



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΤΗ  
ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ ΧΑΛΥΒΑ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ  
ΥΨΗΛΟΥ ΒΑΝΑΔΙΟΥ**

Τσερπέλης Οδυσσέας Α.Μ. 46145130

*Επιβλέπων: Μέντρεα Κάρμεν*

*Δρ. Μεταλλειολόγος-Μεταλλουργός Μηχανικός*

*Συνεπιβλέπων: Παπαγεωργίου Δημήτριος*

*Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ, Υποψήφιος διδάκτωρ ΕΜΠ*

Αθήνα, Οκτώβριος 2021



Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2021.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Δρ. Μέντρεα Κάρμεν

Παπαγεωργίου Δημήτριος

Καρέλλας Γεώργιος

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσερπέλης Οδυσσέας του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 45130 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών

(Υπογραφή)

Οδ. Τσερπέλης

Τσερπέλης Οδυσσέας

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων της θερμικής κατεργασίας της ενανθράκωσης στη μικροδομή της επιφάνειας ενός χάλυβα κονιομεταλλουργίας μετά από ενανθράκωση. Τη συγκεκριμένη θερμική κατεργασία υπέστησαν οι πείροι σύνδεσης εμβόλου-διωστήρα αγωνιστικού αυτοκινήτου. Εισαγωγικά, η εργασία περιλαμβάνει μια αναφορά στις μεθόδους παραγωγής χάλυβα μέσω βιβλιογραφικών αναφορών, εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα της μεθόδου της κονιομεταλλουργίας καθώς και στις θερμικές κατεργασίες των χαλύβων. Γίνεται αναφορά στη συγκεκριμένη οικογένεια χαλύβων που ανήκει το προς μελέτη υλικό (χημική σύσταση, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες). Στο κύριο μέρος της εργασίας περιγράφεται η θερμική ακολουθία που υπέστη το εξάρτημα, τα μακροσκοπικά ευρήματα που προέκυψαν μέσω οπτικού ελέγχου και στερεοσκοπίου καθώς και την προετοιμασία για μεταλλογραφική ανάλυση. Το τελευταίο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει τα συμπεράσματα από τη μακροσκοπική και μικροσκοπική ανάλυση του εξαρτήματος και του υλικού.

## ABSTRACT

This thesis examines the consequences of the carburization on the surface microstructure of high vanadium P/M steel. A set of piston pins from a racing car's engine were carburized. The first part of the study discusses the steelmaking methods through bibliographical references, focusing on the advantages of powder metallurgy among with heat treating of steels. Furthermore, there is a reference on the specific steel of the current study (chemical composition, mechanical properties). In the main part of the study, a description of the component's heat treating, the macroscopic findings which were the result of visual examination and specimen preparation leading to the metallographic examination. The last part of the study includes the conclusions of the macroscopic and microscopic examination of the component and the material.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τις επιπτώσεις της θερμικής κατεργασίας της ενανθράκωσης στην μικροδομή της επιφανείας ενός χάλυβα κονιομεταλλουργίας. Πρόκειται για τον χάλυβα Uddeholm Vanadis 8 Superclean, οποίος είναι ένας εργαλειοχάλυβας κονιομεταλλουργίας για λειτουργία ένα ψυχρό. Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να ερευνηθούν οι επιπτώσεις στην επιφάνεια τεσσάρων πείρων σύνδεσης εμβόλου-διωστήρα αγωνιστικού αυτοκινήτου, οι οποίοι και υπέστησαν λανθασμένα την παραπάνω θερμική κατεργασία. Η εργασία αποτελείται από το θεωρητικό και το πειραματικό μέρος. Το θεωρητικό μέρος χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια. Το πρώτο επικεντρώνεται στις σύγχρονες μεθόδους παραγωγής χάλυβα, στις θερμικές κατεργασίες χαλύβων, στα τεχνικά χαρακτηριστικά των πείρων σύνδεσης εμβόλου-διωστήρα καθώς επίσης και στα συνήθη υλικά κατασκευής τους και το τελευταίο αναφέρεται στην ανάλυση της αστοχίας των υλικών. Στην συνέχεια, στο πειραματικό μέρος παρουσιάζεται αναλυτικά όλη η διαδικασία του μακροσκοπικού και μικροσκοπικού ελέγχου και όλες οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτού. Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της μελέτης. Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση του πειραματικού μέρους της εργασίας καθώς και οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, έγιναν στο εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τους καθηγητές μου κα Κάρμεν Μέντρεα και κ Παπαγεωργίου Δημήτριο αρχικά για τις γνώσεις που μου μετέφεραν κατά την διάρκεια των μαθημάτων τους, οι οποίες με έκαναν να ενδιαφερθώ περισσότερο για την επιστήμη των μεταλλικών υλικών αλλά και για την καθοδήγηση και βοήθειά τους στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον κ Καρέλλα Γεώργιο και Αρσένιο Δραγάτση για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1 ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ</b>	<b>10</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΑ	10
1.1.1 Μέθοδος εμφύσησης οξυγόνου Basic - Oxygen Furnace (BOF)	11
1.1.2 Μέθοδος ηλεκτρικού φούρνου -Electric Arc Furnace (EAF)	13
1.1.2 Δευτερογενής παραγωγή χάλυβα (Secondary Steelmaking)	15
1.2 ΑΝΑΤΗΞΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΑΓΩΓΙΜΗ ΣΚΟΥΡΙΑ-ELECTROSLAG REMELTING (ESR)	16
1.3 ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ	18
1.3.1 Εισαγωγή στις μεθόδους κονιομεταλλουργίας	18
1.3.2 Γενικές μέθοδοι παραγωγής κόνεως	20
1.3.2 Ισοστατική συμπίεση εν θερμώ (HIP)	20
1.3.4 Πλεονεκτήματα κονιομεταλλουργίας	22
1.4 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΙΩΣΗ	24
1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ	25
<b>2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ</b>	<b>27</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	27
2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	27
2.2.1 Ενανθράκωση	28
2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ	29
2.3.1 Συνέπειες τους πορώδους στις ιδιότητες και στο βάθος ενανθράκωσης	30
2.3.2 Ενανθράκωση	33
2.3.3 Ενανθρακαζώτωση	34
<b>3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ</b>	<b>35</b>
3.1 ΤΥΠΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΕΙΡΩΝ	35
3.1.1 Λειτουργικές προδιαγραφές πείρων	36
3.2 ΣΥΝΗΘΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΜΒΟΛΟΥ-ΔΙΩΣΤΗΡΑ	36
<b>4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ</b>	<b>41</b>

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ	41
4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	41
4.2.1 Συλλογή στοιχείων και ιστορικού λειτουργίας	41
4.2.2 Τεχνικές οπτικού ελέγχου	41
4.2.3 Έλεγχος με μη καταστροφικές τεχνικές ελέγχου-NDT Techniques	42
4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	46
4.3.1 Μεταλλογραφία	46
4.4 ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ	47
4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ	47
<b>5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ</b>	<b>50</b>
5.1 ΧΑΛΥΒΑΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΟ	50
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	51
5.2.1 Οπτικός έλεγχος	51
<b>6 ΧΗΜΙΚΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ</b>	<b>59</b>
6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΗΜΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	59
6.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	61
<b>7 ΣΤΕΡΕΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>64</b>
7.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟΥ	64
<b>8 ΔΟΚΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>69</b>
<b>9 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>71</b>
9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	71
9.2 ΚΟΠΗ	73
9.3 ΛΕΙΑΝΣΗ	73
9.4 ΣΤΙΛΒΩΣΗ	73
<b>10 ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ</b>	<b>75</b>



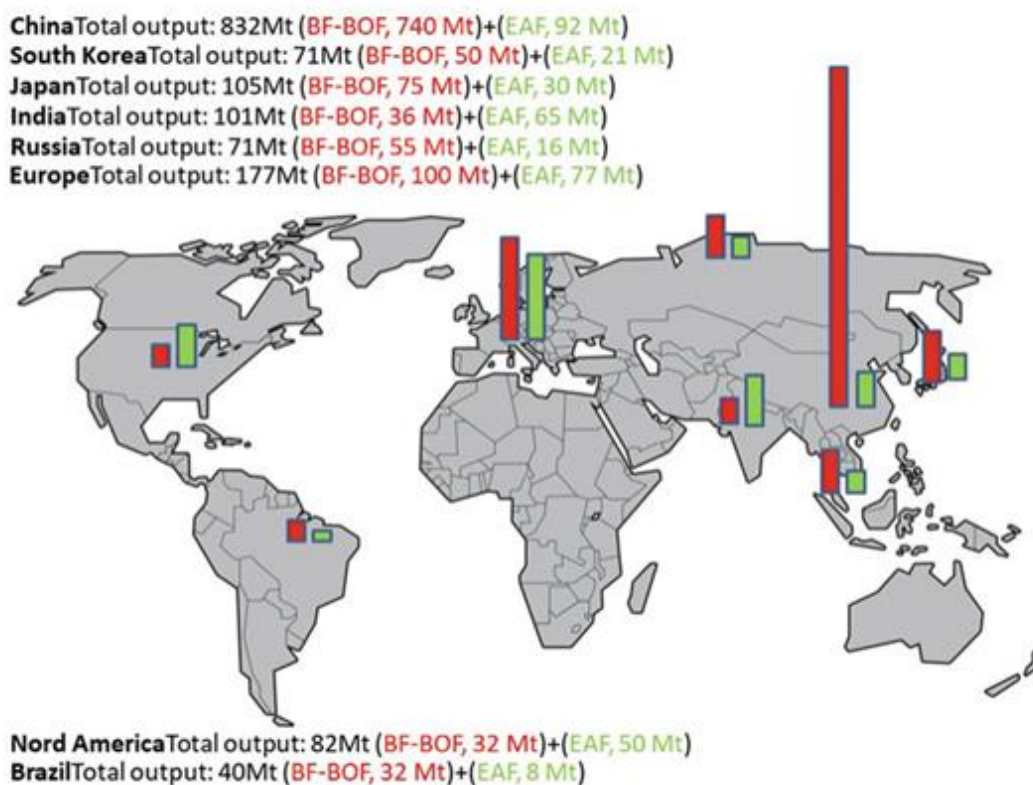
10.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	75
10.2 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΙΙΑ	76
10.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΙΙΒ	78
<b>11 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b>	<b>82</b>
11.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	82
11.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	82
<b>12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΧΟΛΙΑ</b>	<b>89</b>

## ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

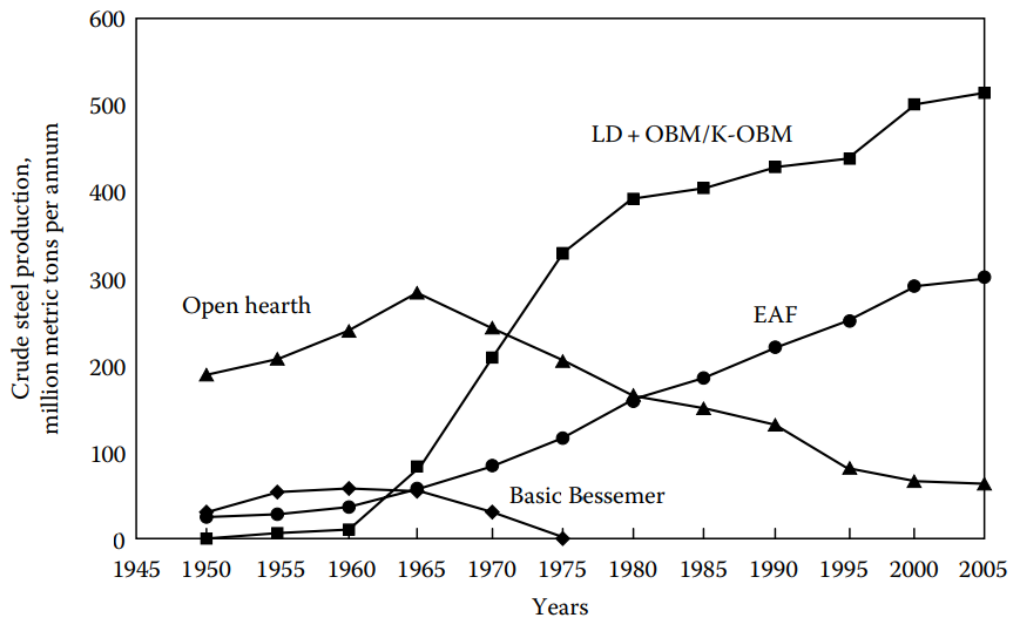
### 1 ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΑ

Η σύγχρονη παραγωγή χάλυβα πραγματοποιείται μέσω δύο βασικών μεθόδων, την μέθοδο εμφύσησης οξυγόνου Basic Oxygen Furnace (BOF) και την μέθοδο ηλεκτρικού φούρνου Electric Arc Furnace (EAF). Κατά την μέθοδο εμφύσησης οξυγόνου, τηγμένος σίδηρος ο οποίος έχει προέλθει από υψικάμινο με περιεκτικότητα άνθρακα περίπου 4,5% κατά βάρος μεταπίπτει σε χάλυβα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0,02 έως 2% κατά βάρος. Κατά την μέθοδο ηλεκτρικού φούρνου πραγματοποιείται η επεξεργασία ενός συνδυασμού από scrap, σπογγώδης σιδήρου (DRI) και χυτοσιδήρου έτσι ώστε να παραχθεί χάλυβας παρόμοιας σύστασης. Οι κραματωμένοι χάλυβες παράγονται κυρίως μέσω της μεθόδου ηλεκτρικού φούρνου και ηλεκτρικού επαγωγικού φούρνου (electric induction furnace).



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια παραγωγή χάλυβα από τις βασικές χώρες παραγωγής. [1]



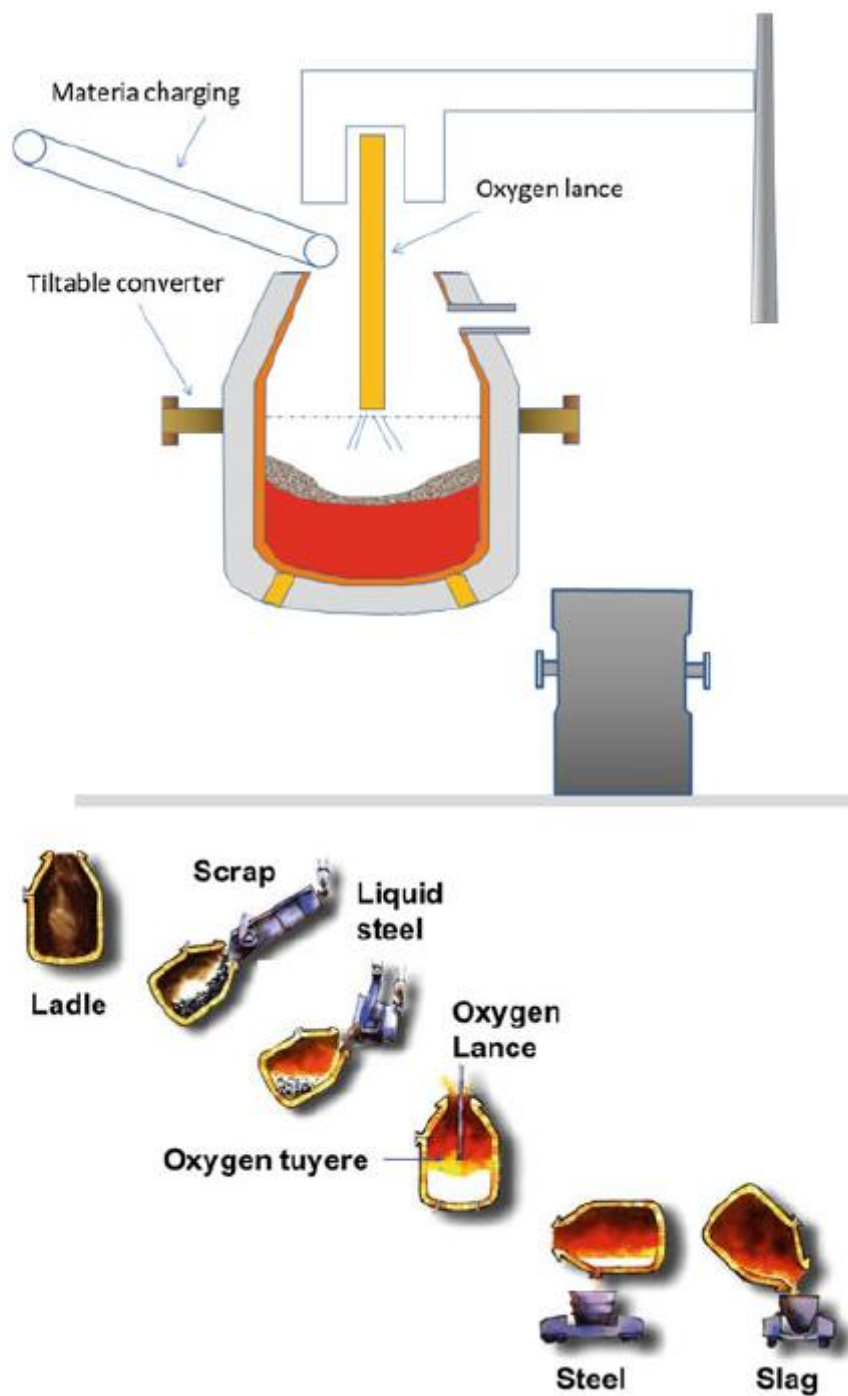
**Εικόνα 1.2:** Διαφορετικές τεχνικές παραγωγής χάλυβα και η συνδρομή τους στην παγκόσμια παραγωγή τον τελευταίο αιώνα [2]

### 1.1.1 Μέθοδος εμφύσησης οξυγόνου Basic - Oxygen Furnace (BOF)

Κατά την μέθοδο αυτή, καθαρό οξυγόνο εγχέεται κάθετα με υπερηχητική ταχύτητα μέσω μίας λόγχης (με ανοίγματα στην άκρη της) στην επιφάνεια υγρού μετάλλου, το οποίο βρίσκεται σε έναν κυλινδρικού σχήματος μετατροπέα [3]. Αυτό οδηγεί σε μια τεράστια απελευθέρωση ενέργειας μέσω της οξείδωσης του άνθρακα στον υγρό σίδηρο. Εκτός από το οξυγόνο δεν απαιτείται καμία άλλη πηγή καυσίμου για την παροχή επιπλέον θερμικής ενέργειας. Για να μπορέσει όμως να διατηρηθεί η διαδικασία αυτόθερμη, το μέγιστο ποσοστό scrap θα πρέπει να περιορίζεται σε 30% [4].

Ο συνολικός σκοπός αυτής της διαδικασίας, είναι η μείωση του ποσοστού του άνθρακα από περίπου 4% σε λιγότερο από 1% ( συχνά λιγότερο από 0,1% ), η μείωση ή έλεγχος του θείου και φωσφόρου και τέλος η αύξηση της θερμοκρασίας του τηγμένου χάλυβα από scrap και υγρό μέταλλο σε περίπου 1635°C (2975 F) [5].

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου, είναι η υψηλή παραγωγικότητά της, η οποία απαιτεί μια συνεχή παροχή υγρού σιδήρου από υψικάμινο καθώς ο κύκλος εργασίας δεν μπορεί να διακοπεί και ο μετατροπέας να μείνει αδρανής για μεγάλα διαστήματα. Αυτό επιβάλλει κάποιους περιορισμούς στην συνολική ευελιξία της μεθόδου [3].



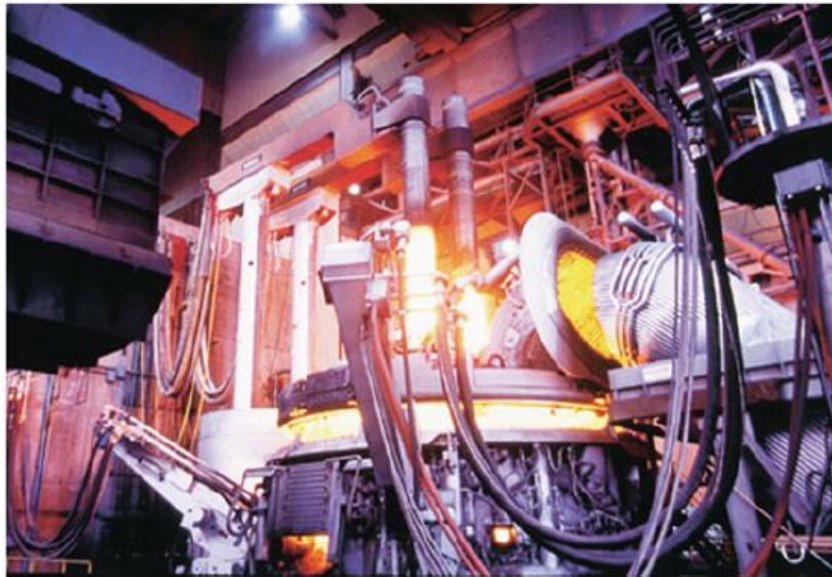
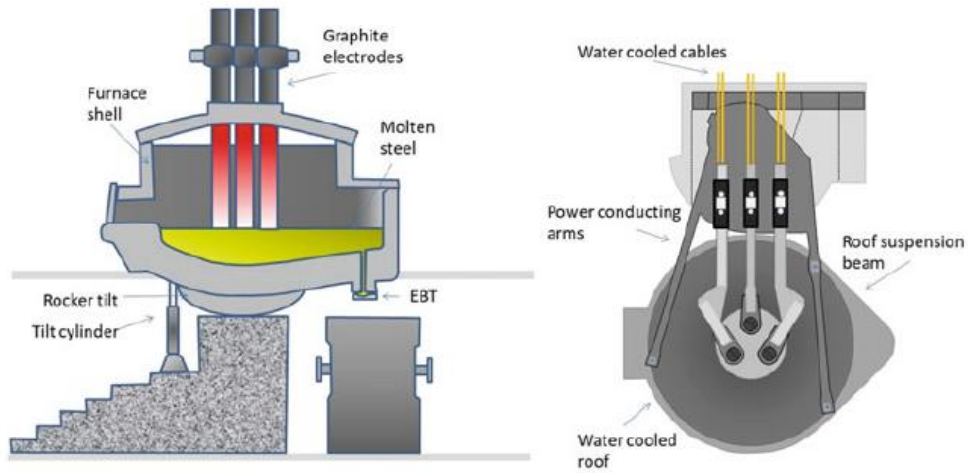
Εικόνα 1.3: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου BOF [1]

### 1.1.2 Μέθοδος ηλεκτρικού φούρνου -Electric Arc Furnace (EAF)

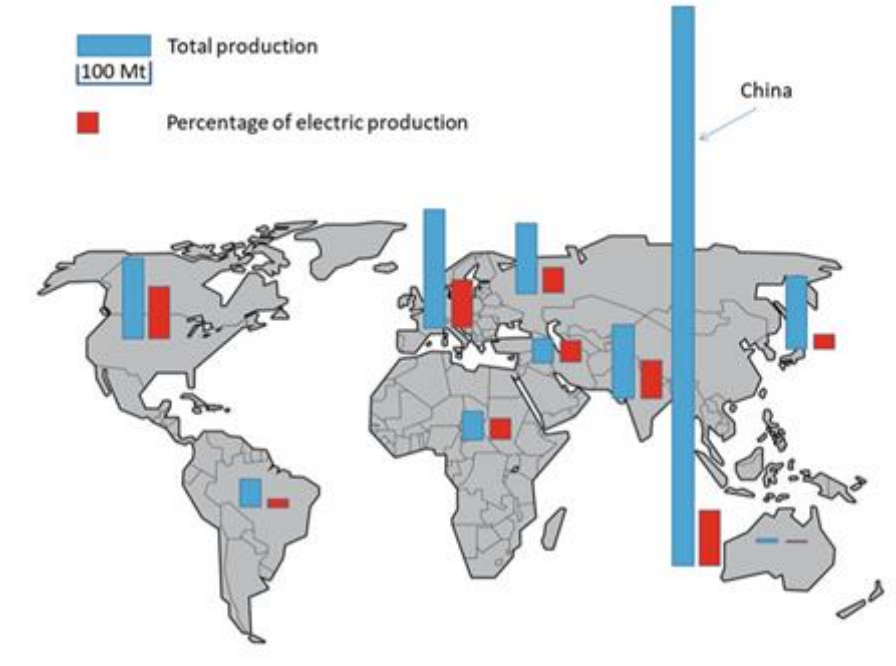
Κατά την μέθοδο του ηλεκτρικού φούρνου, χρησιμοποιείται θερμότητα η οποία προέρχεται από την αλληλεπίδραση ενός ηλεκτρικού τόξου μεταξύ ηλεκτροδίων από γραφίτη, και το μεταλλικό μείγμα στον φούρνο, έτσι ώστε να επιτευχθεί η τήξη των υλικών που τροφοδοτούνται στον φούρνο. Ενώ η ηλεκτρική ενέργεια παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που απαιτείται, χρησιμοποιείται συμπληρωματικά και θερμότητα μέσω καύσης καθαρού οξυγόνου με χρήση αερίου καυσίμου και έγχυσης οξυγόνου (για αύξηση της απόδοσης).

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι ότι δεν απαιτεί την παροχή υγρού σιδήρου άρα και την ανάγκη υψικαμίνου και άλλων σχετικών διεργασιών. Έτσι η τεχνολογία αυτή παρέχει την δυνατότητα αξιοποίησης μικρότερων μονάδων, οι οποίες λειτουργούν οικονομικά σε μικρότερη κλίμακα από ότι οι μεγάλες μονάδες παραγωγής χάλυβα. Κατά την συγκεκριμένη μέθοδο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο εύρος scrap, καθώς επίσης σπογγώδης σίδηρος (DRI) και υγρός σίδηρος (έως 30%). Αυτή η ανακύκλωση εξοικονομεί τα ακατέργαστα υλικά και την ενέργεια που θα χρειαζόταν για την παραγωγή τους. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η παραγωγική διαδικασία μπορεί να ξεκινήσει και να διακοπεί ανάλογα με μεταβλητές όπως η ζήτηση χάλυβα ή διαθεσιμότητα πρώτων υλών [4].

Αρχικά η μέθοδος ηλεκτρικού φούρνου βασιζόταν στην διαθεσιμότητα του scrap, όταν όμως η αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής οδήγησαν στην χαμηλότερη παραγωγή scrap, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της διαθεσιμότητας πρώτης ύλης και όσον αναφορά την ποσότητα και την ποιότητα. Τότε κατέφυγαν στην χρήση υγρού μετάλλου, σπογγώδης σιδήρου και άλλων πρώτων υλών για να αντικατασταθεί η χρήση scrap . Αυτό όχι μόνο πρόσφερε στην μέθοδο ανεξαρτησία από την παροχή scrap, αλλά επίσης έδωσε την δυνατότητα να ικανοποιούνται οι αυστηρές απαιτήσεις της τελικής σύστασης του χάλυβα , σε σχέση με τις συγκεντρώσεις επιβλαβών στοιχείων όπως χαλκού, χρωμίου, νικελίου και κασσίτερου. Έτσι πλέον η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή επίτεδων (χωρίς παραμορφώσεις) προϊόντων, συνεπώς οδηγώντας στην περαιτέρω ανάπτυξη της [3].



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου EAF [1]



**Εικόνα 1.5:** Ποσοστό παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας [1]

### 1.1.2 Δευτερογενής παραγωγή χάλυβα (Secondary Steelmaking)

Η δευτερογενής παραγωγή χάλυβα αποτελεί πλέον ένα αναπόσπαστο κομμάτι των συγχρόνων μονάδων παραγωγής χάλυβα. Η ανάπτυξη της είναι στενά συνδεδεμένη με την ανάπτυξη της συνεχής χύτευσης. Μέχρι την δεκαετία του 1960 κυριαρχούσε η χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων (ingot casting). Μέχρι το 2001, το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα, γίνεται μέσω συνεχούς χύτευσης. Τα επίπεδα ανοχής των ακαθαρσιών και των εγκλεισμάτων είναι χαμηλότερα στη συνεχή χύτευση από ότι κατά την χύτευση μιγιετών, καθιστώντας έτσι τη δευτερογενή επεξεργασία τους περισσότερο σημαντική.

Η παραγωγή χάλυβα σε φούρνους ή αλλιώς primary steelmaking, χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την γρήγορη τήξη scrap και γενικής βελτίωσης, αφήνοντας έτσι την περαιτέρω βελτίωση και έλεγχο για τη δευτερογενή παραγωγή χάλυβα. Υπάρχουν μέθοδοι όπως η ανάτηξη με ηλεκτροαγώγιμη σκουριά και ανάτηξη με βολταϊκό τόξο σε κενό οι οποίες επίσης πραγματοποιούν δευτερογενή βελτίωση. Επειδή όμως στην αρχή της διαδικασίας ξεκινούν με στερεοποιημένο χάλυβα τον οποίο στην συνέχεια ανατήκουν, δεν συμπεριλαμβάνονται ως μέθοδοι δευτερογενούς παραγωγής χάλυβα.

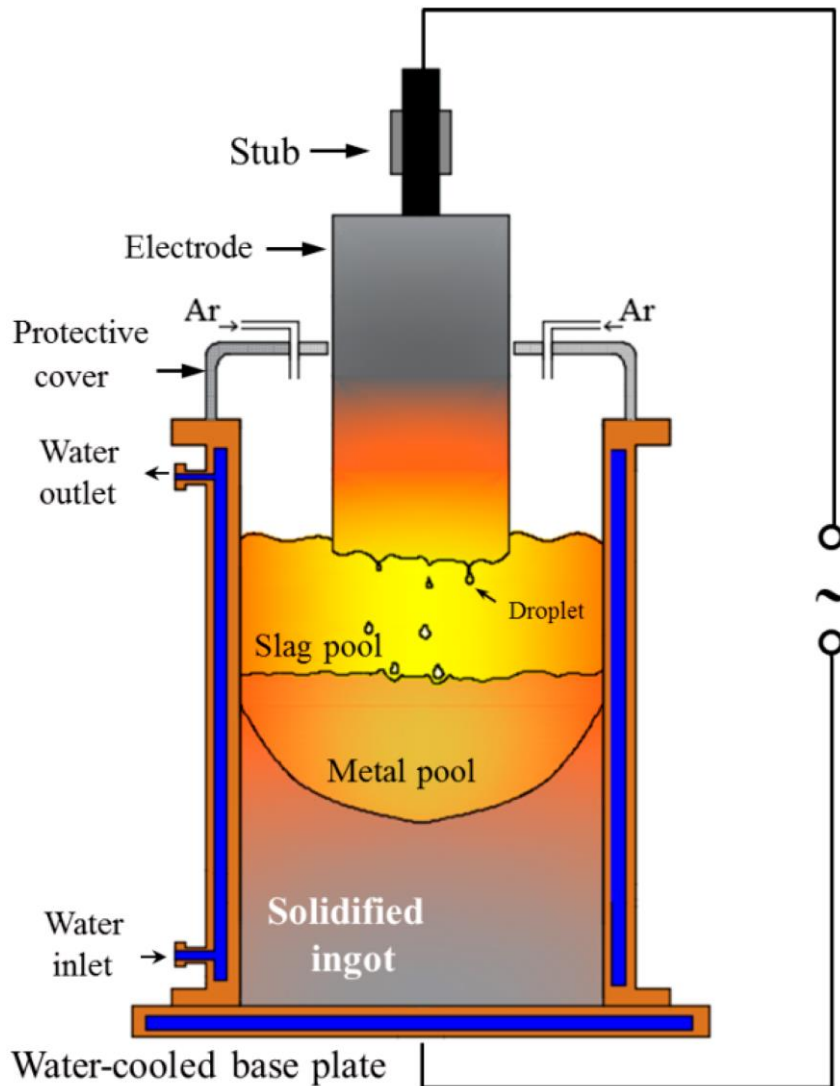
Οι επιβλαβείς ακαθαρσίες στον χάλυβα είναι το θείο, ο φώσφορος, το οξυγόνο και το υδρογόνο. Οι κύριες επιδράσεις αυτών των ακαθαρσιών στο χάλυβα είναι η μείωση της ολκιμότητας, της αντοχής στην κρούση και της αντοχής στη διάβρωση. Ποιο συγκεκριμένα κάθε στοιχείο έχει ξεχωριστή επίδραση στις ιδιότητες του χάλυβα. Το οξυγόνο και το θείο αποτελούν επίσης συστατικά μη μεταλλικών σωματιδίων στον χάλυβα, που οδηγούν σε

εγκλείσματα. Τα εγκλείσματα είναι επίσης επιβλαβή για τις ιδιότητες του χάλυβα, για αυτό πρέπει να αφαιρούνται όσο το δυνατόν περισσότερο. Σήμερα υπάρχουν διαφορετικές ποιότητες χάλυβα στις οποίες οι περιεκτικότητες του θείου, φωσφόρου, οξυγόνου και υδρογόνου, πρέπει να βρίσκονται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη περιεκτικότητα γίνεται.

## 1.2 ΑΝΑΤΗΞΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΑΓΩΓΙΜΗ ΣΚΩΡΙΑ-ELECTROSLAG REMELTING (ESR)

Η ανάτηξη με ηλεκτροαγώγιμη σκωρία, αποτελεί μια μέθοδο ανάτηξης ενός καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου, από το οποίο προκύπτει μία βελτιωμένη ράβδος υψηλής ποιότητας.

Σε αντίθεση με την ανάτηξη με βολταϊκό τόξο εν κενώ-Vacuum arc remelting (VAR), η ανάτηξη κατά την μέθοδο αυτή, δεν προκύπτει από την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού τόξου υπό το κενό. Η ράβδος 'χτίζεται' σε ένα υδρόψυκτο καλούπι, προερχόμενη από την τήξη ενός καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου που βρίσκεται βυθισμένο σε υπέρθερμη σκωρία.



Εικόνα 1.6: Σχηματική αναπαράσταση της ESR μεθόδου [26].



Η απαιτούμενη θερμότητα παράγεται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα (συνήθως εναλλασσόμενο) που διαρρέει την υγρή σκωρία, η οποία παρέχει ηλεκτρική αντίσταση. Καθώς η θερμοκρασία της σκωρίας αυξάνεται και τελικά υπερβαίνει την liquidus θερμοκρασία του μετάλλου, η άκρη του ηλεκτροδίου αρχίζει να τήκεται. Τα τηγμένα σταγονίδια μετάλλου περνάνε μέσα από την υγρή σκωρία και συγκεντρώνονται στο υδρόψυκτο καλούπι. Με αυτόν τον τρόπο, το μέταλλο βελτιώνεται και καθαρίζεται από προσμίξεις όπως οξειδία. Ο υψηλός βαθμός της υπερθέρμανσης της σκωρίας και του μετάλλου, ευνοεί την αντίδραση μεταξύ τους. Η τήξη της μορφής των σταγονιδίων μετάλλου, αυξάνει τη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και της σκωρίας. Οι έντονες αντιδράσεις μεταξύ του μετάλλου και της σκωρίας, οδηγούν σε σημαντική μείωση του θείου και των μη μεταλλικών εγκλεισμάτων. Τα εγκλείσματα που παραμένουν είναι πολύ μικρά και ομοιόμορφα κατανεμημένα στην ανατηγμένη ράβδο.

Ένα ακόμη ειδικό χαρακτηριστικό της μεθόδου ESR, όπως και στο (VAR), είναι η κατευθυνόμενη στερεοποίηση της ράβδου από κάτω προς τα πάνω. Η μικροδομή χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα και ομοιογένεια, καθώς επίσης και από την απουσία φαινομένων διαφορισμού και κοιλοτήτων συρρίκνωσης.

Η ομοιογένεια της ράβδου οδηγεί σε ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες στις διαμήκης και εγκάρσιες κατευθύνσεις μετά την κατεργασία εν θερμώ. Εξαιτίας της απουσίας μικροδιαφορισμού ή ετερογένειας στην κατανομή των μη μεταλλικών εγκλεισμάτων, η απόδοση του καλού υλικού της μπιγιέτας αυξάνεται με αποτέλεσμα το επιπλέον κόστος της ανάτηξης να δικαιολογείται. Ακόμα, η πολύ καθαρή και λεία επιφάνεια της ράβδου, βοηθάει στην μείωση του κόστους παραγωγής διότι καθιστά μη αναγκαία την πραγματοποίηση κάποιας επιφανειακής κατεργασίας πριν την λειτουργία εν θερμώ.

Ο βαθμός και η κατεύθυνση των μεταλλουργικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται κατά την μέθοδο, καθορίζονται από την χημική σύσταση του χάλυβα και της σκωρίας, αλλά και της ατμόσφαιρας που χρησιμοποιείται (αδρανές αέριο, αέρια κλπ.). Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι το λουτρό σκωρίας, μέσω του οποίου πραγματοποιείται μια συνεχής ροή μεταφοράς τηγμένου μετάλλου. Κατά την μεταφορά αυτή, οι συστάσεις της και του μετάλλου μεταβάλλονται, σύμφωνα με τις θερμοδυναμικές και κινητικές συνθήκες. Για να πραγματοποιήσει τις επιθυμητές λειτουργίες του, το λουτρό πρέπει να πληρεί συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

- Το σημείο τήξης του πρέπει να είναι χαμηλότερο από αυτό του μετάλλου που πρόκειται να ανατηχθεί.
- Πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο
- Η χημική του σύσταση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές χημικές αντιδράσεις (όπως απομάκρυνση του θείου και των οξειδίων).
- Πρέπει να έχει το κατάλληλο ιξώδες στην θερμοκρασία ανάτηξης.

Οι σκωρίες για την μέθοδο αυτή, συνήθως αποτελούνται από φθοριούχο ασβέστιο ( $\text{CaF}_2$ ), οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ), οξείδιο του αργίλου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), οξείδιο του μαγνησίου ( $\text{MgO}$ ), διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) και διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ). Έχουν αναπτυχθεί δυο παραλλαγές της συγκεκριμένης μεθόδου, η μία είναι η ανάτηξη υπό υψηλή πίεση, και η δεύτερη η ανάτηξη εν κενώ.

## Εφαρμογές

Η μέθοδος ανάτηξης με ηλεκτροαγώγιμη σκουριά, χρησιμοποιείται ευρέως ως μια μέθοδος τήξης για την παραγωγή ράβδων υψηλών προδιαγραφών, που απαιτούνται σε τομείς όπως:

- Θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας αλλά και πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (κυρίως για άξονες γεννητριών και τουρμπίνων)
- Αεροναυπηγική
- Στρατιωτική τεχνολογία

Γενικότερα, χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπερκραμάτων (κράματα με βάση το νικέλιο) ανοξείδωτων χαλύβων, εργαλειοχαλύβων και μεγάλων ράβδων σφυρηλάτησης [7].

Ορισμένες πιο συγκεκριμένες εφαρμογές είναι :

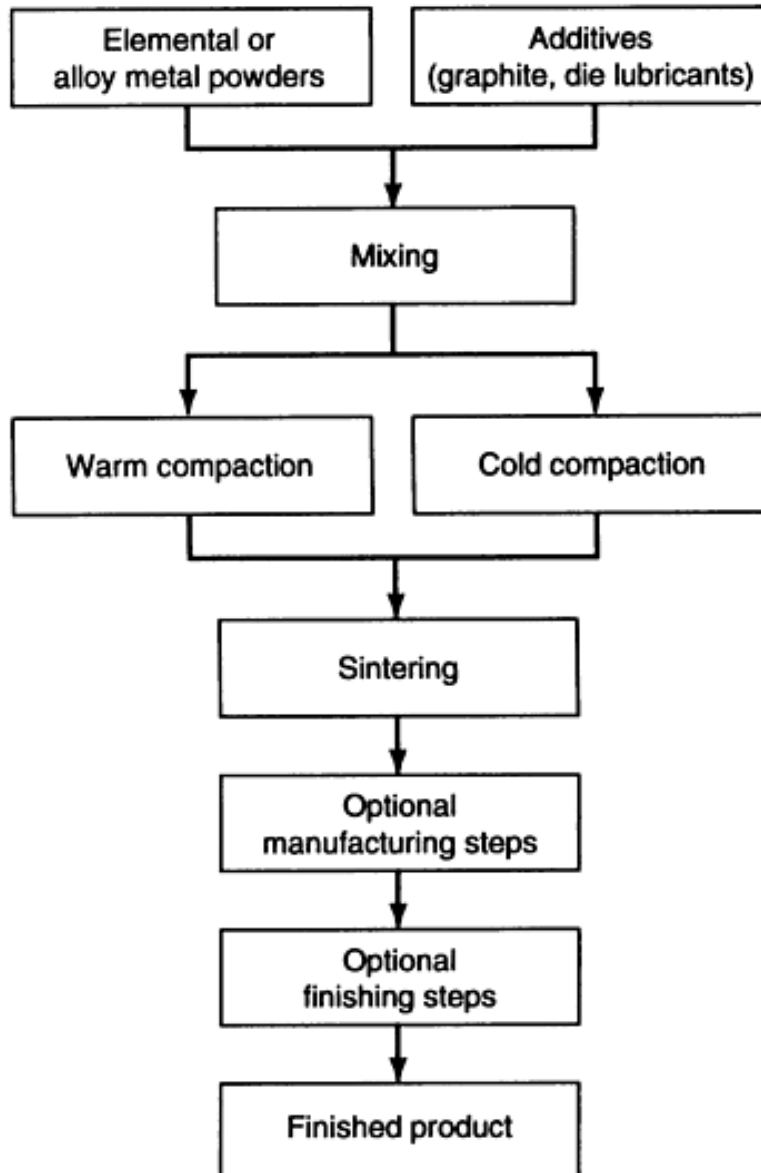
- Διωστήρες
- Δοχεία υψηλής πίεσεως
- Στροφαλοφόροι
- Ένσφαιροι τριβείς
- Ράουλα ψυχρής έλασης

## 1.3 ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑ

### 1.3.1 Εισαγωγή στις μεθόδους κονιομεταλλουργίας

Οι παραγωγικές μέθοδοι κονιομεταλλουργίας μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στις συμβατικές συμπίεσης και πυροσυσσωμάτωσης και στις διεργασίες πλήρους πυκνότητας.

- Οι συμβατικές τεχνολογίες συμπίεσης και πυροσυσσωμάτωσης ακολουθούν τα βήματα που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.7: Διάγραμμα ροής διεργασίας κονιομεταλλουργίας [8]

- Η δεύτερη κατηγορία επεξεργασίας κόνεως αφορά την παραγωγή ενός προϊόντος όσο πιο κοντά στην πλήρη πυκνότητά του γίνεται. Αυτό αντιτίθεται σημαντικά με τα προηγουμένως συμβατικά επεξεργασμένα προϊόντα, όπου η επίτευξη πλήρους πυκνότητας δεν ήταν πρωταρχικός στόχος. Οι διεργασίες πλήρους πυκνότητας περιλαμβάνουν τις εξής: Ισοστατική εν θερμώ συμπίεση-Hot Isostatic Pressing (HIP), Σφυρηλάτηση κόνεως-Powder Forging (P/F), Χύτευση με έγχυση μετάλλου-Metal Injection Molding (MIM), Roll compaction, Συμπίεση και διέλαση εν θερμώ- Hot pressing και Extrusion.

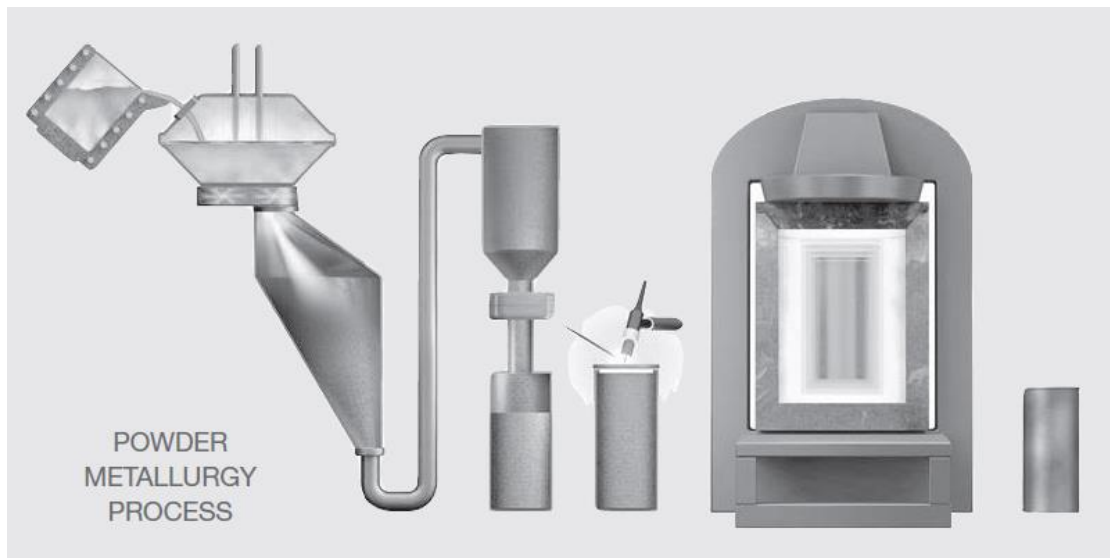
### 1.3.2 Γενικές μέθοδοι παραγωγής κόνεως

Μεταλλικές κόνεις μπορούν να παραχθούν από μηχανικές ή χημικές μεθόδους. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι περιλαμβάνουν την ατομοποίηση νερού και αερίου, άλεση, την μηχανική κραματοποίηση, και τις ηλεκτρολυτικές και χημικές μεθόδους όπως μείωση των οξειδίων.

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τον ρυθμό παραγωγής, τις ιδιότητες της κόνεως και τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του υλικού. Ο μηχανικός θρυμματισμός (ή άλεσμα) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για σκληρά μέταλλα και οξείδια. Παρόλα αυτά, μπορεί να είναι μια περιορισμένη μέθοδος εξαιτίας της ολκιμότητας των περισσοτέρων μετάλλων. Η ατομοποίηση (atomizing) αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο για την παραγωγή μεταλλικών και προκραματικών κόνεων από αλουμίνιο, ορείχαλκο, σίδηρο, ελαφρά κραματομένων χαλύβων, ανοξείδωτων χαλύβων, εργαλειοχαλύβων, υπερκραμμάτων, κραμάτων τιτανίου και άλλων κραμάτων. Είναι ίσως η περισσότερο ευέλικτη μέθοδος σε ένα ευρύ φάσμα παραγωγικού ρυθμού (από 1 έως  $10^5$  τόνους ανά χρόνο) και με μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος της κόνεως (από 10 έως 1000  $\mu\text{m}$ ). Η ατομοποίηση είναι απλούστατα η διάσπαση ενός υγρού σε λεπτά σταγονίδια. Οποιοδήποτε υλικό το οποίο είναι διαθέσιμο σε υγρή μορφή, μπορεί να ατμοποιηθεί.

### 1.3.2 Ισοστατική συμπίεση εν θερμό (HIP)

Είναι μία κατασκευαστική μέθοδος κονιομεταλλουργίας, κατά την οποία αέριο σε υψηλή πίεση εφαρμόζεται σε ένα προς κατεργασία κομμάτι, το οποίο έχει αυξημένη θερμοκρασία και βρίσκεται σε ένα ειδικά κατασκευασμένο δοχείο πίεσεως. Ο συνδυασμός αυτός θερμότητας και πίεσης στο δοχείο, σταθεροποιεί την κόνις στο τελικό της σχήμα, όπως ορίζεται από το αρχικό σχήμα του δοχείου. Το δοχείο αυτό πρέπει να αφαιρεθεί από το κομμάτι μετά τον κύκλο της διεργασίας, συνήθως μέσω μηχανουργικής κατεργασίας ή χημικής στύλβωσης. Κατά την ενοποίηση της μεταλλικής κόνεως σε στεγανά και ερμητικά κλειστά κουτιά, η συγκεκριμένη μέθοδος παραμορφώνει πλαστικά την κόνις η οποία εξαλείφει το πορώδες και πετυχαίνει 100% θεωρητική πυκνότητα στο κομμάτι. Το εύρος της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 480°C (896 F) για κόνεις κραμάτων αλουμινίου έως 1700°C (3092 F) για κόνεις βολφραμίου. Το μεγαλύτερο μέρος της εμπορικής χρήσης της HIP, αφορά την παραγωγή κραμάτων νικελίου στα οποία η θερμοκρασία κυμαίνεται από 1100°C (2012 F) έως 1205°C (2201 F). Αργό αέριο υψηλής πυκνότητας είναι το πιο σύνηθες αέριο μέσο, αλλά χρησιμοποιούνται και άλλα αέρια όπως ήλιο ή άζωτο. Η πίεση κυμαίνεται από 20 έως 300 MPa (3 έως 45 ksi) με την πίεση των 100 MPa (15 ksi) να είναι η περισσότερο συνηθισμένη.



Εικόνα 1.8: Διαδικασία Hot Isostatic Pressing (HIP) [9]

Μπορούν να παραχθούν αποδοτικά, υψηλής ποιότητας και επιδόσεων εξαρτήματα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής έναντι της χύτευσης, περιλαμβάνουν την ομοιόμορφη λεπτόκοκη δομή, χωρίς πορώδες λόγω συρρίκνωσης, εγκλείσματα και φαινομένων διαφορισμού, μείωση του χρόνου μηχανουργικής κατεργασίας λόγω της ημιτελικής μορφής και της λεπτότερης μικροδομής, και μείωση των παραμενουσών τάσεων που μπορούν να προκαλέσουν στο κομμάτι παραμορφώσεις κατά την τελική κατεργασία. Παρόλα η δυσκολία επίτευξης του κατάλληλου διαστασιακού ελέγχου, αποτρέπει την αποδοτική κατασκευή κομματιών με πολύπλοκη γεωμετρία μέσω της μεθόδου αυτής.

Εφαρμογές κομματιών ισοστατικής πύκνωσης εν θερμώ:

- Μπιγιέτες εργαλειοχαλύβων
- Κράματα νικελίου και τιτανίου για εξαρτήματα υψηλών θερμοκρασιών σε συστήματα τουρμπινών αεροσκαφών
- Κράματα νικελίου σε πετροχημικές βιομηχανίες πετρελαίου και αερίου για εξαρτήματα που απαιτούν αντοχή σε διάβρωση, σε κεφαλές φρεάτων και συστήματα σωληνώσεων.
- Κράματα νικελίου για την βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας (για εξαρτήματα που απαιτούν αντοχή σε διάβρωση στους αντιδραστήρες)
- Κράματα τιτανίου και κοβαλτίου για βιοιατρικά προσθετικά εμφυτεύματα
- Πυρίμαχα κράματα μετάλλων , για χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Καρβίδια για εξαρτήματα υψηλής αντοχής σε φθορά
- Σύνθετα υλικά με βάση το αλουμίνιο

Σύγκριση ισοστατικής πύκνωσης εν θερμώ, με τις υπόλοιπες μεθόδους κονιομεταλλουργίας.

- Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες οι οποίες πετυχαίνουν ή και υπερβαίνουν αυτές των χυτών η σφυρήλατων υλικών.
- Ανταγωνιστικότερη απέναντι σε μεγάλα χυτά η σφυρήλατα προϊόντα όπου απαιτείται σημαντική μηχανουργική κατεργασία για την ολοκλήρωση του τελικού προϊόντος.
- Καταλληλότερη για χαμηλές έως μεσαίες ποσότητες παραγωγής
- Περιορισμός εύρους χρησιμοποιούμενων υλικών λόγω εγγενούς κόστους της ίδιας της μεθόδου, επομένως συνήθως εφαρμόζεται μόνο για ακριβά υλικά.

#### 1.3.4 Πλεονεκτήματα κονιομεταλλουργίας

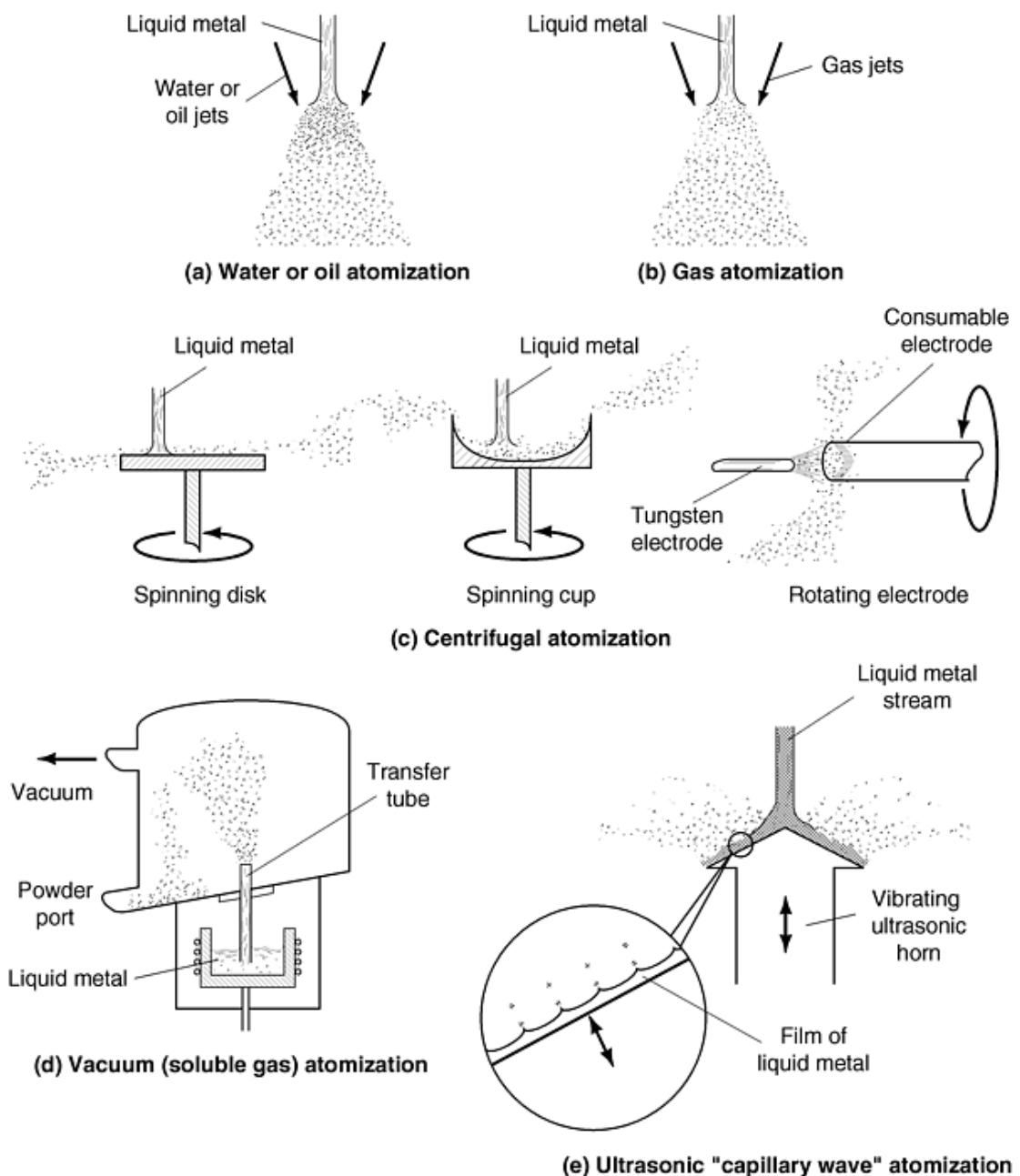
Η δυνατότητα που παρέχει η μέθοδος αυτή να παράγει ημιέτοιμα κομμάτια, είναι ο βασικός παράγοντας που ώθησε την εξέλιξη της. Άλλες συμβατικές κατασκευαστικές μέθοδοι για υλικά με υψηλό ποσοστό κραμάτωσης, έχουν χαμηλή παραγωγική απόδοση και αξιοποιούν μόνο το 10% με 30% της ποσότητας του αρχικού υλικού στο τελικό προϊόν (το υπόλοιπο ποσοστό χάνεται κατά την μηχανουργική κατεργασία). Η ισοστατική πύκνωση εν θερμώ, αυξάνει την δυνατότητα αξιοποίησης του υλικού σημαντικά. Συνήθως χάνεται μόνο το 10-20% του υλικού κατά την τελική μηχανουργική κατεργασία.

Η αδυναμία των πολύπλοκων ημιέτοιμων κομματιών να παρέχουν την δυνατότητα διεξαγωγής μη καταστροφικών δοκιμών για πιστοποίηση, έχει περιορίσει σχετικά την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, ιδιαίτερα για εφαρμογές σε κινητήρες τουρμπινών .

Κατά το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού ενός εξαρτήματος, πρέπει να επιλεγθεί το κατάλληλο υλικό και μέθοδος κατεργασίας του, έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι ανάγκες και απαιτήσεις της εφαρμογής. Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι για τους σχεδιαστές μεταξύ των οποίων είναι και ingot metallurgy (I/M) (μεταλλουργία μπιγιετών) και η κονιομεταλλουργία. Η (I/M) περιλαμβάνει την χύτευση ενός τηγμένου μετάλλου σε καλούπια, την στερεοποίησή του με σχετικά χαμηλό ρυθμό (0,1C/s) και στην συνέχεια την ολοκλήρωση του τελικού προϊόντος μέσω θερμομηχανικών κατεργασιών. Η χυτή ράβδος μετά τη χύτευση παρουσιάζει διακυμάνσεις στην χημική σύσταση, το πορώδες, και την ομοιογένεια στην μικροδομή περιέχοντας ισοαξονικούς και κιονοειδείς κόκκους. Κατεργασίες μετά την χύτευση (π.χ. θερμικές κατεργασίες, θερμομηχανικές κατεργασίες), βοηθούν στην ομογενοποίηση του υλικού και στην βελτίωση αυτών των ανωμαλιών. Ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις η συμβατική μεταλλουργία μέσω μπιγιετών περιορίζει το υλικό από την επίτευξη του συνόλου των δυνατοτήτων του όσον αναφορά τις ιδιότητες.

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στα υλικά να πετύχουν υψηλότερα ποσοστά κραμάτωσης χωρίς να εμφανίζονται φαινόμενα διαφορισμού. Αφού αποκτηθεί κατάλληλη πυκνότητα μετά την ισοστατική πύκνωση εν θερμώ, το υλικό κονιομεταλλουργίας έχει μικροδομή με λεπτό ισοαξονικό μέγεθος κόκκου. Αυτή η ομοιόμορφη μικροδομή με τη σταθερή σύσταση, οδηγεί σε ισοτροπικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες . Η σύσταση έχει λιγότερες διακυμάνσεις από την σύσταση των I/M προϊόντων. Συντά οι μηχανικές ιδιότητες βελτιώνονται εξαιτίας του λεπτού μεγέθους κόκκου και της καλής διασποράς των διαθέσιμων κατακρημνισμάτων για ενίσχυση. Οι καλύτερες ιδιότητες επεκτείνουν του κύκλους εργασίας του προϊόντος ή επιτρέπουν υλικά χαμηλότερης ποιότητας, να χρησιμοποιούνται σε περισσότερο απαιτητικές εφαρμογές. Ακόμα, βελτιώνεται η κατεργασιμότητα εξαιτίας της ομοιογένειας της μικροδομής των υλικών κονιομεταλλουργίας.

Ένα παράδειγμα της υπεροχής της κονιομεταλλουργίας έναντι της I/M , είναι στους υψηλά κραματωμένους εργαλειοχάλυβες. Με την πάροδο των χρόνων, οι παραγωγοί αυτών των υλικών έχουν αυξήσει το ποσοστό των καρβιδιογόνων στοιχείων, όπως μολυβδαίνιο, βολφράμιο, και βανάδιο έτσι ώστε να επιτευχθεί αυξημένη αντοχή σε φθορά. Η αύξηση των στοιχείων κραμάτωσης έχει οδηγήσει στην αύξηση του διαφορισμού, με αποτέλεσμα χαμηλότερες παραγωγικές αποδόσεις και έλλειψη δυσθραυστότητας. Εξαιτίας της καλής φύσης των καρβιδίων, στο προϊόν κονιομεταλλουργίας, βελτιώνεται ιδιαίτερα η αντοχή σε φθορά και η δυσθραυστότητα περισσότερο από ότι στα I/M προϊόντα [8].



Εικόνα 1.9: Διεργασία Atomization [8]

#### 1.4 ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ-ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Η προσθετική κατασκευή μπορεί να περιγραφεί ως η διαδικασία σύνδεσης η προσθήκης υλικών με βασικό στόχο την παραγωγή αντικειμένων από ένα μοντέλο τριών διαστάσεων, χρησιμοποιώντας την αρχή της εναποθέσεως ανά στρώση. Σε αντίθεση με τις συμβατικές κατασκευαστικές τεχνικές, όπως η μηχανουργική κατεργασία, οι οποίες συνηθίζουν να κατασκευάζουν προϊόντα αφαιρώντας υλικό από ένα μεγαλύτερο κομμάτι η ένα φύλλο μετάλλου, η τεχνική της προσθετικής κατασκευής δημιουργεί τελικά σχήματα προσθέτοντας υλικό. Εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας αφορούν τις βιομηχανίες ιατρικής, αεροναυπηγικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Η τεχνολογία αυτή αποτελείται στην ουσία από 3 βασικά βήματα:

1. Αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο στερεό μοντέλο μέσω χρήσης υπολογιστή και μετατρέπεται σε ένα στάνταρ τύπο αρχείου προσθετικής κατασκευής.
2. Στην συνέχεια αυτό το αρχείο στέλνεται στο μηχάνημα προσθετικής κατασκευής, όπου εκεί προσαρμόζεται στην απαιτούμενη κλίμακα.
3. Το κομμάτι χτίζεται στρώση ανά στρώση στο μηχάνημα

Οι προσθετικές κατασκευές για την παραγωγή μεταλλικών προϊόντων, χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Αυτές που βασίζονται σε ένα κρεβάτι κόνεως, αυτές που βασίζονται στην τροφοδοσία κόνεως και σε αυτές που βασίζονται στην τροφοδοσία σύρματος.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής, είναι τα ακόλουθα:

- Αποδοτικότητα στην χρήση υλικού. Σε αντίθεση με την συμβατική παραγωγή η οποία βασίζεται στην αφαίρεση υλικού, κατά την προσθετική κατασκευή γίνεται χρήση του ακατέργαστου υλικού χτίζοντας κομμάτια με διαδοχικά στρώματα. Τα υλικά που περισσεύουν συχνά επαναχρησιμοποιούνται μετά από ελάχιστη επεξεργασία.
- Αποδοτικότητα στην χρήση πόρων. Η συμβατική παραγωγή συνήθως απαιτεί επιπλέον βοηθητικούς πόρους όπως κοπτικά εργαλεία και ψυκτικά μέσα εκτός από τη βασική εργαλειομηχανή. Αντίθετα, η προσθετική κατασκευή δεν απαιτεί αυτούς τους επιπλέον πόρους. Ως αποτέλεσμα μια πληθώρα κομματιών μπορούν να παραχθούν από μικρούς κατασκευαστές οι οποίοι βρίσκονται κοντά στους πελάτες τους. Αυτό το σενάριο παρουσιάζει την ευκαιρία για την βελτίωση της δυναμικής της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- Ευελιξία κομματιού. Επειδή στην συγκεκριμένη μέθοδο δεν υπάρχουν περιορισμοί εργαλείων, κομμάτια με σύνθετη γεωμετρία μπορούν συχνά να κατασκευασθούν σε ένα κομμάτι. Αυτό επιτρέπει στο κομμάτι να μην θυσιάζει την λειτουργικότητά του με σκοπό να διασφαλίζεται η άνεση και η επαναληψιμότητα κατά την παραγωγή του. Επιπλέον, είναι δυνατό να κατασκευασθεί ένα κομμάτι με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες όπως ολκιμότητα στο ένα μέρος και ψαθυρότητα στο υπόλοιπο. Αυτό έχει δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για καινοτομίες στον σχεδιασμό.
- Ευελιξία κατά την παραγωγή. Οι μηχανές προσθετικής κατασκευής δεν απαιτούν ρυθμίσεις υψηλού κόστους, άρα μπορούν να είναι οικονομικά αποδοτικές και για την παραγωγή μικρών παρτίδων. Η συνολική ποιότητα του κομματιού είναι εξαρτημένη από την μέθοδο που χρησιμοποιείται και όχι από την τεχνική και εμπειρία ενός



χειριστή, το οποίο επιτρέπει στην παραγωγή να συγχρονίζεται με τις απαιτήσεις του πελάτη.

Παρ' όλα αυτά, η προσθετική κατασκευή δεν μπορεί να συναγωνιστεί πλήρως την συμβατική παραγωγή, ειδικά τον τομέα της μαζικής παραγωγής, κυρίως λόγω των ακόλουθων λόγων [10]:

- Περιορισμός στο μέγεθος του τελικού προϊόντος.
- Παρουσία ατελειών στο τελικό προϊόν.
- Υψηλό κόστος

## 1.5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

*Οι χάλυβες όσο αναφορά την χημική τους σύσταση μπορούν να διακριθούν σε κοινούς η ανθρακούχους και κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.*

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες ονομάζονται τα κράματα σιδήρου-άνθρακα (Fe-C), τα οποία εκτός από τις συνήθεις ακαθαρσίες (έως 0.04%P και 0.05%S) δεν περιέχουν άλλα κραματικά στοιχεία εκτός από μαγγάνιο (Mn) σε χαμηλά ποσοστά.

Ο κοινός χάλυβας παρουσιάζει χαμηλή αντοχή σε μηχανική φθορά, διάβρωση, χαμηλή εμβαιότητα, και μη επαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα. Οι προσθήκες κραματικών στοιχείων μπορεί να βελτιώσει τις παραπάνω ιδιότητες. Το ποσοστό άνθρακα στους κραματωμένους χάλυβες πρακτικά είναι μικρότερο του 1% με τα πιο συνηθισμένα κύρια στοιχεία κραμάτωσης να είναι το νικέλιο (Ni), το μαγγάνιο (Mn), το χρώμιο (Cr), το πυρίτιο (Si), και το μολυβδαίνιο (Mo) και δευτερεύοντα στοιχεία κραμάτωσης τα βανάδιο (V), το βολφράμιο (W), ο χαλκός (Cu), το τιτάριο (Ti), το αλουμίνιο (Al), το βόριο (B), ο μόλυβδος (Pb), και το νιόβιο (Nb).

Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε :

1. Ελαφρά κραματωμένους η μικροκραματωμένους όπου το ποσοστό των κραματικών στοιχείων είναι μικρότερο του 2%.
2. Μετρίως κραματωμένους , με ποσοστό κραματικών στοιχείων από 2% έως 10%.
3. Ισχυρά κραματωμένους όπου το ποσοστό των κραματικών στοιχείων είναι μεγαλύτερο του 10%.

Χάλυβες διαμόρφωσης ονομάζονται οι χάλυβες οι οποίοι για την μορφοποίησή τους έχουν υποστεί μια κατεργασία διαμόρφωσης (η περιεκτικότητα τους σε άνθρακα θα καθορίσει της χρήση του). Χάλυβες χύτευσης ή χυτοχάλυβες ονομάζονται οι χάλυβες για τους οποίους μορφοποίησή τους γίνεται με απευθείας χύτευση σε κατάλληλα καλούπια (συνήθως σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν υποευκτοειδείς χάλυβες με ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0,5%)

Ανάλογα με τις χρήσεις τους οι χάλυβες διακρίνονται σε :

1. Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, χάλυβες των οποίων η χημική σύσταση περιέχει νικέλιο, χρώμιο, νικέλιο-χρώμιο, μαγγάνιο-πυρίτιο, χρώμιο-μολυβδαίνιο, χρώμιο-βαναδιο, μαγγάνιο-πυρίτιο, χάλυβες μαρτενγήρανσης κλπ)
2. Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες με αντοχή σε φθορά από τριβή , καλή δυσθραυστότητα , καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε επαναφορά)
3. Ανοξείδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες
4. Χάλυβες που προορίζονται για εφαρμογές ηλεκτρομαγνητισμού (μαλακοί μαγνήτες , μη μαγνητικοί χάλυβες)

Οι εργαλειοχάλυβες αποτελούν ένα πάρα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα. Το ποσοστό άνθρακα στην χημική του σύσταση κυμαίνεται μεταξύ 0,6 και 1,4% και ως κραματικά στοιχεία χρησιμοποιούν μαγγάνιο χρώμιο βανάδιο (V),βολφράμιο (W),μολυβδαίνιο (Mo),κοβάλτιο (Co),νικέλιο (Ni) και πυρίτιο (Si). Τα κραματικά στοιχεία των εργαλειοχαλύβων είναι καρβιδιογόνα, σχηματίζουν δηλαδή σταθερά καρβίδια με αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλής σκληρότητας.

Με την κατάλληλη θερμική κατεργασία σε ένα εργαλειοχάλυβα μπορούν να επιτευχθούν ιδιότητες όπως: υψηλή σκληρότητα η οποία μπορεί να διατηρηθεί έως και την θερμοκρασία των 600°C, μεγάλη εμβαπτότητα, αντοχή εν θερμό, καλή δυσθραυστότητα και καλή αντοχή σε φθορά και τριβή [11].

## 2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η θερμική κατεργασία μπορεί να οριστεί ως η θέρμανση και η ψύξη ενός στερεού μετάλλου ή κράματος, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποκτηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες ή συνθήκες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικοί λόγοι για τους οποίους πραγματοποιούνται οι θερμικές κατεργασίες:

- Αφαίρεση παραμένων τάσεων, όπως αυτές που δημιουργούνται κατά την μηχανουργική κατεργασία
- Τροποποίηση του μεγέθους κόκκου της μικροδομής του χάλυβα
- Βελτίωση της αντοχής σε φθορά της επιφάνειας ενός κράματος, αυξάνοντας την σκληρότητα και ταυτόχρονα την αντοχή σε κρούση με την διατήρηση μιας μαλακής και όλκιμης καρδιάς.
- Βελτίωση των ιδιοτήτων μια οικονομικής ποιότητας χάλυβα καθιστώντας το εφικτό έτσι να αντικαταστήσει έναν χάλυβα ακριβότερης ποιότητας, μειώνοντας το κόστος του υλικού σε μία εφαρμογή.
- Αύξηση της δυσθραυστότητας παρέχοντας έναν συνδυασμό υψηλής εφελκυστικής αντοχής και καλής ολκιμότητας έτσι ώστε να βελτιωθεί η αντοχή σε κρούση.
- Βελτίωση των ιδιοτήτων κοπής των εργαλαιοχαλύβων.
- Βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων
- Αλλαγή η τροποποίηση των μαγνητικών ιδιοτήτων

Οι πιο βασικές θερμικές κατεργασίες χαλύβων είναι: Ανόπτηση (Annealing), Ανόπτηση εξομάλυνσης (Normalizing), Αποτατική ανόπτηση (Stress relieving), Επιφανειακή σκλήρυνση (Surface hardening), Απόψυξη (Quenching), Επαναφορά (Tempering), Κρυογονικές κατεργασίες (Cold/Cryogenic treatments) [14].

### 2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η επιφανειακή σκλήρυνση είναι μια διεργασία η οποία περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος τεχνικών και χρησιμοποιείται για την βελτίωση της αντοχής σε φθορά των κομματιών , χωρίς να επηρεάζεται το πιο μαλακό, δύσθραυστο εσωτερικό του κομματιού. Ο συνδυασμός μίας σκληρής επιφάνειας και της αντοχής στο σπάσιμο κατά την κρούση είναι χρήσιμος σε κομμάτια όπως συγκεκριμένα γρανάζια (cam ή ring gear) τα οποία απαιτούν μια πολύ σκληρή επιφάνεια ώστε να αντέξουν στην φθορά, μαζί με ένα δύσθραυστο εσωτερικό ώστε να αντέξει την κρούση που υπάρχει κατά την λειτουργία.

Οι διεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Μέθοδοι οι οποίες περιλαμβάνουν μία εσκεμμένη προσθήκη μιας καινούργιας επίστρωσης.
2. Μέθοδοι οι οποίες περιλαμβάνουν επιφανειακή και υποεπιφανειακή τροποποίηση χωρίς κάποια σκόπιμη προσθήκη ή αύξηση των διαστάσεων του κομματιού.

### 2.2.1 Ενανθράκωση

Ενανθράκωση είναι η προσθήκη άνθρακα στην επιφάνεια χαλύβων χαμηλού άνθρακα, σε θερμοκρασίες ( γενικά μεταξύ 850 και 950 C ή 1560 και 1740 F ) όπου ο ωστενίτης με την υψηλή διαλυτότητά του σε άνθρακα είναι η σταθερή κρυσταλλική δομή. Η σκλήρυνση επιτυγχάνεται όταν η επιφάνεια υψηλής περιεκτικότητας άνθρακα αποψύχεται σχηματίζοντας μαρτενσίτη, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα μαρτενσιτικό κέλυφος υψηλού άνθρακα με καλή αντοχή σε φθορά και κόπωση το οποίο περικλείει ένα δύσθραυστο, χαμηλού άνθρακα χαλύβδινο εσωτερικό. Από τις διάφορες μεθόδους διάχυσης, η περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η αέρια ενανθράκωση (gas carburizing) στην συνέχεια η αέρια εναζώτωση (gas nitriding) και η ενανθρακαζώτωση (carbonitriding).

Η επιφανειακή σκλήρυνση ενανθρακωμένων χαλύβων καθορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Όταν η περιεκτικότητα άνθρακα στον χάλυβα υπερβαίνει περίπου το 0,5%, ο επιπλέον άνθρακας δεν έχει επίδραση στην σκληρότητα αλλά βελτιώνει την εμβαπτότητα. Άνθρακας περισσότερο από 0,5%, μπορεί να μην διαλυθεί, απαιτώντας έτσι υψηλές θερμοκρασίες με σκοπό την εξασφάλιση διαλυτοποίησης άνθρακα – ωστενίτη.

Το βάθος ενανθράκωσης ενανθρακωμένου χάλυβα εξαρτάται από τον χρόνο ενανθράκωσης και την δυναμικότητα του άνθρακα στην επιφάνεια. Όταν χρησιμοποιούνται παρατεταμένοι χρόνοι ενανθράκωσης για μεγάλα βάθη ενανθράκωσης, η υψηλή δυναμικότητα του άνθρακα παράγει μια επιφάνεια υψηλού άνθρακα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικό παραμένον ωστενίτη ή ελεύθερα καρβίδια. Αυτά τα δύο στοιχεία της μικροδομής, έχουν αρνητική επίδραση στην κατανομή παραμενουσών τάσεων στο ενανθρακωμένο κομμάτι. Συνεπώς μια υψηλή δυναμικότητα σε άνθρακα, θα είναι ποιο κατάλληλο να συνδυαστεί με μικρούς χρόνους ενανθράκωσης. Η επιλογή της δυναμικότητας του άνθρακα επίσης εξαρτάται από την αντίδραση στην ενανθράκωση κάθε συγκεκριμένου χάλυβα.

Ενανθράκωση σε χάλυβες για επιφανειακή βαφή: Συνήθως η χημική τους σύσταση περιέχει ποσοστό άνθρακα περίπου 0,2% με την δυναμικότητα του άνθρακα της επιφάνειας που ενανθρακώνεται να κυμαίνεται από 0,8% έως 1%. Βέβαια ο επιφανειακός άνθρακας συχνά περιορίζεται στο 0,9% για την αποφυγή παραμένον ωστενίτη και ψαθυρού μαρτενσίτη (λόγω του σχηματισμού προευκτικοειδών καρβιδίων στα όρια των κόκκων) [12].

### Εξανθράκωση

Εξανθράκωση είναι η απώλεια ατόμων άνθρακα από την επιφάνεια του κομματιού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια επιφάνεια με χαμηλότερο ποσοστό σε άνθρακα από το ποσοστό που υπάρχει σε μία μικρή απόσταση κάτω από την επιφάνεια.

Εάν η ενανθράκωση προάγει τη θετική μεταφορά άνθρακα από το περιβάλλον προς το υλικό, τότε η εξανθράκωση προάγει αρνητική. Οι ωφέλιμες ιδιότητες που αναπτύσσονται κατά την ενανθράκωση και τη σκλήρυνση δεν θα μπορούν να αξιοποιηθούν, εάν στην επιφάνεια του κομματιού υπάρχει εξανθράκωση. Έτσι η εξανθράκωση είναι ένα μη επιθυμητό μεταλλουργικό φαινόμενο. Το βέλτιστο ποσοστό εξανθράκωσης θεωρείται πως είναι μηδενικό, αλλά στην πραγματικότητα ένα μικρό ποσοστό πιθανώς να πραγματοποιηθεί. Σε καλά οργανωμένες μονάδες ενανθράκωσης και σκλήρυνσης, η εξανθράκωση των βαμμένων επιφανειών, δεν φαίνεται να είναι πρόβλημα. Αυτό αποδίδεται στον καλά συντηρημένο εξοπλισμό και στην καλή λειτουργία της διαδικασίας. Ωστόσο κατά την επιφανειακή βαφή, τα αέρια μείγματα που χρησιμοποιούνται, αναγκαστικά περιέχουν παράγοντες εξανθράκωσης. Εφόσον αυτοί οι

παράγοντες είναι παρόντες, υπάρχει πάντα η πιθανότητα μιας απώλειας ελέγχου της ατμόσφαιρας του φούρνου για οποιοδήποτε λόγο, η οποία θα οδηγήσει σε εξανθράκωση στα κομμάτια υπό κατεργασία [13].

## 2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Τα κομμάτια κονιομεταλλουργίας υποβάλλονται σε πολλές θερμικές κατεργασίες κάποιες εκ των οποίων είναι μοναδικές για την κονιομεταλλουργία ενώ άλλες είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται και σε άλλες κατασκευαστικές μεθόδους όπως σφυρηλάτηση και χύτευση. Αυτές περιλαμβάνουν την:

- Ανόπτηση κόνεως
- Πυροσυσσωμάτωση
- Επιφανειακή σκλήρυνση
- Ενανθρακαζώτωση
- Επιφανειακή ενανθράκωση
- Ολική βαφή
- Επαγωγική σκλήρυνση
- Κατεργασία ατμού

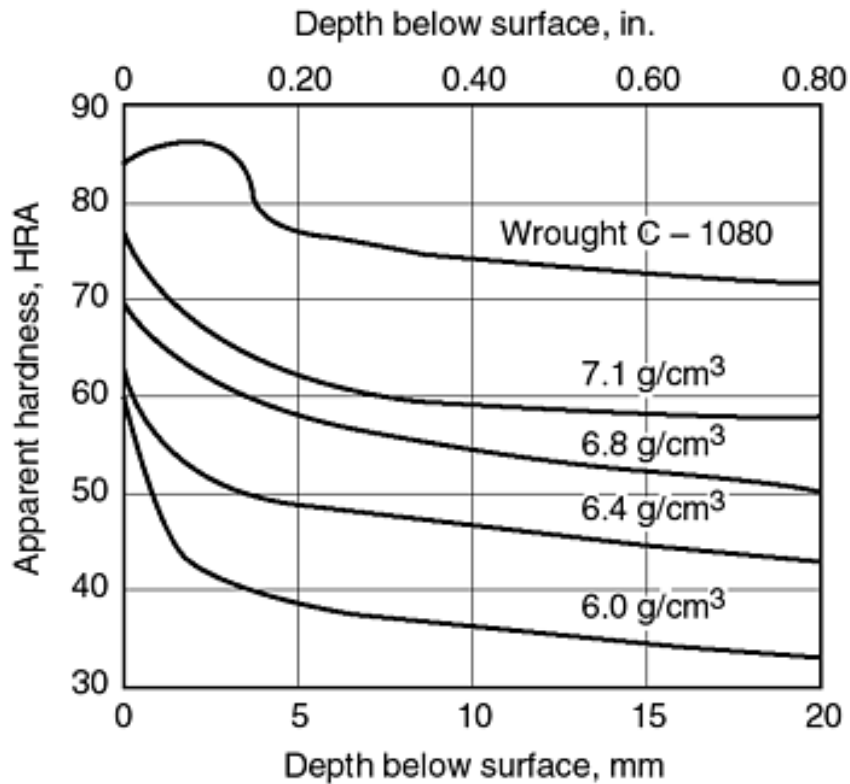
Σε αντίθεση με τους σφυρήλατους χάλυβες όπου η αύξηση της σκληρότητας μέσω των θερμικών κατεργασιών επηρεάζεται από την χημική σύσταση και το μέγεθος του κόκκου, η εμβαπτότητα στα κομμάτια κονιομεταλλουργίας επηρεάζεται σημαντικά από το πορώδες διασύνδεσης, το οποίο κάνει την δομή διαπερατή σε αέρια και υγρά. Τα κομμάτια κονιομεταλλουργίας μετά την πυροσυσσωμάτωση συνήθως περιέχουν ένα ελάχιστο ποσοστό 10% παραμένων εσωτερικού πορώδους (κατά τις μεθόδους συμπίεσης και πυροσυσσωμάτωσης). Κατά την μέθοδο της συμπίεσης εν θερμώ, το ελάχιστο ποσοστό παραμένων πορώδους μπορεί να μειωθεί περίπου στο 5%.

Στην κονιομεταλλουργία συνήθως προκύπτουν διαστασιακές μεταβολές (συρρίκνωση) κατά την βαφή και την επαναφορά. Σε μη σύνθετες γεωμετρίες η συρρίκνωση μπορεί να προβλεφθεί και να προσαρμοσθεί στο σχέδιο του εργαλείου συμπίεσης. Σε πιο σύνθετες γεωμετρίες εξαρτημάτων όμως, διακυμάνσεις στο πορώδες μπορούν να προκαλέσουν παραμόρφωση στο εξάρτημα κατά την θερμική κατεργασία, η οποία μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία ή την εφαρμογή του κομματιού στον μηχανισμό. Όταν κάτι τέτοιο προκύπτει, συνήθως χρειάζεται μία τελική κατεργασία η οποία αναιρεί το οικονομικό πλεονέκτημα της κονιομεταλλουργίας.

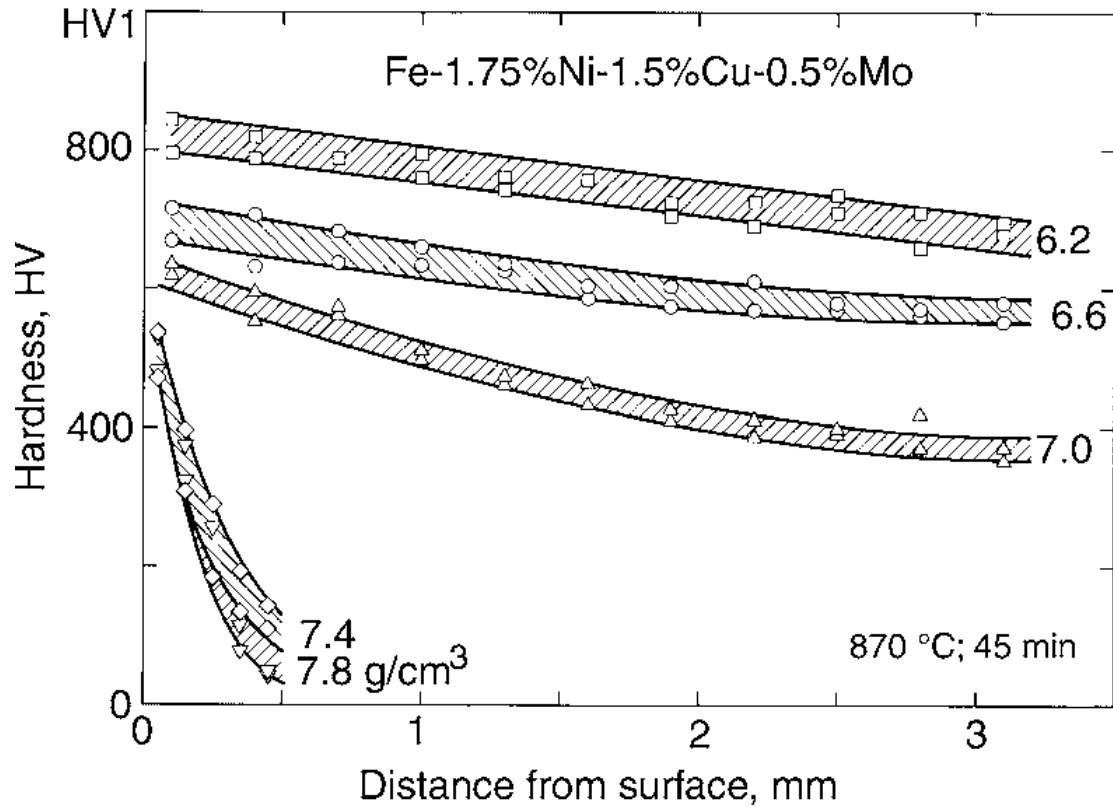
Επίσης η διαπερατότητα επηρεάζει την εμβαπτότητα του υλικού. Το διασυνδεδεμένο υλικό δρα σαν ένας μονωτής και μειώνει την θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Κατά την ταχεία απόψυξη από την ωστενιτική περιοχή, η διαπερατότητα καθυστερεί τον ρυθμό απόψυξης, και οδηγεί σε ανάμεικτη μικροδομή και ασυνέπεια στις μετρήσεις σκληρότητας. Αυτές οι μεταβολές αυξάνονται με την πολυπλοκότητα στην γεωμετρία.

### 2.3.1 Συνέπειες τους πορώδους στις ιδιότητες και στο βάθος ενανθράκωσης

Τα προϊόντα κονιομεταλλουργίας είναι μοναδικά λόγω της διαπερατότητάς τους. Αυτή η διαπερατότητα μειώνει τη θεωρητική πυκνότητα του μετάλλου βάσης, αλλάζει την θερμική αγωγιμότητα όπως αναφέρθηκε νωρίτερα και επίσης επηρεάζει άλλες φυσικές ιδιότητες όπως τον φερρομαγνητισμό και το μέτρο ελαστικότητας. Μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κόπωση και αντοχή σε κρούση, επηρεάζονται άμεσα από το πορώδες. Εξαιτίας αυτής της επίδρασης, η εμβαπτότητα ενός φερριτικού κράματος κονιομεταλλουργίας, μειώνεται αναλογικά με την αύξηση του πορώδους, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



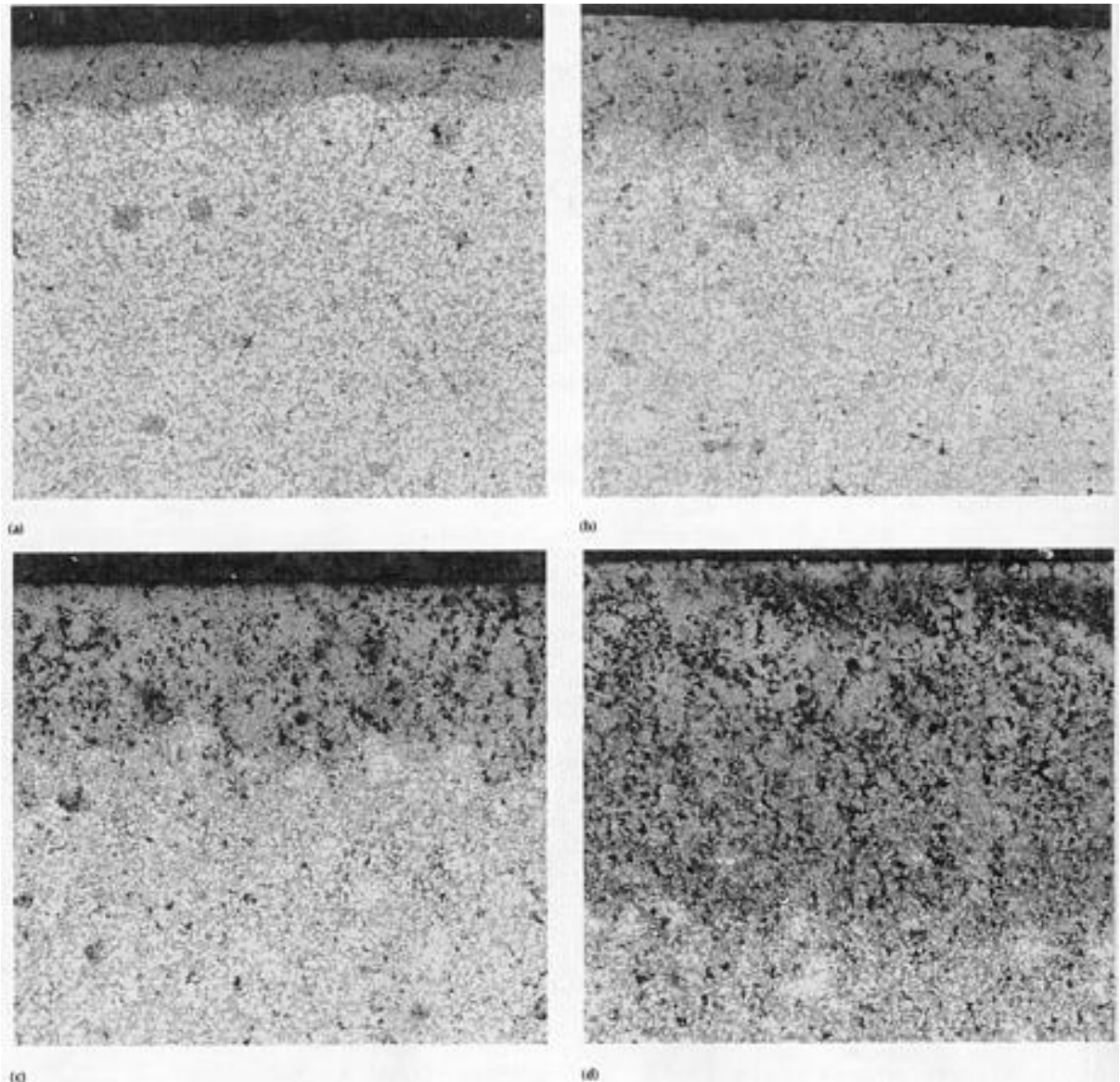
**Εικόνα 2.1:** Σύγκριση από βαφές σε νερό δοκιμών Jominy (ASTM A 255) πυροσυσσωματωμένων χαλύβδινων δοκιμίων (πυκνότητας από 6,0 έως 7,1 g/cm<sup>3</sup>) με σφυρήλατο χάλυβα C-1080 παρόμοιας σύστασης [15].



**Εικόνα 2.2:** Επίδραση της πυκνότητας στο βάθος ενανθράκωσης, το οποίο έχει μετρηθεί εγκάρσια από την επιφάνεια [15].

Σε χαλύβδινα κομμάτια κονιομεταλλουργίας με διασυνδεδεμένο πορώδες, οι κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης όπως η ενανθράκωση, ενανθρακάζωση, απαιτούν ακριβή έλεγχο κατά την διαδικασία τους εξαιτίας της ταχείας διεύθυνσης ατμοσφαιρικών αερίων. Αυτές οι ατμόσφαιρες, πιθανώς υψηλού άνθρακα, διαχέονται στις εσωτερικές επιφάνειες του πορώδους στον ίδιο ρυθμό, με τον οποίο οι εξωτερικές επιφάνειες του κομματιού προκαλούν ταχεία ενανθράκωση σε σημαντικό βάθος κάτω από την επιφάνεια. Και έτσι συνεπάγεται η απώλεια μιας ζώνης μετάβασης.

Οι παρακάτω μικρογραφίες παρουσιάζουν μικροδομές δειγμάτων χαλύβων κονιομεταλλουργίας, οι οποίοι ενανθρακώθηκαν στους 865°C (1590 F) για 30 λεπτά. Τα δοκίμια επεξεργάστηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να επιτευχθούν πυκνότητες πθροσσωμάτων που κυμαίνονται από 7,0 έως 7,7 g/cm<sup>3</sup>.



**Εικόνα 2.3:** (a)  $7.72 \text{ g/cm}^3$  and  $0.23 \text{ mm}$  (b)  $7.45 \text{ g/cm}^3$ , and  $0.46 \text{ mm}$  (c)  $7.34 \text{ g/cm}^3$  and  $0.6 \text{ mm}$  (d)  $7.08 \text{ g/cm}^3$  and  $1.25 \text{ mm}$  [15].

Όπως φαίνεται, η αυξανόμενη πυκνότητα συνοδεύεται από μία αναλογική μείωση στην διείσδυση άνθρακα. Στα  $7,2 \text{ g/cm}^3$ , οι διασυνδεδεμένοι (interconnected) πόροι αρχίζουν να κλείνουν με αποτέλεσμα να εμποδίζουν τα ατμοσφαιρικά αέρια από το να διεισδύουν στον εσωτερικό όγκο του υλικού. Συμπεραίνεται ότι, για τον βέλτιστο έλεγχο των επιφανειακών κατεργασιών κομματιών κονιομεταλλουργίας, απαιτείται μια πυκνότητα  $7,2 \text{ g/cm}^3$  τουλάχιστον.

Ο κύριος σκοπός των επιφανειακών θερμικών κατεργασιών σε χάλυβες χαμηλού άνθρακα, είναι για να παρέχεται μια σκληρή, ανθεκτική στην φθορά επιφάνεια ενώ διατηρείται μία σκληρή καρδιά. Αυτός ο συνδυασμός παρέχει τις βέλτιστες ιδιότητες για οδοντωτούς τροχούς και άλλα εξαρτήματα που αναπτύσσουν υψηλές τάσεις. Όταν δεν μπορεί να ελεγχθεί το ποσοστό διείσδυσης άνθρακα, αυτά τα εξαρτήματα μπορεί να εμφανίσουν μεγάλη ψαθυρότητα και διαστασιακή παραμόρφωση κατά την βαφή.



Τα περισσότερα εξαρτήματα κονιομεταλλουργίας στα οποία πραγματοποιείται κάποια θερμική κατεργασία είναι βαμμένα και επαναφερμένα. Αυτοί οι χάλυβες είναι θερμικά κατεργασμένοι κυρίως για αντοχή στην φθορά και αύξηση της σκληρότητας στην καρδιά. Περιέχουν από 0,5 έως 0,8% C και συνήθως έχουν πυκνότητες που υπερβαίνουν τα 6,8 g/cm<sup>3</sup>. Στα περισσότερα κομμάτια κονιομεταλλουργίας η θερμική κατεργασία γίνεται σε μεγάλες παρτίδες μέσα σε φουρνούς βαφής διότι είναι τελικής μορφής κομμάτια και δεν πρέπει να ακουμπάνε ή να χτυπάνε μεταξύ τους κατά τον θερμικό κύκλο (αυτό θα προκαλούσε παραμόρφωση και μαλακά σημεία). Η περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη ατμόσφαιρα για θερμική κατεργασία είναι ενδόθερμο αέριο με μεθάνιο και προσθήκες αέρα έτσι ώστε να ελέγχεται ο άνθρακας. Εξαιτίας της ταχείας διείδυσης της ατμόσφαιρας στο πορώδες διασύνδεσης, η διάχυση του άνθρακα είναι ιδιαίτερα γρήγορη και οι μικρού χρόνου κύκλοι σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες είναι εντός των προδιαγραφών. Κομμάτια μεσαίας έως υψηλής πυκνότητας (6,8 έως 7,2 g/cm<sup>3</sup>) είναι καταλληλότερα για ομαδοποίηση παρτίδες φούρνων βαφής όπου το θερμοκρασιακό προφίλ είναι εύκολο να ελεγχθεί [15].

### 2.3.2 Ενανθράκωση

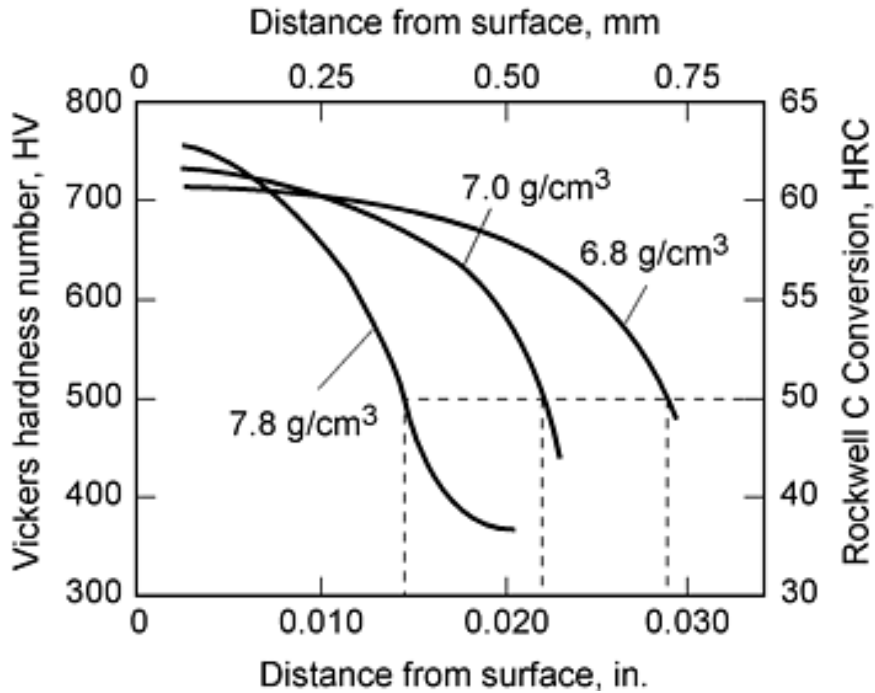
Η ενανθράκωση και η ενανθρακαζώτωση αποτελούν τις δυο περισσότερο συνηθισμένες κατεργασίες επιφανειακής σκλήρυνσης σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπου το εξάρτημα πρέπει να αντέξει φόρτιση υψηλών κύκλων και χρειάζεται να έχει αντοχή σε φθορά.

Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται υψηλή επιφανειακή σκληρότητα η οποία θα συνδυάζεται με σχετικά μαλακή και όλκιμη καρδιά. Οι περισσότερες εφαρμογές οδοντωτών τροχών που δέχονται καταπονήσεις υψηλών φορτίων απαιτούν μια εκ των δυο αυτών κατεργασιών. Σε εφαρμογές κονιομεταλλουργίας, αυτές οι κατεργασίες χρησιμοποιούνται σε υψηλής πυκνότητας προκραματικών η μερικώς κραματωμένων χάλυβων όπου ο συνδυασμένος περιεχόμενος άνθρακας είναι λιγότερος από 0.5% C.

Κομμάτια με επίπεδο πορώδους που υπερβαίνει το 10% δεν συνίστανται για επιφανειακή σκλήρυνση, εξαιτίας της ταχείας διείδυσης του άνθρακα και την δυσκολία στον έλεγχο της δυναμικότητας του άνθρακα στον φούρνο.

Σε σφυρήλατους χάλυβες μετά από επιφανειακές θερμικές κατεργασίες, η επιφάνεια παρουσιάζει μια ομοιόμορφη σκληρότητα και ενεργό βάθος εμποτισμού. Αυτό είναι συνήθως το βάθος στο οποίο μετρείται μια σκληρότητα 50HRC. Μικροσκοπιομετρήσεις μπορούν να δώσουν με ακρίβεια το προφίλ σκληρότητας σε ένα τμήμα σφυρήλατου χάλυβα, αλλά μπορεί να μην είναι ακριβείς όταν πραγματοποιούνται σε χάλυβες κονιομεταλλουργίας όπου το υποεπιφανειακό πορώδες μπορεί να επηρεάσει τις ενδείξεις σκληρότητας.

Προτείνεται να γίνονται τουλάχιστον 3 μετρήσεις οι οποίες θα πραγματοποιούνται σε διαφορετικό βάθος από την επιφάνεια και στην συνέχεια να λαμβάνεται ο μέσος όρος τους για τον προσδιορισμό του ενεργού βάθους εμποτισμού. Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 2.5**), παρουσιάζει την επίδραση του πορώδους στην διείδυση άνθρακα και στο ενεργό βάθος εμποτισμού κατά την ενανθράκωση υπό κενό ενός κράμματος σιδήρου χαλκού σε 3 διαφορετικές πυκνότητες.



**Εικόνα 2.4:** Επίδραση του πορώδους στην διείσδυση άνθρακα και στο ενεργό βάθος εμποτισμού κατά την ενανθράκωση υπό κενό ενός κράμματος σιδήρου χαλκού σε 3 διαφορετικές πυκνότητες [15].

### 2.3.3 Ενανθρακαζώτωση

Η ενανθρακαζώτωση διαφέρει από την ενανθράκωση στο ότι παρέχει και άνθρακα αλλά και ελεύθερο άζωτο για διάχυση. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη άνυδρης αμμωνίας (μικρότερη η ίση από 2% κατά όγκο στην ατμόσφαιρα του φούρνου. Το άζωτο διαχέεται στον χάλυβα ταυτόχρονα με τον άνθρακα, καθυστερώντας έτσι τον κρίσιμο βαθμό απόψυξης κατά την βαφή, το οποίο οδηγεί σε πιο ολοκληρωμένο μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Έτσι δημιουργείται ομοιόμορφη επιφανειακή σκληρότητα, βελτιώνοντας έτσι την αντοχή σε φθορά του υλικού κονιομεταλλουργίας.

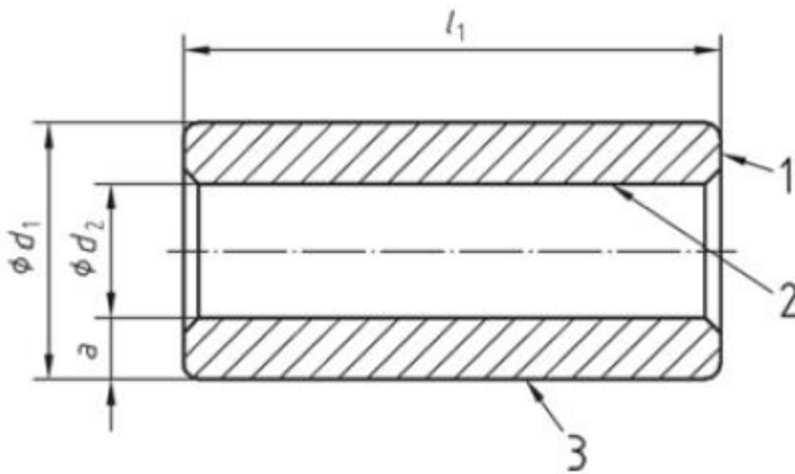
Η ενανθρακαζώτωση συνήθως απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες από αυτές της ενανθράκωσης. Αυτό παρέχει καλύτερο έλεγχο των διαστασιακών μεταβολών και μικρότερη παραμόρφωση του κομματιού σε σχέση με την ενανθράκωση. Χρειάζεται προσοχή κατά την προσθήκη αμμωνίας, διότι η υπερβολική διάχυση αζώτου στο εσωτερικό πορώδες, μπορεί να οδηγήσει σε ψαθυροποίηση και μείωση αντοχής [15].

## 3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΗΘΗ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ

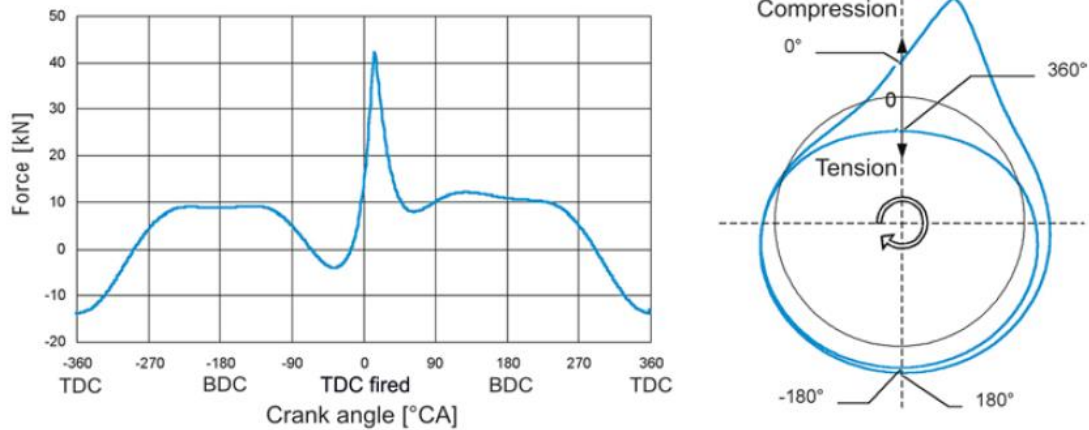
### 3.1 ΤΥΠΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΠΕΙΡΩΝ

Ο πείρος εμβόλου ενώνει το έμβολο με τον διωστήρα. Λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων στον κύλινδρο και κατά συνέπεια την παλινδρόμηση του εμβόλου η οποία προκαλεί και δυνάμεις λόγω αδράνειας, ο πείρος υποβάλλεται σε υψηλά και εναλλασσόμενα φορτία. Παράλληλα, εξαιτίας των μικρών σχετικών κινήσεων οι συνθήκες λίπανσης είναι δύσκολες.

- $d_1$ : εξωτερική διάμετρος
- $d_2$ : εσωτερική διάμετρος
- $l_1$ : μήκος
- $a$ : πάχος τοιχώματος
- 1: πλευρική επιφάνεια
- 2: εσωτερική επιφάνεια
- 3: εξωτερική επιφάνεια



Εικόνα 3.1: Τυπική γεωμετρία πείρου εμβόλου (ISO 18669 standard).



Εικόνα 3.2: Κατανομή αναπτυσσόμενης φόρτισης πείρου κινητήρα βενζίνης [16].

### 3.1.1 Λειτουργικές προδιαγραφές πείρων

Λειτουργικές προδιαγραφές πείρων:

- Επαρκές αντοχή και δυσθραυστότητα έτσι ώστε να αντέξει στα φορτία χωρίς να αστοχήσει.
- Υψηλή επιφανειακή σκληρότητα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά κατά την φθορά.
- Υψηλή ποιότητα επιφανείας και ακρίβεια στο σχήμα και τις διαστάσεις για την βέλτιστη συναρμογή του με το έμβολο και τον διωστήρα.
- Χαμηλό βάρος ώστε οι αδρανειακές δυνάμεις να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.
- Η ελαστικότητά του πρέπει να είναι αντίστοιχη με αυτή του εμβόλου, ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτωση στο έμβολο.

## 3.2 ΣΥΝΗΘΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΕΙΡΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΕΜΒΟΛΟΥ ΔΙΩΣΤΗΡΑ

Οι πείροι εμβόλων κατασκευάζονται από υψηλής ποιότητας ενανθρακωμένους ή εναζωτομένους χάλυβες. Η ενανθράκωση ή εναζώτωση προσδίδει καλή σκληρότητα στην καρδιά και υψηλή επιφανειακή σκληρότητα με καλή συμπεριφορά στην φθορά. Οι πείροι οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από αζωτούχο χάλυβα είναι αξιοσημείωτοι για την εξαιρετική τους αντοχή στην φθορά. Η ενίσχυση της επιφάνειας με άνθρακα ή άζωτο, προκαλεί αύξηση στον όγκο, γεγονός που οδηγεί σε θλιπτικές τάσεις στα επιφανειακά επίπεδα. Αυτές οι παραμένουσες θλιπτικές τάσεις στην επιφάνεια, έχουν μια θετική επίδραση στην αντοχή σε κόπωση του πείρου. Οι πείροι οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από ενανθρακωμένο χάλυβα, φέρουν το πρόβλημα της έλλειψης σταθερότητας στον όγκο. Δηλαδή με αυξανόμενη επιφανειακή σκληρότητα (αύξηση ποσοστού παραμένων ωστενίτη) η διάμετρος του πείρου θα αυξάνεται συνεχώς υπό θερμικό φορτίο.

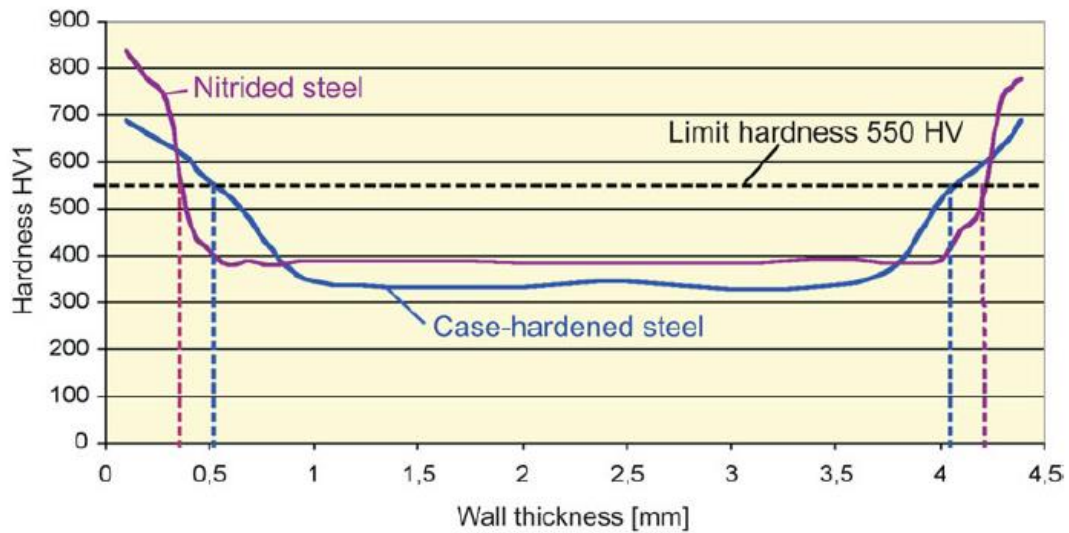
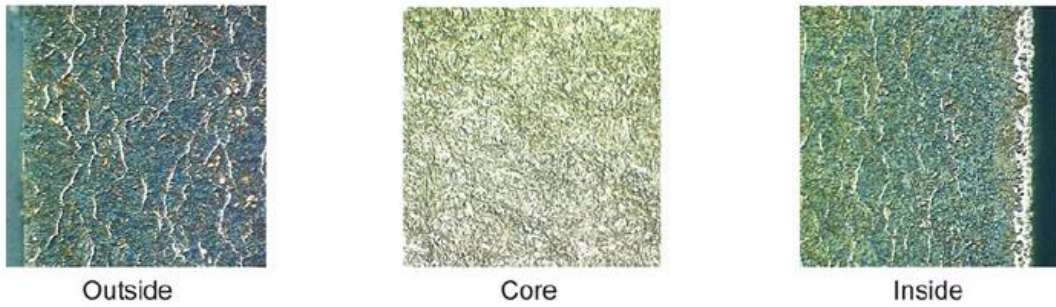
Chemical composition by weight %	Case-hardened steels			Nitrided steel
	17Cr3	16MnCr5	17CrNi6	31CrMoV9
	SAE 5115 (Class L) <sup>1)</sup>	(Class M) <sup>1)</sup>		(Class N) <sup>1)</sup>
C	0.13–0.20	0.14–0.19	0.14–0.20	0.27–0.34
Si	0.15–0.40	0.15–0.40	0.40 max.	0.40 max.
Mn	0.60–0.90	1.00–1.30	0.50–0.90	0.40–0.70
P	≤0.035	≤0.035	≤0.035	≤0.025
S	≤0.040	≤0.035	≤0.035	≤0.035
Cr	0.70–1.00	0.80–1.10	1.40–1.70	2.30–2.70
Ni			1.40–1.70	
Mo				0.15–0.25
V				0.10–0.20
Young's modulus [MPa]	210,000	210,000	210,000	214,000
Thermal expansion <sup>2)</sup> [ $10^{-6}$ 1/K] 20–200°C	13.1	13.1	12.8	13.0
Thermal conductivity <sup>2)</sup> λ [W/m*K]	36	36	37	39
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	7.82	7.84	7.84	7.83
Poisson ratio μ	0.27	0.27	0.27	0.27
Application	Gasoline and passenger car diesel engines	High-performance passenger car engines and commercial vehicle and medium-speed diesel engines	Large-bore engines	Highly loaded gasoline and diesel engines

**Εικόνα 3.3:** Παρουσιάζονται η χημική σύσταση, οι φυσικές ιδιότητες και εφαρμογές των συνήθων υλικών για πείρους εμβόλων [16].

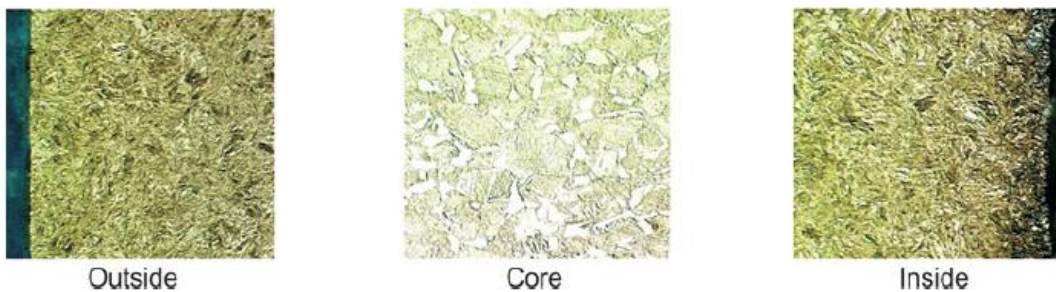
Για υψηλά καταπονούμενους κινητήρες όπως αγωνιστικούς αλλά και για όλους τους πείρους σύνδεσης μεγάλης διαμέτρου, χρησιμοποιούνται χάλυβες ανάτηξης με ηλεκτροαγώγιμη σκουριά υψηλής ποιότητας. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες είναι εξαιρετικοί λόγω του υψηλού βαθμού καθαρότητας, του χαμηλού ποσοστού σε θείο και της υψηλής ομοιογένειας στην μικροδομή.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τυπικές καμπύλες σκληρότητας σε συνάρτηση με το πάχος τοιχώματος του πείρου και τις αντίστοιχες μικροδομές στην επιφάνεια, στον πυρήνα και στο εσωτερικό μέρος του για εναθρακωμένους και εναζωτωμένους πείρους εμβόλων.

Nitrided steel:

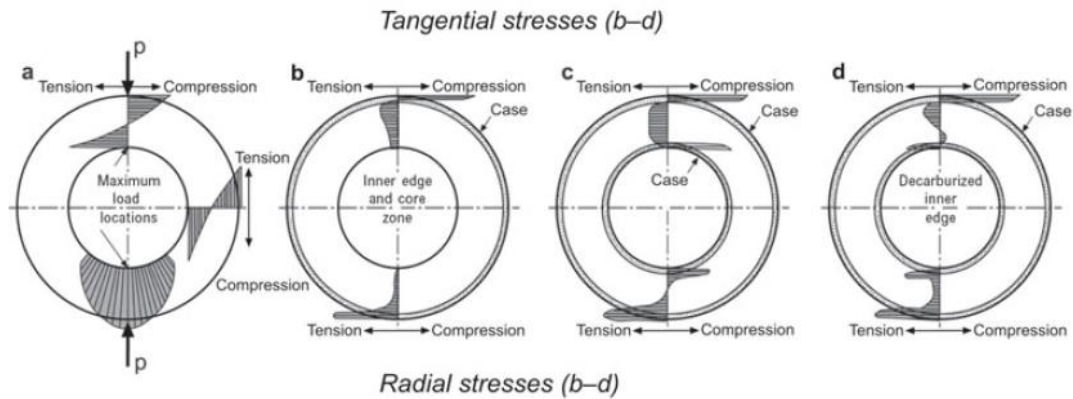


Case-hardened steel:



**Εικόνα 3.4:** Τυπικές καμπύλες σκληρότητας σε συνάρτηση με το πάχος τοιχώματος του πείρου [16].

Υπό την επίδραση των αερίων και των δυνάμεων αδρανείας, η πίεση και τα φορτία τάσεων δρουν στη επιφάνεια του πείρου. Ως αποτέλεσμα αυτής της πίεσης, ο πείρος υπόκειται σε κάμψη, οβαλοποίηση (ovalization). Επιπλέον ασκείται ένα στρεπτικό φορτίο εξαιτίας της κλίσης κατά την κίνηση του διωστήρα, το οποίο όμως παραμελείται λόγω του μικρού του ποσοστού στο συνολικό τελικό φορτίο. Οι προδιαγραφές για έναν πείρο εμβόλου απαιτούν να είναι όσο το δυνατόν πιο άκαμπτος και ελαφρύς γίνεται.

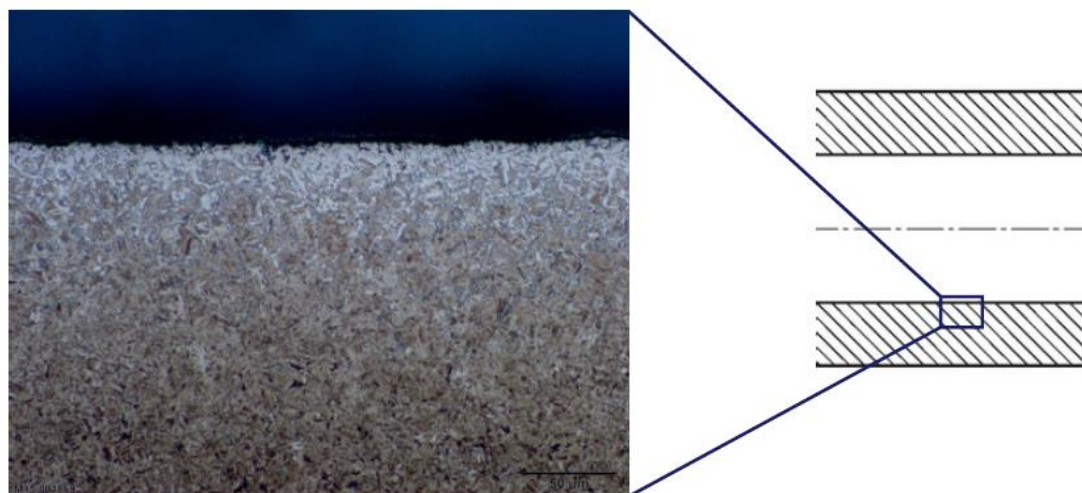


**Εικόνα 3.5:** Παρουσιάζεται η κατανομή τάσεων στον πείρο κατά την οβαλοποίηση σε διάφορες επιφανειακές μικροδομές [16].

Η οβαλοποίηση του πείρου οδηγεί στην κατανομή τάσεων όπως φαίνονται στην εικόνα 3.5(a). Οι μέγιστες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες είναι κρίσιμες για την αντοχή στην κόπωση, βρίσκονται στην εσωτερική επιφάνεια. Παραμένουσες θλιπτικές τάσεις οι οποίες ασκούνται στην εξωτερική επιφάνεια, μπορούν να εξουδετερώσουν τις εφελκυστικές τάσεις, γεγονός το οποίο έχει θετικό αντίκτυπο στην αντοχή σε κόπωση του πείρου. Το ίδιο ισχύει αναλογικά και για την εξωτερική διάμετρο της οποίας το φορτίο που δέχεται προέρχεται κυρίως μέσω κάμψης.

Η πρόσληψη άνθρακα και αζώτου ως επίστρωση στην επιφάνεια (ενανθράκωση – εναζώτωση) οδηγεί σε μία αύξηση του όγκου και συνεπώς παραμενουσών θλιπτικών τάσεων στην επίστρωση. Η επίδραση στις παραμένουσες τάσεις στον πείρο, φαίνεται στις εικόνες 3.5(b-d). Στην πράξη, η εμπειρία επιβεβαιώνει ότι έτσι αυξάνεται σημαντικά η αντοχή σε κόπωση.

Η εξανθράκωση της εσωτερικής επιφάνειας (Εικόνα 3.6), η οποία οδηγεί σε παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις, εικόνα 3.5(d), είναι υπερβολικά επιβλαβής για την αντοχή σε κόπωση του πείρου. Ρωγμές που δημιουργούνται κατά την βαφή, γραμμές σκωρίας και γραμμές λόγω μηχανουργικής κατεργασίας στο εσωτερικό του πείρου επίσης μειώνουν ιδιαίτερα την αντοχή του σε κόπωση [16].



**Εικόνα 3.6:** Εξανθράκωση στην εσωτερική επιφάνεια του πείρου [16].



## 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ένας καλός ορισμός για το τι είναι αστοχία, είναι η ανικανότητα ενός εξαρτήματος, μηχανής, ή διεργασίας να λειτουργήσει κανονικά. Οι πιο συνήθεις αιτίες αστοχιών αφορούν:

- Τις συνθήκες λειτουργίας.
- Την ακατάλληλη συντήρηση (εσκεμμένη – μη εσκεμμένη).
- Τον ακατάλληλο έλεγχο η επιθεώρηση.
- Λάθη κατά την συναρμολόγηση.
- Κατασκευαστικά λάθη.
- Λάθη κατά τον σχεδιασμό (τάσεις, επιλογή υλικού, κλπ).

Ανάλυση αστοχίας είναι μια διαδικασία η οποία πραγματοποιείτε με σκοπό τον καθορισμό των αιτιών η παραγόντων που οδήγησαν σε μια μη επιθυμητή απώλεια λειτουργικότητας.

Κατά τον προκαταρκτικό έλεγχο μίας μελέτης αστοχίας, τα στάδια περιλαμβάνουν :

1. Την συλλογή του ιστορικού και επιλογή δειγμάτων.
2. Τον προκαταρκτικό έλεγχο του κομματιού που αστόχησε (οπτικός έλεγχος και διατήρηση αρχείων).
3. Τις μη καταστροφικές δοκιμές. [19]

## 4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

### 4.2.1 Συλλογή στοιχείων και ιστορικού λειτουργίας

Αρχικά πρέπει να δοθεί το ιστορικό λειτουργίας του εξαρτήματος ή εξοπλισμού που αστόχησε, ιδιαίτερα κατά την χρονική στιγμή της αστοχίας. Επιπλέον αν είναι εφικτό να παραχθούν πληροφορίες από τον χειριστή του εξαρτήματος. Έπειτα γίνεται μία αρχική εκτίμηση για τον τύπο και τον μηχανισμό της αστοχίας έτσι ώστε να αναζητηθεί σε κάποια βάση δεδομένων κάποια παρόμοια αστοχία του παρελθόντος.

### 4.2.2 Τεχνικές οπτικού ελέγχου

Ο οπτικός έλεγχος είναι μία μέθοδος η οποία βασίζεται στον εντοπισμό συγκεκριμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας το ανθρώπινο μάτι και την εμπειρία του ελεγκτή. Συνήθως απαιτούνται βοηθητικά εργαλεία όπως μεγεθυντικοί φακοί, κάμερες, μέτρα, ενδοσκόπια κλπ. Για την επιτυχή διεξαγωγή ενός οπτικού ελέγχου, πρέπει να διασφαλίζεται επαρκής φωτισμός, μάλιστα ίσως να απαιτείται επιπλέον φωτισμός εκτός από τον ήδη υπάρχων.

Συνήθως ο οπτικός έλεγχος αποτελεί τον πρώτο έλεγχο που πραγματοποιείται και έναν από τους πιο χρήσιμους, διότι είναι χαμηλού κόστους, δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό και μπορεί να συνδυαστεί και με άλλες μεθόδους ελέγχου. Ορισμένοι περιορισμοί της μεθόδου αυτής είναι ότι μπορούν να εντοπιστούν μόνο επιφανειακές αστοχίες και ότι χρειάζεται ένα εκπαιδευμένο μάτι.

Η εξέταση επιφανειών θραύσης μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την αιτία της αστοχίας ενός εξαρτήματος, όταν αυτό υπόκειται σε μηχανικά φορτία. Κατά τον προκαταρκτικό έλεγχο γίνονται οπτικές εκτιμήσεις με την βοήθεια μεγεθυντικού φακού (μεγέθυνση μεταξύ x1 και x10). Με αυτή την εκτίμηση μπορεί να αναλυθεί η ζημιά, πιθανές παραμορφώσεις, ρωγμές και άλλου είδους αστοχίες, όμως ποιο σημαντικά το σημείο έναρξης της αστοχίας. Επίσης πραγματοποιούνται έλεγχοι στις διάφορες περιοχές της επιφάνειας θραύσης αλλά και σε άλλα σημεία στα οποία φαίνονται σημάδια αστοχίας (π.χ. διάβρωση, φθορά, κόπωση κλπ). Σε κάποιες περιπτώσεις είναι αναγκαία η αξιολόγηση με μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου.

#### 4.2.3 Έλεγχος με μη καταστροφικές τεχνικές ελέγχου-NDT Techniques

Οι μη καταστροφικές δοκιμές NDT (Non destructive techniques) είναι εκείνες οι οποίες επιτρέπουν να γίνει μια εκτίμηση του εξαρτήματος ή του εξοπλισμού, χωρίς να διακινδυνεύεται η ακεραιότητά του. Αυτό σημαίνει ότι οι δοκιμές δεν καταστρέφουν ή παρεμβαίνουν στην μελλοντική χρήση των κομματιών που επιθεωρούνται. Βασίζονται στην εφαρμογή φυσικών φαινομένων όπως ηλεκτρομαγνητικών, υπερηχητικών, ακουστικών και ελαστικών κυμάτων, την εκπομπή υποατομικών σωματιδίων, του τριχοειδές φαινομένου, της απορρόφησης κλπ. Υπάρχει μια πληθώρα τεχνικών, κάθε μια με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της. Διαφέρουν στην αρχή λειτουργίας τους και στον τύπο εφαρμογής τους.

Η ευρεία εφαρμογή μη καταστροφικών δοκιμών σε υλικά συνοψίζεται σε τρεις κατηγορίες:

- **Ελαττωματολογία (Defectology):** Επιτρέπεται ο εντοπισμός ασυνεχειών, η αξιολόγηση της διάβρωσης και της επιδείνωσης λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων, ο καθορισμός των τάσεων και ο εντοπισμός διαρροών.
- **Χαρακτηρισμός (Characterization):** Εκτίμηση των χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, των φυσικών ιδιοτήτων (ελαστικές, ηλεκτρικές, ηλεκτρομαγνητικές) και των ισοθερμιών κατά την μεταφορά θερμότητας.
- **Μετρολογία (Metrology):** Έλεγχος πάχους, τοπικές διαστασιακές μετρήσεις, πάχος επίστρωσης και επίπεδα πλήρωσης.

Μια διαταραχή στο σήμα παράγει μια ένδειξη η οποία ανιχνεύεται μέσω μιας μη καταστροφικής δοκιμής. Με αυτήν την έννοια η πληροφορία μπορεί να είναι λανθασμένη, σχετική ή μη σχετική. Μια ασυνέχεια μπορεί να ορισθεί ως η έλλειψη ομοιογένειας, η διακοπή της κανονικής φυσικής δομής του υλικού ή μια έλλειψη της κανονικής διαμόρφωσης ενός κομματιού, αντικειμένου ή εξαρτήματος. Οι ασυνέχειες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την:

- **Θέση:** Επιφανειακές, υποεπιφανειακές και εσωτερικές
- **Προέλευση:** Εγγενής κατά την παραγωγή, κατεργασία ή λειτουργία.
- **Μορφολογία:** Επίπεδες ή να καταλαμβάνουν όγκο.

Κατά την χρήση μη καταστροφικών δοκιμών για τη διασφάλιση ποιότητας στο στάδιο της παραγωγής ή στον έλεγχο κατά την λειτουργία, οι ασυνέχειες μπορεί να είναι σχετικές ή μη σχετικές. Μία ένδειξη θεωρείται ατέλεια, όταν το μέγεθος, το σχήμα ή η θέση της υπερβαίνουν τα αποδεκτά όρια τα οποία έχουν καθιερωθεί από τον κώδικα, το πρότυπο ή την εφαρμοστέα προδιαγραφή.

#### 4.2.3.1 Έλεγχος μαγνητικών σωματιδίων

Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων-Magnetic particles (MP) εντοπίζει επιφανειακές και περιστασιακά υποεπιφανειακές (κοντά στην επιφάνεια) ασυνέχειες σε φερρομαγνητικά υλικά. Κατά την τοποθέτηση των πόλων ενός μαγνήτη στην επιφάνεια που ελέγχεται, δημιουργούνται γραμμές ροής λόγω του μαγνητικού πεδίου που παράγεται μεταξύ των πόλων (βόρειου και νότιου). Αυτές οι γραμμές μεταβάλλονται από την ύπαρξη ασυνεχειών οι οποίες προκαλούν διαρροή στο μαγνητικό πεδίο. Τα μαγνητικά σωματίδια θα κατευθυνθούν σύμφωνα με τις γραμμές ροής και θα δώσουν μια ένδειξη για την ασυνέχεια. Τυπικές ατέλειες που εντοπίζονται είναι ρωγμές κόπωσης και ρωγμές διάβρωσης (stress corrosion cracking).



Εικόνα 4.1: Έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια [21].

#### 4.2.3.2 Έλεγχος διεισδυτικών υγρών

Ο έλεγχος διεισδυτικών υγρών φανερώνει επιφανειακές ασυνέχειες απορροφώντας μελάνι αντίθεσης σε φερριτικά και μη φερριτικά μέταλλα και άλλα μη πορώδη υλικά. Τυποποιείται από το ASTM E-165, όπου κατατάσσονται τα φθορίζοντα και έγχρωμα μελάνια, τα οποία επίσης ταξινομούνται από την μέθοδο της αφαίρεσής τους. Η αρχή είναι πολύ απλή. Πρώτα ένα υγρό διαχέετε στην καθαρή επιφάνεια του υλικού και αφήνεται να εισχωρήσει στις ασυνέχειες. Στην συνέχεια το υγρό αφαιρείται, αφήνοντας την επιφάνεια στεγνή. Μέρος του υγρού θα παραμείνει εντός των ρωγμών ή άλλων ατελειών. Τέλος εφαρμόζεται ένας εμφανιστής, ο οποίος απορροφά το αποθηκευμένο υγρό από τις ρωγμές, υποδεικνύοντας την ύπαρξή τους. Ενώ η μέθοδος αυτή είναι γρήγορη και οικονομική, εντοπίζει μόνο επιφανειακές ατέλειες, έχει χαμηλότερη ευκρίνεια από τα μαγνητικά σωματίδια, και μπορεί να οδηγήσει σε παρανοήσεις εάν δεν εφαρμοστεί σωστά.



**Εικόνα 4.2:** Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά [22].

#### 4.2.3.3 Έλεγχος με υπερήχους

Ο έλεγχος με υπέρηχους-ultrasonic test (US) μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δυο τύπους. Μέτρηση πάχους και εντοπισμού σφάλματος. Ο έλεγχος με την μέθοδο των υπερήχων περιλαμβάνει την εκπομπή υπερηχητικών κυμάτων μέσα στο υλικό με την βοήθεια ενός υλικού σύζευξης (coupling material). Ταξιδεύοντας διαμέσου του υλικού ο ήχος χάνει μέρος της ενέργειάς του κατά τις ανακλάσεις σε κάθε επιφάνεια. Τα κύματα που έχουν ανακλαστεί παραλαμβάνονται από έναν μορφομετατροπέα και στην συνέχεια αναλύονται. Στην περίπτωση της μέτρησης πάχους, η ταχύτητα του ήχου στο αντικείμενο είναι γνωστή, έτσι μετριέται ο απαιτούμενος χρόνος του σήματος για να επιστρέψει στο όργανο, αφού ανακλαστεί στο τοίχωμα της άλλης επιφάνειας. Στην περίπτωση του εντοπισμού αστοχίας, η μέθοδος χρησιμοποιεί την ίδια αρχή για να εντοπίσει την ύπαρξη ασυνεχειών, εντός του υλικού. Η μεγάλη διαφορά είναι ότι ο εξοπλισμός καταγράφει την ένταση του εκπεμπόμενου και παραλαμβανόμενου ήχου. Με αυτά τα δεδομένα το ανακλώμενο κύμα μπορεί να αναλυθεί, υποδεικνύοντας την θέση και το μέγεθος της ατέλειας. Συνήθεις ατέλειες που μπορούν να αναγνωρισθούν και να υπολογισθούν είναι ρωγμές πόροι, εγκλείσματα, ελλείψεις διείσδυσης, ελλείψεις τήξης κλπ.

Κάποια πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Η υψηλή ευαισθησία της μεθόδου της επιτρέπει τον εντοπισμό μικρών ασυνεχειών.
- Ο έλεγχος υπερήχων απαιτεί πρόσβαση μόνο σε μία επιφάνεια του υλικού.
- Εξαιρετική ευκρίνεια για τον καθορισμό του μεγέθους και της θέσης της ατέλειας.
- Ο έλεγχος των υπερήχων δεν απαιτεί ειδικό ατομικό εξοπλισμό προστασίας.

Αντίθετα, απαιτείται υψηλή εκπαίδευση για τον σχεδιασμό, λειτουργία και την εφαρμογή του υλικού σύζευξης. Αντικείμενα με περίπλοκο, μικρό, πολύ λεπτό η μη ομοιογενές σχήμα είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθούν. Επιπλέον τα δεδομένα ερμηνεύονται μόνο από ικανό προσωπικό.



**Εικόνα 4.3:** Έλεγχος με υπερήχους [23].

#### **4.2.3.4 Έλεγχος με δινορρεύματα**

Ο έλεγχος με δινορρεύματα-Eddy current (EC) είναι μια ηλεκτρομαγνητική δοκιμή, στην οποία διοχετεύονται μικρά ρεύματα στο υλικό και οποιαδήποτε αλλαγή στην ροή τους καταγράφεται. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται σε ανομοιογένειες μέσα στο υλικό. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η διάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός πηνίου που βρίσκεται κοντά στο αντικείμενο που ελέγχεται. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, παράγει μια μικρή κυκλοφορία δινορρευμάτων στο αντικείμενο. Αυτό το ρεύμα με την σειρά του παράγει το δικό του μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το πηνίο εντοπισμού. Στην συνέχεια το πηνίο πιάνει διαταραχές που προκαλούνται από ασυνέχειες μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων στηρίζεται κυρίως στην ανάλυση του πλάτους και της φάσης των μεταβολών της τάσης στο πηνίο εντοπισμού, λόγω της επίδρασης των διακυμάνσεων των παραμέτρων ενδιαφέροντος στο ελεγχόμενο αντικείμενο. Η αξιολόγηση των ενδείξεων, στηρίζεται σε συγκρίσεις με καλιμπραρισμένα δείγματα, ειδικά προετοιμασμένα για κάθε περίπτωση ελέγχου, σύμφωνα με τους καθιερωμένους κανόνες και διαδικασίες. Ο έλεγχος με δινορρεύματα είναι πολύ ευέλικτος και πολύ χρήσιμος σε αγωγούς. Επίσης εντοπίζει γρήγορα την θέση της ατέλειας και παράγει πολλές πληροφορίες, όμως κάποιες φορές αυτό που είναι σημαντικό είναι δύσκολο να διακριθεί. Απαιτεί επομένως πού εξειδικευμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα δινορρεύματα δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο στα φερρομαγνητικά υλικά, το οποίο μπορεί να κρύψει κάποιο από τα αποτελέσματα.



Εικόνα 4.4: Έλεγχος με δινορρεύματα [24].

### 4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιούνται μετά τον προκαταρκτικό έλεγχο, αφορούν τις χημικές και μηχανικές αναλύσεις των υλικών που σχετίζονται με το στοιχείο που αστόχησε. Έτσι ελέγχεται το υλικό σε κάθε τμήμα του που είναι πιθανό να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες οι οποίες μπορεί να έχουν επηρεάσει τον μηχανισμό αστοχίας. Χαρακτηριστικά που ερευνώνται περιλαμβάνουν υλικά βάσης και συγκόλλησης, επιφανειακές κατεργασίες, εναποθέσεις διάβρωσης, μικροδομικές μεταβολές λόγω θερμοκρασίας ή ακτινοβολίας και γενικά οποιοδήποτε ελάττωμα το οποίο μπορεί να έχει δημιουργηθεί κατά την παραγωγή ή την λειτουργία.

Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών και της ποιότητας των υλικών, λαμβάνονται δείγματα και πραγματοποιούνται έλεγχοι σύμφωνα με το πρότυπο. Τυπικά τα πρωτόκολλα δοκιμών για υλικά βάσης και συγκόλλησης μετά από μια μηχανική αστοχία, περιλαμβάνουν:

- Δοκιμή κρούσης Charpy και συσχέτιση με δυσθραυστότητα.
- Δοκιμή εφελκυσμού, πραγματικό διάγραμμα τάσης – φορτίου
- Χαρτογράφηση σκληρότητας στα σημεία όπου ξεκίνησε η αστοχία.
- Global spark interferometry χημική ανάλυση.
- Microprobe χημική ανάλυση (EDS) μετάλλων και εναποθέσεων.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι συνθήκες για όλκιμη απόσχιση η ψαθυρή θραύση συνήθως απαιτούν κάποια στιγμή κατά την λειτουργία υψηλότερες από τις ιστορικές τάσεις. Σε κάποιες περιπτώσεις η τελική αστοχία έρχεται αφού μηχανισμοί «αλλοίωσης» αλλάζουν τις ιδιότητες του υλικού τροποποιώντας την μικροδομή του (ερπυσμός, εξανθράκωση, ενανθράκωση, και διάφορες μορφές ψαθυροποίησης) η δημιουργώντας ασυνέχειες οι οποίες μειώνουν την αντοχή ενός τμήματος σε μηχανικά φορτία (κόπωση, διάβρωση κλπ).

#### 4.3.1 Μεταλλογραφία

Για τον καθορισμό της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ατελειών και των χαρακτηριστικών της μικροδομής, μεταλλογραφικά δείγματα αφαιρούνται και προετοιμάζονται. Το επιλεγμένο δείγμα από το κομμάτι που πρόκειται να αναλυθεί πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό. Το

δείγμα επίσης θα πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στην θέση της αστοχίας η οτιδήποτε χρειάζεται να ερευνηθεί. Το δείγμα μπορεί να έχει οποιοδήποτε σχήμα, τυπικές διαστάσεις αυτού αντιστοιχούν σε ένα παραλληλεπίπεδο με 5-15 mm πλευρές, περίπου. Τα δείγματα αυτά κόβονται από το υλικό και στην συνέχεια λειαινούνται και στιλβώνονται με τα κατάλληλα αντιδραστήρια ώστε να αποκαλύψουν την μικροδομή τους. Οι μεταλλογραφικές μελέτες ανήκουν στις καταστροφικές δοκιμές.

Ο τομέας της μεταλλογραφίας εξετάζει τα δομικά χαρακτηριστικά της μικροδομής ενός μετάλλου ή κράματος. Χωρίς αμφιβολία το μικροσκόπιο αποτελεί το σημαντικότερο εργαλείο ενός μεταλλουργού. Μπορεί να καθοριστεί μέγεθος κόκκου, σχήμα και η κατανομή των διαφόρων φάσεων και εγκλεισμάτων, τα οποία έχουν μεγάλη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου. Η μικροδομή αποκαλύπτει την μηχανική και θερμική κατεργασία του υλικού και υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να προβλέψει την αναμενόμενη συμπεριφορά [17].

#### 4.4 ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

Θραυστογραφία είναι η μελέτη των επιφανειών θραύσης των υλικών και αποτελεί μια μέθοδο ανάλυσης αστοχίας. Διαφορετικοί μηχανισμοί αστοχίας παράγουν διαφορετικά χαρακτηριστικά στην επιφάνεια θραύσης. Μελετώντας έτσι τα χαρακτηριστικά αυτά, επιτρέπουν στον μελετητή να καθορίσει την αιτία της αστοχίας [20]. Μέσω οπτικού μικροσκοπίου και μικροσκοπίου σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM) γίνονται παρατηρήσεις έτσι ώστε να καθοριστεί η κατάσταση του υλικού και να καθοριστούν οι συνθήκες και ο τρόπος της διάδοσης των ατελειών που θα μπορούσαν να έχουν συμβάλει στην εμφάνιση της αστοχίας.

#### 4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΟΝΙΟΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

Στην περίπτωση των θερμικά κατεργασμένων χαλύβδινων εξαρτημάτων κονιομεταλλουργίας, το είδος αστοχίας και οι αιτίες της είναι περιορισμένες σε αριθμό, οι πιο συνήθεις είναι :

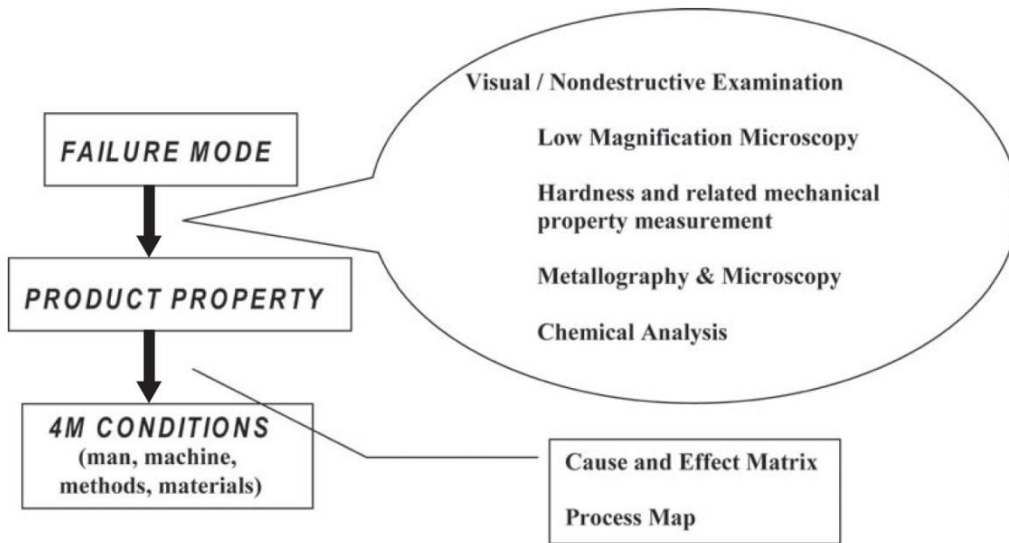
- Φθορά
- Θραύση
- Διαστασιακή αστάθεια λόγω πλαστικής παραμόρφωσης
- Διαστασιακή αστάθεια λόγω μετασχηματισμού φάσης
- Οξείδωση

Οι παραπάνω αιτίες μπορεί να έχουν σχέση με ελλείψεις στις μηχανικές και μεταλλουργικές ιδιότητες, οι οποίες παίζουν ρόλο στην αστοχία.

- Μεταλλουργικές ιδιότητες: Μικροδομή, βάθος εμποτισμού, προσκόλληση επιστρώματος, σκληρότητα, πάχος για επιστρώματα αντοχής σε φθορά, πυκνότητα και σκληρότητα.
- Μηχανικές ιδιότητες: αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε κρούση, αντοχή σε κόπωση, δυσθραυστότητα και σκληρότητα.

Ελλείψεις στις ιδιότητες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μία αστοχία προκαλούνται από έναν συνδυασμό ενός ή περισσοτέρων εκ των τεσσάρων παραμέτρων άνθρωπος, μηχανή, μέθοδος, υλικό. Για παράδειγμα εμφανή χαμηλή σκληρότητα μετά από ενανθρακαζώτωση,

μπορεί να σχετίζεται χαμηλή πυκνότητα κατά το στάδιο της συμπίεσης. Συνεπώς κατά την ανάλυση αστοχίας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η αιτία της αστοχίας μπορεί να σχετίζεται με παραπάνω από ένα στάδιο παραγωγής του εξαρτήματος.



Εικόνα 4.5: Βήματα σε μία ανάλυση αστοχίας [18].

Δύο πολύτιμα εργαλεία κατά την ανάλυση αστοχίας είναι οι χάρτες διεργασιών (process map) και ο πίνακας αιτίου αποτελέσματος (cause-and-effect matrix).

**Χάρτης διεργασιών:** Η έμμεση υπόθεση είναι ότι η αιτία της αστοχίας μπορεί να συσχετισθεί όχι μόνο με την τελική διεργασία αλλά επίσης και προηγούμενες διεργασίες. Κάθε διεργασία κατά την παραγωγή θεωρείται ως μια διεργασία με είσοδο και έξοδο. Η τροφοδοσία αποτελείται από τις τέσσερις συνθήκες: άνθρωπος, μηχανή, μέθοδος, υλικό και η έξοδος από τις απαιτούμενες προδιαγραφές του προϊόντος. Όλες οι δυνατές 4 συνθήκες οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μη αποδεκτό προϊόν καταγράφονται ως είσοδοι και οι μη αποδεκτές ιδιότητες των προϊόντων ως έξοδοι [18].



**Πίνακας 4.1:** Λεπτομερής χάρτης διεργασιών κονιομεταλλουργίας [18].

Inputs	Outputs	Inputs	Outputs
<b>Compaction</b>		<b>Carburizing/carbonitriding (continued)</b>	
Single platen press	...	High time of carbon potential attainment	...
No pressway	Low density	High soaking time	Low surface hardness
No double action	Density difference within compact exceeding 0.2 g/cc	Oxidizing atmosphere	Decarburization
High apparent density	Carbon and lube segregation	Decarburizing atmosphere	Oxidation
Low apparent density	Alloy segregation	Carburizing atmosphere	Excess growth
Segregation of alloys	Dimensions not conforming to specification	High nitrogen potential	Shrinkage
Segregation of carbon and lubricant	...	Masking of products	...
<b>Sintering</b>		Delayed quench	Carbide network in case
Low cooling rate	...	Hot oil quench	Nonmartensitic transformation product in case
High cooling rate	Low hardness	High-viscosity quench oil	...
Low temperature	Decarburization	Delayed tempering	Low mechanical properties
High temperature	Oxidation	Poor hardenability	High retained austenite
Low soaking time	Excess growth	Low density	Low case depth
High soaking time	Shrinkage	Carbon segregation	High case depth
Oxidizing atmosphere	Carburized microstructure	Alloy segregation	High core hardness
Decarburizing atmosphere	Low mechanical properties	Low sectional density	Low core hardness
Carburizing atmosphere	Blistered product	<b>Induction hardening</b>	
High rapid burnoff temperature	Pinholes	Too high frequency	...
Low rapid burnoff temperature	Low sintered density	Too low frequency	Cracked product
Low density	...	High heating rate	High case depth
Carbon-lubricant segregation	...	Low heating rate	Low case depth
Alloy element segregation	...	High heating time	Low surface hardness
Low sectional density	...	Delayed quench	Localized zones of melting
Poor sinter hardenability	...	Severe quench	...
<b>Carburizing/carbonitriding</b>		High temperature	...
Low carbonitriding temperature	...	Low temperature	...
High carbonitriding temperature	...	High carbon	...
Low soaking time	High surface hardness	Low density	...
		<b>Steam treatment</b>	
		Continous mesh belt furnace	Low hardness
		Batch furnace	Leaky product (pores not well sealed)
		Low temperature	Low oxide layer
		Insufficient time	Poor surface appearance
		Insufficient steam	Loose rust
		Oil in pores	Red rust

## ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

### 5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

#### 5.1 ΧΑΛΥΒΑΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των επιπτώσεων της λανθασμένης θερμικής κατεργασίας της ενανθράκωσης στην μικροδομή της επιφάνειας ενός χάλυβα κονιομεταλλουργίας. Τη συγκεκριμένη θερμική κατεργασία υπέστησαν 4 τεμάχια πείρων τα οποία προοριζόντουσαν να χρησιμοποιηθούν ως πείροι σύνδεσης εμβόλου-διωστήρα αγωνιστικού αυτοκινήτου. Το υλικό κατασκευής τους είναι ο χάλυβας Uddeholm Vanadis 8 Superclean.

Πρόκειται για έναν εργαλειοχάλυβα κονιομεταλλουργίας με κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το χρώμιο (Cr), το μολυβδαίνιο (Mo) και το βανάδιο (V), ο οποίος είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπου η φθορά λόγω τριβής είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας. Ο συνδυασμός της πολύ υψηλής αντοχής του σε φθορά και της καλής δυσθραυστότητάς, τον καθιστούν επίσης μια καλή εναλλακτική σε εφαρμογές εργαλείων όπου η χρήση υλικών καρβιδίων και ταχυχαλύβων οδηγεί σε ρωγμάτωση (chip or crack). Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών είναι απότμηση και διαμόρφωση (blanking and forming), απότμηση ακριβείας (fine blanking), απότμηση φύλλου ηλεκτρικών εφαρμογών (blanking of electrical sheet), βαθεία κοίλανση (deep drawing), σφυρηλάτηση εν ψυχρώ (cold forging) [9].

**Πίνακας 5.1 :** Τυπική χημική σύσταση Uddeholm Vanadis 8 Superclean χάλυβα.

Στοιχεία κραμάτωσης	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
Τυπική ανάλυση %	2.3	0.4	0.4	4.8	3.6	8.0

Οι πείροι αμέσως μετά την μηχανουργική κατεργασία παραγωγής τους, υπέστησαν την εξής ακολουθία θερμικών κατεργασιών:

- Απόταση: Θέρμανση στους 610°C για 9 ώρες.
- Ενανθράκωση: Θέρμανση στους 900°C για 2,5 ώρες με μέσο ενανθράκωσης υγρό μείγμα ανθρακικού βαρίου ( $BaCO_3$ ) και ανθρακικού ασβεστίου ( $CaCO_3$ ) δυναμικότητας σε άνθρακα 0,8-1%. Χαμήλωμα στους 840 °C το οποίο διήρκησε 30 λεπτά και από εκεί απόψυξη ισοθερμοκρασιακά σε λουτρό άλατος στους 180°C το οποίο διήρκησε περίπου 20 λεπτά.
- Επαναφορά: Θέρμανση στους 180°C για 2 ώρες.

Τέλος υπέστησαν αμμοβολή και παρουσιάστηκε η επιφανειακή αστοχία που παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην συνέχεια.

## 5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, την μακροσκοπική και την μικροσκοπική. Κατά την μακροσκοπική ανάλυση πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος, στερεοσκοπικός έλεγχος και μέτρηση σκληρότητας. Στην συνέχεια αφού τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα (κοπή-λείανση-στίλβωση-εγκιβωτισμός) ακολούθησε ο μικροσκοπικός έλεγχος ο οποίος περιλαμβάνει την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης και την μεταλλογραφική ανάλυση μέσω οπτικού μικροσκοπίου.

### 5.2.1 Οπτικός έλεγχος

Στα πλαίσια του οπτικού ελέγχου έγινε φωτογράφιση των δοκιμίων στον ειδικό θάλαμο φωτογράφισης (Photobooth) η οποία παρουσιάζεται στις παρακάτω φωτογραφίες και αποτυπώνει την κατάσταση των πείρων κατά την έναρξη της μελέτης.



**Εικόνα 5.1:** Θάλαμος φωτογράφισης Photobooth.



**Εικόνα 5.2:** Αρχική κατάσταση πρώτου δοκιμίου.



**Εικόνα 5.3:** Αρχική κατάσταση δευτέρου δοκιμίου.



**Εικόνα 5.4:** Αρχική κατάσταση τρίτου δοκιμίου.

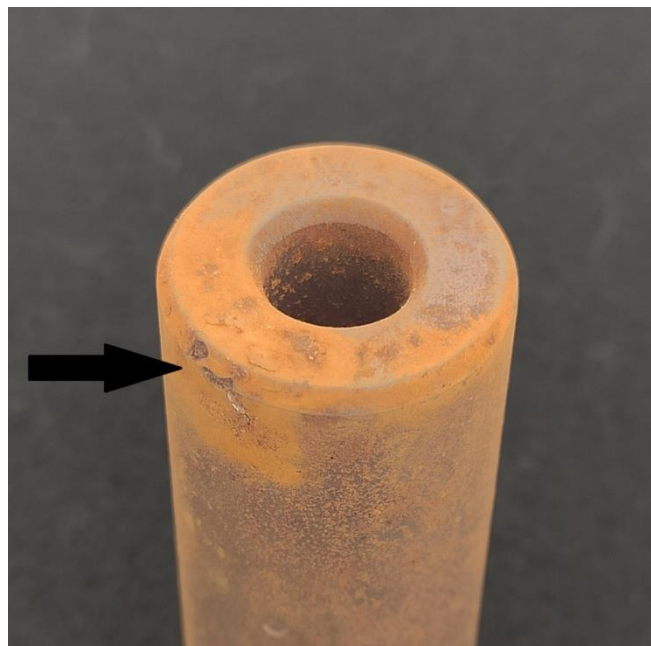


**Εικόνα 5.5:** Αρχική κατάσταση τέταρτου δοκιμίου.



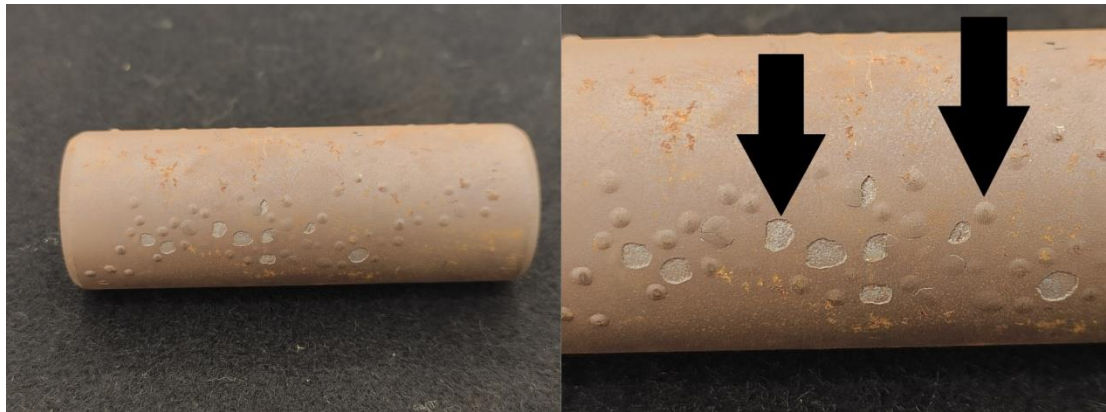
**Εικόνα 5.6:** Αρχική κατάσταση δοκιμίου Pilot.

Κατά τον οπτικό έλεγχο, αρχικά είναι εμφανής η οξείδωση των δοκιμίων λόγω της αποθήκευσής τους. Επιπλέον, η βασική αστοχία που παρατηρείται σε όλα τα δοκίμια (όχι όμως στον ίδιο βαθμό) είναι το ξεφλούδισμα μικρών κομματιών ακανόνιστου σχήματος, της τάξεως των 2-3mm από την επιφάνεια σε διάφορα σημεία.



**Εικόνα 5.7:** Χαρακτηριστική απεικόνιση ξεφλουδίσματος πρώτου δοκιμίου.

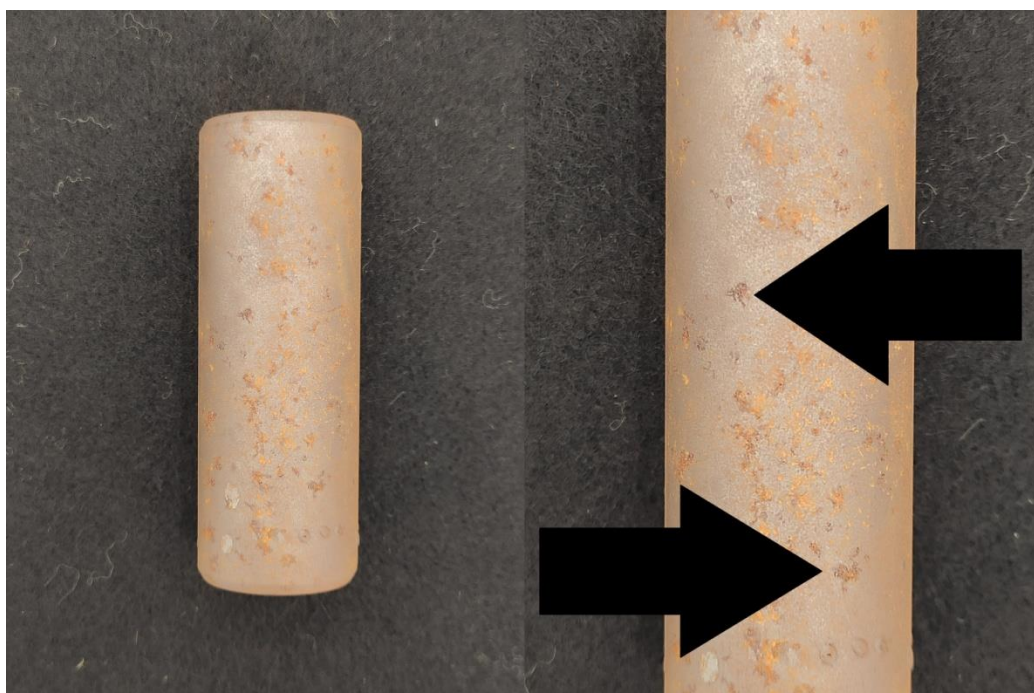




**Εικόνα 5.8:** Χαρακτηριστική απεικόνιση φουσκωμάτων τρίτου δοκιμίου.

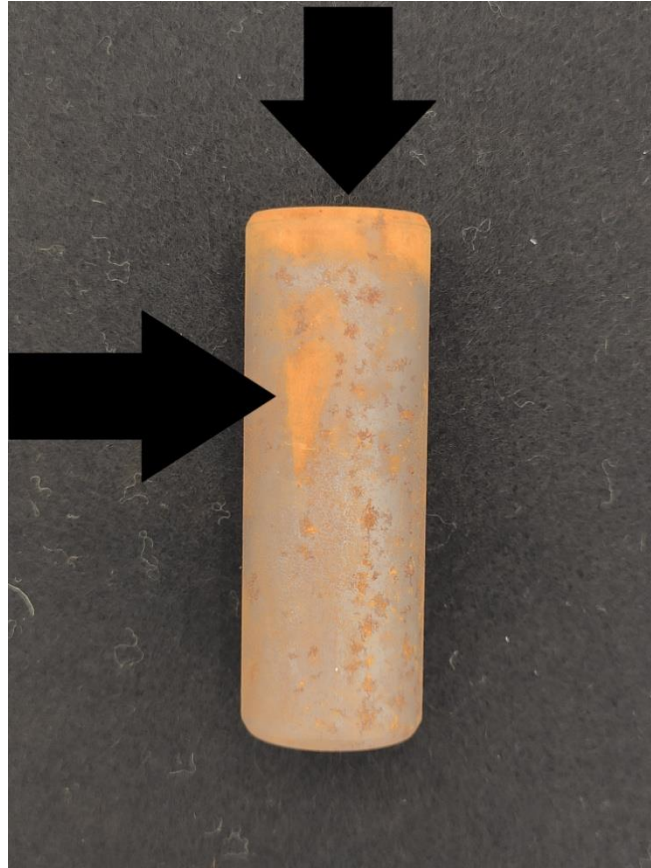
Το συγκεκριμένο ξεφλούδισμα αποτυπώνεται καλύτερα στο τρίτο δοκίμιο στο οποίο παρατηρούνται κάποια χαρακτηριστικά φουσκώματα, όπου σε κάποια έχει αποκολληθεί το πάνω μέρος.

Διακρίνονται επίσης διάσπαρτα σημάδια πάλι ακανόνιστου σχήματος όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8, τα οποία όμως έχουν ένα περισσότερο σκούρο χρώμα από την υπόλοιπη επιφάνεια. Τα συγκεκριμένα σημάδια είναι εύκολο να εντοπισθούν, καθώς σχεδόν σε όλα υπάρχει έντονη οξείδωση.



**Εικόνα 5.9:** Απεικόνιση σκούρων σημαδιών στην επιφάνεια του τρίτου δοκιμίου.

Ακόμα μία παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί είναι κάποιες περιοχές στις οποίες η οξείδωση είναι φαίνεται να είναι εντονότερη.



**Εικόνα 5.10:** Απεικόνιση περιοχών εντονότερης οξείδωσης στην επιφάνεια του δευτέρου δοκιμίου.

Αμέσως μετά τη φωτογράφιση, στα δοκίμια χαράχτηκαν οι λατινικοί αριθμοί I,II,III,IV έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η ταυτοποίησή τους κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

## 6 ΧΗΜΙΚΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ

### 6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΧΗΜΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ

Από τα 4 δοκίμια επιλέχθηκαν για μελέτη τα δοκίμια III και IV, καθώς επίσης και το δοκίμιο pilot (για δοκιμαστικούς ελέγχους). Ο χημικός καθαρισμός πραγματοποιήθηκε με σκοπό να απομακρυνθεί η οξείδωση που είχε αναπτυχθεί κατά την αποθήκευση των δοκιμίων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα καθαρισμού με υπερήχους Sonic 3MX, James products και η διαδικασία που ακολουθήθηκε έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E407.

Οι καθαριστές υπερήχων λειτουργούν παράγοντας ηχητικά κύματα τα οποία μεταδίδονται μέσα στην δεξαμενή και στο διάλυμα καθαρισμού. Αυτά τα κύματα δημιουργούν εκατομμύρια μικροσκοπικές φυσαλίδες, οι οποίες καταρρέουν απελευθερώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας, με αποτέλεσμα να καθαρίζεται η επιφάνεια [25].



**Εικόνα 6.1:** Καθαριστής υπερήχων Sonic 3MX , James products.

Σύμφωνα με το πρότυπο, η αναλογία απιονισμένου νερού και αντιδραστηρίου είναι 1 προς 10, έτσι χρησιμοποιήθηκαν 20 ml νιτρικού οξέως σε 200 ml απιονισμένου νερού. Αρχικά η θερμοκρασία έφτασε περίπου 40°C (μετά από 30 λεπτά) προτού βυθιστεί το δοκίμιο pilot για δοκιμαστικό καθαρισμό. Στην συνέχεια ακολούθησαν τα δοκίμια III και IV. Η διαδικασία του χημικού καθαρισμού πραγματοποιήθηκε με διαδοχικές βυθίσεις συγκεκριμένου χρόνου όπως περιγράφεται από τον πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1:** Διαδικασία χημικού καθαρισμού.

Επαναλήψεις	Χρόνος (min)	Power (%)	T (°C)
1η	1	40	43-46
2η	10	40	46-50
3η	10	40	50-60
4η	10	70	60
5η	10	70	60

Από το πρώτο κιόλας λεπτό παρατηρήθηκε η επίδραση του καθαρισμού στα δοκίμια., όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.2**.

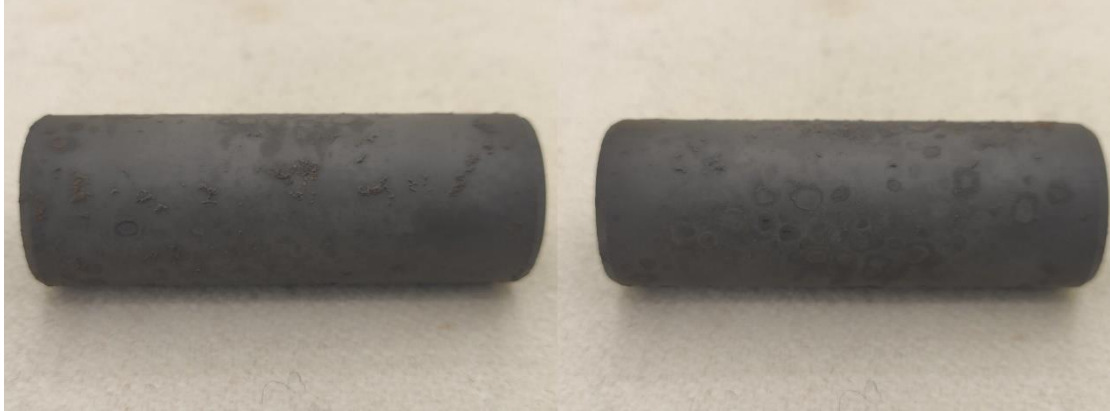


**Εικόνα 6.2:** Διάφορα στάδια καθαρισμού.

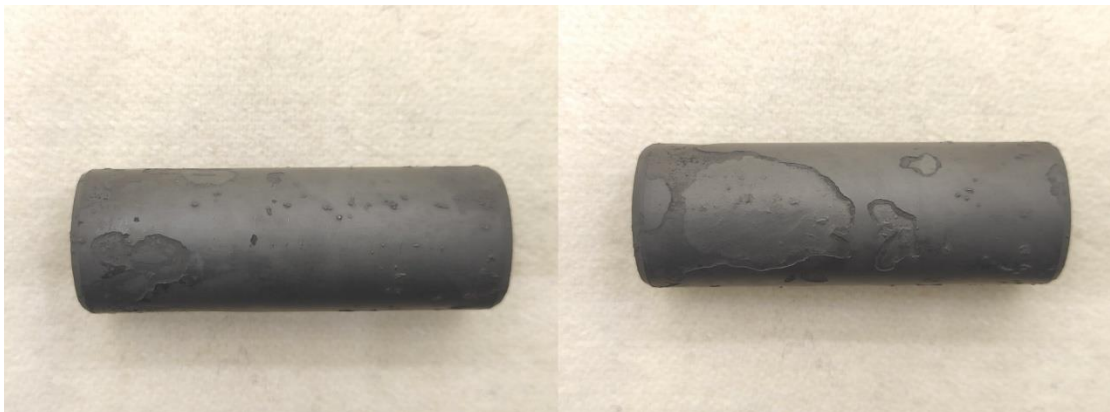
Ενδιάμεσα από τις βυθίσεις τα δοκίμια καθαρίζοντουσαν μηχανικά μέσω μιας πλαστικής βουρτσας. Μετά την πέμπτη βύθιση, τα δοκίμια είχαν καθαριστεί επαρκώς.

## 6.2 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Ακολούθησε η φωτογράφιση των δοκιμίων όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 6.3:** Δοκίμιο III μετά τον καθαρισμό.

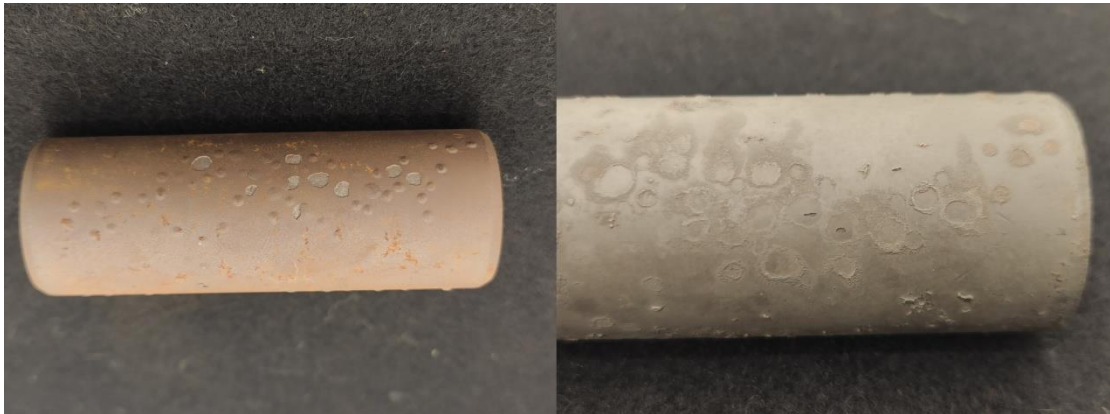


**Εικόνα 6.4:** Δοκίμιο IV μετά τον καθαρισμό.

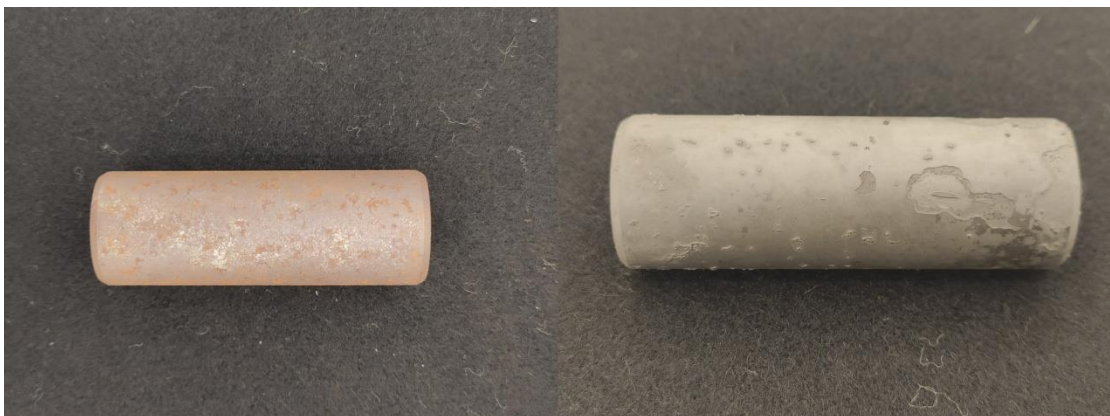


**Εικόνα 6.5:** Δοκίμια III και IV μετά τον καθαρισμό.

Σύγκριση των δοκιμίων πριν και μετά τον καθαρισμό :



**Εικόνα 6.6:** Δοκίμιο III πριν τον καθαρισμό (αριστερά) και μετά (δεξιά).



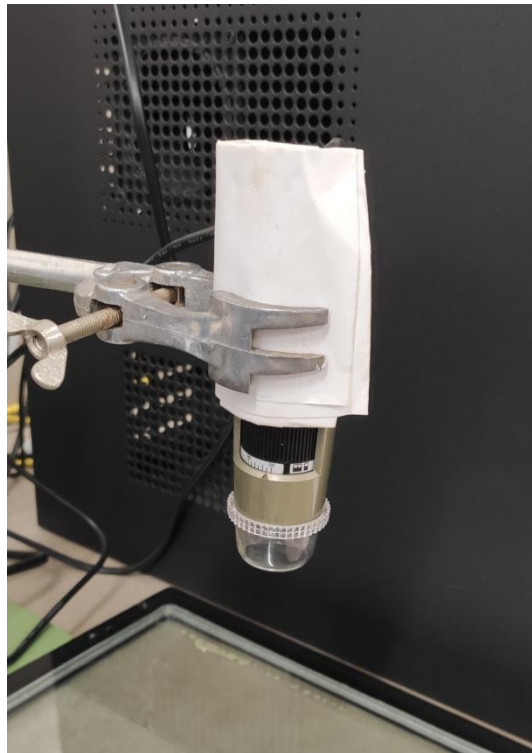
**Εικόνα 6.7:** Δοκίμιο IV πριν τον καθαρισμό (αριστερά) και μετά (δεξιά).

Μετά την ολοκλήρωση του καθαρισμού, είναι εμφανές ότι η επιφάνεια των δοκιμίων έχει αλλάξει σημαντικά. Κατά την στερεοσκοπική ανάλυση που ακολουθεί, μελετάται περαιτέρω η νέα αυτή επιφάνεια.

## 7 ΣΤΕΡΕΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 7.1 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΣΩ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΟΥ

Μετά τον καθαρισμό και τη φωτογράφιση των δοκιμίων ακολούθησε η στερεοσκοπική ανάλυση, η οποία πραγματοποιήθηκε στο στερεοσκόπιο του εργαστηρίου Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής . Οι φωτογραφίες που πάρθηκαν είναι σε μεγεθύνσεις x25, x40 και x50. Ο σκοπός της στερεοσκοπικής ανάλυσης είναι η περαιτέρω μακροσκοπική μελέτη της αστοχίας σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις από ότι έγινε κατά τον αρχικό οπτικό έλεγχο.

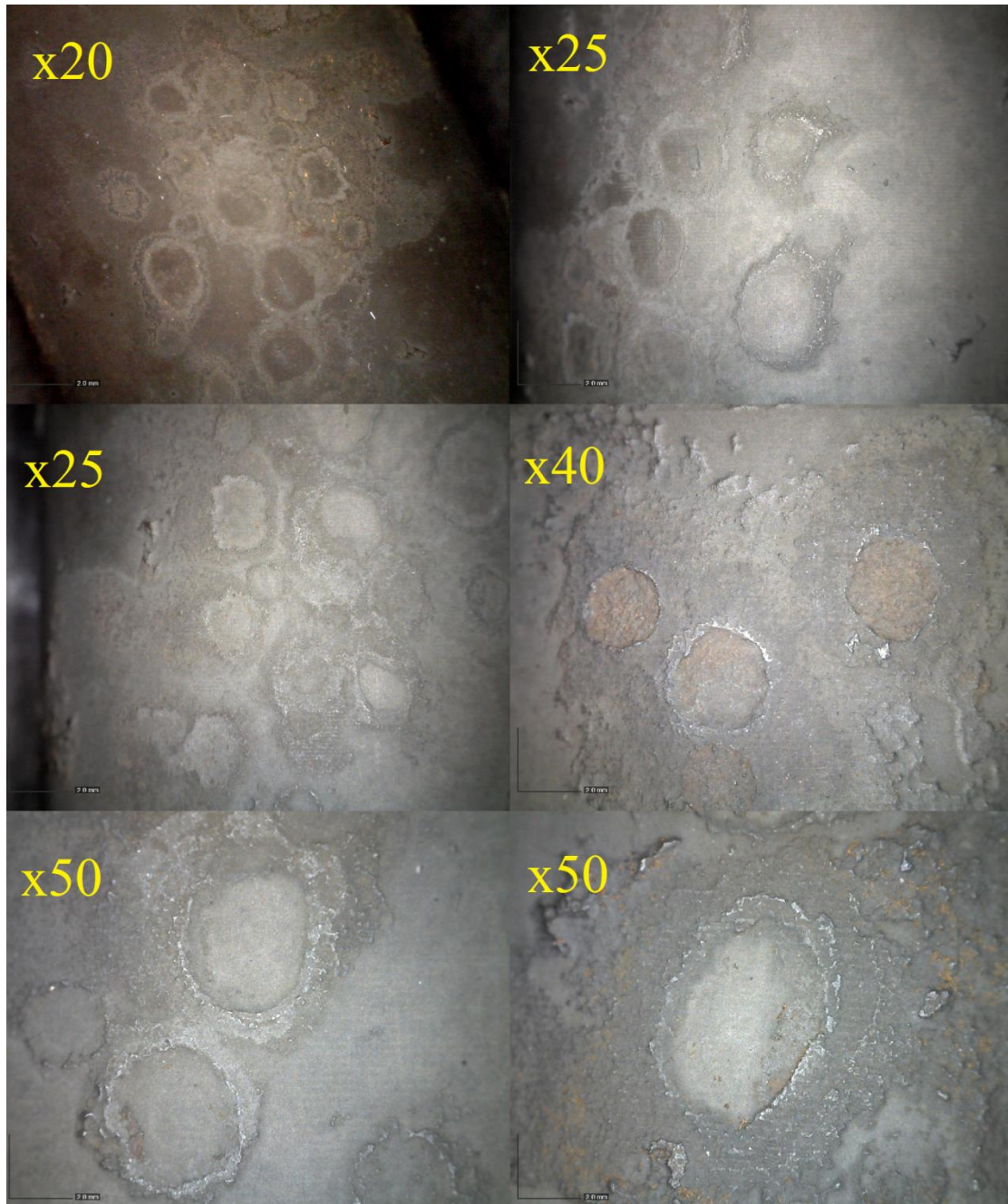


Εικόνα 7.1: Στερεοσκόπιο Digital Microscope Dremier Dino-Lite.



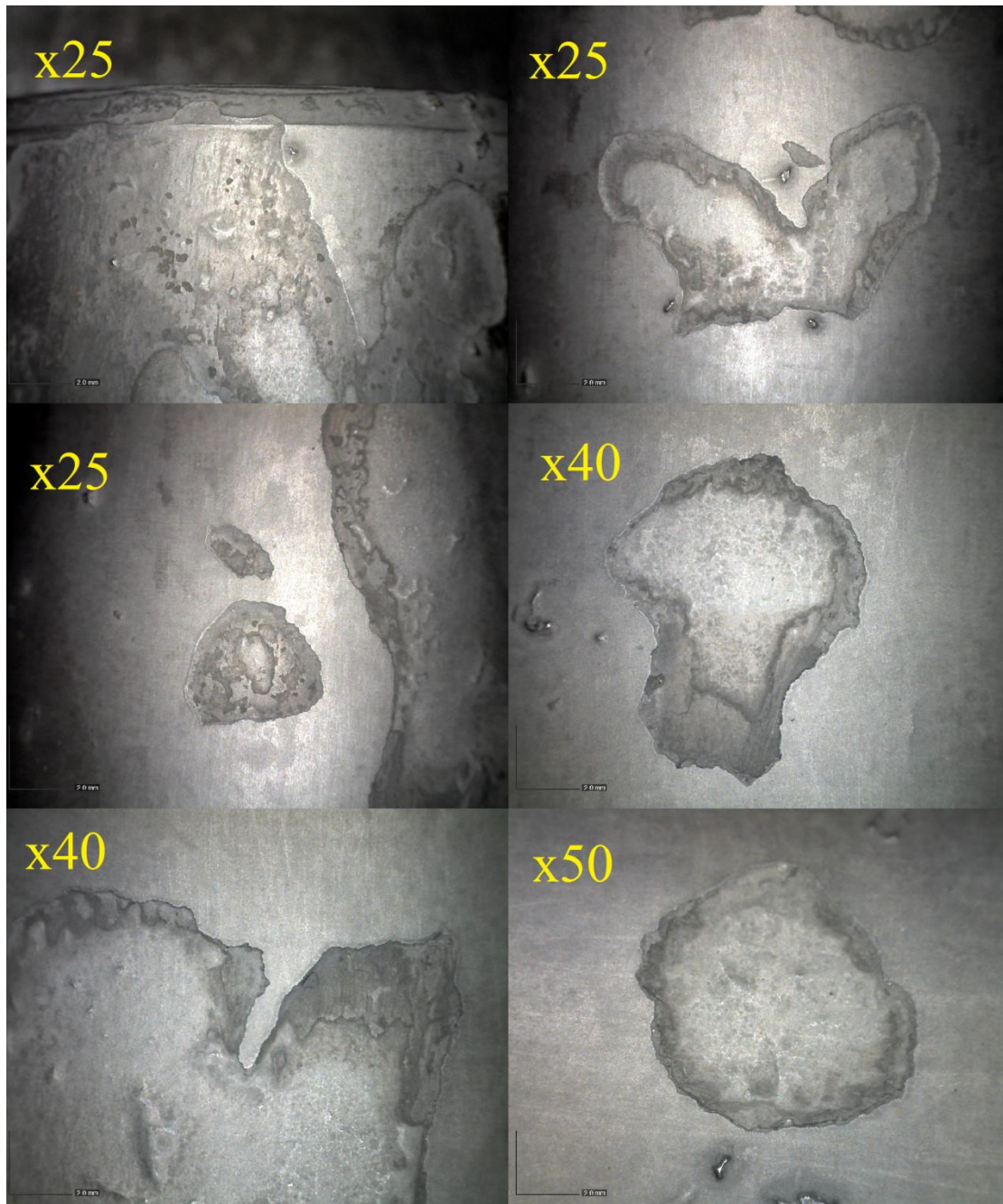
Κατά τον στερεοσκοπικό έλεγχο των πείρων μετά τον καθαρισμό, μπορούν να γίνουν οι έξης παρατηρήσεις για το τι επίδραση είχε ο χημικός καθαρισμός στην επιφάνεια:

- Αρχικά τα φουσκώματα του δοκιμίου ΙΙΙ έχουν δημιουργήσει πλέον σημάδια «κρατήρες» μετά από την διάλυση της εξωτερικής επιφάνειας κατά τον χημικό καθαρισμό.



Εικόνα 7.2: Δοκίμιο ΙΙΙ, σημάδια «κρατήρες» σε διάφορες μεγεθύνσεις.

- Αντίθετα, στο δοκίμιο IV είναι περισσότερο ξεκάθαρη η αποκόλληση του εξωτερικού φλοιού της επιφάνειας, ο οποίος πλέον φαίνεται να έχει δημιουργήσει τρία διαφορετικά επίπεδα. Το εξωτερικό το οποίο είναι ότι έχει απομείνει από τον αρχικό φλοιό, ένα ενδιάμεσο που πλέον καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας και ένα τρίτο όπου είναι εμφανές μόνο στα σημεία αποκόλλησης ολόκληρων κομματιών από το δεύτερο επίπεδο.



Εικόνα 7.3: Δοκίμιο IV, απεικόνιση αποκόλλησης και δημιουργία τριών επιπέδων σε διάφορες μεγεθύνσεις.

- Διακρίνονται διάφορα εξογκώματα ως κατάλοιπο του εξωτερικού φλοιού που πλέον δεν υπάρχει.
- Επίσης στα παραπάνω εξογκώματα (και όχι μόνο) είναι εμφανής σημάδια μηχανουργικής κατεργασίας.



**Εικόνα 7.4:** Δοκίμιο ΙΙΙ, απεικόνιση εξογκωμάτων με εμφανή σημάδια μηχανουργικής κατεργασίας σε μεγέθυνση x25.

- Τέλος σε ορισμένα σημεία φαίνονται ακόμη κάποια κατάλοιπα οξείδωσης τα οποία δεν απομακρύνθηκαν πλήρως κατά τον χημικό καθαρισμό.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, μπορεί να ειπωθεί ότι ο χημικός καθαρισμός των δοκιμίων είχε μια καταλυτική επίδραση στην εμφάνιση του συνολικού μεγέθους την αστοχίας στην επιφάνεια των πείρων.

## 8 ΔΟΚΙΜΗ ΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Αμέσως μετά τον καθαρισμό των δοκιμίων, ακολούθησαν οι μετρήσεις σκληρότητας. Ο σκοπός αυτού του ελέγχου είναι να μετρηθεί η σκληρότητα του υλικού. Η σκληρότητα ενός υλικού μπορεί να συσχετιστεί με την αντοχή σε εφελκυσμό για πολλά μέταλλα και κράμματα και μπορεί να δώσει μια καλή ένδειξη για την κατεργασιμότητα, την αντοχή σε φθορά, την δυσθραυστότητα και την ολκιμότητα. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο σκληρόμετρο του εργαστηρίου InnovaTest 600 Series.



**Εικόνα 8.1:** Σκληρόμετρο InnovaTest 600 Series.

Αρχικά, λειάνθηκαν οι δυο πλευρές κάθε δοκιμίου με χαρτί λείανσης τραχύτητας x240 και σε 250 grm. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η σκληρότητα που μετρήθηκε, αφορά την επιφανειακή σκληρότητα του πείρου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1 .

**Πίνακας 8.1:** Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας.

Μετρήσεις	Δοκίμιο	
	III	IV
1	45	45
2	45	45
3	45	44
4	46	45
5	46	45
6	46	45
<b>Σκληρότητα HRC</b>	45,5	44,8

Η αρχική σκληρότητα του υλικού πριν τις θερμικές κατεργασίες σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο είναι 270 HB, δηλαδή περίπου 28 HRC [27].

Επίσης σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του συγκεκριμένου χάλυβα η προβλεπόμενη σκληρότητα είναι 62 HRC μετά από βαφή και επαναφορά [27].

Από τον πίνακα 8.1 συμπεραίνεται ότι το υλικό έχει υποστεί μερική σκλήρυνση μέσω της θερμικής κατεργασίας ενανθράκωσης.

Η μικροσκοπική ανάλυση που ακολουθεί, είναι αυτή που θα δώσει τις επιπλέον απαιτούμενες πληροφορίες.



**Εικόνα 8.2:** Δοκίμιο III (αριστερά), δοκίμιο IV (δεξιά) μετά την δοκιμή σκληρομέτρησης.

## 9 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Το εργαστήριο του Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής παρέχει όλον τον απαραίτητο εργαστηριακό εξοπλισμό για την διεξαγωγή της προετοιμασίας των δοκιμίων.

Το στάδιο της προετοιμασίας των δοκιμίων έχει ως σκοπό να προετοιμάσει τα δοκίμια κατάλληλα έτσι ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν μικροσκοπικά μέσω της δοκιμής μικροσκληρομέτρησης και της μεταλλογραφικής ανάλυσης. Η προετοιμασία αυτή περιλαμβάνει αρχικά την κοπή των δοκιμίων, τον εγκιβωτισμό τους, την λείανση και τέλος την στίλβωση και αφορά το δοκίμιο III.

- Μηχάνημα κοπής Struers Lobotom-3 (Αριθμός μοντέλου: 05326146 Σειριακός αριθμός: 5321698).



**Εικόνα 9.1:** Μηχάνημα κοπής Struers Lobotom-3.

- Μηχανή λείανσης και στίλβωσης Presi, μοντέλο Mecapol P 262.



**Εικόνα 9.2:** Μηχανή λείανσης και στίλβωσης Presi.

- Μικροσκληρόμετρο Shimadzu (Σειριακός αριθμός: 341-64278).

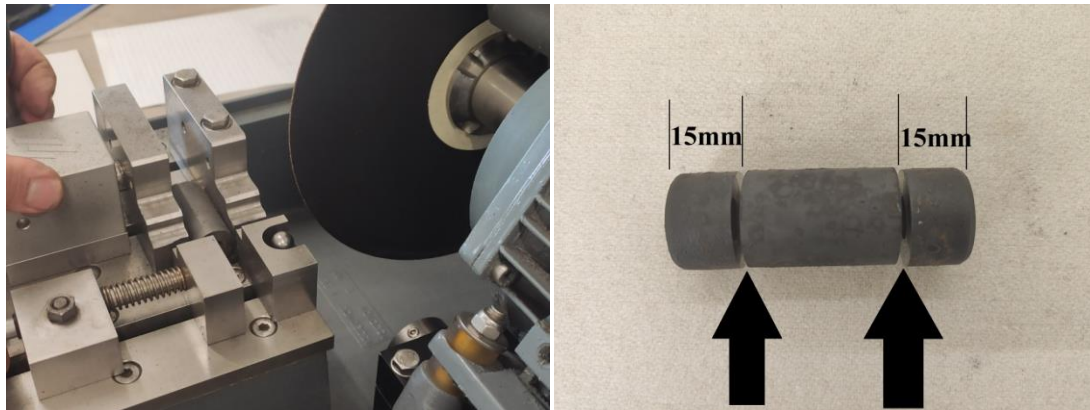


**Εικόνα 9.3:** Μικροσκληρόμετρο Shimadzu.



## 9.2 ΚΟΠΗ

Ο κάθε πείρος τεμαχίστηκε σε 3 κομμάτια στα 15mm από την πάνω και κάτω πλευρά, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.5. Από αυτά τα 3 κομμάτια κάθε πείρου, επιλέχθηκαν για μελέτη τα δύο ακριανά. Επίσης ονοματίστηκαν εκ νέου σε IIIA, IIIB και IVA, IVB.



**Εικόνα 9.4:** Διαδικασία κοπής δοκιμίου III(αριστερά), κοπή δοκιμίου III σε τρία τεμάχια (δεξιά).

## 9.3 ΛΕΙΑΝΣΗ

Ο σκοπός της λείανσης είναι να μειωθεί η τραχύτητα της επιφάνειας των δοκιμίων. Η λείανση πραγματοποιήθηκε στο μηχάνημα της εικόνας 9.3 στις 250 στροφές με τρεχούμενο νερό και χρησιμοποιήθηκαν διαδοχικά τα λειαντικά χαρτιά τραχύτητας P60, P80, P240, P320, P600, P800, P1000, P1200, P2400.

## 9.4 ΣΤΙΛΒΩΣΗ

Χρησιμοποιήθηκαν οι λειαντικοί δίσκοι της εικόνας 9.6 καθώς επίσης και τα αιωρήματα διαμαντιού και αλουμίνας.



**Εικόνα 9.5:** Λειαντικοί δίσκοι που χρησιμοποιήθηκαν, τραχύτητας 6μm 3μm 1μm 0.25μm (αντίστοιχα από αριστερά προς τα δεξιά).

Η στίλβωση ολοκληρώθηκε σε 4 στάδια ξεκινώντας από τον δίσκο τραχύτητας 6μm (μαζί με το κατάλληλο αιώρημα) και φτάνοντας μέχρι και αυτόν των 0.25μm.



**Εικόνα 9.6:** Δοκίμια IIIA και IIIB αμέσως μετά την ολοκλήρωση της στίλβωσης.

## 10 ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

### 10.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Οι δοκιμές μικροσκληρομέτρησης μπορούν να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό και την ποσοτικοποίηση διακυμάνσεων σκληρότητας οι οποίες εμφανίζονται σε μικρή απόσταση. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να είναι εσκεμμένες, όπως κατά την επιφανειακή σκλήρυνση, από διαδικασίες όπως: ενανθράκωση, εναζώτωση, ενανθρακαζώτωση ή μπορεί να είναι μη εσκεμμένες λόγω προβλημάτων όπως η εξανθράκωση. Ακόμα η χαμηλή τιμή δύναμης που εφαρμόζεται κατά την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης, επεκτείνουν την χρήση της δοκιμής και σε υλικά πολύ λεπτά ή πολύ μικρά.

Για την παρούσα μελέτη, ο σκοπός της δοκιμής μικροσκληρομέτρησης είναι να ερευνηθεί το προφίλ της σκληρότητας της επιφάνειας το οποίο θα δώσει περισσότερες πληροφορίες για το βάθος εμποτισμού. Η διαδικασία λήψης των μετρήσεων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM, E384-17.

Μετρήθηκαν από δύο προφίλ σκληρότητας αντιδιαμετρικά και υπό φόρτιση 200gr για 15 sec. Ο διεισδυτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν διεισδυτής Vickers.



**Εικόνα 10.1:** Αποτυπώματα δοκιμίου IIIA (αριστερά), αποτυπώματα δοκιμίου IIIB (δεξιά).

## 10.2 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΙΙΑ

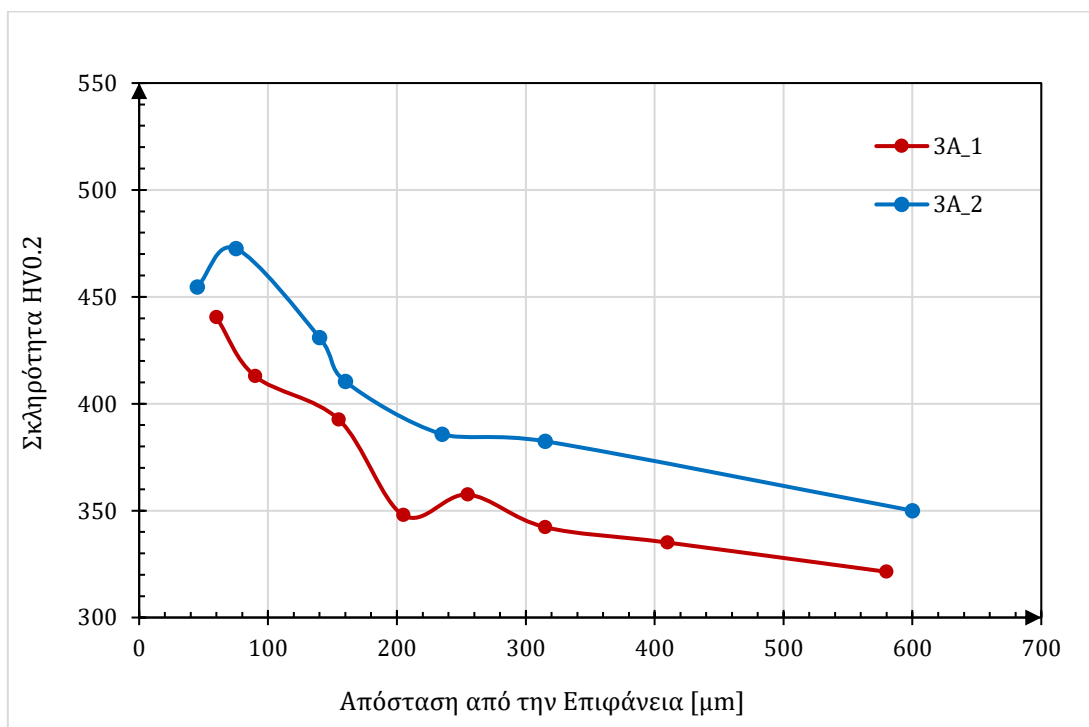
Παρακάτω παρουσιάζονται πινακοποιημένες οι μετρήσεις σκληρότητας για κάθε προφίλ και τα αντίστοιχα διαγράμμάτα τους. Οι ενδείξεις σκληρότητας είναι καταχωρημένες κατά σκληρότητα Vickers.

**Πίνακας 10.1:** Μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης πρώτου προφίλ σκληρότητας δοκιμίου ΙΙΑ.

A/A	Απόσταση από την επιφάνεια (μm)	Διάμετροι (μm)	Μέση τιμή	Τιμή σκληρότητας	HV0.2 (διορθ.)
1	60	29,7	29,65	421,9	440,4
		29,6			
2	90	30,7	30,7	393,5	412,9
		30,7			
3	155	31,6	31,55	372,6	392,5
		31,5			
4	205	33,8	33,7	326,6	347,8
		33,6			
5	255	33,6	33,2	336,5	357,5
		32,8			
6	315	34,0	34	320,8	342,3
		34,0			
7	410	34,5	34,4	313,4	335,1
		34,3			
8	580	35,3	35,2	299,3	321,4
		35,1			

**Πίνακας 10.2:** Μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης δεύτερο προφίλ σκληρότητας δοκιμίου ΠΑ.

A/A	Απόσταση από την επιφάνεια (μm)	Διάμετροι (μm)	Μέση τιμή	Τιμή σκληρότητας	HV0.2 (διορθ.)
1	45	29,7	29,15	436,5	454,6
		28,6			
2	75	27,7	28,55	455,0	472,6
		29,4			
3	140	29,5	30	412,1	430,9
		30,5			
4	160	30,4	30,8	391,0	410,4
		31,2			
5	235	31,4	31,85	365,6	385,8
		32,3			
6	315	31,6	32	362,2	382,4
		32,4			



**Εικόνα 10.1:** Γραφική αναπαράσταση της κατανομής σκληρότητας σε απόσταση κάθετη από την επιφάνεια του δοκιμίου ΠΑ.

### Παρατηρήσεις

Αρχικά, οι μετρήσεις παρουσιάζουν ομοιογένεια. Στην συνέχεια παρατηρείται αυξημένη σκληρότητα στο επιφανειακό στρώμα, υποδεικνύοντας έτσι ότι η επιφάνεια ενανθρακώθηκε φτάνοντας περίπου 472 HV δηλαδή περίπου 46 HRC [27].

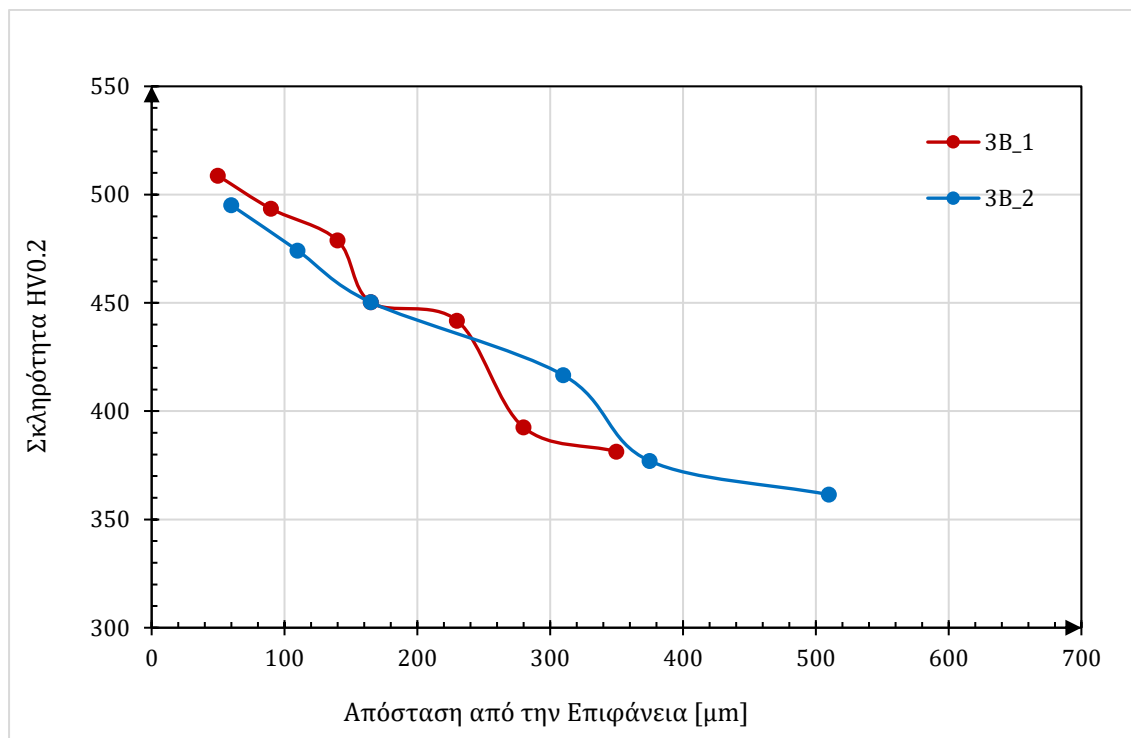
## 10.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΙΙΒ

**Πίνακας 10.3:** Μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης πρώτου προφίλ σκληρότητας δοκιμίου ΙΙΒ.

A/A	Απόσταση από την επιφάνεια (μm)	Διάμετροι (μm)	Μέση τιμή	Τιμή σκληρότητας	HV0.2 (διορθ.)
1	50	27,5	27,45	492,2	508,7
		27,4			
2	90	28,1	27,9	476,5	493,4
		27,7			
3	140	28,7	28,35	461,5	478,8
		28,0			
4	165	29,6	29,3	432,0	450,3
		29,0			
5	230	29,6	29,6	423,3	441,8
		29,6			
6	280	31,9	31,55	372,6	392,5
		31,2			
7	350	32,2	32,05	361,1	381,3
		31,9			

**Πίνακας 10.4:** Μετρήσεις μικροσκληρομέτρησης πρώτου προφίλ σκληρότητας δοκιμίου ΠΙΒ.

A/A	Απόσταση από την επιφάνεια (μm)	Διάμετροι (μm)	Μέση τιμή	Τιμή σκληρότητας	HV0.2 (διορθ.)
1	60	28,0	27,85	478,2	495,1
		27,7			
2	110	28,6	28,5	456,6	474,1
		28,4			
3	165	29,3	29,3	432,0	450,3
		29,3			
4	310	30,4	30,55	397,4	416,6
		30,7			
5	375	31,4	32,25	356,6	377,0
		33,1			
6	510	33,0	33	340,6	361,4
		33,0			



**Εικόνα 10.2:** Γραφική αναπαράσταση της κατανομής σκληρότητας σε απόσταση κάθετη από την επιφάνεια του δοκιμίου ΠΙΑ.

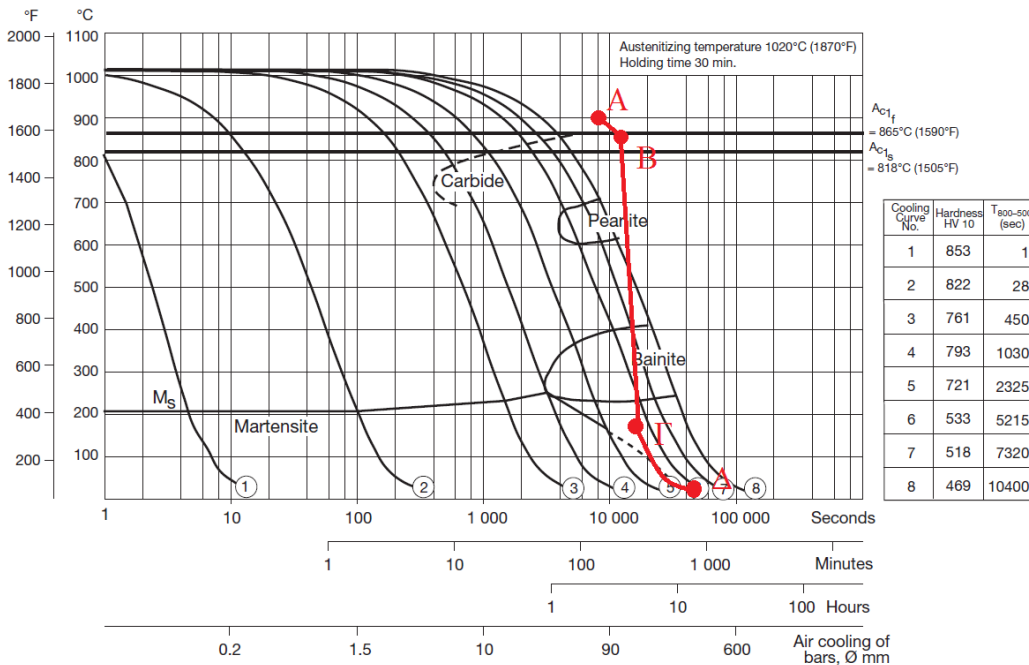
### Παρατηρήσεις

Όπως και στο προηγούμενο δοκίμιο, οι μετρήσεις παρουσιάζουν ομοιογένεια. Το συγκεκριμένο προφίλ δείχνει ότι η επιφάνεια φτάνει σκληρότητα περίπου 508HV, δηλαδή περίπου 50 HRC [27].

Τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης επιβεβαιώνουν ότι η επιφάνεια τελικά ενανθρακώθηκε και με την βοήθεια του διαγράμματος συνεχούς απόψυξης CCT είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι τελικές φάσεις της μικροδομής.

### CCT-GRAPH

Austenitizing temperature 1020°C (1870°F). Holding time 30 minutes.



Εικόνα 10.3: Εκτίμηση φάσεων μικροδομής από διάγραμμα συνεχούς απόψυξης.

- **AB:** Χαμήλωμα θερμοκρασίας από 900°C σε 840°C (διάρκεια 30 λεπτά)
- **BΓ:** Ισοθερμοκρασιακή απόψυξη σε λουτρό άλατος (διάρκεια 20 λεπτά)
- **ΓΔ:** Απόψυξη έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος

Από το διάγραμμα συνεχούς απόψυξης μπορεί να γίνει η εκτίμηση της τελικής μικροδομής. Σύμφωνα λοιπόν με το διάγραμμα η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης είναι 1020°C, η κάτω κρίσιμη θερμοκρασία είναι 865°C και η άνω κρίσιμη περίπου 970°C. Αυτό σημαίνει ότι η θέρμανση στην θερμοκρασία των 900°C που υπέστη το υλικό, βρίσκεται ενδιάμεσα από την κάτω και πάνω κρίσιμη θερμοκρασία. Αυτή η θέρμανση πέτυχε έτσι έναν μερικό μετασχηματισμό της μικροδομής περλίτη σεμεντίτη σε ωστενίτη. Η απόψυξη από τους 900°C στους 840 °C περιόρισε το ποσοστό του ωστενίτη που τελικά μετασχηματίστηκε ενώ στην



συνέχεια η ισοθερμοκρασιακή απόψυξη στο λουτρό αλάτων είχε σαν αποτέλεσμα τον μετασηματισμό του ωστενίτη σε μπαινίτη και περλίτη.

Η τελική επαναφορά ουσιαστικά επανέφερε ότι ποσοστό μαρτενσίτη περιείχε η μικροδομή της επιφάνειας.

Έτσι η μικροδομή της καρδιάς περιέχει καρβίδια, περλίτη και μπαινίτη, ενώ η μικροδομή της επιφάνειας περιέχει καρβίδια μπαινίτη και ένα ποσοστό επαναφερμένου μαρτενσίτη.

## 11 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 11.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

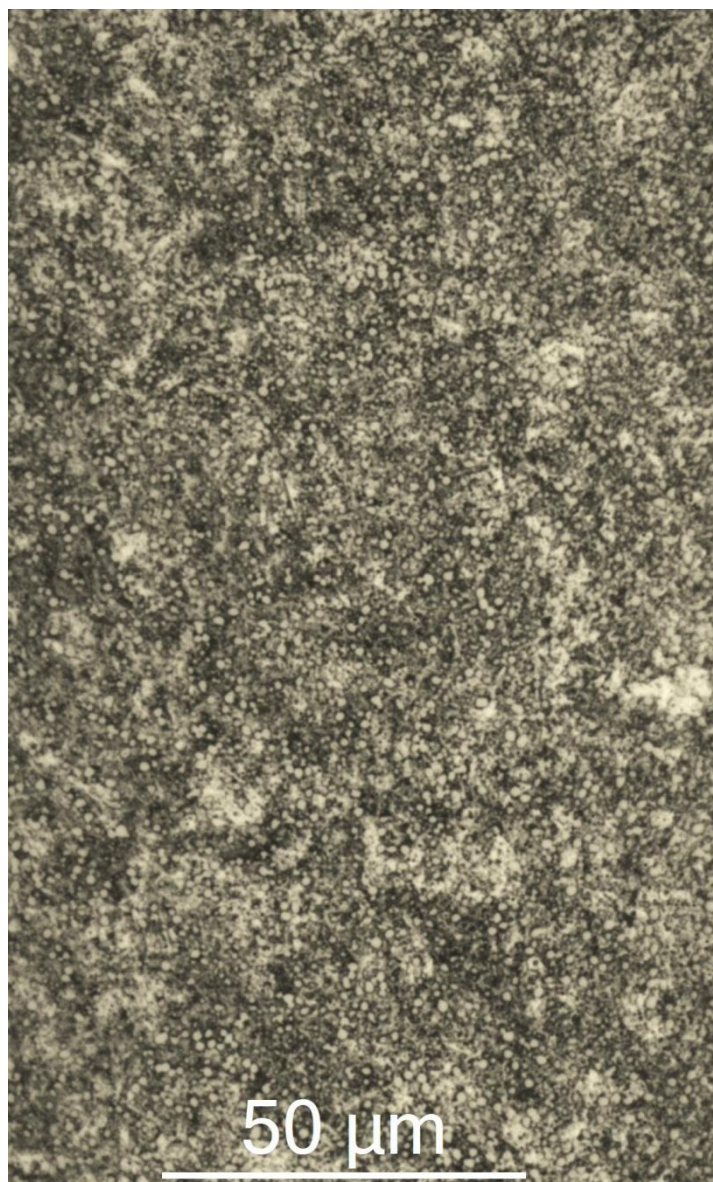
Αρχικά επιλέχθηκε το δοκίμιο ΠΙΑ στο οποίο πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή. Η χημική προσβολή έχει ως σκοπό την διάβρωση της επιφάνειας έτσι ώστε να μπορέσει να αναλυθεί η μικροδομή με την χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Η μεταλλογραφική ανάλυση η οποία ακολουθεί την χημική προσβολή, έχει ως σκοπό την μελέτη της μικροδομής του υλικού η οποία μπορεί να δώσει απαντήσεις για την ποιότητα του υλικού. Το χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε κατά την χημική προσβολή είναι picral και το δοκίμιο παρέμεινε εντός του για χρόνο 13,3 δευτερολέπτων. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μεταλλογραφική ανάλυση στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο της εικόνας 11.1.



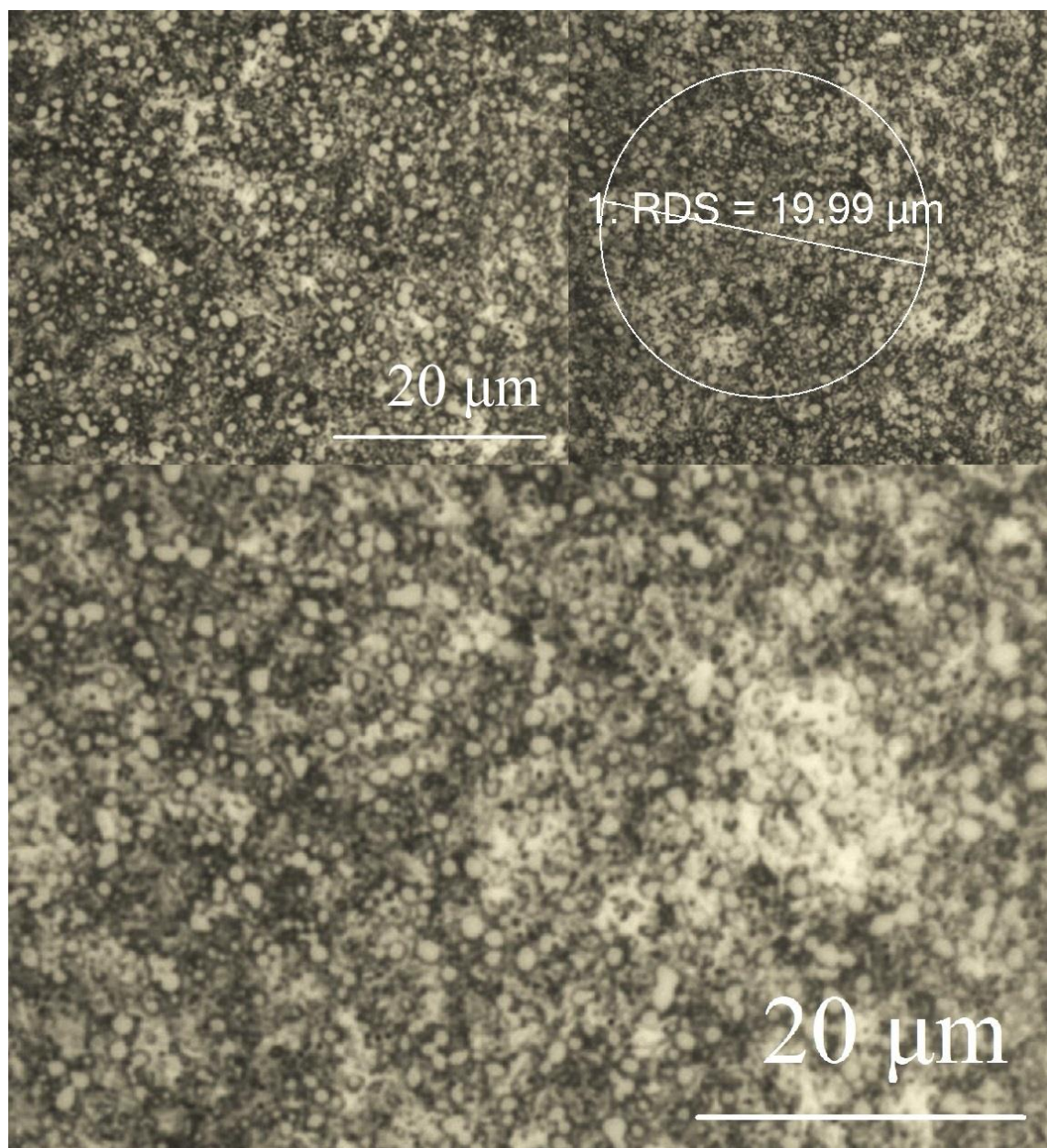
**Εικόνα 11.1:** Μεταλλογραφικό μικροσκόπιο Zeiss Axio Vert. A1.

### 11.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

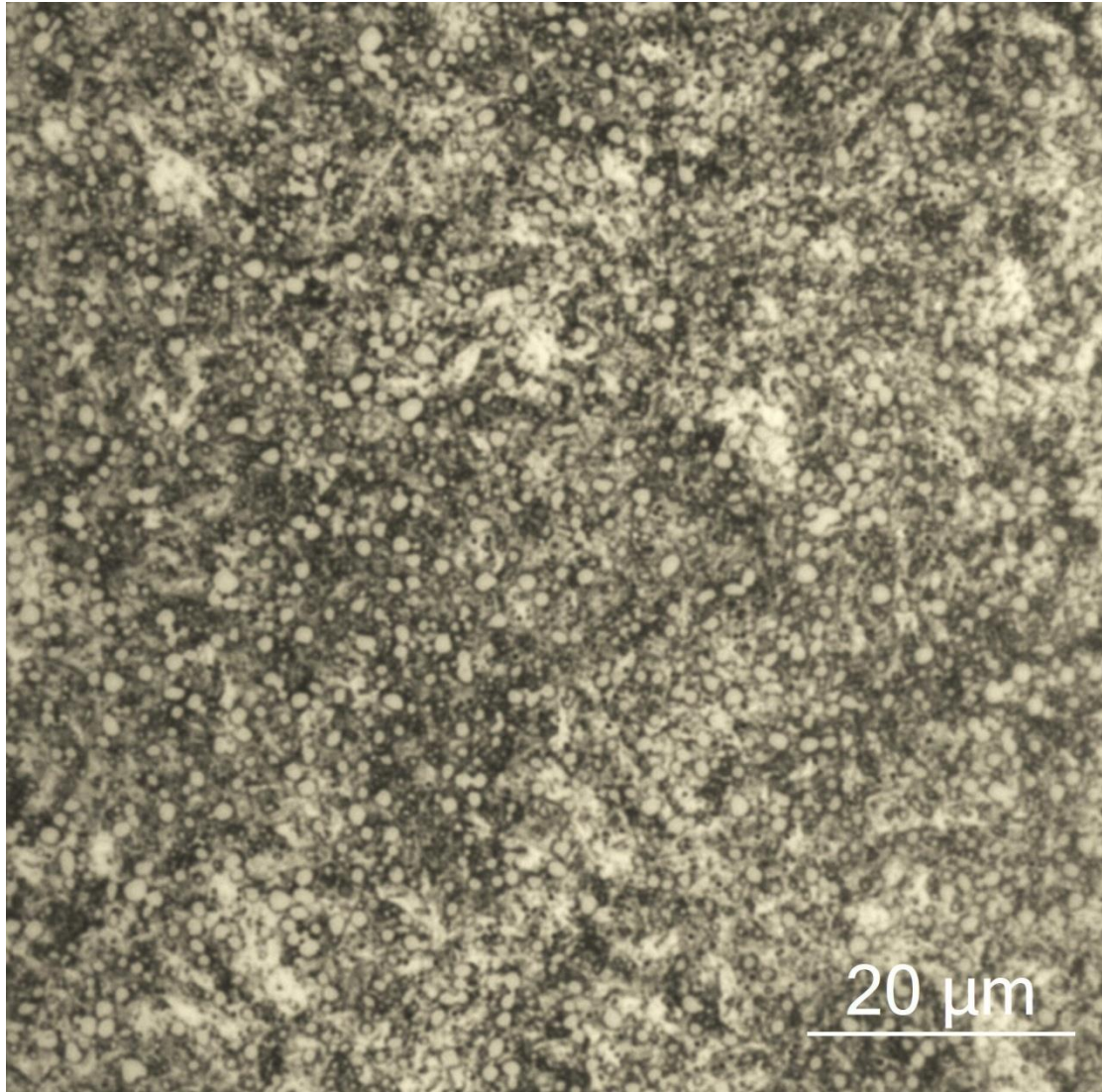
Κατά την μεταλλογραφική ανάλυση αρχικά μελετήθηκε η μικροδομή του υλικού σε μεγεθύνσεις x500, x1000, η οποία χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη διάσπαρτων πρωτογενών καρβιδίων χρωμίου (Cr), βαναδίου (V) και μολυβδαινίου (Mo).



**Εικόνα 11.2:** Μικροδομή δοκιμίου ΠΙΑ Σε μεγέθυνση x500.



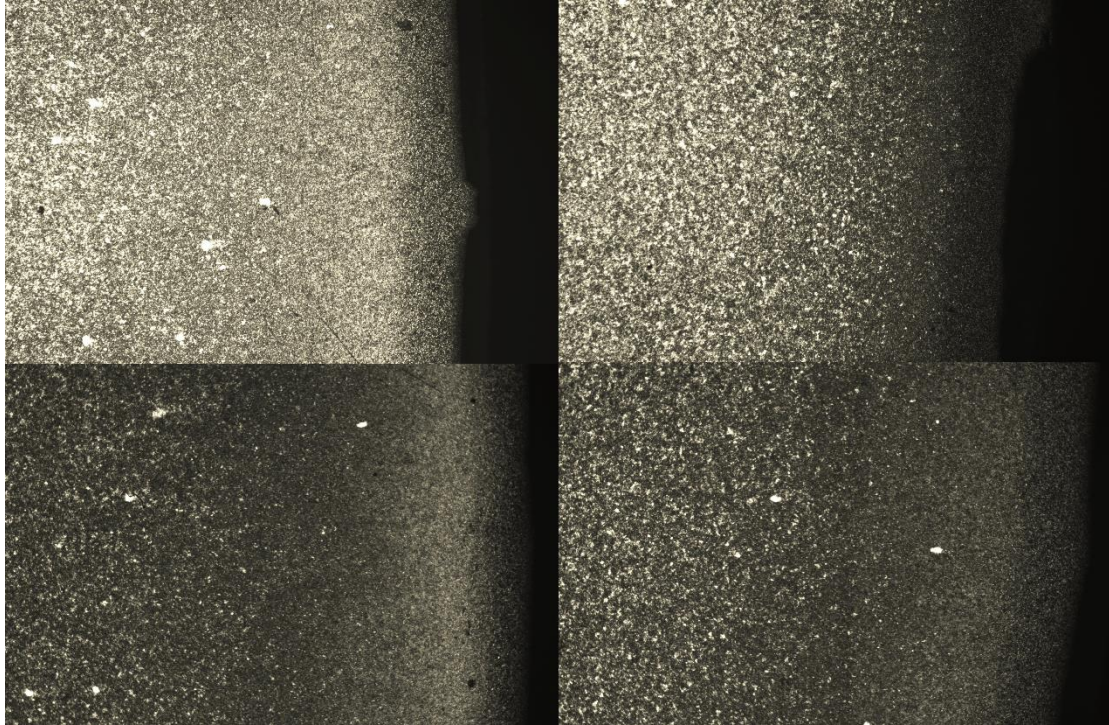
**Εικόνα 11.3:** Μικροδομή δοκιμίου IIIA σε μεγέθυνση x1000.



**Εικόνα 11.4:** Μικροδομή δοκιμίου ΠΑ, απεικόνιση πρωτογενών καρβιδίων σε μεγέθυνση x1000.

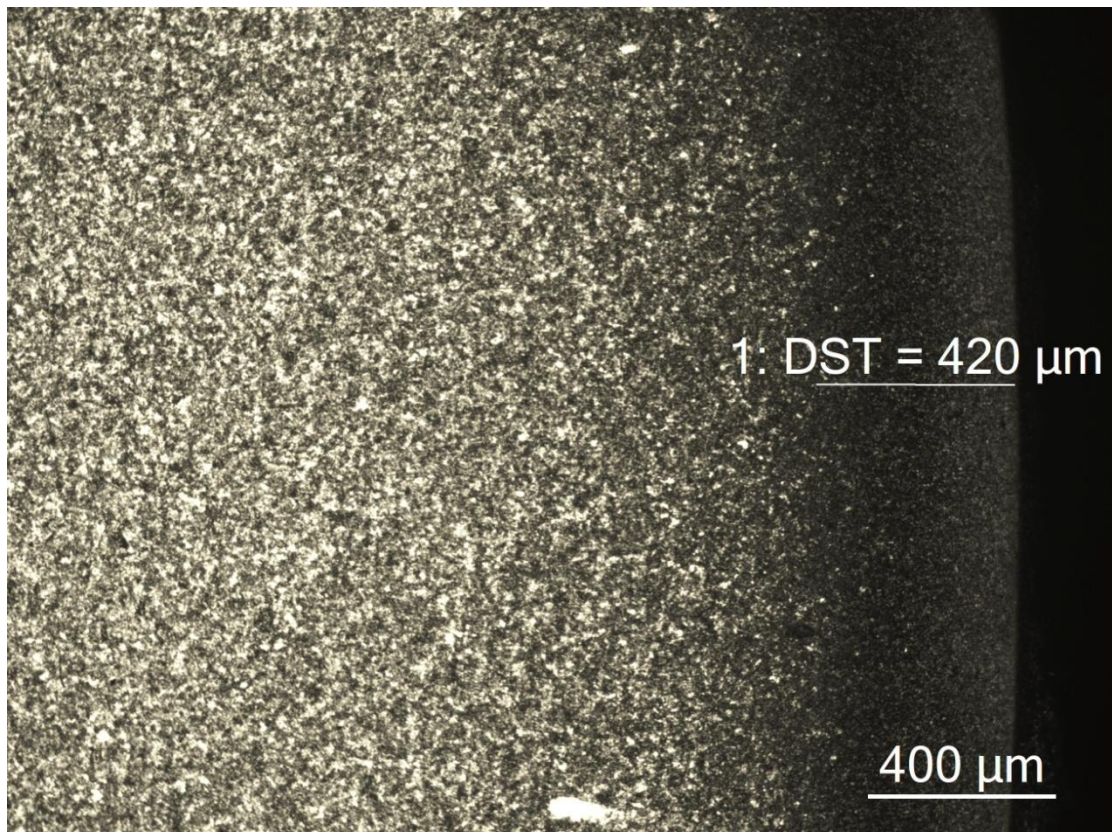
Διακρίνονται εύκολα τα πρωτογενή καρβίδια για τα οποία θα ήταν χρήσιμο αν γινόταν να μετρηθεί ο αριθμός τους ανά συγκεκριμένη επιφάνεια, δυστυχώς όμως δεν υπάρχει το απαραίτητο λογισμικό.

Στη συνέχεια, απεικονίστηκε το βάθος ενανθράκωσης σε διαφορετικές μεγεθύνσεις. Στην εικόνα 11.5 παρουσιάζεται το δοκίμιο ΙΙΑ σε διάφορα σημεία της επιφάνειας περιμετρικά του δοκιμίου, στα οποία διακρίνεται το βάθος ενανθράκωσης.



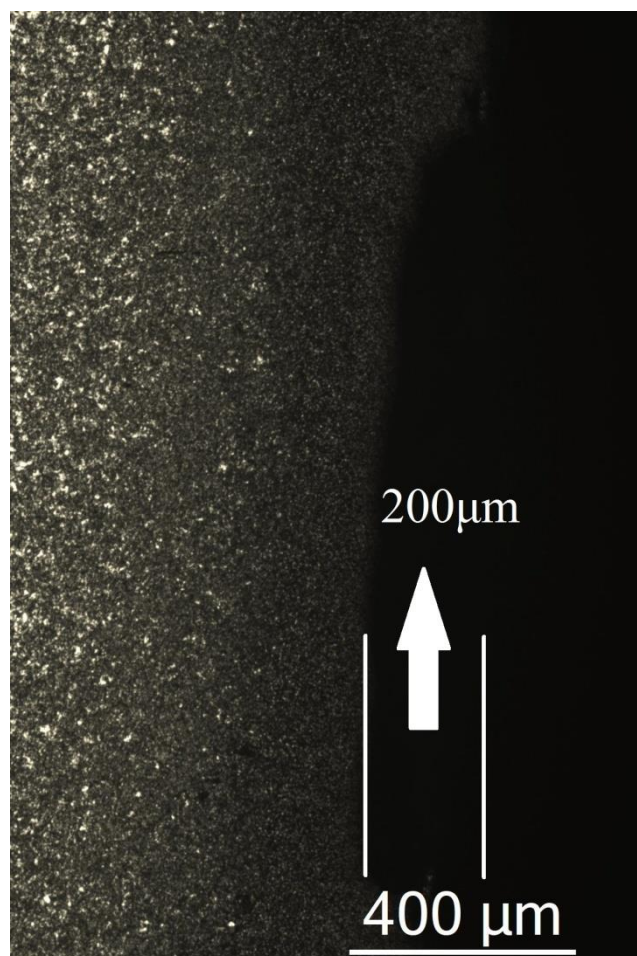
**Εικόνα 11.5:** Απεικόνιση βάθους ενανθράκωσης, σε διάφορα σημεία περιμετρικά του δοκιμίου.

Στην εικόνα 11.6, αποτυπώνεται το βάθος ενανθράκωσης, το οποίο υπολογίζεται περίπου 420 $\mu\text{m}$ .



**Εικόνα 11.6:** Απεικόνιση βάθους ενανθράκωσης σε μεγέθυνση x5.

Μια ακόμα πληροφορία η οποία μπορεί να υπολογισθεί μέσω του μικροσκοπίου, είναι το βάθος το οποίο φαίνεται μακροσκοπικά πως παρουσιάστηκε η αστοχία .Στην εικόνα 11.7 απεικονίζεται ένα σημείο της επιφάνειας, από το οποίο έχει αποκολληθεί ένα επιφανειακό κομμάτι.



**Εικόνα 11.7:** Αποφλοίωση επιφάνειας σε μεγέθυνση x5.

Το βάθος της συγκεκριμένης αποφλοίωσης μπορεί να υπολογισθεί περίπου στα 200μm.



## 12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΣΧΟΛΙΑ

Αρχικά ο μακροσκοπικός έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια, μπόρεσε και έδωσε μια περισσότερο ξεκάθαρη εικόνα της συνολικής αστοχίας που υπέστησαν. Στην συνέχεια ο μικροσκοπικός έλεγχος, έδωσε την δυνατότητα ανάλυσης της μικροδομής του υλικού, μέσω της οποίας εντοπίστηκε και υπολογίστηκε το βάθος ενανθράκωσης της επιφάνειας, η οποία και αστόχησε.

Ενώ η αρχική εκτίμηση ήταν ότι η επιφάνεια έχει υποστεί εξανθράκωση, γεγονός το οποίο προκάλεσε την επιφανειακή αστοχία, τελικά τα αποτελέσματα της μικροσκοπικής ανάλυσης υποδεικνύουν ότι η επιφάνεια του υλικού ενανθρακώθηκε σε βάθος 420 μm.

Από τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης και της μεταλλογραφικής ανάλυσης βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Πέραν της απόστασης των 420μm από την επιφάνεια και του βάθους εμποτισμού (δηλαδή στην καρδιά) το υλικό υπέστη ατελή σκλήρυνση λόγω έλλειψης ωστενίτη και θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, με την σκληρότητά του να φτάνει από περίπου 28 HRC σε περίπου 37 HRC. Μία αύξηση της εσωτερικής σκληρότητας του υλικού της τάξεως των 9 μονάδων HRC η οποία οφείλεται σε μπαινίτη και καρβίδια.
- Στην επιφάνεια η οποία ενανθρακώθηκε, το ισοδύναμο ποσοστό άνθρακα που δημιουργήθηκε παρήγαγε μία σκληρότητα περίπου 50 HRC, γεγονός το οποίο δικαιολογεί ποσοστό μετασχηματισμού σε μαρτενσίτη.

Στον χάλυβα Vanadis 8 δεν προβλέπεται η πραγματοποίηση της θερμική κατεργασίας της ενανθράκωσης. Η περισσότερο λογική υπόθεση είναι ότι η συγκεκριμένη ενανθράκωση προοριζόταν για κάποιον χάλυβα επιφανειακής βαφής με ποσοστό άνθρακα περίπου 0,2%. Αυτό δικαιολογείται και από την θερμοκρασία των 900°C η οποία θα ήταν μία θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης για τον χάλυβα επιφανειακής βαφής και από την δυναμικότητα του μέσου ενανθράκωσης η οποία (0,2 της επιφάνειας του υλικού – 0,8 του μέσου ενανθράκωσης) θα εξασφάλιζε την διάχυση άνθρακα από το περιβάλλον στην επιφάνεια του υλικού.

Η σκληρότητα στην περιοχή των 44 HRC η οποία εκτείνεται σε 420 μm, δείχνει ότι το υλικό επηρεάστηκε θερμικά μόνο στην περιοχή όπου έγινε η ενανθράκωση.

Στην περίπτωση χάλυβα επιφανειακής βαφής, το αναμενόμενο βάθος ενανθράκωσης θα κυμαίνονταν μεταξύ των 800-1000μm. Στην παρούσα περίπτωση παρατηρείται ένας περιορισμένος έκτασης εμποτισμός ο οποίος είναι περίπου μισός από τον αναμενόμενο για μια περίπτωση χάλυβα επιφανειακής βαφής. Αυτό συμβαίνει για δύο βασικούς λόγους.

1. Λόγω της χημικής σύστασης του υλικού το οποίο δεν ευνοεί τη διάχυση σε αυτή τη θερμοκρασία.
2. Λόγω της θερμοκρασίας των 900°C όπου το συγκεκριμένο υλικό βρίσκεται λίγο πάνω από την  $A_{c1f}$ , οπότε ο μετασχηματισμός σε ωστενίτη είναι περιορισμένος.

Αυτοί είναι οι δύο λόγοι οι οποίοι συνέβαλαν στο να υπάρξει αυτός ο περιορισμένος εμποτισμός άνθρακα σε βάθος 400μm.

Η διάχυση ατόμων άνθρακα στην επιφάνεια υλικού κονιομεταλλουργίας οδήγησε στην ψαθυροποίηση της επιφάνειας η οποία μακροσκοπικά εμφανίστηκε με την αποσάθρωση του υλικού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Pasquale Cavaliere, (2019), Clean Ironmaking and Steelmaking processes, Springer
- [2]. Mazumdar-James W. Evans , (2010), Modeling of steelmaking processes, CRC Press
- [3]. Ahindra Ghosh- Amit Chatterjee, (2008), Ironmaking and Steelmaking Theory and Practice, PHI Learning Limited (p.39-40)
- [4]. The State of the art Clean technologies (SOACT) for Stellmaking Handbook (2010) (2<sup>nd</sup> edition ) ( p.5-6 )
- [5]. The Making, Shaping and Treating of Steel 11<sup>th</sup> edition Steelmaking and Refining Volume ,(1998) TheAISE Steel Foundation , ( p.475 )
- [6]. Ahindra Ghosh,( 2001), Secondary Steelmaking principles and applications - CRC Press ( p.14-15 )
- [7]. ASM Handbook Volume 15 Casting – ASM International (1992) (p. 873-874, 877 )
- [8]. ASM Handbook Volume 7 Powder metal Technologies and Applications– ASM International (1998) (p. 27,34,84,1425,1426)
- [9]. Τεχνικό φυλλάδιο χάλυβα Uddeholm Vanadis 8 Superclean εταιρίας Uddeholm, [https://www.uddeholm.com/files/PB\\_Uddeholm\\_vanadis\\_8\\_english.pdf](https://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_vanadis_8_english.pdf) (13-10-2021)
- [10]. T.S. Srivatsan , T.S. Sudarshan ,(2016), Additive Manufacturing innovations, advances and applications, CRC Press (p. 2, 15, 25 )
- [11]. Επιστημη και τεχνολογια μεταλλικών υλικών - Γ.Δ. Χρυσουλάκη, Δ.Ι. Παντελή Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004 ( Κεφάλαιο 15ο )
- [12]. ASM Handbook Volume 4 Heat Treating – ASM International (1991) (p. 607, 1587)
- [13]. Geoffrey Parrish, (1999), Carburizing: microstructures and properties ASM International (p.37)
- [14]. Harry Chandler, (1995), Heat Treater’s Guide : Practices and Procedures for Irons and Steels — ASM International (p. 1)
- [15]. ASM Handbook Volume 7 Powder metal Technologies and Applications (p.1642-1645,1652-1653)
- [16]. MAHLE GmbH Cylinder, (2016) Components, properties-applications-materials ( 2<sup>nd</sup> Edition ), Editor. Springer Vieweg (p. 25-28,38, 40-42)
- [17]. Jose Luis Otegui , (2014), Failure Analysis, Fundamentals and applications in mechanical components, Springer ( 2<sup>nd</sup> Chapter 25-45)
- [18]. S. Ashok and Syndar Sriram, (2008), Failure analysis of powder metal steel components, Sundram Fasteners Ltd- ASM International (p.399-401)

- [19]. Handbook Volume 11 Failure analysis and Prevention, (2002) ASM International
- [20]. <https://www.nanoscience.com/applications/materials-science/fractography/> (5-10-2021)
- [21]. <https://hsseworld.com/wp-content/uploads/2021/08/magnetic-particle-testing.jpg> (7-10-2021)
- [22]. [https://kardensales.com/image/catalog/blog\\_images/SpotCheck.jpg](https://kardensales.com/image/catalog/blog_images/SpotCheck.jpg) (7-10-2021)
- [23]. [https://uploads-ssl.webflow.com/5eb62a0f162ee60ee55ff51a/5eb62a0f162ee6bd295ff539\\_Ultrasonic%20Testing%20NDT.jpg](https://uploads-ssl.webflow.com/5eb62a0f162ee60ee55ff51a/5eb62a0f162ee6bd295ff539_Ultrasonic%20Testing%20NDT.jpg) (7-10-2021)
- [24]. <https://nde-solutions.com/wp-content/uploads/2021/01/standard-ndt-1-min-scaled.jpg> (7-10-2021)
- [25]. <https://docs.rs-online.com/5dc5/0900766b81478cb7.pdf> (8-10-2021)
- [26]. Kinetics of Phosphorus Transfer during Industrial Electroslag Remelting of G20CrNi2Mo Bearing Steel, <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/4/467> (10-10-2021)
- [27]. ASTM E140-12Be1 (2019), Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness. ASTM International