμια, δηλαδή, πιθανόν, υφίστανται περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της αντοχής τους στη φθορά [59-60]. Μία άλλη εξήγηση μπορεί να σχετίζεται με τα παραγόμενα προϊόντα από τη διαδικασία της φθοράς λόγω εκτριβής, τα οποία αυξάνουν τα φαινόμενα τριβής-εκτριβής και οδηγούν σε μεγαλύτερη απώλεια βάρους. Αυτά τα φαινόμενα θα επιβεβαιωθούν αν εφαρμοστεί η δοκιμή σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων.

Η καλύτερη αντίσταση του δοκιμίου Γ στη φθορά οφείλεται στο υψηλότερο ποσοστό χρωμίου Cr που περιέχει, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς του δοκιμίου στην, πλούσια σε Cr, πούδρα 410L, καθώς αποτελεί κραματικό στοιχείο το οποίο ενισχύει την αντοχή στη φθορά. Βέβαια, εν γένει, ο ρυθμός φθοράς δε διαφέρει κατά σημαντικό βαθμό μεταξύ και των τριών δοκιμίων. Συνεπώς, η επιλογή της κατάλληλης αναλογίας της πούδρας 410L, δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στην αντίσταση στη φθορά, μέχρι την εφαρμογή της δοκιμής στους 4000 κύκλους. Ίσως, αν εφαρμοστεί η δοκιμή σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων, να υπάρξει πιο εμφανής διαβάθμιση, ως προς συμπεριφορά των δοκιμίων στη φθορά.

<u>Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>

Στην ακόλουθη μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η απόθεση μέσω της τεχνικής Laser Cladding Deposition-LCD δύο τροποποιημένων μεταλλικών πουδρών, ενός φερριτικού ανοξείδωτου χάλυβα AISI 410L και του AISI 4140, ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα με μέτρια περιεκτικότητα σε άνθρακα, σε υπόστρωμα ελαφρά κραματωμένου χάλυβα, υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, του AISI 1060. Οι μεταλλικές πούδρες AISI 410L και AISI 4140 αναμείχθηκαν και αποτέθηκαν στο υπόστρωμα AISI 1060, σε τρεις διαφορετικές αναλογίες, με το ποσοστό της πούδρας 410L να αυξάνεται, ενώ της 4140 να μειώνεται: A) AISI 410L:AISI 4140→50:50, B) AISI 410L:AISI 4140→80:20 και Γ) AISI 410L:AISI 4140→90:10. Βάσει όλων των παραπάνω μεθόδων αξιολόγησης των δοκιμίων (δηλ., LOM, SEM, XRD, μακροσκληρότητες και μικροσκληρότητες κατά Vickers, μετρήσεις επιφανειακής τραχύτητας και δοκιμές φθοράς λόγω εκτριβής) και λαμβάνοντας υπόψη τη διατήρηση των επιλεχθέντων παραμέτρων κατά τη διάρκεια της τεχνικής laser cladding σε όλα τα δοκίμια, διεξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Αναφορικά με τα δοκίμια A(1,2), B(1,2) και $\Gamma(1,2)$

Παρουσιάζονται κάποια αρχικά συμπεράσματα τα οποία εστιάζουν στα δοκίμια A(1,2), B(1,2) και Γ(1,2) :

- Η επικάλυψη των δοκιμίων με πάχος, περίπου, 1.2mm αποτελείται από: α) βελόνες μαρτενσίτη οι οποίες σχηματίζουν δενδρίτες, β) σφαιρικούς πόρους ομοιόμορφα διασκορπισμένους, μικρού μεγέθους και μικρού κλάσματος όγκου, γ) λεπτοκρυσταλλικά καρβίδια, πιθανόν Cr ή/και Μο κυρίως κοντά στη διεπιφάνεια εντός των μαρτενσιτικών βελονών και κυρίως στα δοκίμια A(2), B(2), Γ(2) και δ) πιθανές νάνο-κατακρημνίσεις σφαιροποιημένου σεμεντίτη.
- Η ΗΑΖ με πάχος, περίπου, 3mm διακρίνεται σε 4 υποπεριοχές βάσει των κύριων μικρογραφικών χαρακτηριστικών που απαντώνται, καθορισμένες από τα έντονα διαχυσιακά φαινόμενα σε συνδυασμό με την κλιμακούμενη κατανομή της θερμοκρασίας. Η μικροδομή της αποτελείται από: α) κόκκους προευτηκτοειδή φερρίτη, ορισμένες φορές βελονοειδής μορφολογίας (πιθανόν τύπου Widmanstätten) και περλίτη, ο οποίος ανά περιοχές αποτελείται από σφαιροποιημένο σεμεντίτη, β) λεπτοκρυσταλλικά καρβίδια, πιθανόν Cr ή/και

Μο και γ) πιθανή μπαινιτική μορφολογία. Σημειώνονται διαβαθμίσεις στα μεγέθη των κόκκων των μικρογραφικών χαρακτηριστικών.

- Το απαραίτητο ποσοστό διαλυτοποίησης κρίνεται επιθυμητό και δεν παρατηρούνται σε καμία ζώνη ελαττώματα, όπως σημάδια ανεπαρκούς διαλυτοποίησης, έντονα φαινόμενα μικροδιαφορισμού των κραματικών στοιχείων και σημεία έναρξης και ανάπτυξης ρωγμών.
- Χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση των δοκιμίων μέσω TEM και EBSD για την εξακρίβωση και επιβεβαίωση των κατακρημνίσεων των λεπτοκρυσταλλικών καρβιδίων της BZ και της HAZ και του μπαινιτικού σχηματισμού της HAZ.
- Η επιλογή διαφορετικής ανάμιξης των πουδρών (AISI 410L και AISI 4140)
 δεν επηρεάζει τόσο τη συμπεριφορά των δοκιμίων ως προς τη σκληρότητα,
 καθώς οι διαφορές μεταξύ των τιμών των μακροσκληρομετρήσεων των
 αντίστοιχων ζωνών των δοκιμίων είναι μικρές (ιδιαίτερα μεταξύ Β και Γ).
- Η αντίσταση στη φθορά αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε Cr, και συνεπώς την αύξηση της αναλογίας της πούδρας 410L, χωρίς όμως να παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ των τριών δοκιμίων. Συνεπώς, χρειάζεται περαιτέρω εφαρμογή, στα δοκίμια A, B, Γ, της δοκιμής σε φθορά σε περισσότερους από 4000 κύκλους.
- Το δοκίμιο Β έχει τη βέλτιστη αναλογία των δύο πουδρών, διότι συνδυάζει την υψηλότερη σκληρότητα, παρόμοια τραχύτητα και ικανοποιητική αντοχή στη φθορά, συγκριτικά με τα άλλα δύο, χωρίς να σημειώνονται ελαττώματα στη μικροδομή. Συνεπώς, η αύξηση της αναλογίας τη πούδρας 410L προτιμάται, χωρίς να είναι απαραίτητη η αύξησή της σε ποσοστό άνω του 80%, με αποτέλεσμα τη μείωση κόστους στη βιομηχανία, αφού είναι 2.5 έως 3 φορές πιο ακριβή από την πούδρα 4140, λόγω του ανοξείδωτου χαρακτήρα και της ποιότητάς της. Βέβαια, για την επιβεβαίωση αυτού του ισχυρισμού είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν συμπληρωματικά και άλλες δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων που συνδέονται άμεσα με την προοριζόμενη εφαρμογή του (π.χ. επισκευή βιομηχανικού ράουλου, επισκευή στροφαλοφόρου άξονα πλοίου, κ.α.).

Αναφορικά με την απόδοση της τεχνικής Laser Cladding Deposition-LCD και τις παραμέτρους της

Αναλύονται κάποιες παρατηρήσεις και συμπεράσματα που συνδέονται και εστιάζουν στην τεχνική LCD και στην κρίση κατά πόσο θεωρήθηκε επιτυχής ή μη:

Η εφαρμογή της τεχνικής LCD και στα 3 δοκίμια Α, Β και Γ σε ευρύτερα πλαίσια μπορεί να θεωρηθεί επιτυχής διότι: α) δεν υπάρχουν σημάδια ανεπαρκούς διαλυτοποίησης, έντονα φαινόμενα μικροδιαφορισμού των κραματικών στοιχείων και σημεία έναρξης και ανάπτυξης ρωγμών, β) το ποσοστό διαλυτοποίησης και στα δύο συστήματα αξόνων (ΨΖ και ΧΖ), κρίνοντας από τη ζώνη διαλυτοποίησης μέσω SEM και των τοπικών και γραμμικών αναλύσεων, φαίνεται να είναι επιτυχές, παρά την χρήση υψηλής ισχύος λέιζερ (laser power), διότι συνδυάστηκε με υψηλή ταχύτητα κίνησής του λέιζερ (laser scanning speed) και μικρή διάμετρο δέσμης του (laser spot diameter), γ) το υπόστρωμα των δοκιμίων δεν έχει επηρεαστεί θερμικά κατά τη διάρκεια εφαρμογής του LCD, συμπέρασμα το οποίο επιβεβαιώνεται από τις μεθόδους LOM, SEM και μακροσκληρομετρήσεις κατά Vickers και δ) η δημιουργία των δύο αποτιθέμενων στρωμάτων προωθεί ικανοποιητική αντίσταση στη φθορά και την επιθυμητή αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας των δοκιμίων, μέσω υψηλής τιμής της σκληρότητας των επικαλύψεων, χωρίς να υπάρχουν μεγάλες εναλλαγές στις τιμές των σκληροτήτων κάθε ζώνης (BZ, HAZ) και διατηρώντας μια ομαλή μετάβαση μεταξύ υποστρώματος και ΗΑΖ, σύμφωνα με το προφίλ των μικροσκληρομετρήσεων, τις μακροσκληρομετρήσεις κατά Vickers και το υπολογιζόμενο σφάλμα. Συνεπώς, οι παράμετροι της τεχνικής καθώς και η υπολογισμένη εξ' αυτών, εφαρμοζόμενη ειδική ενέργεια (33.33 J/mm² από eq.1) κρίνονται κατάλληλες και επιτυχείς.

Βέβαια, αν και παρατηρήθηκαν στις επικαλύψεις των δοκιμίων και από τα δύο συστήματα αξόνων (ΨΖ και ΧΖ) μικρά ποσοστά πόρων, έχουν σφαιρικό σχήμα, μικρή διάμετρο και είναι σχετικά ομοιόμορφα διασκορπισμένοι με μικρό κλάσμα όγκου (keyholing porosity effect). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται σε ποικίλους λόγους που σχετίζονται με την επιλογή και συνδυασμό των παραμέτρων της τεχνικής LCD, οι πιο συνηθισμένοι από τους οποίους είναι: η παγίδευση, εντός της επικάλυψης, αδρανούς αερίου (inert gas entrapment), η χρήση υψηλής ισχύος του λέιζερ (high laser power input), η χρήση υψηλής ταχύτητας του λέιζερ (high laser scanning speed), και η επιλογή όχι τόσο κατάλληλων παραμέτρων της πούδρας (π.χ. κατανομή μεγέθους σωματιδίων, σχήμα, πόροι κόκκων - non-suitable powder properties). Συνεπώς, για την αποφυγή αυτών, η αλλαγή κάποιων από τις ακόλουθες παραμέτρους ή ο συνδυασμός αυτών θα βοηθούσε στη μείωση ή και ακόμα στην εξάλειψη των πόρων, όπως η αύξηση της εφαρμοζόμενης ειδικής ενέργειας με τη μείωση της ισχύος, της ταχύτητας του λέιζερ και της διαμέτρου της δέσμης του λέιζερ, η διατήρηση της ισχύος συνδυαζόμενη με τη μείωση της ταχύτητας του λέιζερ, η επιλογή μικρότερης διαμέτρου της δέσμης του λέιζερ, η μείωση της τροφοδοσίας με αργό, η μείωση της τροφοδοσίας της αναλογίας των πουδρών και η επιλογή καλύτερης ποιότητας πουδρών σχετικά με την κατανομή μεγέθους τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν υποβαθμίζουν σε σημαντικό βαθμό την επικάλυψη των δοκιμίων και ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση του επικαλυμμένου εξαρτήματος μπορούν να μη ληφθούν υπόψιν. Φυσικά για την επιβεβαίωση αυτού του ισχυρισμού είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν οι ανάλογες δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων που συνδέονται άμεσα με την εφαρμογή του.

Επιπροσθέτως, μία άλλη παρατήρηση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αμφιβολία σχετικά με την επιτυχία της εφαρμογής LCD είναι το μεγάλο πάχος της HAZ σε όλα τα δοκίμια και στα δύο συστήματα αξόνων (ΨΖ και ΧΖ). Πιο συγκεκριμένα, η HAZ καταλάμβανε περίπου το 1/3 του αρχικού πάχους των δοκιμίων (3mm από τα 9.06mm). Βέβαια, ενώ παρατηρείται μεγάλη HAZ, το ποσοστό διαλυτοποίησης έχει επίσης παρατηρηθεί επιτυχές. Συνεπώς, η περαιτέρω παραμετροποίηση της τεχνικής αποτελεί τη λύση η οποία θα αποβεί στη διατήρηση του μικρού ποσοστού διαλυτοποίησης, αλλά και στη μείωση του πάχους της HAZ. Για παράδειγμα, μία τέτοια αλλαγή θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω διατήρησης της εφαρμοζόμενης ειδικής ενέργειας, αλλά με αλλαγή των παραμέτρων της *eq.1 ¹* (π.χ. μείωση της ισχύος του λέιζερ, διατήρηση της ταχύτητας και μείωσης της διαμέτρου δέσμης του λέιζερ) και συνδυάζοντας μικρότερα ποσοστά αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των μεμονωμένων ημιελλειπτικών κοιλοτήτων της αποτιθέμενης επικάλυψης (beads), στοχεύοντας στην απορρόφηση μικρότερης θερμικής ενέργειας σε λιγότερο ευρείες περιοχές.

Σχετικά με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά, στην τεχνική LCD η παραγόμενη επικάλυψη και η θερμικά επηρεασμένη ζώνη κατά μήκος της τομής του ίδιου δοκιμίου δε φέρουν την ίδια μορφολογία, ή/και μέγεθος, ή/και κλάσμα όγκου των

¹ Κεφάλαιο 1.6.4.1, σελίδα 43.

ίδιων φάσεων ή επίσης δε φέρουν τις ίδιες φάσεις. Συνεπώς, αυτές οι λεπτομερείς διαφοροποιήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε λεπτομερείς διαφοροποιήσεις στις μηχανικές ιδιότητες, όπως και παρατηρήθηκε μέσα από το προφίλ των μικροσκληρομετρήσεων των δοκιμίων κατά Vickers. Επιπροσθέτως, συγκριτικά οι μικρογραφίες των επικαλύψεων και των θερμικά επηρεασμένων ζωνών των δοκιμίων που έχουν κοπεί ως προς διαφορετικά συστήματα αξόνων μπορούν να φέρουν σημαντικές διαφορές σχετικά με την ποικιλομορφία των χαρακτηριστικών των ίδιων φάσεων και την εμφάνιση διαφορετικών φάσεων. Ανάλογα με τις διαφορές που παρουσιάζονται στη μικροδομή των δοκιμίων μπορούν να επηρεαστούν οι τελικές μηγανικές ιδιότητες του υλικού και να συμπεριφερθεί διαφορετικά, ανάλογα με την διεύθυνση των αξόνων στην οποία θα εφαρμοσθούν οι μέθοδοι των μηχανικών ιδιοτήτων (π.χ. δοκιμές εφελκυσμού, κόπωσης, κ.λπ.). Βέβαια, στα δοκίμια προς εξέταση που κόπηκαν ως προς διαφορετικές διευθύνσεις (ΨΖ και ΧΖ άξονες) δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές ως προς τη μικροδομή, ούτε εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό και επιπλέον, οι μακροσκληρότητες κατά Vickers μεταξύ των αντίστοιγων ζωνών των δοκιμίων δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Οι προκύπτουσες διαφορές οφείλονται στα διαχυσιακά φαινόμενα τα οποία καθορίζονται από τις διαστάσεις του δοκιμίου, το θερμοκρασιακό προφίλ, το ρυθμό απόψυξης, τα περιεχόμενα κραματικά στοιχεία και από τους παράγοντες της τοπικής μεταβολής της θερμοκρασίας με την απόσταση (dt/dx - temperature gradient, G) στη διεπιφάνεια τηγμένης/στερεοποιημένης περιοχής και του ρυθμού στερεοποίησης ή ανάπτυξης των κόκκων (solidification rate or grain growth rate, R) σε συνδυασμό με τη διεύθυνση της στερεοποίησης των κόκκων σε σχέση με τη διεύθυνση κίνησης του λέιζερ. Όλα τα παραπάνω εξηγούν τις διαφορές μεταξύ των δοκιμίων και στο ίδιο σύστημα αξόνων αλλά και σε διαφορετικό σύστημα αξόνων, καθώς οι συνθήκες θερμοκρασίας και απόψυξής είναι διαφορετικές, με αποτέλεσμα να κατακρημνιστούν και να αναπτυχθούν είτε ίδιες φάσεις σε διαφορετικό κλάσμα όγκου ή/και σε διαφορετικά μεγέθη, είτε ακόμα και διαφορετικές φάσεις.

Συνοψίζοντας λοιπόν, ένα βασικό συμπέρασμα ως απόρροια όλων των παραπάνω, είναι ότι η τεχνική LCD είναι σε μεγάλο βαθμό πολυπαραγοντική (π.χ. επιλογή υλικού υποστρώματος και πούδρας, ποιότητα και χαρακτηριστικά πούδρας, παράμετροι τεχνικής LCD, τυχόν προθερμάνσεις και ανοπτήσεις μετά το πέρας της διαδικασίας) ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη μικροδομή η οποία θα συνδυάζει όλα τα απαραίτητα μικρογραφικά χαρακτηριστικά και τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες, έτσι ώστε ένα εξάρτημα να μπορεί να ανταπεξέλθει στην προοριζόμενη εφαρμογή του, αλλά και ταυτόχρονα η κατασκευή μέσω της τεχνικής LCD να κριθεί οικονομικά βιώσιμη συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους.

Ολοκληρώνοντας, αξίζει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η δημοσίευση του ακόλουθου άρθρου από το επιστημονικό περιοδικό Journal of Materials Engineering and Performance: C. Roussos, S. Deligiannis, D. Ioannidou, G. Papapanos, P. E. Tsakiridis, "Microstructural and Mechanical Properties of Laser Cladding-Deposited AISI 1060 with a Mixture of 410L Alloy and 4140 Alloy Powders".

<u>Κεφάλαιο 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>

 R. W. Cahn, P. Haasen, Physical Metallurgy Volume 1,2,3, Elsevier Science B.V., 4th Edition, 1996.

[2] ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM International, 1990.

[3] J. R. Davis, Alloying-Understanding the basics, ASM International, 2001.

[4] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής. Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Εκδ. Παπασωτηρίου. 2η έκδοση, ΑΘΗΝΑ 2008.

[5] H. K. D. H. Bhadeshia and R. W. K. Honeycombe, Steels Microstructure and Properties Third Edition, Elsevier Ltd., 2006.

[6] Outokumpu Stainless AB, Handbook of Stainless Steel, Avista: Outokumpu Oyj, 2013.

[7] J. C. Lippold, D. J. Kotecki, Welding Metallurgy and Weldability of Stainlees Steels, John Wiley and Sons Inc., 2005.

[8] J.R. Davis, ASM Speciality Handbook: Stainless Steels, Materials Park, Ohio: ASM International, 1994.

[9] M. McGuire, Stainless Steels for Design Engineers, Materials Park, Ohio: ASM International, 2008.

[10] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ, Τα Κράματα, Αθήνα 1993.

[11] E. Pereloma and D. V. Edmonds, Phase Transformations in Steels, Volume 1,2: Diffusionless transformations, high strength steels, modeling and advanced analytical techniques, Woodhead Publishing, 2012.

[12] W. D. Callister Jr., Materials Science and Engineering-An Introduction. John Willey and Sons, Inc., 7th Edition, 2007.

[13] ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures, ASM International, 2004.

[14] H. K. D. H. Bhadeshia, Bainite in Steels, Theory and Practice, Third Edition, Maney Publishing, 2015.

[15] M. Maalekian, The Effects of Alloying Elements on Steels (I), Christian Doppler Laboratory for Early Stages of Precipitation, Technische Universität Graz, October 2007.

[16] ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, Materials Park, OH, ASM International, 2016.

[17] G. Krauss, Steels: Processing, Structure and Performance, Second Edition, Materials Park, Ohio: ASM International, 2015.

[18] ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, ASM International, 2004.

[19] ASM Handbook, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, Volume 4A, Materials Park, Ohio: ASM International, 2013.

[20] ASM Handbook, Additive Manufacturing Processes, Volume 24, Materials Park, Ohio: ASM International, 2020.

[21] L. Gargalis, Optimisation of silicon content in Fe-Si alloys processed via Laser Powder Bed Fusion for an additively manufactured soft magnetic core, Ph.D. thesis, University of Nottingham, 2021.

[22] A. Dass and A. Moridi, State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design, Coatings 2019, 9, 418.

[23] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff & S. S. Babu, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, International Materials Reviews, 2016.

[24] L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon, S. Wiener, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, Springer Series in Advanced Manufacturing, 2017.

[25] J. O. Milewski, Additive Manufacturing of Metals From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry, Springer Series in Materials Science, Volume 258, 2017.

[26] R. Leach, S. Carmignato, Precision Metal Additive Manufacturing, CRC Press Taylor and Francis Group, 2021.

[27] T. Mukherjee, J. S. Zuback, A. De & T. DebRoy, Printability of alloys for additive manufacturing, Scientific Reports | 6:19717, 2016.

[28] D. Powell, A. E. W. Rennie, L. Geekie, N. Burns, Understanding powder degradation in metal additive manufacturing to allow the upcycling of recycled powders, Journal of Cleaner Production 268 (2020) 122077.

[29] P. Bajaj, A. Hariharan, A. Kini, P. Kürnsteiner, D. Raabe, E. A. Jagle, Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties, Materials Science & Engineering A 772 (2020) 138633.

[30] M. Ansari, A. Martinez-Marchese, Y. Huang, E. Toyserkani, A mathematical model of laser directed energy deposition for process mapping and geometry prediction of Ti-5553 single-tracks, Materialia 12 (2020) 100710.

[31] P. Cavaliere, Laser Cladding of Metals, Springer Cham, 2020.

[32] M. F. Schneider, Laser Cladding with Powder, Effect of some Machining Parameters on Clad Properties, Ph.D. Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, March 1998.

[33] R. Vilar, Laser Cladding, J. Laser Appl., Vol. 11, No. 2, April 1999.

[34] K. Li, D. Li, D. Liu, G. Pei, L. Sun, Microstructure evolution and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L stainless steel, Applied Surface Science, 2015.

[35] S. Huang, D. Li, L. Zhang, X. Zhang and W. Zhu, Tailoring the Mechanical Properties of Laser Cladding-Deposited Ferrous Alloys with a Mixture of 410L Alloy and Fe–Cr–B–Si–Mo Alloy Powders, Materials 2019, 12, 410.

[36] T. Roy, A. Paradowska, R. Abrahams, M. Law, P. Mutton, M. Soodi and W. Yan, Residual stress in laser cladded heavy-haul rails investigated by neutron diffraction, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2019.

[37] H. Gedda, Laser Cladding: An Experimental and Theoretical Investigation, Ph.D. Thesis, Lulea University of Technology, October 2004.

[38] M. John, U. B. Kuruveri and P. L. Menezes, Laser Cladding-Based Surface Modification of Carbon Steel and High-Alloy Steel for Extreme Condition Applications, Coatings 2022, 12, 1444.

[39] M. K. Alam, Characterization of Laser-Cladded AISI 420 Martensitic Stainless Steel for Additive Manufacturing Applications, Ph.D. Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada, 2019.

[40] D. S. Salehi, Sensing and Control of Nd:YAG Laser Cladding Process, Ph.D. Thesis, Industrial Research Institute Swinburne (IRIS), Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, July 2005.

[41] C. L. Sexton, G. Byrne, K. G. Watkins, Alloy development by laser cladding: An overview, J. Laser Appl., Vol. 13, No. 1, February 2001.

[42] W.-J. Chen, Q.-Y. Chen, Y. Mao and S.-C. Tang, Effect of laser cladding on microstructural transformation and mechanical properties of heat affected zone of EA4T steel, Mater. Express, Vol. 11, pp. 1707–1715, 2021.

[43] V. V. Popov, M. L. Grilli, A. Koptyug, L. Jaworska, A. Katz-Demyanetz, D. Klobcar, S. Balos, B. O. Postolnyi and S. Goel, Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Using Critical Raw Materials: A Review, Materials 2021, 14, 909.

[44] X. Wang, Lei Lei and H. Yu, A Review on Microstructural Features and Mechanical Properties of Wheels/Rails Cladded by Laser Cladding, Micromachines 2021, 12, 152.

[45] G. Sun, R. Zhou, J. Lu and J. Mazumder, Evaluation of defect density, microstructure, residual stress, elastic modulus, hardness and strength of laser-deposited AISI 4340 steel, Acta Materialia 84 (2015) 172–189.

[46] L. Song, G. Zeng, H. Xiao, X. Xiao and S. Li, Repair of 304 stainless steel by laser cladding with 316L stainless steel powders followed by laser surface alloying with WC powders, Elsevier Ltd, 2016.

[47] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, S. M. Thomson, An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control, Additive Manufacturing 8 (2015) 12–35.

[48] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi and P. Fino, Microstructure and Mechanical Properties of AISI 316L Produced by Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing: A Review, Appl. Sci. 2020, 10, 3310.

[49] C. Janse van Niekerk, In-situ Alloying of AISI 410L Martensitic Stainless Steels with Nitrogen during Laser Cladding, Master Thesis, University of Pretoria, January 2016.

[50] S. Kostic, Z. Ž. Lazarevic, V. Radojevic, A. Milutinovic, M. Romcevic, N.Ž. Romcevic, A. Valcic, Study of structural and optical properties of YAG and Nd:YAG single crystals, Materials Research Bulletin 63 (2015) 80–87.

[51] ASM Handbook, Metalworking: Sheet Forming, Volume 14B, Materials Park, Ohio: ASM International, 2006.

[52] P. D. Babu, K. R. Balasubramanian, G. Buvanashekaran, Laser surface hardening: a review, International Journal of Surface Science and Engineering 5(2/3):131 – 151, July 2011.

[53] ASM Handbook, Surface Engineering, Volume 5, ASM International, 1994.

[54] ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Volume 8, ASM International, 2000.

[55] D. M. Kennedy, Dynamic Abrasion Resistance of Advanced Coating Systems, Ph.D. Thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, September 1995.

[56] Κ. Ι. Τριαντού, Μελέτη Απλών και Σύνθετων Επικαλύψεων Ψυχρού Ψεκασμού: Μικροδομή, Μηχανισμός Συναπόθεσης, Τριβολογία και Αντοχή σε Διάβρωση, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάιος 2012.

[57] Μ. Αξιομακάρου, Μελέτη της φθοράς τριβής-παλινδρόμησης και τριβοδιάβρωσης απλών και σύνθετων ηλεκτρολυτικών επικαλύψεων μήτρας Ni και Ni-P, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011. [58] ASM Handbook, Friction, Lubrication and Wear Technology, Volume 18, ASM International, 1992.

[59] B. Bhushan, Introduction to Tribology, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

[60] I. M. Hutchings, Wear-resistant materials: into the next century, Materials Science and Engineering, A184 (1994) 185-195.

[61] C. Kose, C. Topal, Effect of post weld heat treatment and heat input on the microstructure and mechanical properties of plasma arc welded AISI 410S ferritic stainless steel, Mater. Res. Express, 2019.

[62] T. Roy, Q. Lai, R. Abrahams, P. Mutton, A. Paradowska, M. Soodi, W. Yan, Effect of deposition material and heat treatment on wear and rolling contact fatigue of laser cladded rails, Wear, 2018.

[63] N. Kampanis and I. Hauer, Propeller Shaft Repair for a Large Ferry with the Aid of Laser Cladding Technique, ICSOT 2010.

[64] Q. Lai, R. Abrahams, W. Yan, C. Qiu, P. Mutton, A. Paradowska, X. Fang, M. Soodi, X. Wu, Effects of preheating and carbon dilution on material characteristics of lasercladded hypereutectoid rail steels, Materials Science & Engineering A 712 (2018) 548–563.

[65] E. Taban, E. Deleu, A. Dhooge, E. Kaluc, Laser welding of modified 12% Cr stainless steel: Strength, fatigue, toughness, microstructure and corrosion properties, Materials and Design 30 (2009) 1193–1200.

[66] G. de Queiroz Caetano, C. C. Silva, M. F. Motta, H. C. Miranda, J. P. Farias, L. A. Bergmann, J. F. dos Santos, Influence of Rotation Speed and Axial Force on the Friction Stir Welding of AISI 410S Ferritic Stainless Steel, Journal of Materials Processing Tech. (2018).

[67] M. Li, H. Shengsun, H. Bao, S. Junqi, W. Yonghui, Activating Flux Design for Laser Welding of Ferritic Stainless Steel, Trans. Tianjin Univ. 2014, 20(6): 429-434. [68] M. O. H. Amuda and S. Mridha, An Overview of Sensitization Dynamics in Ferritic Stainless Steel Welds, International Journal of Corrosion, 2011.

[69] D. D. Balsaraf, S. P. Ambade, A. P. Patil, Y. M. Puri, Literature Review on Analysis of Sensitization and Corrosion of Ferritic Stainless Steel (FSS) by Different Welding Processes, Advanced Materials Manufacturing & Characterization Vol 3 Issue 1 (2013).

[70] C. C. Silva, J. Da Costa Almeida Neto, J. P. Farias, Sant'Ana Hosiberto Batista de, Microstructural changes in the AISI 410S stainless steel HAZ - Effects on corrosion resistance, Journal Name: Soldagem e Inspecao, 2006, 11(4):188-199.

[71] H. Kim, Z. Liu, W. Cong and H.-C. Zhang, Tensile Fracture Behavior and Failure Mechanism of Additively-Manufactured AISI 4140 Low Alloy Steel by Laser Engineered Net Shaping, Materials 2017, 10, 1283.

[72] M. H. Khani Sanij, S. S. Ghasemi Banadkouki, A. R. Mashreghi, M. Moshrefifar, The effect of single and double quenching and tempering heat treatments on the microstructure and mechanical properties of AISI 4140 steel, Materials and Design 42 (2012) 339–346.

[73] A. H. Meysami, R. Ghasemzadeh, H. Seyedyn, M. R. Aboutalebi, An Investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel, Materials and Design 31 (2010) 1570–1575.

[74] L. Wang, D. Qian, J. Guo and Y. Pan, Austenite Grain Growth Behavior of AISI 4140 Alloy Steel, Advances in Mechanical Engineering, Hindawi Publishing Corporation, 2013.

[75] A. Chamanfar, S. M. Chentouf, M. Jahazi, L.-P. Lapierre-Boire, Austenite grain growth and hot deformation behavior in a medium carbon low alloy steel, J. Mater. Res. Technol. 2020;9(6):12102-12114.

[76] B. M. Gurumurthy, M.C. Gowrishankar, S. Sharma, A. Kini, M. Shettar, P. Hiremath, Microstructure authentication on mechanical property of medium carbon Low alloy duplex steels, J. Mater. Res. Technol. 2020;9(3):5105-5111.

[77] Lifeng Lv, Liming Fu, Sohail Ahmad and Aidang Shan, Effect of heavy warm rolling on microstructures and mechanical properties of AISI 4140 steel, Materials Science & Engineering A, 2017.

[78] J. B. Ferguson, B. F. Schultz, A. D. Moghadam, P. K. Rohatgi, Semi-empirical model of deposit size and porosity in 420 stainless steel and 4140 steel using laser engineered net shaping, Journal of Manufacturing Processes 19 (2015) 163–170.

[79] G. Castro, J. Rodríguez, M. A. Montealegre, J. L. Arias, A. Yañez, S. Panedas, L. Rey, Laser additive manufacturing of high added value pieces, Procedia Engineering 132 (2015) 102 – 109.

[80] M. Badaruddin, Sugiyanto, H. Wardono, Andoko, C. J. Wang, A. K. Rivai, Improvement of low-cycle fatigue resistance in AISI 4140 steel by annealing treatment, International Journal of Fatigue 125 (2019) 406–417.

[81] N. Arivazhagan, S. Singh, S. Prakash, G. M. Reddy, Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding, Materials and Design 32 (2011) 3036–3050.

[82] A. Hascalic, E. Unal, N. Ozdemir, Fatigue behaviour of AISI 304 steel to AISI 4340 steel welded by friction welding, J. Mater. Sci. 41 (2006) 3233-3239. [83] S. Celik, I. Ersozlu, Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels, Materials and Design 30 (2009) 970–976.

[84] S. Niknamian, Investigation on the effect of cold drawing process on mechanical properties and structure of seamless steel (Ck60) tube, SSRN Electronic Journal, 2019.

[85] E. Maleki, G. H. Farrahi, K. R. Kashyzadeh, O. Unal, M. Gugaliano, S. Bagherifard, Effects of Conventional and Severe Shot Peening on Residual Stress and Fatigue Strength of Steel AISI 1060 and Residual Stress Relaxation Due to Fatigue Loading: Experimental and Numerical Simulation, Metals and Materials International, 2020.

[86] M. Mia, N. R. Dhar, Prediction and optimization by using SVR, RSM and GA in hard turning of tempered AISI 1060 steel under effective cooling condition, Neural Comput & Applic, 2017.

[87] G. Subhash Chander, G. Madhusudhan Reddy, G. R. N. Tagore, Influence of process parameters on impact toughness and hardness of dissimilar AISI 4140 and AISI 304 continuous drive friction welds, Int. J. Adv. Manuf. Technol. (2013) 64:1445–1457.

[88] M. Azizieh, M. Khamisi, D. J. Lee, E. Y. Yoon, H. S. Kim, Characterizations of dissimilar friction welding of ST37 and CK60 steels, Int. J. Adv. Manuf. Technol.,2015.

[89] M. Yazdani, M. R. Toroghinejad, S. M. Hashemi, Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of St37 Steel-Ck60 Steel Joints by Explosive Cladding, Journal of Materials Engineering and Performance, (2015) 24(10):4032–4043.

[90] M. K. Alam, A. Edrisy, J. Urbanic and J. Pineault, Microhardness and Stress Analysis of Laser-Cladded AISI 420 Martensitic Stainless Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 26(3), March 2017.

[91] M. K. Alam, M. Mehdi, R. J. Urbanic, A. Edrisy, Mechanical behavior of additive manufactured AISI 420 martensitic stainless steel, Materials Science & Engineering A 773 (2020) 138815.

[92] T. H. Kim, G. Y. Baek, J. B. Jeon, K. Y. Lee, D. Shim, W. Lee, Effect of laser rescanning on microstructure and mechanical properties of direct energy deposited AISI 316L stainless steel, Surface & Coatings Technology 405 (2021) 126540.

[93] D. P. Karmakar, G. Muvvala, A. K. Nath, Effect of scan strategy and heat input on the shear strength of laser cladded Stellite 21 layers on AISI H13 tool steel in asdeposited and heat treated conditions, Surface & Coatings Technology 384 (2020) 125331.

[94] T. Bhardwaj, M. Shukla, Effect of laser scanning strategies on texture, physical and mechanical properties of laser sintered maraging steel, Materials Science & Engineering A 734 (2018) 102–109.

[95] K. Zhang, S. Wang, W. Liu, X. Shang, Characterization of stainless steel parts by Laser Metal Deposition Shaping, Materials and Design 55 (2014) 104–119.

[96] M. Güden, H. Yavas, A. A. Tanrıkulu, A. Tasdemirci, B. Akın, S. Enser, A. Karakus, B. A. Hamat, Orientation dependent tensile properties of a selective-lasermelt 316L stainless steel, Materials Science & Engineering A 824 (2021) 141808.

[97] H. Wang, J. Mo, S. Mu, M. Zhang, W. Duan, J. Li, Z. Zhou, Effects of interfacial trapezoidal grooves on the mechanical properties of coatings by laser cladding, Surface & Coatings Technology 421 (2021) 127425.

[98] J. Ning, H. Zhang, S. Chen, L. Zhang, S. J. Na, Intensive laser repair through additive manufacturing of high-strength martensitic stainless steel powders (I)-powder preparation, laser cladding and microstructures and properties of laser-cladded metals, Journal of materials research and technology 2021;15:5746-5761.

[99] G. F. Vander Voort, Metallography Principles and Practice, Materials Park, Ohio: ASM International, 1999.

[100] R. F. Egerton, Physical Principles of Electron Microscopy - An Introduction to TEM, SEM and AEM, Springer, 2005.

[101] B.J. Inkson, Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, pp. 17-43, 2016.

[102] Y. Waseda, E. Matsubara, K. Shinoda, X-Ray Diffraction Crystallography, Introduction, Examples and Solved Problems, Springer, 2011.

[103] M. Ladd, R. Palmer, Structure Determination by X-ray Crystallography, Analysis by X-rays and Neutrons, Fifth Edition, New York: Springer, 2013.

[104] Α. Α. Αλεξανδράτου, Χαρακτηρισμός με Τεχνικές Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας των Μετασχηματισμών Φάσεων σε Υπερκράμα Νικελίου (WASPALOY[®]), Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα: ΕΜΠ, 2016.

[105] I. Madariaga, I. Gutiérrez*, C. García-de Andrés and C. Capdevila, Acicular Ferrite Formation in a Medium Carbon Steel with a Two Stage Continuous Cooling, Scripta Materialia, Vol. 41, No. 3, pp. 229–235, 1999.

[106] R. A. Farrar, P. L. Harrison, Review Acicular ferrite in carbon-manganese weld metals: an overview, Journal Of Materials Science 22 (1987) 3812-3820.

[107] H. K. D. H. Bhadeshia, R. W. K. Honeycombe, Steels Microstructure and Properties, Fourth Edition, Elsevier Ltd, 2017.

[108] G. Krauss, Martensite in steel: strength and structure, Materials Science and Engineering A273–275 (1999) 40–57.