

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ DIN 15CRNI6**

Δραγάτης Αρσένιος του Ανδρέα

Επιβλέπων: Μέντρεα Κάρμεν
Δρ. Μεταλλειολόγος-Μεταλλουργός Μηχανικός
Συνεπιβλέπων: Παπαγεωργίου Γ. Δημήτριος
Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ, Υπ. Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος, 2019



Επιτρέπεται η αντιγραφή, διανομή, αναπαραγωγή και η παρουσίαση της εργασίας και των παράγωγων έργων που βασίζονται σε αυτή, με την προϋπόθεση της πλήρους αναφοράς των στοιχείων της εργασίας, όπως αναγράφονται στο εξώφυλλο και η διάθεση των νέων δημιουργημάτων με τους ίδιους ακριβώς όρους.

UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

BSc THESIS

**INFLUENCE ON MECHANICAL PROPERTIES OF
CARBURIZATION IN DIN 15CRNI6 CASE
HARDENING STEEL**

Dragatsis A. Arsenios

Supervisor: Medrea Carmen
Dr. Mining-Metallurgical Engineer
Co-Supervisor: Papageorgiou G. Dimitrios
Mechanical Engineer NTUA, PhD Cand. NTUA

Athens, March, 2019



Επιτρέπεται η αντιγραφή, διανομή, αναπαραγωγή και η παρουσίαση της εργασίας και των παράγωγων έργων που βασίζονται σε αυτή, με την προϋπόθεση της πλήρους αναφοράς των στοιχείων της εργασίας, όπως αναγράφονται στο εξώφυλλο και η διάθεση των νέων δημιουργημάτων με τους ίδιους ακριβώς όρους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται την επίδραση της ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα DIN 15CrNi6 (W.Nr. 1.5919) μετά από συνεχή και κλιμακωτή βαφή. Ο συγκεκριμένος χάλυβας συγκαταλέγεται στους ελαφρά κραματωμένους, επιφανειακής βαφής. Έχει ευρεία χρήση σε εφαρμογές στοιχείων μηχανών όπως άξονες και άτρακτοι καθώς και σε κοπτικά αλλά και διαμορφωτικά καλούπια που δουλεύουν εν ψυχρώ. Για τις ανάγκες της εργασίας, διεξήχθησαν θερμικές κατεργασίες ενανθράκωσης συνεχούς βαφής και κλιμακωτής βαφής σε δύο ομάδες δοκιμίων για διάφορους χρόνους ενανθράκωσης. Σκοπός της εργασίας είναι ο ποσοτικός προσδιορισμός της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα αλλά και η σύγκριση των δύο διαφορετικών τύπων απόψυξης (συνεχής βαφή σε λάδι και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος). Οι θερμικές κατεργασίες όσο και μηχανικές δοκιμές, πραγματοποιήθηκαν βάσει των τεχνικών φυλλαδίων του κατασκευαστή του χάλυβα και των διεθνών προτύπων αντίστοιχα. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάμψης, όπως επίσης και μετρήσεις μικροσκληρότητας τύπου Vickers (HV0.2). Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη θραυστογραφίας, μετά την δοκιμή της κάμψης, με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Η εργασία ολοκληρώνεται με την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την παρουσίαση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν.

Λέξεις κλειδιά: Χάλυβας DIN 15CrNi6, Βάθος Ενανθράκωσης, Μικροσκληρότητα, Θραυστογραφία, Δοκιμή Κάμψης

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the examination of the influence of carburizing on the mechanical properties of DIN 15CrNi6 after continuous and isothermal quenching. The thesis was accomplished in the Quality Control and Technology of Metallic Materials Laboratory of the Department of Mechanical Engineering, UNIWA. This particular steel is one of the low alloyed, case hardening steels. It is widely used in machine tool applications such as shafts and spindles as well as cutting and shaping molds that work in cold conditions. Carburization heat treatment of continuous quenching in oil and isothermal quenching were performed for the needs of this study, on two sets of specimens for several times. The main object of this thesis is to quantify the effect of carburization time on the mechanical properties of steel and to compare the two different types of cooling (continuous quenching in oil and isothermal quenching). The heat treatments and mechanical tests were carried out on the basis of the steel manufacturer's technical prospectus and international standards, respectively. Bending tests, as well as Vickers microhardness measurements (HV0.2), were performed for quantification of mechanical properties. Finally, a fractography study was performed after the bending test using a scanning electron microscope (SEM). The work is completed by the statistical processing of the results and the presentation of the conclusions drawn.

Key words: *DIN 15CrNi6 steel, Depth Carburizing, Microhardness, Fractography, Bending Flexural Test*

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας
(Declaration of academic integrity)

Ο υπογράφων υπεύθυνα δηλώνει ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία με τίτλο «Επιρροή της ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα DIN 15CrNi6», είναι αποκλειστικά δική μου δουλειά και ότι αν υπάρχουν αποσπάσματα κειμένου ή διαγράμματα από βιβλία ή επιστημονικά άρθρα ή εισηγήσεις/παρουσιάσεις σε συνέδρια, σε ηλεκτρονική ή μη μορφή, από σελίδες του διαδικτύου ή άλλες πηγές, όλες αυτά περιλαμβάνονται στις βιβλιογραφικές αναφορές της εργασίας μου και αυτές αναγράφονται πλήρως.

(Υπογραφή)

Δραγάτσης Α. Αρσένιος

Ημερομηνία: 29/02/2019

Το πρωτότυπο αντίτυπο φυλάσσεται στην βιβλιοθήκη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

(κενή σελίδα)

Ευχαριστίες

Ως την ελάχιστη δυνατή μνεία, με την παρούσα παράγραφο οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της και ιδιαίτερα:

Την επιβλέπουσα καθηγήτρια, Μέντρεα Κάρμεν Δρ. Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό του Πολυτεχνείου Cluj-Napoca , για την πολύτιμη υποστήριξή της, τις παραγωγικές υποδείξεις καθώς και για τις γνώσεις που μου περίεχε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Τον Κο Παπαγεωργίου Δημήτρη, Μηχανολόγο Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτωρ τεχνολογίας κατεργασιών του Ε.Μ.Π., τεχνικό διευθυντή της εταιρίας Στασινόπουλος – Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε και επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Ε.Π.Τ.ΥΛ. του Πα.Δ.Α., για την πολύτιμη βοήθειά του τόσο στην διενέργεια των θερμικών κατεργασιών όσο και στην καθοδήγηση για τη σωστή εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τον Dr.Prof.Ing. Ionel Chicinas καθηγητή του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών και πρύτανη της σχολής Υλικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Cluj-Napoca (U.T.C.N.) της Ρουμανίας για την βοήθεια του και τον σημαντικό χρόνο που μου διέθεσε για την πραγματοποίηση της ανάλυσης θραυστογραφίας μέσω SEM καθώς και για την δοκιμή της κάμψης.

Το Dr. Florin Popa, λέκτορα του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, για την βοήθεια του στην υλοποίησης της μικροσκοπικής ανάλυσης των επιφανειών θραύσης μέσω S.E.M. και τον κο Buna Alexandru για την βοήθεια στην πραγματοποίηση της δοκιμής κάμψης στο εργαστήριο μηχανικών δοκιμών του U.T.C.N.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω την κα Κατσάπη Άννα, καθηγήτρια μου στο εργαστηριακό μέρος του μαθήματος και νυν εργαστηριακό συνεργάτη του εργαστηρίου Ε.Π.Τ.ΥΛ. για τις πολύτιμες γνώσεις που μου έδωσε και για το αμέριστο ενδιαφέρον που μου έδειξε κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Τον κο Καρέλλα Γιώργο, Ε.Τ.Ε.Π. του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και τον συμφοιτητή Ραχούτη Γιάννη για την πολύτιμη βοήθεια τους στην προετοιμασία των δοκιμών. Καθώς επίσης, και τον συμφοιτητή Κοκολάρα Σωτήρη, για την βοήθεια του στην υλοποίηση του πειραματικού μέρους που διεξήχθη στη Ρουμανία.

Στο σημείο αυτό, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε ένα ξεχωριστό άνθρωπο, στον αείμνηστο Ι.Φ. Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό του ΕΜΠ και δάσκαλο μου στο μάθημα της τεχνολογίας των μεταλλικών υλικών. Για τους μαθητές τους, θα είναι για πάντα ο μεγάλος δάσκαλος του ΠΕΤΥΛ, όσοι τον γνωρίσαμε είχαμε την ευλογία να πάρουμε λίγη από την λάμψη των ματιών του, για την επιστήμη των μεταλλικών υλικών.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Ανδρέα και Αλεξάνδρα και στα αδέρφια μου Σπύρο, Σταύρο και Παναγιώτη για την στήριξη και υπομονή που έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Δραγάτης Α. Αρσένιος

Αθήνα, Μάρτιος, 2019

«Η φύση με το ένα χέρι σου δίνει και με το άλλο σου παίρνει»

Ιωάννης Φ. Σιδέρης

(Δεκέμβριος 2014)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, εξετάζει την επίδραση της υγρής ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα επιφανειακής βαφής 15CrNi6 κατά DIN. Η ενανθράκωση είναι μία θερμοχημική επιφανειακή κατεργασία που χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία τα τελευταία χρόνια, σε εφαρμογές που απαιτούν καλή αντοχή στη φθορά κατά τη τριβή και ταυτόχρονα καλή συμπεριφορά στη κόπωση. Η αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού μετά από ενανθράκωση, είναι το σημείο αναφοράς για την βελτίωση της συμπεριφοράς αυτού, κάτω από απαιτητικές συνθήκες. Στόχος της εργασίας είναι και η σύγκριση των δύο τύπων απόψυξης μετά την ενανθράκωση. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιούνται δύο τύποι ενανθράκωσης. Αρχικά, στην μία ομάδα δοκιμών γίνεται ενανθράκωση για μία, δύο, τρεις και τέσσερις ώρες με συνεχή βαφή σε λάδι. Ενώ, στην δεύτερη ομάδα δοκιμών, πραγματοποιείται ενανθράκωση για μία, δύο, τρεις και τέσσερις ώρες και στην συνέχεια ισοθερμοκρασιακή απόψυξη σε τήγμα άλατος.

Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, γίνεται μία εισαγωγή στις βασικές θεωρητικές έννοιες, οι οποίες είναι προαπαιτούμενες για την κατανόηση της εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στους χάλυβες, όπου γίνεται μία εισαγωγή στην ονοματολογία και στην ταξινόμηση αυτών, ενώ στην συνέχεια πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στους χάλυβες κατασκευών όπως είναι και ο 15CrNi6 της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις θερμικές κατεργασίες των χαλύβων. Αναλυτικότερα, περιγράφονται οι μέθοδοι παραγωγής χάλυβα, οι διαδικασίες και οι τρόποι μορφοποίησης του. Επίσης, αναφέρονται επιγραμματικά οι βασικές θερμικές κατεργασίες μάζας αλλά και οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες που γίνονται στους χάλυβες. Τέλος, αναφέρονται οι βασικότερες επιφανειακές θερμοχημικές κατεργασίες και περιγράφονται αναλυτικά (υποκεφάλαιο 2.5.1.) οι πέντε μέθοδοι ενανθράκωσης (στερεά, υγρή, αέρια, κενού και πλάσματος). Στην συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των μεταλλικών υλικών, αναφέρονται επιγραμματικά οι κατηγορίες τους και περιγράφονται ξεχωριστά οι έννοιες των μηχανικών ιδιοτήτων και οι μηχανικές δοκιμές προσδιορισμού αυτών.

Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Σημαντικό ποσοστό αυτού, πραγματοποιήθηκε στο πολυτεχνείο του Cluj-Napoca, στα εργαστήρια ηλεκτρονικής μικροσκοπίας και μηχανικών δοκιμών, υπό την εποπτεία του καθηγητή και επικεφαλής του τμήματος Dr.Prof.Ing. Ionel Chicinas.

Πιο συγκεκριμένα, στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Όπου, αναλύεται ο σχεδιασμός και περιγράφεται η διεξαγωγή του πειράματος. Οι θερμικές κατεργασίες έλαβαν χώρα στην εταιρεία Στασινόπουλος – Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε., υπό την εποπτεία του κ. Παπαγεωργίου Δημήτρη. ο πέμπτο κεφάλαιο αφορά την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης και την δημιουργία των προφίλ σκληρότητας, για κάθε μία εκ των οκτώ διαφορετικών ομάδων των δοκιμών. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type M., στο εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πα.Δ.Α. Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην μικροσκοπική ανάλυση των επιφανειών θραύσης

μέσω Η.Μ.Σ.- S.E.M. Η θραυστογραφία πραγματοποιήθηκε με μικροσκόπιο σάρωσης δέσμης ηλεκτρονίων (SEM) τύπου JEOL-JSM5600 LV. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρονικής μικροσκοπίας του τμήματος επιστήμης και τεχνολογίας υλικών του Πολυτεχνίου του Cluj-Napoca, υπό την εποπτεία του κ. Florin Popa.

Στο έβδομο κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία της στερεοσκοπικής ανάλυση των επιφανειών θραύσης, η οποία έγινε με σκοπό την εξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων προς την θραύση των δοκιμίων. Η ανάλυση μέσω στερεοσκοπίου, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο «Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πα.Δ.Α. Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο του πειραματικού μέρους, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία της δοκιμής κάμψης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής. Η δοκιμή της κάμψης, πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο μηχανικών δοκιμών του τμήματος επιστήμης και τεχνολογίας υλικών του Πολυτεχνίου του Cluj-Napoca, υπό την εποπτεία του κ. Buna Alexandru.

Στο προτελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα, αναφέρονται τα συμπεράσματα και τονίζονται τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία επιλέγεται η θερμική κατεργασία (διάρκεια και μέθοδος απόψυξης), η οποία δημιουργεί τις καλύτερες ιδιότητες προς αντοχή σε τριβή και ταυτοχρόνως καλή συμπεριφορά σε κόπωση.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται η αναφορά στην βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	17
ΛΕΞΙΚΟ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ	19
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	25
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	31
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ	35
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΑ	35
1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΧΑΛΥΒΩΝ	37
1.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE 38	
1.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Γερμανικό σύστημα DIN	39
1.2.3 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Αγγλικό σύστημα B.S.	41
1.2.4 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Γαλλικό σύστημα AFNOR	42
1.2.5 Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με την χημική σύσταση	42
1.2.6 Επίδραση των στοιχείων κραμάτωσης	43
1.2.7 Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με τον προορισμό τους	44
1.2.8 Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με την χρήση τους	46
1.3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	53
1.3.1 Χάλυβες μηχανολογικών κατασκευών	53
1.3.2 Ταξινόμηση χαλύβων μηχανολογικών κατασκευών κατά προέλευση	53
1.3.3 Ταξινόμηση χαλύβων μηχανολογικών κατασκευών κατά τη ποιότητα	53
1.3.4 Ταξινόμηση χαλύβων μηχανολογικών κατασκευών κατά τη χρήση	54
2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ	59
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ	59
2.1.1 Μέθοδος Bessemer	60
2.1.2 Μέθοδος Siemens-Martin	60
2.1.3 Μέθοδος Εμφύσησης Οξυγόνου - Basic Oxygen Furnace Refining (BOF)	61
2.1.4 Μέθοδος ηλεκτρικού φούρνου	62
2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ	62
2.2.1 Χύτευση χαλύβων	63
2.2.2 Διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση	63

2.2.3	Διαμόρφωση με αφαίρεση υλικού ή κοπής	68
2.2.4	Κοννιομεταλλουργία	69
2.3	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	69
2.3.1	Ανόπτηση	70
2.3.2	Ανόπτηση κατεργασίας ή αποτατική ανόπτηση (Stress Relieving)	71
2.3.3	Ανόπτηση εξομάλυνσης (Normalizing)	71
2.3.4	Πλήρης ανόπτηση (Full Annealing)	71
2.3.5	Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης (Recrystallisation)	72
2.3.6	Ανόπτηση αποκατάστασης (Recovery)	72
2.3.7	Μαλακτοποίηση ή σφαιροποίηση του σεμεντίτη (Softening or Spherodise Annealing)	72
2.3.8	Ανόπτηση χυτογάλυβα (Annealing of Casting)	73
2.3.9	Βαφή / Σκλήρυνση (Quenching / Hardening)	73
2.3.10	Ωστενιτοποίηση (Austenitizing)	74
2.3.11	Επαναφορά (Tempering)	83
2.4	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	84
2.4.1	Φλογοβαφή (Flame Hardening)	87
2.4.2	Επαγωγική Σκλήρυνση (Induction Hardening)	87
2.4.3	Βαφή με αντιστάσεις (high frequency resistance hardening)	88
2.4.4	Επιφανειακή βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Hardening)	88
2.5	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	89
2.5.1	Ενανθράκωση (Carburizing)	89
2.5.1.1	Στερεά Ενανθράκωση (Pack Carburizing)	95
2.5.1.2	Αέρια Ενανθράκωση – Gas Carburizing	98
2.5.1.3	Ενανθράκωση Κενού (Vacuum Carburizing)	100
2.5.1.4	Ενανθράκωση Πλάσματος (Plasma-Ion Carburizing)	103
2.5.1.5	Υγρή Ενανθράκωση – Ενδοκυάνωση (Liquid Carburizing – Cyaniding)	105
2.5.2	Εναζώτωση (Nitriding)	109
2.5.3	Ενανθρακαζώτωση (Carbonitriding)	112
2.5.4	Βορίωση (Boriding)	113
2.5.5	Εχρωμίωση (Chromizing)	114
3	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	117
3.1	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	119
3.1.1	Ελαστικότητα (Elasticity)	119
3.1.2	Πλαστικότητα (Plasticity)	119

3.1.3	Μέτρο ελαστικότητας (Modulus of Elastic)	119
3.1.4	Αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength)	120
3.1.5	Ολκιμότητα (Ductility)	120
3.1.6	Ψαθυρότητα (Brittleness)	120
3.1.7	Επανάταξη (Resilience)	120
3.1.8	Δυσθραυστότητα (Toughness)	121
3.1.9	Αντοχή στην κόπωση	121
3.1.10	Αντοχή στην κρούση	121
3.1.11	Αντοχή στον ερπυσμό	122
3.1.12	Σκληρότητα	122
3.2	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	122
3.2.1	Δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Testing)	123
3.2.2	Δοκιμή θλίψης (Compression Testing)	125
3.2.3	Δοκιμή κάμψης (Bend Testing)	126
3.2.4	Δοκιμή κρούσης (Impact Testing)	132
3.2.5	Δοκιμή κόπωσης (Fatigue Testing)	134
3.2.6	Δοκιμή ερπυσμού	136
3.2.7	Μέτρηση σκληρότητας	137
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	145
4.1	ΧΑΛΥΒΑΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ	145
4.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	145
4.3	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ	148
4.4	ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	151
4.4.1	Προετοιμασία δοκιμίων για δοκιμή εφελκυσμού	151
4.4.2	Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.	152
4.4.3	Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.	152
4.4.4	Επιλογή δειγμάτων	153
4.4.5	Εγκιβωτισμός – Λείανση – Στίλβωση	154
5	ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ	157
5.1	ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	157
5.2	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟΥ	157
5.3	ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ	160
5.4	ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ	168
5.5	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΥΠΩΝ ΑΠΟΨΥΞΕΩΝ	176

6	ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕΣΩ S.E.M.	181
6.1	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	181
6.2	ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ	181
6.2.1	Μία ώρα ενανθράκωσης	181
6.2.2	Δύο ώρες ενανθράκωσης	183
6.2.3	Τρεις ώρες ενανθράκωσης	184
6.2.4	Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης	185
6.3	ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ	186
6.3.1	Μία ώρα ενανθράκωσης	186
6.3.2	Δύο ώρες ενανθράκωσης	187
6.3.3	Τρεις ώρες ενανθράκωσης	188
6.3.4	Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης	189
7	ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ	191
7.1	ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ	191
7.1.1	Μία ώρα ενανθράκωσης	191
7.1.2	Δύο ώρες ενανθράκωσης	192
7.1.3	Τρεις ώρες ενανθράκωσης	193
7.1.4	Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης	194
7.2	ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ	195
7.2.1	Μια ώρα ενανθράκωσης	195
7.2.2	Δύο ώρες ενανθράκωσης	196
7.2.3	Τρεις ώρες ενανθράκωσης	196
7.2.4	Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης	197
8	ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ	199
8.1	ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ	199
8.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΚΑΜΨΗΣ	200
8.3	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	201
8.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	202
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	209
a.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	209
9.1	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΠΟΚΤΩΜΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	213
b.	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	215

Περιεχόμενα 15

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 217

(κενή σελίδα)

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Στον ακόλουθο πίνακα των συμβολισμών αναγράφονται τα μαθηματικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην εργασία με την αντίστοιχη επεξήγηση και τις μονάδες στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). Τα σύμβολα αναγράφονται με αλφαβητική σειρά στις ακόλουθες ομάδες:

- Λατινικοί χαρακτήρες (μικρά),
- Λατινικοί χαρακτήρες (κεφαλαία),

Στην περίπτωση που στην εργασία χρησιμοποιούνται σύμβολα που έχουν τους ίδιους δείκτες ή /και εκθέτες, συνηθίζεται η αναγραφή αυτών σε πρόσθετο πίνακα σε συνέχεια του πίνακα των συμβόλων.

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
%E	Σχετικό σφάλμα	-
C.I. 95%	Διάστημα εμπιστοσύνης 95%	-
D.C.	Ενεργό βάθος ενανθράκωσης	μm
d	Μέση διάμετρος αποτυπώματος σκληρομέτρησης Vickers	μm
G	Μέτρο διάτμησης	GPa
HRC	Σκληρότητα Rockwell C	HRC
HV0.2	Μικροσκληρότητα βάρους 200γρ.	HV0.2
I _x	Ροπή αδρανείας ως προς τον άξονα της ουδέτερης γραμμής	mm^4
M _{max}	Μέγιστη καμπτική ροπή	Nm
P	Φόρτιση διεισδυτή μικροσκληρομέτρης βάσει ASTM-E384	kg
P _{Fracture}	Δύναμη θραύσης κατά την κάμψη	N
R	Επαναληψιμότητα	-
Re	Όριο διαρροής	MPa
Re _{0.2}	Συμβατικό όριο διαρροής	MPa
R _m	Εφελκυστική αντοχή χάλυβα	MPa
E	Μέτρο ελαστικότητας	GPa
E _{κάμψης}	Μέτρο διάρρηξης (μέσω δοκιμής κάμψης)	GPa
k	Συντελεστής διάχυσης	-
up	ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων κρούσης	m/s
us	Ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων κρούσης	m/s
δ	Βέλος κάμψης	mm
ε _f	Επιμήκυνση θραύσης εφελκυσμού	$\text{mm} \cdot 10^{-3}$
σ	Ορθή τάση	MPa
σ _{Fracture}	Καμπτική τάση θραύσης	MPa

(κενή σελίδα)

ΛΕΞΙΚΟ ΑΓΓΛΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρονται οι ξενόγλωσσοι αγγλικοί όροι που εμπεριέχονται στην παρούσα πτυχιακή.

<u>Αγγλικά</u>	<u>Κεφάλαιο</u>	<u>Επεξήγηση</u>
15CrNi6	1.1	Χάλυβας πτυχιακής με 0,15%C και 1,5%Cr,Ni
A.I.S.I.	1.1	Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σιδήρου και Χάλυβα
Absorptivity	3.1	Απορροφητικότητα
AFNOR	1.2	Γαλλικό σύστημα τυποποίησης
Air-Hardening steel	1.2	Εργαλειοχάλυβες μέτριας κραματοποίησης και υψηλής εμβαπτότητας
AISI-SAE	1.2	Αμερικάνικο σύστημα τυποποίησης
Annealing of casting	2.3	Ανόπτηση χυτοχάλυβα
Austenitizing	2.3	Ωστενιτοποίηση
B.S.	1.2	Αγγλικό σύστημα τυποποίησης
Barreling	3.2	Βαρελοποίηση
Basic Oxygen Furnace Refining	2.1	Μέθοδος Εμφύσησης Οξυγόνου (B.O.F.)
Batch Furnaces	2.5	Κλίβανοι παρτίδας (μη συνεχείς)
Bending	2.2	Κάμψη
Bending Testing	3.2	Δοκιμή Κάμψης
Bessemer	2.1	Μέθοδος Bessemer (παραγωγής χάλυβα)
Blanking	2.2	Απότμηση (απόβλιττο εξωτερικά της απότμησης)
Boost-diffusion-type	2.5	Κλίβανοι εκτός ισορροπίας τύπου ώθησης-διάχυσης
Boriding	2.5	Βορίωση
Brinell	3.2	Μέθοδος σκληρότητας Brinell
Brittleness	3.1	Ψαθυρότητα
Carbon Potential	2.5	Δυναμικότητα του άνθρακα
Carbonitriding	2.5	Ενανθρακαζώτωση
Carburized Steel	3.2	Ενανθρακωμένος χάλυβας
Carburizing	2.5	Ενανθράκωση
Carrier Gas	2.5	Ενδοθερμικό αέριο, αέριας ενανθράκωσης
Case Hardening steel	1.3	Χάλυβας επιφανειακών βαφών
Castability	3.1	Ευχυτότητα
Charpy testing	3.2	Μέθοδος Charpy δοκιμής κρούσης
Chemical composition	3.1	Χημική σύσταση
Chromizing	2.5	Εγχρωμίωση

<i>Co</i>	1.2	Κοβάλτιο
<i>Coarsening</i>	2.5	Φαινόμενο μεγέθυνση κόκκων
<i>Coercive Force</i>	3.1	Αντίσταση μαγνητισμού
<i>Compound layer</i>	6.1	Στρώμα διείσδυσης
<i>Compression Testing</i>	3.2	Δοκιμή θλίψης
<i>Conductivity</i>	3.1	Αγωγιμότητα
<i>Confidence Interval of the mean</i>	8.1	Διάστημα Εμπιστοσύνης
<i>Construction Steel</i>	1.3	Χάλυβας μηχανολογικών κατασκευών
<i>Continuous Furnaces</i>	2.5	Συνεχείς κλίβανοι
<i>Corrosion Resistance</i>	3.1	Μικροδομή
<i>Cleavage rupture</i>	7.1	Θραύση κατά «θύλακες»
<i>Cr</i>	1.1	Χρόμιο
<i>Creep</i>	3.1	Αντοχή στον ερπυσμό
<i>Cyaniding</i>	2.5	Ενδοκυάνωση
<i>Deep-Drawing</i>	2.2	Βαθεία κοίλανση
<i>Depth Case</i>	2.5	Βάθος εμποτισμού
<i>Dielectric Strength</i>	3.1	Διηλεκτρική αντίσταση
<i>D.I.N.</i>	1.2	Γερμανικό σύστημα τυποποίησης
<i>Drawing</i>	2.2	Όλκη
<i>Ductility</i>	3.1	Ολκιμότητα
<i>Effective case depth</i>	2.5	Ενεργό βάθος εμποτισμού
<i>Elasticity</i>	3.1	Ελαστικότητα
<i>Electron beam hardening</i>	2.4	Βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων
<i>Extrusion</i>	2.2	Διέλαση
<i>Fatigue</i>	3.1	Αντοχή στη κόπωση
<i>Fatigue Testing</i>	3.2	Δοκιμή κόπωσης
<i>Fe-C</i>	1.1	Κράμα σιδήρου-άνθρακα
<i>Fick</i>	2.5	Νόμος διάχυσης του Fick
<i>Flame hardening</i>	2.4	Φλογοβαφή
<i>Flexural Strength</i>	3.2	Αντοχή σε κάμψη
<i>Forgeability</i>	2.2	Ικανότητα σφυρηλάτησης
<i>Forging</i>	2.2	Σφυρηλάτηση
<i>Formability</i>	3.1	Ικανότητα διαμόρφωσης
<i>Full annealing</i>	2.3	Πλήρης ανόπτηση
<i>Gas Carburizing</i>	2.5	Αέρια ενανθράκωση
<i>Hardenability</i>	3.1	Εμβαπτότητα

<i>Hardening</i>	2.3	Σκλήρυνση
<i>Hardness</i>	3.1	Σκληρότητα
<i>Heat Capacity</i>	3.1	Θερμοχωρητικότητα
<i>Heat treatment</i>	2.3	Θερμική κατεργασία
<i>High frequency resistance hardening</i>	2.4	Βαφή με αντιστάσεις
<i>Hooke</i>	3.2	Νόμος του Hooke $\sigma = \varepsilon \cdot E$
<i>Hot-Working</i>	1.2	Εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών
<i>Hysteresis</i>	3.1	Υστέρηση
<i>Impact Strength</i>	3.1	Αντοχή στη κρούση
<i>Impact Testing</i>	3.2	Δοκιμή κρούσης
<i>Induction heating</i>	2.4	Επιφανειακή βαφή
<i>Injection</i>	2.5	Καλούπια έγχυσης πλαστικών
<i>Izod test</i>	3.2	Μέθοδος Izod δοκιμής κρούσης
<i>Jominy test</i>	2.3	Δοκιμή εμβαπτότητας Jominy
<i>Knoop</i>	3.2	Μέθοδος σκληρότητας Knoop
<i>Laser transformation</i>	2.4	Βαφή με δέσμη laser
<i>Liquid Carburizing</i>	2.5	Υγρή ενανθράκωση
<i>Machinability</i>	3.1	Κατεργασιμότητα
<i>Magnetic Permeability</i>	3.1	Μαγνητική διαπερατότητα
<i>Malleability</i>	3.1	Ελατότητα
<i>Maraging steel</i>	1.2	Χάλυβας μαρτενγήρνασης
<i>Mechanical Properties</i>	3.2	Μηχανικές Ιδιότητες
<i>Melting Point</i>	3.1	Σημείο τήξης
<i>Metal sparying</i>	2.3	Σφαιροβολή
M_f	2.3	Θερμοκρασία λήξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού
<i>Microhardness</i>	2.5	Μικροσκληρότητα
<i>Microstructure</i>	3.1	Μικροδομή
<i>Microvoid coalescence</i>	7.1	Συνένωση μικροκενών
<i>Mn</i>	1.1	Μαγγάνιο
<i>Mo</i>	1.2	Μολυβδαίνιο
<i>Modulus of Elastic</i>	3.1	Μέτρο Ελαστικότητας
<i>Modulus of rupture</i>	3.2	Μέτρο διάρρηξης ή Μέτρο Ελαστικότητας κάμψης (Υπολογίζεται για ψαθυρά υλικά)
M_s	2.3	Θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού
<i>Ni</i>	1.1	Νικέλιο
<i>Nitrining</i>	2.5	Εναζώτωση

<i>Normalizing</i>	2.3	Εξομάλυνση δομής
<i>O</i>	1.1	Οξυγόνο
<i>Oil-Hardening steel</i>	1.2	Εργαλειοχάλυβας ψυχρής κατεργασίας, μέσης εμβεπτότητας
<i>P</i>	1.1	Φώσφορος
<i>Pack Carburizing</i>	2.5	Στερεά ενανθράκωση
<i>Pack cementation</i>	2.5	Διάχυση με μέσο σε μορφή στερεάς σκόνης
<i>Plasma-Ion Carburizing</i>	2.5	Ενανθράκωση πλάσματος
<i>Plasticity</i>	3.1	Πλαστικότητα
<i>Porosity</i>	3.1	Πορώδες
<i>Powder metallurgy</i>	2.2	Κοννιομεταλλουργία
<i>Punching</i>	2.2	Απότμηση (απόβλιττο εσωτερικά της απότμησης)
<i>Quenching</i>	2.1	Βαφή
<i>Recovery</i>	2.3	Ανόπτηση αποκατάστασης
<i>Recrystallisation</i>	2.3	Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης
<i>Re-drawing</i>	2.2	Ανακοίλαση
<i>Reflectivity</i>	3.1	Ανακλασιμότητα
<i>Refractivity</i>	3.1	Δείκτης διάθλασης
<i>Resilience</i>	3.1	Επανάταξη
<i>Resistivity</i>	3.1	Αντίσταση
<i>Rockwell</i>	3.2	Μέθοδος σκληρότητας <i>Rockwell</i>
<i>Rolling</i>	2.2	Έλαση
<i>S</i>	1.1	Θείο
<i>S.E.M.</i>	4.1	Μικροσκόπιο σάρωσης δέσμης ηλεκτρονίων
<i>Scattering</i>	3.1	Σκέδαση
<i>Schaeffler</i>	1.2	Διάγραμμα <i>Schaeffler</i> (Φάσεις μετά την συγκόλληση ωστενιτικών χάλυβων)
<i>Shock resisting types steel</i>	1.2	Εργαλειοχάλυβας υψηλής αντοχής στην κρούση
<i>Si</i>	1.1	Πυρίτιο
<i>Siemens-Martin method</i>	2.1	Μέθοδος <i>Siemens-Martin</i> (παραγωγής χάλυβα)
<i>Softening</i>	2.3	Μαλακτοποίηση
<i>Specific Heat</i>	3.1	Ειδική θερμότητα
<i>Spherodise annealing</i>	2.3	Σφαιροποίηση του σεμεντίτη
<i>Spheroidal Annealed</i>	1.3	Ανοπτημένος
<i>St</i>	1.2	Χάλυβας (Γερμανικά- <i>Stahl</i>)
<i>Stiffness</i>	3.1	Μέτρο Δυσκαμψίας
<i>Stress relieving</i>	2.3	Αποτακτική ανόπτηση

<i>Structural Steel</i>	1.3	<i>Χάλυβας δομικών κατασκευών</i>
<i>Structure</i>	3.1	<i>Δομή</i>
<i>Super Conductivity</i>	3.1	<i>Υπερ-αγωγιμότητα</i>
<i>Surface rolling</i>	2.4	<i>Επιφανειακή έλαση</i>
<i>Tempering</i>	2.3	<i>Επαναφορά</i>
<i>Tensile testing</i>	3.2	<i>Δοκιμή Εφελκυσμού</i>
<i>Thermal conductivity</i>	3.1	<i>Θερμική αγωγιμότητα</i>
<i>Thermal expansion</i>	3.1	<i>Θερμική διαστολή</i>
<i>Thermochemical surface treatment</i>	2.5	<i>Επιφανειακή θερμοχημική κατεργασία</i>
<i>Total case depth</i>	2.5	<i>Συνολικό βάθος εμποτισμού</i>
<i>Toughness</i>	3.1	<i>Δυσθραυστότητα</i>
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	3.1	<i>Μέγιστη Τάση Εφελκυσμού</i>
<i>V</i>	1.1	<i>Βανάδιο</i>
<i>Vacuum Carburizing</i>	2.5	<i>Ενανθράκωση εν κενώ</i>
<i>Vickers</i>	3.2	<i>Μέθοδος σκληρότητας Vickers</i>
<i>W</i>	1.1	<i>Βολφράμιο</i>
<i>Water-Hardening steel</i>	1.2	<i>Εργαλειοχάλυβας χαμηλής εμβαπτότητα</i>
<i>Wear resistance</i>	3.1	<i>Αντοχή στη φθορά</i>
<i>Weldability</i>	3.1	<i>Συγκολλησιμότητα</i>
<i>Widmanstätten</i>	2.2	<i>Χαρακτηριστική δομή χυτοχάλυβων</i>
<i>Wöhler</i>	3.2	<i>Χαρακτηριστική καμπύλη κόπωσης Wöhler</i>
<i>Workability</i>	3.1	<i>Ικανότητα Διαμόρφωσης</i>
<i>Young modulus</i>	3.2	<i>Μέτρο ελαστικότητας του Young</i>
<i>Young stress</i>	3.2	<i>Τάση ελαστικότητας</i>

(κενή σελίδα)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Πρότυπη φωτογραφία προϊόντος χάλυβα.....	36
Εικόνα 1.2: Τομείς εκμετάλλευσης χάλυβα.....	36
Εικόνα 1.3: Εκμετάλλευση χάλυβα ανά τομέα εν έτη 2018.....	37
Εικόνα 1.4: Ταξινόμηση χαλύβων ανά κριτήριο.....	37
Εικόνα 1.5: Τύποι Χαλύβων Χύτευσης.....	45
Εικόνα 1.6: Εξαρτήματα αυτοκινήτου από χάλυβες κατασκευών.....	47
Εικόνα 1.7: Εφαρμογές Εργαλειοχαλύβων (κοπτικά εργαλεία για τórνο ή φρέζα).....	48
Εικόνα 1.8: Ανάλυση στρωμάτων κοπτικού εργαλείου κατασκευασμένου από εργα.....	49
Εικόνα 1.9: Άλλες εφαρμογές εργαλειοχαλύβων (κοπτικά, αλυσίδες, οδοντωτοί τροχοί).....	49
Εικόνα 1.10: Φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής με πτερύγια από χάλυβα θερμικής αντοχής.....	51
Εικόνα 1.11: Εφαρμογές Χαλύβων Ck45-Ck60.....	55
Εικόνα 1.12: (α)Εφαρμογές Case Hardening Χαλύβων,(β)Επιβελτιωμένων Χαλύβων [8].....	56
Εικόνα 1.13: Εφαρμογές Χαλύβων Υψηλών Πίεσεων [8].....	57
Εικόνα 1.14: Εφαρμογές χαλύβων α) για ρουλεμάν β) Αντίστασης σε τριβή [8].....	57
Εικόνα 1.15: Εφαρμογές (α) Εναζωτωμένων Χαλύβων, (β) Ελατηρίων [8].....	58
Εικόνα 2.1: Λειτουργία Υψικαμίνου (Παρασκευής Χυτοσιδήρου) [9].....	59
Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση κλιβάνου Bessemer [9].....	60
Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου Siemens-Martin [9].....	61
Εικόνα 2.4: Κλίβανος B.O.F.....	61
Εικόνα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα [10].....	62
Εικόνα 2.6: Κλίβανος Ηλεκτρικού τόξου [9].....	63
Εικόνα 2.7: Ταξινόμηση κατεργασιών πλαστικής παραμόρφωσης [13]	65
Εικόνα 2.8: Σφυρηλάτηση (α) Ανοικτής Μήτρας (β) Κλειστής Μήτρας [12].....	65
Εικόνα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση α) Διέλασης β) Όλκης [12].....	66
Εικόνα 2.10: Διάταξη έλασης σε σειρά [12].....	66
Εικόνα 2.11: (α) Μηχανισμός απότμησης, (β) Χαρακτηρισμός της απότμησης ανάλογα με το απόβλιττο της κατεργασίας [12].....	66
Εικόνα 2.12: Είδη Κάμψης [12].....	67
Εικόνα 2.13: Αρχή της βαθείας κούλιανσης χωρίς συγκράτηση [12].....	67
Εικόνα 2.14: Είδη ανακούλιανσης α) Αμεση β) Ανάστροφη [12].....	68
Εικόνα 2.15: Ταξινόμηση κατεργασιών κοπής βάσει της μορφής του εργαλείου.....	68
Εικόνα 2.16: Οι βασικότερες κατεργασίες αφαίρεσης ή κοπής υλικού [13].....	69
Εικόνα 2.17: Θερμοκρασιακά διαστήματα θερμικών κατεργασιών σε σχέση με το διάγραμμα ισοροπίας φάσεων Fe-C.....	70
Εικόνα 2.18: Διαγράμματα TTT (CCT) - Καμπύλες απόψυξης για την πλήρη ανόπτηση και την ανόπτηση εξομάλυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα. [14].....	72
Εικόνα 2.19: (α) Σχηματική παράσταση του θερμικού κύκλου και των αλλαγών δομής κατά τη βαθφή. (β) Απλουστευμένος μηχανισμός του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.....	74
Εικόνα 2.20: Καμπύλη ταχείας απόψυξης (βαφής) μικρού χαλύβδινου κυλίνδρου, μετά την εμβάπτισή του σε γλιαρό νερό.....	75
Εικόνα 2.21: Δοκιμή Jominy: (α) Χάλυβα υψηλής εμβαπτότητας, (β) Χάλυβα μέτριας εμβαπτότητας. [13].....	77
Εικόνα 2.22: Οπτικές μικρογραφίες που δείχνουν (α) Μαρτενσίτη, S.E.M. X1000 βαφής σε νερό και (β) Μπαινίτη X1000.....	78
Εικόνα 2.23: Μεταβολή θερμοκρασιών Ms και Mf συναρτήσει περιεκτικότητας %.....	79
Εικόνα 2.24: Σύγκριση σκληρότητας διαφόρων φάσεων χαλύβων.....	80
Εικόνα 2.25: (α) Διάγραμμα CCT του O1, (β) Διάγραμμα TTT [20].....	81
Εικόνα 2.26: Διάγραμμα TTT. Καμπύλη Α: κλιμακωτή μαρτενσιτική βαθφή, Καμπύλη Β: κλιμακωτή μπαινιτική βαθφή και Καμπύλη Γ: κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαθφή.....	82
Εικόνα 2.27: Οπτική μικρογραφία χρωμιομολυβδαινιούχου χάλυβα, όπου φαίνεται η ανάπτυξη μικρορωγμής μέσα στη μαρτενσιτική δομή (X400), [14].....	83
Εικόνα 2.28: Μικροδομή επαναφερμένου μαρτενσίτη SEMx3000.....	83

Εικόνα 2.29: Γενική ταξινόμηση τεχνικών ενίσχυσης μεταλλικών υλικών με τροποποίηση των επιφανειακών στρωμάτων τους.....	84
84Εικόνα 2.30: Μεταβολή των επιφανειακών ιδιοτήτων χάλυβων μετά από επιφανειακή βαφή. [23].....	85
Εικόνα 2.31: Μεταβολή της κατανομής θερμοκρασίας για δύο διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας, [23].....	86
Εικόνα 2.32: Εύρος θερμοκρασιών-βάθους σκλήρυνσης συναρτήσει θερμικής επιφανειακής κατεργασίας, [23].....	86
Εικόνα 2.33: Διαδικασία φλογοβαφής. (α) και (β) Περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου προς ομοιόμορφη θέρμανση, (γ) και (δ) Απόψυξη Τεμαχίου σε μπάνιο νερού.....	87
Εικόνα 2.34: Παραδείγματα Επαγωγικής Σκλήρυνσης (α) Οδοντωτός Τροχός.....	87
Εικόνα 2.35: Διαδικασία επιφανειακής θερμικής κατεργασίας με δέσμη laser σε άξονα πολύπλοκης γεωμετρίας.....	88
Εικόνα 2.36: Διαχωριστική γραμμή μαρτενσίτη- επαναφερμένου μαρτενσίτη κατά τη δοκιμή Ms , [30]...	92
Εικόνα 2.37: (α) Μετρούμενη περιεκτικότητα άνθρακα μετά από αέρια ενανθράκωση στους 925 °C για 4.5 ώρες (β) Τόρνευση ενανθρακωμένων δοκιμίων κατά Jominy, [32].....	93
Εικόνα 2.38: Παράδειγμα επιφανειακής ενανθράκωσης σε SAE 9310 (α) Διαδρομή μικροσκληρομετρήσεων (β) Προφίλ σκληρότητας συναρτήσει βάθους ενανθράκωσης.....	94
Εικόνα 2.39: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας στερεάς ενανθράκωσης, [35].....	95
Εικόνα 2.40: Κατανομή βάθους ενανθράκωσης συναρτήσει θερμοκρασίας και χρόνου ενανθράκωσης, [36].....	97
Εικόνα 2.41: Σχηματική Αναπαράσταση θερμικής κατεργασίας σε κλίβανο διαλείποντος έργου, [37].....	100
Εικόνα 2.42: Σχηματική παράσταση θερμικής κατεργασίας σε κλίβανου συνεχούς έργου [38].....	100
Εικόνα 2.43: Τυπικός θερμικός κύκλος ενανθράκωσης κενού.....	101
Εικόνα 2.44: Κατανομή του άνθρακα στην επιφάνεια επιστρώματος χάλυβα 18CrNi8 με δύο ενανθρακώσεις κενού 18mins+40mins θερμοκρασίας 1273°C και 1193°C, [40].....	103
Εικόνα 2.45: (α) Αύξηση της διαλυτότητας του άνθρακα στον ωστενίτη για ενανθράκωση πλάσματος έναντι συμβατικής, (β) Συντελεστής Διάχυσης του άνθρακα στον Ωστενίτη συναρτήσει της συγκέντρωσης του άνθρακα στους 1125°C, [34].....	105
Εικόνα 2.46: (α) Συγκριτική μελέτη συμβατικής,εν-κενό και ενανθράκωσης πλάσματος για την καλύτερη ομοιορρία βάθους ενανθράκωσης σε τυφλές οπές, (β) Οπτικές διαφορές ομοιομορφίας βάθους επιστρώματος μεταξύ ενανθράκωσης πλάσματος (α) και κενού (β), [34]	105
Εικόνα 2.47: Υγρή ενανθράκωση (α) θέρμανση σε λουτρό τετηγμένων ανθρακούχων αλάτων, (β) Απόψυξη με εμβάπτιση σε λάδι.....	109
Εικόνα 2.48: Εξαρτήματα προς τοπική ενανθράκωση.....	109
Εικόνα 2.49: (α) Σχηματικό διάγραμμα εξοπλισμού εναζώτωσης, (β) Μικροδομή Εναζωτωμένο υλικού [41].....	110
Εικόνα 2.50: (α) Διάγραμμα σκληρότητας συναρτήσει απόστασης από την επιφάνεια, (β) Βάθος εναζώτωσης συναρτήσει χρόνου εναζώτωσης, [22].....	111
Εικόνα 2.51: (α) Βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση εναζωτωμένου χυτοσιδήρου, (β) Εφαρμογή εναζώτωσης σε στροφαλοφόρο άξονα προς αύξησης μηχανικών ιδιοτήτων, [41].....	112
Εικόνα 2.52: (α) Επιφανειακή σκλήρυνση κόμπλερ αντλίας με ενανθρακαζώτωση (min 40 HRC, βάθος βαφής 0.25 mm – 0.65 mm), (β) Επίδραση διάρκειας ενανθρακαζώτωσης στην τελική σκληρότητα, [42]	113
Εικόνα 2.53: (α) Επίστρωση βορώσεως, (β) Συγκριτική μελέτη φθοράς ανάμεσα σε ακα-τέργαστο, εναζωτωμένο και βορωμένο χάλυβα.....	114
Εικόνα 2.54: Συνήθειες εφαρμογές εγχρωμώσεως [44].....	115
Εικόνα 3.1: (α) Ελαστική συμπεριφορά σε ατομική κλίμακα, (β) Απεικόνιση κίνησης μιας διαταραχής σε κρυσταλλικό πλέγμα, οδηγώντας σε πλαστική παραμόρφωση. [45].....	119
Εικόνα 3.2: (α) Μέτρο ελαστικότητας, (β) Εφελκυστική αντοχή - καμπύλη σ-ε, [45].....	120
Εικόνα 3.3: Σχηματική παράσταση καμπύλων σ-ε όλκιμων και ψαθυρών υλικών, [45].....	120
Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση της (α) Ενέργειας επανάταξης, (β) Ενέργειας δυσθραυστότητας, μέσω καμπύλης σ-ε, [45].....	121
Εικόνα 3.5: (α) Πειραματική διάταξη πειράματος κρούσης, (β) διαφορές μεθόδου Charpy και Izod.....	122
Εικόνα 3.6: (α) Πειραματική διάταξη εφελκυσμού, (β) Πρότυπη καμπύλη εφελκυσμού σ-ε, κύρια χαρακτηριστικά εφελκυσμού, [47].....	124
Εικόνα 3.7: (α) Δοκίμιο μετά από όλκιμη θραύση [47], (β) Πρότυπο διάγραμμα εφελκυσμού χάλυβα με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του. [48].....	124

Εικόνα 3.8: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου υπό θλιπτικά φορτία, (β) Διάγραμμα θλίψης εφελκυσμού, [48].....	125
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων όλκιμου δοκιμίου σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, [48].....	126
Εικόνα 3.10: (α) Φωτογραφίες από πραγματικά δοκίμια υπό θλίψη, (β) Θραύση υπό διαμητικό επίπεδο και θραύση με βαρελοποίηση, (γ) Εμφάνιση βαρελοποίησης σε δοκίμιο που υπέστη θλιπτικά φορτία, [49].....	126
Εικόνα 3.11: Πρότυπη εικόνα κάμψης (εγκάρσια).....	127
Εικόνα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση τύπων κάμψης κατά την φόρτιση: (α) Καθαρή κάμψη, (β) Εγκάρσια κάμψη, (γ) Επιμήκης κάμψη, (δ) Μεικτή κάμψη, [49].....	127
Εικόνα 3.13: (α) Σχηματική αναπαράσταση καμπτόμενης δοκού, ουδέτερη γραμμή, ουδέτερες ίνες, ουδέτερο επίπεδο, (β) Τομή δοκού προς ανάλυση ορθών τάσεων,[49].....	128
Εικόνα 3.14: Πρότυπη κατανομή ορθών τάσεων δοκιμίου κάμψης, [51].....	129
Εικόνα 3.15: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου πτυχιακής σε δοκιμή κάμψης με δεδομένη δύναμη θραύσης 8.7kN, (β) Κατανομή ορθών τάσεων λόγω κάμψης στην διατομή του δοκιμίου στο ήμισυ του συνολικού μήκους.....	130
Εικόνα 3.16: (α) Η δοκιμή κάμψης συχνά χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μηχανικής αντοχής ψαθυρών υλικών, (β) προσδιορίζεται το βέλος κάμψης δ που προκαλείται από την κάμψη, [47].....	131
Εικόνα 3.17: Διάταξη δοκιμής κάμψης (α) τριών σημείων και (β) τεσσάρων σημείων [47].....	131
Εικόνα 3.18: (α) Διάγραμμα ανηγμένων τάσεων – παραμορφώσεων ψαθυρών και περισσότερο όλκιμων υλικών, (β) Καμπύλη τάσης – βέλους κάμψης, για ψαθυρό υλικό, μετά την δοκιμή κάμψης, [47].....	132
Εικόνα 3.19: (α) Σχηματική αναπαράσταση αποτελέσματος κάμψης ψαθυρών υλικών, [52], (β) Εμφάνιση ρωγμής δοκιμίου πτυχιακής, οριακά πριν την θραύση.....	132
Εικόνα 3.20: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής κρούσης κατά Charpy και Izod, [47], (β) Τυπική καμπύλη μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά.....	134
Εικόνα 3.21: Ημιτονοειδής συνάρτηση τάσεων- κύκλων φόρτισης κόπωσης, [52].....	135
Εικόνα 3.22: Χαρακτηριστική καμπύλη Wöhler κόπωσης, [52].....	136
Εικόνα 3.23: (α) Χαρακτηριστική καμπύλη σ-ε ερπυσμού, (β) Πειραματική διάταξη δοκιμής ερπυσμού.....	137
Εικόνα 3.24: Αποτυπώματα διευσητή κάθε μεθόδου σκληρομέτρησης, [52].....	138
Εικόνα 3.25: Σχηματική αναπαράσταση αποτυπώματος σφαιρικού διεισδυτή μεθόδου [52].....	139
Εικόνα 3.26: Σχηματική αναπαράσταση αποτυπώματος διεισδυτή της μεθόδου Vickers, [52].....	140
Εικόνα 3.27: Φωτογραφίες διατάξεων σκληρομέτρησης: (α) Brinell, (β) Μικροσκληρόμετρο Vickers, (γ) Rockwell (Innovatest 600 Series).....	141
Εικόνα 4.1: (α) Φασματογράφος οπτικής εκπομπής τύπου τύπου OE Spectrometer Thermo ARL, (β) Θέση υποδοχής δοκιμίου στο φασματογράφο.....	149
Εικόνα 4.2: Πιστοποιητικό ποιότητας χάλυβα πτυχιακής.....	150
Εικόνα 4.3: (α) Δοκίμια όπως παραλήφθηκαν από την εταιρία, (β) Παλινδρομικό πριόνι κοπής.....	151
Εικόνα 4.4: (α) Τόρνευση ράβδων προς διαμόρφωση δοκιμίων δοκιμής κάμψης, (β) Κοπή δοκιμίων μετά την δοκιμή κάμψης προς δημιουργία δοκιμίων για μικροσκληρομετρήσεις.....	151
Εικόνα 4.5: Σχεδιαστική απεικόνιση δοκιμίων εφελκυσμού.....	151
Εικόνα 4.6: Πρόγραμμα ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.....	153
Εικόνα 4.7: Πρόγραμμα ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.....	153
Εικόνα 4.8: (α) Απεικόνιση τρόπου και θέσεων κοπής των δοκιμίων μετά την θραύση προς δημιουργία δοκιμίων μικροσκληρομέτρησης και δοκιμίων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (S.E.M.), (β) Σημεία κοπής και (γ) Δοκίμια σκληρομέτρησης μετά το στάδιο της κοπής.....	154
Εικόνα 4.9: (α) Δοκίμιο σκληρομέτρησης, μετά το στάδιο του εγκιβωτισμού, (β) Λειαντική μηχανή BUEHLER METASERV πριν το στάδιο της στίλβωσης.....	155
Εικόνα 5.1: Μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type M. (S/N: 341 – 64278) για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής.....	157
Εικόνα 5.2: Καμπύλη βαθμονόμησης μικροσκληρομέτρου Shimadzu (S/N: 341-64278) εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.....	159
Εικόνα 5.3: α) Αποτυπώματα δοκιμίου 33 με-γέθυνση (x400), (β) αποτυπώματα δοκιμίου 56 μεγέθυνση (x100).....	159
Εικόνα 5.4: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 43 & 44 που υπέστησαν μία ώρα ενανθρά-κωση και συνεχή βαφή σε λάδι.....	161
Εικόνα 5.5: Αποτυπώματα δοκιμίου 44 δεξιά παρειά (πλευρά) (x100).....	161

Εικόνα 5.6: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 22 & 31, δύο ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι	163
Εικόνα 5.7: Αποτυπώματα δοκιμίου 31, αριστερή παρειά (x100).....	163
Εικόνα 5.8: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 6 & 50, τριών ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι	165
Εικόνα 5.9: Αποτυπώματα δοκιμίου 6 αριστερή παρειά (x100).....	165
Εικόνα 5.10: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 58 & 54, τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι.....	167
Εικόνα 5.11: Αποτυπώματα δοκιμίου 54 αριστερή παρειά (x100).....	167
Εικόνα 5.12: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 33 & 15, μίας ώρας ενανθράκωσης με κλιμα-κωτή βαφή σε τήγμα άλατος.....	169
Εικόνα 5.13: Αποτυπώματα δοκιμίου 15 αριστερή παρειά (x100).....	169
Εικόνα 5.14: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 7 & 57, δύο ωρών ενανθράκωσης με κλιμα-κωτή βαφή σε τήγμα άλατος.....	171
Εικόνα 5.15: Αποτυπώματα δοκιμίου 57 δεξιά παρειά (x100).....	171
Εικόνα 5.16: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 53 & 37, τριών ωρών ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος.....	173
Εικόνα 5.17: Αποτυπώματα δοκιμίου 53 δεξιά παρειά (x100).....	173
Εικόνα 5.18: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 56 & 49, τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής σε τήγμα άλατος.....	175
Εικόνα 5.19: Αποτυπώματα δοκιμίου 56 αριστερή παρειά (x100).....	175
Εικόνα 5.20: Προφίλ σκληρότητας μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή.....	176
Εικόνα 5.21: Προφίλ σκληρότητας μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή.....	177
Εικόνα 5.22: Σύγκριση κατανομής ενεργού βάρους ενανθράκωσης των δύο τύπων απόφυξης.....	178
Εικόνα 5.23: Κατανομή περιεκτικότητας του άνθρακα συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια.....	179
Εικόνα 6.1: (α) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M. JOEL JSM 5600LV) , (β) Εισαγωγή των δοκιμίων εντός θαλάμου.....	181
Εικόνα 6.2: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη μια ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή.....	182
Εικόνα 6.3: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη δυο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.....	183
Εικόνα 6.4: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.....	184
Εικόνα 6.5: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.....	185
Εικόνα 6.6: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.....	186
Εικόνα 6.7: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη δυο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.....	187
Εικόνα 6.8: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.....	188
Εικόνα 6.9: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.....	189
Εικόνα 7.1: Στερεοσκόπιο Digital Microscope Dremier Dino-Lite.....	191
Εικόνα 7.2: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	191
Εικόνα 7.3: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	192
Εικόνα 7.4: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	193
Εικόνα 7.5: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	194
Εικόνα 7.6: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	194

Εικόνα 7.7: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	195
Εικόνα 7.8: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	196
Εικόνα 7.9: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.....	196
Εικόνα 8.1: (α) Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης, (i) Πρέσα δοκιμής κάμψης, (ii) Σύστημα Μέτρησης, (β) Τεχνικά χαρακτηριστικά της υδραυλικής πρέσας, (γ) Παρελκόμενα μηχανής δοκιμής κάμψης. (i) Βάση με πείρους στήριξης και (ii) πείρος φόρτισης.....	199
Εικόνα 8.2: Διάταξη δοκιμής κάμψης (α) 3-σημείων, (β) 4 σημείων.....	200
Εικόνα 8.3: Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου υπό κάμψη, οριακά πριν την έναρξη της θραύσης.....	200
Εικόνα 8.4: Διαστατικά χαρακτηριστικά δοκιμίων βάσει προτύπου.....	201
Εικόνα 8.5: Μέτρηση μέγιστης φόρτισης την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου 45.....	201
Εικόνα 8.6: Στιγμιότυπα από την θραύση ενός τυχαίου δοκιμίου, (α) τοποθέτηση του δοκιμίου στα έδρανα στήριξης, (β) επαφή του πείρου φόρτισης με το δοκίμιο, (γ) εμφανής παραμόρφωση (βέλος κάμψης) του δοκιμίου μετά την κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου, (δ) μέγιστη βύθιση (μέγιστο βέλος κάμψης) λίγο πριν την θραύση, (ε) εμφανής ρωγμή από την πλευρά της θετικής ίνας εξαιτίας εφέλκυσμού, (στ) ολική θραύση δοκιμίου.....	202
Εικόνα 8.7: Κατανομή των καμπτικών τάσεων για ένα κυκλικής διατομής δοκίμιο.....	203
Εικόνα 8.8: Κατανομή καμπτικής τάσης θραύσης (MPa), ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.....	205
Εικόνα 8.9: Κατανομή καμπτικής τάσης θραύσης (MPa), ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.....	207
Εικόνα 8.10: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομών καμπτικών τάσεων θραύσης ενανθράκωσης συνεχούς και κλιμακωτής βαφής.....	208
Εικόνα 9.1: (α) Θεωρητικό βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει θερμοκρασίας και διάρκειας, (β) σύγκριση πειραματικών προφίλ ενεργού βάθους ενανθράκωσης για τα δύο είδη προγραμμάτων με την βιβλιογραφία [32].....	213
Εικόνα 9.2: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων ενανθράκωσης με αντίστοιχα της κα-τασκευάστριας εταιρίας (Durferrit) των αλατιών της υγρής ενανθράκωσης (πηγή εταιρίας: Durferrit «Carburizing baths»).....	214

(κενή σελίδα)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Αριθμοί ομάδων χάλυβα [3] (πίνακας 1 του EN 10027-2).....	38
Πίνακας 1.2: Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI-SAE (Κωδικός X) [4].....	38
Πίνακας 1.3: Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Y) [4].....	39
Πίνακας 1.4: Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Y) [4].....	39
Πίνακας 1.5: Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI-SAE (Κωδικός-Γράμμα διαδικασίας παραγωγής) [4]	39
Πίνακας 1.6: Πρώτο μέρος της κωδικής ονομασίας χάλυβων, κατά το σύστημα B.S. [5]	41
Πίνακας 1.7: Δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας χάλυβων, κατά το σύστημα B.S[5]	42
Πίνακας 1.8: Στοιχεία προσθήκης χάλυβων.....	44
Πίνακας 1.9: Χάλυβες διαμόρφωσης και χρήσεις τους [5]	45
Πίνακας 1.10: Κατάταξη κατά AISI-SAE των χάλυβων κατασκευών Ιδιότητες και βασικές χρήσεις τους [7]	46
Πίνακας 1.11: Παραδείγματα Εργαλειοχαλύβων (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7].....	47
Πίνακας 1.12: Βασικές κατηγορίες εργαλειοχαλύβων κατά AISI-SAE [7].....	48
Πίνακας 1.13: Χημική σύσταση των κυριότερων εργαλειοχαλύβων. [7].....	49
Πίνακας 1.14: Συμβολισμός Ανοξειδωτων χάλυβων κατά DIN [7].....	50
Πίνακας 1.15: Παραδείγματα χάλυβων θερμικής αντοχής (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7].....	51
Πίνακας 1.16: Παραδείγματα χάλυβων Ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7].....	52
Πίνακας 1.17: Χημικές συστάσεις (%κ.β.) αντιπροσωπευτικών χάλυβων μαρτενγήρασης.....	53
Πίνακας 2.1: Η βελτίωση των ιδιοτήτων ενός ανθρακούχου χάλυβα λόγω ανόπτησης.....	73
Πίνακας 2.2: Τιμές δραστικότητας διαφόρων ψυκτικών μέσων χάλυβων κάτω από διάφορες συνθήκες.....	76
Πίνακας 4.1: Τυχαιοποίηση δειγμάτων.....	146
Πίνακας 4.2(α): Πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών συνεχούς βαφής.....	147
Πίνακας 4.2(β): Πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών ισοθερμοκρασιακής βαφής.....	147
Πίνακας 4.3: Πραγματική χημική ανάλυση υλικού.....	149
Πίνακας 4.4: Ταυτοποίηση Χημικής Ανάλυσης Υλικού.....	149
Πίνακας 5.1: Μετρήσεις αποτυπωμάτων πρότυπων δοκιμίων προς βαθμονόμηση του οργάνου.....	158
Πίνακας 5.2: Επαναληψιμότητα και Σφάλμα πρότυπων δοκιμίων.....	158
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 43.....	160
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 44.....	160
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 22.....	162
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 31.....	162
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 6.....	164
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 50.....	164

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 58.....	166
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 54.....	166
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 33.....	168
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 15.....	168
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 7.....	170
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 57.....	170
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 53.....	172
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 37.....	172
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 56.....	174
Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 49.....	174
Πίνακας 8.1(α): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης μίας ώρας με συνεχή βαφή.....	203
Πίνακας 8.1(β): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης δύο ωρών με συνεχή βαφή.....	203
Πίνακας 8.1(γ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τριών ωρών με συνεχή βαφή.....	204
Πίνακας 8.1(δ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τεσσάρων ωρών με συνεχή βαφή.....	204
Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.....	204
Πίνακας 8.3(α): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης μίας ώρας με κλιμακωτή βαφή.....	206
Πίνακας 8.3(β): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης δύο ωρών με κλιμακωτή βαφή.....	206
Πίνακας 8.3(γ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τριών ωρών με κλιμακωτή βαφή.....	206
Πίνακας 8.3(δ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τεσσάρων ωρών με κλιμακωτή βαφή.....	206
Πίνακας 8.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.....	207
Πίνακας 9.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενανθράκωσης συνεχούς και κλιμακωτής βαφής.....	211

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ

2. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

(κενή σελίδα)

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΛΥΒΑ

Ο χάλυβας συνιστά κράμα σιδήρου άνθρακα (Fe-C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη του 1,8%. Μερικά στοιχεία που συνθέτουν το χάλυβα είναι το πυρίτιο (Si), το μαγγάνιο (Mn), το βολφράμιο (W), το χρώμιο (Cr), το βανάδιο (V) και το νικέλιο (Ni) σε ποσοστιαίες αναλογίες που δεν υπερβαίνουν κατά κανόνα το 5%. Απαραίτητα στοιχεία κάθε χάλυβα αποτελούν ο άνθρακας σε ποσοστό που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ του 0,2% και 0,7% και το πυρίτιο (Si) σε ποσοστά από 0,1% έως και 0,7%, σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και το ποσοστό του 4%.

Η ποσότητα του άνθρακα είναι αυτή που ουσιαστικά επηρεάζει τις ιδιότητες και τις ποιότητες των διαφόρων τύπων χάλυβα. Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του άνθρακα τόσο αυξάνεται η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ μειώνεται η συνεκτικότητα και η πλαστικότητα του. Σε αντίθετη περίπτωση, με την μείωση του ποσοστού άνθρακα αυξάνεται η συγκολλησιμότητα του.

Το μαγγάνιο (Mn) συναντάται σε περιεκτικότητα από 0,3% έως 0,8%, ενώ σε εξαιρετικές περιπτώσεις χάλυβων πολύ μεγάλης σκληρότητας και αντοχής στη φθορά μπορεί να συμμετέχει σε ποσοστό 12% έως και 15%. Η συμμετοχή του (Mn) ενισχύει σημαντικά την καταλληλότητα προς συγκόλληση του χάλυβα, η οποία δεν υφίσταται για κράματα με τιμές περιεκτικότητας σε άνθρακα μεγαλύτερες του 0,15%. Για την δημιουργία μεγάλου αριθμού ειδικών χάλυβων απαιτείται και η παρουσία κραματοποιητικών στοιχείων όπως το νικέλιο (Ni), το χρώμιο (Cr), το βανάδιο (V), το βολφράμιο (W) και άλλα, με σκοπό το κράμα να αποκτήσει ιδιαίτερες ιδιότητες, κατά περίπτωση.

Το θείο (S), ο φώσφορος (P) και το οξυγόνο (O), προσδίδουν αρνητικές ιδιότητες στο κράμα αποτελώντας επιβλαβή στοιχεία για τη σύνθεση του. Πιο συγκεκριμένα, προκαλείται ψαθυρότητα εξαιτίας του φωσφόρου (P), ολκιμότητα λόγω αυτής του θείου (Si), ενώ το οξυγόνο (O) με την σειρά του προκαλεί ανεπιθύμητη παρουσία φυσαλίδων και ασυνεχειών κατά την διαδικασία της χύτευσης. Για το γεγονός αυτό, η συμμετοχή αυτών των κραματοποιητικών στοιχείων δεν ξεπερνά το 0,1%.

Οι ιδιότητες κάθε χάλυβα μπορούν να υπολογισθούν με εξαιρετική ακρίβεια, με τις ακριβείς αναλογίες των συστατικών στοιχείων στην χημική του σύσταση και σε συνδυασμό με μία κατάλληλη θερμική κατεργασία.

Στην εικόνα 1.1, απεικονίζονται μία πρότυπη φωτογραφία προϊόντων από χάλυβα.



Εικόνα 1.1: Πρότυπη φωτογραφία προϊόντος χάλυβα. [1]

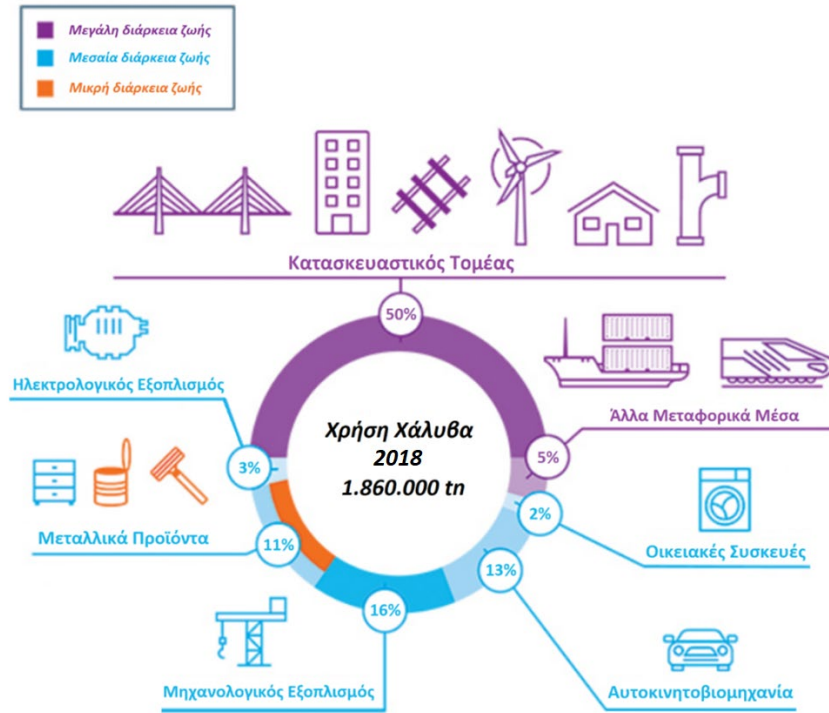
Ο χάλυβας αποτελεί το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται στον κλάδο των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αλλοτροπική τάση του σιδήρου σε συνδυασμό με τους μετασχηματισμούς φάσεων στους χάλυβες επιτρέπουν την δημιουργία μιας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών με αποτέλεσμα ένα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων. Επίσης, κατέχει το ευρύτερο φάσμα χρήσης από όλα τα υλικά, και συναντάται καθημερινά σε διάφορες μορφές, όπως σε κουζινικά είδη, σε πλυντήρια πιάτων ή ρούχων, στα μέσα μεταφοράς (όπως είναι τα αυτοκίνητα, τα πλοία και τα αεροπλάνα), ακόμα και σε χειρουργικά είδη.

Στην εικόνα 1.2, απεικονίζονται οι σημαντικότεροι τομείς της βιομηχανίας, στους οποίους ο χάλυβας ως προϊόν κατέχει πρωταγωνιστικό ρόλο.



Εικόνα 1.2: Τομείς εκμετάλλευσης χάλυβα

Στην εικόνα 1.3: παρουσιάζεται γραφικά η ποσοστιαία σε tπ, η παγκόσμια εκμετάλλευση του χάλυβα ανά βιομηχανικό τομέα εν έτη 2018. Στα στοιχεία, ελήφθησαν από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σιδήρου και Χάλυβα (A.I.S.I.).



Εικόνα 1.3: Εκμετάλλευση χάλυβα ανά τομέα εν έτη 2018 [2]

1.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΧΑΛΥΒΩΝ

Η ταξινόμηση των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα κριτήρια, όπως: η χημική σύσταση, ο προορισμός και η χρήση τους. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, διακρίνονται σε κοινούς (ή ανθρακούχους) και σε κραματωμένους χάλυβες. Ανάλογα με τον προορισμό τους διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες, ενώ ανάλογα με τη χρήση τους σε χάλυβες κατασκευών, εργαλειοχάλυβες, ανοξείδωτους χάλυβες, πυρίμαχους χάλυβες και χάλυβες ειδικών εφαρμογών. Τα γενικά χαρακτηριστικά του υπό διερεύνηση προβλήματος, όπως παρουσιάζεται στην ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία.

Στην εικόνα 1.4, παρουσιάζεται το δέντρο ταξινόμησης των χαλύβων κατά την χημική σύσταση, τον προορισμό και την χρήση τους.



Εικόνα 1.4: Ταξινόμηση χαλύβων ανά κριτήριο

Στον πίνακα 1.1, παρουσιάζεται μέρος του πίνακα 1 του πρότυπου EN 10027-2, με μαύρο φόντο φαίνεται η κατηγορία του χάλυβα της παρούσας πτυχιακής.

Πίνακας 1.1: Αριθμοί ομάδων χάλυβα [3]**Πίνακας 3.11** Αριθμοί ομάδων χάλυβα (πίνακας 1 του EN 10027-2)

κραματωμένοι χάλυβες							
α.α	ειδικοί χάλυβες						
	χάλυβες εργαλείων	διάφοροι χάλυβες	ανοξειδωτοι χάλυβες	χάλυβες κατασκευαστικοί, μηχανολογικοί και δοχείων πίεσης			
0	20 Cr	30	40 ανοξειδωτοι χάλυβες με < 2,5% Ni χωρίς Mo, Nb και Ti	50 Mn-Si-Cu	60 Cr-Ni με 2,0% ≤ Cr < 3,0%	70 Cr Cr-B	80 Cr-Si-Mo Cr-Si-Mn-Mo Cr-Si-Mo-V Cr-Si-Mn-Mo-V
9	29	39 υλικά με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες και με Ni	49 χάλυβες με αντοχή σε αυξημένη θερμοκρασία	59 Cr-Ni με ≥ 1,5% < 2,0% Cr	69 Cr-Ni εκτός από τις ομάδες 57 + 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	89 χάλυβες υψηλής αντοχής συγκολλησιμοι, μη προοριζόμενοι για θερμική κατεργασία από τον χρήστη

Η τυποποίηση των χαλύβων έχει λάβει χώρα σε διάφορα συστήματα τυποποίησης, όπως το Αμερικάνικο σύστημα (AISI-SAE), το Γερμανικό (DIN), το Αγγλικό (BS), το Γαλλικό (AFNOR) κ.α.

1.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE

Για την ονομασία των χαλύβων, το σύστημα AISI-SAE χρησιμοποιεί έναν τετραψήφιο αριθμό (xyzz). Τα δύο πρώτα ψηφία αναφέρονται στην οικογένεια κραμάτων, ως προς το ή τα κύρια στοιχεία προσθήκης και στο ποσοστό τους στο χάλυβα, αντιστοίχως. Τα επόμενα ψηφία δίνουν την % περιεκτικότητά του σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100.

X: Οικογένεια χαλύβων (Πίνακας 1.2)

Y: Είδος χάλυβα, με βάση το ποσοστό των κύριων στοιχείων κραμάτωσης και την οικογένεια χαλύβων στην οποία ανήκει (Πίνακες 1.3-1.4).

ZZ: περιεκτικότητα άνθρακα (C) κ.β. πολλαπλασιασμένη επί 100%.

Στους πίνακες 1.2 , 1.3 , 1.4 δίνονται ενδεικτικά κάποια παραδείγματα με τους κωδικούς X,Y,ZZ τυποποίησης για κάθε σειρά χαλύβων.

Πίνακας 1.2: Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός X) [4]

Σειρά χαλύβων	Οικογένεια χαλύβων
1YZZ	Κοινοί ανθρακούχοι ή Μαγγανιούχοι χάλυβες
2YZZ	Νικελιούχοι χάλυβες
3YZZ	Νικελιοχρωμιούχοι χάλυβες
4YZZ	Μολυβδαινιούχοι/Χρωμιομολυβδαινιούχοι/Νικελιομολυβδαινιούχοι/ Ni-Cr-Mo χάλυβες
5YZZ	Χρωμιούχοι χάλυβες
6YZZ	Χρωμιοβαναδιούχοι χάλυβες

Πίνακας 1.3: Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Y) [4]

Σειρά χαλύβων	Είδη χαλύβων
10ZZ	Κοινοί χάλυβες
11ZZ	Κοινοί χάλυβες ελεύθερης κοπής (free-cutting) με Θείο (S)
13ZZ	Χαλυβοκράματα μαγγανίου (Mn=1.60-1.90%)
33ZZ	Χαλυβοκράματα Ni-Cr (Ni=3.50%, Cr=1.50%)
40ZZ	Χαλυβοκράματα μολυβδαινίου (Mo=0.25%)
41ZZ	Χαλυβοκράματα Cr-Mo (Cr=1%, Mo=0.20%)
43ZZ	Χαλυβοκράματα Ni-Cr-Mo

Πίνακας 1.4: Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός Y) [4]

Σειρά χαλύβων	Είδη χαλύβων
46ZZ	Χαλυβοκράματα Ni-Mo (Ni=1.75%, Mo=0.25%)
48ZZ	Χαλυβοκράματα Ni-Mo (Ni=3.5%, Mo=0.25%)
51ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου (Cr=0.80%)
52ZZ	Χαλυβοκράματα χρωμίου (Cr=1.5%)
61ZZ	Χαλυβοκράματα Cr-V

Επιπλέον, μπροστά από τον κωδικό του χάλυβα μπορεί επίσης να υπάρχει ένα κεφαλαίο γράμμα της λατινικής αλφαβήτου που δηλώνει τη μεταλλουργική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του χάλυβα (Πίνακας 1.5).

Πίνακας 1.5: Ονοματολογία χαλύβων κατά AISI-SAE (Κωδικός-Γράμμα διαδικασίας παραγωγής) [4]

Πρόθεμα	Διαδικασία παραγωγής χάλυβα
A	Κραματωμένος χάλυβας σε κάμινο όξινης επένδυσης
B	Κοινός χάλυβας σε κάμινο Bessemer
C	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με βασική επένδυση
D	Κοινός χάλυβας σε κάμινο ανοικτής εστίας με όξινη επένδυση
E	Χάλυβας σε ηλεκτρική κάμινο
X	Χάλυβας ειδικής σύστασης (εκτός προδιαγραφών)

Παράδειγμα: E 1360 → **E:** Χάλυβας παραχθείς σε ηλεκτρική κάμινο
 → **1:** Μαγγανιούχος (ή κοινός ανθρακούχος)
 → **3:** Μαγγανιούχος με Mn = 1.60 - 1.90 % κ.β.
 → **60:** Ποσοστό άνθρακα C = 0,55 - 0,66 % κ.β.

1.2.2 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Γερμανικό σύστημα DIN

Κατά DIN οι χάλυβες τυποποιούνται ανάλογα με την χημική τους σύσταση και την κατεργασία για την οποία προορίζονται.

1) Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες

Συμβολισμός: St XX(YY), όπου:

St: Από τη γερμανική λέξη Stahl = χάλυβας

XX: Η ελάχιστη αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό, εκφρασμένη σε kp/mm^2 .

(YY): (Προαιρετικά) Αφορούν ειδικές (ποιοτικές) προδιαγραφές αντίστοιχου πίνακα.

Η ονομασία ενός κοινού ανθρακούχου χάλυβα ξεκινά με το πρόθεμα St (από το γερμανικό Stahl που σημαίνει χάλυβας) και ακολουθεί ένας αριθμός, που υποδηλώνει την αντοχή αυτού του χάλυβα σε εφελκυσμό, μετρούμενη σε kp/mm^2 . Έτσι, ένας ανθρακούχος χάλυβας με αντοχή 700 MPa ή N/mm^2 (δηλ. 70 kp/mm^2) συμβολίζεται, σύμφωνα με αυτήν την ονοματολογία, ως St 70.

Προαιρετικά ακολουθούν και δύο ακόμη ψηφία που δηλώνουν τα δύο τελευταία ψηφία του προτύπου DIN. Για παράδειγμα, ο συμβολισμός St 5011 δηλώνει χάλυβα αντοχής 50 kp/mm^2 (ή 500 N/mm^2), ο οποίος είναι τυποποιημένος σύμφωνα με το πρότυπο DIN 1611 (τα δύο πρώτα ψηφία, 16, αναφέρονται στους χάλυβες). Συνήθως, τον αριθμό που δηλώνει την αντοχή ακολουθεί ένα ψηφίο που αφορά την ποιότητα (1: συνήθεις απαιτήσεις, 2: μεγαλύτερες απαιτήσεις, 3: ειδικές απαιτήσεις). Για παράδειγμα, ο χάλυβας St 40-1 έχει αντοχή 400 N/mm^2 και ανήκει στην ποιότητα 1.

2) Κοινοί χάλυβες για επιβελτίωση ή ενανθράκωση

Συμβολισμός: C XX ή C XX K

όπου: XX: η περιεκτικότητα του C πολλαπλασιασμένη επί 100.

K: Δηλώνει χαμηλό ποσοστό ακαθαρσιών.

Για ανθρακούχους χάλυβες καλύτερης ποιότητας ο συμβολισμός ξεκινά με το γράμμα C (που δηλώνει άνθρακα) και ακολουθεί η εκατοστιαία περιεκτικότητα σε άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100. Πιο συγκεκριμένα, ο χάλυβας C 60 είναι ανθρακούχος χάλυβας με $60/100 = 0,60 \%$ κ.β. C. Στην περίπτωση των υπερκαθαρών χαλύβων (με εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά ακαθαρσιών S, P) μεταξύ του C και της περιεκτικότητας παρεμβάλλεται το γράμμα K. Υπό άλλες συνθήκες, ο προηγούμενος χάλυβας θα ονομαζόταν CK 60, αν η περιεκτικότητά του σε S και P ήταν πολύ χαμηλή. Όταν ο χάλυβας έχει υποστεί κάποια θερμική ή άλλη κατεργασία, χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου:

- E: Ενανθράκωση
- G: Ανόπτηση
- N: Εξομάλυνση
- V: Επιβελτίωση
- GS: Χυτοχάλυβας (προϊόν χύτευσης)

Παράδειγμα: Ο χάλυβας C 40 K, είναι κοινός χάλυβας με $C = 0.40\%$ και εξαιρετικής καθαρότητας που προορίζεται για επιβελτίωση ή ενανθράκωση.

3) Κραματωμένοι Χάλυβες

Ενώ αν έχουμε κραματωμένο χάλυβα, προηγείται η περιεκτικότητα του άνθρακα πολλαπλασιασμένη επί 100 και έπεται ο χημικός συμβολισμός για τα στοιχεία προσθήκης με τις περιεκτικότητες πολλαπλασιασμένες με κάποιο αριθμό όπως αναλύονται παρακάτω:

Συμβολισμός: XX ABC...abc...

όπου: XX: η περιεκτικότητα του C πολλαπλασιασμένη επί 100.
A, B, C ... τα χημικά σύμβολα των βασικών κραματικών στοιχείων κατά σειρά ελαττούμενης περιεκτικότητας a, b, c ... αντίστοιχοι ακέραιοι δηλωτικοί της περιεκτικότητας των A, B, C ..., αντίστοιχα, οι οποίοι υπακούουν στους εξής κανόνες:

Για τα στοιχεία: Cr, Co, Mn, Ni, Si, W προκύπτουν από την περιεκτικότητα (%) πολλαπλασιασμένη επί 4

Για τα στοιχεία: Al, Mo, Cu, Ti, V προκύπτουν από την περιεκτικότητα (%) πολλαπλασιασμένη επί 10.

Για τα στοιχεία: S, P, N, προκύπτουν από την περιεκτικότητα (%) πολλαπλασιασμένη επί 100.

Παράδειγμα: Ο χάλυβας 40 CrMoP 212, είναι κραματωμένος χάλυβας με σύνθεση:

- $C = 40/100 = 0.40\%$ κ.β.,
- $Cr = 2/4 = 0.50\%$ κ.β.
- $Mo = 1/10 = 0.10\%$ κ.β.
- $P = 2/100 = 0.02\%$ κ.β.

1.2.3 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Αγγλικό σύστημα B.S.

Το αγγλικό σύστημα χρησιμοποιεί εξαψήφιους κωδικούς, καθένας από τους οποίους χωρίζεται σε τρία μέρη:

- 1) Το πρώτο τριψήφιο μέρος του κωδικού αφορά τον τύπο του χάλυβα (Πίνακας 1.6).
- 2) Το δεύτερο μέρος είναι ένα γράμμα, που δίνει ιδιαίτερες πληροφορίες για τον χάλυβα (Πίνακας 1.7).
- 3) Το τρίτο διψήφιο μέρος του κωδικού δίνει το ποσοστό του χάλυβα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένο επί 100.

Πίνακας 1.6: Πρώτο μέρος της κωδικής ονομασίας χαλύβων, κατά το σύστημα B.S. [5]

1 ^ο Μέρος Κωδικού	Τύπος Χάλυβα
000-199	Κοινός ανθρακούχος ή ανθρακούχος με Mn, ο τριψήφιος αριθμός δίνει το ποσοστό του Mn, πολλαπλασιασμένο επί 100
200-240	Αυτόματος χάλυβας (χάλυβας αποκοπής θείου), το δεύτερο και τρίτο ψηφίο δίνουν το ποσοστό του S, πολλαπλασιασμένο επί 100
250	Μαγγανιοπυριτιούχος χάλυβας

Πίνακας 1.7: Δεύτερο μέρος κωδικής ονομασίας χαλύβων, κατά το σύστημα B.S[5]

2 ^ο Μέρος Κωδικού	Επεξήγηση Κωδικού
A	Η ακριβής χημική σύσταση του χάλυβα καθορίζεται με χημική ανάλυση
H	Ο χάλυβας προσφέρεται για κατεργασία σκλήρυνσης (βαφή)
M	Ο χάλυβας προσφέρεται για ειδική μηχανική κατεργασία
S	Πρόκειται για ανοξειδωτο χάλυβα

1.2.4 Ονοματολογία χαλύβων κατά το Γαλλικό σύστημα AFNOR

Οι ονομασίες των κοινών χαλύβων δίνονται με τη μορφή Czz, όπου zz είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100. Ενίοτε, ακολουθεί κάποιο από τα γράμματα a, b ή m, που παραστούν τις προδιαγραφές των περιεκτικότητας των ακαθαρσιών, οι οποίες δίνονται από πίνακα. Όταν το γράμμα C ακολουθείται από το X, ο κοινός χάλυβας είναι πολύ καλής ποιότητας, κατάλληλος για θερμικές κατεργασίες. Για παράδειγμα, ο χάλυβας C 40 e, είναι κοινός ανθρακούχος με 0,40% κ.β. C, στον οποίο το ποσοστό των ακαθαρσιών S+P ισούται με 0,07%.

Σύμφωνα με το ίδιο σύστημα, οι ονομασίες των ελαφρά κραματωμένων χαλύβων δίνονται με τη μορφή zzK1K2K3x1x2x3. Κατά τα γνωστά, με zz δίνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100. K1, K2 και K3 είναι τα τρία κύρια στοιχεία προσθήκης, για τον συμβολισμό των οποίων χρησιμοποιούνται γράμματα του λατινικού αλφαβήτου ως εξής: A για το Al, C για το Cr, K για το Co, U για το Cu, M για το Mn, D για το Mo, N για το Ni, Pb για το Pb, S για το Si, F για το S, W για το W, V για το V, κλπ. Οι ποσότητες x1, x2 και x3 αναφέρονται στα αντίστοιχα ποσοστά τους στο χάλυβα, πολλαπλασιασμένα επί 4, για περιεκτικότητες 1-3%, και επί 10, για περιεκτικότητες μικρότερες. Για παράδειγμα, ο χάλυβας 50CV4 είναι ελαφρά κραματωμένος, με ποσοστό άνθρακα 0,40%. Περιέχει, επίσης, χρώμιο σε ποσοστό $4/4=1\%$ και λίγο βανάδιο.

Οι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, δηλώνονται με το γράμμα Z, ενώ οι ποσότητες x1, x2, x3... είναι διψήφιος και δίνουν τις περιεκτικότητες των προσθηκών. Για παράδειγμα, ο Z70WK1205 είναι ισχυρά κραματωμένος χάλυβας, με χημική σύσταση: 0,70% C, 12% W και 5% Co.

1.2.5 Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με την χημική σύσταση

1) Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Ονομάζονται τα κράματα Fe-C, τα οποία εκτός από μικρές ποσότητες προσμείξεων θείου (S) έως 0,04%, φωσφόρου (P) έως 0,05% και Μαγγάνιο (Mn) έως 1%, δεν περιέχει άλλα στοιχεία κραμάτωσης.

Ανάλογα με το ποσοστό (%) του άνθρακα, οι κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- Υποευτηκτοειδείς, όσοι περιέχουν ποσοστό άνθρακα κατά βάρος έως και 0,76%

- Μαλακοί, αυτοί που η περιεκτικότητα τους σε άνθρακα είναι από 0,10% έως και 0,25%
- Χάλυβες μέτριου άνθρακα, από 0,20% έως 0,50%
- Χάλυβες υψηλού άνθρακα, πάνω από 0,50% περιεκτικότητα C.
- Ευτηκτοειδείς, ονομάζονται οι χάλυβες που η περιεκτικότητα σε άνθρακα ισούται με 0,76% κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς, όσοι έχουν άνθρακα από 0,76% έως 2,14% κ.β.

2) Κραματωμένοι χάλυβες

Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το συνολικό ποσοστό των προσμείξεων τους ως:

- Ελαφρά κρατατωμένοι ή μικροκραματωμένοι χάλυβες, για προσμείξεις έως 2%. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι δομικοί χάλυβες ή χάλυβες κατασκευών. Σχεδιάζονται ώστε να παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες ή/και αυξημένη αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση, σε σύγκριση με άλλους συμβατικούς χάλυβες. Οι μικροκραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,05%-2,5% C), με σκοπό να εμφανίζουν επαρκή ικανότητα διαμόρφωσης και συγκολλησιμότητα, ενώ επίσης περιέχουν Μαγγάνιο (Mn) σε ποσοστό έως 2%.
- Μέτρια κραματωμένοι χάλυβες, για προσμείξεις από 2% έως και 10%. Συνήθως περιέχουν Mn έως 1,5% καθώς επίσης και άλλα κραματικά στοιχεία όπως Nb, V ή Ti έως 0,1%. Παρουσιάζει διακύμανση στο όριο διαρροής από 400 έως 650 MPa, αντοχή σε εφελκυσμό από 500 έως 850 MPa, καθώς και σημαντική επιμήκυνση μέχρι το σημείο της θραύσης της τάξης του 14-27%. Εξαιτίας του μικρού μεγέθους των κόκκων, η ικανότητα μορφοποίησης τους εν ψυχρώ είναι μικρή. Το μεγάλο κόστος παραγωγής τους, είναι αυτό που τους περιορίζει στη χρήση παρόλο που έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες έναντι των κοινών χαλύβων. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία εκεί όπου οι απαιτήσεις για αντοχή και δυσθραυστότητα είναι υψηλές (Αξονες, κιβώτια ταχυτήτων, φρένα, κλπ)
- Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, για συνολικό ποσοστό προσμείξεων μεγαλύτερο του 10%. Αυτή την κατηγορία αποτελούν οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι και οι χάλυβες μαρτεγύρανσης (Maraging) με μεγάλα ποσοστά νικελίου (Ni), χρωμίου (Cr), βαναδίου (V), μολυβδαινίου (Mo), βολφραμίου (W) και κοβάλτιου (Co).

1.2.6 Επίδραση των στοιχείων κραμάτωσης

Τα στοιχεία τα οποία προστίθενται στο χάλυβα έχουν στόχο να βελτιώσουν τη δομή, τις μηχανικές του ιδιότητες, την αντοχή σε φθορά και διάβρωση. Ορισμένες από τις δράσεις των στοιχείων προσθήκης αναφέρονται παρακάτω :

- Σταθεροποίηση του φερρίτη (α-φερρογόνα στοιχεία) : Cr, Mo, W, V, Si
- Σταθεροποίηση του ωστενίτη (γ-φερρογόνα στοιχεία) : Mn, Ni, Co

- Τάση σχηματισμού καρβιδίων (καρβιδιογόνα στοιχεία) : $Co < Fe < Mn < Cr < Mo < W < V < Ti$
- Τάση διάσπασης καρβιδίων σε γραφίτη (γραφιτίζοντα στοιχεία): Ni, Si, Al
- Μετατόπιση των καμπυλών TTT προς τα δεξιά-αύξηση της εμβαπτότητας : μικρή για Mn, Cr, σημαντική για Ni και μεγάλη Mo, W, V
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση: Cr, Ni, Si
- Αύξηση κατεργασιμότητας: Mn
- Αύξηση της μαγνητικής διαπερατότητας: Si

Οι ακαθαρσίες θείου και φωσφόρου πρέπει να διατηρούνται σε μικρά ποσοστά, διότι ψαθυροποιούν το χάλυβα. Αναλυτικά ο ρόλος για καθένα ξεχωριστά από τα βασικότερα στοιχεία προσθήκης παρουσιάζεται στο πίνακα 1.8 [7].

Πίνακας 1.8: Στοιχεία προσθήκης χαλύβων

Στοιχείο Προσθήκης	Κατηγορία	Διαλυτότητα	Επίδραση
Ni (Νικέλιο)	γ-φερρογόνο και γραφιτίζον	10% στο φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Σημαντική αύξηση εμβαπτότητας. Αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και της προστασίας από διάβρωση.
Cr (Χρώμιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στο φερρίτη και 13% στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαπτότητας. Αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και της προστασίας από διάβρωση (τ -δίκως > 13%)
Mn (Μαγγάνιο)	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	3% στο φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαπτότητας. Αύξηση της κατεργασιμότητας σε κοπή (χάλυβες ελευθέρως κοπής). Μεγάλη αντοχή σε φθορά-τριβή για ποσοστά > 12% (χάλυβες Hadfield)
Mo (Μολυβδαίνιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	37% στο φερρίτη και 5% στον ωστενίτη	Μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας. Αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά και της αντοχής σε φθορά-τριβή.
W (Βολφράμιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	33% στο φερρίτη και 6% στον ωστενίτη	Μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, της σκληρότητας, της αντοχής σε επαναφορά και της αντοχής σε φθορά-τριβή.
V (Βανάδιο)	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	άνευ ορίου στο φερρίτη και 1% στον ωστενίτη	Πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας. Προκαλεί τη μέγιστη αύξηση της σκληρότητας μετά από επαναφορά. Μεγάλη αύξηση της αντοχής σε φθορά-τριβή.
Co (Κοβάλτιο)	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	75% στο φερρίτη και άνευ ορίου στον ωστενίτη	Μείωση της εμβαπτότητας. Προκαλεί σκλήρυνση με το σχηματισμό μεσομεταλλικών ενώσεων σε ειδικές κατηγορίες χαλύβων (χάλυβες Maraging)
Si (Πυρίτιο)	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	18,5% στο φερρίτη και 6% στον ωστενίτη	Μικρή αύξηση της εμβαπτότητας. Προστασία από διάβρωση. Χρήση σε ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές.

1.2.7 Ταξινόμηση χαλύβων σύμφωνα με τον προορισμό τους

1) Χάλυβες διαμόρφωσης

Είναι οι χάλυβες οι οποίοι υφίστανται επιπλέον μηχανική κατεργασία όπως έλαση, διέλαση, κ.λ.π. (Πίνακας 1.9) [5].

Πίνακας 1.9: Χάλυβες διαμόρφωσης και χρήσεις τους. [5]

% κ.β. C	Θερμικές Κατεργασίες	Ιδιότητες	Χρήσεις
<0,05	–	Μεγάλη πλαστικότητα, καλή κατεργασιμότητα	Ελάσματα, σωλήνες, ράβδοι, σύρματα, κοχλίες, περικόχλια
0,15	–	Καλή μηχανική αντοχή	Μεταλλικές κατασκευές και τμήματα μηχανών
<0,30	–	Καλή συγκολλησιμότητα	Χάλυβες συγκολλήσεων
0,35	Χωρίς θερμική κατεργασία	–	Τμήματα μηχανών
	ή μετά από ανόπτηση		
0,45	Μετά από ανόπτηση	Αρκετή σκληρότητα,	–
		καλή αντοχή σε φθορά, ανεκτική κατεργασιμότητα	
0,45- 0,60	Μετά από βαφή και επαναφορά	Μεγάλη σκληρότητα	–
0,50	Χωρίς θερμική κατεργασία	Μεγάλη σκληρότητα	Αξονες, ελατήρια, οδοντωτοί τροχοί, αλυσίδες, λάμες κοπίδια, κλπ.
	μετά από επαναφορά ή ανόπτηση		

2) Χάλυβες χύτευσης ή χυτοχάλυβες

Παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή «χελωνών».

Στην εικόνα 1.5, παρουσιάζεται το δέντρο ταξινόμησης των χαλύβων χύτευσης.



Εικόνα 1.5: Τύποι Χαλύβων Χύτευσης

1.2.8 Ταξινόμηση χάλυβων σύμφωνα με την χρήση τους

1) Χάλυβες κατασκευών

Η κατάταξη κατά AISI-SAE, οι ιδιότητες και οι βασικές χρήσεις των χάλυβων κατασκευών φαίνονται στον Πίνακα 1.10 Από άποψη δομής, οι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε: φερριτικούς, φερριτο-περλιτικούς, ωστενιτικούς και μαρτενσιτικούς.

Πίνακας 1.10: Κατάταξη κατά AISI-SAE των χάλυβων κατασκευών Ιδιότητες και βασικές χρήσεις τους [7]

Κύρια σειρά (AISI-SAE)	Είδος χάλυβα	Ιδιότητες - Χρήσεις
2000	Νικελιούχος	Αντοχή σε κόπωση, διάβρωση. Ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές.
3000	Νικελιοχρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Κατασκευή διωστήρων, αξόνων, κ.λπ.
4000	Μολυβδαινιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Σκληρότητα, αντίσταση στη φθορά και αντοχή στον ερπυσμό. Κατασκευή τμημάτων λεβήτων, αεροστροβίλων.
5000	Χρωμιούχος	Καλή εμβαπτότητα. Επιδέχεται επιφανειακή σκλήρυνση. Κατασκευή λεπίδων, διωστήρων, ρουλεμάν, εκκέντρων, κ.λπ.
6000	Χρωμοβαναδιούχος	Πολύ καλή εμβαπτότητα. Αύξηση αντοχής σε φθορά-τριβή. Κατασκευή μαχαιριών, ψαλιδιών, λεπίδων, ελατηρίων βαλβίδων, κ.λπ.

Αποτελούνται από μικρά ποσοστά κραματικών στοιχείων (κυρίως Mn, Cr) και καταλαμβάνουν μεγάλο εύρος μηχανολογικών κατασκευών όπως είναι οι λέβητες, οι μεταλλικοί σκελετοί κ.λ.π. αλλά και στοιχείων μηχανών όπως π.χ. άξονες, διωστήρες, βαλβίδες, ελατήρια κ.λ.π.

Ιδιαίτερο ρόλο έχουν στο τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου οι χάλυβες κατασκευών αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζονται χιτώνια, πείροι, λεβιέδες, σύνδεσμοι, αλυσίδες, κιβώτια ταχυτήτων, ρουλεμάν, άξονες, ελατήρια διαφόρων τύπων, τροχαλίες αλυσίδων, πείροι εμβόλων και αλυσίδων, άξονες γραναζιών κ.λ.π.

Στο κεφάλαιο 1.3 «Χάλυβες κατασκευών» αναλύεται διεξοδικά η συγκεκριμένη κατηγορία χάλυβων.

Στην εικόνα 1.6, παρουσιάζονται τα κυριότερα εξαρτήματα του αυτοκινήτου κατασκευασμένα από χάλυβες κατασκευών.



Εικόνα 1.6: Εξαρτήματα αυτοκινήτου από χάλυβες κατασκευών

2) Εργαλειοχάλυβες

Οι εργαλειοχάλυβες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που απαιτείται υψηλή μηχανική αντοχή και κυρίως μεγάλη σκληρότητα και αντίσταση σε φθορά, όπως π.χ. κοπτικά εργαλεία, μήτρες διαμόρφωσης, έμβολα διέλασης, ράουλα έλασης, κλπ. Η χρήση γίνεται πάντοτε μετά από θερμική κατεργασία βαφής- επαναφοράς (επιβελτίωση). Αποτελούν το 0,1% της παγκόσμιας παραγωγής χαλύβων (Πίνακας 1.11). Τα μεγάλα ποσοστά κραματικών στοιχείων (W, Mo, Cr, V) ευνοούν την αύξηση της σκληρότητας και της αντίστασης σε φθορά. Λόγω της υψηλής αντοχής σε φθορά και τριβή χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κοπής (κοπτικά εργαλειομηχανών τόννου, φρέζας, πλάνης κ.λ.π), ή διαμόρφωσης (καλούπια χύτευσης ή διαμόρφωσης, μήτρες, έμβολα).

Βασικό χαρακτηριστικό των εργαλειοχαλύβων είναι η ύπαρξη **καρβιδίων**, (δηλαδή ενώσεων μετάλλου-άνθρακα) είτε σφαιρικού σχήματος (π.χ. καρβίδια του μολυβδαινίου και βολφραμίου στους ταχυχάλυβες) είτε ακανόνιστου-μακρόστενου σχήματος (π.χ. καρβίδια του χρωμίου στους εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου). Οι σημαντικότερες ιδιότητες των εργαλειοχαλύβων είναι η μεγάλη εμβαπτότητα, η αυξημένη σκληρότητα διατηρηθείσα έως και την θερμοκρασία των 600°C, εξαιρετική δυσθραυστότητα, αντοχή εν θερμώ, αντοχή σε τριβή και φθορά.

Στον πίνακα 1.11, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιοι εργαλειοχάλυβες με αντοχή σε MPa, σκληρότητα Brinell και περιεκτικότητα σε %C, ενώ στην εικόνα 1.7, φαίνονται μερικές εφαρμογές αυτών, για κοπτικά τόννου ή φρέζας.

Πίνακας 1.11: Παραδείγματα Εργαλειοχαλύβων (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7]

Αριθμός Υλικού	Σύμβολο κατά DIN	Αντοχή σε MPa	Σκληρότητα Brinell HB	Περιεκτικότητα σε C (%)
1.152	C 70 W1	640	190	0.65-0.74
1.162	C 70 W2	640-760	190	0.65-0.74
1.183	C 85 W	760-830	225-248	0.80-0.90
1.2601	X165CrMoV12	1570-1960	231	1.55-1.75
1.2726	26 NiCrMoV 5	1180-1420	240	0.22-0.30
1.412	X20CrMo13	880-1470	260	0.17-0.22

Στην εικόνα 1.7, απεικονίζονται κοπτικά εργαλεία για τόρνο και φρέζα κατασκευασμένα από εργαλειοχάλυβα.



Εικόνα 1.7 Εφαρμογές Εργαλειοχαλύβων (κοπτικά εργαλεία για τόρνο ή φρέζα)

Η παρουσία σκληρών καρβιδίων (1500-2500 HV) αυξάνει τη σκληρότητα του χάλυβα και την αντοχή του σε φθορά. Επιπλέον, σε ορισμένες κατηγορίες (**ταχυχάλυβες**) επιδρούν και στην εν θερμώ αντοχή. Κατά την καταπόνηση σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως π.χ. σε κοπή υψηλής ταχύτητας, σχηματίζονται νέα καρβίδια (δευτερογενή καρβίδια), αυξάνοντας τη σκληρότητα και την αντίσταση σε φθορά του εργαλείου (**δευτερογενής σκλήρυνση**). Η ταξινόμηση των χάλυβων, σύμφωνα με το αμερικάνικο σύστημα AISI-SAE, παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.12

Πίνακας 1.12: Βασικές κατηγορίες εργαλειοχαλύβων κατά AISI-SAE [7]

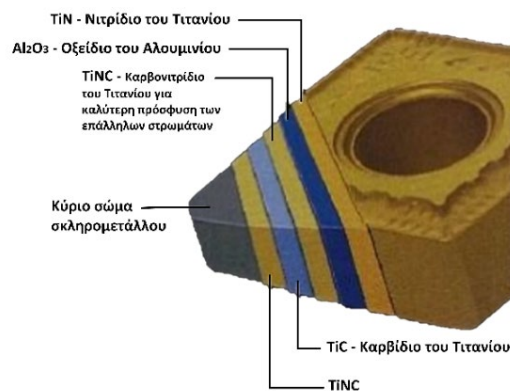
Σειρά κατά AISI-SAE	Βασικά χαρακτηριστικά
Σειρά W (Water-Hardening) (Εργαλειοχάλυβες χαμηλής εμβαιπτότητας)	Η αύξηση της εμβαιπτότητας και της αντοχής σε φθορά οφείλεται στην προσθήκη του χρωμίου (0,20-0,50%), ενώ τα βανάδιο συμβάλλει στην εκλέπτυνση των κόκκων και τη βελτίωση της δυσθραυστότητας. Βάφονται στο νερό. Τα εργαλεία κοπής και κατεργασίας ξύλου και μετάλλου αποτελούν τις κυριότερες εφαρμογές τους.
Σειρά A (Air-Hardening) (Εργαλειοχάλυβες μέτριας κραματοποίησης και υψηλής εμβαιπτότητας)	Επιδέχονται βαφή στον αέρα. Το χρώμιο, το μολυβδαίνιο, το μαγγάνιο και το βανάδιο είναι τα κύρια κραματικά στοιχεία. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων υψηλής αντοχής σε φθορά και τριβή και για την κατασκευή κυλίνδρων ελάσεως
Σειρά D (Εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου)	Ανήκουν στην κατηγορία των ισχυρών κραματομένων χάλυβων, με μεγάλη περιεκτικότητα σε C της τάξης του (1-2,35%) και Cr (12%). Άλλα κραματικά στοιχεία είναι το βανάδιο, το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο και το κοβάλτιο. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτών χάλυβων είναι η εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε φθορά και τριβή, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ράουλων ελάστρων.
Σειρά O (Oil-Hardening) (Εργαλειοχάλυβες ψυχρής κατεργασίας, μέσης εμβαιπτότητας)	Βάφονται στο λάδι. Κύριες προσθήκες αποτελούν το μαγγάνιο, το χρώμιο, το μολυβδαίνιο, και το βολφράμιο. Η χρήση τους αφορά τη κατασκευή εργαλείων και καλουπιών ψυχρής διαμόρφωσης.
Σειρά S (Shock resisting types) (Εργαλειοχάλυβες υψηλής αντοχής στην κρούση)	Σε αυτή τη κατηγορία εργαλειοχαλύβων το θείο, το χρώμιο και το βολφράμιο αλλά και σε δευτερεύον ρόλο το μολυβδαίνιο και το νικέλιο έχουν ως στόχος της βελτίωση της εμβαιπτότητας και της αντοχής στη φθορά. Η κατασκευή εργαλείων και εδράνων που καταπονούνται από έντονα κρουστικά φορτία αποτελεί την κύρια χρήση αυτών των χάλυβων
Σειρά H (Hot-Working) (Εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών)	Με κύριες προσθήκες όπως είναι το βολφράμιο, το χρώμιο, το βανάδιο και το μολυβδαίνιο η συγκεκριμένη σειρά εργαλειοχαλύβων χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων (καλούπια, έμβολα, μήτρες) θερμών κατεργασιών, όπως θερμή εξέλαση, θερμή σφυρηλάτηση, χύτευση κλπ

Η χημική σύσταση των βασικότερων τύπων εργαλειοχαλύβων που χρησιμοποιούνται στις μηχανουργικές κατεργασίες (O, H, D, M, T) παρουσιάζεται στον πίνακα 1.13:

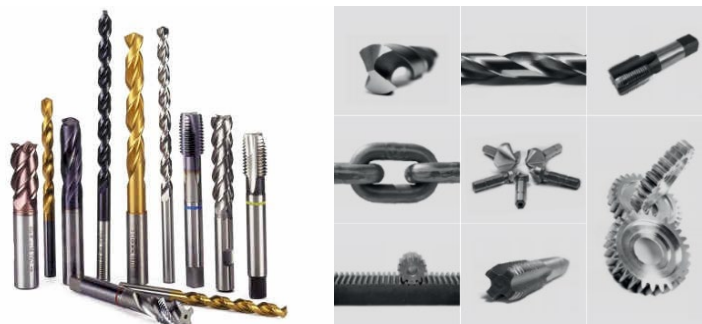
Πίνακας 1.13: Χημική σύσταση των κυριότερων εργαλειοχαλύβων. [7]

Σειρά AISI-SAE	Χάλυβας	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Co
Σειρά O	O1	0,90	0,50	-	0,50	-	1,00	-
	O2	0,90	-	-	-	-	1,60	-
Σειρά D	D2	1,50	12,00	1,00	-	1,00	-	-
	D3	2,25	12,00	-	-	-	-	-
	D4	2,25	12,00	1,00	-	-	-	-
	D5	1,50	12,00	1,00	-	-	-	3,00
Σειρά M	M1	0,85	4,00	8,50	1,50	1,00	-	-
	M2	1,00	4,00	5,00	6,00	2,00	-	-
	M4	1,30	4,00	4,50	5,50	4,00	-	-
	M7	1,00	4,00	8,75	1,75	2,00	-	-
Σειρά T	T1	0,75	4,00	-	18,00	1,00	-	-

Στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται η ανάλυση στρωμάτων ενός κοπτικού εργαλείου από εργαλειοχάλυβα ενώ στην 1.9 φωτογραφίες από άλλες εφαρμογές εργαλειοχαλύβων.



Εικόνα 1.8: Ανάλυση στρωμάτων κοπτικού εργαλείου κατασκευασμένου από εργαλειοχάλυβα



Εικόνα 1.9: Άλλες εφαρμογές εργαλειοχαλύβων (κοπτικά, αλυσίδες, οδοντωτοί τροχοί)

3) Ανοξειδωτοι χάλυβες

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες περιέχουν πολύ μεγάλη συγκέντρωση σε χρώμιο ($Cr > 13\%$) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε αντοχή σε διάβρωση. Μερικές κατασκευές από ανοξειδωτο χάλυβα αποτελούν οι εναλλάκτες θερμότητας, δοχεία, σωλήνες, πτερωτές και οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή έρχεται σε επαφή με διαβρωτικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται επίσης και σε ιατρικά εργαλεία όπως είναι τα χειρουργικά νυστέρια αλλά και σε είδη οικιακής χρήσεως όπως είδη κουζίνας, μαχαιροπήρουνα, κ.λ.π.

Στον πίνακα 1.14, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια παραδείγματα ανοξειδωτων χαλύβων.

Πίνακας 1.14: Συμβολισμός Ανοξειδωτων χαλύβων κατά DIN [7]

Αριθμός Υλικού	Σύμβολο κατά DIN	Αντοχή σε Mpa	Σκληρότητα Brinell HB	Περιεκτικότητα σε C (%)
1.4	X 7 Cr 13	450-700	130-210	≤ 0.08
1.4001	X 7 Cr 14	-----	130-180	≤ 0.08
1.4002	X 7 CrAl 13	450-700	130-210	≤ 0.08

Οι ανοξειδωτοι χάλυβες διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες: μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες, φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες, ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες και ωστενιτοφερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες.

Λόγω καλή αντοχής σε διάβρωση, η συγκεκριμένη κατηγορία χαλύβων χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτείται αυξημένη αντοχή σε σκουριά, όπως είναι πολλά από τα μέρη ενός κινητήρα αυτοκινήτου, πιο συγκεκριμένα οι ανοξειδωτοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βαλβίδων, ρουλεμάν, εξατμίσεων, πιστονιών, αντλιών κ.λ.π.

Με βάση το διαχωρισμό των κραματικών στοιχείων σε α - και γ -φερρογόνα, ο Schaeffler κατάφερε να συσχετίσει με ακρίβεια την παρουσία των μεταλλουργικών φάσεων, που εμφανίζονται κατά την συγκόλληση ανοξειδωτων χαλύβων. Εκλέγοντας το Ni ως τυπικό γ -φερρογόνο στοιχείο και το Cr ως τυπικό α -φερρογόνο και συγκρίνοντας με άλλα στοιχεία τη δυνατότητα σχηματισμού ωστενίτη και φερρίτη, αντίστοιχα, βρέθηκε ένας εμπειρικός συντελεστής για κάθε στοιχείο, ώστε, τελικά, η χημική σύσταση να εκφράζεται με ισοδύναμες ποσότητες σε Cr και Ni. Με την μέθοδο αυτή, έγινε δυνατή η απεικόνιση σε διάγραμμα, όλων των ανοξειδωτων χαλύβων (το διάγραμμα Schaeffer).

4) Χάλυβες θερμικής αντοχής

Οι συγκεκριμένοι χάλυβες, ξεχωρίζουν λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε χρώμιο (Cr), ενώ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φούρνων, λεβήτων, σιδηροτροχιών, σωληνώσεων διυλιστηρίων, κ.λ.π.

Πίνακας 1.15: Παραδείγματα χαλύβων θερμικής αντοχής (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7]

Αριθμός Υλικού	Σύμβολο κατά DIN	Αντοχή σε Mpa	Σκληρότητα Brinell HB	Περιεκτικότητα σε C (%)
1.47	8 CrSi 7 7	490-640	192	≤ 0.10
1.4713	X10CrAl7	420-620	192	≤ 0.12
1.4722	X10CrSi13	540-690	195	≤ 0.12
1.4741	X10CrSi18	540-690	215	≤ 0.12
1.4861	X10NiCr3220	490-740	200	≤ 0.12

Από τους χάλυβες θερμικής αντοχής κατασκευάζονται επίσης βαλβίδες εισόδου μέσης αντοχής για μηχανές, βαλβίδες εξόδου για μηχανές υψηλών απαιτήσεων, στροβίλων τούρμπο, πτερύγια, πόρτες αυτοκινήτων κ.λ.π. Η εικόνα 1.10 απεικονίζει μιά χαρακτηριστική εφαρμογή των πυρίμαχων χαλύβων.

**Εικόνα 1.10** Φυγοκεντρικός υπερσυμπιεστής με πτερύγια από χάλυβα θερμικής αντοχής.

5) Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μόνιμων μαγνητών, κ.λ.π. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Πίνακας 1.17):

- i. Μαγνητικά μαλακοί χάλυβες. Περιέχουν μεγάλο ποσοστό Si (4-5%) και έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και μικρές απώλειες ενέργειας από υστέρηση και δινορεύματα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών για ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες.
- ii. Μαγνητικά σκληροί χάλυβες. Οι τυπικοί μαγνητικοί σκληροί χάλυβες περιέχουν C (0,8-1,0%), Cr (0,6-9,0%), W (έως 6,0%) και Co (3,0 και 15%). Άλλα μαγνητικά υλικά, με βάση το σίδηρο, είναι κράματα Fe-Ni, Fe-Co και Fe-Ni-Co. Επίσης, τελευταία έχουν βελτιωθεί οι ιδιότητές τους με προσθήκες Al, Cu και Ti, όπως είναι το κράμα 57Fe-12Co-9Al-16Ni-5Cu-1Ti (κράμα Alnico). Παρουσιάζουν μεγάλο βρόγχο υστέρησης και παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως μόνιμοι μαγνήτες.

Στον πίνακα 1.16, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια παραδείγματα χαλύβων ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

Πίνακας 1.16: Παραδείγματα χαλύβων Ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (Συμβολισμός DIN και Ιδιότητες) [7]

Αριθμός Υλικού	Σύμβολο κατά DIN	Αντοχή σε MPa	Σκληρότητα Brinell HB	Περιεκτικότητα σε C (%)
1.0301	C 10	490-640	131	0.07-0.13
1.5732	14 NiCr 10	830-1080	205	0.10-0.17
1.5919	15 CrNi 6	780-1060	217	0.12-0.17

6) Χάλυβες Μαρτενγήρανσης ή Maraging Χάλυβες

Οι ισχυρά κραματωμένοι αυτοί χάλυβες υψηλής αντοχής, περιέχουν πολύ μικρά ποσοστά άνθρακα (έως 0,03%), υψηλό ποσοστό νικελίου (17-25%) και σε μικρότερες ποσότητες Ti, Al, Co και Mo. Ονομάζονται **χάλυβες μαρτενγήρανσης**, διότι εντός της μαρτενσιτικής δομής κατακρημνίζονται, λόγω γήρανσης, μεσομεταλλικές ενώσεις: Ni₃Ti, Fe₂Mo και Ni₃Mo. Ο άνθρακας διατηρείται σε χαμηλά ποσοστά, διότι η παρουσία υψηλών περιεκτικοτήτων νικελίου θα οδηγούσε στο σχηματισμό γραφίτη και, κατά συνέπεια, σε μείωση της αντοχής και της σκληρότητας του χάλυβα. Στον Πίνακα 1.17 παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις των σημαντικότερων αντιπροσώπων αυτής της κατηγορίας χαλύβων. Οι κωδικές ονομασίες των χαλύβων αυτών, πολλαπλασιασμένες επί 1000, δίδουν την αντοχή τους σε lb/in². Η τυπική θερμική κατεργασία των χαλύβων αυτών περιλαμβάνει:

Θέρμανση στους 830°C και απόψυξη στον αέρα, οπότε ο χάλυβας αποκτά δομή όλκιμου μαρτενσίτη, που έχει αντοχή σε εφελκυσμό 700MPa και σκληρότητα 300HV. Ακολουθεί η μηχανουργική κατεργασία του χάλυβα.

Με αναθέρμανση στους 500°C, για δύο έως τρεις ώρες, κατακρημνίζονται οι μεσομεταλλικές φάσεις που προκαλούν τη σκλήρυνση του ήδη κατεργασμένου χάλυβα. Μετά από αυτό το στάδιο, η μέση αντοχή σε εφελκυσμό και σκληρότητα είναι, αντίστοιχα, 2000MPa και 550 HV.

Στον πίνακα 1.7, παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις των κυριότερων χαλύβων μαρτενγήρανσης

Πίνακας 1.17: Χημικές συστάσεις (%κ.β.) αντιπροσωπευτικών χαλύβων μαρτενγήρανσης. (πηγή: Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.532)

Χάλυβας	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Max. C
200	18	8	3,2	0,1	0,2	0,03
250	18	8	5,0	0,1	0,4	0,03
300	18	9	5,0	0,1	0,6	0,03
350	18	12	4,0	0,1	1,8	0,01

7) Διφασικοί Φερριτομαρτενσιτικοί ή Dual-Phase Χάλυβες

Οι **φερριτομαρτενσιτικοί χάλυβες** περιέχουν χαμηλά ποσοστά άνθρακα (0,08-0,15%) και 1-1,5% Mn. Η μικροδομή τους αποτελείται από κόκκους φερρίτη, στα όρια των οποίων υπάρχουν μικρές περιοχές μαρτενσίτη, σε ποσοστό από 10 έως 20%. Η δομή αυτή λαμβάνεται με θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία μεταξύ των σημείων A_1 και A_3 . Με τη θέρμανση αυτή, ο φερρίτης παραμένει αμετάβλητος, ενώ ο περλίτης μετασχηματίζεται σε πλούσιο σε άνθρακα ωστενίτη, ο οποίος μετά τη βαφή που ακολουθεί μετατρέπεται σε μαρτενσίτη.

Η τιμή του ορίου διαρροής των χάλυβων αυτών παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (300-350 MPa), ενώ η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, μετά από πλαστική παραμόρφωση, φτάνει τα 650-700 MPa. Η επιμήκυνση θραύσης παραμένει υψηλή (25-30%), γεγονός που τους προσδίδει καλή κατεργασιμότητα εν ψυχρώ.

1.3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ένα μεγάλο ποσοστό της παραγωγής χάλυβων αποτελεί η κατηγορία των χάλυβων κατασκευών λόγω της ευρείας χρήσης του μικρού κόστους, των εξαιρετικών ιδιοτήτων που έχουν και άλλων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω.

Πιο συγκεκριμένα, οι χάλυβες κατασκευών διακρίνονται σε:

- Χάλυβες Μηχανολογικών Κατασκευών (Construction Steel)
- Χάλυβες Δομικών Κατασκευών (Structural Steel)

1.3.1 Χάλυβες μηχανολογικών κατασκευών

Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας των χάλυβων είναι:

- Ευρεία χρήση στη βιομηχανία
- Λαμβάνονται εύκολα σαν πρώτη ύλη
- Μικρό κόστος παραγωγής
- Πολύ καλές μηχανολογικές-τεχνολογικές ιδιότητες
- Εύκολη επεξεργασία με όλα τα είδη κατεργασίας
- Άμεση ανακύκλωση μετά την χρήση τους.

1.3.2 Ταξινόμηση χάλυβων μηχανολογικών κατασκευών κατά προέλευση

Διακρίνονται σε:

- Χάλυβες Χύτευσης
- Χάλυβες Μορφοποίησης

1.3.3 Ταξινόμηση χάλυβων μηχανολογικών κατασκευών κατά τη ποιότητα

Διακρίνονται σε:

- Χάλυβες Γενικής Χρήσης: Είναι απλοί χάλυβες με μικρό κόστος παραγωγής, συνήθως ανθρακούχοι, παρουσιάζουν μεγάλη μαζικότητα παραγωγής. Χρησιμοποιούνται σε μέρη πρέσας ως στοιχεία μηχανών λόγω ανάγκης συναρμολόγησης, στα σημεία όπου απαιτούνται υψηλή αντοχή, υπόκεινται σε επιβελτιώση (βαφή και επαναφορά), ενώ εκεί όπου οι ανάγκες της κατασκευής περιλαμβάνουν αντοχή σε τριβή και καλή δυσθραυστότητα τότε γίνεται κάποιο είδος θερμοχημικής επιφανειακής κατεργασίας, με σκοπό να διατηρηθεί η καρδιά σχετικά μαλακή (αντοχή σε κόπωση) και η επιφάνεια να έχει την απαιτούμενη αντοχή σε τριβή. Με αυτό επιτυγχάνονται ποιοτικοί χάλυβες για την εκάστοτε κατασκευή με σχετικά χαμηλό κόστος.
- Ποιοτικοί Χάλυβες: Μπορεί να είναι ανθρακούχοι ή κραματωμένοι, χρησιμοποιούνται μετά από βαφή και επαναφορά (βελτιωμένοι) ή μετά από επιφανειακές θερμοχημικές κατεργασίες όπως π.χ. ενανθράκωση. Η χημική τους σύσταση είναι τέτοια που εγγυάται καλές μηχανικές ιδιότητες(αντοχή).
- Χάλυβες Εξαιρετικής Ποιότητας: Είναι είτε ανθρακούχοι είτε κραματωμένοι, διασφαλίζεται μέσω πιστοποιήσεων η «καθαρότητα» της χημικής σύστασης και συγκεκριμένα οι εξαιρετικά αυστηρές προδιαγραφές στη περιεκτικότητα θείου και φωσφόρου (ακαθαρσίες), στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στις συνθήκες της μικροδομής (Ανόπτηση, Επαναφορά, κλπ.).

1.3.4 Ταξινόμηση χαλύβων μηχανολογικών κατασκευών κατά τη χρήση

Διακρίνονται σε:

1) Χάλυβες Κατασκευών CK45-CK60

Σε αυτή την κατηγορία χαλύβων κατασκευών ανήκουν οι CK45 και CK60 [8], ο CK45 (W Nr 1.1191) με χημική σύσταση που αποτελείται από άνθρακα 0.42-0.45% , πυρίτιο ≤ 0.40 , Μαγγάνιο 0.50-0.80 και ποσοστά φωσφόρου, θείου, χρωμίου, μολυβδαινίου και νικελίου, χρησιμοποιείται για μέρη μηχανών κινητήρων με μικρή και μέση καταπόνηση (στροφαλοφόρους άξονες, άξονες μεταδόσεως κινήσεως, οδοντωτοί τροχοί, ζάντες, τεμάχια υφιστάμενα θερμικές κατεργασίας). Εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα δύναται να συγκολληθεί με ευκολία.

Όσον αφορά τον CK60 (W Nr 1.1221), η χημική του σύσταση αποτελείται από άνθρακα 0.57-0.65%, πυρίτιο $\leq 0.40\%$, μαγγάνιο 0.40-0.90%, τη χημική του σύσταση συμπληρώνουν μικρά ποσοστά φωσφόρου, θείου, χρωμίου, μολυβδαινίου και νικελίου. Ο συγκεκριμένος χάλυβας χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μικρά διασταυρούμενα τμήματα που απαιτούν ελαστικότητα όπως μέρη μηχανών κινητήρων, συσκευών με μικρή και μέση καταπόνηση. Κατάλληλος για χύτευση εξαιτίας της μικρής περιεκτικότητας του σε άνθρακα. Η εικόνα 1.11 απεικονίζει μερικές χαρακτηριστικές εφαρμογές των χαλύβων Ck45-Ck60.



Εικόνα 1.11: Εφαρμογές Χαλύβων Ck45-Ck60

2) Χάλυβες Κατασκευών ST52

Ο συγκεκριμένος χάλυβας, DIN ST52 με W.Nr 1.0580 διακρίνεται για την ελαστικότητα του, εξαιτίας της χημικής του σύστασης που αποτελείται από μικρό ποσοστό σε άνθρακα έως 0.22%, πυρίτιο έως και 0.55%, υψηλό ποσοστό σε μαγγάνιο έως και 1.60% καθώς και μικρά ποσοστά φωσφόρου και θείου.

Όσον αφορά τα πεδία εφαρμογής του, αυτά περιλαμβάνουν μηχανικά μέρη με διασταυρούμενα τμήματα που απαιτούν ελαστικότητα όπως τμήματα μηχανών στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.λ.π.

3) Χάλυβες Επιφανειακής Σκλήρυνσης (Επιφανειακής Βαφής)

Σε αυτή τη κατηγορία ανήκει και ο χάλυβας της παρούσας πτυχιακής 15CrNi6, γενικότερα χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα $< 0,25\%$, προορίζονται για θερμική κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης (επιφανειακή βαφή) με ενανθράκωση (εμπλουτισμός με άνθρακα) σε κορεσμένο περιβάλλον. Λόγω της περιεκτικότητας του σε νικέλιο είναι χάλυβας υψηλότερης αντοχής στις κρούσεις, κάμψεις και στρέψεις. Οι χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο είναι οι ενδεδειγμένοι για εφαρμογές υψηλής αντοχής.

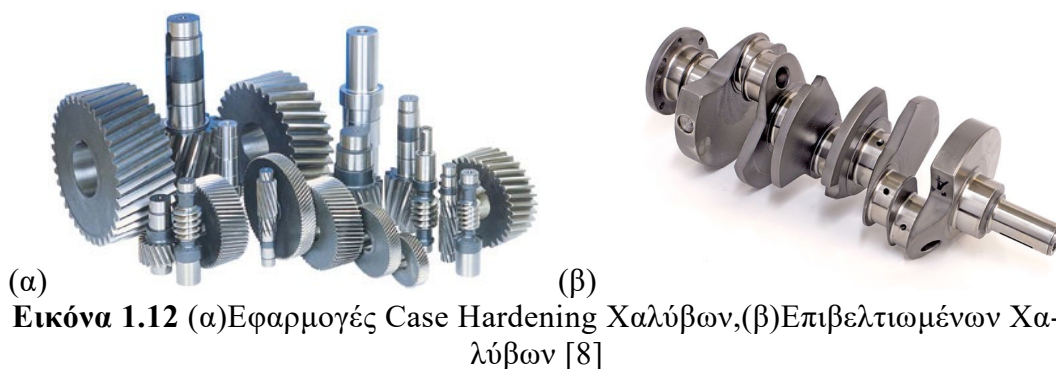
Άλλοι χάλυβες αυτής της κατηγορίας: C30 (1.0528), C45 (1.0503), 25CrMo4 (1.7218), 41Cr4 (1.7035), 42CrMo4 (1.7225), 39NiCrMo3 (1.6510), 34CrNiMo6 (1.6582), 36NiCrMo16 (1.6773), 51CrV4 (1.2241), 36CrNiMo4 (1.6511).

4) Χάλυβες Ολικής Σκλήρυνσης (Βελτιωμένοι Χάλυβες)

Εδώ ανήκουν χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα $C > 0,25\%$, προορίζονται για θερμική κατεργασία ολικής σκλήρυνσης (επιβελτίωσης). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο DIN 34CrNiMo6 (W.Nr 1.6582), με χημική σύσταση σε άνθρακα 0.30-0.38%, πυρίτιο έως και 0.40%, μαγγάνιο από 0.50 έως 0.80%, μικρά ποσοστά σε φώσφορο, θείο και μολυβδαίνιο ενώ μεγάλα ποσοστά σε χρώμιο (1.30-1.70%) και νικέλιο (1.30-1.70%). Λόγω της χημικής τους σύστασης και συγκεκριμένα το μεγάλο ποσοστό σε νικέλιο που προσδίδει αντοχή σε κρούσεις, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αντοχή σε εξαρτήματα μεγάλης επιφανείας για αεροναυπηγική, βιομηχανίες αυτοκινήτων, για άξονες προπελών, συνδέσμων, κιβωτίων ταχυτήτων αυτοκινήτων κ.λ.π.

Άλλοι Χάλυβες αυτής της κατηγορίας: C30 (1.0528), C45 (1.0503), 25CrMo4 (1.7218), 41Cr4 (1.7035), 42CrMo4 (1.7225), 39NiCrMo3 (1.6510), 36NiCrMo16 (1.677), 51CrV4 (1.2241), 36CrNiMo4 (1.6511)

Η εικόνα 1.12 απεικονίζει μερικές εφαρμογές των χαλύβων σκλήρυνσης.



Εικόνα 1.12 (α) Εφαρμογές Case Hardening Χαλύβων, (β) Επιβελτιωμένων Χαλύβων [8]

5) Χάλυβες Εναζώτωσης

Χάλυβες που περιέχουν συγκεκριμένα στοιχεία κραματοποίησης τα οποία με την απορρόφηση αζώτου βοηθούν στην δημιουργία χαλυβοκράμματος κατάλληλου για επιφανειακή σκλήρυνση (επιφανειακή βαφή).

Χάλυβες Εναζώτωσης: 31CrMoV9 (1.8519) και 34/41CrMoA17.

6) Κεκραμμένοι Χάλυβες

Χάλυβες (χαλυβοκράματα) με υψηλή περιεκτικότητα σε μαγγάνιο και βανάδιο και χαμηλή περιεκτικότητα στο κυρίως στοιχείο ή στα λοιπά στοιχεία κραματοποίησης, με πολύ μεγάλη αντοχή στην τριβή που οφείλεται ουσιαστικά στην καθίζηση των ενώσεων των στοιχείων της κραματοποίησης κατά την διάρκεια της ελεγχόμενης ψύξης του μετά την θερμή έλαση.

Χάλυβες αυτής της κατηγορίας: 38MnSiVS6 και 46MnVS6.

7) Χάλυβες Υψηλών Πιέσεων

Οι εν λόγω χάλυβες δεν είναι κραματοποιημένοι (δεν είναι χαλυβοκράματα) ή είναι ελαφρώς κραματοποιημένοι με χρώμιο και μολυβδαίνιο. Οι μηχανικές τους ιδιότητες προσδιορίζονται σαφέστατα από τα πρότυπα και χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή ατμολεβήτων, δοχείων (λέβητες) υψηλής πίεσης, μεγάλες σωληνώσεις και σχετικών δομικών στοιχείων. Οι μη κραματοποιημένοι χάλυβες αυτής της ομάδας χαρακτηρίζονται με το γράμμα P σαν πρώτο γράμμα του τύπου (μάρκας) που χαρακτηρίζει την ποιότητα τους, σαν προσδιορισμός της χρήσης τους (πίεση / pressure).

Χάλυβες αυτής της κατηγορίας: P235GH – P250GH (C22.8) – P295GH – 16Mo3

Η εικόνα 1.13 απεικονίζει μία χαρακτηριστική εφαρμογή των χαλύβων υψηλών πιέσεων.



Εικόνα 1.13: Εφαρμογές Χαλύβων Υψηλών Πιέσεων [8]

8) Χάλυβες για Ρουλεμάν

Χρωμιούχοι χάλυβες που λόγω της μεγάλης σκληρότητας που αποκτούν μετά την βαφή τους και μαζί με την καλή ανθεκτικότητα (αντοχή) που παρουσιάζουν στην φθορά από την τριβή και την θλίψη, χρησιμοποιούνται γενικώς για την κατασκευή σφαιρών, κυλίνδρων και δακτυλίων για τους τριβείς (ρουλεμάν). Συνήθως παραδίδονται ανοπτημένοι (Spheroidal Annealed).

Χάλυβες αυτής της κατηγορίας: 100Cr6 – 100CrMo7 – 100CrMn4

9) Αντιτριβικοί Χάλυβες

Χάλυβες κραματοποιημένοι με βόριο ή μαγγάνιο, έχουν πολύ μεγάλη αντοχή στην φθορά από τριβή (αντιτριβικοί) και συνήθως χρησιμοποιούνται στον αγροτικό τομέα (τσάπες, φτυάρια, εξαρτήματα εκσκαφέων, χωματουργικών μηχανημάτων).

Χάλυβες αυτής της κατηγορίας: 20/30MnB5 – 27/33MnCrB5 – C70 – X120Mn12

Η εικόνα 1.14 απεικονίζει χαρακτηριστικές εφαρμογές των αντιτριβικών χαλύβων.

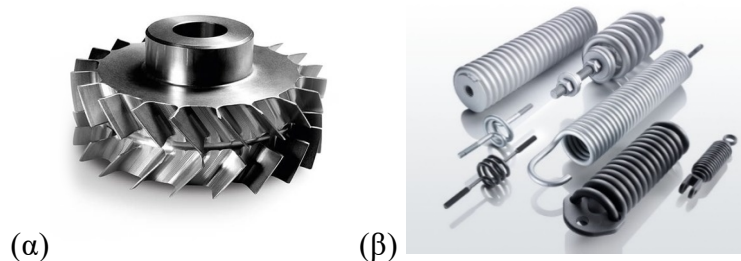


Εικόνα 1.14: Εφαρμογές χαλύβων α) για ρουλεμάν β) Αντίστασης σε τριβή [8]

10) Χάλυβες Ελατηρίων

Οι εν λόγω χάλυβες έχουν πολύ υψηλό όριο διαρροής (κοντά στο όριο θραύσης) και λόγω αυτού επανέρχονται γρήγορα στην κανονική τους μορφή εάν μετά από καταπόνηση σε λυγισμό ή στρέψη. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή σπειροειδών ελατηρίων, ράβδους επαναφοράς, ελαστικές λαβίδες. Συνήθως παραδίδονται ανοπτημένοι.

Η εικόνα 1.15 απεικονίζει χαρακτηριστικές εφαρμογές των χαλύβων για κατασκευή ελατηρίων.



Εικόνα 1.15: Εφαρμογές (α) Εναζωτωμένων Χαλύβων, (β) Ελατηρίων [8]

11) Χάλυβες μεγάλης αντοχής σε ερπυσμό

Πρόκειται για χάλυβες που χρησιμοποιούνται σε χρήσεις (κατασκευές) όπου εμφανίζεται ερπυσμός (ξεχειλίωμα του χάλυβα). Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε διαρκή πλαστική

παραμόρφωση (και ως εκ τούτου μόνιμη) όταν ο χάλυβας υπόκειται σε συνδυασμένη δράση συνθηκών θερμοκρασίας και τάσης.

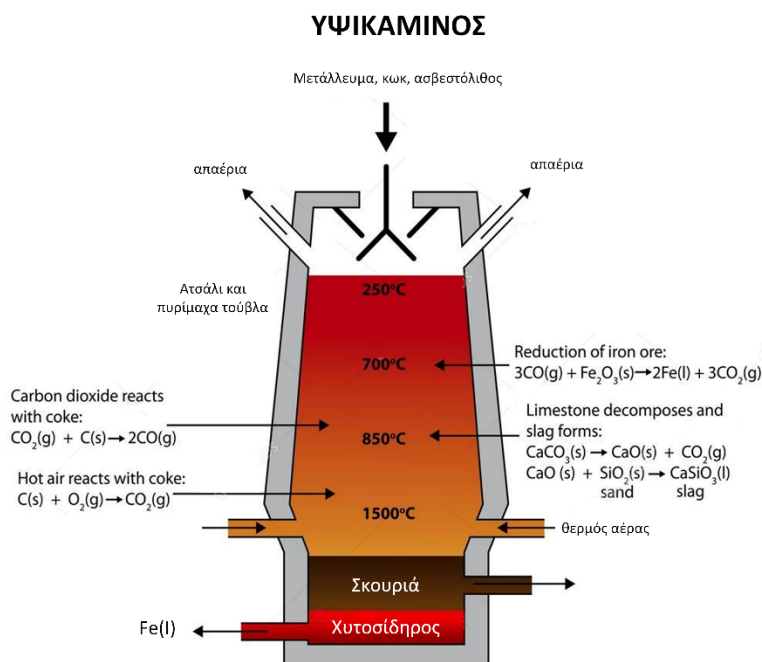
Άλλοι χάλυβες αυτής της κατηγορίας: X11CrMo5 (μέχρι και 600°C), X11CrMo9 (μέχρι και 600°C), 10CrMo5.5 (μέχρι και 650°C), 12CrMo9.10 (μέχρι και 630°C), X10CrMoVNb9.1 (μέχρι και 525°C), AISI 4140 (μέχρι και 450°C), 40CrMoV4.6 (μέχρι και 510°C), 21CrMoV5.7 (μέχρι και 540°C).

2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ

Οι απαιτήσεις κάθε χάλυβα διαφοροποιούν τα ποσοστά του άνθρακα και των υπόλοιπων μη σιδηρούχων στοιχείων [9]. Για αυτό το λόγο, η παραγωγή του χάλυβα βασίζεται στο τρόπο καθαρισμού του ακάθαρτου χυτοσιδήρου (μετάλλευμα, κωκ και ασβεστόλιθος) σε ένα υψικάμινο. Όλες οι μέθοδοι καθαρισμού εφαρμόζουν την οξείδωση των ανεπιθύμητων στοιχείων με εμφύσηση οξυγόνου υψηλής καθαρότητας. Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν ο δολομίτης και ο ασβεστόλιθος. Αυτά αρχικά αντιδρούν με το SiO_2 το οποίο κατά την οξείδωση του διαχωρίζεται από το μέταλλο. Ως αποτέλεσμα σχηματίζει μία «βασική» σκουριά σε ρευστή κατάσταση. Επίσης, και οι ανεπιθύμητες ακαθαρσίες όπως το θείο και ο φώσφορος από το τηγμένο μέταλλο κατακάθονται στη σκουριά.

Στην εικόνα 2.1, παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας υψικαμίνου.



Εικόνα 2.1: Λειτουργία Υψικαμίνου (Παρασκευής Χυτοσιδήρου) [9]

Οι πιο γνωστές μέθοδοι καθαρισμού είναι:

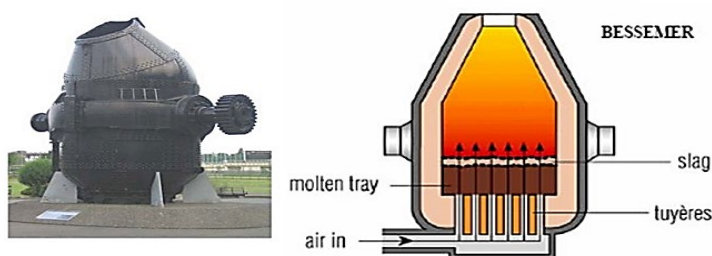
- Μέθοδος Bessemer, 1856
- Μέθοδος Siemens-Martin, 1857 (ανοικτής εστίας)
- Μέθοδος οξυγόνο
- Μέθοδος του ηλεκτρικού φούρνου

2.1.1 Μέθοδος Bessemer

Η μέθοδος Bessemer βασίζεται αρχή λειτουργίας του «καθαρισμού» ενός τήγματος ακάθαρτου χυτοσιδήρου έπειτα από εμφύσηση ενός ρεύματος αέρα εντός της μάζας του. Εν συνεχεία, ο καθαρός πλέον σίδηρος γίνεται χάλυβας με την κατάλληλη προσθήκη άνθρακα και διαφόρων στοιχείων προσθήκης. Το θείο, ο φώσφορος, το μαγγάνιο, το πυρίτιο και ο άνθρακας αποτελούν τις κύριες ακαθαρσίες του χυτοσιδήρου, οι οποίες δύναται να απομακρυνθούν εν μέσω καύσης ή να σχηματίσουν σκουριά που «επιπλέει» στην επιφάνεια του τήγματος.

Η μέθοδος Bessemer είχε σημαντικά ελαττώματα: δεν μπορούσε να αφαιρεθεί το θείο και το φώσφορο, ενώ ο παραγόμενος χάλυβας περιείχε μεγάλο ποσοστό αζώτου (λόγω της παροχής αέρα) που τον έκανε εύθραυστο.

Στην εικόνα 2.2, παρουσιάζεται φωτογραφία ενός κλιβάνου Bessemer και η σχηματική αναπαράστασή του.



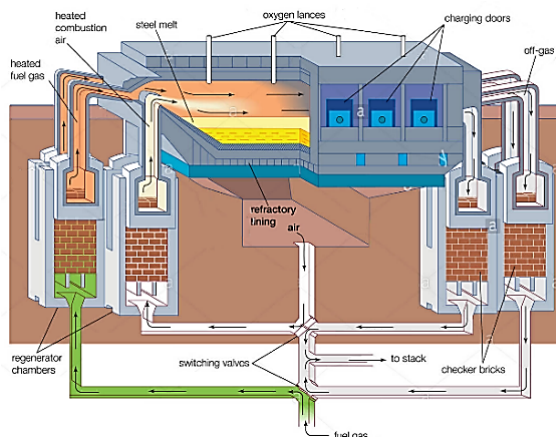
Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση κλιβάνου Bessemer [9]

2.1.2 Μέθοδος Siemens-Martin

Μεταγενέστερη της Bessemer είναι η μέθοδος Siemens-Martin, σύμφωνα με την οποία ο χάλυβας είναι προϊόν χυτοσιδήρου. Αυτός θερμαίνεται με μαζούτ ή φυσικό αέριο και εν συνεχεία προστίθεται σιδηρομέταλλευμα (πλούσιο σε άνθρακα) για να εξασφαλισθεί στο τελικό προϊόν ο άνθρακας που απαιτείται. Επιπλέον, στον φούρνο τοποθετούνται συλλιπάσματα τέτοια ώστε να απομακρυνθούν οι ανεπιθύμητες ακαθαρσίες. Το αποτέλεσμα είναι η αφαίρεση του άνθρακα και ο σχηματισμός σκουριάς η οποία απορρίπτεται από κατάλληλη έξοδο του φούρνου.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν η ευελιξία στην αναλογία παλιοσίδηρου-μετάλλου και στην ποιότητα του χυτοσιδήρου και του παλιοσίδηρου (scrap). Αντιθέτως, μερικά από τα μειονεκτήματα είναι η πολύ χαμηλή παραγωγικότητα (κατεργασία χυτηρίου 300 τόνων σε 5 h). Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, εξαιτίας της αισθητής θερμότητας μεγάλου όγκου απαερίων που περιέχουν N₂. Υψηλό κόστος αντιμετώπισης περιβαλλοντικών προβλημάτων, εξαιτίας του μεγάλου όγκου απαερίων.

Στην εικόνα 2.3, παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου Siemens-Martin.

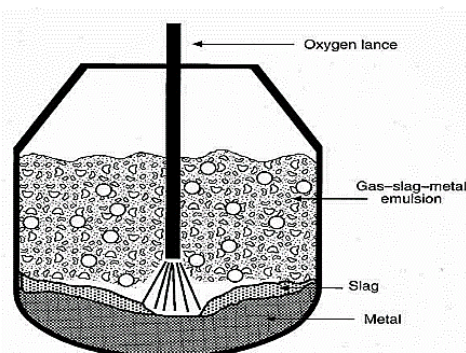


Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου Siemens-Martin [9]

2.1.3 Μέθοδος Εμφύσησης Οξυγόνου - Basic Oxygen Furnace Refining (BOF)

Αποτελεί την επικρατέστερη μέχρι και σήμερα, μέθοδο. Η μέθοδος εμφύσησης οξυγόνου σε βασικό κλίβανο χρησιμοποιεί τις ίδιες αρχές με τον κλίβανο Bessemer με την διαφορά ότι γίνεται παροχή βιομηχανικού οξυγόνου υψηλής καθαρότητας έναντι του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του «βαθμού απόδοσης» καύσης των ακαθαρσιών και κατά συνέπεια την εν δυνάμει προσθήκη scrap σιδήρου εκτός του χυτοσιδήρου της υψικαμίνου.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου περιλαμβάνει την τροφοδοσία του κλιβάνου, μέσω ενός ακροφυσίου με βιομηχανικό οξυγόνο καθαρότητας 99.5% με υπερηχητική ταχύτητα μέσα στο τήγμα. Κατά αυτό το τρόπο, επιτυγχάνεται η οξειδωση και η απομάκρυνση των ακαθαρσιών μέσα από το τηγμένο μέταλλο με μορφή σκουριάς. Το τήγμα παραμένει υγρή και λιώνει το scrap που προστέθηκε καθώς όλες οι αντιδράσεις είναι εξώθερμες και συντελούν στην θερμότητα που απαιτείται. Το 25% του φορτίου εμφύσησης δύναται να αποτελείται από scrap, εκτοξεύοντας την οικονομική απόδοση της μεθόδου. Επίσης, τα πυρίμαχα που χρησιμοποιούνται σαν επένδυση (συνήθως περιέχουν MgO) αντιδρούν συνέχεια με το τήγμα και την σκουριά και μέσω της φθοράς τους βοηθούν στην απομάκρυνση του θείου και του φωσφόρου μέσω αντιδράσεων. Στην εικόνα 2.4, παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του κλιβάνου B.O.F.

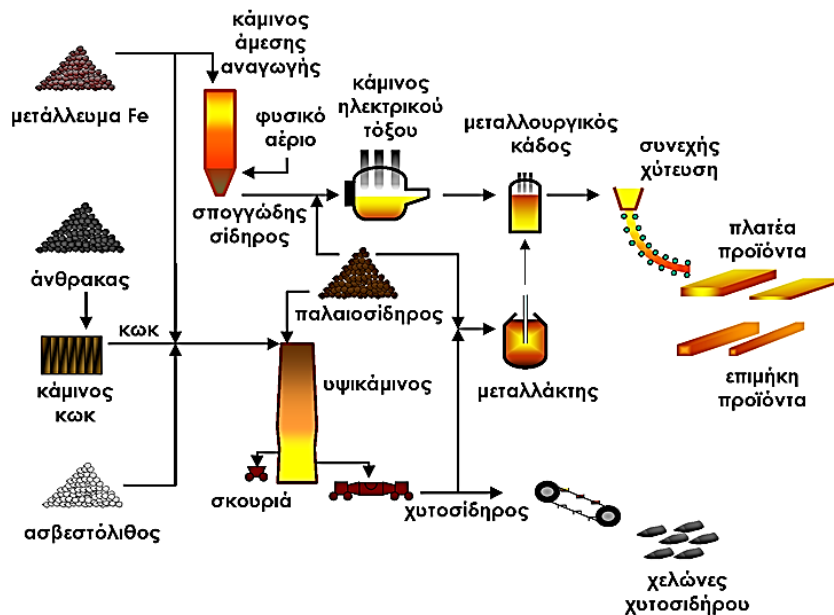


Εικόνα 2.4: Κλίβανος B.O.F.

2.1.4 Μέθοδος ηλεκτρικού φούρνου

Είναι το συνηθέστερο (33% της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα) τρόπο «καθαρισμού» του σιδήρου, γιατί επιτρέπει τη παρασκευή χάλυβα μόνο από scrap, αρά πιο αποτελεσματικό ενεργειακά εν αντιθέσει με τους χάλυβες που παράγονται από σιδηρομετάλλευμα. Μέσα στο φούρνο τοποθετείται ένα ζυγισμένο φορτίο παλιοσίδερών και σε μερικές περιπτώσεις μαζί με μια ποσότητα χυτοσιδήρου. Προκαλείται έναυση ηλεκτρικού τόξου με τη βοήθεια ηλεκτροδίων. Το ηλεκτρικό τόξο παράγει μεγάλη θερμότητα και προκαλεί την ταχύτατη τήξη του φορτίου. Οι μονάδες παραγωγής χάλυβα που στηρίζονται σε κλίβανους ηλεκτρικού τόξου έχουν πολύ μεγαλύτερη ευελιξία και μπορούν να λειτουργούν κατά βούληση ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς, σε αντίθεση με μία υψικάμινο η οποία πρέπει να έχει συνεχόμενη ροή πρώτων υλών και πρέπει να δουλεύει συνεχόμενα για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

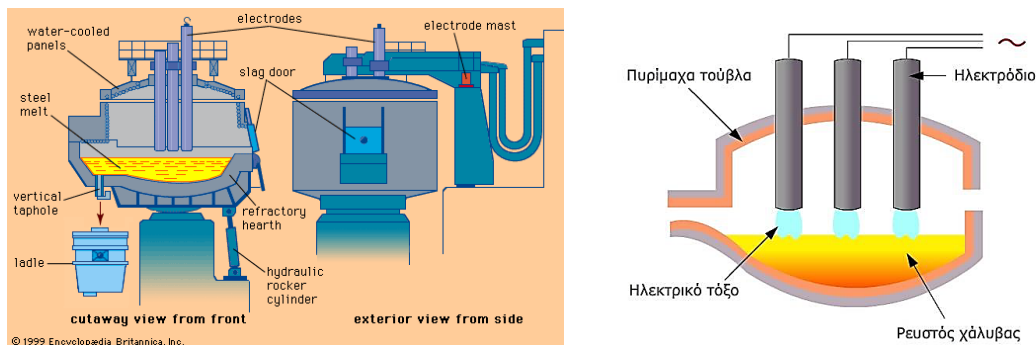
Στην εικόνα 2.5, παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα.



Εικόνα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα [10]

2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

Ο όρος «μορφοποίηση» αναφέρεται γενικά σε πρόσδοση μορφής, [12]. Ενώ όταν αυτή γίνεται με πλαστική παραμόρφωση ονομάζεται «Διαμόρφωση». Πιο συχνά, αναφέρεται με το όρο «Πλαστική Διαμόρφωση». Στην εικόνα 2.5, παρουσιάζεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του κλιβάνου με ηλεκτρικό τόξο.



Εικόνα 2.6: Κλίβανος Ηλεκτρικού τόξου [9]

Οι βασικές μέθοδοι μορφοποίησης μετάλλων είναι οι εξής:

- Χύτευση
- Διαμόρφωση με αφαίρεση υλικού ή μηχανουργική κατεργασία
- Διαμόρφωση με Πλαστική Παραμόρφωση
- Κοννιομεταλλουργία

Η χύτευση στηρίζεται στο χαμηλό σημείο τήξεως ορισμένων μετάλλων και στην ευχυτότητα δηλαδή την ιδιότητα που έχουν ορισμένα ρευστά μέταλλα να γεμίζουν με ακρίβεια όλες τις κοιλότητες ενός καλουπιού. Η χύτευση δεν εξασφαλίζει συχνά το επιθυμητό τελείωμα ενός αντικειμένου και απαιτεί πρόσθετη μηχανουργική επεξεργασία.

2.2.1 Χύτευση χαλύβων

Χύτευση ονομάζεται η έκχυση τηγμένου μετάλλου σε καλούπια-τύπους κατάλληλου σχήματος. Αποτελεί μέχρι και σήμερα μία από τις σημαντικότερες μεθόδους κατασκευής μεταλλικών αντικειμένων. Η διαδικασία της χύτευσης απαιτεί την κατασκευή του καλουπιού, την τήξη του μετάλλου και την έκχυση του σε αυτό. Η χύτευση στηρίζεται κατά κύριο λόγο σε δύο σημαντικές ιδιότητες των μετάλλων:

- Χαμηλό σημείο τήξης
- Ευχυτότητα: ικανότητα των τηγμένων-ρευστών λόγω των ιξώδους τους να γεμίζουν σωστά με ακρίβεια δύσκολες κοιλότητες ενός καλουπιού.

Ωστόσο, πολλές φορές μετά την χύτευση το αποτέλεσμα δεν είναι το επιθυμητό και απαιτείται κάποιο στάδιο μηχανουργικής κατεργασίας ώστε να πάρει το προϊόν, την απαιτούμενη τελική μορφή.

2.2.2 Διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση

Αποτελεί τον πιο εκτεταμένο κλάδο της μορφοποίησης μετάλλων, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μέταλλα έχουν σημαντικό περιθώριο πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση τους. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας προκαλούν πλαστική παραμόρφωση χωρίς το κίνδυνο θραύσης. Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων:

- Εν θερμώ πλαστική παραμόρφωση
- Εν ψυχρώ πλαστική παραμόρφωση

Χαρακτηρίζονται ανάλογα με την θερμοκρασία κατεργασίας, μεγαλύτερη ή όχι από την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του μετάλλου. Για τα περισσότερα μέταλλα, η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης βρίσκεται περίπου στο 40% της θερμοκρασίας τήξης. Οι δύο περιπτώσεις κατεργασιών διαμόρφωσης παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

1) Εν θερμώ πλαστικές διαμορφώσεις

Πλεονεκτήματα

Το υλικό προς διαμόρφωση έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη αυτή της ανακρυστάλλωσης του και η σκλήρυνση δεν επέρχεται λόγω της επίδρασης του φορτίου παραμόρφωσης.

- Καλύτερη πλαστικότητα λόγω χαμηλότερου ορίου διαρροής σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Όσον αυξάνεται η θερμοκρασία, μειώνεται η αντοχή σε διάτμηση και για την ίδια παραμόρφωση απαιτείται λιγότερη δύναμη από ότι στην εν ψυχρώ κατεργασία.

Μειονεκτήματα

- Η ευθραυστότητα σε υψηλές θερμοκρασίες σε μερικά υλικά εμποδίζει την εν θερμώ παραμόρφωση.
- Λόγω της διαστολής δυσκολεύει την επίτευξη ακρίβειας των διαστάσεων. Ο έλεγχος του κομματιού που παραμορφώνεται είναι δύσκολος.
- Η συγκράτηση του τεμαχίου σε υψηλές θερμοκρασίες είναι δύσκολη.

2) Εν ψυχρώ πλαστικές διαμορφώσεις

Πλεονεκτήματα

- Η εν ψυχρώ παραμόρφωση αυξάνει την αντοχή και την επιφανειακή σκληρότητα του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Αφού δεν υπάρχουν υψηλές θερμοκρασίες, δεν παρουσιάζονται οξειδία στην επιφάνεια του τεμαχίου, με αποτέλεσμα η ποιότητα της επιφάνειάς του να είναι καλύτερη.
- Επίτευξη καλύτερης ακρίβειας στις διαστάσεις του τελικού προϊόντος.
- Είναι εύκολος ο χειρισμός και η συγκράτηση των τεμαχίων.

Μειονεκτήματα

- Η «χαμηλή» θερμοκρασία διαμόρφωσης συνεπάγεται υψηλό όριο διαρροής άρα και περισσότερο φορτίο με στόχο την παραμόρφωση του προϊόντος.
- Το υλικό με την εν ψυχρώ παραμόρφωση ενδοτραχύνεται, δηλαδή αντιστέκεται στην περαιτέρω παραμόρφωσή του. Περισσότερη παραμόρφωση μπορεί να γίνει, αφού προηγηθεί ανόπτηση και με αυτό τον τρόπο μείωση του ορίου διαρροής.
- Διάφορα εύθραυστα υλικά δε μπορούν να διαμορφωθούν εν ψυχρώ.

Στην εικόνα 2.7, παρουσιάζεται το δέντρο ταξινόμησης των κατεργασιών διαμόρφωσης.



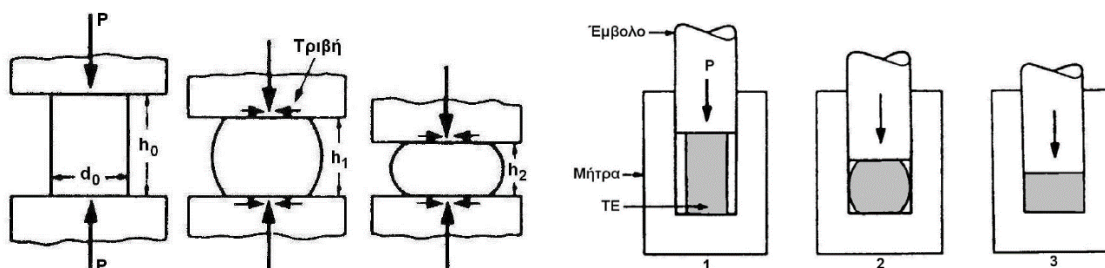
Εικόνα 2.7: Ταξινόμηση κατεργασιών πλαστικής παραμόρφωσης [13]

3) Σφυρηλάτηση (Forging)

Η πλαστική παραμόρφωση του τελικού προϊόντος επιτυγχάνεται με άσκηση θλιπτικών φορτίων, [12]. Τυπικά σφυρηλάτα προϊόντα: εκκεντροφόροι άξονες, διωστήρες, χειροτροχοί, οδοντωτοί τροχοί, ήλοι, εργαλεία χειρός, πτερύγια ελίκων κλπ.

Η δυνατότητα του υλικού σε σφυρηλάτηση (Forgeability) εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να παραμορφώνεται πλαστικά σε ορισμένη θερμοκρασία και ταχύτητα παραμόρφωσης, χωρίς αστοχία.

Ταξινομείται σε δύο κατηγορίες: ανοικτής μήτρας και κλειστής μήτρας. Στην εικόνα 2.8, απεικονίζονται τα δύο είδη σφυρηλάτησης, ανοικτής και κλειστής μήτρας.



Εικόνα 2.8: Σφυρηλάτηση (α) Ανοικτής Μήτρας (β) Κλειστής Μήτρας [12]

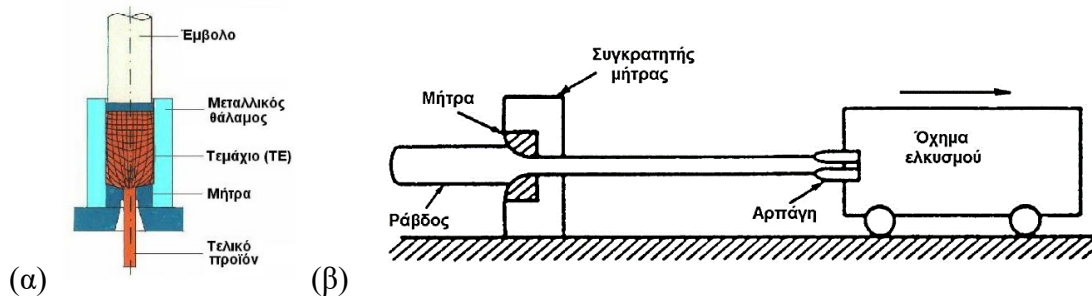
4) Διέλαση (Extrusion)

Κατά τη διέλαση (extrusion) το μέταλλο συμπιέζεται μέσω ενός εμβόλου, σε ένα μεταλλικό θάλαμο. Στο άλλο άκρο του θαλάμου ευρίσκεται κατάλληλα διαμορφωμένη μήτρα. Το μέταλλο αναγκάζεται να εξέλθει από το άνοιγμα της μήτρας αποδίδοντας προϊόν με μικρότερη και συνήθως σύνθετη διατομή και μεγαλύτερο μήκος.

5) Όλκη (Drawing)

Κατά την ολκή (drawing), το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου, σύρματος ή σωλήνα υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από μεταλλική μήτρα υπό την επενέργεια εφελκυστικού φορτίου στην έξοδο της μήτρας. Αποτέλεσμα των κατεργασιών ολκής είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Στην εικόνα

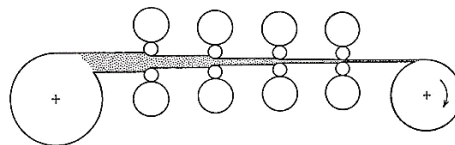
2.9(α), παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της διέλασης ενώ στην εικόνα 2.9(β) αυτή της όλκης.



Εικόνα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση α) Διέλασης β) Όλκης [12]

6) Έλαση (Rolling)

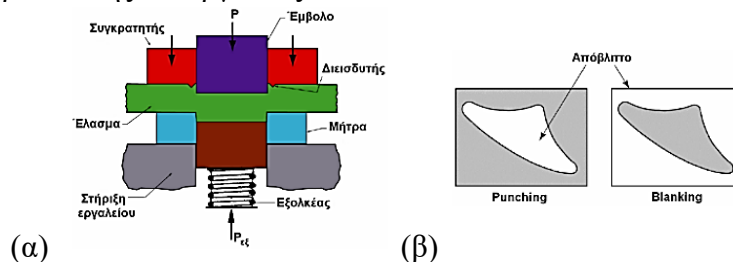
Κατά την έλαση (rolling), το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων ραούλων (Εικόνα 2.10). Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος. Στην εικόνα 2.10, απεικονίζεται η διάταξη έλασης σε σειρά.



Εικόνα 2.10: Διάταξη έλασης σε σειρά [12]

7) Απότμηση

Είναι ο αποχωρισμός τμήματος ελάσματος κατά μήκος μιας ανοικτής ή κλειστής γραμμής μέσω κατάλληλου εργαλείου. Το εργαλείο απότμησης αποτελείται από το έμβολο και τη μήτρα. Το τελικό προϊόν μπορεί να είναι είτε το αποχωριζόμενο τεμάχιο (απότμηση) είτε το απομένον έλασμα (στην πρώτη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως blanking, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ως punching). Ο μηχανισμός απότμησης περιλαμβάνει διατμητική καταπόνηση του υλικού του ελάσματος μέχρι τη θραύση του. Στην εικόνα 2.11(α), παρουσιάζεται ο μηχανισμός απότμησης ενώ στην εικόνα 2.11(β) γίνεται χαρακτηρισμός της απότμησης ανάλογα με το απόβλιττο της κατεργασίας.



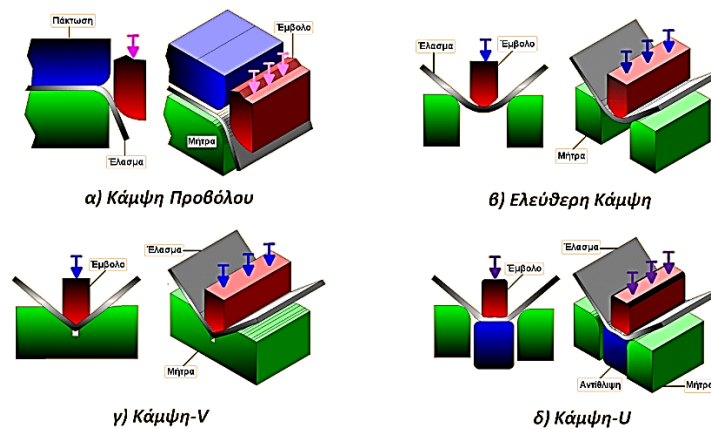
Εικόνα 2.11: α) Μηχανισμός απότμησης β) Χαρακτηρισμός της απότμησης ανάλογα με το απόβλιττο της κατεργασίας [12]

8) Κάμψη (Bending)

Κάμψη είναι η ομοιόμορφη μόνιμη παραμόρφωση υλικού υπό τη μορφή ελάσματος ή ταινίας, η οποία επιτυγχάνεται με περιστροφή τμήματος αυτού περί ευθύγραμμο άξονα που βρίσκεται στο ουδέτερο επίπεδο της διατομής του και είναι κάθετος σ' αυτή. Τα είδη κάμψης είναι:

- Προβόλου
- Ελεύθερη
- Κάμψη-V
- Κάμψη-U

Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζονται τα είδη της κάμψης ως μηχανισμός διαμόρφωσης προϊόντων .

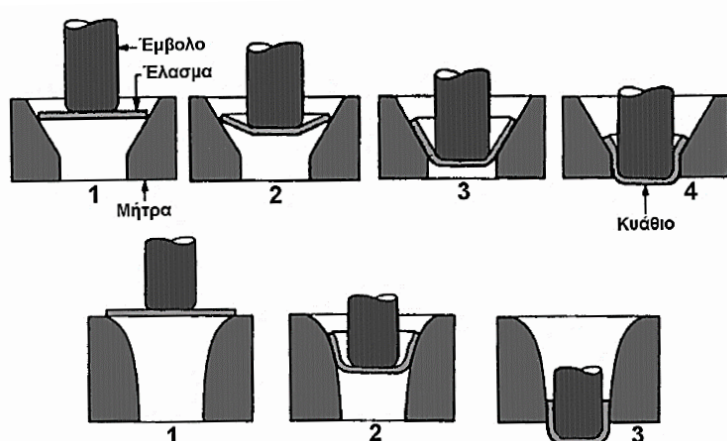


Εικόνα 2.12: Είδη Κάμψης [12]

9) Βαθεία Κοίλανση (Deep-Drawing)

Βαθεία κοίλανση είναι η διαμόρφωση επίπεδου ελάσματος σε κοίλο τεμάχιο (κυάθιο) με τη βοήθεια συστήματος εμβόλου/μήτρας, με ή χωρίς τη χρήση δακτυλίου συγκράτησης, η οποία μπορεί να λαμβάνει χώρα σε περισσότερες από μία φάσεις.

Στην εικόνα 2.13, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της βαθιάς κοίλανσης χωρίς συγκράτησης.



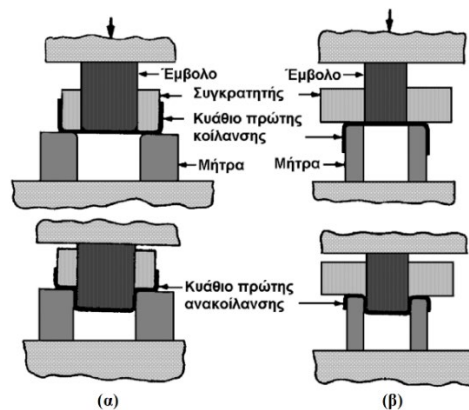
Εικόνα 2.13: Αρχή της βαθιάς κοίλανσης χωρίς συγκράτηση [12]

10) Ανακοίλωση (re-drawing)

Ονομάζεται καθεμιά από τις φάσεις κοίλωσης που ακολουθούν την πρώτη φάση (εικόνα 2.14). Διακρίνονται:

- Την άμεση ανακοίλωση, κατά την οποία η εξωτερική επιφάνεια του κυathίου της προηγούμενης φάσης παραμένει εξωτερική και του ανακοιλανθέντος κυathίου.
- Την ανάστροφη ανακοίλωση, κατά την οποία η εσωτερική επιφάνεια του κυathίου της προηγούμενης φάσης γίνεται εξωτερική του ανακοιλανθέντος κυathίου.

Στην εικόνα 2.14, παρουσιάζονται τα είδη ανακοίλωσης, 2.14(α) άμεσης ανακοίλωσης και 2.14(β) ανάστροφης ανακοίλωσης.



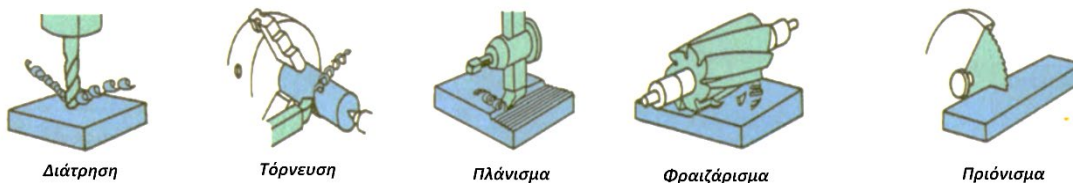
Εικόνα 2.14: Είδη ανακοίλωσης α) Άμεση β) Ανάστροφη [12]

2.2.3 Διαμόρφωση με αφαίρεση υλικού ή κοπής

Με τον όρο κατεργασίες με αφαίρεση υλικού ή κοπής, εννοούνται μία σειρά από τεχνολογίες που στοχεύουν στην αφαίρεση ανεπιθύμητου υλικού από το αρχικό προϊόν (Εικόνα 2.15). Η συγκεκριμένη σειρά κατεργασιών χρησιμοποιείται συνήθως προς μετατροπή ενός τεμαχίου που είναι χυτό, σφυρήλατο ή προερχόμενο από πρωτογενείς διαδικασίες διαμόρφωση που αναπτύσσονται στην παράγραφο 2.2.3. «Διαμόρφωση με πλαστική παραμόρφωση». Σε γενικές γραμμές, η διαμόρφωση μηχανουργικής κατεργασίας χρησιμοποιείται όταν οι απαιτήσεις του τελικού προϊόντος προϋποθέτουν μεγάλη ακρίβεια (Εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.15: Ταξινόμηση κατεργασιών κοπής βάσει της μορφής του εργαλείου.



Εικόνα 2.16: Οι βασικότερες κατεργασίες αφαίρεσης ή κοπής υλικού [13]

2.2.4 Κονιομεταλλουργία

Η κονιομεταλλουργία (powder metallurgy, PM) μαζί με τη χύτευση ανήκουν στις αρχέγονες ή πρωτογενείς κατεργασίες (primary forming processes). Πρώτη ύλη αυτής της μεθόδου αποτελεί η μεταλλική σκόνη η οποία αρχικά συμπιέζεται σε κατάλληλες μήτρες και στη συνέχεια θερμαίνεται χωρίς όμως να λιώσει, με σκοπό να αποκτήσει την τελική μορφή και τις επιθυμητές ιδιότητες.

Τα τελευταία χρόνια, συναγωνίζεται επάξια τις τεχνικές της χύτευσης και της σφυρηλάτησης για την παραγωγή αντικειμένων πολύπλοκης μορφής από κράματα υψηλής αντοχής και σκληρότητας. Το κύριο πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων διαφόρων μεγεθών πολύ κοντά στην τελική μορφή με μικρή ή σχεδόν καμιά κατεργασία αποπεράτωσης (near net-shape manufacturing), με προφανείς συνέπειες τη μικρή απώλεια πρώτης ύλης και την εξοικονόμηση ενέργειας.

2.3 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Ένα από τα βασικότερα στάδια παραγωγής στη βαριά βιομηχανία και ειδικότερα σε αυτή του χάλυβα, αποτελούν οι θερμικές κατεργασίες (Heat Treatment) [14]. Οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων διακρίνονται σε:

1. Θερμικές κατεργασίες μάζας
2. Επιφανειακές κατεργασίες.

Οι θερμικές κατεργασίες μάζας έχουν σκοπό την επίτευξη των ιδιοτήτων που απαιτούνται για την όποια εφαρμογή, σε όλη την μάζα του υλικού (ρύθμιση του μεγέθους κόκκων, εξάλειψη εσωτερικών τάσεων, αύξηση μηχανικής αντοχής κ.α.). Αντίθετα, στις επιφανειακές κατεργασίες τροποποιείται μόνο ένα στρώμα της εξωτερικής επιφάνειας του υλικού.

Οι βασικές παράμετροι, οι οποίες διαφοροποιούν μεταξύ τους τις θερμικές κατεργασίες, είναι οι ακόλουθες:

- Η θερμοκρασία
- Ο χρόνος παραμονής στην παραπάνω θερμοκρασία και
- Ο ρυθμός απόψυξης

Το μέσο ή περιβάλλον θέρμανσης (αέρας, τηγμένα άλατα), το μέσο απόψυξης (νερό, λάδι, άλατα, αέρας), αλλά και η μάζα του κατεργαζόμενου υλικού, είναι βασικά στοιχεία των θερμικών κατεργασιών, γιατί επηρεάζουν σημαντικά τις βασικές τους παραμέτρους. Οι σημαντικότερες οικογένειες θερμικών κατεργασιών χαλύβων είναι οι ακόλουθες:

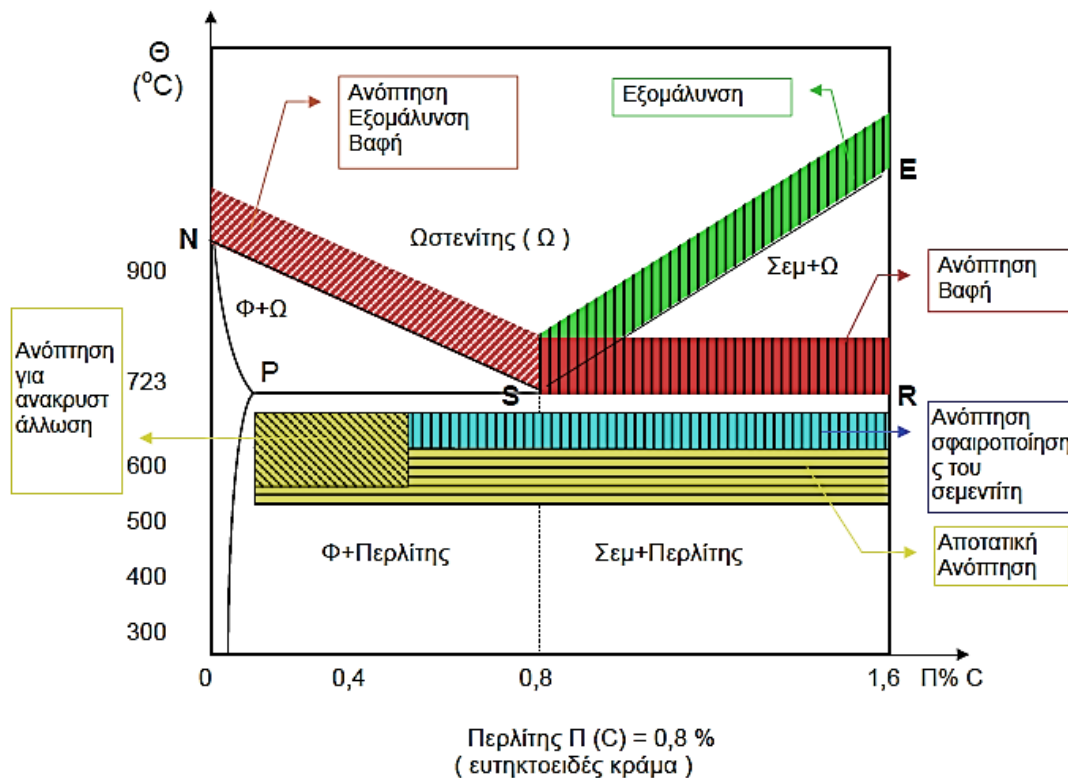
- Ανόπτηση
- Βαφή και Επαναφορά

2.3.1 Ανόπτηση

Οι χάλυβες υποβάλλονται σε διάφορα είδη ανοπτήσεων, ανάλογα με την εφαρμογή [15]. Η ταχύτητα απόψυξης της ανοπτήσης είναι σχετικά μικρή σε αντίθεση με τη ταχύτητα απόψυξης της βαφής. Τα είδη ανοπτήσεως των χάλυβων είναι:

- Ανόπτηση κατεργασίας ή Αποτατική ανόπτηση
- Ανόπτηση εξομάλυνσης
- Πλήρης ανόπτηση
- Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης
- Ανόπτηση αποκατάστασης
- Μαλακτοποίηση ή σφαιροποίηση του Σεμεντίτη
- Ανόπτηση χυτοχάλυβα

Στην εικόνα 2.17 ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος ισορροπίας φάσεων του διμερούς Σιδήρου-Άνθρακα (Fe-C), για την περιοχή των χάλυβων, με εικονιζόμενες τις περιοχές των θερμικών κατεργασιών ανοπτήσης και βαφής, οι οποίες ισχύουν για ανθρακούχους χάλυβες.



Εικόνα 2.17: Θερμοκρασιακά διαστήματα θερμικών κατεργασιών σε σχέση με το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C

2.3.2 Ανόπτηση κατεργασίας ή αποτατική ανόπτηση (Stress Relieving)

Η ανόπτηση κατεργασίας ή αποτατική ανόπτηση αποτελεί θερμική κατεργασία του χάλυβα κατά την οποία αυτός θερμαίνεται για ορισμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να αφαιρεθούν οι επιπτώσεις της ψυχρής κατεργασίας, και με σκοπό την αύξηση της ολκιμότητας του, στις περιπτώσεις που έχει υποστεί σκλήρυνση μέσω ενδοτράχυνσης [15]. Πραγματοποιείται συνήθως σε θερμοκρασία μεταξύ 550°-650°C, ενώ ακολουθείται από βραδεία απόψυξη του υλικού έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Φαινόμενα αποκατάστασης ή/και ανακρυστάλλωσης δύναται να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας. Σε γενικές γραμμές, η θερμική αυτή κατεργασία επιτρέπει την απόκτηση λεπτόκοκκης κρυσταλλικής δομής, εφόσον σταματήσει εγκαίρως, προτού, δηλαδή, παρατηρηθεί μεγέθυνση των κόκκων.

2.3.3 Ανόπτηση εξομάλυνσης (Normalizing)

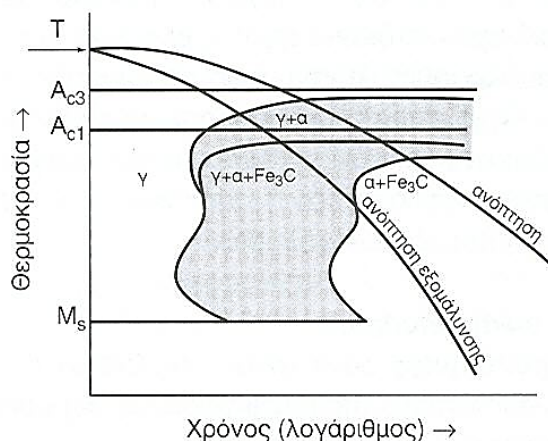
Η ανόπτηση εξομάλυνσης πραγματοποιείται με σκοπό τη επίτευξη ομοιόμορφης, λεπτόκοκκης και κυτταροειδής φερριτοπερλιτικής κρυσταλλικής δομής [15]. Ο χάλυβας θερμαίνεται για κατάλληλο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50-85 °C της άνω κρίσιμης A_{c3} ή A_{cm} (ανάλογα με τη περιεκτικότητα του άνθρακα στο κράμα), ώστε να επέλθει πλήρης ωστενιτοποίησή του. Η κατεργασία περατώνεται με ψύξη στον αέρα, μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με αυτό τον τρόπο, μειώνονται ή εξαλείφονται οι ανισotropίες των ιδιοτήτων του χάλυβα και βελτιώνοντας τη δυσθραυστότητα και τη μηχανική αντοχή του κράματος. Άλλοι στόχοι που επιτυγχάνονται με την εξομάλυνση είναι η βελτίωση της κατεργασιμότητας, η εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων και του διαφορισμού (διαφορισμός = συγκέντρωση των προσμείξεων στα όρια των κόκκων κατά τη χύτευση) σε χυτά τεμάχια. Συχνά, στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες που υφίστανται ανόπτηση εξομάλυνσης, παρατηρείται η δημιουργία ομοιογενούς, λεπτόκοκκου περλίτη, χωρίς τον αναμενόμενο σχηματισμό προευτηκτοειδούς φερρίτη, λόγω της σχετικά μεγάλης ταχύτητας απόψυξης. Για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, η ανόπτηση εξομάλυνσης εφαρμόζεται προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά του σεμεντίτη. Η εξομάλυνση προκαλεί εκλέπτυνση των κόκκων αντικειμένων από χυτοχάλυβα, ή από τυχόν υπερθερμανθέντα χάλυβα (από χάλυβα, δηλαδή, ο οποίος κατά το στάδιο της ωστενιτοποίησης, υπέστη υπερβολική αύξηση του μεγέθους των ωστενιτικών κόκκων, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας).

2.3.4 Πλήρης ανόπτηση (Full Annealing)

Η πλήρη ανόπτηση είναι τεχνικά παρόμοια με την ανόπτηση εξομάλυνσης. Χρησιμοποιείται στους χάλυβες χαμηλής έως μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι, κατά τη διάρκεια κατεργασιών μορφοποίησης ή κοπής, αναμένεται να παραμορφωθούν πλαστικά [15].

Το κράμα ωστενιτοποιείται, σε θερμοκρασία περίπου 30°C πάνω από τη θερμοκρασία της άνω κρίσιμης A_{c3} , έως ότου να επέλθει πλήρης ωστενιτοποίηση (Εικόνα 2.18). Ακολουθεί πολύ αργή ψύξη συνήθως μέσα στο φούρνο, με ρυθμό περίπου 20°C/ώρα.

Στην εικόνα 2.18, ακολουθεί σχηματική απεικόνιση του διαγράμματος CCT για πλήρη ανόπτηση ενός υποευτηκτοειδή χάλυβα.



Εικόνα 2.18: Διαγράμματα TTT (CCT) - Καμπύλες απόψυξης για την πλήρη ανόπτηση και την ανόπτηση εξομάλυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα. [14]

Η πλήρης ανόπτηση είναι χρονοβόρα διαδικασία, αλλά χρησιμοποιείται προκειμένου:

- Ο χάλυβας να αποκτήσει καλή κατεργασιμότητα, που να επιτρέπει τη συνέχιση της κατεργασίας διαμόρφωσης ή κοπής.
- Οι χυτοχάλυβες να αποκτήσουν ομοιογενή μικροδομή και να βελτιωθεί η αντοχή τους και, ιδιαίτερα, να αυξηθεί η δυσθραυστότητά τους.
- Να εξαλειφθούν οι εσωτερικές μηχανικές τάσεις, μετά από εν θερμώ μηχανική κατεργασία του χάλυβα ή μετά από συγκόλληση.

2.3.5 Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης (Recrystallisation)

Η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης πραγματοποιείται εντός της φερριτικής περιοχής (650-750°C), σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσής του και αποψύχεται στον αέρα. Εφαρμόζεται στους «εν ψυχρώ» παραμορφωμένους χάλυβες, προκειμένου να εξαλειφθεί ο ιστός της ενδοτράχυνσης (π.χ. σε λαμαρίνες μετά από ψυχρή έλαση) και να καταστεί δυνατή η περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης.

2.3.6 Ανόπτηση αποκατάστασης (Recovery)

Ο στόχοι της συγκεκριμένης ανόπτησης είναι ο ίδιος με αυτούς της ανόπτησης ανακρυστάλλωσης, με την διαφορά ότι η θέρμανση γίνεται σε θερμοκρασία χαμηλότερη, 450-600°C.

2.3.7 Μαλακτοποίηση ή σφαιροποίηση του σεμεντίτη (Softening or Spheroidise Annealing)

Η ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη πραγματοποιείται συνήθως σε υπερευτηκροειδούς χάλυβες σε θερμοκρασία $\pm 20^\circ\text{C}$ από την κάτω κρίσιμη θερμοκρασία A_1 και στην συνέχεια αποψύχεται αργά μέσα στο φούρνο για περίπου 25 ώρες. Κυριότερος στόχος της είναι η σφαιροποίηση του σεμεντίτη ο οποίος σε έναν υπερευτηκτοειδή χάλυβα βρίσκεται τόσο με τη μορφή φιαλιδίων μέσα στον περλίτη (ευτηκτοειδής σεμεντίτης), όσο και γύρω από τα όρια των κόκκων του περλίτη (προευτηκτοειδής σεμεντίτης). Ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης, χωρίς να υποστεί μετασχηματισμό φάσης, βελτιώνει την κατεργασιμότητα του χάλυβα,

δεδομένου ότι αυτός γίνεται μαλακότερος και ολκιμότερος. Η δομή του χάλυβα αποτελείται από σφαιρικό σεμεντίτη μέσα σε μήτρα φερρίτη. Η σφαιροποίηση του σεμεντίτη επιτυγχάνεται σε μεγάλο βαθμό στη βιομηχανία, με ανόπτηση σε αυξομειούμενη θερμοκρασία μεταξύ A_1-50 και A_1+50 (συνήθως μεταξύ $650-750^\circ\text{C}$), η οποία καλείται ταλαντωτική ανόπτηση.

2.3.8 Ανόπτηση χυτοχάλυβα (Annealing of Casting)

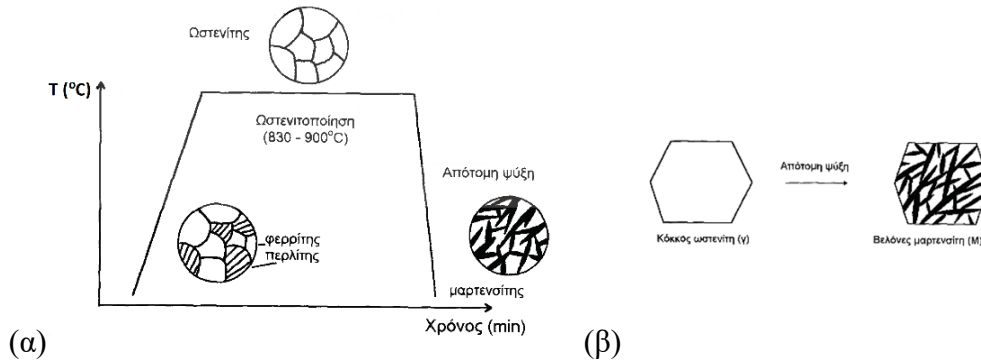
Κατά τη χύτευση σε τύπο από άμμο, λόγω της αργής απόψυξης που ακολουθεί, παρατηρείται ότι η δομή του χάλυβα (συνήθως με αρχική περιεκτικότητα $0,35\% \text{ C}$), μετά από τη στερεοποίηση, αποτελείται από χονδρούς κόκκους περλίτη και βελονοειδή φερρίτη (τόσο στα όρια των κόκκων του περλίτη, όσο και κατά μήκος συγκεκριμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων) δομή γνωστή ως Widmanstätten. Η δομή αυτή είναι ψαθυρή λόγω στους προσανατολισμένους βελονοειδείς φερριτικούς κρυστάλλους. Η άρση της παραπάνω μικροδομής γίνεται με κατάλληλη ανόπτηση: θέρμανση του τεμαχίου σε θερμοκρασία $40-50^\circ\text{C}$ πιο πάνω από την A_3 και παραμονή για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και ψύξη στο φούρνο. Με την ανόπτηση πάνω από την άνω κρίσιμη θερμοκρασία επιτυγχάνεται διαλυτοποίηση του φερρίτη στον ωστενίτη και η ανάπτυξη λεπτών κυττάρων ωστενίτη, που μετά την ψύξη μετατρέπεται σε ανεξάρτητους κόκκους περλίτη και κόκκους φερρίτη, και κατά συνέπεια βελτίωση των ιδιοτήτων που φαίνεται χαρακτηριστικά στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Η βελτίωση των ιδιοτήτων ενός ανθρακούχου χάλυβα λόγω ανόπτησης.

	Σκληρότητα (Brinell)	Όριο Διαρροής (MPa)	Αντοχή Εφελκυσμού (MPa)	Παραμόρφωση Θραύσης (%)	Δυσθραυστότητα (Joule)
Χυτοχάλυβας	160	309	448	6	12
Ανοπτημένος 880°C , 6hr, απόψυξης σε φούρνο	153	247	479	24	32

2.3.9 Βαφή / Σκλήρυνση (Quenching / Hardening)

Βαφή καλείται η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, κατά την οποία, το κράμα θερμαίνεται για ωστενιτοποίηση ($A_3+50^\circ\text{C}$ για υποευτηκτοειδείς και $A_1+50^\circ\text{C}$ για υπερευτηκτοειδείς χάλυβες), και στη συνέχεια αποψύχεται απότομα, με εμβάπτιση του σε κάποιο μέσο απόψυξης (αέρας, νερό, λάδι, τήγμα άλατος) (εικόνα 2.19). Κύριος στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα (σκληρότητα, αντοχή κ.λπ.), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κ.λπ.). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι, ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 20-22HRC μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω από 62-64HRC, έπειτα από βαφή.



Εικόνα 2.19: (α) Σχηματική παράσταση του θερμικού κύκλου και των αλλαγών δομής κατά τη βαφή. (β) Απλουστευμένος μηχανισμός του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

2.3.10 Ωστενιτοποίηση (Austenitizing)

1) Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης

Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 830°-900°C για τους υποευθηκτοειδείς χάλυβες και σε αυτές τις θερμοκρασίες το υλικό παίρνει ένα «ανοιχτό πορτοκαλί» χρώμα λόγω πύρωσης. Οι υπερευθηκτοειδείς χάλυβες υφίστανται θέρμανση στους 750°-780°C, ενώ σε χάλυβες, που περιέχουν μεγάλα ποσοστά άλλων στοιχείων κραματοποίησης (π.χ. Cr, Mo, Ni, κ.λπ), η θέρμανσή ενδέχεται να υπερβεί τους 1000°-1050°C.

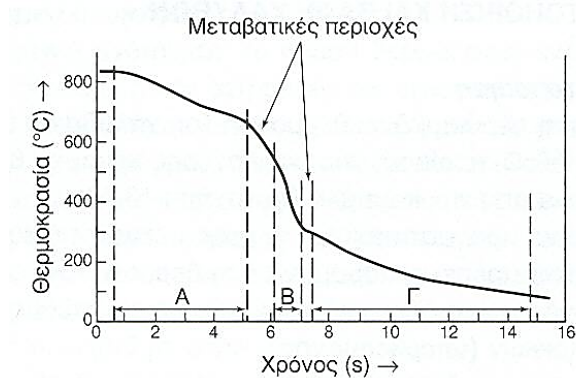
2) Διάρκεια Ωστενιτοποίησης

Με στόχο την πλήρης μετατροπή του χάλυβα σε ομογενή ωστενίτη, πρέπει η παραμονή του κράματος στο φούρνο να διαρκέσει αρκετά, όχι τόσο όμως που θα οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους των κόκκων λόγω υπερθέρμανσης. Συχνά, παρατηρείται η διαφορά θερμοκρασίας επιφάνειας και εσωτερικού της μάζας (καρδιάς) του κράματος, όπου δύναται να προκαλέσει την πλαστική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη. Για αυτό το λόγο, η διάρκεια της ωστενιτοποίησης γίνεται με τόσο βραδύ ρυθμό όσο μεγαλύτερη είναι η μικρότερη διάσταση του τεμαχίου. Κατά την διάρκεια της ωστενιτοποίησης, προκαλείται η οξειδωση του χάλυβα, ενώ παρατηρείται η επιφανειακή απώλεια υλικού και η ελάττωση της περιεκτικότητας του άνθρακα. Τα προαναφερθεί προβλήματα αντιμετωπίζονται με τη χρήση φούρνων ελεγχόμενης ατμόσφαιρας, η κενού.

3) Απόψυξη Χάλυβα

Η ταχύτητα απόψυξης είναι καθοριστική τόσο για βαθμό σκλήρυνσης, όσο και για τις αστοχίες (ρωγματώσεις), που μπορούν να εμφανισθούν λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του υλικού, με άμεσο επακόλουθο τη δραματική μείωση της δυσθραυστότητας και με κίνδυνο την εμφάνιση ρωγμών.

Η καμπύλη απόψυξης του χάλυβα δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ψύξης, ως συνάρτηση του χρόνου, (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.20: Καμπύλη ταχείας απόψυξης (βαφής) μικρού χαλύβδινου κυλίνδρου, μετά την εμβάπτισή του σε χλιαρό νερό. (πηγή: Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.478)

Η ταχύτητα απόψυξης ($\Delta T/\Delta t$) μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της ψύξης και διακρίνονται τρεις κύριες περιοχές, οι οποίες οφείλονται κυρίως στον διαφορετικό τρόπο μεταφοράς της θερμότητας:

- Περιοχή Α: Πραγματοποιείται ακαριαία εξάτμιση του υγρού ψύξης λόγω υψηλής θερμοκρασίας, τη στιγμή που έρθει σε επαφή με τη μεταλλική επιφάνεια, σχηματίζονται συγχρόνως ένα λεπτό στρώμα ατμών γύρω από αυτή, διαμέσου του οποίου γίνεται η ψύξη με αγωγή και ακτινοβολία. Λόγω της μικρής ικανότητας απαγωγής θερμότητας των ατμών, η ταχύτητα ψύξης είναι αργή (μικρή κλίση της εφαπτομένης $\Delta T/\Delta t$)
- Περιοχή Β: Το στρώμα των ατμών έχει διαλυθεί, το υγρό εξαιτίας της επαφής του με την μεταλλική επιφάνεια εμφανίζει έντονο φαινόμενο βρασμού. Η ταχύτητα της απόψυξης είναι μεγάλη λόγω του γεγονότος ότι η απαγωγή θερμότητας γίνεται ταχύτατα.
- Περιοχή Γ: Όταν υπάρξει ισορροπία των θερμοκρασιών της επιφάνειας του μετάλλου και αυτής του βρασμού του ψυκτικού μέσου, η εξάτμιση του υγρού παύει και η ψύξη συνεχίζεται με απαγωγή διαμέσου του όγκου του υγρού. Σε αυτό το στάδιο, η ταχύτητα απόψυξης είναι μικρότερη όλων.

Γενικά, η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται, εκτός από τον τρόπο μεταφοράς της θερμότητας, από το είδος του ψυκτικού μέσου, τη θερμοκρασία του, την ενδεχόμενη ανάδεδυσή του, αλλά και από το μέγεθος, τη γεωμετρία, τη μάζα και την κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου.

4) Μέσα βαφής – Δραστικότητα μέσω βαφής

Ως ιδανικό ψυκτικό μέσο ορίζεται εκείνο το οποίο προκαλεί μεγάλο ρυθμό ψύξης στη περιοχή Α με στόχο τη πρόληψη ανεπιθύμητων μετασχηματισμών του κράματος, και ταυτόχρονα, βραδύ ρυθμό απόψυξης στη περιοχή Γ, ώστε να αποφεύγονται έντονες παραμορφώσεις. Συγκρίνοντας τα υπάρχον διαθέσιμα ψυκτικά μέσα, ξεχωρίζουν το νερό και τα διαλύματα οργανικών αλάτων, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη ταχύτητα απόψυξης σε όλες τις περιοχές και ορισμένα ειδικά λάδια μεγάλη έκταση της περιοχής Α και μικρότερη της Β. Δραστικότητα του μέσου απόψυξης (H) είναι ένας αριθμητικός συντελεστής και ορίζεται ως η αποτελεσματικότητα, από απόψεως απόψυξης για δεδομένο μέσο βαφής (Πίνακας 2.2). Ο συντελεστής αυτός είναι συνάρτηση της ταχύτητας απόψυξης και εξαρτάται από το αν

υπάρχει ανάδευση κατά την απόψυξη ή όχι. Χαρακτηριστική τιμή του συντελεστή (H) για τη δραστηριότητα του νερού ως μέσο απόψυξης σε θερμοκρασία 20°C χωρίς ανάδευση η οποία ισούται με τη μονάδα (H=1). Ο συντελεστής (H), αυξάνεται με τη προσθήκη αλάτων όπως: NaCl, Na₂CO₃, NH₄Cl, ενώ ελαττώνεται με τη προσθήκη γλυκερίνης, σαπουνιού ή Na₂SiO₃. Η ταχύτητα ανάδευσης επιδρά θετικά στην ταχύτητα απόψυξης, καταστρέφοντας το σχηματιζόμενο στρώμα ατμών και ελαττώνοντας έτσι την έκταση της περιοχής A.

Πίνακας 2.2: Τιμές δραστηριότητας διαφόρων ψυκτικών μέσων χαλύβων κάτω από διάφορες συνθήκες. (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.479)

Μέσο Βαφής	Σε Ηρεμία	Μέτρια Ανάδευση	Ισχυρή Ανάδευση	Ισχυρότατη Ανάδευση
Αέρας	0,02	-	-	-
Λάδι	0,3	0,4	0,8	1,0
Νερό	1,0	1,3	2,0	4,0
Υδατικό διάλυμα άλατος	2,0	-	-	5,0
Ιδανικό ψυκτικό μέσο	∞	-	-	-

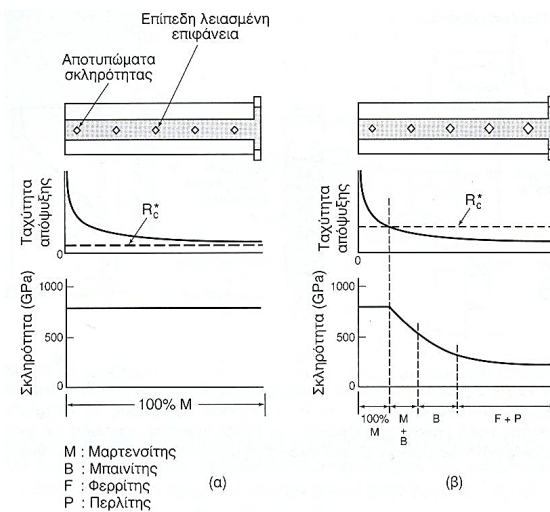
Η μάζα του αντικειμένου παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο βαφής. Κατά τη βαφή, λαμβάνει χώρα διάχυση θερμότητας από το θερμό αντικείμενο προς το ψυχρό λουτρό, προκειμένου να εξισωθούν οι δύο θερμοκρασίες. Μια ράβδος χάλυβα μεγάλης διαμέτρου απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο για την εξίσωση των θερμοκρασιών, από μια ράβδο μικρότερης διαμέτρου. Τα οξειδία που σχηματίζονται στη μεταλλική επιφάνεια είναι υπεύθυνα για την επιβράδυνση της ταχύτητας απόψυξης, εκτός από τη περίπτωση αποκόλλησης ενός μέρος τους από την μεταλλική επιφάνεια που συντελεί στην ανομοιόμορφη ψύξη της επιφάνειας. Οι τρόποι αντιμετώπισης της παραγωγής αυτών των οξειδίων περιλαμβάνουν την επικάλυψη της επιφάνειας με Cu ή Al (ηλεκτρολυτικό) ή άλλο μέταλλο, αλλιώς η θέρμανση του χάλυβα πραγματοποιείται σε αδρανή ατμόσφαιρα ή σε υγρά άλατα ουδέτερα ως προς το χάλυβα, είτε σε κάμινο που περιέχει ρινίσματα σιδήρου.

5) Εμβαπτότητα (Ικανότητα σκλήρυνσης μετά από βαφή).

Οι χάλυβες γίνονται σκληρότεροι και ανθεκτικότεροι μετά από βαφή και επαναφορά. Για να επιτευχθούν οι καλύτερες ιδιότητες, θα πρέπει η βαφή να πραγματοποιηθεί με ταχύτητα μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης έτσι ώστε ο χάλυβας να αποκτήσει μαρτενσιτική μικροδομή. Η ταχύτητα του μετασχηματισμού λόγω της διάχυσης είναι ανάλογη του αριθμού των πυρήνων που σχηματίζονται στη μονάδα της επιφάνειας ανά sec. Δεδομένου ότι τα όρια των κόκκων αποτελούν ευνοϊκές θέσεις πυρηνοποίησης, ένας λεπτόκοκκος χάλυβας θα πρέπει να παράγει περισσότερους πυρήνες από ένα χονδρόκοκκο. Επομένως, ο λεπτόκοκκος χάλυβας θα μετασχηματίζεται ταχύτερα από ένα χονδρόκοκκο και, κατά συνέπεια, θα έχει υψηλότερη τιμή κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης.

Ένας χάλυβας υψηλής εμβαπτότητας παρουσιάζει σταθερή τιμή, υψηλής σκληρότητας, σε όλο το μήκος του δοκιμίου, διότι η ταχύτητα απόψυξης, ακόμη και στο μη ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης (Εικόνα 2.21α). Σε όλο το δοκίμιο, συνεπώς, έχουμε πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη.

Σε ένα χάλυβα μέτριας εμβαπτότητας, η ταχύτητα απόψυξης παραμένει μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης, μόνο λίγα εκατοστά μακρύτερα της ψυχόμενης επιφάνειας (Εικόνα 2.21β). Μόλις η ταχύτητα απόψυξης γίνει μικρότερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης, ο ωστενίτης του χάλυβα αρχίζει να μετασχηματίζεται σε μπαινίτη, ενώ κοντά στο απέναντι από το ψυχόμενο άκρο, εμφανίζεται η φερριτοπερλιτική δομή, η δε σκληρότητα ελαττώνεται συνεχώς.



Εικόνα 2.21: Δοκιμή Jominy: (α) Χάλυβα υψηλής εμβαπτότητας, (β) Χάλυβα μέτριας εμβαπτότητας. [13]

Ως βάθος βαφής, κατά τη δοκιμή Jominy, ορίζεται η απόσταση από το ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, στην οποία ο ωστενίτης έχει μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά 50%. Το βάθος βαφής αντιστοιχεί, περίπου, στο σημείο καμψής της καμπύλης εμβαπτότητας. Ένας χάλυβας έχει καλή εμβαπτότητα, όταν, μετά τη βαφή, εμφανίζει μεγάλο βάθος βαφής. Για δεδομένο χάλυβα, η εμβαπτότητα και το βάθος βαφής εξαρτώνται από τη μάζα του αντικειμένου και από τη δραστικότητα του λουτρού.

Η εμβαπτότητα εξαρτάται επίσης από το είδος του χάλυβα. Οι προσθήκες στον κοινό χάλυβα μετατοπίζουν, γενικά, τις καμπύλες TTT και CCT προς τα δεξιά, γεγονός που συνεπάγεται την ελάττωση της κρίσιμης ταχύτητας βαφής και αύξηση του βάθους βαφής. Η αύξηση της διαμέτρου των κόκκων του ωστενίτη προκαλεί, επίσης, μετατόπιση των καμπυλών TTT και CCT προς τα δεξιά.

6) Μετασχηματισμοί φάσεων κατά την βαφή

Διάγραμμα Fe-C Ισορροπίας φάσεων

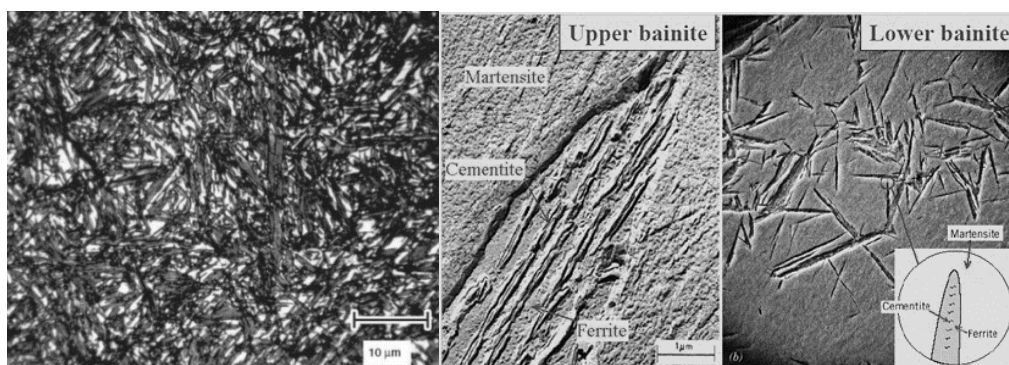
Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-Fe₃C προβλέπει όλες τις πιθανές φάσεις που μπορεί να συναντηθούν στο διμερές κράμα σε *συνθήκες απόλυτης ισορροπίας*, δηλαδή κατά την

πολύ αργή απόψυξη από υψηλή θερμοκρασία. Όλοι οι μετασχηματισμοί φάσεων, που καταγράφονται στα διαγράμματα φάσεων, γίνονται επίσης πολύ αργά και η ταχύτητα τους αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ο κυρίαρχος μηχανισμός όλων αυτών των μετασχηματισμών είναι η ατομική διάχυση. Στο διάγραμμα αυτό υπακούουν μόνο οι θερμικές κατεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται με ενεργοποίηση του μηχανισμού διάχυσης των ατόμων, και κατά συνέπεια, αναμένονται και οι αντίστοιχες φάσεις (φερρίτης + σεμεντίτης). Στις περιπτώσεις των θερμικών κατεργασιών όπου οι ταχύτητες απόψυξης είναι μεγάλες όπως είναι και η περίπτωση της βαφής, οι φάσεις που προκύπτουν από τους μετασχηματισμούς που λαμβάνουν χώρα είναι φάσεις εκτός ισορροπίας (Μαρτενσίτης και Μπαινίτης).

7) Μετασχηματισμοί φάσεων εκτός ισορροπίας

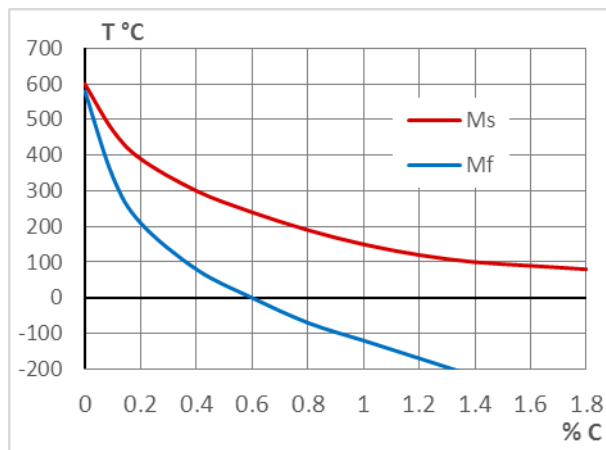
Κατά την θέρμανση σε κατάλληλες θερμοκρασίες η αρχική δομή του χάλυβα μετατρέπεται σε ωστενίτη. Σε περίπτωση γρήγορης απόψυξης (βαφής) ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μία σκληρή και εύθραυστη φάση, τον μαρτενσίτη, η οποία κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό πλέγμα. Ο μαρτενσίτης αναπτύσσεται σχεδόν ακαριαία μέσα στους κόκκους του ωστενίτη με πλακοειδής ή βελονοειδής μορφή.

Χαρακτηριστική μορφολογία του μαρτενσίτη παρουσιάζεται σε μικροφωτογραφία στην εικόνα 2.22α. Η σκληρότητα του μαρτενσίτη είναι πολύ μεγάλη (500-1000 HV) λόγω αφενός της ανάπτυξης εντόνων εσωτερικών τάσεων και αταξιών κατά την απότομη ψύξη και αφετέρου του κορεσμού της κρυσταλλικής δομής του σε άνθρακα. Γι' αυτό πρακτικά δεν επιτυγχάνεται σκλήρυνση μέσω βαφής σε χάλυβες με ποσοστό σε άνθρακα μικρότερο από 0,2%.



Εικόνα 2.22: Οπτικές μικρογραφίες που δείχνουν (α) Μαρτενσίτη, S.E.M. X1000 βαφής σε νερό και (β) Μπαινίτη X1000 [17]

Ο σχηματισμός του μαρτενσίτη ξεκινά με την ψύξη του υλικού κάτω από μία χαρακτηριστική θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, M_s . Για να μετατραπεί ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη κατά 100%, πρέπει η ψύξη να συνεχισθεί μέχρι τη θερμοκρασία τέλους M_f (Εικόνα 2.23). Οι θερμοκρασίες M_s , M_f εξαρτώνται αποκλειστικά από τη χημική σύσταση του χάλυβα: χάλυβες με μεγάλο ποσοστό σε άνθρακα ($>0.7\%$) ή/και ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν $M_f < 0$. Εάν η ψύξη σταματήσει σε θερμοκρασία ενδιάμεσα των σημείων M_s , M_f , τότε η δομή του υλικού θα αποτελείται από μαρτενσίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη.



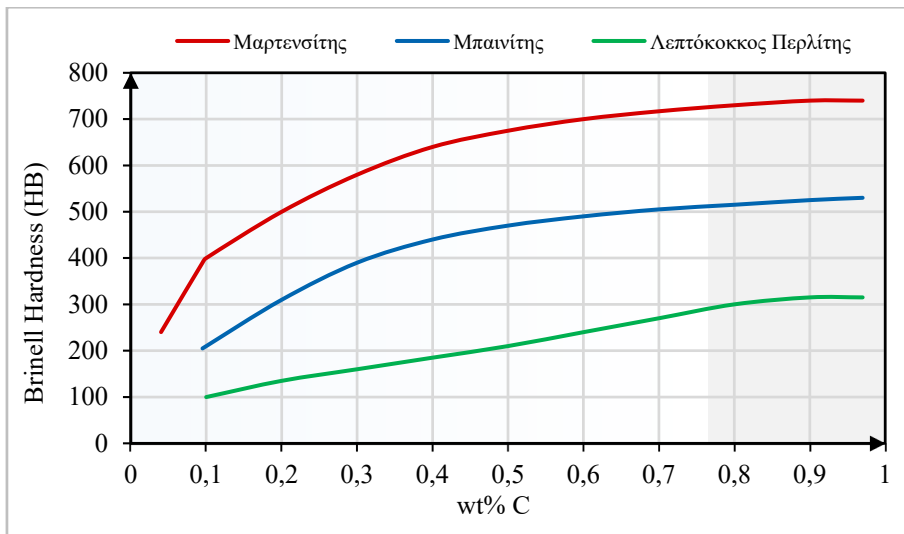
Εικόνα 2.23: Μεταβολή θερμοκρασιών Ms και Mf συναρτήσει περιεκτικότητας %C [18]

Η μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη δεν πραγματοποιείται με διάχυση, λόγω της απότομης ψύξης που ακολουθεί την ωστενιτοποίηση. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι τα εξής:

- Είναι μετασχηματισμός είναι μετασχηματισμός «διάτμησης» και όχι «διάχυσης», δηλαδή δεν πραγματοποιείται με κλασικό μηχανισμό πυρηνοποίησης και ανάπτυξης.
- Μπορεί να γίνει και σε θερμοκρασία λίγο πιο πάνω από 0°K (απόλυτο μηδέν), ενώ ο μετασχηματισμός διάχυσης σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, πάνω από $0.3T_f$ (T_f = σημείο τήξεως του υλικού).
- Η ταχύτητα διάχυσης είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ η ταχύτητα του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι σχεδόν σταθερή και πολύ υψηλή. Φθάνει την ταχύτητα του ήχου στο σίδηρο (5000 m/s). Ο χρόνος ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι της τάξης των 10^{-7} sec.
- Το ποσοστό του παραγόμενου μαρτενσίτη εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά κάτω από μια θερμοκρασία έναρξης, που συμβολίζεται m_s , και ολοκληρώνεται σε μια θερμοκρασία τέλους, που συμβολίζεται m_f ($m_s > m_f$). Στην τελευταία θερμοκρασία έχει μετατραπεί όλος ο ωστενίτης σε μαρτενσίτη (100% μετατροπή). Κατά τη διάχυση, όμως, το ποσοστό μετατροπής εξαρτάται τόσο από τη θερμοκρασία, όσο και από το χρόνο παραμονής στην εκάστοτε θερμοκρασία.
- Μετά από το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό δεν υπάρχουν αλλαγές στη χημική σύσταση, δηλαδή ο μαρτενσίτης περιέχει ποσοστό άνθρακα όσο και ο ωστενίτης από τον οποίον προήλθε. Αντίθετα, κατά τη διάχυση οι νέες φάσεις έχουν διαφορετική σύσταση από τις παλαιές.
- Η μαρτενσιτική δομή παρουσιάζει μεγάλη κρυσταλλογραφική συνάφεια με το μητρικό πλέγμα, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει κατά τη διάχυση.

Η μέτρια ταχύτητα απόψυξης οδηγεί σε δομή, η οποία αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη και μοιάζει μορφολογικά και με τον περλίτη και με τον μαρτενσίτη. Αυτή η ενδιάμεση δομή ονομάζεται μπαινίτης (Εικόνα 2.22β). Ο μπαινίτης είναι λιγότερο σκληρός από το μαρτενσίτη (350-550 HV) και παρουσιάζει μεγαλύτερη πλαστικότητα. Ο μπαινίτης και ο

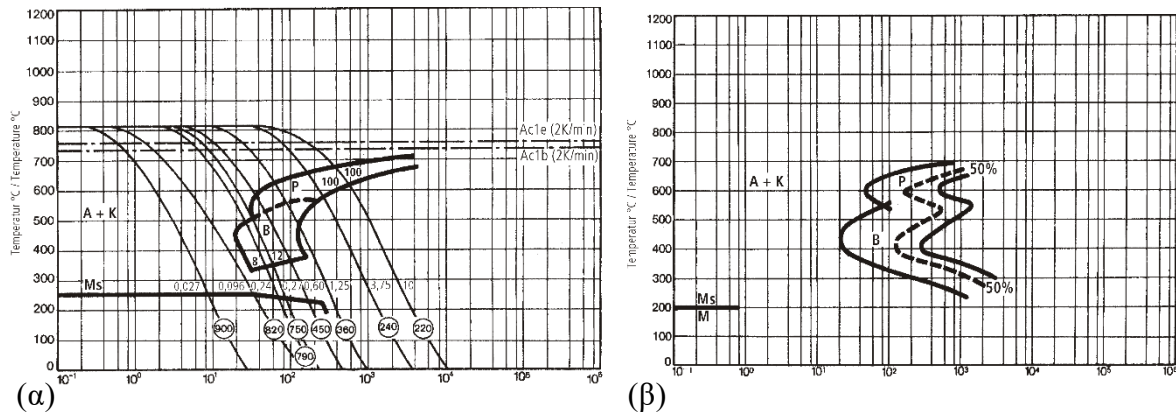
μαρτενσίτης, είναι δομές εκτός ισορροπίας και δεν επισημαίνονται από τα διαγράμματα φάσεων. Αργές απόψυξεις οδηγούν σε μετατροπή του ωστενίτη σε περλίτη. Η σκληρότητα διαφόρων φάσεων του χάλυβα παρουσιάζεται στην εικόνα 2.24.



Εικόνα 2.24: Σύγκριση σκληρότητας διαφόρων φάσεων χαλύβων [19]

8) Διάγραμμα Μετασηματισμού – Χρόνου - Θερμοκρασίας (T.T.T.)

Οι γρήγορες θερμοκρασιακές μεταβολές, που λαμβάνουν χώρα κατά τη βαφή, οδηγούν στο σχηματισμό δομών εκτός ισορροπίας. Αυτές οι δομές δεν επισημαίνονται στο διάγραμμα φάσεων Fe-C, διότι παρεμβαίνει η παράμετρος του χρόνου. Ένα διάγραμμα στο οποίο σκιαγραφούνται όλοι οι δυνατοί μετασηματισμοί φάσεων με βάση και την παράμετρο του χρόνου, είναι το Διάγραμμα Μετασηματισμού-Χρόνου-Θερμοκρασίας ή απλώς το TTT διάγραμμα (Time-Temperature-Transformation). Κάθε χάλυβας έχει και το δικό του διάγραμμα TTT (Εικόνα 2.25). Οι καμπύλες μέσα στο TTT διάγραμμα λέγονται C-καμπύλες, λόγω σχήματος, και η πρώτη από αριστερά οριοθετεί την έναρξη του μετασηματισμού διάχυσης του ωστενίτη σε περλίτη, ενώ καθώς προχωρούμε προς τα δεξιά το ποσοστό μετατροπής του ωστενίτη αυξάνεται. Άρα, κάθε καμπύλη προς τα δεξιά αντιστοιχεί σε ένα μεγαλύτερο ποσοστό μετατροπής του ωστενίτη από ότι η προηγούμενή της (η οποία βρίσκεται αριστερά). Η "μύτη" (το ακραίο σημείο) όλων αυτών των καμπυλών βρίσκεται περίπου πάνω στην ίδια οριζόντια ευθεία. Η περιοχή των καμπυλών, που βρίσκεται πάνω από τη μύτη, αντιστοιχεί στον περλίτη- το ανώτερο σημείο σε χονδρόκοκκο και το κατώτερο σε λεπτόκοκκο περλίτη- ενώ η προς τα κάτω περιοχή στο μπαινίτη. Για να επιτευχθεί ο μαρτενσιτικός μετασηματισμός, θα πρέπει να γίνει τόσο απότομα η απόψυξη, έτσι ώστε να μην κόψει τη μύτη των C-καμπυλών και να κατέβει κάτω από την οριζόντια γραμμή MS. Για να έχουμε πλήρη μετατροπή του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, θα πρέπει η καμπύλη απόψυξης να κατέβει κάτω από την οριζόντια Mf.



Εικόνα 2.25: (α) Διάγραμμα CCT του O1, (β) Διάγραμμα TTT [20]

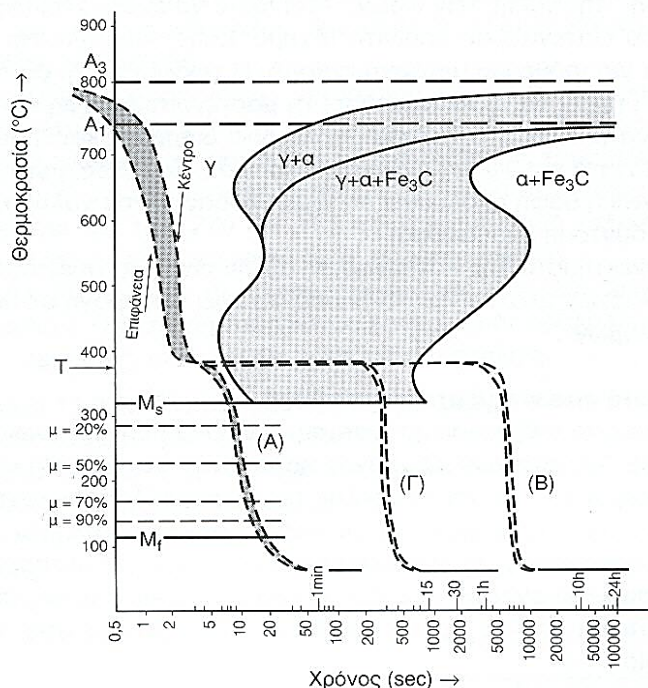
9) Κλιμακωτή Βαφή

Κλιμακωτή βαφή καλείται η θερμική κατεργασία της οποίας η απόψυξη δεν είναι συνεχής, αλλά περιλαμβάνει ένα στάδιο παραμονής σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία [14]. Συνήθως η ενδιάμεση ψύξη γίνεται μέσα σε κάποιο λουτρό τηγμένου άλατος (μεταξύ της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και της θερμοκρασίας έναρξης Ms). Οι κλιμακωτή βαφή χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις, που το κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι μεγάλων διαστάσεων ή παρουσιάζει πολύπλοκη γεωμετρία. Η χρήση της κλιμακωτής βαφής επιβάλλεται για τους εξής λόγους :

- Μείωση των εσωτερικών τάσεων
- Μείωση της ανομοιογένειας που προκαλείται λόγω του φαινομένου της μάζας.

Τα διάφορα είδη κλιμακωτής βαφής είναι τα ακόλουθα (Εικόνα 2.26):

- Κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή: Η απόψυξη περιλαμβάνει παραμονή σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία διάρκειας μερικών δευτερόλεπτων, έτσι ώστε να μην αρχίσει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη. Μετά το τέλος της ψύξης η δομή που λαμβάνεται είναι μαρτενσίτης.
- Κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή: Σε αυτή την περίπτωση το ενδιάμεσο στάδιο διαρκεί μερικά λεπτά, προκειμένου ένα μέρος του ωστενίτη να μετατραπεί σε μπαινίτη. Ακολουθεί απότομη ψύξη, μετά το τέλος της οποίας λαμβάνεται μείγμα μπαινίτη-μαρτενσίτη. Η βαφή αυτή ενδείκνυται σε περιπτώσεις που το υλικό απαιτείται να έχει υψηλή σκληρότητα αλλά και δυσθραυστότητα.
- Κλιμακωτή μπαινιτική βαφή: Σε αυτή την περίπτωση το ενδιάμεσο στάδιο διαρκεί μερικές ώρες, προκειμένου ο ωστενίτης να μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε μπαινίτη. Η βαφή αυτή ενδείκνυται σε περιπτώσεις που το κατεργαζόμενο τεμάχιο καταπονείται κατά κανόνα σε κρουστικές ή/και εναλλασσόμενες φορτίσεις και πρέπει να επιδεικνύει μεγάλη δυσθραυστότητα και αντοχή σε κόπωση.



Εικόνα 2.26: Διάγραμμα TTT. Καμπύλη A: κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή, Καμπύλη B: κλιμακωτή μπαινιτική βαφή και Καμπύλη Γ: κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή.

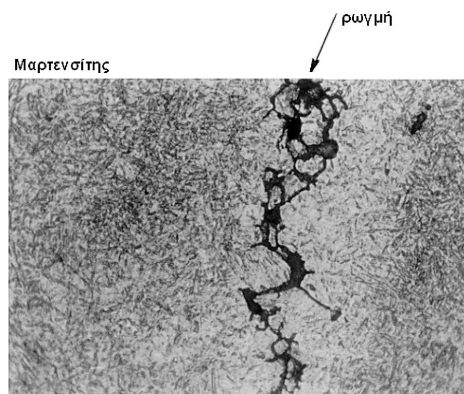
10) Αστοχίες κατά την βαφή

Αυτές είναι κυρίως ρωγμές και στρεβλώσεις οι οποίες οφείλονται στην ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά τη βαφή [14]. Οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται μπορεί να οφείλονται στους παρακάτω λόγους:

- Στην απότομη ψύξη (θερμικές τάσεις)
- Στην αύξηση όγκου (εξόγκωση) που συνοδεύει το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό
- Στην ανομοιογενή θέρμανση - ψύξη που παρατηρείται σε τεμάχια μεγάλων διαστάσεων.
- Σε ελλιπή σχεδιασμό του προς βαφή αντικειμένου (π.χ. οι απότομες γωνίες μπορούν να οδηγήσουν σε συγκέντρωση τάσεων).
- Σε σφάλματα θερμικών κατεργασιών. Μεγαλύτερη θερμοκρασία ή/και χρόνος παραμονής κατά την ωστενιτοποίηση μπορούν να οδηγήσουν σε ψαθυροποίηση. Η κακή επιλογή του μέσου απόψυξης (π.χ. νερό αντί για αέρα ή για λάδι) μπορεί, επίσης, να οδηγήσει σε ρωγματώσεις.

Όλες οι παραπάνω αστοχίες, οι οποίες εκδηλώνονται με ρωγματώσεις, δεν επιδέχονται θεραπεία.

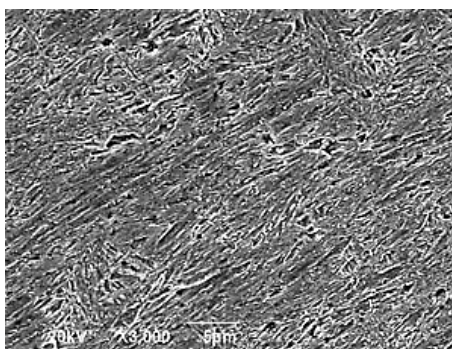
Η εικόνα 2.27 δείχνει μικρορωγμές, που έχουν αναπτυχθεί σε βαμμένο χάλυβα λόγω παρατεταμένης ωστενιτοποίησης.



Εικόνα 2.27: Οπτική μικρογραφία χρωμιομολυβδαινιούχου χάλυβα, όπου φαίνεται η ανάπτυξη μικρορωγμής μέσα στη μαρτενσιτική δομή (X400), [14]

2.3.11 Επαναφορά (Tempering)

Η επαναφορά των βαμμένων χάλυβων είναι αναγκαία, διότι σε μαρτενσιτική κατάσταση είναι σκληρότατοι και εύθραστοι, λόγω των υψηλών εσωτερικών τάσεων. Σε μαρτενσιτική κατάσταση, οι χάλυβες δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν. Για αυτό το λόγο, οι βαμμένοι μαρτενσιτικοί χάλυβες θερμαίνονται σε θερμοκρασία T , με $M_s < T < A_1$, και για χρόνο t , ώστε ο μαρτενσίτης να εξελιχθεί μερικώς στην κατάσταση ισορροπίας. Η δομή αυτή καλείται μαρτενσίτης από επαναφορά. Με τον τρόπο αυτό, η αποκτηθείσα, κατά τη βαφή, σκληρότητα του χάλυβα ελαττώνεται, ενώ αυξάνονται η δυσθραυστότητα και η ολκιμότητά του. Οι δομές που λαμβάνονται κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη εξαρτώνται από το χρόνο και τη θερμοκρασία της κατεργασίας (Εικόνα 2.28).



Εικόνα 2.28: Μικροδομή επαναφερμένου μαρτενσίτη SEMX3000 [21]

Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες διατηρούν, κατά την επαναφορά, την υψηλή τους σκληρότητα, ιδιότητα η οποία καλείται αντοχή σε επαναφορά. Για παράδειγμα, οι χρωμιούχοι χάλυβες διατηρούν την υψηλή τους σκληρότητα ως τους $500\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες, η ελάττωση της τιμής της είναι μικρότερη από αυτή των κοινών χάλυβων. Γενικά, χάλυβες που περιέχουν καρβιδιογόνα στοιχεία, εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε επαναφορά, διατηρούν την σκληρότητά τους, ενώ, ταυτόχρονα, γίνονται ολκιμότεροι. Αυτό οφείλεται στην κατακρήμνιση, κατά την επαναφορά, καρβιδίων των προσθηκών.

Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες, κυρίως οι μαγγανιούχοι, μετά από βαφή, επαναφορά και βραδεία απόψυξη, καθίστανται εύθραστοι σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η συμπεριφορά αυτή καλείται ευθραυστότητα από επαναφορά. Το φαινόμενο συνδέεται με την κατακρήμνιση λόγω γήρανσης και δεν εμφανίζεται, όταν την επαναφορά ακολουθεί ταχύτατη

απόψυξη. Κατά την βραδεία απόψυξη, κατακρημνίζονται καρβίδια και νιτρίδια των κραματικών στοιχείων, τα οποία είναι διαλυμένα σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 430 °C. Με την ταχεία απόψυξη, τα καρβίδια διατηρούνται εν διαλύσει και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ένταση του φαινομένου ελαττώνεται, επίσης, με προσθήκη στο χάλυβα 0,10% Mo.

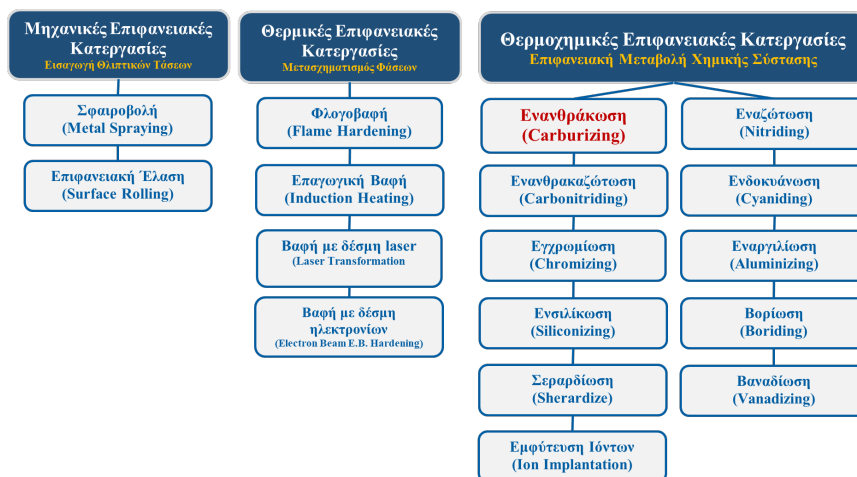
Ορισμένοι κραματωμένοι χάλυβες, με καρβιδιογόνα στοιχεία (W, Mo, V) θερμαινόμενοι, δε χάνουν την σκληρότητά τους παρά μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασίες της τάξης των 600 °C, αντί για σεμεντίτη έχουμε σχηματισμό καρβιδίων (π.χ. W₂C), τα οποία είναι πολύ σκληρά, σταθερά και δε σφαιροποιούνται. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται ταχυχάλυβες και χρησιμοποιούνται για εργαλεία ταχείας κοπής, στα οποία οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές. Οι ταχυχάλυβες βράφονται από υψηλή θερμοκρασία και επαναφέρονται σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας εργασίας τους.

2.4 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Οι τεχνικές τροποποίησης επιφανειακών στρωμάτων του υλικού του αντικειμένου που υποβάλλεται σε κατεργασία έχουν ως στόχο, [22]:

- Η αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειάς τους, με επακόλουθο την βελτίωση της αντοχής τους σε φθορά-τριβή.
- Η εισαγωγή εσωτερικών θλιπτικών τάσεων σε υποεπιφανειακό στρώμα που έχουν ως στόχο την απόκριση του υλικού υπό καθεστώς εναλλασσόμενων φορτίσεων (κόπωση). Οι θλιπτικές παραμένουσες τάσεις σε επιφανειακό στρώμα ενός μεταλλικού αντικειμένου συνεισφέρουν θεαματικά στην απόκριση του υλικού υπό καθεστώς εναλλασσόμενων φορτίσεων (κόπωση).

Η επίτευξη των ιδιοτήτων αυτών γίνεται με επιφανειακές κατεργασίες είτε με μηχανικό ή θερμικό τρόπο χωρίς μεταβολή στη χημική σύσταση του υλικού, είτε με διάχυση στο επιφανειακό στρώμα «ευκίνητων» ατόμων (Εικόνα 2.29).



Εικόνα 2.29: Γενική ταξινόμηση τεχνικών ενίσχυσης μεταλλικών υλικών με τροποποίηση των επιφανειακών στρωμάτων τους.

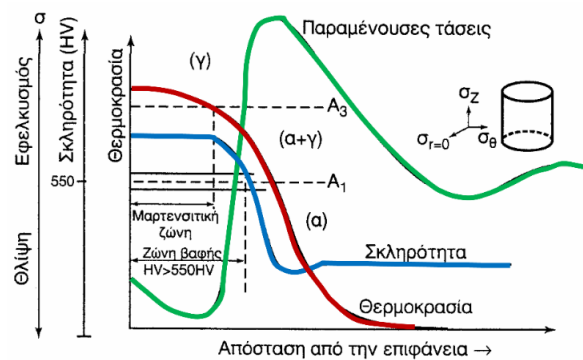
Θερμική Τροποποίηση Στρωμάτων Υλικού

Κατά την επιφανειακή σκλήρυνση με παροχή θερμότητας, σε επιφανειακό στρώμα υλικού λαμβάνουν χώρα μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί με δημιουργία φάσεων υψηλότερης σκληρότητας απ' αυτή του μετάλλου βάσης [23]. Πρόκειται, για την επιφανειακή βαφή του αντικειμένου και αφορά κατά κύριο λόγο τα σιδηρούχα κράματα.

Μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί κατά την επιφανειακή βαφή χαλύβων

Κατά την επιφανειακή βαφή χαλύβων διακρίνονται τρεις ζώνες, στις οποίες λαμβάνουν χώρα διαφορετικοί μεταλλουργικοί μετασχηματισμοί, ως συνέπεια της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σ' αυτές κατά τη θέρμανση του αντικειμένου (Εικόνα 2.30):

- Επιφανειακό στρώμα χάλυβα θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας A_{c3} , για πλήρη ωστενιτοποίηση του στρώματος αυτού. Με ταχεία ψύξη του αντικειμένου, ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη, ενώ το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη είναι ελάχιστο.
- Στη ζώνη του υλικού κάτω από το επιφανειακό στρώμα βαφής (θερμικά επηρεασμένη ζώνη), οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες είναι μεταξύ της A_{c3} και A_{c1} , και σημειώνεται μερική ωστενιτοποίηση που κατά την ταχεία ψύξη δίνει φερριτο-μπαϊνιτική δομή.
- Στο υποκείμενο υλικό του οποίου η θερμοκρασία δεν ξεπερνά την A_{c1} , παρατηρείται επαναφορά και ελάχιστη μείωση της σκληρότητας του υλικού.



Εικόνα 2.30: Μεταβολή των επιφανειακών ιδιοτήτων χαλύβων μετά από επιφανειακή βαφή. [23]

Βάθος επιφανειακής βαφής χαλύβων

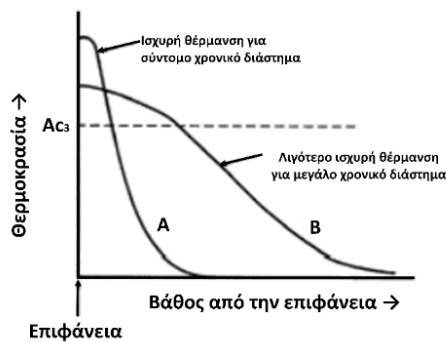
Το βάθος βαφής, καθώς επίσης και το βάθος της **θερμικά επηρεασμένης ζώνης (HAZ)**, μπορούν να προβλεφθούν με ασφάλεια με κατάλληλη επιλογή των βασικών παραμέτρων της θερμικής κατεργασίας (θερμοκρασία και χρόνος κατεργασίας) [23]. Το βάθος βαφής χαρακτηρίζεται από σκληρότητα μεγαλύτερη των 550 HV και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1-2 mm, αλλά μπορεί να φθάσει μέχρι 6-8 mm, αναλόγως των συνθηκών κατεργασίας και της χημικής σύστασης του χάλυβα. Έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία για σύντομο χρονικό διάστημα, έχει ως αποτέλεσμα:

- Πολύ μικρό βάθος επιφανειακού στρώματος ωστενιτοποίησης.
- Πολύ μικρό πάχους στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη.

Έκθεση σε χαμηλή θερμοκρασία για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχει ως αποτέλεσμα:

- Μεγαλύτερο βάθος βαφής.
- Μεγάλο πάχος θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

Στην εικόνα 2.31, παρουσιάζονται ποιοτικά, ως συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια, οι κατανομές της θερμοκρασίας κατά την επιφανειακή θέρμανση με διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.

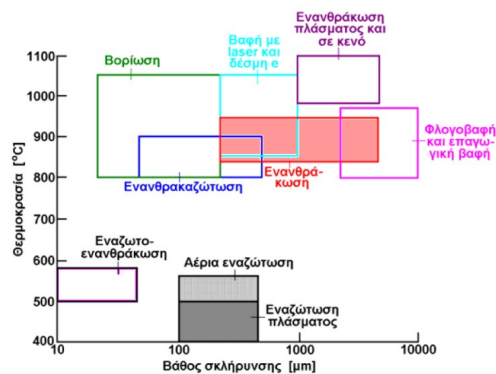


Εικόνα 2.31: Μεταβολή της κατανομής θερμοκρασίας για δυο διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας, [23]

Τεχνικές Επιφανειακής Βαφής Χαλύβων

Η επιφανειακή βαφή εφαρμόζεται σε κοινούς ανθρακούχους χάλυβες και μικροκραματωμένους χάλυβες με ποσοστό άνθρακα 0.3-0.6%. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται το χαμηλό της κόστος και η δυνατότητα κατεργασίας σε σχετικά μεγάλο βάθος από την επιφάνεια. Τα κυριότερα μειονεκτήματά της είναι οι περιορισμοί που τίθενται από τη χημική σύσταση των χάλυβων, καθώς και η πιθανότητα διαστασιακής στρέβλωσης του αντικειμένου.

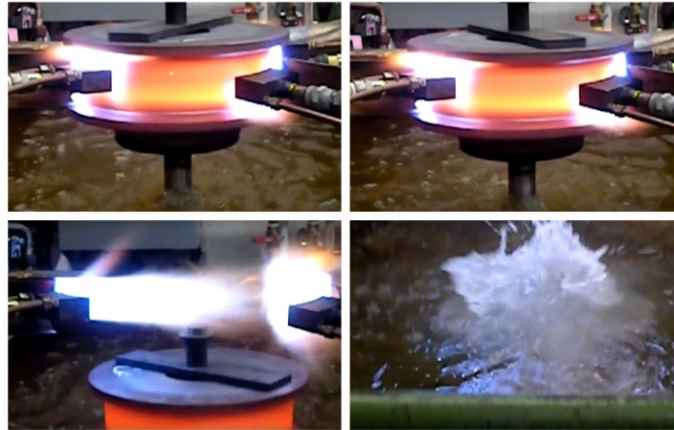
Η επιφανειακή θέρμανση γίνεται συνήθως με χρήση επαγωγικών πηνίων (επαγωγική βαφή, induction hardening), φλόγιστρων (φλογοβαφή, flame hardening), αντιστάσεις υψίσυχνου ρεύματος (high frequency resistance hardening), δεσμών υψηλής ενέργειας (laser transformation hardening και electron beam hardening). Η ταχεία ψύξη γίνεται με ψεκασμό ή βύθιση του αντικειμένου σε νερό ή λάδι. Στην Εικόνα 2.32, αναφέρονται τα εύρη των θερμοκρασιών όλων των επιφανειακών θερμικών κατεργασιών.



Εικόνα 2.32: Εύρος θερμοκρασιών-βάθους σκλήρυνσης συναρτήσει θερμικής επιφανειακής κατεργασίας, [23]

2.4.1 Φλογοβαφή (Flame Hardening)

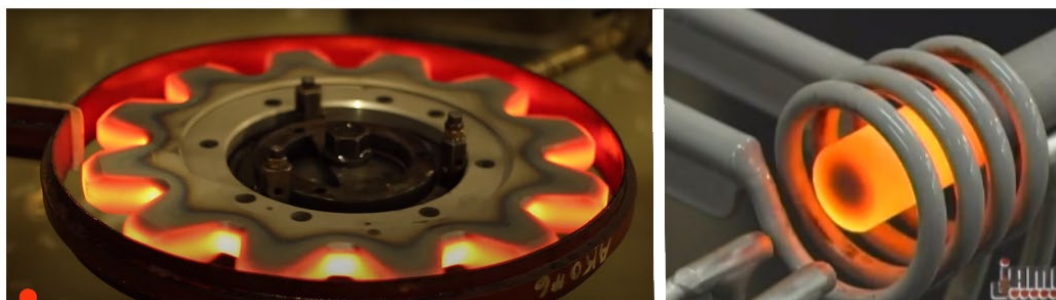
Κατά τη φλογοβαφή ο χάλυβας θερμαίνεται επιφανειακά με φλόγα που δημιουργείται από καύση μείγματος καυσίμου - οξυγόνου (π.χ. ασετυλίνη-οξυγόνο). Ακολουθεί ψύξη με αυτοματοποιημένες διατάξεις. Η Φλογοβαφή συνιστάται σε αντικείμενα πολύπλοκης γεωμετρίας, σε χυτοσιδηρά εξαρτήματα και σε ορισμένες περιπτώσεις σε οδοντωτούς τροχούς (Εικόνα 2.33).



Εικόνα 2.33: Διαδικασία φλογοβαφής. (α) και (β) Περιστροφή του κατεργαζόμενου τεμαχίου προς ομοιόμορφη θέρμανση, (γ) και (δ) Απόψυξη Τεμαχίου σε μπάνιο νερού [24]

2.4.2 Επαγωγική Σκλήρυνση (Induction Hardening)

Κατά την επαγωγική σκλήρυνση το υλικό τοποθετείται κατάλληλα μέσα σε ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής προκαλεί υψίσυχα επαγωγικά ρεύματα, τα οποία διεισδύουν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του υλικού, θερμαίνοντάς το τοπικά. Υψηλή συχνότητα ρεύματος στο πηνίο (500kHz) προκαλεί μικρό βάθος βαφής (0,5mm), ενώ χαμηλή συχνότητα ρεύματος στο πηνίο της τάξης του 1kHz είναι υπεύθυνο για βαφή βάθους 5mm. Η θέρμανση πάνω από την θερμοκρασία A_3 προκαλεί ωστενιτοποίηση της επιφανειακής στιβάδας του υλικού και κατόπιν ακολουθεί απότομη ψύξη για τη σκλήρυνση της επιφάνειας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη σκλήρυνση εξαρτημάτων απλής γεωμετρίας, ολισθητήρων εργαλειομηχανών, κ.λπ (Εικόνα 2.34).



Εικόνα 2.34: Παραδείγματα Επαγωγικής Σκλήρυνσης (α) Οδοντωτός Τροχός [25] , (β) Άξονας [26]

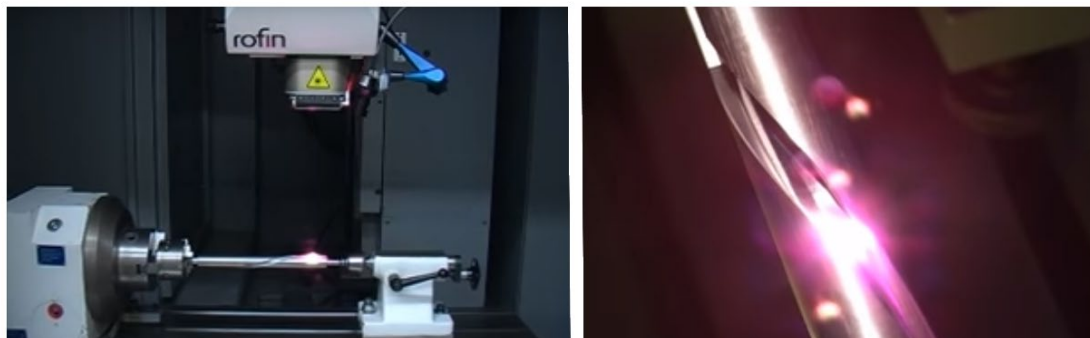
2.4.3 Βαφή με αντιστάσεις (high frequency resistance hardening)

Η θέρμανση σε βαφή με αντιστάσεις πραγματοποιείται με πρόσδοση θερμότητας επιλεκτικά στο επιθυμητό σημείο προς σκλήρυνση. Έπειτα ακολουθεί ταχεία ψύξη του χάλυβα με νερό. Η συγκεκριμένη μέθοδος προτιμάται λόγω μικρού κόστους.

1) Επιφανειακή βαφή με δέσμη LASER (laser transformation hardening)

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το κατεργαζόμενο υλικό ακτινοβολείται με δέσμη laser υψηλής πυκνότητας ισχύος και στη συνέχεια ψύχεται στον αέρα (Εικόνα 2.35). Πριν την κατεργασία απαιτείται μια προεργασία βελτίωσης της απορροφητικής ικανότητας της επιφάνειας (π.χ. αμμοβολή, επικάλυψη με γραφίτη). Πρόκειται για μη συμβατική μέθοδο επιφανειακής σκλήρυνσης χαλύβων, η οποία παρουσιάζει μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον εξαιτίας των παρακάτω πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις συμβατικές επιφανειακές κατεργασίες:

- Μεγάλη ποσά ενέργειας ανά επιφάνεια.
- Μεγάλος ρυθμός απόψυξης στον αέρα (Αυτοβαφή).
- Δυνατότητα μεγάλων ταχυτήτων κατεργασίας εξαιτίας αυτοματοποίησης της.
- Συνεχής επεξεργασία τεμαχίων χωρίς διακοπές.
- Δυνατότητα κατεργασίας επιφανειών πολύπλοκης γεωμετρίας.



Εικόνα 2.35: Διαδικασία επιφανειακής θερμικής κατεργασίας με δέσμη laser σε άξονα πολύπλοκης γεωμετρίας [27]

2.4.4 Επιφανειακή βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων (Electron Beam Hardening)

Η σκλήρυνση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι παρόμοια με άλλες διεργασίες θερμικής επεξεργασίας, όπως το υλικό που πρόκειται να σκληρυνθεί θερμαίνεται στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποψύχεται. Η σκλήρυνση δέσμης ηλεκτρονίων ανήκει, όπως και η σκλήρυνση δέσμης laser, στην ομάδα επεξεργασίας που είναι γνωστή ως θερμικές κατεργασίες μικρού κύκλου. Σε σύγκριση με όλες τις άλλες συμβατικές διαδικασίες, οι κύκλοι θερμοκρασίας-χρόνου χαρακτηρίζονται από σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης (κοντά στη θερμοκρασία τήξης) καθώς και σημαντικά υψηλότερη θερμότητα, σύντομοι χρόνοι ωστενιτοποίησης (0,1 5 δευτερόλεπτα) και ρυθμούς απόψυξης.

2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΘΕΡΜΟΧΗΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ

Σε πολλές εφαρμογές οι θερμικές κατεργασίες των χαλύβων συνοδεύονται από εμπλουτισμό της επιφάνειάς τους με κάποιο χημικό στοιχείο (C, N, Cr, B, Al, Zn και Si), μέσω του μηχανισμού της διάχυσης [28]. Σε αυτές τις περιπτώσεις αλλάζει η χημική σύσταση της επιφάνειας του χάλυβα και πρόκειται για θερμοχημικές μέθοδοι κατεργασίας των χαλύβων-εμποτισμοί (thermochemical surface treatment). Ο εμπλουτισμός επιταχύνεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και γίνεται με μηχανισμούς διάχυσης σε στερεή κατάσταση.

Το φαινόμενο περιγράφεται από το *δεύτερο νόμο του Fick*, για διάχυση σε μη μονική κατάσταση. Το προς κατεργασία αντικείμενο τοποθετείται στον αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας, όπου βρίσκεται σε άμεση επαφή με το φορέα του στοιχείου διάχυσης που εισάγεται υπό τη μορφή σκόνης (pack cementation), αερίου ή τηγμένου άλατος. Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες θερμοχημικές κατεργασίες σε βιομηχανική κλίμακα είναι:

- Ενανθράκωση (carburizing)
- Εναζώτωση (nitriding)
- Ενανθρακαζώτωση (Carbonitriding)
- Βορίωση (boronizing)

2.5.1 Ενανθράκωση (Carburizing)

Η ενανθράκωση είναι η κατεργασία προσθήκης άνθρακα στην επιφάνεια των χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, [22] σε θερμοκρασίες (γενικά μεταξύ 850°C και 950 °C) στις οποίες ο ωστενίτης (με υψηλότερη ικανότητα διαλυτότητας του άνθρακα) είναι η σταθερή κρυσταλλική δομή [22]. Η σκλήρυνση του συστατικού επιτυγχάνεται με βαφή. Κατά τη απόψυξη, ένα μαρτενσιτικό στρώμα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (με πολύ καλή αντοχή σε κόπωση και φθορά) εμποτίζεται σε μία καρδιά χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Οι χάλυβες που δύναται να υποστούν ενανθράκωση έχουν συνήθως περιεκτικότητα σε άνθρακα περίπου 0,2% κ.β., με την περιεκτικότητα του άνθρακα στο υπόστρωμα ενανθράκωσης να είναι μεταξύ 0,8% και 1,0% κ.β.

Μέθοδοι Ενανθράκωσης

- Στερεά ενανθράκωση (Pack Carburizing)
- Υγρά Ενανθράκωση (Liquid Carburizing)
- Αέρια Ενανθράκωση (Gas Carburizing)
- Ενανθράκωση εν κενώ (Vacuum Carburizing)
- Ενανθράκωση Πλάσματος (Plasma-Ion Carburizing)

Αυτές οι μέθοδοι εισάγουν άνθρακα χρησιμοποιώντας μια ατμόσφαιρα (ατμοσφαιρικό αέριο, πλάσμα και κενό), υγρά (λουτρό άλατος) ή στερεές ενώσεις (σκόνη). Η πλειοψηφία των τεμαχίων που έχουν υποστεί ενανθράκωση υποβάλλονται σε αέρια ενανθράκωση χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο, προπάνιο ή βουτάνιο. Οι ενανθρακώσεις εν κενώ ή πλάσματος είναι χρήσιμες λόγω της απουσίας οξυγόνου στην ατμόσφαιρα του φούρνου. Η στερεά και η αέρια ενανθράκωση έχουν μικρή εμπορική σημασία, αλλά εξακολουθούν να γίνονται περιστασιακά.

Ορισμός Βάθους Ενανθράκωσης (Depth Case)

Σχετικά με το βάθος εμποτισμού όσον αφορά την περιεκτικότητα σε άνθρακα οι πιο κοινά αποδεκτοί ορισμοί είναι [29]:

Συνολικό βάθος εμποτισμού (Total Case Depth): Το βάθος στο οποίο η περιεκτικότητα σε άνθρακα του χάλυβα είναι 0,04% πάνω από την περιεκτικότητα σε άνθρακα της καρδιάς του χάλυβα. Το συνολικό βάθος εμποτισμού είναι το σημείο στο οποίο οι διαφορές στις χημικές ή φυσικές ιδιότητες της εναπόθεσης και της καρδιάς δεν μπορούν πλέον να διακριθούν. Πολλοί μεταλλουργοί καθορίζουν το συνολικό βάθος εμποτισμού με χημική προσβολή (nital) ενός δείγματος χάλυβα και μετρούν τη ζώνη που επηρεάζεται από το διαβρωτικό.

Ενεργό βάθος εμποτισμού (Effective Case Depth): Το βάθος στο οποίο η περιεκτικότητα σε άνθρακα ενός ελαφρά κραματωμένου χάλυβα είναι 0,40% ή περίπου 0,30% για τους μέτρια ή υψηλά κραματωμένους χάλυβες. Δεδομένου ότι συχνά είναι χρονοβόρα η μέτρηση της συγκέντρωσης άνθρακα ως συνάρτηση του βάθους σε ένα ενανθρακωμένο συστατικό για να προσδιοριστεί το ενεργό βάθος ενανθράκωσης, συχνά χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές (όπως η μικροσκληρομέτρηση-microhardness).

Σε ορισμένες καταστάσεις με πολύ μεγάλα βάθη εμποτισμού, η σκληρότητα μετράται απευθείας στις κλίμακες A ή C. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι ορισμοί.

Ενεργό βάθος εμποτισμού (Η.Π.Α.) (Effective Case Depth-US(A): Η απόσταση από την επιφάνεια (σε ίντσες) έως ένα σημείο εντός ενανθρακωμένης ζώνης όπου η σκληρότητα είναι 50 HRC (542 Knoop ή 513 HV). Αυτή η μέτρηση γίνεται σε μια διατομή με τεχνικές μικροσκληρομέτρησης με έναν άξονα Knoop ή Vickers. Αυτές οι τιμές στη συνέχεια μετατρέπονται σε σκληρότητα Rockwell C, αν χρησιμοποιείται φορτίο 500 γραμμαρίων κατά το πρότυπο ASTM E384. Για ενδιάμεσες τιμές μετατροπής απαιτείται (γραμμική) παρεμβολή. Το ενεργό βάθος εμποτισμού εξαρτάται από τη δυναμικότητα του άνθρακα (Carbon Potential) και την εμβαπτότητα της ενανθρακωμένης περιοχής, παρόλα αυτά 50 HRC ισοδυναμούν τυπικά με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0,40% για τους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες και 0,30% για τους μέτρια και υψηλά κραματωμένους χάλυβες.

Ενεργό βάθος εμποτισμού (Διεθνώς) (Effective Case Depth-International): Η απόσταση από την επιφάνεια (σε χιλιοστά) σε ένα σημείο εντός της ενανθράκωσης όπου η σκληρότητα είναι 550 HV (περίπου 52,5 HRC). Η μέτρηση αυτή γίνεται με μια μέθοδο μικροσκληρομέτρησης Vickers με ένα προκαθορισμένο φορτίο 1kg και δεν μετατρέπεται σε Rockwell C. Όπως και στον ορισμό κατά Η.Π.Α. το ενεργό βάθος εμποτισμού εξαρτάται από την εμβαπτότητα της ενανθρακωμένης ζώνης και τη δυναμικότητα του άνθρακα. Για τους εξαιρετικά κραματοποιημένους χάλυβες που σκληρύνουν την περίπτωση, η περιεκτικότητα σε άνθρακα για 550HV κυμαίνεται συνήθως από 0,25-0,30%. Για τις ποιότητες μέτριων κραματωμένων χαλύβων, είναι περίπου 0,30-0,35% C, και για τους χαμηλά κραματωμένους, είναι περίπου 0,35-0,40% C.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι εάν δεν δύναται να προσδιοριστεί ούτε το συνολικό ούτε το ενεργό βάθος εμποτισμού, ένας «κανόνας» για τον προσδιορισμό του συνολικού

βάθους ενανθράκωσης, δεδομένου του ενεργού βάθους είναι να πολλαπλασιαστεί με 1.5 σε αντίθετη περίπτωση αν είναι γνωστό το συνολικό βάθος ενανθράκωσης, διαιρώντας με 1.5 υπολογίζεται το ενεργό βάθος εμποτισμού. Η ποιότητα του χάλυβα, η χημική σύσταση και η σκληρότητα του αλλά και το βάθος εμποτισμού μπορούν να επηρεάσουν αυτό τον συντελεστή. Σε περιπτώσεις εναζώτωσης, ενανθρακαζώτωσης, βορίωσης αλλά και επαγωγικής βαφής ή φλογοβαφής εφαρμόζονται διάφοροι μέθοδοι προσδιορισμού του βάθους εμποτισμού οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως οπτικές, χημικές ή μηχανικές. Τα τμήματα δοκιμίων ή τα αντιπροσωπευτικά δείγματα που θα υποστούν μηχανικές δοκιμές είναι συνήθως της ίδιας ποιότητας χάλυβα που υπέστη επιφανειακή βαφή και ιδανικά από την ίδια θερμότητα του χάλυβα. Τουλάχιστον, πρέπει να γνωρίζουμε τη χημική σύσταση ή τις ιδιότητες. Ορισμένες εταιρείες, ωστόσο, προτιμούν να χρησιμοποιούν ένα μόνο χάλυβα (π.χ., SAE 8620 για την ενανθράκωση) και να εκτελούν δοκιμές σε αυτό για συγκριτικούς σκοπούς με το πρόσθετο πλεονέκτημα της απόκτησης γνώσεων σχετικά με την απόδοση του φούρνου/κλιβάνου με την πάροδο του χρόνου.

Οπτικές Μέθοδοι

Η οπτική ερμηνεία εμπίπτει σε δύο ευρείες κατηγορίες: μακροσκοπική και μικροσκοπική, και οι δύο είναι πολύτιμες [29].

Μακροσκοπικές Τεχνικές

Οι μακροσκοπικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της διαδικασίας από τους τεχνίτες του εργαστηρίου ως ρουτίνα, κυρίως λόγω της απλότητας και του μικρού χρόνου που απαιτείται για τον προσδιορισμό. Συνήθως γίνονται χρησιμοποιώντας το γυμνό μάτι, ένα μεγεθυντικό φακό ή με ένα στερεοσκοπικό μικροσκόπιο μέχρι τις μεγεθύνσεις των 40X. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μπορεί να βελτιωθεί με συσχέτιση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του βάθους ενανθρακώσεως των προς κατεργασία δοκιμίων.

Οι οπτικές μέθοδοι εφαρμόζονται συνήθως σε βαμμένα δοκίμια. Τα δείγματα που έχουν υποστεί επαγωγική βαφή ή φλογοβαφή είναι πρωταρχικά παραδείγματα, καθώς συνήθως έχουν εξαιρετική αντίθεση μεταξύ επιφάνειας και καρδιάς όταν έχουν υποστεί χημική προσβολή (π.χ. 10% Nital). Άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χρήση ράβδων θραύσης, η οποία είναι ένας αποτελεσματικός και γρήγορος τρόπος για να δοκιμάσετε κάθε φορτίο επιφανειακής κατεργασίας. Το βάθος της σκλήρυνσης είναι καλά καθορισμένο και ερμηνεύεται εύκολα με μεθόδους θραύσης. Το εξωτερικό έχει μια επίπεδη αλλά ελαφρώς κοκκώδη εμφάνιση που συνδέεται με την ψαθυρότητα, ενώ το εσωτερικό έχει μια ακανόνιστη, μάλλον ινώδη εμφάνιση που σχετίζεται με καλή αντοχή σε θραύση. Το σημαντικό σημείο είναι ότι η θραύση αλλάζει από σημείο σε σημείο απότομα. Το βάθος ενανθρακώσεως μπορεί να μετρηθεί με την κλίμακα Brinell ή με κλίμακα σε στερεοσκοπικό μικροσκόπιο. Εάν η καρδιά είναι μαλακή, η επιφάνεια θραύσης θα παρουσιάζει καλή αντίθεση μεταξύ επιφάνειας και καρδιάς. Εάν η καρδιά είναι σκληρή, εκθέτοντας τη θραύση σε μια θερμή πλάκα μπορεί να βελτιωθεί η αντίθεση.

Η μέθοδος M_s είναι μια άλλη, αλλά περισσότερο εμπλεκόμενη, οπτική τεχνική. Βασίζεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία εκκίνησης μαρτενσίτη (M_s) ποικίλλει ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα του χάλυβα. Η σκλήρυνση (τυπικά σε λουτρό άλατος) και

στη συνέχεια η παραμονή του χάλυβα για ένα μικρό χρονικό διάστημα στη θερμοκρασία M_s (που αντιστοιχεί σε δεδομένη περιεκτικότητα του άνθρακα), επαναφέρει τον σχηματισμένο μαρτενσίτη σε όλα τα επίπεδα χαμηλού άνθρακα. Η επακόλουθη βαφή σε νερό, μετασχηματίζει τον ωστενίτη που υπάρχει σε όλα τα επίπεδα υψηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα του χάλυβα, σε μη επαναφερμένο μαρτενσίτη. Η στίλβωση και η χημική προσβολή αποκαλύπτουν μια απότομη γραμμή διαχωρισμού μεταξύ του επαναφερμένου και μη-επαναφερμένου μαρτενσίτη (Εικόνα 2.36).



Εικόνα 2.36: Διαχωριστική γραμμή μαρτενσίτη- επαναφερμένου μαρτενσίτη κατά τη δοκιμή M_s , [30]

Μικροσκοπικές Τεχνικές

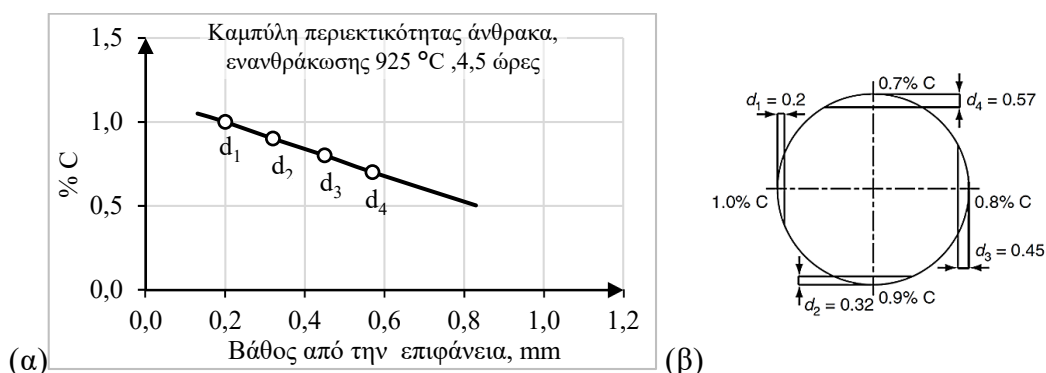
Οι μικροσκοπικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό του βάθους ενανθρακώσεως [31]. Προϋποθέτουν ότι τα δείγματα προς εξέταση θα υποστούν πρώτα, ολοκληρωμένο στάδιο στίλβωσης και χημικής προσβολής. Ο προσδιορισμός του ενεργού βάθους εμποτισμού βαμμένων δειγμάτων βασίζεται σε σύγκριση με μεταλλογραφικές δομές που βρέθηκαν ισοδύναμες με 50 HRC με άλλες μεθόδους. Μία δομή που αποτελείται περίπου από 85% επαναφερμένο μαρτενσίτη και 15% μικτές μετασχηματιζόμενες φάσεις συχνά αντιστοιχεί σε τιμή σκληρότητας 50 HRC. Το συνολικό βάθος εμποτισμού είναι η γραμμή που οριοθετεί την επιφάνεια με την καρδιά (μεταξύ σκοτεινών και ανοικτών περιοχών μετά τη χημική προσβολή). Αυτή η γραμμή δεν διακρίνεται εύκολα σε κραματομένους χάλυβες. Η ακρίβειά τους εξαρτάται από τη φύση των μικροδομών επιφάνειας και καρδιάς. Για παράδειγμα, το βάθος ενανθρακώσεως είναι ευκολότερο να αξιολογηθεί σε ένα μη βαμμένο δείγμα, ενώ οι εναζωτωμένες επιφάνειες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Είναι σημαντικό η τομή του δείγματος να είναι κάθετη. Διαφορετικά, πρέπει να είναι γνωστή η γωνία κλίσης. Ίσως το συχνό βήμα που παραβλέπεται, είναι να εξασφαλιστεί καλή συγκράτηση άκρων με κατάλληλες διαδικασίες.

Χημικές Μέθοδοι

Αυτές οι μέθοδοι συνήθως βασίζονται στην ανάλυση των τσιπ από τις στρογγυλές ράβδους. Πραγματοποιείται ανάλυση λεπτών στρωμάτων της επιφάνειας μέσω τórνευσης. Τα δοκίμια πρέπει να έχουν ενανθρακωθεί κατά τρόπο, αντιπροσωπευτικό της μεθόδου. Εάν τα δοκίμια έχουν υποστεί βαφή μετά την ενανθράκωση, θα πρέπει να υποστούν και επαναφορά σε θερμοκρασία περίπου 595° - 650°C και να ευθυγραμμιστούν με μέγιστη ακτινική απόκλιση 0.04mm πριν την μηχανουργική κατεργασία τórνευσης. Ο χρόνος παραμονής στη θερμοκρασία πρέπει διατηρηθεί στο ελάχιστο για να αποφευχθεί η υπερβολική διάχυση του άνθρακα ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα διαστήματα τórνευσης μεταξύ 0,05 και 0,25 mm τυπικά επιλέγονται ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια

και το αναμενόμενο βάθος εμποτισμού. Τα λεπτά στρώματα από κάθε πάσο πρέπει να διατηρούνται ξεχωριστά και να αναλύονται μεμονωμένα για την περιεκτικότητα σε άνθρακα σε κατάλληλη συσκευή. Σε περιπτώσεις ειδικά μεγάλου βάθους ενανθράκωσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κωνικές ράβδοι. Κατασκευάζονται μηχανικά και πραγματοποιείται φασματογραφική ανάλυση κατά το μήκος τους σε απόσταση τουλάχιστον μιας διαμέτρου.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η εμβαπτότητα των ενανθρακωμένων χαλύβων. Τυποποιημένα δείγματα κατά την δομική Jominy ενανθρακώνονται σε μέσο ενανθράκωσης που θα έχει υψηλή δυναμικότητα ο άνθρακας για επαρκή χρόνο, για να ληφθεί ένα ενανθρακωμένο στρώμα με το επιθυμητό βάθος. Εκτός από τα δείγματα Jominy, δύο ράβδοι του ίδιου χάλυβα και ίδιας θερμότητας, με το ίδιο φινίρισμα επιφάνειας, και ίδιες διαστάσεις (διάμετρος 25 mm) επίσης ενανθρακώνονται υπό πανομοιότυπες συνθήκες. Αυτές οι ράβδοι χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση της καμπύλης ποσοστού του άνθρακα που δείχνεται στο εικόνα 2.37(α), η οποία παράγεται με χημική ανάλυση των λεπτών στρωμάτων που λαμβάνονται από τη τόννευση στρώματος σε διαφορετικών ενανθρακωμένων στρωμάτων σε διαφορετικά πάχη στρωμάτων. Με τον τρόπο αυτό, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.37(β), βρέθηκαν οι ακόλουθες περιεκτικότητες σε άνθρακα ως συνάρτηση του βάθους ενανθράκωσης:



Εικόνα 2.37: (α) Μετρούμενη περιεκτικότητα άνθρακα μετά από αέρια ενανθράκωση στους 925°C για 4.5 ώρες, (β) Τόννευση ενανθρακωμένων δοκιμίων κατά Jominy [32]

Μηχανικές μέθοδοι

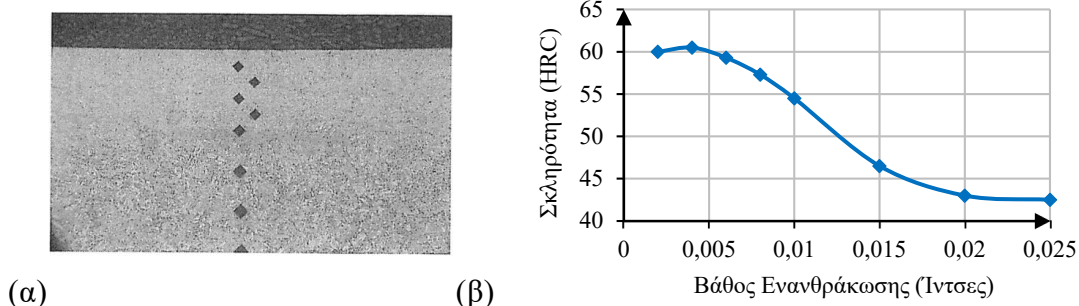
Αυτές οι μέθοδοι προτιμώνται για τον ακριβή προσδιορισμό του ενεργού βάθους ενανθράκωσης και για τον προσδιορισμό του συνολικού βάθους ενανθράκωσης σε τμήματα που έχουν υποστεί επιφανειακή σκλήρυνση. Η χρήση της βασίζεται στην απόκτηση και καταγραφή τιμών σκληρότητας σε συγκεκριμένα διαστήματα εντός της ενανθρακωμένης περιοχής. Θεωρείται ότι, έχει εισχωρήσει η σκλήρυνση στα δοκίμια εάν το επίπεδο σκληρότητας δεν πέσει κάτω από την αντίστοιχη τιμή του ενεργού βάθους ενανθράκωσης. Πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην προετοιμασία των δοκιμίων ώστε να υπολογιστεί ορθά το βάθος ενανθράκωσης με οποιαδήποτε από τις μηχανικές μεθόδους. Μπορούν να εισαχθούν σοβαρά σφάλματα αν το δείγμα δεν έχει προετοιμαστεί σωστά. Στην περίπτωση των μετρήσεων μικροσκληρότητας, είναι σημαντικό να αποφευχθεί η κοπή ή η λείανση των εξογκωμάτων. Είναι πάντα μια καλή ιδέα να χρησιμοποιηθεί ένα διαλυτικό για ανίχνευση των εξογκωμάτων ως γενική προφύλαξη, παρόλο που αυτό σχεδόν δεν γίνεται ποτέ στην πράξη. Εάν το δοκίμιο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί απευθείας

σε κλίμακα Rockwell, η τεχνική αποκοπής που γίνεται σε αυτό είναι κρίσιμη. Ο διεισδυτής πρέπει να είναι κάθετος προς την επιφάνεια, σε άλλη περίπτωση δεν πρέπει να υπάρχει απόκλιση μεγαλύτερη των 2 μοιρών στην καθετότητά τους. Διαφορετικά, οι ενδείξεις θα είναι λανθασμένες.

Σε περιπτώσεις μικροσκληρότητας, η επιφάνεια των δοκιμίων προς μικροσκληρομέτρηση αποτελεί σημαντικό παράγοντα στα τυχόν σφάλματα που μπορεί να προκύψουν. Για ακριβείς ενδείξεις, όπου το φορτίο του διεισδυτή είναι της τάξης των 200 γραμμαρίων, η δοκιμή μικροσκληρομέτρησης μπορεί να εκτελεστεί αν η επιφάνεια είναι στιλβωμένη με χαρτί 30μm. Γενικά, όσο πιο μικρό είναι το φορτίο τόσο μικρότερη τραχύτητα απαιτείται κατά το στάδιο της προετοιμασίας των δειγμάτων. Επίσης, η μικροσκληρομέτρηση πρέπει να ξεκινήσει αρκετά κάτω από την επιφάνεια της ενανθράκωσης για να εξασφαλισθεί επαρκής απόσταση μεταξύ των αποτυπωμάτων και αποφυγή αποκόλλησης του στρώματος ενανθράκωσης από το κύριο μέταλλο.

Ένα συνηθισμένο σφάλμα είναι να επιβάλλεται μεγάλο φορτίο από το διεισδυτή στα άκρα του δοκιμίου, που έχει ως αποτέλεσμα κάμψη στα άκρα του δοκιμίου και λανθασμένη ένδειξη λόγω μη καθετότητας διεισδυτή-επιφανείας. Ένα άλλο συνηθισμένο σφάλμα είναι να συγκεντρώνονται πολλές σκληρομετρήσεις κοντά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζονται οι εκάστοτε ενδείξεις από τις παραμορφώσεις (πλαστικές) που έχουν δημιουργήσει τα διπλανά αποτυπώματα.

Μία τυπική «διαδρομή» μικρο-σκληρομετρήσεων κατά Vickers ή Knoop (500 γραμμαρίων) θα είχε μια αρχική ένδειξη στα 0,06 mm (0,0025 ίντσες) και μετέπειτα ενδείξεις σε διαστήματα 0,13 mm (0,005 ίντσες) έως 0,75 mm (0,030 ίντσες) και έπειτα σε 0,25 mm (0,010-ίντσών) έως ότου παρατηρηθούν τιμές πάνω και κάτω από την τιμή 513 HV. Μπορεί να γίνει παρεμβολή ή επιπλέον εσοχές για να προσδιοριστεί η ακριβής τιμή (Εικόνα 2.38).



Εικόνα 2.38: Παράδειγμα επιφανειακής ενανθράκωσης σε SAE 9310 (α) Διαδρομή μικροσκληρομετρήσεων (β) Προφίλ σκληρότητας συναρτήσει βάθους ενανθράκωσης.

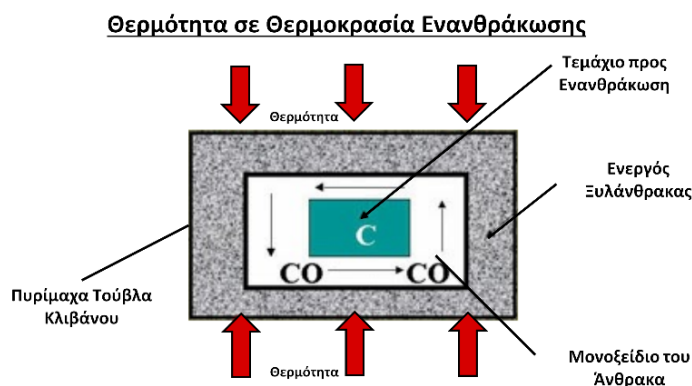
[33]

Επίδραση των κραματικών στοιχείων στην ενανθράκωση

- Το Mg (έως 8%) προκαλεί αύξηση της σκλήρυνσης και της τάσης επιφανειακής ρηγματώσης.
- Το Ni (έως 5%) παρεμποδίζει την αύξηση του μεγέθους κόκκων.
- Το Cr συντελεί στην αύξηση της σκληρότητας, της αντοχής σε φθορά και του μεγέθους κόκκων.
- Το Mo (έως 1%) ευνοεί τη δημιουργία ψαθυρών καρβιδίων στα όρια κόκκων

2.5.1.1 Στερεά Ενανθράκωση (Pack Carburizing)

Η στερεά ενανθράκωση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το μονοξείδιο του άνθρακα που προέρχεται από μια στερεή ένωση αποσυντίθεται στην μεταλλική επιφάνεια σε πρωτογενή άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα (Εικόνα 2.39). Εν συνεχεία ο πρωτογενής άνθρακας, απορροφάται στο μέταλλο [34]. Το διοξείδιο του άνθρακα που προκύπτει από αυτή την αποσύνθεση αντιδρά αμέσως με το ανθρακούχο υλικό που υπάρχει στην στερεά ενανθρακωμένη ένωση και παράγει φρέσκο μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτή η αντίδραση ενισχύεται από ενεργοποιητές ή καταλύτες, όπως το ανθρακικό βάριο (BaCO_3) και το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3), που υπάρχουν στην ένωση ενανθράκωσης. Αυτές οι ουσίες αντιδρούν με άνθρακα για να σχηματίσουν πρόσθετο μονοξείδιο του άνθρακα και ένα οξείδιο της ενεργοποιημένης ένωσης. Το τελευταίο με τη σειρά του, αντιδρά εν μέρει με διοξείδιο του άνθρακα για την επαναδημιουργία ανθρακικού άλατος. Έτσι, σε ένα κλειστό σύστημα, ο ενεργοποιητής συνεχώς χρησιμοποιείται και επανασηματίζεται. Η ενανθράκωση συνεχίζεται όσο υπάρχει αρκετός άνθρακας για να αντιδράσει με την περίσσεια διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 2.39: Σχηματική αναπαράσταση διεργασίας στερεάς ενανθράκωσης, [35]

Η στερεά ενανθράκωση δεν αποτελεί πλέον σημαντική εμπορική διαδικασία. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση από περισσότερο ελεγχόμενες και ταυτόχρονα λιγότερο εξαρτώμενες από εργατικό δυναμικό διαδικασίες, όπως είναι αυτές της αέριας και υγρής ενανθράκωσης. Εν τούτοις, το πλεονέκτημα του κόστους εργασίας που μπορεί να έχουν η αέρια ή η υγρή ενανθράκωση έναντι της στερεάς μπορεί να έχει εξουδετερωθεί αν το τεμάχιο απαιτεί επιπρόσθετα στάδια όπως ο καθαρισμός και η εφαρμογή προστατευτικών επικαλύψεων. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες έχουν επίσης οδηγήσει σε μειωμένη χρήση της στερεάς ενανθράκωσης. Έχει ακόμη εφαρμογή σε ορισμένες εξειδικευμένες χρήσεις, ωστόσο. Μεταξύ των κύριων πλεονεκτημάτων της στερεάς ενανθράκωσης είναι:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία φούρνων επειδή παράγει το δικό της ενανθρακωτικό περιβάλλον.
- Είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις όπου θέλουμε αργό ρυθμό απόψυξη από τη θερμοκρασία ενανθράκωσης, μια διαδικασία που μπορεί να είναι ευνοϊκή για εξαρτήματα που πρόκειται να κατεργαστούν μηχανουργικά μετά την ενανθράκωση και πριν από τη βαφή. Κύριο μειονέκτημα της στερεάς ενανθράκωσης είναι το λιγότερο καθαρή και λιγότερο βολική από άλλες κατεργασίες ενανθράκωσης. Άλλα μειονεκτήματα που γενικά σχετίζονται με τη στερεά ενανθράκωση περιλαμβάνουν:

- Δεν είναι κατάλληλη για την παραγωγή επιφανειακού βάθους ενανθράκωσης όπου οι απαιτήσεις σε ανοχές είναι αυστηρές
- Δεν μπορεί να παράσχει ο βαθμός ευκαμψίας και ακρίβειας του ελέγχου επί της επιφανειακής περιεκτικότητας και ποιότητας σε άνθρακα που μπορεί να επιτευχθεί με την αέρια ενανθράκωση
- Δεν είναι κατάλληλη για γρήγορη απόψυξη. Έτσι, απαιτείται επιπλέον χειρισμός και επεξεργασία για τη διαδικασία της σκλήρυνσης
- Απαιτείται περισσότερος χρόνος επεξεργασίας για τη στερεά ενανθράκωση από ότι για την αέρια ή την υγρά ενανθράκωση εξαιτίας της ανάγκης θέρμανσης και ψύξης της επιπλέον θερμικής μάζας που σχετίζεται με την ένωση και το δοχείο.
- Απαιτείται μεγάλος αριθμός δυναμικού προσωπικού.

Ενανθρακωτικές Ενώσεις

Οι κοινές εμπορικές ενανθρακωτικές ενώσεις είναι επαναχρησιμοποιήσιμες και περιέχουν 10 έως 20% μέταλλα αλκαλίων ή αλκαλικών γαιών συνδεδεμένα με ξυλάνθρακα σκληρού ξύλου ή με κωκ από έλαιο, πίσσα ή μελάσα [34]. Το ανθρακικό βάριο είναι ο κύριος ενεργοποιητής, που συνήθως περιλαμβάνει περίπου το 50 έως 70% της συνολικής περιεκτικότητας σε ανθρακικό άλας. Το υπόλοιπο του ενεργοποιητή συνήθως αποτελείται από ανθρακικό ασβέστιο, αν και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ανθρακικό νάτριο και ανθρακικό κάλιο. Το ανθρακικό βάριο, το οποίο σήμερα χαρακτηρίζεται από τους κυβερνητικούς κανονισμούς ως κίνδυνο για την υγεία λόγω της τοξικότητάς του και των προβλημάτων διάθεσης που παρουσιάζει, σταδιακά καταργείται από τους κατασκευαστές των ΗΠΑ ως καταλύτης σε κατεργασίες στερεάς ενανθράκωσης. Ο ξυλάνθρακας είναι πιο δραστικός από τον οπτάνθρακα ως πηγή άνθρακα για τη στερεά ενανθράκωση. Παρ' όλα αυτά, ο οπτάνθρακας προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως ελάχιστη συρρίκνωση, καλή θερμική αντοχή και καλή θερμική αγωγιμότητα. Συνεπώς, οι περισσότερες δραστικές ενανθρακωτικές ενώσεις περιέχουν τόσο ξυλάνθρακα όσο και οπτάνθρακα, με τυπικές ενώσεις που περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό ξυλάνθρακα.

Έλεγχος διαδικασίας. Στη στερεά ενανθράκωση, όπως και σε άλλες κατεργασίες ενανθράκωσης, ο βαθμός συγκέντρωσης άνθρακα που λαμβάνεται, είναι συνάρτηση της δυναμικότητας του, της θερμοκρασίας και του χρόνου ενανθράκωσης, καθώς και της χημικής σύστασης του χάλυβα. Μπορεί να υπάρξει μια παραλλαγή στο βάθος της ενανθράκωσης μέσα σε ένα δεδομένο φορτίο του φούρνου λόγω ανόμοιας θερμικής κατανομής μέσα στα δοχεία ενανθράκωσης. Η παραμόρφωση των τμημάτων κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης μπορεί να μειωθεί επειδή η ένωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την στήριξη των τμημάτων.

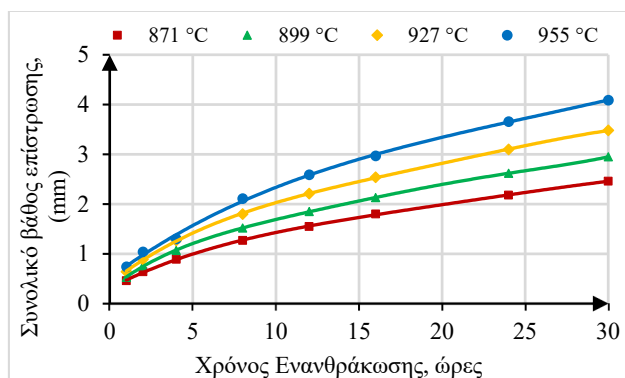
Δυναμικότητα του άνθρακα. Η δυναμικότητα του άνθρακα της ατμόσφαιρας που παράγεται από την ένωση ενανθράκωσης, καθώς και η περιεκτικότητα σε άνθρακα που προκύπτει στην επιφάνεια του υλικού, αυξάνεται άμεσα με την αύξηση του λόγου του μονοξειδίου του άνθρακα προς το διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι, στην επιφάνεια του υλικού παρέχεται περισσότερος άνθρακας με τη χρησιμοποίηση ενεργητικών μέσων και ενανθρακωτικών υλικών που προάγουν το σχηματισμό μονοξειδίου του άνθρακα. Στη στερεά ενανθράκωση, ο ρυθμός εξέλιξης του ανθρακούχου αερίου είναι σταθερός και

σχεδόν πάντα υπερβαίνει το ρυθμό που απαιτείται για την παροχή του απαραίτητου άνθρακα για ένα κεκορεσμένο επιφανειακό στρώμα.

Θερμοκρασία. Η στερεά ενανθράκωση κανονικά εκτελείται σε θερμοκρασία από 815°C έως 955 °C (Εικόνα 2.40). Τα τελευταία χρόνια, τα ανώτατα όρια έχουν αυξηθεί σταθερά και έχουν χρησιμοποιηθεί θερμοκρασίες ενανθράκωσης έως και 1095°C. Οι διαδικασίες κατασκευής χαλύβων βελτιώθηκαν σε βαθμό τέτοιο ώστε το μέγεθος των λεπτών να διατηρείται σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν ή υπερβαίνουν τους 1040°C. Πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, το φαινόμενο της μεγέθυνσης των κόκκων (coarsening) εμφανίζεται μόνο μετά από παρατεταμένες χρονικές περιόδους, επιτρέποντας την επεξεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες χωρίς κίνδυνο.

Ο ρυθμός με τον οποίο σχηματίζεται το στρώμα ενανθράκωσης αυξάνεται ταχέως με τη θερμοκρασία. Εάν ένας συντελεστής 1.0 είναι αντιπροσωπευτικός των 815°C, αυξάνεται σε 1.5 στους 870 °C και σε πάνω από 2.0 σε 925 °C. Βελτιωμένα δοχεία, λεπτόκοκκοι χάλυβες και άλλες βελτιώσεις επιτρέπουν τη χρήση μεγάλου εύρους θερμοκρασιών. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα στην επιφάνεια είναι περίπου αυτή του ορίου διαλυτότητας του άνθρακα στον ωστενίτη. Σε θερμοκρασία κατεργασίας, το επιθυμητό μέσο επίπεδο του άνθρακα καθ' όλη την περίπτωση εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία της ενανθράκωσης. Όταν απαιτούνται ευηλεκτροειδή στρώματα ενανθράκωσης, η θερμοκρασία είναι κανονικά περίπου 815°C. Όσο απαιτείται περισσότερος άνθρακας, η θερμοκρασία αυξάνεται.

Χρόνος. Ο ρυθμός αλλαγής στο βάθος ενανθράκωσης σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία ενανθράκωσης είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Ο ρυθμός της ενανθράκωσης είναι υψηλότερος στην αρχή του κύκλου και σταδιακά μειώνεται καθώς ο κύκλος επεκτείνεται.



Εικόνα 2.40: Κατανομή βάθους ενανθράκωσης συναρτήσει θερμοκρασίας και χρόνου ενανθράκωσης, [36]

Χημική σύσταση του χάλυβα. Οποιοσδήποτε ποιότητες ανθρακούχων ή κραματωμένων χαλύβων που μπορούν να υποστούν ενανθράκωση είναι κατάλληλες για τη στερεά ενανθράκωση. Ο ρυθμός διάχυσης του άνθρακα στον χάλυβα δεν επηρεάζεται αισθητά από τη χημική σύσταση του χάλυβα. Η χημική σύσταση έχει μια επίδραση στη δραστηριότητα του άνθρακα και έτσι μπορεί να επηρεάσει το επίπεδο του άνθρακα σε διαλυτότητα για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Οι **στρεβλώσεις** γίνονται συνήθως εντονότερα με την αύξηση της θερμοκρασίας ενανθράκωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιλέγεται η θερμοκρασία ενανθράκωσης με βάση

το μέγιστο ποσοστό στρεβλώσεων που μπορούν να παραμένει εντός ανοχών. Σε κάθε περίπτωση, ακολουθώντας τις κατάλληλες οδηγίες, θα ελαχιστοποιηθούν οι στρεβλώσεις.

Περιορισμοί Κατεργασίας. Τα βασικά μειονεκτήματα της στερεάς ενανθράκωσης σε αντίθεση με άλλα είδη είναι η πρόσθετη απαιτούμενη εργασία και το γεγονός ότι η διαδικασία απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας λόγω του συνόλου, κουτιά και σύνθετο υλικό, που πρέπει να θερμαίνεται. Υπάρχει επίσης η δυσκολία άμεσης απόψυξης από τη διαδικασία, απαιτώντας την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας για μια ξεχωριστή διαδικασία επαναθέρμανσης.

2.5.1.2 Αέρια Ενανθράκωση – Gas Carburizing

Η αέρια ενανθράκωση είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη σύγχρονη τεχνική ενανθράκωσης. Χρησιμοποιούνται φούρνοι συνεχούς χρήσης με εξαρτήματα που τοποθετούνται είτε σε φιάλες είτε τοποθετούνται σε καλάθια [34]. Ατμόσφαιρα πλούσια σε άνθρακα παρέχεται από ένα ενδόθερμη συσκευή παροχής αερίου εμπλουτισμένου με αέριο υδρογονανθράκων, όπως το μεθάνιο (φυσικό αέριο) ή το προπάνιο. Οι φούρνοι συχνά είναι εξοπλισμένοι με αυτοματοποιημένα συστήματα παραγωγής για όλες τις διαδικασίες θερμικών κατεργασιών. Η οξειδωση, πριν από τη βαφή, εμποδίζεται με τη διατήρηση των δειγμάτων στην ατμόσφαιρα ενανθράκωσης κατά την διάρκεια μεταφορά του στο μέσο απόψυξης (νερό ή λάδι). Αν και η βαφή σε λάδια σε θερμοκρασίες από 50°C έως 75°C είναι συνηθισμένη, πολλά ενανθρακωμένα τεμάχια, υφίστανται κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή (Martempering) μετά από βαφή σε λάδι ή τήγματα άλατος σε θερμοκρασίες 175°C to 200°C. Επειδή η θερμοκρασία κλιμακωτής μαρτενσιτικής βαφής της περιοχής που έχει εμποτιστεί με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι πάνω από τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s), η επιφάνεια μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη απόψυξη σε αέρα.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενανθρακωμένων στρωμάτων

Μερικά από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των ενανθρακωμένων στρωμάτων οφείλονται στο γεγονός ότι δημιουργούνται από διάχυση του άνθρακα. Πρώτον, υπάρχει σταδιακή μετάβαση σε περιεκτικότητα σε άνθρακα, καθώς και μετάβαση στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες, μεταξύ επιφάνειας και καρδιάς. Κατά κανόνα, όσο πιο βαθιά είναι ο εμποτισμός, τόσο λιγότερο απότομη είναι η μείωση του άνθρακα από στρώμα σε στρώμα. Η απουσία οποιασδήποτε απότομης μετάβασης στις ιδιότητες εξασφαλίζει την άριστη προσκόλληση του στρώματος ενανθράκωσης. Δεύτερον, οι ενανθρακωμένες επιστρώσεις παράγονται συχνότερα σε πάχη που κυμαίνονται από 0,5mm έως 1,5 mm. Στους 925°C, μια τυπική θερμοκρασία κατεργασίας, το εύρος πάχους μπορεί να παραχθεί σε χρόνους κατεργασίας από περίπου 2ώρες έως 15ώρες. Επιστρώσεις τόσο λεπτές όσο 0,1 mm, οι οποίες απαιτούν λιγότερα από 10 λεπτά στους 927°C, παράγονται μερικές φορές σε μικρά μέρη με υγρά ενανθράκωση σε λουτρό με τήγμα άλατος. Οι επιστρώσεις βαθύτερες από 3 mm, οι οποίες απαιτούν περισσότερο από δύο ημέρες θέρμανσης στους 927°C, παράγονται περιστασιακά σε μεγάλα τεμάχια.

Πηγές άνθρακα. Χαλύβδινα τμήματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα που εκτίθενται σε ατμόσφαιρες πλούσιες σε άνθρακα και προέρχονται από μεγάλη ποικιλία πηγών, θα ενανθρακωθούν σε θερμοκρασίες 850°C και άνω. Στα πρώτα στάδια της κατεργασίας η πηγή του άνθρακα είναι τόσο πλούσια ώστε το όριο διαλυτότητας του άνθρακα στον ωστενίτη να φθάνει στην επιφάνεια του χάλυβα που έχει ως αποτέλεσμα την σχηματισμό καρβιδίων στην επιφάνεια. Η αιθάλη της ατμόσφαιρας του κλιβάνου ελαχιστοποιείται.

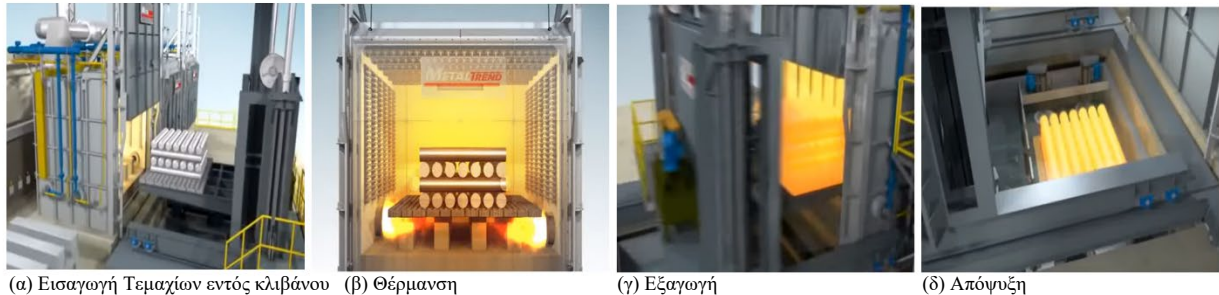
Οι ελεγχόμενες ατμόσφαιρες ενανθρακώσεως παράγονται με ανάμειξη φέροντος αερίου με ένα εμπλουτισμένο αέριο, το οποίο χρησιμεύει ως πηγή άνθρακα. Το πιο συνηθισμένο (Carrier Gas), ενδοθερμικό αέριο, δεν είναι απλά ένα αραιωτικό, αλλά παίζει και ρόλο στην επιτάχυνση της αντίδρασης ενανθράκωσης στην επιφάνεια των τμημάτων. Η ποσότητα του εμπλουτισμένου αερίου που απαιτείται από τη διαδικασία εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό με τον οποίο απορροφάται ο άνθρακας. Το ενδοθερμικό αέριο (Endogas) είναι ένα μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου και αζώτου (με μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, υδρατμών και μεθανίου) που παράγεται από την αντίδραση ενός αερίου υδρογονάνθρακα όπως το φυσικό αέριο (κυρίως μεθάνιο), προπάνιο ή βουτάνιο με αέρα. Το Endogas παράγεται συνήθως σε έναν ξεχωριστό φούρνο με αποστακτήρα, χρησιμοποιώντας αναλογία τροφοδοσίας αέρος προς υδρογονάνθρακες τέτοια που θα παράγει αναλογία οξυγόνου προς άνθρακα περίπου 1,05 στην ενδοθερμική ατμόσφαιρα. Στο ενδοθερμικό αέριο που παράγεται από καθαρό μεθάνιο, ο λόγος αέρα προς μεθάνιο είναι περίπου 2,5, στην ενδοθερμική ατμόσφαιρα που προήλθε από το καθαρό προπάνιο, ο λόγος αέρα προς προπάνιο είναι περίπου 7.5. Το προπάνιο, για την παραγωγή ατμόσφαιρας, πρέπει να περιέχει λιγότερο από 5% προπυλένιο και λιγότερο από 2,5% βουτάνιο ή βαρύτερους υδρογονάνθρακες, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις της ASTM D1835 για το λεγόμενο ειδικό προπάνιο ή την προδιαγραφή 2140, ποιότητα HD 5.

Ένα φέρον αέριο παρόμοιο σε σύσταση της ενδοθερμικής ατμόσφαιρας που παράγεται από μεθάνιο μπορεί να σχηματιστεί από μίγμα αζώτου-μεθανόλης. Οι αναλογίες αζώτου και μεθανόλης επιλέγονται συνήθως για να δώσουν την ίδια αναλογία αζώτου προς οξυγόνο όπως αυτή του αέρα, δηλαδή περίπου 1,9 όγκο αζώτου για κάθε όγκο αερίου μεθανόλης. Κατά την είσοδο στον κλίβανο, κάθε όγκος αερίου μεθανόλης διαλύεται για να σχηματίσει περίπου έναν όγκο μονοξειδίου του άνθρακα και δύο όγκους υδρογόνου. Ένα φέρον αέριο μπορεί να παραχθεί επί τόπου με την άμεση προσθήκη αέρα και ενός αερίου υδρογονάνθρακα στον κλίβανο θέρμανσης. Πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις (χαμηλές ταχύτητες ροής, υψηλές θερμοκρασίες και καλή ανάμιξη) κατά τη ρύθμιση και τον έλεγχο μιας τέτοιας διαδικασίας, ώστε να εξασφαλίζεται η ενδεδειγμένη αντίδραση των τροφοδοτούμενων αερίων και η ομοιομορφία της ενανθράκωσης. Παρόμοιες προφυλάξεις είναι απαραίτητες εάν χρησιμοποιούνται φέροντα αέρια με υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα ή υδρατμούς (όπως το εξώθερμο αέριο).

Εξοπλισμός Αέριας Ενανθράκωσης

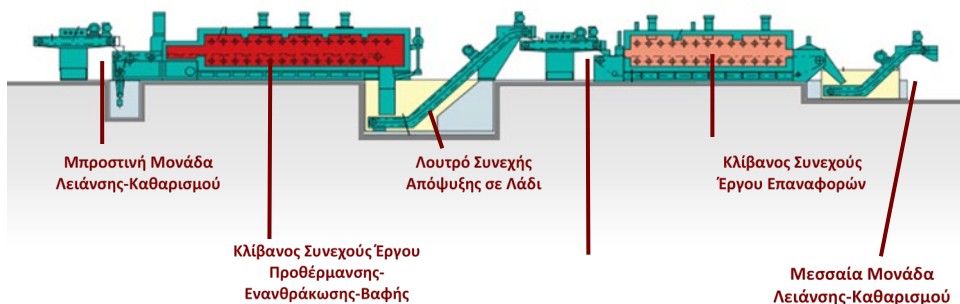
Οι φούρνοι αέριας ενανθράκωσης ποικίλλουν ευρέως σε φυσική κατασκευή (Εικόνα 2.41), αλλά μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: οι «Batch Furnaces» και οι «Continuous Furnaces». Σε ένα κλίβανο τύπου «batch», το τεμάχιο προς κατεργασία

φορτώνεται και εκφορτώνεται ως ενιαία μονάδα ή παρτίδα. Σε ένα συνεχή κλίβανο, το τεμάχιο εισέρχεται και εξέρχεται από τον κλίβανο σε συνεχή ροή (Εικόνα 2.42). Οι συνεχείς κλίβανοι ευνοούνται για την παραγωγή μεγάλων όγκων παρόμοιων εξαρτημάτων με απαιτήσεις συνολικού βάθους ενανθράκωσης μικρότερες από 2 mm.



Εικόνα 2.41: Σχηματική Αναπαράσταση θερμικής κατεργασίας σε κλίβανο διαλείποντος έργου, [37]

ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΣΥΝΕΧΩΝ ΦΟΥΡΝΩΝ ΑΕΡΙΑΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ METHANOL (CH_3OH) - TOLUENE (C_7H_8)



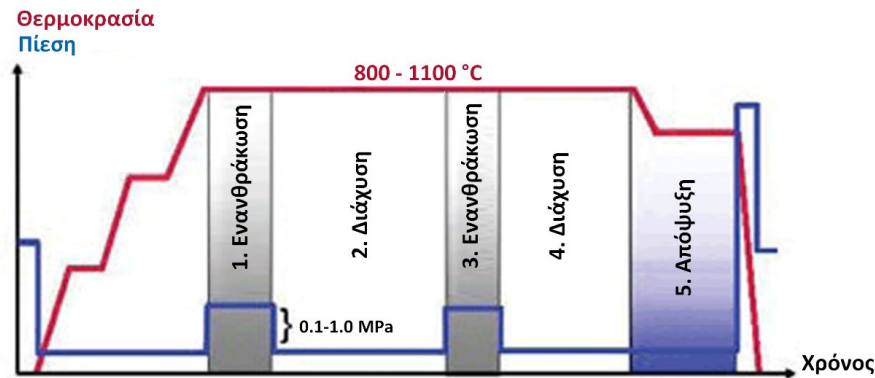
Εικόνα 2.42: Σχηματική παράσταση θερμικής κατεργασίας σε κλίβανου συνεχούς έργου [38]

2.5.1.3 Ενανθράκωση Κενού (Vacuum Carburizing)

Η ενανθράκωση εν-κενώ είναι μία εκτός ισορροπίας, τύπου ώθησης-διάχυσης (boost-diffusion-type) διαδικασία ενανθράκωσης, στην οποία ο χάλυβας είναι ωστενιτοποιημένος σε περιβάλλον κενού χαμηλής πίεσης (μικρότερη των 1bar), ενανθρακωμένος σε μερική πίεση αερίου υδρογονανθράκων, διαχεόμενος σε κενό χαμηλής πίεσης και έπειτα βαμμένος σε λάδι ή αέριο. Σε σύγκριση με την συμβατική ενανθράκωσης ατμόσφαιρα, η ενανθράκωση σε κενό προσφέρει εξαιρετική ομοιομορφία και επαναληψιμότητα λόγω του υψηλού βαθμού ελέγχου της διαδικασίας. με φούρνους εν-κενώ (Vacuum Furnaces), βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας της ενδόκοκκης οξειδωσης και δυνητικά μειωμένους χρόνους κύκλων κατεργασιών, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται διαδικασίες υψηλότερων θερμοκρασιών.

Επισκόπηση διαδικασίας: Η ενανθράκωση χαλύβων εν κενώ, είναι τυπικά μία διαδικασία τεσσάρων βημάτων (Εικόνα 2.43):

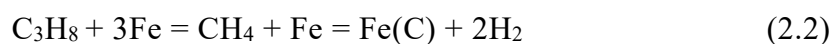
- Θέρμανση και εμποτισμός σε θερμοκρασία ενανθράκωσης τέτοια ώστε να εξασφαλιστεί θερμοκρασιακή ομοιομορφία σε όλο το χάλυβα.
- Αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα του Ωστενίτη.
- Διάχυση για την παροχή σταδιακής μετάβασης επιφάνειας-καρδιάς.
- Απόψυξη σε λάδι. Επιπλέον, ένα στάδιο αναθέρμανσης πριν από την απόψυξη μπορεί να είναι απαραίτητο προς για την βελτίωση των κόκκων.



Εικόνα 2.43: Τυπικός θερμικός κύκλος ενανθράκωσης κενού [39]

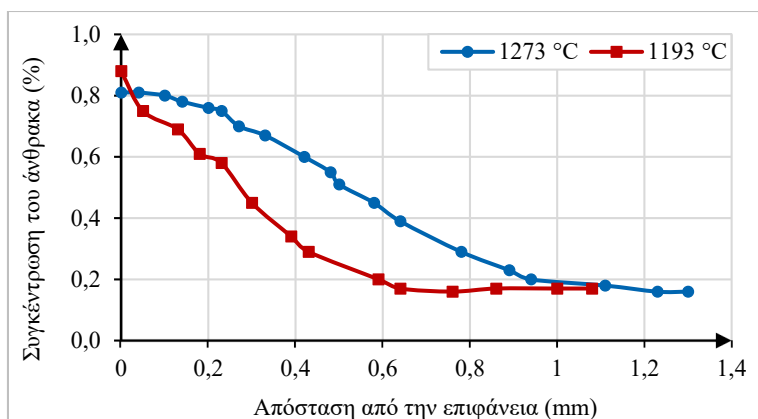
Θέρμανση και Εμποτισμός: Το πρώτο βήμα είναι η θέρμανση του προς ενανθράκωση χάλυβα στην επιθυμητή θερμοκρασία ενανθράκωσης, τυπικά είναι στο εύρος από 845°C έως 1040 °C, και ο εμποτισμός σε θερμοκρασία ενανθράκωσης για αρκετό χρονικό διάστημα για να εξασφαλιστεί ο χάλυβας έχει αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή σε όλο τον όγκο του. Η υπερθέρμανση ιδιαίτερα πάνω από τους 925°C, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής εξαιτίας της αύξησης του μεγέθους των κόκκων. Κατά τη διάρκεια του πρώτου βήματος, πρέπει να αποφευχθεί η οξείδωση της επιφάνειας και να μειωθεί οποιαδήποτε παρουσία οξειδίων στην επιφάνεια. Σε θάλαμο θέρμανσης με γραφίτη, ένα περιβάλλον κενού σε εύρος 13Pa-40Pa είναι συνήθως ικανοποιητικό. Σε ένα κεραμικό κλίβανο με στοιχεία θέρμανσης καρβιδίων πυριτίου, μία μερική πίεση περίπου 40Pa- 67Pa υδρογόνου είναι αποτελεσματική. Χάλυβες που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε χρώμιο, μεγάλη περιεκτικότητα σε πυρίτιο ή άλλα συγγενή στοιχεία υψηλού κινδύνου οξείδωσης, συνήθως απαιτούν υψηλότερο επίπεδο κενού πριν την ενανθράκωση.

Βήμα ενίσχυσης της διαδικασίας. Αυτό το βήμα στοχεύει στην απορρόφηση άνθρακα από τον ωστενίτη μέχρι το όριο της διαλυτότητας του σε άνθρακα, στη θερμοκρασία ενανθράκωσης. Η ενίσχυση επιτυγχάνεται με την πλήρωση του θαλάμου κενού είτε με καθαρό αέριο υδρογονάνθρακα, είτε με μείγμα αερίων υδρογονανθράκων σε μερική πίεση. Μπορεί να προστεθεί αμμωνία εάν προτιμάται ενανθρακαζώτωση. Ένα αδρανές αέριο όπως άζωτο μπορεί επίσης να προστεθεί στο αέριο ή στο μείγμα αερίων. Η μετάβαση του άνθρακα πραγματοποιείται με διάσπαση του αερίου υδρογονανθράκων στην επιφάνεια του χάλυβα με άμεση απορρόφηση του άνθρακα από τον ωστενίτη ενώ το αέριο υδρογόνο απελευθερώνεται. Οι αντιδράσεις με μεθάνιο και προπάνιο είναι:



Σε τυπικές θερμοκρασίες ενανθράκωσης, οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται γρήγορα από αριστερά προς τα δεξιά των εξισώσεων. Επειδή οι αντιδράσεις είναι δύσκολο να μετρηθούν επί τόπου, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της δυναμικότητας του άνθρακα κατά την ενανθράκωση σε κενό. Επειδή δεν υπάρχει παρουσία οξυγόνου, οι μέθοδοι υπολογισμού της δυναμικότητας του άνθρακα για συμβατική ατμόσφαιρα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, τουλάχιστον ένας κατασκευαστής κλιβάνου έχει σχεδιάσει, σύμφωνα με πληροφορίες, ένα σύστημα για την ενανθράκωση σε κενό, το οποίο μετρά και ελέγχει τη δυναμικότητα του άνθρακα του ενανθρακωτικού αερίου. Απαιτείται ελάχιστη πίεση αερίου υδρογονανθράκων για να εξασφαλιστεί η ταχεία ενανθράκωση του ωστενίτη. Η απαιτούμενη ελάχιστη πίεση ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία ενανθράκωσης, τη σύσταση του αερίου ενανθρακώσεως και την κατασκευή του κλιβάνου. Πάνω από την ελάχιστη πίεση, η πίεση του χρησιμοποιούμενου ενανθρακωτικού αερίου δεν έχει σχέση με τη δυναμικότητα του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Οι τυπικές πιέσεις κυμαίνονται μεταξύ 1,3 kPa και 6,6 kPa σε φούρνους με γραφίτη και 13kPa και 25 kPa σε φούρνο κεραμικής κατασκευής. Δεν συνιστώνται πιέσεις άνω των 40kPa, λόγω της υπερβολικής εναπόθεσης άνθρακα εντός του κλιβάνου που συνεπάγεται υψηλότερες πιέσεις.

Το τρίτο βήμα είναι η **διάχυση**. Εάν ένας χάλυβας σκληρυνθεί μόνο με την αύξηση του άνθρακα που προκύπτει από την ενίσχυση, ιδιαίτερα εάν δεν ελεγχτεί η δυναμικότητα του άνθρακα κατά τη διάρκεια του σταδίου ενίσχυσης, θα προκύψει μία ανεπιθύμητη μικροδομή πλησίον της ενανθρακωτικής περιοχής (Εικόνα 2.44). Το στάδιο διαχύσεως επιτρέπει την προς τα μέσα διάχυση του άνθρακα από το ενανθρακωμένη επιφάνεια, καταλήγοντας σε επιφάνεια χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και πιο σταδιακή μετάβαση αυτού από την επιφάνεια στην καρδιά. Το στάδιο διαχύσεως πραγματοποιείται συνήθως σε περιβάλλον κενού με πίεση 67Pa έως 135Pa, στην ίδια θερμοκρασία με την ενανθράκωση. Εάν χρησιμοποιήθηκε έλεγχος της δυναμικότητας του άνθρακα κατά τη διάρκεια του βήματος ενίσχυσης, το τμήμα διαχύσεως μπορεί να μειωθεί ή να εξαλειφθεί.



Εικόνα 2.44: Κατανομή του άνθρακα στην επιφάνεια επιστρώματος χάλυβα 18CrNi8 με δύο ενανθρακώσεις κενού 18mins+40mins θερμοκρασίας 1273°C και 1193°C, [40]

Το τέταρτο βήμα είναι η απόψυξη σε λάδι. Εάν η επαναθέρμανση δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, και/ή δεν απαιτούνται περαιτέρω μηχανουργικές κατεργασίες, ο χάλυ-

βας αποψύχεται άμεσα σε λάδι, συνήθως υπό μερική πίεση αζώτου. Όταν η ενανθράκωση σε κενό διεξάγεται σε υψηλότερη θερμοκρασία από την συνηθισμένη, απαιτείται απόψυξη σε χαμηλότερη θερμοκρασία και σταθεροποίηση σε αυτή πριν από τη τελική απόψυξη. Εναλλακτικά, εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ένα στάδιο επαναθέρμανσης για το μέγεθος των κόκκων ή απαιτείται περαιτέρω μηχανουργική κατεργασία, ο χάλυβας αποψύχεται σε αέριο υπό πίεση, από τη θερμοκρασία διάχυσης σε θερμοκρασία δωματίου, συνήθως υπό μερική πίεση αζώτου. Η επαναθέρμανση συνήθως συνίσταται για ωστενιτοποίηση σε εύρος από 790°C έως 845°C, ακολουθούμενη από απόψυξη σε λάδι. Σε μερικές περιπτώσεις, είναι δυνατή η απόψυξη σε αέριο υπό πίεση μετά από ενανθράκωση, αλλά αυτό απαιτεί σύστημα υψηλής απόδοσης αερίου πίεσης-απόψυξης, μικρές φορτίσεις, λεπτά τμήματα και μέτριους έως υψηλά κραματωμένους χάλυβες. Το ενδιαφέρον για την βαφή σε αέριο υπό πίεση αυξάνεται όταν η ενανθράκωση αφορά οδοντωτούς τροχούς, ειδικά λόγω των γεωμετριών που προκαλούν συχνά στρεβλώσεις.

Φούρνοι Ενανθράκωσης Κενού. Η ενανθράκωση κενού εκτελείται συνήθως σε κλίβανο ειδικά σχεδιασμένο για εφαρμογή με ή χωρίς ικανότητα απόψυξης σε λάδι ή σε αέριο και τροποποιείται με τους ελέγχους και τις υδραυλικές εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την ενανθράκωση υπό κενό. Ο κλίβανος μπορεί να είναι κατασκευή γραφίτη (Μόνοση γραφίτη με θερμαντικά στοιχεία) ή κεραμική κατασκευή (πυρίμαχα τούβλα μόνωσης και καρβίδια πυριτίου ως θερμαντικά στοιχεία). Η κατασκευή γραφίτη επιτρέπει την χρήση υψηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας για έναν κλίβανο πολλαπλών χρήσεων, ενώ η κεραμική κατασκευή είναι πιο κατάλληλη για την ενανθράκωση εν κενώ, επειδή μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια στον αέρα σε θερμοκρασίες διεργασίας για την απόψυξη ή τη διευκόλυνση της απομάκρυνσης της αιθάλης.

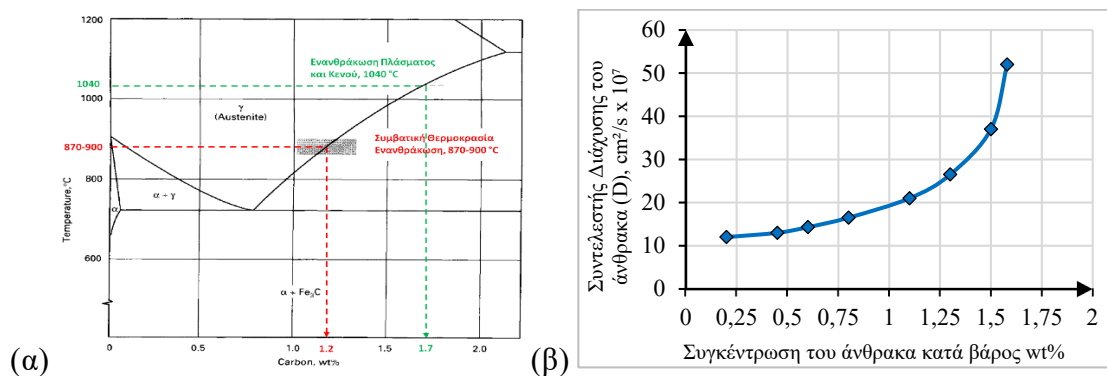
2.5.1.4 Ενανθράκωση Πλάσματος (Plasma-Ion Carburizing)

Η Ενανθράκωση Πλάσματος ή Ιόντων βασίζεται σε εν-κενό διαδικασία όπου χρησιμοποιεί τεχνολογία εκκένωσης με λάμψη για την εισαγωγή ιόντων που φέρουν άνθρακα στην επιφάνεια του χάλυβα, για μετέπειτα διάχυση κάτω από την επιφάνεια [34]. Είναι αποτελεσματική στην αύξηση των ποσοστών ενανθράκωσης, επειδή η διαδικασία παρακάμπτει αποτελεσματικά διάφορα στάδια της κλασικής διαδικασίας. Με αέριο μεθάνιο (CH₄), για παράδειγμα, ο ενεργός άνθρακας για προσρόφηση μπορεί να σχηματιστεί απευθείας από το μεθάνιο λόγω του ιονιστικού αποτελέσματος του πλάσματος. Η ενανθράκωση πλάσματος επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς κατεργασίας από ότι η συμβατική αέρια ενανθράκωση, η οποία περιλαμβάνει διάφορα στάδια αντίδρασης στην αποσύνθεση του μεθανίου σε ενεργό άνθρακα. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπονται υψηλότερες θερμοκρασίες, επειδή η διαδικασία πραγματοποιείται σε περιβάλλον κενού χωρίς οξυγόνο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι παρόμοιο στη διαδικασία της ενανθράκωσης κενού. Εν τούτοις, η ενανθράκωση σε κενό παρουσιάζει μερικά δυνητικά μειονεκτήματα σε σύγκριση με την ενανθράκωση πλάσματος. Επειδή η ενανθράκωση σε κενό πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλές πιέσεις και η ταχύτητα ροής του ρευστού της αέριας ενανθράκωσης μέσα στον κλίβανο είναι πολύ χαμηλή, το ισοδύναμο του άνθρακα (Carbon Potential) του αερίου σε βαθιές εσοχές και τυφλές οπές εξαντλείται γρήγορα. Ακόμη και αν το αέριο συμπληρωθεί σε αυτές τις περιοχές, είναι πιθανό να εμφανιστεί μια μεγάλη ανομοιομορφία στο βάθος ενανθράκωσης πάνω στην επιφάνεια του τμήματος. Εάν, σε

μια προσπάθεια να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, αυξηθεί σημαντικά η πίεση του αερίου, δημιουργείται ένα άλλο πρόβλημα, δηλαδή ο σχηματισμός ελεύθερου άνθρακα ή η καθίζηση. Έτσι, για να ληφθούν περιπτώσεις σχετικά ομοιόμορφου βάθους πάνω σε ένα τμήμα σύνθετου σχήματος, η πίεση του αερίου πρέπει να αυξάνεται περιοδικά ώστε να αναπληρώνεται η απεμπλουτισμένη ατμόσφαιρα σε εσοχές και στη συνέχεια να μειώνεται και πάλι στην πίεση λειτουργίας. Είναι προφανές ότι υπάρχει μια ευαίσθητη ισορροπία κατά την ενανθράκωση κενού, όπου οι συνθήκες διεργασίας πρέπει να ρυθμιστούν ώστε να επιτευχθεί ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ της ομοιομορφίας της επίστρωσης, του κινδύνου κατακρημνίσεως και του ρυθμού ενανθράκωσης.

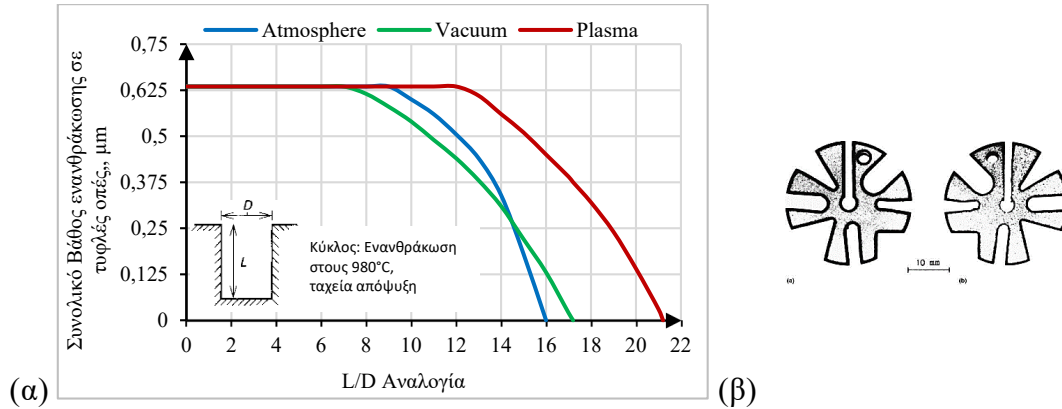
Χαρακτηριστικά διάχυσης

Η ενανθράκωση πλάσματος πραγματοποιείται σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, το οποίο επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες και συνεπώς υψηλότερους ρυθμούς διάχυσης. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιφέρουν επίσης ορισμένα επιπρόσθετα οφέλη που προκύπτουν από την αυξημένη διαλυτότητα του άνθρακα στον ωστενίτη καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.45α, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας ενανθράκωσης πλάσματος (1040°C), αυξάνεται η διαλυτότητα του άνθρακα στον ωστενίτη, από 1.2% σε 1.7%. Επειδή η επιφάνεια του θερμού χαλύβδινου τμήματος θα κορεστεί πολύ γρήγορα στην ενανθράκωση πλάσματος, η διάχυση (και συνεπώς ο ρυθμός ενανθράκωσης) αυξάνεται, λόγω της επίδρασης υψηλότερων συγκεντρώσεων διαλυμένου άνθρακα επί του συντελεστή διάχυσης στον ωστενίτη. Η αύξηση του συντελεστή διάχυσης (D) με την αυξανόμενη συγκέντρωση άνθρακα φαίνεται στην Εικόνα 2.45β. Μπορεί να φανεί ότι για τις συγκεντρώσεις άνθρακα πάνω από περίπου 1% κ.β., ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται εκθετικά. Για συγκεντρώσεις κοντά στο 1,5 έως 1,6% κατά βάρος (το όριο στερεής διαλυτότητας του άνθρακα στον ωστενίτη στις θερμοκρασίες που επιτρέπονται στην ενανθράκωση πλάσματος), ο συντελεστής διάχυσης (και συνεπώς η διάχυση) είναι περισσότερο από διπλάσιος από τον αντίστοιχο για κάτω από 1% κ.β.. Συνεπώς, η θερμοκρασία έχει δύο επιδράσεις ταυτόχρονα στην αύξηση του ρυθμού διάχυσης του άνθρακα από την επιφάνεια στο εσωτερικό του τμήματος χάλυβα: πρώτον, το αποτέλεσμα της αυξημένης θερμοκρασίας στην διάχυση, και δεύτερον, η αυξημένη διάχυση που προκαλείται από την αυξημένη διαλυτότητα άνθρακα στον χάλυβα.



Εικόνα 2.45: (α) Αύξηση της διαλυτότητας του άνθρακα στον ωστενίτη για ενανθράκωση πλάσματος έναντι συμβατικής, (β) Συντελεστής Διάχυσης του άνθρακα στον Ωστενίτη συναρτήσει της συγκέντρωσης του άνθρακα στους 1125°C, [34]

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της ενανθράκωσης πλάσματος είναι αποτύπωση επαρκούς βάθους εμποτισμού, χωρίς ανομοιομορφίες στις τυφλές οπές. Χαρακτηριστική είναι η εικόνα 2.46, όπου φαίνονται ποσοτικά και σχεδιαστικά οι διαφορές με τις άλλες μεθόδους.



Εικόνα 2.46: (α) Συγκριτική μελέτη συμβατικής,εν-κενώ και ενανθράκωσης πλάσματος για την καλύτερη ομοιορφία βάθους ενανθράκωσης σε τυφλές οπές, (β) Οπτικές διαφορές ομοιομορφίας βάθους επιστρώματος μεταξύ ενανθράκωσης πλάσματος (α) και κενού (β), [34]

2.5.1.5 Υγρή Ενανθράκωση – Ενδοκυάνωση (Liquid Carburizing – Cyaniding)

Η υγρή ενανθράκωση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη σκλήρυνση των χαλύβδινων ή σιδηρούχων τεμαχίων. Τα τεμάχια διατηρούνται σε θερμοκρασία πάνω από A_{c1} σε τηγμένο αλάτι το οποίο θα εισάγει άνθρακα και άζωτο ή μόνο άνθρακα στο μέταλλο. Η διάχυση του άνθρακα από την επιφάνεια προς το εσωτερικό παράγει μια επίστρωση που μπορεί να σκληρυνθεί, συνήθως με γρήγορη απόψυξη από το λουτρό. Ο άνθρακας διαχέεται από το λουτρό στο μέταλλο και παράγει μια επίστρωση συγκρίσιμη με εκείνη που προκύπτει από την αέρια ενανθράκωση σε μια ατμόσφαιρα που περιέχει κάποια αμμωνία. Επειδή η υγρή ενανθράκωση εμπλέκει ταχύτερη θέρμανση, οι χρόνοι κύκλων είναι μικρότεροι από εκείνους για τη αέρια. Τα περισσότερα λουτρά υγρής ενανθράκωσης περιέχουν κυανιούχο άλας, το οποίο εισάγει τόσο άνθρακα όσο και άζωτο στην επίστρωση. Ωστόσο, ένας τύπος λουτρού υγρής ενανθράκωσης, χρησιμοποιεί μία ειδική ποιότητα άνθρακα. Αυτό το λουτρό παράγει μία επίστρωση η οποία περιέχει μόνο άνθρακα ως παράγοντας σκλήρυνσης. Η υγρή ενανθράκωση μπορεί να διακριθεί από την ενδοκυάνωση (η οποία πραγματοποιείται σε λουτρό που περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό κυανιούχου άλατος) από τον χαρακτήρα και τη χημική σύσταση της επίστρωσης. Οι επιστρώσεις που παράγονται με υγρή ενανθράκωση είναι χαμηλότερες σε άζωτο και υψηλότερες σε άνθρακα από αυτές που παράγονται από την ενδοκυάνωση. Οι επιστρώσεις κυανιούχου άλατος σπάνια εφαρμόζονται σε βάθη μεγαλύτερα από 0,25 mm. Ενώ, η υγρή ενανθράκωση μπορεί να παράγει επιστρώσεις τόσο βαθιές όσο 6,35 mm. Για τις πολύ λεπτές επιστρώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υγρή ενανθράκωση σε λουτρά χαμηλής θερμοκρασίας αντί για ενδοκυάνωση.

Κυανιούχο Άλας - περιεχόμενο λουτρών Υγρής Ενανθράκωσης

Μικρά βάθη και μεγάλα βάθη ενανθράκωσης είναι αυθαίρετοι όροι που έχουν συσχετιστεί με την υγρά ενανθράκωση σε λουτρά που περιέχουν κυανιούχο άλας. Γενικά, οι δύο τύποι επιστρώσεων διακρίνονται περισσότερο από την θερμοκρασία λειτουργίας παρά από την σύσταση των λουτρών. Ως εκ τούτου, προτιμώνται οι «Χαμηλής Θερμοκρασίας» και «Υψηλής Θερμοκρασίας». Λουτρά κυανιούχου άλατος «Χαμηλής Θερμοκρασίας», είναι εκείνα που λειτουργούν συνήθως σε θερμοκρασίες από 845°C έως 900°C, αν και για ορισμένες συγκεκριμένες επιδράσεις αυτό το εύρος εκτείνεται μερικές φορές σε 790°C έως 925°C. Τα λουτρά χαμηλής θερμοκρασίας ταιριάζουν καλύτερα στο σχηματισμό «ρηχότερων» επιστρώσεων. Τα λουτρά χαμηλής θερμοκρασίας είναι γενικά του επιταχυνόμενου κυανογόνου που περιέχει διάφορους συνδυασμούς και ποσότητες των συστατικών και διαφέρουν από τα λουτρά κυανιούχου άλατος στα οποία η επίστρωση παράγεται από λουτρά χαμηλών θερμοκρασιών αποτελούμενα κυρίως από άνθρακα. Τα λουτρά κυανιούχου άλατος υψηλής θερμοκρασίας (λουτρά βαθιάς ενανθράκωσης) λειτουργούν συνήθως στην περιοχή θερμοκρασιών από 900°C έως 955°C. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενανθράκωσης πάχους από 0,5mm έως 3,0mm. Σε μερικές περιπτώσεις, παράγονται ακόμη μεγαλύτερα πάχη ενανθράκωσης (μέχρι περίπου 6mm), αλλά η πιο σημαντική χρήση αυτών των λουτρών είναι η ταχεία ανάπτυξη πάχων ενανθράκωσης 1mm έως 2mm. Αυτά τα λουτρά αποτελούνται από κυανιούχο άλας και από ένα σημαντικό ποσοστό χλωριούχου βαρίου.

Ενδοκυάνωση (Υγρή Ενανθρακαζώτωση)

Η ενδοκυάνωση ή ενανθρακαζώτωση με λουτρό άλατος, είναι μια διαδικασία θερμικής κατεργασίας που παράγει μια σκληρή, ανθεκτική στη φθορά επιφάνεια σε σιδηρούχα μέρη. Όταν ο χάλυβας θερμαίνεται πάνω από την A_{c1} σε κατάλληλο τηγμένο λουτρό που περιέχει κυανιούχα αλκάλια και κυανικά οξέα, η επιφάνεια του χάλυβα απορροφά τόσο άνθρακα όσο και άζωτο. Όταν αποψύχεται σε ορυκτέλαιο, παραφινέλαιο, νερό ή αλατόνερο, ο χάλυβας αναπτύσσει ένα στρώμα σκληρής επιφάνειας ή επίστρωση, που περιέχει λιγότερο άνθρακα και περισσότερο άζωτο από την επίστρωση που αναπτύσσεται σε ενεργά λουτρά υγρής ενανθράκωσης.

Σύνθεση μπάνιου. Ένα μίγμα κυανιούχου νατρίου (30%NaCN, 40%Na₂CO₃ και 30%NaCl) χρησιμοποιείται γενικά για την ενδοκυάνωση σε παραγωγικό στάδιο. Τα αδρανή άλατα χλωριούχου νατρίου και ανθρακικού νατρίου προστίθενται στο κυανιούχο άλας για να παρέχουν ρευστότητα και έλεγχο των σημείων τήξης όλων των μιγμάτων. Το μίγμα 30% NaCN, καθώς και αυτά που περιέχουν 45,75% και 97% NaCN, μπορεί να προστεθεί στο λουτρό λειτουργίας για να διατηρηθεί μία επιθυμητή συγκέντρωση κυανιούχου άλατος για μία συγκεκριμένη εφαρμογή.

Θερμοκρασία Ενδοκυάνωσης. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του λουτρού κυανιούχου άλατος για σκλήρυνση κυμαίνονται μεταξύ 760°C και 870°C. Θερμοκρασίες κοντά στο κατώτερο άκρο αυτής της περιοχής ευνοούνται για την ελαχιστοποίηση των στρεβλώσεων κατά τη απόψυξη από τη θερμοκρασία του λουτρού. Όταν ελαφρά ανθρακούχοι και κραματωμένοι χάλυβες πρόκειται να υποστούν ενδοκυάνωση για να παράγουν μία

επιφάνεια ικανή σε μεγάλες φορτίσεις, η επιφάνεια συνήθως πρέπει να υποστηρίζεται από λεπτόκοκκη, σκληρή καρδιά. Αυτό προϋποθέτει λουτρό με θερμοκρασία λειτουργίας περίπου 870°C.

Υγρά Ενανθράκωση Χωρίς παρουσία κυανιούχου άλατος (Liquid Carburizing – NoCyaniding)

Η υγρή ενανθράκωση μπορεί να επιτευχθεί σε ένα λουτρό που περιέχει μια ειδική ποιότητα άνθρακα αντί του κυανιούχου άλατος, ως πηγή άνθρακα. Τα σωματίδια άνθρακα διασκορπίζονται στο τηγμένο άλας με μηχανική ανάδευση, η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός ή περισσοτέρων απλών αναδευτήρων πτερυγίων που καταλαμβάνουν ένα μικρό μέρος του λουτρού. Η βασική σύσταση και τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτού του λουτρού έχουν ως εξής: Η χημική αντίδραση που εμπλέκεται δεν είναι πλήρως κατανοητή αλλά πιστεύεται ότι περιλαμβάνει προσρόφηση μονοξειδίου του άνθρακα σε σωματίδια άνθρακα. Το μονοξείδιο του άνθρακα δημιουργείται από την αντίδραση μεταξύ του άνθρακα και των ανθρακικών αλάτων, τα οποία αποτελούν μείζονα συστατικά του τηγμένου άλατος. Το προσροφημένο μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με χαλύβδινες επιφάνειες πολύ, όπως στην στερεά και στην αέρια ενανθράκωση. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας για αυτόν τον τύπο λουτρού είναι γενικά υψηλότερες από εκείνες για τα λουτρά ενδοκυάνωσης. Χρησιμοποιείται συχνότερα μια περιοχή περίπου 900°C έως 955°C. Θερμοκρασίες κάτω από περίπου 870°C δεν συνιστώνται, και μπορεί ακόμη και να οδηγήσουν σε **εξανθράκωση** του χάλυβα. Τα βάθη των επιστρώσεων και οι βαθμίδες περιεκτικότητας του άνθρακα που παράγονται βρίσκονται στην ίδια κλίμακα με εκείνη των λουτρών ενδοκυάνωσης υψηλής θερμοκρασίας, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει άζωτο. Θερμοκρασίες άνω των 955°C προάγουν την ταχύτερη διείσδυση του άνθρακα και δεν επηρεάζουν δυσμενώς τα λουτρά που δεν περιέχουν κυανιούχο άλας, επειδή δεν υπάρχει κυανιούχο άλας που θα διασπαστεί και θα αφρούς στην επιφάνεια. Η φθορά του εξοπλισμού είναι ο κύριος παράγοντας που περιορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Φούρνοι και Εξοπλισμός

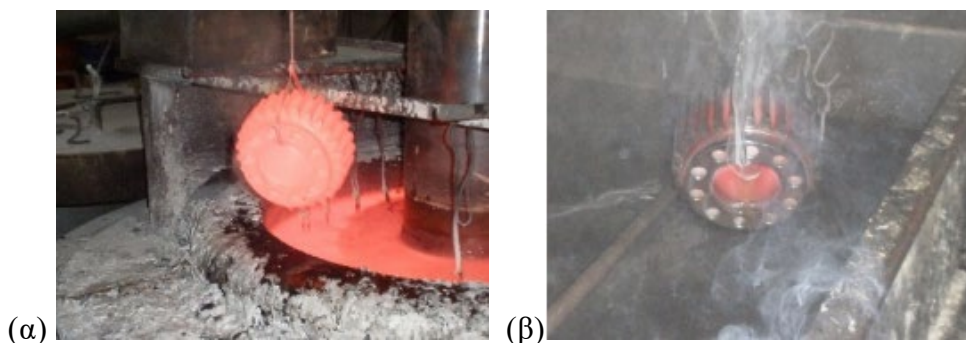
Η υγρή ενανθράκωση πραγματοποιείται σε φούρνο με λουτρό άλατος που μπορεί να θερμανθεί είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά. Σε εξωτερικά θερμαινόμενο κλίβανο, εισάγεται θερμότητα σε ένα δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ του δοχείου αλατιού και της περιβάλλουσας μόνωσης, η οποία κατασκευάζεται από πυρίμαχα τούβλα. Σε εσωτερικά θερμαινόμενο κλίβανο, εισάγεται θερμότητα απευθείας στο αλάτι. Τόσο οι εσωτερικά όσο και οι εξωτερικά θερμαινόμενοι κλίβανοι έχουν γενικά μονωμένα καπάκια που ολισθαίνουν για να ανοίξουν το λουτρό και επιτρέπουν την τοποθέτηση τεμαχίων και στηριγμάτων, με ένα γερανό ή με μηχανικό εξοπλισμό ανύψωσης.

Απόψυξη. Τα περισσότερα συμβατικά μέσα απόψυξης, περιλαμβανομένου του ύδατος, άλμης, καυστικού διαλύματος, ελαίου και τηγμένων αλάτων, είναι κατάλληλα για την απόψυξη τεμαχίων που έχουν ενανθρακωθεί σε τήγμα άλατος. Η καταλληλότητα του κάθε μέσου εξαρτάται κυρίως από την εμβαπτότητα του χάλυβα, τις απαιτήσεις σκληρότητας σε καρδιά και επιφάνεια, το ποσό των επιτρεπόμενων, βάσει ανοχών, στρεβλώσεων.

Αφαίρεση Αλατιού (Πλύσιμο). Η ευκολία ή η δυσκολία με την οποία το άλας μπορεί να απομακρυνθεί από τα τεμάχια που έχουν υποστεί υγρή ενανθράκωση, εξαρτάται από την γεωμετρία των τεμαχίων (απλή ή περίπλοκη) και από το μέσω απόψυξης τους κατά την βαφή (νερό ή λάδι). Η απομάκρυνση του εναπομείναντος άλατος μπορεί να είναι δύσκολη εξαιτίας της παρουσίας των αδιάλυτων υπολειμμάτων. Τα τεμάχια απλής γεωμετρίας, χωρίς τυφλές οπές ή βαθιές εσοχές, που έχουν υποστεί απόψυξη σε νερό, η απομάκρυνση του άλατος αποτελεί σχετικά εύκολη διαδικασία. Μπορούν να ξεπλυθούν καλά στους περίπου 80°C και στη συνέχεια να επικαλυφθούν με ένα έλαιο για την προστασία κατά της σκουριάς. Τα μέρη που αποψύχονται με λάδι είναι πιο δύσκολο να καθαριστούν επειδή το λάδι πρέπει να είναι από αδιάλυτες ενώσεις βαρίου σε παρουσία αλάτων που περιέχουν βάριο. Εάν παραμείνει ένα λευκό, κονιορτοποιημένο επίστρωμα ανθρακικού βαρίου στα τμήματα, μπορεί να αφαιρεθεί μετά την απομάκρυνση όλα του κυανιούχου άλατος με εμβάπτιση σε αραιό διάλυμα οξικού ή υδροχλωρικού οξέος. Τα σύνθετα εξαρτήματα με τις τυφλές οπές, τις εσοχές και τα σπειρώματα είναι δύσκολο να καθαριστούν, ειδικά εάν έχουν υποστεί απόψυξη σε λάδι. Η υγρή ενανθράκωση τεμαχίων που περιέχουν τυφλές οπές για τις οποίες το βάθος υπερβαίνει το διπλάσιο της διαμέτρου, δεν συνίσταται, εκτός εάν οι οπές αυτές μπορούν να καλυφθούν. Το ζεστό νερό ή ο πίδακας ατμού είναι ίσως ο καλύτερος τρόπος διαλύτη για το αλάτι που διατηρείται σε εσοχές, ρωγμές και τυφλές οπές.

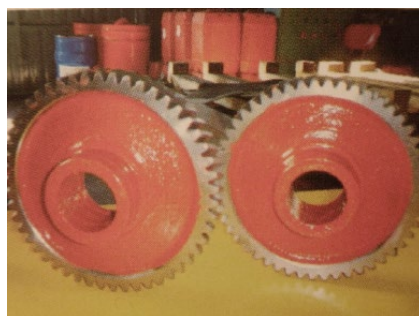
Καθαρισμός τεμαχίων που έχουν υποστεί ενδοκυάνωση. Τα εξαρτήματα που έχουν υποστεί ενδοκυάνωση είναι εύκολο να πλυθούν, ακόμη και μετά την απόψυξη σε λάδι, επειδή το κυανιούχο άλας και το ανθρακικό νάτριο είναι καλά απορρυπαντικά και επειδή όλα τα συστατικά του λουτρό άλατος είναι υδατοδιαλυτά. Το προς κατεργασία τεμάχιο μπορεί να είναι εμποτισμένο σε δεξαμενή αναδευόμενου βραστού νερού, για να ξεπλυθεί με καθαρό ζεστό νερό. ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Γενικά, η στερεά ενανθράκωση προσφέρεται για την επεξεργασία ογκωδών και μεμονωμένων αντικειμένων. Αντιθέτως η αέρια και υγρή ενανθράκωση είναι ταχύτερες και υπάρχει δυνατότητα αυτοματοποίησής τους. Συγκρίνοντας την αέρια με την υγρή ενανθράκωση, ταχύτερη είναι η υγρή λόγω της υψηλότερης δραστηριότητας των αλάτων. Ακόμη προσφέρει τη δυνατότητα ταυτόχρονης επεξεργασίας αντικειμένων διαφορετικής γεωμετρίας και διαφορετικού επιθυμητού βάθους βαφής στον ίδιο κλίβανο. Στην εικόνα 2.47, απεικονίζεται η ενανθράκωση ενός αντικειμένου πιο συγκεκριμένα στην 2.47(α), κατά την διάρκεια της θέρμανσης σε τήγμα ανθρακώχων αλάτων και στην 2.47(β) κατά το στάδιο της απόψυξης σε λάδι.



Εικόνα 2.47: Υγρή ενανθράκωση (α) θέρμανση σε λουτρό τετηγμένων ανθρακούχων αλάτων, (β) Απόψυξη με εμβάπτιση σε λάδι.

Εάν κάποια τμήματα της επιφάνειας δεν πρέπει να ενανθρακωθούν, τότε επικαλύπτονται με αντιδιαχυτική επικάλυψη (π.χ. ηλεκτρολυτικό χαλκό), η οποία εμποδίζει τη διάχυση των ατόμων του άνθρακα στα σημεία αυτά, αυτή η επικάλυψη απεικονίζεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 2.48. Αυτή η δυνατότητα υπάρχει στην περίπτωση της αέριας και στερεάς ενανθράκωσης, αλλά όχι στην υγρή ενανθράκωση, λόγω της αυξημένης χημικής δραστηριότητας των τετηγμένων αλάτων.

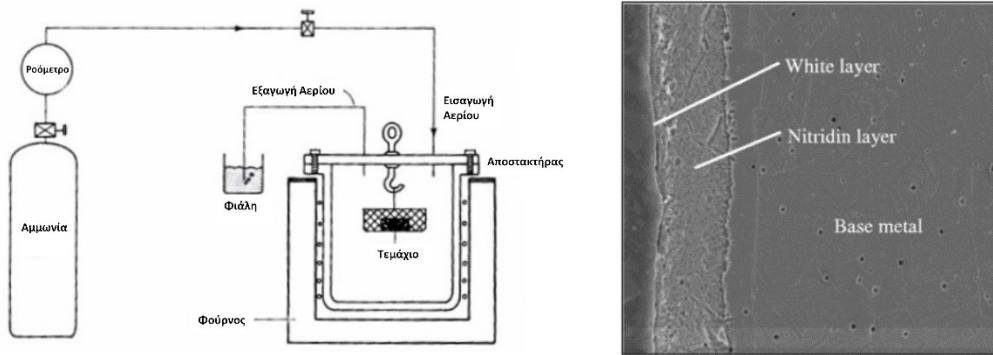


Εικόνα 2.48: Εξαρτήματα προς τοπική ενανθράκωση. Οι επικαλυμμένες περιοχές προστατεύονται από τη διάχυση του άνθρακα και δεν ενανθρακώνονται.

2.5.2 Εναζώτωση (Nitriding)

Η εναζώτωση περιλαμβάνει διάχυση αζώτου σε ένα επιφανειακό στρώμα χάλυβα. Το άζωτο αλληλοεπιδρά τόσο με τον σίδηρο όσο και με άλλα κραματικά 45 στοιχεία που περιέχει ο χάλυβας (π.χ. Al, Cr, Ti) και σχηματίζει νιτρίδια, τα οποία αυξάνουν την σκληρότητα του επιφανειακού στρώματος. Εκτός της αύξησης της σκληρότητας, ο σχηματισμός νιτρίδιων προκαλεί διόγκωση και στρέβλωση του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου, με συνέπεια την εισαγωγή θλιπτικών τάσεων, οι οποίες αυξάνουν την αντοχή του χάλυβα σε κόπωση.

Το στρώμα εναζωτώσεως αποτελείται από δύο επιμέρους ζώνες, την ζώνη νιτρίδιων και την ζώνη διάχυσης (Εικόνα 2.49). Η ζώνη νιτρίδιων ονομάζεται και "λευκή ζώνη" από την λευκή εμφάνιση που παρουσιάζει στην μεταλλογραφική απεικόνιση. Η λευκή ζώνη εκτείνεται σε βάθος έως και 25μm και περιέχει νιτρίδια του. Η ζώνη διαχύσεως αποτελείται από στερεό διάλυμα παρεμβολής Fe-N, που σχηματίζεται από την διάχυση του αζώτου στον φερρίτη. Επίσης περιέχει και νιτρίδια του τύπου $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$. Σύμφωνα με την κατάσταση του αζωτούχου μέσου που χρησιμοποιείται, η κατεργασία διακρίνεται σε αέρια εναζώτωση (500°C), σε εναζώτωση τετηγμένων αλάτων (580°C) και εναζώτωση πλάσματος (450°C).

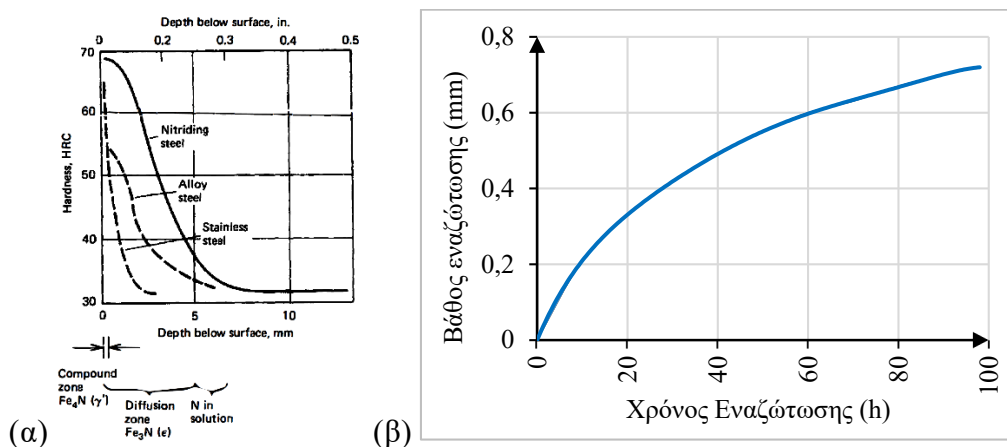


Εικόνα 2.49: (α) Σχηματικό διάγραμμα εξοπλισμού εναζώτωσης, (β) Μικροδομή Εναζωτωμένο υλικού [41]

Στην αέρια εναζώτωση συνήθως χρησιμοποιείται NH_3 , στη υγρή αζωτούχα άλατα, όπως τα κυανιούχα, ενώ στη εναζώτωση πλάσματος, N_2 . Κατά την υγρή εναζώτωση, τα άλατα προσφέρουν επίσης άνθρακα μετατρέποντας τη διεργασία τετηγμένων αλάτων σε διεργασία ενανθρακαζώτωσης. Η υγρή και η αέρια εναζώτωση παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αντίστοιχων διεργασιών ενανθράκωσης, ενώ η εναζώτωση πλάσματος, αν και δαπανηρότερη τελευταία κερδίζει έδαφος, λόγω της πολύ καλύτερης ποιότητας της κατεργαζόμενης επιφάνειας και ακριβούς ρύθμισης του βάθους και του βαθμού σκλήρυνσης.

Το **βάθος της εναζώτωσης** και οι ιδιότητές της εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκέντρωση και τον τύπο των στοιχείων που σχηματίζουν νιτρίδια στον χάλυβα. Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε κράματα, τόσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα της εναζώτωσης. Ωστόσο, τα στοιχεία υψηλότερης κραματοποίησης επιβραδύνουν το ρυθμό διάχυσης του N_2 , γεγονός που επιβραδύνει την ανάπτυξη του βάθους της εναζώτωσης.

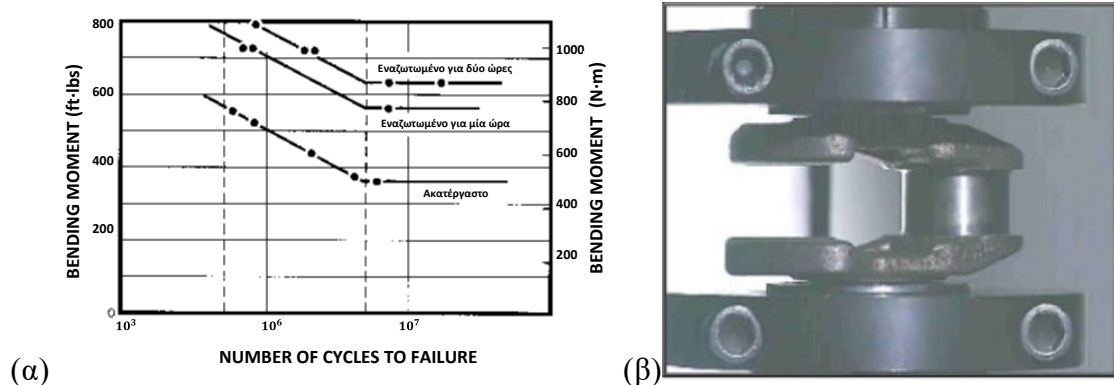
Επομένως, η εναζώτωση απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους (κύκλους) για να επιτευχθεί ένα δεδομένο βάθος από αυτό που απαιτείται για την ενανθράκωση. Στην εικόνα 2.50, απεικονίζεται η σχέση σκληρότητας και βάθους εναζώτωσης.



Εικόνα 2.50: (α) Διάγραμμα σκληρότητας συναρτήσει απόστασης από την επιφάνεια, (β) Βάθος εναζώτωσης συναρτήσει χρόνου εναζώτωσης, [22]

Οι χάλυβες που μπορούν να υποστούν εναζώτωση είναι γενικά χάλυβες μέσου άνθρακα (επιβελτιωμένοι) που περιέχουν ισχυρά στοιχεία σχηματισμού νιτριδίων όπως αλουμίνιο, χρώμιο, βανάδιο και μολυβδαίνιο. Η πιο σημαντική σκλήρυνση επιτυγχάνεται με μια κλάση κραματοποιημένων χαλύβων (τύπος nitralloy) που περιέχουν περίπου 1% Al, εικόνα 2.50α. Όταν αυτοί οι χάλυβες είναι εναζωτωμένοι, το αλουμίνιο σχηματίζει σωματίδια AlN, τα οποία τεντώνουν/ισχυροποιούν το πλέγμα φερρίτη και δημιουργούν ισχυρότερο κρυσταλλικό πλέγμα. Το τιτάνιο και το χρώμιο χρησιμοποιούνται επίσης για τη βελτίωση της σκληρότητας της εναζώτωσης, αν και το βάθος της μειώνεται καθώς αυξάνεται το περιεκτικότητα του κραματοποιητικού στοιχείου. Η μικροδομή παίζει σημαντικό ρόλο στη εναζώτωση, επειδή το άζωτο μπορεί εύκολα να διαχέεται μέσω φερρίτη, και ένα χαμηλό περιεχόμενο καρβιδίου ευνοεί τόσο τη διάχυση όσο και τη σκληρότητα της εναζώτωσης. Συνήθως, οι κραματοποιημένοι χάλυβες υπό συνθήκες επιβελτίωσης χρησιμοποιούνται για εναζώτωση.

Βασικές εφαρμογές της εναζωτώσεως είναι οι στροφαλοφόροι και εκκεντροφόροι άξονες καθώς και χιτώνια κυλίνδρων και έδρες βαλβίδων των μηχανών εσωτερικής καύσεως, εργαλειοχάλυβες κατεργασιών διαμορφώσεως (π.χ. μήτρες διελάσεως αλουμινίου), οδοντωτοί τροχοί κ.λ.π. Στην εικόνα 2.51(α) παρουσιάζεται γραφικά η βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση ενός χυτοσιδήρου λόγω εναζώτωσης ενώ στην 2.51(β) απεικονίζεται ενός εναζωτωμένος στροφαλοφόρος άξονας κατά την διάρκεια δοκιμής θλίψης προς διευκρίνηση της επίδρασης της εναζώτωσης σε αυτόν. Άλλες τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν γρανάζια, εκκεντροφόρους άξονες, στροφαλοφόρους άξονες, τμήματα βαλβίδων, κοχλίες εκβολών (extruders), εργαλεία χύτευσης υπό πίεση, μήτρες σφυρηλάτησης, μήτρες εκβολής (extrusion), εργαλεία καλουπιών μορφοποίησης πλαστικών και καλούπια έγχυσης πλαστικών (injection).



Εικόνα 2.51: (α) Βελτίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση εναζωτωμένου χυτοσιδήρου, (β) Εφαρμογή εναζώτωσης σε στροφαλοφόρο άξονα προς αύξησης μηχανικών ιδιοτήτων, [41]

Σε σχέση με την ενανθράκωση, η εναζώτωση υπερτερεί λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας της κατεργασίας, της υψηλής σκληρότητας που λαμβάνεται, της σταθερότητας σε θερμοκρασίες μέχρι 500°C και της μη αναγκαιότητας περαιτέρω βαφής, ενώ μειονεκτεί λόγω του μεγάλου χρόνου που απαιτείται και του μικρού πάχους κατεργασίας που επιτυγχάνεται (ως $\sim 700 \mu\text{m}$). Η επιφανειακή σκληρότητα των εναζωτωμένων χαλύβων διατηρείται έως και τους 500°C , ενώ οι ενανθρακωμένοι χάλυβες παρουσιάζουν

μείωση των ιδιοτήτων τους από τους 200°C. Επειδή η εναζώτωση πραγματοποιείται σε χαμηλή θερμοκρασία, η ταχύτητα διάχυσης του αζώτου είναι σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα η ζώνη εναζώτωσης να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ζώνη ενανθράκωσης, ενώ ο χρόνος επεξεργασίας μεγαλύτερος.

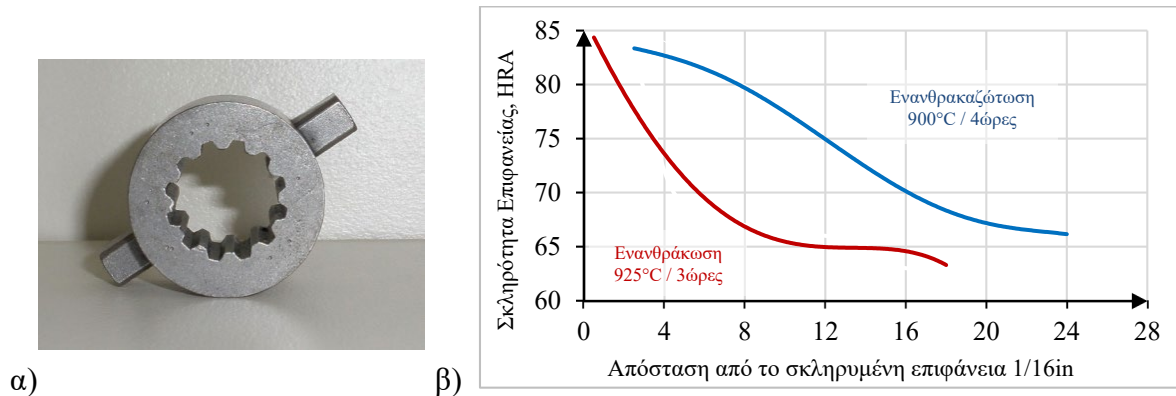
2.5.3 Ενανθρακαζώτωση (Carbonitriding)

Η ενανθρακαζώτωση είναι μια επιφανειακή θερμική κατεργασία όπου εισάγει άνθρακα και άζωτο στον ωστενίτη του χάλυβα. Αυτή η επεξεργασία είναι παρόμοια με τη ενανθράκωση κατά το ότι η σύσταση του ωστενίτη αλλάζει και η υψηλή σκληρότητα της επιφάνειας παράγεται εξαιτίας του σχηματισμού Μαρτενσίτη που δίνει η βαφή. Ωστόσο, επειδή το άζωτο αυξάνει τη σκληρότητα, η ενανθρακαζώτωση καθιστά δυνατή τη χρήση χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα για να επιτευχθεί σκληρότητα επιφανείας ίση με εκείνη που θα είχε ένας υψηλά-κραματωμένος ενανθρακωμένος χάλυβας χωρίς την ανάγκη της ταχείας απόψυξης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μικρότερη παραμόρφωση καθώς και ελαχιστοποίηση πιθανότητας ρωγμών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η σκλήρυνση μπορεί να εξαρτάται από το σχηματισμό νιτριδίου. Αν και η διαδικασία της ενανθράκωσης μπορεί να διεξαχθεί με ατμόσφαιρες αερίου ή λουτρά άλατος, ο όρος «**Ενανθρακαζώτωση**» συχνά αναφέρεται μόνο σε κατεργασία σε ατμόσφαιρα αερίου. Βασικά, η ενανθρακαζώτωση σε ένα λουτρό άλατος είναι η ίδια με τη σκλήρυνση του λουτρού κυανιούχου. Και στις δύο διαδικασίες, το άζωτο ενισχύει τη εμβαπτότητα και την σκληρότητα της επιφάνειας, αλλά εμποδίζει τη διάχυση του άνθρακα. Σε πολλές περιπτώσεις, η ενανθρακαζώτωση χονδρόκοκκων χαλύβων είναι πιο κατάλληλη από την ενανθράκωση λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών και των μικρότερων χρόνων κατεργασίας.

Όπως ο άνθρακας, έτσι και το άζωτο είναι «σταθεροποιητής» του ωστενίτη. Συνεπώς, μπορεί να διατηρηθεί σημαντικός ωστενίτης μετά την βαφή ενός ενανθρακωμένου τεμαχίου. Εάν η διατηρούμενη περιεκτικότητα σε ωστενίτη είναι τόσο υψηλή ώστε να μειώνει τη σκληρότητα και την αντοχή στη φθορά, δύναται να ελεγχθεί με μείωση της περιεκτικότητας σε αμμωνία της αέριας ενανθρακαζώτωσης είτε σε ολόκληρο τον κύκλο είτε κατά τη διάρκεια του τελευταίου τμήματος του κύκλου. Ένα άλλο αποτέλεσμα της υπερβολικής περιεκτικότητας σε άζωτο στην περίπτωση της ενανθρακαζώτωσης είναι το πόρωδες.

Κατά την επεξεργασία άτομα άνθρακα και αζώτου διαχέονται σε παραπλεγματικές θέσεις (άτομα παρεμβολής), σε θερμοκρασία ~850°C, σημαντικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία εναζώτωσης, ~ 530°C, (έτσι ώστε να διαλυθεί ο άνθρακας στον ωστενίτη), αλλά ελαφρά μικρότερη από τη θερμοκρασία ενανθράκωσης, ~ 950°C. Οι χρόνοι επεξεργασίας είναι επίσης μικρότεροι. Η ενανθρακαζώτωση είναι πιο οικονομική από την ενανθράκωση και επιπλέον μειώνονται οι στρεβλώσεις κατά την απόψυξη. Η χαμηλότερη θερμοκρασία επιτρέπει την απόψυξη σε λάδι ή ακόμη και σε πεπιεσμένο αέρα. Τυπικά το βάθος της ενανθρακαζώτωσης κυμαίνεται από 0.07 mm έως 0.5 mm. Μπορεί ακόμη να φθάσει έως 0.75 mm. Γενικά με την ενανθρακαζώτωση επιτυγχάνεται υψηλότερη σκληρότητα από ότι με την ενανθράκωση, 55-62 HRC. Μπορεί ακόμη να γίνει συνδυασμός ενανθράκωσης και ενανθρακαζώτωσης.

Τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν δόντια γραναζιών, άξονες, πείρους, ρουλεμάν, ροδέλες, δίσκους συμπλέκτη οχημάτων, εργαλεία και καλούπια. Στην εικόνα 2.52(α), παρουσιάζεται ένα κόμπλερ αντλίας οχημάτων το οποίο υποβλήθηκε σε ενανθρακαζώτωση, ενώ στην εικόνα 2.52(β), απεικονίζεται γραφικά η επίδραση της διάρκειας της εναζώτωσης στην τελική σκληρότητα του υλικού.



Εικόνα 2.52: (α) Επιφανειακή σκλήρυνση κόμπλερ αντλίας με ενανθρακαζώτωση (min 40 HRC, βάθος βαφής 0.25 mm – 0.65 mm), (β) Επίδραση διάρκειας ενανθρακαζώτωσης στην τελική σκληρότητα, [42]

2.5.4 Βορίωση (Boriding)

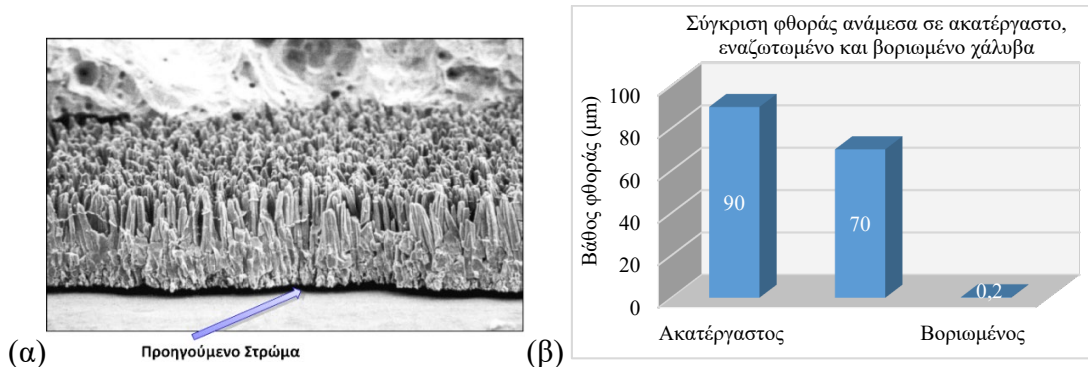
Η **Βορίωση** είναι μια θερμοχημική κατεργασία επιφανειακής σκλήρυνσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε μια μεγάλη ποικιλία σιδηρούχων, μη σιδηρούχων και κεραμικών υλικών. Η διεργασία **στερεής βορίωσης** είναι παρόμοια με τη στερεά ενανθράκωση, με τα προς επένδυση μέρη να επικαλύπτονται με μία ένωση που περιέχει βόριο όπως σκόνη βορίου ή σιδηροβόριο. Η δομή της βοριωμένης ζώνης αποτελείται από τη ζώνη ενώσεων και τη ζώνη διάχυσης, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από την εξωτερική ζώνη βορίωσης και προσδίδει ικανοποιητική μηχανική στήριξη στη ζώνη ενώσεων. Τα βορίδια του σιδήρου είναι υπεύθυνα για την αύξηση της επιφανειακής σκληρότητας και αποτελούν γενικά χημικά σταθερές και σκληρές ενώσεις με πολύ καλή αντοχή σε κόπωση και σε διάβρωση. Η βορίωση των εργαλειοχαλύβων που έχουν υποστεί προηγουμένως βαφή επιτυγχάνεται στους 540°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες μέχρι τους 1090°C προκαλεί αύξηση των ποσοστών διάχυσης, μειώνοντας έτσι τον χρόνο διεργασίας. Η εμποτισμένη με βόριο επιφάνεια δεν χρειάζεται να υποστεί βαφή για να αποκτήσει υψηλή σκληρότητα, αλλά οι εργαλειοχάλυβες που κατεργάζονται στην ωστενιτική περιοχή πρέπει να βάφονται από τη θερμοκρασία επίστρωσης για να σκληρύνουν την επιφάνεια. Η βορίωση εφαρμόζεται συνήθως στους εργαλειοχάλυβες ή σε άλλες επιφάνειες που έχουν ήδη σκληρυνθεί με θερμική κατεργασία.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η συγκολλησιμότητα των επεξεργασμένων επιφανειών, η διατήρηση των μηχανικών ιδιοτήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, η αντιοξειδωτική προστατευτική δράση σε αλκαλικό περιβάλλον και το γεγονός ότι ο χάλυβας επιδέχεται (μετά την επεξεργασία της βορίωσης, δεδομένης της ίδιας τιμής θερμικής διαστολής της βοριωμένης ζώνης και του υποκείμενου χάλυβα) επιπλέον επιβελτίωση προς αύξηση των μηχανικών αντοχών. Εκτός από την υψηλή σκληρότητα, στα πλεονεκτήματα της τεχνικής συγκαταλέγεται η πολύ καλή πρόσφυση του στρώματος των βοριδίων λόγω

της ιδιαίτερης «οδοντωτής» δομής που λαμβάνεται και η πολύ υψηλή προστασία έναντι διάβρωσης από τηγμένα μέταλλα.

Τα μειονεκτήματα της τεχνικής είναι η πολύ υψηλή θερμοκρασία κατεργασίας που πιθανά να εισάγει διαστασιακές στρεβλώσεις ή και ανεπιθύμητες μεταβολές στη μικροδομή του μετάλλου βάσης, η ευθραυστότητα του επιφανειακού στρώματος και η χαμηλή αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση.

Στην εικόνα 2.53(α), απεικονίζεται το στρώμα βορίωσης σε σχέση με το προηγούμενο στρώμα (χωρίς βορίωση) ενώ στην εικόνα 2.53(β), παρουσιάζεται μία συγκριτική μελέτη φθοράς μεταξύ ακατέργαστου, εναζωτωμένου και βοριωμένου χάλυβα.



Εικόνα 2.53: (α) Επίστρωση βορίωσης, (β) Συγκριτική μελέτη φθοράς ανάμεσα σε ακατέργαστο, εναζωτωμένο και βοριωμένο χάλυβα [43]

2.5.5 Εγχρωμίωση (Chromizing)

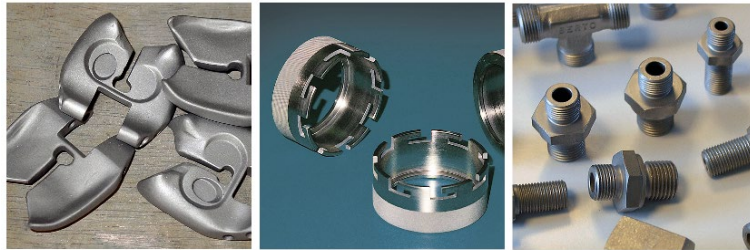
Σε αυτή τη επιφανειακή κατεργασία, άτομα χρωμίου εμποτίζονται στην επιφάνεια προς ισχυροποίηση της αντοχή σε φθορά [44]. Διακρίνονται δύο κατηγορίες εγχρωμίωσης: «Μαλακή εγχρωμίωση» και «Σκληρή εγχρωμίωση»

Η **μαλακή εγχρωμίωση** αναφέρεται επίσης και ως (heat and erosion-resistant Chromizing) δηλαδή εγχρωμίωση κατάλληλη για αντοχή σε θερμότητα και διάβρωση. Το βάθος της εγχρωμίωσης ποικίλει από 35-200μm. Η μαλακή επικάλυψη προσφέρει πολύ σημαντικά οφέλη, καθώς επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους να αποφεύγουν να επενδύουν σε ακριβά ανθεκτικά στη θερμότητα υλικά και αντί αυτού να χρησιμοποιούν φθηνότερα είδη χάλυβων τα οποία στη συνέχεια γίνονται πολύ ανθεκτικά στη θερμότητα μέσω της συγκεκριμένης κατεργασίας. Οι ιδιότητες μετά την κατεργασία προσφέρουν στο υλικό μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς και αντοχή σε πλαστική παραμόρφωση. Η αντοχή σε θερμοκρασία φτάνει τους 850°C. Εφαρμόζεται κυρίως σε σιδηρούχα μέταλλα με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη του 0.1%. Αυτή η τεχνολογία με βάση τη διάχυση χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες για την παραγωγή θερμαντήρων και τις βιομηχανίες χημικών διεργασιών και τροφίμων. Κατασκευάζονται μέσω αυτής της διαδικασίας σωλήνες μεταφοράς, καυστήρες και στοιχεία σχάρας.

Η **Σκληρή Εγχρωμίωση** εφαρμόζει ένα στρώμα από κεραμικό καρβίδιο χρωμίου (CR_xC_y) στην μεταλλική επιφάνεια, καθιστώντας τη έτσι εξαιρετικά ανθεκτική σε φθορά. Το μοναδικό επιφανειακό στρώμα (5-25μm) παρέχει σημαντικές αυξήσεις στη διάρκεια χρήσης που μπορεί να αναμένεται, ανεξάρτητα από το αν είναι λειαντικό ή συγκολλητικό. Μετά την επεξεργασία, η επιφάνεια είναι εξαιρετικά σκληρή και πυκνά

δομημένη και έχει άριστα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η επεξεργασία εγγυάται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των εργαλείων. Η εξαιρετικά ομοιόμορφη δομή του επιφανειακού στρώματος και η απουσία οποιωνδήποτε σκληρών άκρων ή σχηματισμού σταγόνας στις γωνίες, παρέχει στο υλικό σημαντικά πλεονεκτήματα καθώς η επεξεργασία οδηγεί σε ελάχιστη αλλαγή του σχήματος, σε αντίθεση με άλλους τύπους επιφανειακής κατεργασίας. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της διάχυσης είναι ότι δεν υπάρχουν ποτέ προβλήματα συγκόλλησης μεταξύ του υλικού βάσης και του επιφανειακού στρώματος. Μέρη που αντιμετωπίζονται συχνά με αυτόν τον τρόπο περιλαμβάνουν έμβολα αντλιών, σφαιρικές βαλβίδες και βαλβίδες ελέγχου για περιστρεφόμενες σφραγίδες και σωλήνες για τη μεταφορά ποικίλων επιθετικών μέσων. Η σκληρή εγχρωμίωση χρησιμοποιείται για πρέσες εξώθησης και εξοπλισμό μηχανουργικής κατεργασίας καθώς και για εξώθηση αλουμινίου λόγω των εξαιρετικών αντι-συγκολλητικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος.

Στην εικόνα 2.54, παρουσιάζονται φωτογραφίες συχνών εφαρμογών εγχρωμίωσης.



Εικόνα 2.54: Συνήθεις εφαρμογές εγχρωμίωσης [44]

(κενή σελίδα)

3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η σύγκριση των διαφόρων υλικών μεταξύ τους με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότητα τους για μία εφαρμογή γίνεται βάσει των ιδιοτήτων των υλικών. Ιδιότητες των υλικών είναι τα φυσικά μεγέθη, που μας περιγράφουν τη συμπεριφορά του σε εξωτερικές επιδράσεις. Ουδιότητες των μεταλλικών υλικών διακρίνονται σε:

1) Μηχανικές Ιδιότητες

Οι ιδιότητες ενός υλικού που καθορίζουν τη συμπεριφορά του υπό εφαρμοζόμενα φορτία είναι γνωστές ως μηχανικές ιδιότητες. Μια καλή γνώση αυτών παρέχει βάσεις για την πρόβλεψη προς αποφυγή αστοχιών της εφαρμογής. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά οι μηχανικές ιδιότητες. Οι σημαντικότερες εξ αυτών περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.2.

- Ελαστικότητα (Elasticity)
- Πλαστικότητα (Plasticity)
- Μέτρο Ελαστικότητας (Modulus of Elastic)
- Μέτρο Δυσκαμψίας (Stiffness)
- Μέγιστη Τάση Εφελκυσμού (Ultimate Tensile Strength)
- Ολκιμότητα (Ductility)
- Ελατότητα (Malleability)
- Ψαθυρότητα (Brittleness)
- Επανάταξη (Resilience)
- Δυσθραυστότητα (Toughness)
- Αντοχή στη Κρούση (Impact Strength)
- Αντοχή στη Κόπωση (Fatigue)
- Αντοχή στον Ερπυσμό (Creep)
- Αντοχή στη φθορά (Wear Resistance)
- Σκληρότητα (Hardness)

2) Θερμικές Ιδιότητες

Οι θερμικές ιδιότητες αναφέρονται στην αντίσταση του υλικού στην εφαρμογή θερμότητας. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την θερμική συμπεριφορά υλικών που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν ως τμήματα κλιβάνων, φούρνων, ατμολεβήτων όπου πρέπει να αντέξει σταθερά υψηλή θερμοκρασία. Οι σημαντικότερες θερμικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών είναι:

- Θερμοχωρητικότητα (Heat Capacity)
- Ειδική θερμότητα (Specific Heat)
- Θερμική διαστολή (Thermal Expansion)
- Θερμική αγωγιμότητα (Thermal Conductivity)
- Σημείο τήξης (Melting Point)

3) Τεχνολογικές Ιδιότητες

Ονομάζονται εκείνες οι ιδιότητες που δίνουν πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα των μετάλλων για διάφορες τεχνολογικές λειτουργίες. Τέτοιες ιδιότητες είναι πολύ σημαντικές για την μορφοποίηση, διαμόρφωση και κατασκευή των μετάλλων. Οι σημαντικότερες εξ αυτών είναι:

- Εμβαπτότητα (Hardenability)
- Ευχυτότητα (Castability)
- Κατεργασιμότητα (Machinability)
- Συγκολλησιμότητα (Weldability)
- Ικανότητα Διαμόρφωσης (Workability or Formability)

4) Φυσικές Ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες είναι τα χαρακτηριστικά των υλικών που έχουν οριστεί από την φύση. Οι φυσικές ιδιότητες δεν απαιτούν καταστροφικές δοκιμές για να προσδιοριστεί η αξία τους. Οι σημαντικότερες εξ αυτών είναι:

- Διαστάσεις (Dimensions)
- Χρώμα (Colour)
- Εμφάνιση (Appearance)
- Πυκνότητα (Density)
- Πορώδες (Porosity)
- Δομή (Structure)

5) Χημικές Ιδιότητες

Τα περισσότερα εκ των μεταλλικών υλικών, που έρχονται σε επαφή με άλλα ουσίες που μπορούν να αντιδράσουν, τείνουν να υποστούν χημική αλλοίωση. Αυτό έχει συνέπεια την απαίτηση της μελέτης των χημικών ιδιοτήτων. Οι σημαντικότερες χημικές ιδιότητες των μετάλλων είναι:

- Χημική σύσταση (Chemical Composition)
- Μικροδομή (Microstructure)
- Αντίσταση στη διάβρωση (Corrosion Resistance)

6) Ηλεκτρικές Ιδιότητες

- Αντίσταση (Resistivity)
- Αγωγιμότητα (Conductivity)
- Υπερ-αγωγιμότητα (Super Conductivity)
- Δηλεκτρική αντίσταση (Dielectric Strength)

7) Μαγνητικές Ιδιότητες

- Μαγνητική διαπερατότητα (Magnetic Permeability)
- Αντίσταση μαγνητισμού (Coercive Force)
- Υστέρηση (Hysteresis)

8) Οπτικές Ιδιότητες

Ονομάζονται αυτές που σχετίζονται άμεσα με την αλληπίδραση με το φως. Οι σημαντικότερες είναι:

- Ανακλασιμότητα (Reflectivity)
- Δείκτης διάθλασης (Refractivity)
- Απορροφητικότητα (Absorptivity)
- Σκέδαση (Scattering)

3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

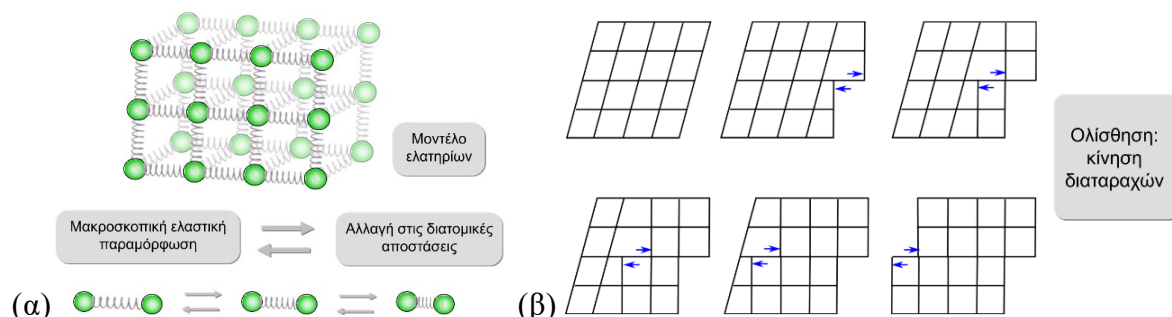
Οι μηχανικές ιδιότητες (mechanical properties) χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά ενός υλικού όταν αυτό δέχεται εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω καταστρεπτικών μηχανικών δοκιμών όπως θα περιγραφούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3. Μηχανικές Δοκιμές.

3.1.1 Ελαστικότητα (Elasticity)

Η τάση ενός παραμορφωμένου στερεού να αναζητήσει τις αρχικές του διαστάσεις κατά την αποφόρτιση ονομάζεται ελαστικότητα. Τα ελαστικά υλικά επανέρχονται στις αρχικές τους διαστάσεις. Μετά την αποφόρτιση, αν η ανάκτηση είναι πλήρης τότε είναι τελείως ελαστικό υλικό. Εάν η ανάκτηση είναι ελλιπής, τότε ονομάζεται μη ελαστικό. Η ελαστική παραμόρφωση είναι παροδική και αντιστρέψιμη και οφείλεται σε «τέντωμα» δεσμών.

3.1.2 Πλαστικότητα (Plasticity)

Η πλαστικότητα είναι η ιδιότητα ενός υλικού σύμφωνα με την οποία παραμορφώνεται μόνιμα, όταν έχει υποβληθεί σε μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη δύναμη, αρκετά μεγάλη ώστε να υπερβεί το ελαστικό όριο. Η πλαστική παραμόρφωση είναι μόνιμη και μη αντιστρέψιμη και οφείλεται σε «σπάσιμο» και αναδιοργάνωση των δεσμών.



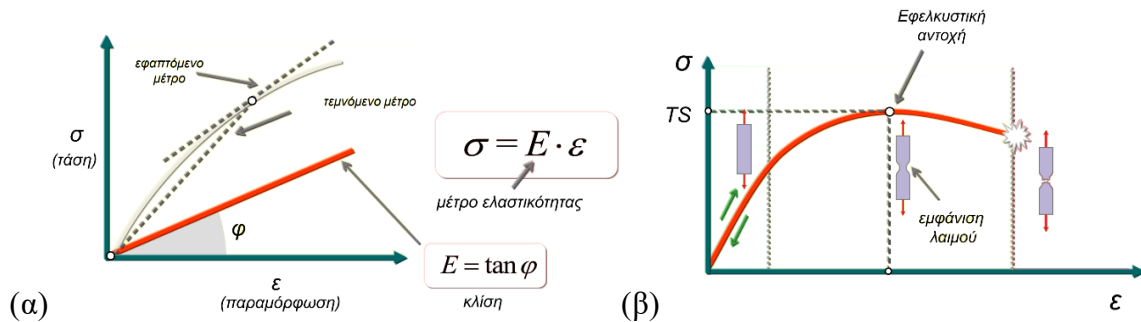
Εικόνα 3.1: (α) Ελαστική συμπεριφορά σε ατομική κλίμακα, (β) Απεικόνιση κίνησης μιας διαταραχής σε κρυσταλλικό πλέγμα, οδηγώντας σε πλαστική παραμόρφωση. [45]

3.1.3 Μέτρο ελαστικότητας (Modulus of Elastic)

Το μέτρο ελαστικότητας E [GPa] ορίζεται από την κλίση της καμπύλης σ - ϵ (Εικόνα 3.2).

3.1.4 Αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength)

Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης στο διάγραμμα (σ-ε). Εδώ συχνά υπολογίζεται λανθασμένα καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η μείωση της διατομής σε εκείνο το σημείο που συνεπάγεται αύξηση της πραγματικής μέγιστης τάσης από αυτήν που θα έδινε ο λόγος μέγιστης δύναμης προς αρχική διατομή.



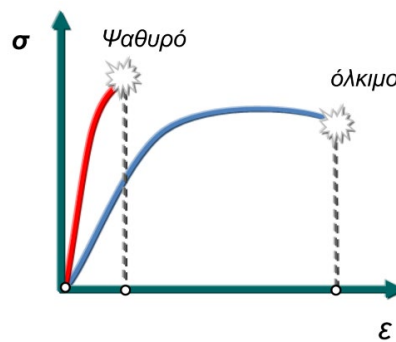
Εικόνα 3.2: (α) Μέτρο ελαστικότητας, (β) Εφελκυστική αντοχή - καμπύλη σ-ε, [45]

3.1.5 Ολκιμότητα (Ductility)

Η ολκιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να υποστεί παραμόρφωση υπό τάση χωρίς θραύση. Η ολκιμότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να εφελκύεται από ένα μικρό τμήμα μεγάλης διατομής σε ένα μεγάλο τμήμα μικρής διατομής χωρίς εμφάνιση λαιμού (όπως στη κατεργασία συρματοποίησης).

3.1.6 Ψαθυρότητα (Brittleness)

Ψαθυρότητα είναι η ιδιότητα ενός υλικού να θραύεται χωρίς αισθητή παραμόρφωση (Εικόνα 3.3). Ένα εύθραστο υλικό θα σπάσει με μικρή μόνιμη παραμόρφωση.



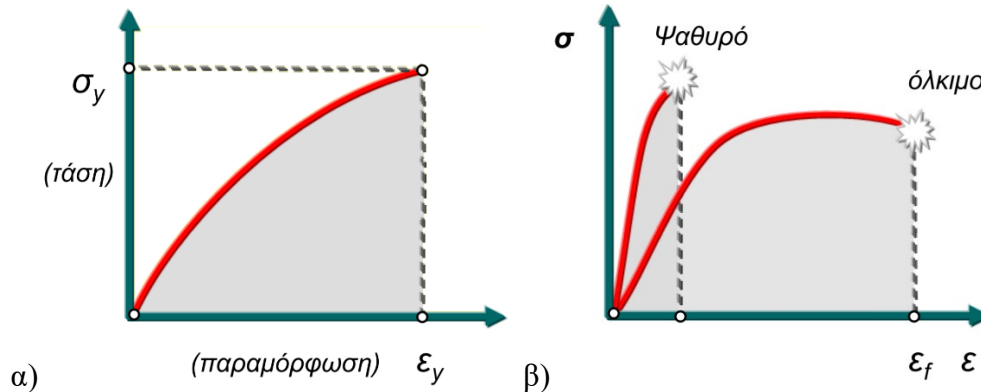
Εικόνα 3.3: Σχηματική παράσταση καμπύλων σ-ε όλκιμων και ψαθυρών υλικών, [45]

3.1.7 Επανάταξη (Resilience)

Η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια όταν παραμορφώνεται ελαστικά κατά την αποφόρτιση για να ανακτηθεί αυτή η ενέργεια (Εικόνα 3.4α). Αντιπροσωπεύει τον λόγο της ενέργειας που δίνεται κατά την αποφόρτιση παραμόρφωσης προς την ενέργεια που απαιτείται για την παραμόρφωση.

3.1.8 Δυσθραυστότητα (Toughness)

Αποτελεί μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια έως την θραύση (Εικόνα 3.4β). Η δυσθραυστότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να αντέχει στην κάμψη μέσω κρούσης ή στην εφαρμογή διατμητικών δυνάμεων χωρίς θραύση.



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση της (α) Ενέργειας επανάταξης, (β) Ενέργειας δυσθραυστότητας, μέσω καμπύλης σ - ϵ , [45]

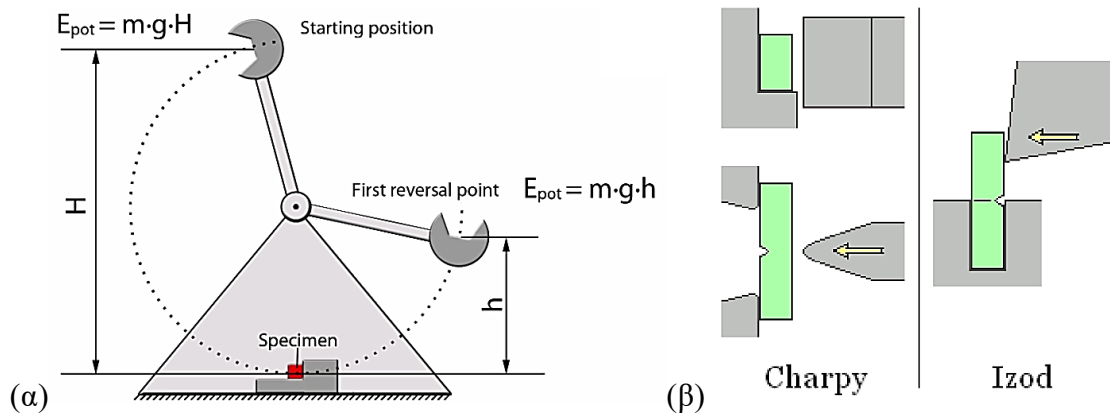
3.1.9 Αντοχή στην κόπωση

Κόπωση ονομάζεται η χαρακτηριστική χρονικά μεταβαλλόμενη καταπόνηση, η οποία μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, δύναται να οδηγήσει στην αστοχία ενός υλικού (θραύση από κόπωση). Το όριο διαρροής αποτελεί μέτρο στατικής αντοχής του. Το όριο κόπωσης είναι κατώτερο του στατικού και αντιστοιχεί στη δυναμική αντοχή του υλικού.

Το φαινόμενο της κόπωσης μπορεί να βοηθηθεί από την παρουσία διαβρωτικών συνθηκών και από την συγκέντρωση τάσεων. Καλός σχεδιασμός των μεταλλικών εξαρτημάτων (όπως γωνίες, εγκοπές) θα οδηγήσει στην μείωση της αντοχής τους σε κόπωση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση των μετάλλων επιτυγχάνεται κυρίως με εξάλειψη επιφανειακών ατελειών με λείανση καθώς και με μεθόδους επιφανειακής σκλήρυνσης, όπως π.χ. με αμμοβολή - υαλοβολή, ενανθράκωση, εναζώτωση.

3.1.10 Αντοχή στην κρούση

Τα κρουστικά φορτία είναι φορτία που μεταβάλλονται πολύ γρήγορα σε σχέση με το χρόνο. Για τον υπολογισμό της αντοχής ενός υλικού σε κρούση χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι υπολογισμού της ενέργειας που απορροφά το υλικό κατά την κρούση (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: α) Πειραματική διάταξη πειράματος κρούσης, β) διαφορές μεθόδου Charpy και Izod [46]

3.1.11 Αντοχή στον ερπυσμό

Η πλαστική παραμόρφωση (ϵ) που παρουσιάζει ένα υλικό σε υψηλές θερμοκρασίες, όταν εφαρμόζεται μια τάση σ (πολύ μικρότερη του ορίου διαρροής του υλικού), ονομάζεται **ερπυσμός**. Για τον υπολογισμό του απαιτούνται μετρητικές διατάξεις μεγάλης ακρίβειας, χωρίς να επηρεάζονται από αυτήν.

3.1.12 Σκληρότητα

Η σκληρότητα είναι η ιδιότητα του υλικού να αντιστέκεται στην πλαστική παραμόρφωση, συνήθως από τη διείδυση. Οι βασικότερες τυποποιημένες μέθοδοι σκληρομέτρησης την προσδιορίζουν σε σχέση με το μέγεθος και την γεωμετρία των αντίστοιχων διεισδυτών και είναι οι :

- Brinell
- Vickers
- Rockwell

Η σκληρότητα ως μηχανική ιδιότητα συνδέεται και με άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού: την αντοχή σε εφελκυσμό, την πλαστικότητα (επιμήκυνση κατά τη θραύση) και τη δυσθραυστότητα. Όταν αυξάνεται η σκληρότητα ενός υλικού, αυξάνεται η αντοχή του και μειώνονται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητας του. Άρα, ένα πολύ σκληρό υλικό είναι πολλές φορές και ψαθυρό (εύθραυστο).

3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι πολύ σημαντική, τόσο για την απευθείας χρήση τους σε μηχανολογικές εφαρμογές, όσο και για την επιλογή του τρόπου διαμόρφωσής τους σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι μηχανικές δοκιμές (mechanical tests) των υλικών έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών τους ιδιοτήτων και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες :

- Καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσοι μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου και

- Μη καταστρεπτικές μεθόδους (έμμεσοι μέθοδοι), στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν βασικά οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Τέτοιες δοκιμές είναι οι ακόλουθες :

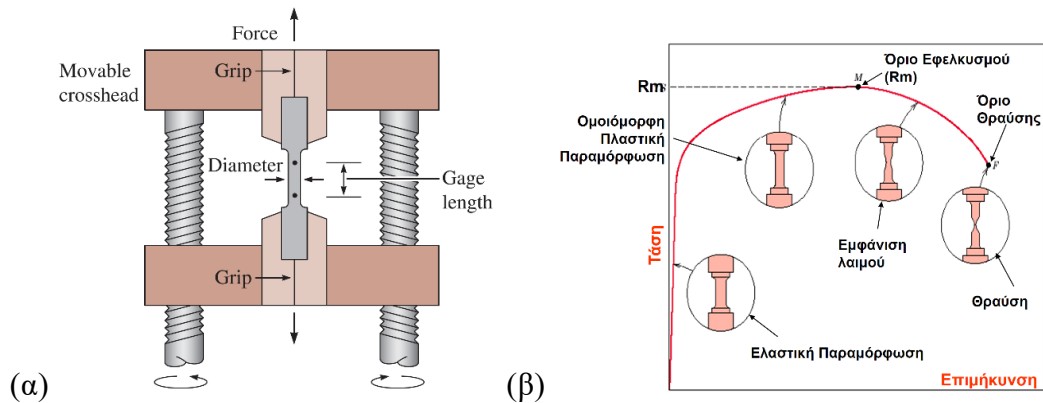
- Δοκιμή εφελκυσμού
- Δοκιμή θλίψεως
- Δοκιμή κάμψης
- Δοκιμή κρούσης
- Δοκιμή κόπωσης
- Δοκιμή ερπυσμού
- Δοκιμή σκληρότητας

3.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Testing)

Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των μεταλλικών υλικών είναι η ικανότητά να αναλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία, αφού παραμορφωθούν εντός ελαστικής περιοχής (αναστρέψιμα) και εν συνεχεία εντός πλαστικής περιοχής (μη αναστρέψιμα) ως την τελική θραύση. Η γνώση της συμπεριφοράς του υλικού υπό καθεστώς στατικής εφελκυστικής φόρτισης, αποτελεί βασικό στοιχείο που πρέπει να εκτιμηθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού μιας μεταλλικής κατασκευής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες καταστροφικής αστοχίας της και περιλαμβάνεται στο φάκελο του σχεδιασμού της. Συμπληρωματικά, η εξέταση της απόκρισης σε εφελκυσμό υλικού που έχει αστοχήσει δίνει πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τη συμμόρφωση της κατασκευής προς τις απαιτήσεις του σχεδιασμού, τόσο ως προς την κατάλληλη επιλογή του υλικού, όσο και ως προς τη διαστασιολογική του ανάλυση. Για το λόγο αυτό εκτελούνται δοκιμές εφελκυσμού, κατά τις οποίες καταγράφεται η εξέλιξη της ονομαστικής τάσης (επιβαλλόμενη δύναμη ανά μονάδα αρχικής διατομής του δοκιμίου) συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης (προκαλούμενη επιμήκυνση ανά μονάδα αρχικού μήκους) του υλικού.

Στην εικόνα 3.6(α), παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη μηχανής εκτέλεσης δοκιμών εφελκυσμού. Στην περίπτωση της ψαθυρής συμπεριφοράς, η θραύση επέρχεται χωρίς προειδοποίηση, αφού οι παραμορφώσεις του υλικού μέχρι τη θραύση είναι αναστρέψιμες και για το λόγο αυτό η ψαθυρή συμπεριφορά είναι εξαιρετικά επικίνδυνη. Ωστόσο, στην πλειοψηφία τους τα μεταλλικά υλικά μηχανολογικών κατασκευών είναι όλκιμα, η θραύση τους επέρχεται μετά από αισθητή μόνιμη παραμόρφωσή τους, «προειδοποιώντας» για την επερχόμενη θραύση με τη δημιουργία λαιμού (Εικόνα 3.7). Χαρακτηριστικά μεγέθη του υλικού που προσδιορίζονται με δοκιμή εφελκυσμού είναι:

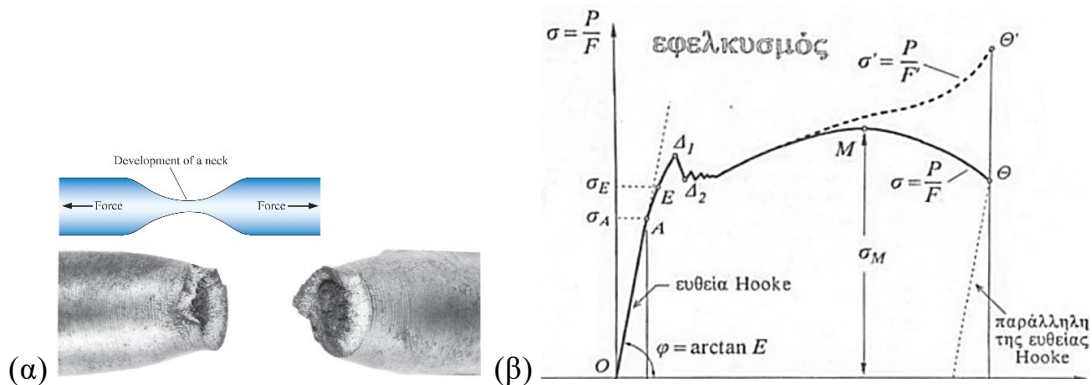
- Το όριο διαρροής (yield stress) (σ_y), δηλαδή η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό προκαλώντας ελαστικές παραμορφώσεις.
- Η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength) $m(\sigma_{ts})$, δηλαδή η μέγιστη τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης που καταγράφεται στο διάγραμμα.
- Η παραμόρφωση θραύσης (ϵ_f), δηλαδή η παραμένουσα επιμήκυνση που μετράται στο μεταλλικό δοκίμιο μετά τη θραύση του



Εικόνα 3.6: (α) Πειραματική διάταξη εφελκυσμού, (β) Πρότυπη καμπύλη εφελκυσμού σ - ϵ , κύρια χαρακτηριστικά εφελκυσμού, [47]

Νόμος του Hooke

Η σχέση ανάμεσα στην τάση και την επιμήκυνση, στην ελαστική περιοχή, είναι γραμμική για τα μέταλλα και τα κεραμικά και περιγράφεται από τον νόμο του Hooke (Εικόνα 3.7β). Το όριο αναλογίας τάσης και παραμόρφωσης ονομάζεται σταθερά ελαστικότητας **E** ή **σταθερά του Young** και είναι ένα μέτρο για την ακαμψία του υλικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το E τόσο πιο στιβαρό είναι ένα υλικό.



Εικόνα 3.7: (α) Δοκίμιο μετά από όγκιμη θραύση [47], (β) Πρότυπο διάγραμμα εφελκυσμού χάλυβα με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του. [48]

Σημαντικότερα Χαρακτηριστικά Εφελκυσμού:

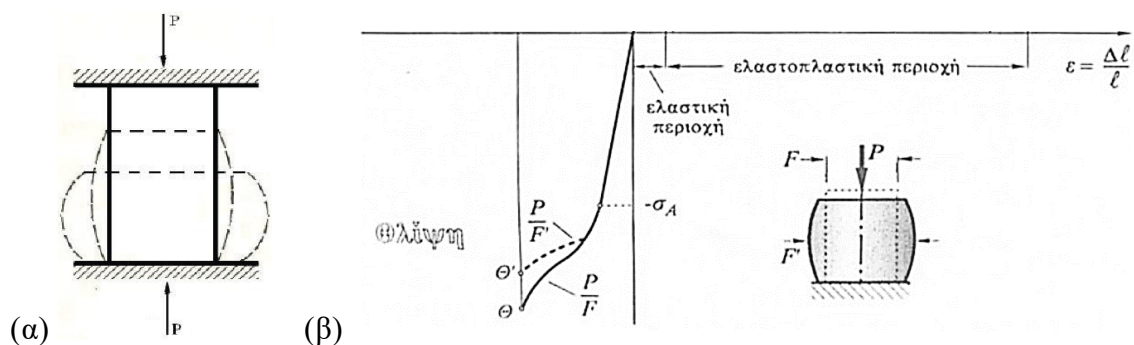
- A: Όριο αναλογίας: Το σημείο μέχρι το οποίο ισχύει ο νόμος του Hooke, $\sigma = E\epsilon$
- E: Όριο ελαστικότητας: Η μέγιστη ορθή τάση που δύναται να αναπτυχθεί χωρίς να παρουσιαστούν στο δοκίμιο μακροσκοπικά μόνιμες ή πλαστικές παραμορφώσεις.
- Δ_1 : Ανώτατο όριο διαρροής
- Δ_2 : Κατώτατο όριο διαρροής: Η τάση εκείνη κατά την οποία παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραμόρφωσης χωρίς αύξησης της τάσης και πέραν αυτής η παραμόρφωση παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλαστική.
- M: Μέγιστη αντοχή εφελκυσμού: Η τάση πέραν της οποίας παρατηρείται εγκάρσια παραμόρφωση (στένωση, λαιμός) του δοκιμίου.
- Θ : Όριο θραύσης: Η τάση που οδηγεί στην θραύση του δοκιμίου.

- Θ' : Πραγματικό όριο θραύσης: Η πραγματική τάση (λόγω μείωσης της διατομής) που οδηγεί στην θραύση του δοκιμίου.

Η διακεκομμένη καμπύλη στην εικόνα 3.7β εκφράζει την πραγματική καμπύλη εφελκυσμού αν ληφθεί υπόψιν και η μείωση της διατομής του δοκιμίου λόγω των επιβαλλόμενων φορτίων.

3.2.2 Δοκιμή θλίψης (Compression Testing)

Το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως (compression test) αποτελεί μια δοκιμή κατά την οποία το δοκίμιο φορτίζεται υπό την επίδραση δυο δυνάμεων, ίσου μέτρου, ίδιας διεύθυνσεως, αντίθετης όμως φοράς, τέτοιας ώστε να προκαλείται συμπίεση του υλικού (Εικόνα 3.8).

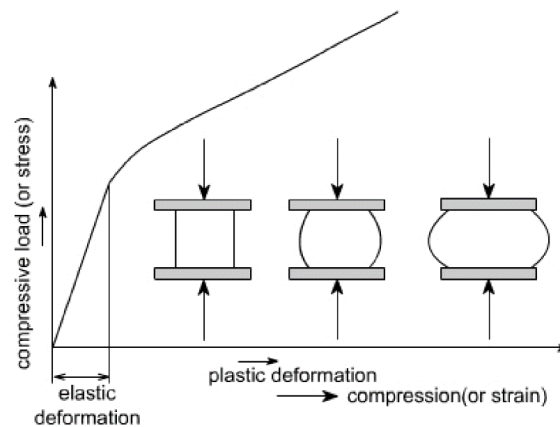


Εικόνα 3.8: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου υπό θλιπτικά φορτία, (β) Διάγραμμα θλίψης εφελκυσμού, [48]

Δεδομένης της ακριβώς αντίθετης διαδικασίας (κατ' αποτέλεσμα) από την αντίστοιχη του εφελκυσμού, τα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης ή ορθής τάσεως- ανηγμένης παραμορφώσεως είθισται να σχεδιάζονται στο 3ο τεταρτημόριο όπου τα αντίστοιχα μεγέθη έχουν αρνητικά πρόσημα, σε σχέση με τα αντίστοιχα του εφελκυσμού (Εικόνα 3.9). Όπως και σε κάθε περίπτωση αξονικής καταπόνησης ενός υλικού, όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι μικρότερη από την τάση ελαστικότητας (young stress) που αντιστοιχεί στο όριο ελαστικότητας του υλικού, το υλικό παραμορφώνεται ελαστικά, υπό θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Στην περίπτωση της ελαστικής παραμόρφωσης (βράχυνσης) και μέχρι το όριο αναλογίας του διαγράμματος σ - ϵ , ισχύει ο νόμος του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις ($\sigma = E \cdot \epsilon$). Οι παραδοχές ισχύος του Νόμου του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις μπορούν να συμπτυχθούν στις ακόλουθες:

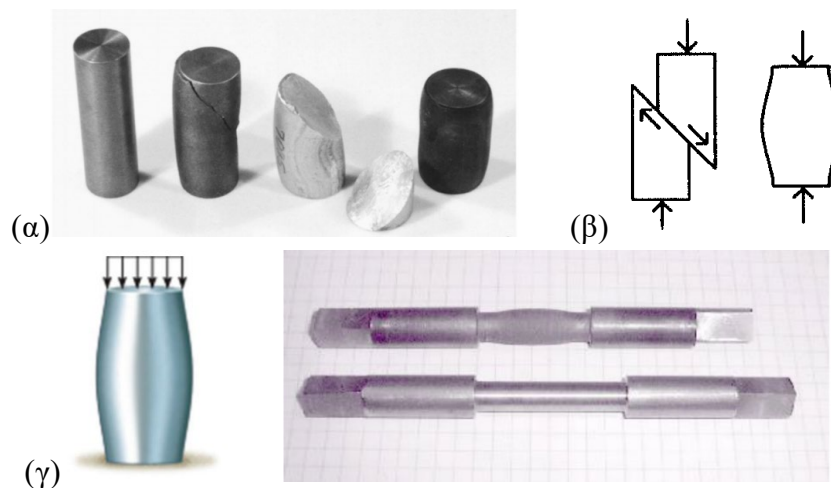
- Η επιβαλλόμενη δύναμη δρα στη διεύθυνση του κύριου άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- Ο κύριος άξονας της ράβδου είναι απολύτως ευθύγραμμος.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.
- Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιμηκύνονται ή συμπιέζονται ακριβώς το ίδιο.
- Οι διατομές που αρχικά είναι επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου, παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- Οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις είναι πάντα μικρότερες από την τάση αναλογίας σ_A του υλικού.

Στην εικόνα 3.10: παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων όλκιμου δοκιμίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το οποίο υποβάλλεται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψεως. Είναι πολύ σημαντικό να τονισθεί ότι κατά την εν λόγω πειραματική διαδικασία το όλκιμο δοκίμιο εμφανίζει μια βράχυνση με παράλληλη πλευρική διόγκωση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται βαρελοποίηση (barreling) και ουσιαστικά αποτελεί το τελικό σημείο του πειράματος. Δηλαδή, το πείραμα της μονοαξονικής θλίψεως όλκιμου υλικού δεν θεωρείται περατωθέν με την θραύση του δοκιμίου (όπως στον εφελκυσμό), αλλά με την εμφάνιση της πλευρικής διόγκωσης του δοκιμίου σε ποσοστό υποβιβασμού του αρχικού του μήκους, περίπου 30%.



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων όλκιμου δοκιμίου σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, [48]

Γενικά, τα ψαθυρά υλικά έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε θλιπτικά φορτία σε σχέση με τα όλκιμα, υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Στην εικόνα 3.10 (α) και (β) δίδεται η μορφή θραύσης του ψαθυρού και του όλκιμου δοκιμίου υπό θλιπτικά φορτία.



Εικόνα 3.10: (α) Φωτογραφίες από πραγματικά δοκίμια υπό θλίψη, (β) Θραύση υπό διατμητικό επίπεδο και θραύση με βαρελοποίηση, (γ) Εμφάνιση βαρελοποίησης σε δοκίμιο που υπέστη θλιπτικά φορτία, [49]

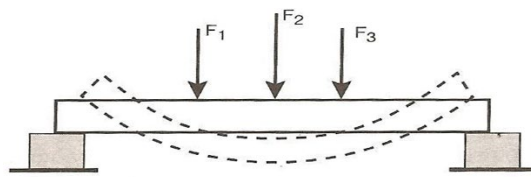
3.2.3 Δοκιμή κάμψης (Bend Testing)

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του φαινομένου της κάμψης ως μηχανική δοκιμή, καθώς είναι και η δοκιμή που υπέστησαν τα δοκίμια της παρούσας

πτυχιακής. Θα αναλυθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε μια καμπτόμενη δοκό και τον υπολογισμό τους, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της αντοχής και της παραμόρφωσης μιας δοκού κάτω από συγκεκριμένη φόρτιση, τη φορτοϊκανότητα της ή τη διαστασιολόγηση της διατομής της.

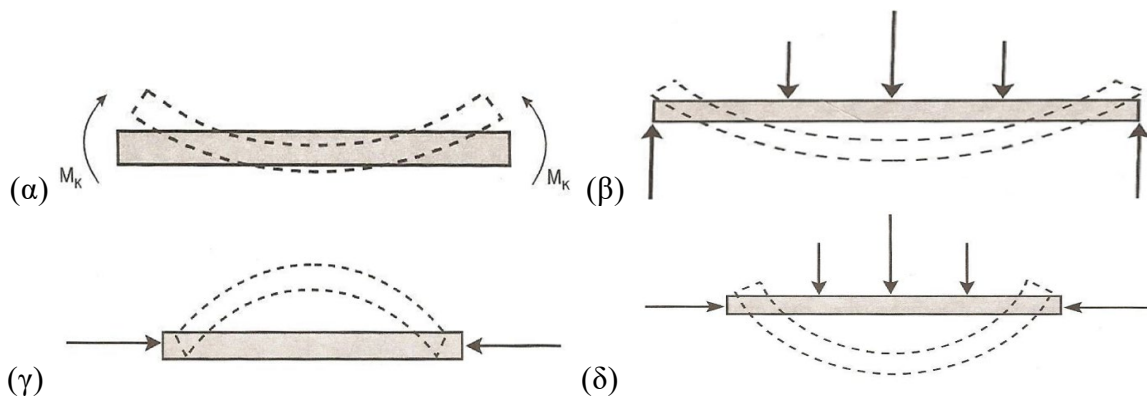
Τύποι κάμψης (κατά την φόρτιση)

Εάν μία ράβδος παραμορφώνεται με την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, υπάρχει μια αλλαγή στη καμπυλότητα του άξονα της, η οποία οφείλεται σε καταπόνηση της ράβδου σε κάμψη (Εικόνα 3.11). Διακρίνονται περισσότερα είδη κάμψης, ανάλογα με την φόρτιση (Εικόνα 3.12).



Εικόνα 3.11: Πρότυπη εικόνα κάμψης (εγκάρσιας)

1. **Καθαρή κάμψη.** Σε αυτήν, αναπτύσσεται μόνο ροπή κάμψης M_k με αποτέλεσμα η ράβδος να καμπυλώνεται.
2. **Εγκάρσια κάμψη.** Σε αυτήν, τα φορτία επενεργούν κάθετα στο γεωμετρικό άξονα της ράβδου, με αποτέλεσμα η ράβδος να καμπυλώνεται.
3. **Επιμήκης κάμψη.** Σε αυτήν, τα φορτία επενεργούν κατά μήκος του γεωμετρικού άξονα της ράβδου, με αποτέλεσμα η ράβδος να καμπυλώνεται.
4. **Μεικτή κάμψη.** Σε αυτήν, τα φορτία επενεργούν έκκεντρα οριζόντια και κάθετα στον γεωμετρικό άξονα της ράβδου, με αποτέλεσμα να καμπυλώνεται.



Εικόνα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση τύπων κάμψης κατά την φόρτιση: (α) Καθαρή κάμψη, (β) Εγκάρσια κάμψη, (γ) Επιμήκης κάμψη, (δ) Μεικτή κάμψη, [49]

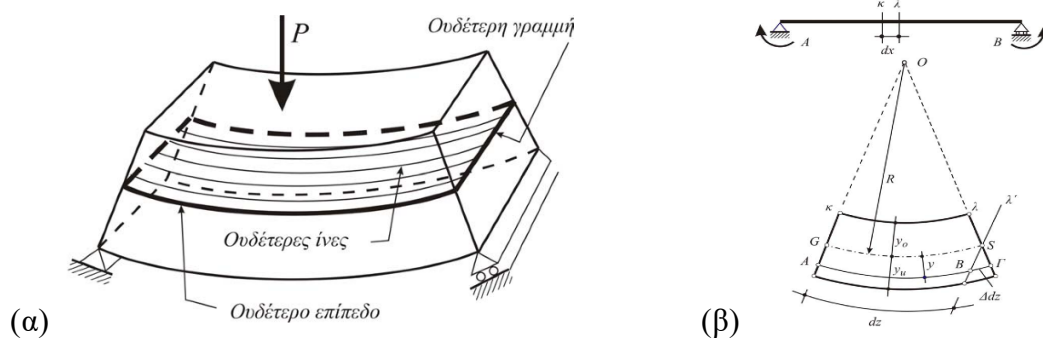
Μία δοκός καταπονείται σε απλή κάμψη, όταν φορτίζεται από ζεύγος ροπών ίσης και αντίθετης φοράς, εφαρμοζόμενων στο επίπεδο της ουδέτερου άξονα του φορέα.

Οι παραδοχές-προϋποθέσεις που λαμβάνονται υπόψη για απλοποίησή των πολύπλοκων προβλημάτων της αντοχής υλικών και για να ισχύουν οι τύποι που θα αναφέρουμε πιο κάτω, είναι:

- Οι διαστάσεις της δοκού (h) σε σχέση με το μήκος της (l), είναι μικρές ($l > 2h$)

- Ο άξονας της δοκού είναι ευθύγραμμος πριν την παραμόρφωση μετά, γίνεται καμπύλος (ελαστική γραμμή).
- Η διατομή της δοκού έχει άξονα συμμετρίας και σε όλο το μήκος της παραμένει αμετάβλητη.
- Τα φορτία που επενεργούν στη δοκό είναι κάθετα πάνω στον άξονα της δοκού και βρίσκονται μέσα στο επίπεδο συμμετρίας, προς το οποίο το διάνυσα της M_K (καμπτικής ροπής) είναι κάθετο.
- Λαμβάνεται υπόψιν, ότι οι επιμηκύνσεις είναι ανάλογες των τάσεων - δηλαδή ισχύει ο Νόμος του Hooke: σε κάθε ίνα της δοκού και το μέτρο ελαστικότητας στον εφελκυσμό, είναι το ίδιο με το μέτρο ελαστικότητας της θλίψης.
- Λαμβάνεται υπόψιν, ότι οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση (Υπόθεση Bernoulli).
- Το υλικό της δοκού είναι ομοιογενές και ισότροπο.

Στην κάμψη της δοκού υπό την επενέργεια των φορτίων που δέχεται, παρατηρούμε ότι οι κάτω ίνες της επιμηκύνονται (εφελκυσμός), ενώ οι επάνω ίνες της επιβραδύνονται (θλίψη) και κατά μήκος του άξονα της δοκού οι ίνες της δεν παθαίνουν καμιά παραμόρφωση (ουδέτερος άξονας). Στις άπειρες εγκάρσιες διατομές της δοκού, αντιστοιχούν και άπειροι ουδέτεροι άξονες που αποτελούν ένα στρώμα, το λεγόμενο «στρώμα των ουδέτερων ινών» και βρίσκονται φυσικά στο όριο των επιμηκυνόμενων και επιβραδυνόμενων ινών (Εικόνα 3.13). Ο ουδέτερος άξονας μιας δεδομένης διατομής περνά από το κέντρο βάρους G της διατομής. Επειδή η παραμόρφωση της ράβδου είναι συνεχής (χωρίς το υλικό της να παρουσιάζει κενά) έπεται ότι η μετάβαση από τη θλίψη στον εφελκυσμό δε γίνεται απότομα αλλά βαθμιαία (Εικόνα 3.14). Επομένως σε ενδιάμεσες θέσεις της διατομής θα υπάρχουν ίνες οι οποίες δεν έπαθαν καμιά μεταβολή στο αρχικό τους μήκος και συνεπώς δεν εμφανίζεται σ' αυτές ούτε θλίψη ούτε εφελκυσμός.



Εικόνα 3.13: (α) Σχηματική αναπαράσταση καμπτόμενης δοκού, ουδέτερη γραμμή, ουδέτερες ίνες, ουδέτερο επίπεδο, (β) Τομή δοκού προς ανάλυση ορθών τάσεων,[49]

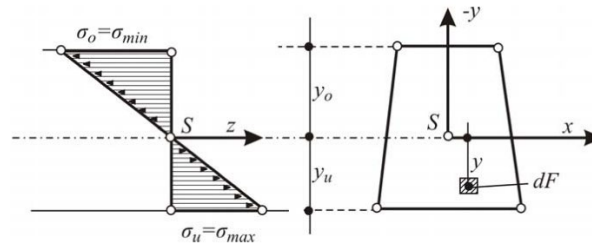
Ανάπτυξη Ορθών Τάσεων

$$\frac{B\Gamma}{GS} = \frac{y}{R} \quad \text{ή} \quad \frac{\Delta dz}{dz} = \frac{y}{R} \quad (3.1)$$

Από τον νόμο του Hooke έχουμε:

$$\frac{\Delta dz}{dz} = \frac{E}{R} y \quad (3.2)$$

Η τελευταία σχέση εκφράζει τη γραμμικότητα της μεταβολής των ορθών τάσεων σ , σε σχέση με την απόστασή τους y από την ουδέτερη γραμμή.



Εικόνα 3.14: Πρότυπη κατανομή ορθών τάσεων δοκιμίου κάμψης, [51]

Σε στοιχειώδη επιφάνεια dF της διατομής που απέχει απόσταση y από την ουδέτερη γραμμή, ενεργεί η στοιχειώδης ορθή δύναμη:

$$dN = \sigma dF = \frac{E}{R} y dF \quad (3.3)$$

Η ολοκλήρωση της τελευταίας σχέσης στην επιφάνεια F , δίνει:

$$N = \int_F dN = \int_F \frac{E}{R} y dF = \frac{E}{R} \int_F y dF = 0 \quad (3.4)$$

Η σχέση (3.4) ορίζει ότι η στατική ροπή της διατομής F ως προς την ουδέτερη γραμμή είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι η ουδέτερη γραμμή περνάει από το κεντροειδές της διατομής, το οποίο είναι σταθερό και προσδιορισμένο σημείο. Παρατηρείται επίσης ότι το άθροισμα των ροπών όλων των στοιχειωδών δυνάμεων dN που αναφέρονται στην προηγούμενη σχέση ως προς την ουδέτερη γραμμή, πρέπει να ισούται προς την καμπτική ροπή M , η οποία ενεργεί στη διατομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η M είναι η καμπτική ροπή που γνωρίσαμε ήδη στην ενότητα δ που αφορά τα φορτία διατομής. Ωστε λοιπόν, είναι:

$$M = \int_F y dN = \int_F y \frac{E}{R} y dF = \frac{E}{R} \int_F y^2 dF \quad (3.5)$$

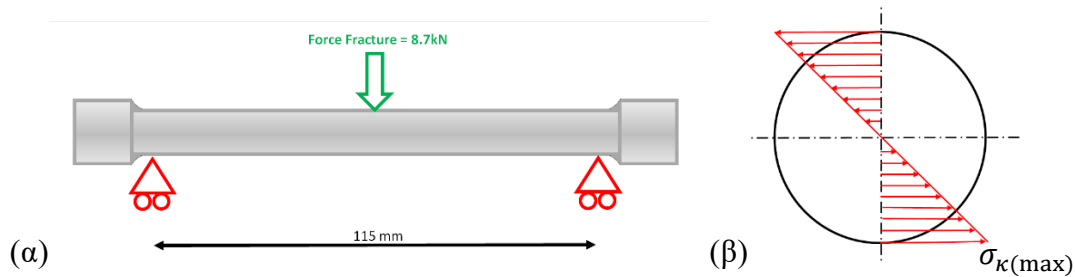
Στην παραπάνω σχέση, ο παράγοντας $\int_F y^2 dF$ εκφράζει τη ροπή αδρανείας I_x της διατομής ως προς την ουδέτερη γραμμή. Άρα:

$$M = \frac{E}{R} I_x \quad (3.6)$$

Απαλείφοντας τον παράγοντα E/R μεταξύ της σχέσης (3.6) και της (3.7), προκύπτει τελικά ο νόμος των ορθών τάσεων για μία δοκιμή κάμψης περιγράφεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{M}{I_x} y \quad (3.7)$$

Αποτέλεσμα αυτού είναι και ο υπολογισμός της μέγιστης ορθής τάσης θραύσης, μίας κυκλικής δοκού, γνωρίζοντας την δύναμη θραύσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης, όπως αυτή συναντάται στη παρούσα πτυχιακή (Εικόνα 3.15).



Εικόνα 3.15: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμίου πτυχιακής σε δοκιμή κάμψης με δεδομένη δύναμη θραύσης 8.7kN, (β) Κατανομή ορθών τάσεων λόγω κάμψης στην διατομή του δοκιμίου στο ήμισυ του συνολικού μήκους.

$$\sigma_{\kappa(\max)} = \frac{M_{\max}}{I_{yy}} \cdot y \quad (3.8)$$

όπου: $I_{yy} = \frac{\pi d^4}{64}$, $M_{\max} = \frac{F l}{4}$

Δοκιμή κάμψης για ψαθυρά υλικά

Στα όλκιμα μεταλλικά υλικά, η καμπύλη ανηγμένων τάσεων – παραμορφώσεων, συνήθως μία τιμή μέγιστης τάσης, αυτή αποτελεί και την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού (σ_{UTS}). Η τελική θραύση του υλικού λαμβάνει χώρα σε τιμή τάσης χαμηλότερης της σ_{UTS}, μετά το σχηματισμό λαιμού, ο οποίος οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας διατομής που παραλαμβάνει το φορτίο. Στα περισσότερα ψαθυρά υλικά, όπως είναι και το δοκίμιο της παρούσας εργασίας (ενανθρακωμένος χάλυβας – Carburized Steel) η μέγιστη τάση σ_{UTS} ταυτίζεται με την τάση θραύσης σ_{Fracture} (Εικόνα 3.18α).

Σε πολλά ψαθυρά υλικά δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα η δοκιμή εφελκυσμού, εξαιτίας της έντονης ψαθυρότητας που εμφανίζουν και καθιστούν την δοκιμή εφελκυσμού επίφοβη. Τέτοια υλικά μπορούν να υποστούν **δοκιμή κάμψης** (Εικόνα 3.16). Το φορτίο ασκείται στο μέσον του δοκιμίου και στα δύο άκρα αναπτύσσονται τάσεις ίσες προς το ήμισυ της φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό προκαλείται κάμψη και αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις από την πλευρά της φόρτισης, ενώ από την αντίθετη αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις. Η θραύση του δοκιμίου ξεκινά από το σημείο ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.19. Η Αντοχή σε κάμψη (**flexural Strength**) ή το μέτρο διάρρηξης (**modulus of rupture**) περιγράφει την αντοχή του υλικού.

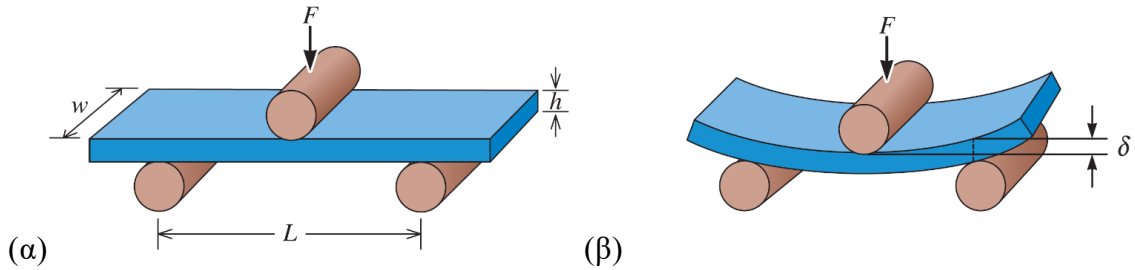
Αντοχή σε κάμψη για έλεγχο κάμψης τριών σημείων

$$\sigma_{\text{κάμψης}} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (3.9)$$

Όπου F το φορτίο θραύσης, L η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων στήριξης, w το πλάτος του δοκιμίου και h το ύψος του δοκιμίου.

Η Αντοχή σε κάμψη έχει μονάδες τάσης. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης είναι αντίστοιχα των καμπυλών τάσης – παραμορφώσης και στο λαμβανόμενο διάγραμμα, οι τιμές τάσης απεικονίζονται συναρτήσει του βέλους κάμψης και όχι της παραμόρφωσης

(Εικόνα 3.16). Το αντίστοιχο διάγραμμα ροπής κάμψης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.16: (α) Η δοκιμή κάμψης συχνά χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μηχανικής αντοχής ψαθυρών υλικών, (β) προσδιορίζεται το βέλος κάμψης δ που προκαλείται από την κάμψη, [47]

Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη ή μέτρο διάρρηξης (flexural modulus / modulus of rupture), υπολογίζεται από την σχέση:

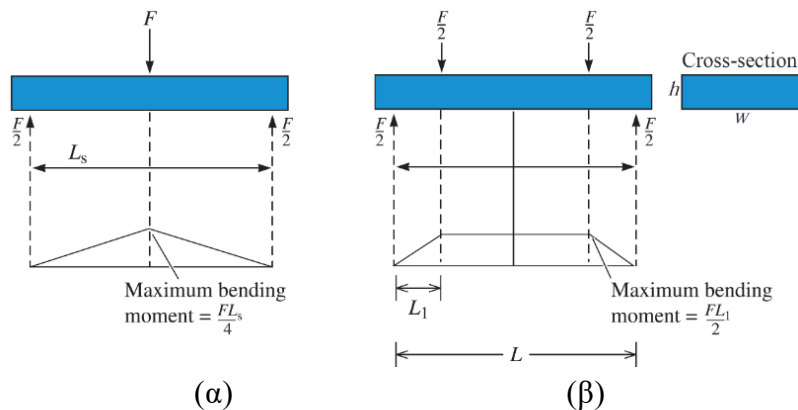
$$\text{Μέτρο Διάρρηξης } E_{\text{κάμψης}} = \frac{L^3 F}{4wh^3\delta} \tag{3.10}$$

Όπου δ το βέλος κάμψης δοκού, στην οποία επιβάλλεται δύναμη F .

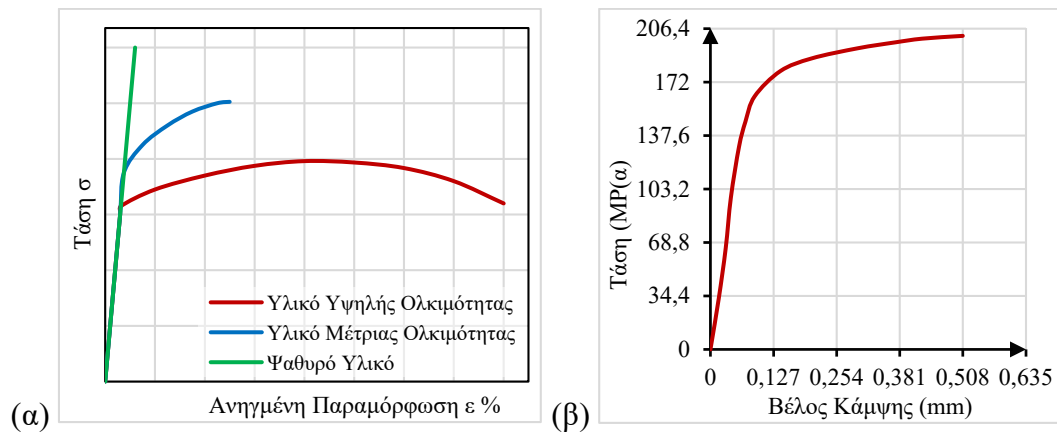
Παραλλαγή αυτής της δοκιμής είναι η δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, Εικόνα 3.17(β). Η μέγιστη τάση ή η τάση τεσσάρων σημείων δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_{\text{κάμψη}} = \frac{3FL}{4wh^2} \tag{3.11}$$

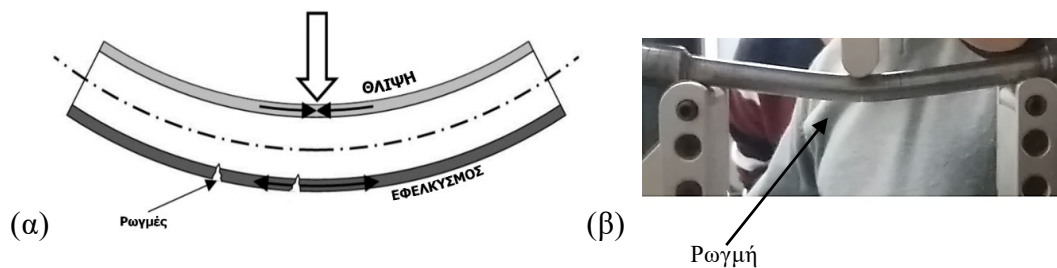
Για την ειδική περίπτωση, στην οποία $L_1=L/4$ της Εικόνας 3.17(β).



Εικόνα 3.17: Διάταξη δοκιμής κάμψης (α) τριών σημείων και (β) τεσσάρων σημείων [47]



Εικόνα 3.18: (α) Διάγραμμα ανηγμένων τάσεων – παραμορφώσεων ψαθυρών και περισσότερο όλκιμων υλικών, (β) Καμπύλη τάσης – βέλους κάμψης, για ψαθυρό υλικό, μετά την δοκιμή κάμψης, [47]



Εικόνα 3.19: (α) Σχηματική αναπαράσταση αποτελέσματος κάμψης ψαθυρών υλικών, [52], (β) Εμφάνιση ρωγμής δοκιμίου πτυχιακής, οριακά πριν την θραύση.

3.2.4 Δοκιμή κρούσης (Impact Testing)

Ένα φορτίο ονομάζεται κρουστικό όταν η χρονική διάρκεια επιβολής του είναι το πολύ ίση με τη θεμελιώδη φυσική περίοδο που αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Ως κρουστικά χαρακτηρίζονται τα φορτία τα οποία είτε μεταβάλλουν γρήγορα το μέγεθος τους (π.χ. χτύπημα με σφυρί) είτε μετακινούν γρήγορα το σημείο επιβολής τους (π.χ. τροχοί κινούμενου τραίνου επάνω σε σιδηροτροχιά). Αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός κρουστικού φορτίου σε ένα υλικό είναι η δημιουργία και η διάδοση τασικών (ελαστικών) κυμάτων μέσα σε αυτό. Τα τασικά κύματα είναι είτε διαμήκη, οπότε προκαλούν διόγκωση (αλλαγή διαστάσεων), είτε εγκάρσια, οπότε προκαλούν στρέβλωση (αλλαγή σχήματος) του δοκιμίου. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αποτελεί ιδιότητα του υλικού και δε σχετίζεται με τη διέγερση.

Η ταχύτητα διάδοσης των διαμηκών κυμάτων εξαρτάται από το μέτρο διάτμησης (G), την πυκνότητα (ρ), το λόγο μέτρο διόγκωσης (K) του υλικού:

$$u_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (3.12)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων δεν εξαρτάται από το μέτρο διόγκωσης:

$$u_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.13)$$

Ο **συντελεστής δυσθραυστότητας** αποτελεί μέτρο της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό πριν τη θραύση του και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού. Οι στατικές δοκιμές δεν αναφέρονται σε ενέργεια αλλά σε τιμή τάσης για το συντελεστή δυσθραυστότητας (αντοχή). Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή δυσθραυστότητας του υλικού, τόσο πιο όλκιμο είναι. Η τιμή του συντελεστή δυσθραυστότητας μεταβάλλεται ανάλογα με τις αλλαγές της κατάστασης της ύλης, όπως για παράδειγμα αυτές που συμβαίνουν με την επίδραση μικρής θερμικής κατεργασίας ή μερικής σφυρηλάτησης.

Πειραματική Διάταξη

Η μηχανή εκτέλεσης δοκιμών κρούσης είναι ένα μηχανικό εκκρεμές του οποίου η αιωρούμενη μάζα αφήνεται από καθορισμένο ύψος έτσι ώστε στο κατώτερο σημείο της τροχιάς της να έχει την ταχύτητα που ορίζουν οι κανονισμοί. Η μηχανή είναι εφοδιασμένη με αντύγα, ο δείκτης της οποίας παρασύρεται από το βραχίονα του εκκρεμούς και δίνει την απορροφούμενη ενέργεια σε kpm.

Κατά τη δοκιμή κρούσης, ένα δοκίμιο απορροφά ενέργεια ίση με:

$$E = mg (H - h) \quad (3.14)$$

Όπου- mg το βάρος της σφύρας που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του φορτίου,

- H το ύψος από το οποίο ξεκινά η σφύρα και

- h το ύψος στο οποίο καταλήγει μετά την θραύση του δοκιμίου.

Η ενέργεια αυτή ανάγεται στην εγκάρσια διατομή του δοκιμίου που απομένει μετά την αφαίρεση της επιφάνειας της εγκοπής και ο λόγος αυτός ονομάζεται συντελεστής δυσθραυστότητας και ισούται με:

$$E = \frac{mg (H - h)}{F} \left(\frac{kpm}{mm^2} \right) \quad (3.15)$$

Υπάρχουν δύο τρόποι πραγματοποίησης της δοκιμής (κατά Charpy και κατά Izod) οι οποίοι διαφοροποιούνται ως προς τη μορφή του δοκιμίου και τον τρόπο στήριξής του. Στη δοκιμή κρούσης η εντατική κατάσταση, το φορτίο και η ταχύτητα καταπόνησης είναι προκαθορισμένες από τη γεωμετρική μορφή του δοκιμίου και την πειραματική διάταξη. Σύμφωνα με τους κανονισμούς εκτελούνται τουλάχιστον τρεις δοκιμές κρούσης με τη μία ή την άλλη μέθοδο.

Ως συντελεστής δυσθραυστότητας του υλικού λαμβάνεται ο μέσος όρος της απορροφούμενης ενέργειας ανά μονάδα ελαχίστης διατομής. Η δοκιμή ολοκληρώνεται με τον έλεγχο της μορφής της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου ώστε να καθοριστεί το είδος της θραύσης (ψαθυρή ή όλκιμη) αναλόγως με το αν επικρατούν λείες και στιλπνές ή ανώμαλες και κοκκώδεις επιφάνειες.

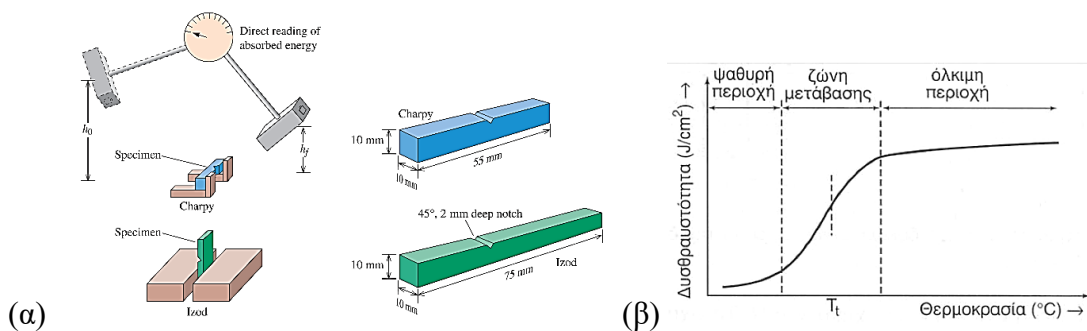
Δοκιμή κατά Charpy (Ευρώπη)

Κατά τη δοκιμή κατά Charpy (που είναι η πιο διαδεδομένη), το δοκίμιο στηρίζεται ως αμφιέριστη δοκός, με απόσταση 40 mm μεταξύ των εδράσεων (Εικόνα 3.20α). Η ακμή της σφύρας προσκρούει στην πλευρά του δοκιμίου απέναντι από εκείνη που έχει την εγκοπή, έτσι ώστε η εγκοπή να βρίσκεται στην περιοχή των εφελκυσμένων ινών. Το

δοκίμιο θραύεται και η ενέργεια απορρόφησης διαβάζεται απευθείας στη μηχανή. Στη δοκιμή Charpy η ταχύτητα κρούσης της σφύρας είναι ίση με 5.75 m/s.

Δοκιμή κατά Izod (ΗΠΑ και Αγγλία)

Κατά τη δοκιμή κατά Izod, το δοκίμιο πακτώνεται σε κατάλληλο σύστημα αρπαγών έτσι ώστε το κέντρο της εγκοπής του να συμπίπτει με το όριο πάκτωσης (Εικόνα 3.20β). Η σφύρα προσκρούει σε μια τομή του δοκιμίου που βρίσκεται 22 mm πάνω από την πάκτωση, με ταχύτητα 3.75 m/s. Στη δοκιμή κατά Izod η επιφάνεια επαφής σφύρας - δοκιμίου βρίσκεται στην ίδια πλευρά του δοκιμίου που βρίσκεται και η εγκοπή, ώστε πάλι να καταπονείται εφελκυστικά η περιοχή της εγκοπής. Διαστάσεις δοκιμίου 75x10x10.



Εικόνα 3.20: (α) Σχηματική αναπαράσταση δοκιμής κρούσης κατά Charpy και Izod, [47], (β) Τυπική καμπύλη μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά.

3.2.5 Δοκιμή κόπωσης (Fatigue Testing)

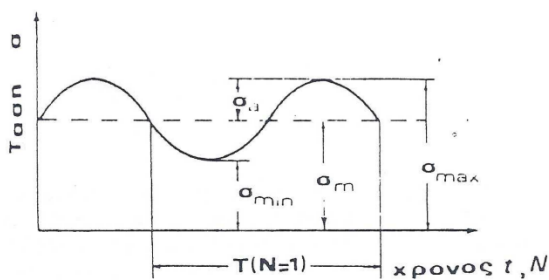
Πολλές φορές, τμήματα κατασκευών ή και ολόκληρες οι κατασκευές (όπως μηχανές εσωτερικής καύσης, κ.λ.π.), καταπονούνται με επαναλαμβανόμενα φορτία στο χρόνο και αστοχούν, χωρίς τα φορτία να υπερβούν το όριο θραύσης ή το όριο διαρροής του υλικού. Το φαινόμενο κατά το οποίο οι μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού μεταβάλλονται και τελικά οδηγούν στην αστοχία του υλικού, υπό την επίδραση εναλλασσόμενων τάσεων, ονομάζεται κόπωση. Τα φορτία και οι αντίστοιχες τάσεις που προκαλούν την κόπωση ονομάζονται φορτία και τάσεις κόπωσης.

Η αντοχή σε κόπωση ενός υλικού είναι ιδιαίτερος σημαντική, επειδή περίπου το 90% των αστοχιών που παρουσιάζονται στην πράξη οφείλονται σε τάσεις κόπωσης. Η αστοχία σε κόπωση οφείλεται κυρίως στις αναπόφευκτες μικροσκοπικές ατέλειες και στις ασυνέχειες που συσσωρεύονται στον όγκο κάθε υλικού. Αυτές αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή μικρές περιοχές στις οποίες οι τάσεις είναι δυνατόν να ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού, παρά το γεγονός ότι σε συνολικό επίπεδο οι εφαρμοζόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής. Στη μεταβολή των τάσεων στις μικρές αυτές περιοχές οφείλει την ύπαρξή του ο μηχανισμός δημιουργίας και επέκτασης μικρορωγμών, οι οποίες εξελίσσονται σε μακρορωγμές και ευθύνονται τελικά για τη μείωση της αντοχής του υλικού ως την τελική θραύση του.

Η συνηθέστερη καταπόνηση σε κόπωση στις εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιείται με εφελκυστικά ή και θλιπτικά φορτία. Γίνονται όμως και δοκιμές σε κάμψη, σε στρέψη

ή σε συνδυασμό αυτών των δύο. Σε όλες τις δοκιμές σε κόπωση, θεωρείται ότι η συχνότητα δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών. Η παραδοχή αυτή ισχύει για συχνότητες μέχρι και 100 Hz. Για μεγαλύτερες συχνότητες, παρατηρείται συχνά σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του εξεταζόμενου υλικού, η οποία επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητές του. Η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου, το οποίο υποβλήθηκε σε καμπτικές ή εφελκυστικές τάσεις κόπωσης, αποτελείται από δύο τμήματα που διακρίνονται εύκολα μεταξύ τους. Δηλαδή, διακρίνεται κατά πόσον η αστοχία του υλικού οφείλεται σε τάσεις κόπωσης ή σε υπέρβαση του ορίου θραύσης από τη μέση τάση.

Η περιοχή Α της επιφάνειας θραύσης είναι λεία και συνήθως αναπτύσσονται γραμμές κόπωσης εξαιτίας της προσωρινής παύσης της καταπόνησης σε κόπωση (προσωρινή παύση λειτουργίας του κινητήρα). Πρόκειται για την περιοχή θραύσης λόγω κόπωσης όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21. Η περιοχή Β αντιστοιχεί στη θραύση της υπόλοιπης διατομής, λόγω υπέρβασης του ορίου θραύσης. Είναι τραχεία, χονδρόκοκκη με έντονα σημάδια πλαστικής παραμόρφωσης. Για την μελέτη της συμπεριφοράς στην κόπωση μπορούμε να εκφράσουμε τη σχέση μεταξύ τάσης (S) και κύκλων φόρτισης (N) με μια ημιτονοειδή συνάρτηση.



- Μέγιστη Τάση (σ_{\max})
- Ελάχιστη Τάση (σ_{\min})
- Εύρος Τάσης ($\Delta\sigma$) = $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
- Μέση Τάση = $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$
- Πλάτος Τάσης = $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$
- Λόγος Τάσεων = $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$

Εικόνα 3.21: Ημιτονοειδής συνάρτηση τάσεων- κύκλων φόρτισης κόπωσης, [52].

Χαρακτηριστικά Κόπωσης

Η τάση μεταβάλλεται μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής:

- εάν η σ_{\min} έχει θετική τιμή τότε η καταπόνηση ονομάζεται κυμαινόμενη εφελκυστική
- εάν η σ_{\max} είναι αρνητική η καταπόνηση ονομάζεται κυμαινόμενη θλιπτική.
- εάν $\sigma_{\min} = 0$ η καταπόνηση ονομάζεται επαναλαμβανόμενη
- εάν $\sigma_m = 0$ τότε η καταπόνηση λέγεται αντιστρεφόμενη.

Αντοχή κόπωσης καλείται η ονομαστική εναλλασσόμενη τάση, η οποία προκαλεί αστοχία για καθορισμένη μέση τάση και κύκλους εναλλαγών.

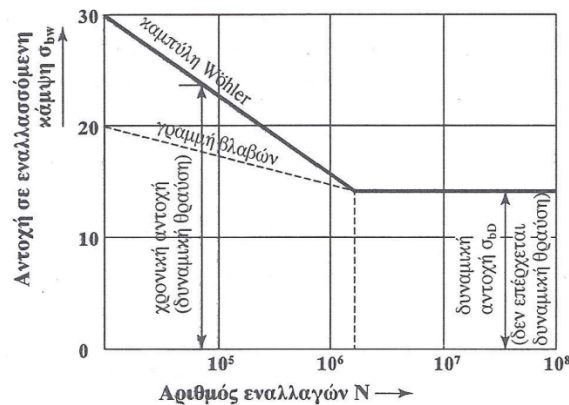
Αντίστοιχα ως **όριο κόπωσης**, ορίζεται η αντοχή σε κόπωση για άπειρο πλήθος εναλλαγών.

Στην πράξη, επειδή το άπειρο πλήθος εναλλαγών δεν έχει νόημα, ορίζεται το συμβατικό όριο κόπωσης το οποίο:

- για χάλυβα επιτυγχάνεται όταν πραγματοποιηθούν κύκλοι $N = 10^7$
- και για κράματα αλουμινίου όταν πραγματοποιηθούν κύκλοι $N = 10^8$

Καμπύλη κόπωσης ή καμπύλη Wöhler ονομάζεται το διάγραμμα τάσης – λογαρίθμου αριθμού κύκλων αστοχίας (Εικόνα 3.22).

- Το όριο κόπωσης, είναι η τάση, η οποία αντιστοιχεί στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης.
- Για τη χάραξη αυτή της καμπύλης καταγράφεται το πλήθος N των κύκλων εναλλαγής που απαιτούνται για τη θραύση δοκιμίων για διάφορα πλάτη εναλλασσόμενης τάσης, δηλαδή καταγράφονται τα ζεύγη (σ_a, N)



Εικόνα 3.22: Χαρακτηριστική καμπύλη Wöhler κόπωσης, [52]

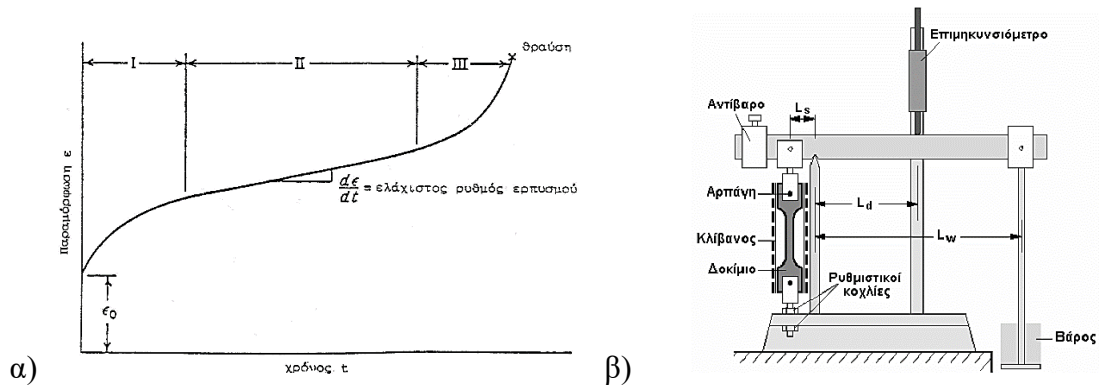
3.2.6 Δοκιμή ερπυσμού

Ερπυσμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης ενός φορέα συναρτήσει του χρόνου, υπό την επίδραση σταθερής τάσης και υπό σταθερή θερμοκρασία.

Ταχύτητα ερπυσμού ονομάζεται ο χρονικός ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου. Σε περιοχές όπου η παραμόρφωση παραμένει σταθερή, λόγω στηρίξεων, τότε μειώνεται η τάση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **χαλάρωση**. Η διατήρηση σταθερής τιμής τάσης για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσει βαθμιαία διαρροή και μεταβολή των διαστάσεων ενός φορέα.

Γενικά, ο ερπυσμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε θερμοκρασίες γύρω στους $0.4T_m$, όπου T_m είναι η απόλυτη θερμοκρασία τήξης (σε βαθμούς K). Υλικά τα οποία έχουν χαμηλή θερμοκρασία τήξης, μπορούν να παρουσιάσουν ερπυσμό σε θερμοκρασίες δωματίου (π.χ. ο μόλυβδος έχει θερμοκρασία τήξης στους 326°C (599K) και στους 20°C (293K , που αντιστοιχεί σε $0.5T_m$) παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά ερπυσμού όπως ο σίδηρος στους 650°C .

Η καμπύλη ερπυσμού είναι μια καμπύλη παραμόρφωσης – χρόνου (Εικόνα 3.23).



Εικόνα 3.23: (α) Χαρακτηριστική καμπύλη σ - ϵ ερπυσμού, (β) Πειραματική διάταξη δοκιμής ερπυσμού.

Η καμπύλη εμφανίζει τρία στάδια:

1. Πρωτογενής ερπυσμός: Η ταχύτητα ερπυσμού μειώνεται με το χρόνο.
2. Δευτερογενής ερπυσμός: Η ταχύτητα ερπυσμού παραμένει σταθερή με το χρόνο.
3. Τριτογενής ερπυσμός: Επιτάχυνση της παραμόρφωσης, μέχρι να σημειωθεί αστοχία του υλικού (θραύση).

Ο ερπυσμός είναι μια συνάρτηση: της τάσης, του χρόνου και της θερμοκρασίας και μπορεί να δημιουργηθεί σε υψηλά επίπεδα τάσεων ή σε μεγάλο χρονικό διάστημα ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Αντοχή στον ερπυσμό ορίζεται η μέγιστη τάση όπου το υλικό όπου το υλικό δεν παρουσιάζει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υψηλή.

Αντοχή κατάρευσης σε ερπυσμό ορίζεται η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί ένα υλικό να ανταποκριθεί ένα υλικό χωρίς να αστοχήσει.

3.2.7 Μέτρηση σκληρότητας

Με τον όρο «σκληρότητα» ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό στην διείσδυση κάποιου άλλου «σκληρότερου» εισβολέα υπό φορτίο. Η σκληρότητα του εξεταζόμενου δοκιμίου καθορίζεται μέσω μιας βαθμονομημένης κλίμακας σκληρότητας, η οποία προκύπτει επείτα από δοκιμές σε πρότυπα δοκίμια, δηλαδή δοκίμια «γνωστής» σκληρότητας από τον κατασκευαστή τους, με σκοπό την εύρεση των αποκλίσεων του σκληρόμετρων αν υπάρχουν και διορθώσεων αυτών μέσω καμπύλης βαθμονόμησης.

Η δοκιμή σκληρότητας αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο χαρακτηρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών καθώς παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Είναι απλή στην χρήση της, χωρίς να απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις.
- Δεν απαιτείται ειδική κατεργασία μορφοποίησης των δοκιμίων ή ιδιαίτερη προετοιμασία.
- Ο εξοπλισμός της δοκιμής είναι σχετικά φθηνός.
- Είναι γρήγορη μέθοδος ως προς τον καθορισμό των αποτελεσμάτων της.
- Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον ποιοτικό έλεγχο κομματιών παραγωγής.

Ανάλογα με την κλίμακα μέτρησης και το φορτίο του διεισδυτή, οι μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας μπορούν να χαρακτηριστούν ως:

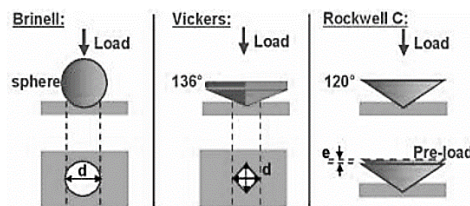
- Μακροσκληρότητα ($F_{\max}= 50 \text{ N}$ ως 1500 N)
- Μικροσκληρότητα ($F_{\max}= 2 \text{ N}$ ως 50 N) ειδικά για πολύ ψαθυρά υλικά
- Νανοσκληρότητα ($F_{\max}= 1\text{mN}$ ως 1000 mN) για πολύ λεπτά φιλμ

Συνολικά υπάρχουν πολλές μέθοδοι μέτρησης της σκληρότητας, αλλά δεν υπάρχει κοινή κλίμακα. Είναι επομένως απαραίτητο κάθε μέθοδος που χρησιμοποιείται να συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά της.

Στις στατικές μεθόδους μέτρησης της σκληρότητας, ένας εισβολέας από πολύ σκληρό χάλυβα ή από διαμάντι, κατάλληλη γεωμετρικής μορφής, πιέζεται από κάθετο φορτίο στο υπό εξέταση δοκίμιο. Οι πιο γνωστές μέθοδοι χαρακτηρισμού της σκληρότητας είναι (Εικόνα 3.24):

Η μέθοδος Brinell

- Η μέθοδος Vickers
- Η μέθοδος Rockwell

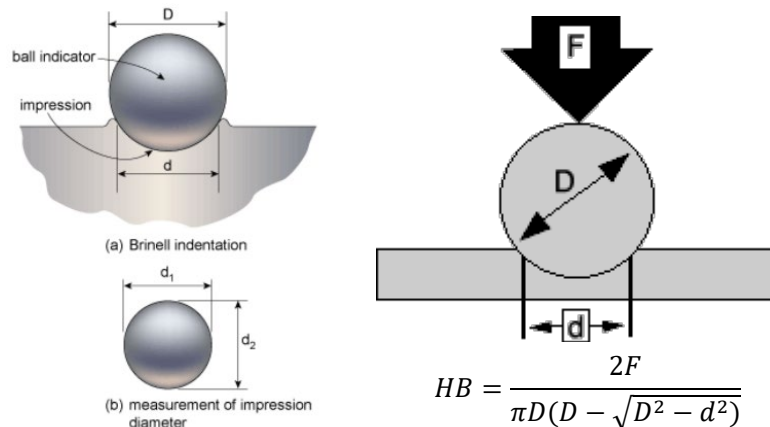


Εικόνα 3.24: Αποτυπώματα διεισδυτή κάθε μεθόδου σκληρομέτρησης, [52]

Κατά τη **μέθοδο Brinell** εφαρμόζεται σταθερό φορτίο μέσω μίας μικρής σφαίρας (1, 2.5, 5 ή 10 mm) για χρονικό διάστημα (10 έως 30 s) πάνω στο δοκίμιο (Εικόνα 3.25). Μετά το πέρας του πειράματος, μετρώντας οι διαστάσεις του αποτυπώματος και υπολογίζεται η σκληρότητα μέσω τύπου. Οι περιορισμένοι της μεθόδου Brinell είναι οι εξής:

- Τα φορτία πρέπει να εκλέγονται ώστε να προκαλούν βάθος αποτυπώματος $>0.01D$ και $<0.15D$, στην πράξη είναι 500-3000 kg δύναμης.
- Η επιφάνεια του δοκιμίου πρέπει να έχει χαμηλή τραχύτητα, ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια το αποτύπωμα.
- Η επιβολή του φορτίου πρέπει να είναι απολύτως κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου.
- Ανάλογα με τη σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού, πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συνθήκες πειράματος και διαφορετικοί εισβολείς.
- Η δοκιμή (30 s) και η προετοιμασία της επιφάνειας του δοκιμίου κάνουν τη δοκιμή χρονοβόρα, επομένως δύσκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία

Είναι σημαντικό να καταγράφονται οι συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος, πιο συγκεκριμένα: η σχέση φορτίου-διαμέτρου, η διάμετρος του σφαιρικού εισβολέα και ο χρόνος επιβολής του φορτίου. Π.χ. η σκληρότητα 356HB30 αναφέρεται σε λόγο $P/D^2=30$.



Εικόνα 3.25: Σχηματική αναπαράσταση αποτυπώματος σφαιρικού διεισδυτή μεθόδου Brinell, [52]

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου Brinell είναι:

- Ολόκληρο το φάσμα σκληροτήτων των διάφορων υλικών καλύπτεται από μία ενιαία κλίμακα.
- Υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί φορτίου-διαμέτρου που δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα.
- Η δοκιμή είναι μη καταστροφική, το δοκίμιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.
- Λόγω της σφαιρικής μορφής του εισβολέα, είναι κατάλληλη για τον καθορισμό της σκληρότητας σε υλικά που έχουν μεγάλο μέγεθος κόκκων, όπως τα σφυρήλατα και τα χυτά.
- Με τη μέθοδο Brinell είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό.

Στη μέθοδο **Vickers** χρησιμοποιείται ως εισβολέας αδαμάντινη κανονική τετραγωνική πυραμίδα με γωνία των απέναντι εδρών 136° (Εικόνα 3.26). Από τη διείδυση δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα με διαγωνίους μήκους d_1 και d_2 . Αν d είναι η μέση τιμή των δύο διαγωνίων, η επιφάνεια του αποτυπώματος δίνεται από τη σχέση:

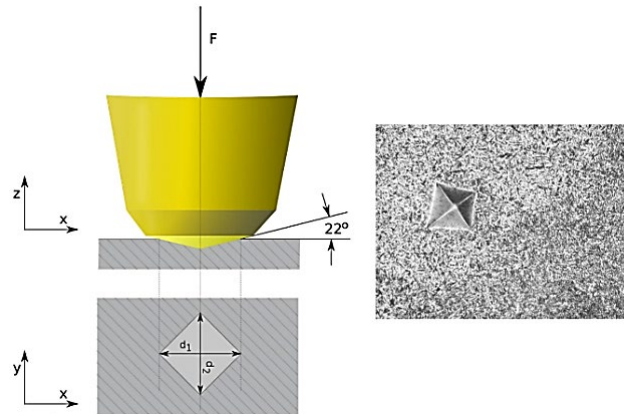
$$A = \frac{d_2}{2 \cdot \cos(22^\circ)} \quad (3.16)$$

Έτσι ως αριθμός σκληρότητας για μέγιστο φορτίο διείδυσης P προκύπτει από το λόγο P/A :

$$HV = \frac{0.1891P}{d^2} \left(\frac{N}{mm^2} \right) \quad (3.17)$$

Η δοκιμή αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Ο εισβολέας διεισδύει στο δοκίμιο υπό σταθερό φορτίο, το οποίο παραμένει για κάποιο χρονικό διάστημα (10-15 s).
2. Όταν περάσει ο χρόνος εφαρμογής του φορτίου, ο εισβολέας απομακρύνεται και μετρώνται οι διαστάσεις των διαγωνίων του αποτυπώματος.
3. Καθορίζεται η τιμή σκληρότητας σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο, π.χ. $HV = 485$ γράφεται 485HV.



Εικόνα 3.26: Σχηματική αναπαράσταση αποτυπώματος διεισδυτή της μεθόδου Vickers, [52]

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Vickers είναι:

- Η σκληρομέτρηση Vickers εφαρμόζεται τόσο στην κλίμακα μακροσκληρότητας, όσο και στην κλίμακα **μικρο-** και **νανο-**σκληρότητας, λόγω της μορφής του εισβολέα και του τελικού αποτυπώματος, τα οποία δίνουν την ίδια τιμή σκληρότητας ανεξαρτήτως του φορτίου.
- Λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης σκληρότητας του αδαμάντινου εισβολέα, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μέταλλα, καθώς και σε πολύ σκληρά υλικά όπως βαμμένοι χάλυβες .
- Τα μήκη των διαγωνίων του αποτυπώματος είναι εύκολο να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια.
- Η παραμόρφωση του εισβολέα είναι αμελητέα ακόμα και για πολύ σκληρά υλικά.

Τα σοβαρότερα μειονεκτήματα της μεθόδου Vickers είναι:

- Η δοκιμή είναι αργή και δύσκολα μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικό επίπεδο.
- Οι επιφάνειες προς μέτρηση πρέπει να είναι καθαρές και να έχουν χαμηλή τραχύτητα.
- Τα μήκη των διαγωνίων του αποτυπώματος όταν μετρώνται με ανθρώπινο μάτι δεν είναι ακριβή.

Η μέθοδος **Rockwell** αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο σκληρομέτρησης στη βιομηχανία λόγω της ταχύτητας και την αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της. Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές της μεθόδου αυτής ωστόσο πλέον χρησιμοποιούνται κυρίως δύο από αυτές, και διαφοροποιούνται ανάλογα με τον διεισδυτή.

- Μέθοδος Rockwell C (HRC) με αδαμάντινο κώνο γωνίας κορυφής 120° .
- Μέθοδος Rockwell B (HRB) με χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου $1/16''$.

Στη μέθοδο αυτή μετριέται το βάθος διεϊσδυσης του εισβολέα με μονάδα μέτρησης 2 μm .

1. Ο εισβολέας τοποθετείται χωρίς φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου.
2. Ένα μικρό φορτίο (10kgf) εφαρμόζεται για να ξεπεραστούν οι επιφανειακές ανωμαλίες και καθορίζεται ένα επίπεδο αναφοράς.
3. Εφαρμόζεται το κύριο φορτίο (150kgf) για 5 s και έπειτα απομακρύνεται.

4. Μετρίεται το τελικό βάθος του αποτυπώματος από το επίπεδο αναφοράς και προκύπτει ο αριθμός HRC, π.χ. 44HRC.

Λόγω της διαφορετικής σκληρότητας των υλικών, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά φορτία και διαφορετικοί εισβολείς ανάλογα με το υπό εξέταση δοκίμιο (Πίνακας 3.1 και Εικόνα 3.27γ). Οι εισβολείς είναι κώνος 120° ή σφαίρες διαμέτρου 1/2, 1/4, 1/8 και 1/16”.

Πίνακας 3.1: Αντιστοιχία φορτίου και διεισδυτή αναλόγως της μεθόδου Rockwell που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

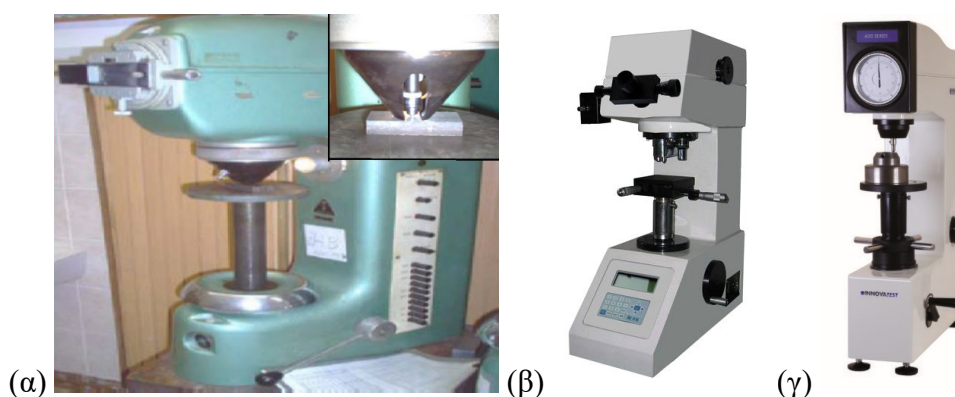
Όνομα	Φορτίο	Διεισδυτής	Χρήση
HRA	60 kgf	120ο Αδαμάντινος κώνος	Καρβίδια Βολφραμίου
HRB	100 kgf	1/16” , Χαλύβδινη σφαίρα	Αλουμίνιο, Ορείχαλκος και μαλακοί χάλυβες
HRC	150 kgf	120ο Αδαμάντινος κώνος	Σκληρότεροι Χάλυβες
HRD	100 kgf	120ο Αδαμάντινος κώνος	
HRE	100 kgf	1/8” , Χαλύβδινη σφαίρα	
HRF	60 kgf	1/16” , Χαλύβδινη σφαίρα	
HRG	150 kgf	1/16” , Χαλύβδινη σφαίρα	

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Rockwell είναι:

- Γρήγορη δοκιμή, ένα πείραμα σκληρομέτρησης δεν κρατάει πάνω από 15 s, ενώ η μόνη προετοιμασία που χρειάζεται είναι ένας απλός καθαρισμός της επιφάνειας.
- Άμεσο αποτέλεσμα με μεγάλη ακρίβεια, δεν χρειάζεται παρατήρηση γιατί η μέτρηση του βάθους γίνεται απευθείας στη συσκευή σκληρομέτρησης.

Τα σοβαρότερα μειονεκτήματα της μεθόδου Rockwell είναι:

- Χρειάζονται 30 κλίμακες για να καλύψουν όλο το φάσμα σκληροτήτων των υλικών.
- Οι μετατροπές στις διαφορετικές κλίμακες εξαρτώνται από τα υλικά.



Εικόνα 3.27: Φωτογραφίες διατάξεων σκληρομέτρησης: (α) Brinell, (β) Μικροσκληρόμετρο Vickers, (γ) Rockwell (Innovatest 600 Series).

(κενή σελίδα)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ
5. ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ
6. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ
ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕΣΩ S.E.M.
7. ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ
ΘΡΑΥΣΗΣ
8. ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

(κενή σελίδα)

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΧΑΛΥΒΑΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

Η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση της διάρκειας ενανθράκωσης του χάλυβα κατασκευών 15CrNi6 κατά DIN (1.5919). Το υλικό παραλήφθηκε σε άξονες λείας επιφανείας διαμέτρου 23 mm. Στην εικόνα 4.2, επισυνάπτεται το πιστοποιητικό ποιότητας της εταιρίας, το οποίο αναφέρεται στην ποιότητα και την χημική σύσταση του χάλυβα. Οι προαναφερθέντες ράβδοι έχουν υποστεί έλαση εν θερμώ (hot rolled steel bars) από χάλυβα 15CrNi6 βάσει του προτύπου DIN 10200-86, επίσης έχουν παραδοθεί σε ανοπτημένη κατάσταση (Annealed).

Ο χάλυβας 15CrNi6 κατά DIN (AISI 3115, W.No: 1.5919) ανήκει στην ομάδα των χαλύβων κατασκευών και πιο συγκεκριμένα σε αυτήν των ειδικών κραματομένων χαλύβων επιφανειακής βαφής – ενανθράκωσης (βλέπε κεφάλαιο 1.3.2.3. (3) σελίδα 20 της παρούσας πτυχιακής). Η χημική του σύσταση αποτελείται από μικρά ποσοστά σε άνθρακα (0.17%) και κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το χρώμιο (Cr) και το νικέλιο (Ni), την χημική σύσταση του υλικού συμπληρώνουν χημικά στοιχεία όπως: Το μαγγάνιο (Mn), το θείο (S), ο φώσφορος (P), το πυρίτιο (Si) και το αλουμίνιο (Al).

Ο συγκεκριμένος χάλυβας χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή επιφανειακή αντοχή, αντοχή στην φθορά και στην τριβή και ταυτόχρονα πυρήνας καλής αντοχής. Τα συνηθέστερα πεδία εφαρμογών αποτελούν τα στοιχεία μηχανών ή τα εργαλεία διαμόρφωσης όπως κοχλίες εργαλειομηχανών, πείροι ακραξινίων, δακτύλιοι ρουλεμάν, οδοντωτοί τροχοί κιβωτίων, σιαγόνες για τσοκ τόννου, γενικότερα σε σημεία που δέχονται κρουστικά φορτία.

Όσον αφορά, την κατάσταση παραλαβής από τον κατασκευαστή είναι συνήθως κατάσταση ανόπτησης ή μαλακτοποίησης για μηχανουργικές κατεργασίες λόγω καλύτερης κατεργαστικότητας (170-235 H(B)). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι είναι κατάλληλος για συγκόλληση τήξεως πριν την ενανθράκωση κατόπιν προθέρμανσης, ενώ η επαναφορά αυτού του χάλυβα σε θερμοκρασίες 150-200 °C, βελτιώνει σημαντικά την αντοχή του μειώνοντας ελάχιστα την σκληρότητα.

4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Ο σκοπός της εργασίας αφορά την διερεύνηση της επίδρασης του χρόνου ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε δύο περιπτώσεις θερμικών κατεργασιών, αυτή της κλιμακωτής βαφής και αυτή της συνεχούς βαφής. Για την διεξαγωγή του πειράματος επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές χρονικές διάρκειες (1ώρα, 2ώρες, 3ώρες, 4ώρες) σε κάθε θερμική κατεργασία. Οι χρονικές διάρκειες επιλέχθηκαν με κριτήριο το γεγονός ότι είναι οι συνηθέστερες περιπτώσεις ενανθράκωσης στην βιομηχανία. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, οι μόνες παράμετροι του πειράματος είναι η διάρκεια ενανθράκωσης και ο

τύπος θερμικής κατεργασίας (συνεχής ή κλιμακωτή βαφή), όλες οι υπόλοιποι παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις. Για να καθίσταται δυνατή η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, για κάθε περίπτωση προετοιμάστηκαν τέσσερα δοκίμια.

Για την διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκε τυχαιοποίηση των δοκιμών μέσω του προγράμματος MINITAB 17. Τα αποτελέσματα διατυπώνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τυχαιοποίηση δειγμάτων

A/A	Θερμική Κατεργασία	Τυχαιοποίηση	A/A	Θερμική Κατεργασία	Τυχαιοποίηση
1	1h + oil	39	18	1h + AS140	5
2	1h + oil	43	19	1h + AS140	15
3	1h + oil	44	20	1h + AS140	33
4	1h + oil	35	21	1h + AS140	32
5	2h + oil	22	22	2h + AS140	45
6	2h + oil	31	23	2h + AS140	7
7	2h + oil	29	24	2h + AS140	17
8	2h + oil	18	25	2h + AS140	57
9	2h + oil	26	26	2h + AS140	48
10	3h + oil	27	27	3h + AS140	10
11	3h + oil	6	28	3h + AS140	37
12	3h + oil	19	29	3h + AS140	4
13	3h + oil	50	30	3h + AS140	53
14	4h + oil	36	31	4h + AS140	49
15	4h + oil	40	32	4h + AS140	56
16	4h + oil	58	33	4h + AS140	21
17	4h + oil	54	-	-	-

Στους πίνακες 4.2 (α) και 4.2 (β), παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα προγράμματα θερμικών κατεργασιών που υπέστη τα δοκίμια του πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.2(α): Πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών συνεχούς βαφής.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ				ΒΑΦΗ			ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ			
		ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ		ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΨΥΞΗ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΨΥΞΗ	
		T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	ΜΕΣΟ	T (°C)	T (min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ
ΕΝΑΝ/ΣΗ 1 ΩΡΑΣ	39	630	30	900	60	840	30	ΛΑΛΑΤΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	43											
	44											
	35											
ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ 2 ΩΡΩΝ	22	630	30	900	120	840	30	ΛΑΛΑΤΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	31											
	29											
	18											
	26											
ΕΝΑΝ/ΣΗ 3 ΩΡΩΝ	27	630	30	900	180	840	30	ΛΑΛΑΤΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	6											
	19											
	50											
ΕΝΑΝ/ΣΗ 4 ΩΡΩΝ	36	630	30	900	240	840	30	ΛΑΛΑΤΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	40											
	58											
	54											

Πίνακας 4.2(β): Πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών ισοθερμοκρασιακής βαφής.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ				ΒΑΦΗ					ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ				
		ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ		ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΨΥΞΗ Ι			ΨΥΞΗ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΨΥΞΗ	
		T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	T (°C)	t (min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ	T (°C)	t (min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ
ΕΝΑΝ/ΚΩΣΗ 1 ΩΡΑΣ	5	630	30	900	60	840	30	180	15	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	15														
	33														
	32														
ΕΝΑΝ/ΚΩΣΗ 2 ΩΡΩΝ	45	630	30	900	120	840	30	180	15	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	7														
	17														
	57														
ΕΝΑΝ/ΚΩΣΗ 3 ΩΡΩΝ	10	630	30	900	180	840	30	180	15	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	37														
	4														
	53														
ΕΝΑΝ/ΚΩΣΗ 3 ΩΡΩΝ	49	630	30	900	240	840	30	180	15	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	56														
	21														

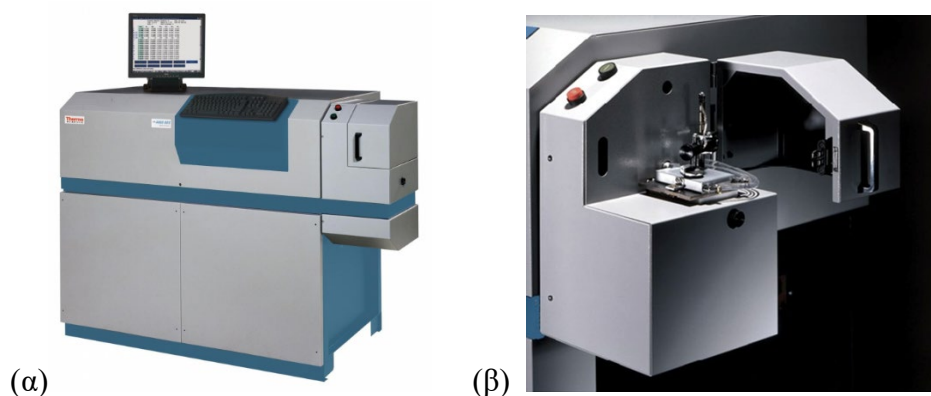
4.3 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΛΙΚΟΥ

Ο ποιοτικός έλεγχος κάθε υλικού αποτελεί απαραίτητο στάδιο σε κάθε ένα από τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας, σε μία βιομηχανία επεξεργασίας μετάλλου. Όπως και οι υπόλοιποι έλεγχοι, έτσι και η χημική ανάλυση αποτελεί έναν από τους ελέγχους οι πραγματοποιούνται σε κάθε περίπτωση ακολουθώντας αυστηρά πρότυπα. Μία από τις πλέον ευρέως, στην βιομηχανία, μεθόδους χημικής ανάλυσης είναι η φασματοσκοπική ανάλυση ατομικής εκπομπής. Όσον αφορά την αρχή λειτουργίας της φασματοσκοπίας ανάλυσης ατομικής εκπομπής, στοιχειακής ανάλυσης, χρησιμοποιείται διέγερση σπινθήρα (spark) και arc, η οποία προτιμάται έναντι των υπολοίπων ως μέθοδος για την στοιχειακή ανάλυση δειγμάτων μετάλλου. Η συγκεκριμένη διεργασία αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους τρόπους ελέγχου των κραμάτων διαφόρων μετάλλων, λόγω της ταχείας ανάλυσης σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια που προσφέρει. Οι φασματογράφοι εργαστηρίων χρησιμοποιούνται στα στάδια εκείνα της παραγωγικής διαδικασίας όπου απαιτείται χημική ανάλυση δειγμάτων του μετάλλου, όπως είναι τα στάδια ποιοτικού ελέγχου εισαγωγής πρώτων υλών, επεξεργασίας αυτών αλλά και στον έλεγχο των τελικών προϊόντων. Στις περιπτώσεις των μηχανολογικών εξαρτημάτων όπου απαιτείται χημική ανάλυση, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy), λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας. Εξαιτίας της δημιουργίας πλάσματος, τα άτομα των στοιχείων του προς μελέτη υλικού διεγείρονται με αποτέλεσμα της εκπομπή μιας σειράς χαρακτηριστικών για κάθε ένα ακτινοβολιών. Η ποιοτική ανάλυση γίνεται με την ανίχνευση των κύριων φασματικών γραμμών ενώ η ποσοτική ανάλυση γίνεται μετά από κατάλληλη μέτρηση της έντασής τους με τη χρήση προτυποποιημένων δειγμάτων του αντίστοιχου στοιχείου.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων της εργασίας, επιλέχθηκε η μέθοδος της φασματοσκοπίας οπτικής εκπομπής. Η χημική ανάλυση του υλικού πραγματοποιήθηκε στην εταιρία Χαλυβουργική Α.Ε. και χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος τύπου OE Spectrometer Thermo ARL model: 3460, serial No: 2524 (Εικόνα 4.1)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μέθοδος της φασματοσκοπίας οπτικής εκπομπής. Η χημική ανάλυση του υλικού πραγματοποιήθηκε στην εταιρεία Χαλυβουργική Α.Ε. και χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος τύπου OE Spectrometer Thermo ARL model: 3460, serial No: 2524 (Εικόνα 4.1α).

Μετά την αγορά του υλικού, προετοιμάστηκε κατάλληλα ένα δοκίμιο προς μελέτη της χημικής σύστασης του μέσω του φασματογράφου. Απαραίτητη προϋπόθεση η σωστή τραχύτητα του δοκιμίου, για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκε λείανση με χαρτιά P80 και P120. Έπειτα, το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο φασματογράφο (Εικόνα 4.1(β)) και πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος.



Εικόνα 4.1: (α) Φασματογράφος οπτικής εκπομπής τύπου τύπου OE Spectrometer Thermo ARL, (β) Θέση υποδοχής δοκιμίου στο φασματογράφο [34]

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πραγματικής χημικής ανάλυσης του δοκιμίου ως μέσος όρος πέντε διαδοχικών μετρήσεων. Στον Πίνακα 4.4 διατυπώνεται η χημική ανάλυση του υλικού σε σύγκριση με την ονομαστική χημική ανάλυση του κατασκευαστή [32] και την τυπική χημική ανάλυση κατά DIN 17210 αντίστοιχα [34].

Πίνακας 4.3: Πραγματική χημική ανάλυση υλικού

Χημικό Στοιχείο	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	C	W	Co	Mo	Al
Περιεκτικότητα (%)	94.9	1.94	1.8	0.428	0.252	0.179	0.169	0.07	0.055	0.043	0.03
Χημικό Στοιχείο	As	S	Sn	Ti	P	V	B	Nb	Pb	Zr	
Περιεκτικότητα (%)	0.029	0.027	0.022	0.019	0.012	0.005	0.005	0.004	0.001	0.001	

Πίνακας 4.4: Ταυτοποίηση Χημικής Ανάλυσης Υλικού

Χημικό Στοιχείο (%) Χημική Σύσταση	C	Cr	Ni	Mn	Si	Al	S	P
Χημική Ανάλυση (Κατασκευαστής)	0.17	1.47	1.42	0.5	0.29	0.033	0.01	0.018
Τυπική Χημική Ανάλυση κατά DIN 17210	0.14 – 0.19	1.40 – 1.70	1.40 – 1.70	0.40 – 0.60	max. 0.40	-	max. 0.035	max. 0.035
Πραγματική Χημική Ανάλυση Υλικού	0.169	1.94	1.8	0.428	0.252	0.03	0.027	0.012

Από τον παραπάνω πίνακα, γίνεται κατανοητό ότι το υλικό αντιστοιχεί στο χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN (W.Nr. 1.5919).

Στην εικόνα 4.2, επισυνάπτεται το πιστοποιητικό ποιότητας του υλικού της παρούσας πτυχιακής της κατασκευάστριας εταιρίας.



Targoviste

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204 - 3.1

No: 2162656

Dispatch note: 2162656;2168025

Auto No.:

Customer:

Buyer

MECHEL TRADING LTD, ZUG, SCHAAN BRANCH

Order No.: 32-4161

Manufacturer:

S.C. MECHEL TARGOVISTE S.A.

Works No.:

6262

Product:

HOT ROLLED STEEL BARS

Steel grade:

15CRNI6

Accord to:

DIN 17210-86

State of delivery:

ANNEALED

Melting process:

E

In length:

6000+100/-0mm

DIN 1013/76

Pos No	Bundl es	Product dimensions (mm)	Weight (kg)	Cast No.	HB
1	4	Ø 85	7898	48178	170
2	4	Ø 85	9848	48178	170
3	1	Ø 20	2520	48178	170
9			28256		

Marking

* Material X
 * Brand of the manufacturer T
 * Cast No. X
 * Test No. / Lot No.

Cast No.	Distance from quenched end, in mm												
	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40
48178	43,8	42,8	42,4	40,4	37,4	36,4	34,6	33	30,8	28,8	28,8	28,1	27,3

Cast No.	Chemical Composition of Cast, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
48178	0,17	0,50	0,29	0,010	0,018	1,47	1,42	0,31	-	0,033

Other Test / Inspection

Dimensional and visual inspection: ACCEPTED
 Test of change: PASSED
 Ultrasonic test up billet: ACCEPTED SEP 1921 c/s 2C/c
 Surface quality: ACCEPTED EN 10221 CL A

Confirming that goods produced are in accordance with EC - REGULATION 2002-95
 We hereby certify that the material described above has been tested and
 complies with the order

Works Inspector



CQ-10-5.13

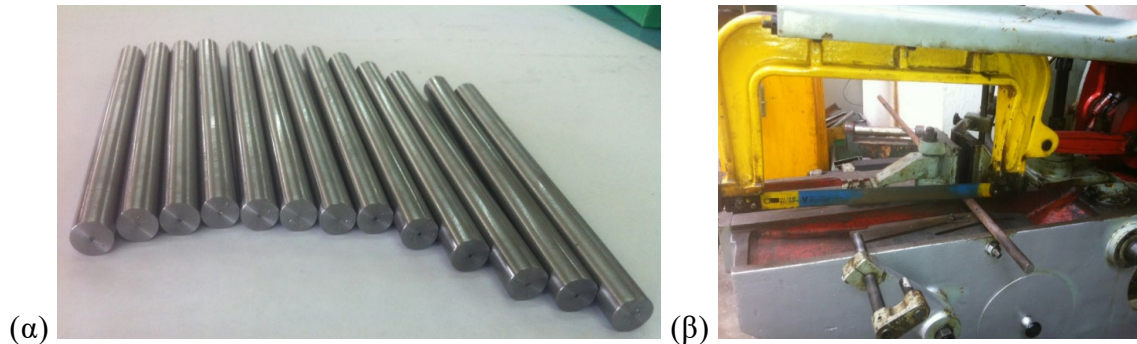
ΣΙΔΗΡΟΣ & ΧΑΛΥΒΑΣ ΕΠΕ
 ΕΜΠΟΡΙΑ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ
 ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ & ΧΑΛΥΒΑ
 ΕΤΑΙΡΙΑ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ
 ΑΣΚΛΗΠΙΟΥ 9 Τ.Κ. 18545 ΠΕΙΡΑΙΑΣ
 Α.Φ.Μ. 998038615 ΔΟΥ. Δ' ΠΕΙΡΑΙΑΣ
 ΤΗΛ. 4173342 - 4139452, FAX. 4220616

Εικόνα 4.2: Πιστοποιητικό ποιότητας χάλυβα πτυχιακής

4.4 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.4.1 Προετοιμασία δοκιμίων για δοκιμή εφελκυσμού

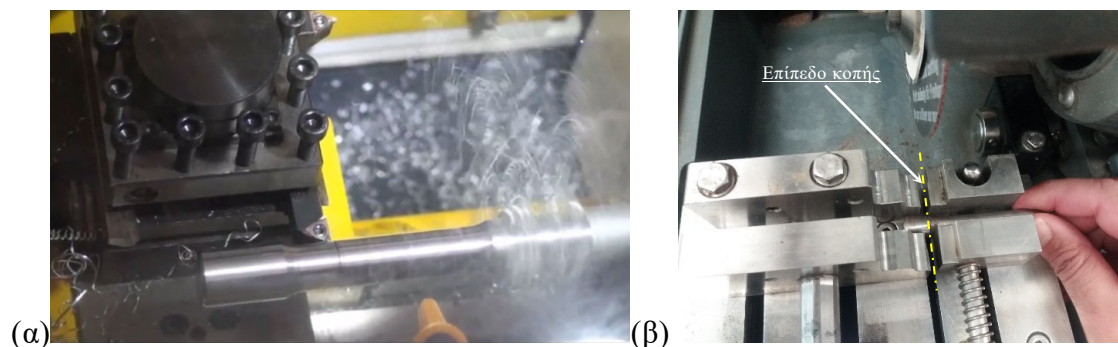
Οι ράβδοι διαμέτρου 23mm, αρχικά κόπηκαν στο κατάλληλο μήκος 158mm, με παλινδρομικό πριόνι τύπου S.N.40 C με αριθμό παραγωγής 084010970095 (Εικόνα 4.3). Χρησιμοποιήθηκε λάμα κοπής 500-38-0,2 εφελκυστικού τύπου με 4 οδόντες ανά ίντσα.



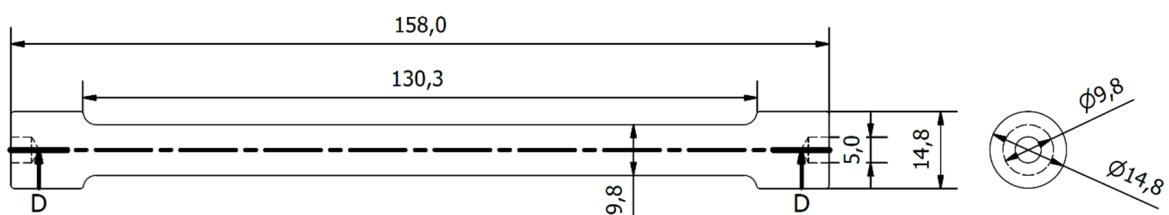
Εικόνα 4.3: (α) Δοκίμια όπως παραλήφθηκαν από την εταιρία, (β) Παλινδρομικό πριόνι κοπής

Στην συνέχεια κατεργάστηκαν σε εργαλειομηχανή τόννου, με σκοπό την διαμόρφωση τους σε δοκίμια δοκιμής εφελκυσμού. Η μηχανουργική κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε 6 πάσα ξεχονδρίσματος των 0,75mm με 1500grm και τέσσερα πάσα φινιρίσματος των 0,5mm με 2500grm. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε λείανση των επιφανειών με λειαντικά χαρτιά P320 και P600 διαδοχικά και προέκυψαν δοκίμια διαστάσεων όπως φαίνεται και στο μηχανολογικό σχέδιο των δοκιμίων εικόνα 4.5.

Στην εικόνα 4.4, παρουσιάζεται το στάδιο της τόννευσης των ράβδων προς διαμόρφωση τους σε δοκίμια προς δοκιμή εφελκυσμού.



Εικόνα 4.4: (α) Τόννευση ράβδων προς διαμόρφωση δοκιμίων δοκιμής κάμψης, (β) Κοπή δοκιμίων μετά την δοκιμή κάμψης προς δημιουργία δοκιμίων για μικροσκληρομετρήσεις.



Εικόνα 4.5: Σχεδιαστική απεικόνιση δοκιμίων εφελκυσμού.

4.4.2 Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.

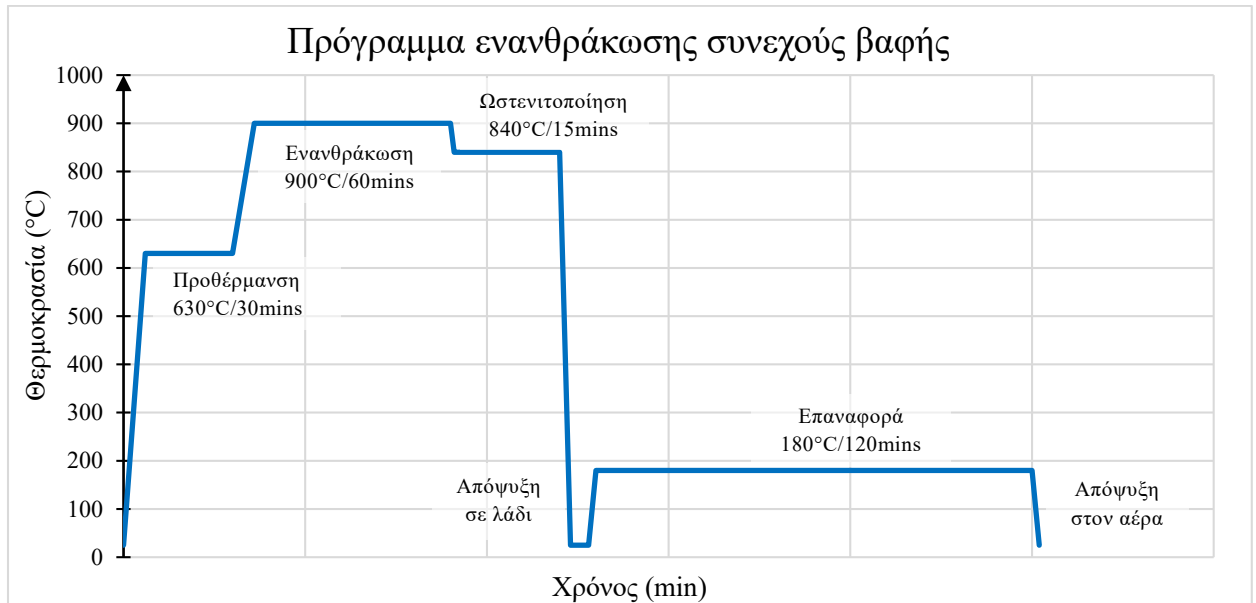
Το κύριο μέρος της εργασίας αποτελείται από τις θερμικές κατεργασίες του υλικού οι οποίες έλαβαν χώρα στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ-Uddeholm Χάλυβες ΑΕΒΕ υπό την επίβλεψη του κ. Παπαγεωργίου Δημήτριου.

Το πρόγραμμα των θερμικών κατεργασιών περιγράφεται στους πίνακες 4.2(α) και 4.2(β), αυτό περιλαμβάνει δύο ομάδες θερμικών κατεργασιών. Η μία εξ αυτών αφορά ενανθράκωση συνεχούς βαφής (βλέπε πίνακα 4.2(α)), κατά την οποία όλα τα δοκίμια αυτής της ομάδας έχουν υποστεί προθέρμανση για 30 λεπτά σε θερμοκρασία 630°C, σε κλίβανο τύπου pit type. Εν συνεχεία αυτού, τα δοκίμια εισήχθησαν σε κλίβανο τετηγμένων ανθρακούχων αλάτων (GS750, CECONTROL 110B και GS540) για να πραγματοποιηθεί το στάδιο της ενανθράκωσης σε θερμοκρασία 900°C και για χρόνο 60, 120, 180 και 240 λεπτά. Με στόχο την διασφάλιση της σταθερότητας όλων των παραμέτρων που θα δύνανται να επηρεάσουν τα αποτελέσματα του πειράματος, τα δοκίμια εισήχθησαν στο κλίβανο ανά ομάδες σε σειρά, αρχικά τοποθετήθηκαν τα δοκίμια της ομάδας των τεσσάρων ωρών, μετά το πέρας των 60 λεπτών εισήχθησαν αυτά των τριών ωρών, μετά το πέρας 120 λεπτών αυτά των δύο ωρών και τέλος τα δοκίμια της μίας ώρας, με αυτό τον τρόπο διασφαλίστηκαν παρόμοιες συνθήκες με διαφορετική διάρκεια. Μετά το στάδιο της ενανθράκωσης, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο κλίβανο ωστενιτοποίησης στους 840°C για 30 λεπτά, ακολουθώντας το πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών, η απόψυξη πραγματοποιήθηκε σε λάδι. Το τελευταίο στάδιο είναι αυτό της επαναφοράς, κατά το οποίο όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον ίδιο κλίβανο σε θερμοκρασία 180°C για 120 λεπτά, η απόψυξη έγινε στον αέρα.

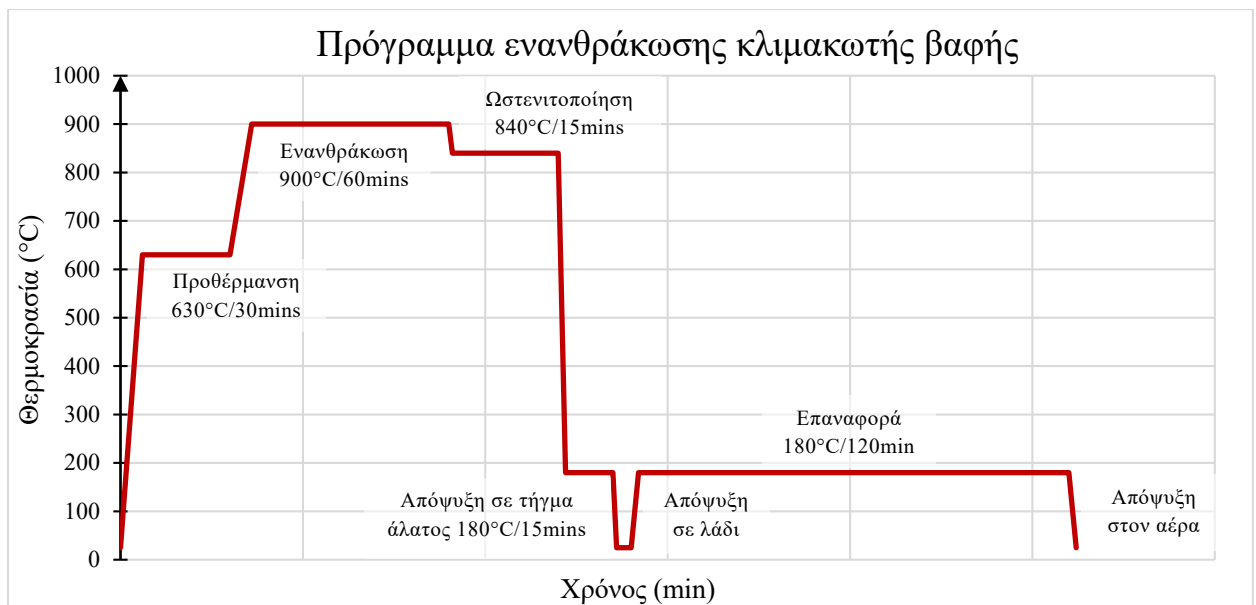
4.4.3 Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.

Η δεύτερη ομάδα δοκιμίων (βλέπε πίνακα 4.2(β)) αφορά υγρή ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής. Όπως και στην ενανθράκωση συνεχούς βαφής που περιγράφεται στην παράγραφο 4.4.1., τα δοκίμια προθερμάθηκαν στους για 30 λεπτά σε θερμοκρασία 630°C, σε κλίβανο τύπου pit type. Στην συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε κλίβανο για την υγρή ενανθράκωση στους 900°C, για χρόνο 60, 120, 180 και 240 λεπτά. Έπειτα, τα δοκίμια εισήχθησαν στο κλίβανο ωστενιτοποίησης για 30 λεπτά στους 840°C, μετά το πέρας του χρόνου ωστενιτοποίησης, τα δοκίμια μεταφέρθηκαν σε άλλον κλίβανο τετηγμένων αλάτων τύπου AS140 στους 180°C για 15 λεπτά για το στάδιο της κλιμακωτής βαφής. Η απόψυξη των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στον αέρα έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην εικόνα 4.6, παρουσιάζεται σε μορφή διαγράμματος το πρόγραμμα ενανθράκωσης συνεχούς βαφής που περιεγράφηκε στην παράγραφο 4.4.1., ενώ στην εικόνα 4.7, παρουσιάζεται το αντίστοιχο πρόγραμμα ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής (βλέπε παράγραφο 4.4.2.)



Εικόνα 4.6: Πρόγραμμα ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.



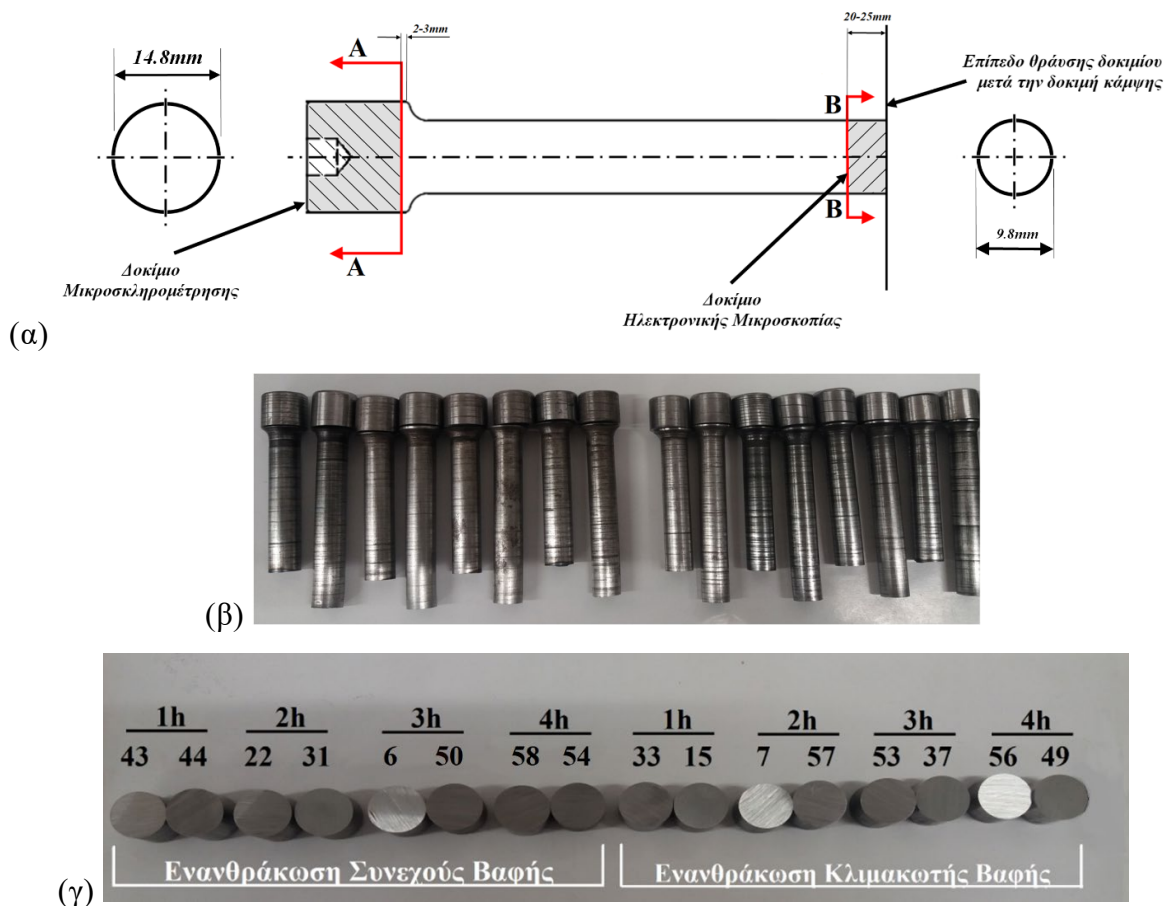
Εικόνα 4.7: Πρόγραμμα ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.

4.4.4 Επιλογή δειγμάτων

Μετά το στάδιο της διαμόρφωσης των δοκιμίων, ακολούθησε αυτό της μηχανικής δοκιμής της κάμψης. (βλέπε κεφάλαιο 8). Μετά την θραύση των δοκιμίων λόγω κάμψης, τα δοκίμια κόπηκαν σε κατάλληλα σημεία ώστε μελετηθεί η επιφάνεια θραύσης (βλέπε κεφάλαιο 6) και το προφίλ σκληρότητας (βλέπε κεφάλαιο 5)

Στην εικόνα 4.8(α), παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά την θραύση τους και φαίνονται χαρακτηριστικά τα σημεία κοπής. Κάθε δοκίμιο κόπηκε σε απόσταση 2-2.5 εκατοστών από την επιφάνεια θραύσης τους για να δύνανται να χωρέσει στην ειδική υποδοχή το ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, επίσης επιλέχθηκε και η απέναντι άκρη της επιφάνειας θραύσης ως σημείο κοπής σε απόσταση 2-3mm από το ράδιο της τόννευσης, ώστε να

μην έχει επηρεαστεί το υλικό από την παραμόρφωση της δοκιμής της κάμψης σε εκείνη την περιοχή. Ενώ, στην εικόνα 4.8(β), απεικονίζονται τα δοκίμια που θα μικροσκλημετρηθούν για την δημιουργία του προφίλ σκληρότητας μετά το στάδιο της κοπής.



Εικόνα 4.8: (α) Απεικόνιση τρόπου και θέσεων κοπής των δοκιμίων μετά την θράυση προς δημιουργία δοκιμίων μικροσκληρομέτρησης και δοκιμίων ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (S.E.M.), (β) Σημεία κοπής και (γ) Δοκίμια σκληρομέτρησης μετά το στάδιο της κοπής.

4.4.5 Εγκιβωτισμός – Λείανση – Στίλβωση

Τα δοκίμια υφίστανται εγκιβωτισμό με σκοπό την δημιουργία παράλληλων επιπέδων για την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης βάσει προτύπων ASTM. Για τον εγκιβωτισμό χρησιμοποιήθηκε μηχανή εγκιβωτισμού CitoPress 1, Category Number: 05776127, Serial Number: 5770313, του εργαστηρίου Ε.Π.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής συστατικά:

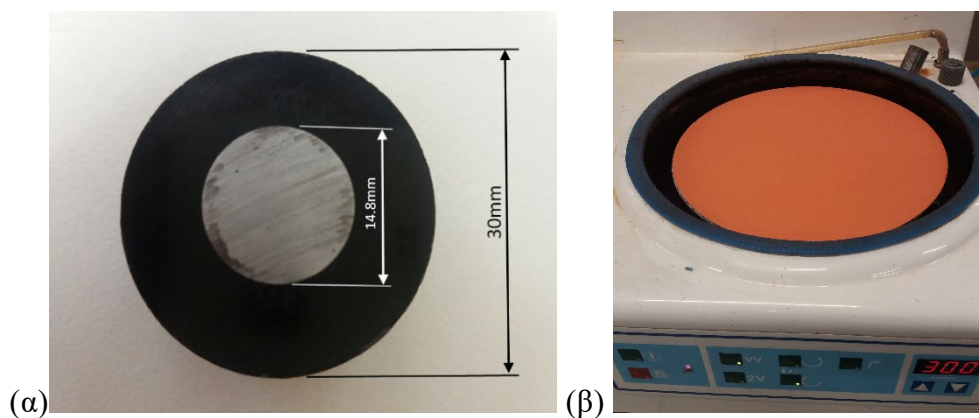
- Phenocure Black Buehler (Σκληρό)
- Epomet Molding Compound Buehler (Μαλακό)
- Αντικολλητική πούδρα Antistick της Struels

Η θέρμανση για κάθε δοκίμιο ήταν διάρκειας τριών λεπτών στους 180°C και πίεση 250bar ενώ η ψύξη πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια 2 λεπτών.

Η λείανση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο λειαντικό μηχάνημα Struels (Serial Number: 1445569) με σταθερές στροφές 250rpm. Χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά P80, P120, P180, P240, P320, P480, P600, P800, P1000, P1200.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε το στάδιο της στίλβωσης, το οποίο πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια. Αρχικά, στο τριβείο Struels με την χρήση διαμανταλοιφής Struels DP-Paste, M6 μm και 3 μm . Έπειτα, στο τριβείο BUEHLER METASERV (Type: 95.C2268.250, Serial Number: 398824161) με τη χρήση αιωρήματος αλουμίνας Presi LD33 1 μm και Presi LD33 0.3 μm αντίστοιχα. Μετά από κάθε στάδιο στίλβωσης ακολουθούσε καθαρισμός της επιφανείας του δοκιμίου με απιονισμένο νερό και μετά με αλκοόλη.

Στην εικόνα 4.9(α), απεικονίζεται ένα από τα δοκίμια μικροσκληρομέτρησης μετά το στάδιο εγκιβωτισμού και πριν από αυτό της λείανσης-στίλβωσης. Στην εικόνα 4.9(β), φαίνεται η λειαντική μηχανή BUEHLER METASERV και το στίλβωτικό πανί πριν την χρήση του.



Εικόνα 4.9: (α) Δοκίμιο σκληρομέτρησης, μετά το στάδιο του εγκιβωτισμού, (β) Λειαντική μηχανή BUEHLER METASERV πριν το στάδιο της στίλβωσης

(κενή σελίδα)

5 ΔΟΚΙΜΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Βασικός σκοπός της παρούσας πτυχιακής είναι η διερεύνηση της επίδρασης της διάρκειας της ενανθράκωσης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα 15CrNi6. Για το συγκεκριμένο σκοπό επιλέχθηκαν κατάλληλα δοκίμια (όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.5 «Επιλογή Δοκιμίων») για να υποστούν μικροσκληρομέτρηση και να δημιουργηθεί το προφίλ της σκληρότητας της επιφάνειας.

Η δοκιμή της μικροσκληρομέτρησης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών (Ε.Π.Τ.ΥΛ.) του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.).

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το εικονιζόμενο μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type M. (S/N: 341 – 64278) (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type M. (S/N: 341 – 64278) για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής (Εργαστήριο: Ε.Π.Τ.ΥΛ. - Πα.Δ.Α.)

Οι συνθήκες λειτουργίας έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο E384-11, χρησιμοποιώντας πρότυπο βάρος 200gr. για χρονική διάρκεια φόρτισης 15sec.

5.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΟΥ

Πριν από την μέτρηση των δοκιμίων, πραγματοποιήθηκε διαδικασία βαθμονόμησης του μικροσκληρομέτρου όπως αναλύεται στην συνέχεια. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα δοκίμια από τρεις διαφορετικές περιοχές σκληρότητας και πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα δοκίμια ονομαστικής σκληρότητας 158.3, 455.0 και 700,7 HV0.2. Επίσης, πάρθηκαν σκληρομετρήσεις σύμφωνα με τους περιορισμούς της μεθόδου όπως αναφέρονται αναλυτικά στο πρότυπο E384.

Στον πίνακα 5.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αποτυπωμάτων των πρότυπων δοκιμών.

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις αποτυπωμάτων πρότυπων δοκιμών προς βαθμονόμηση του οργάνου

Μέσος Όρος Διαγωνίων (μm) → Ενδείξεις Σκληρότητας HV0.2						
A/A	700,7 HV0.2 → 23.0 (μm)		455,0 HV0.2 → 28.55 (μm)		158,3 HV0.2 → 48.4 (μm)	
1	23,15	692,04	29,80	417,64	50,95	142,87
2	23,05	698,06	29,85	416,24	50,90	143,15
3	23,25	686,10	29,40	429,08	52,20	136,11
4	23,25	686,10	29,60	423,30	52,55	134,30
5	23,30	683,16	29,30	432,01	51,95	137,42
6	22,95	704,15	29,30	432,01	52,45	134,82
7	22,95	704,15	29,40	429,08	52,55	134,30
8	22,90	707,23	29,55	424,74	51,95	137,42
9	23,00	701,10	29,55	424,74	52,00	137,16
10	23,00	701,10	29,90	414,85	51,95	137,42
Σύνολο	230,80	6963,19	295,65	4243,69	519,45	1374,99
Μέση Τιμή	23,08	696,32	29,57	424,37	51,95	137,50

Οι μετρήσεις είχαν αποδεκτή επαναληψιμότητα αλλά μη αποδεκτό σφάλμα (R & E). Σύμφωνα με το πρότυπο Ε 384 πίνακα Α2.1, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

$$\text{Σκληρότητα HV} = 1.8544 \cdot \frac{P}{d^2}, P \text{ σε (kg) και } d \text{ σε } \mu\text{m} \quad (5.1)$$

$$\text{Επαναληψιμότητα: } R = 100 \frac{(d_{\max} - d_{\min})}{\bar{d}}, d \text{ σε } \mu\text{m} \quad (5.2)$$

$$\text{Σχετικό Σφάλμα: } \%E = 100 \frac{(\bar{d} - d_{\text{real}})}{\bar{d}}, d \text{ σε } \mu\text{m} \quad (5.3)$$

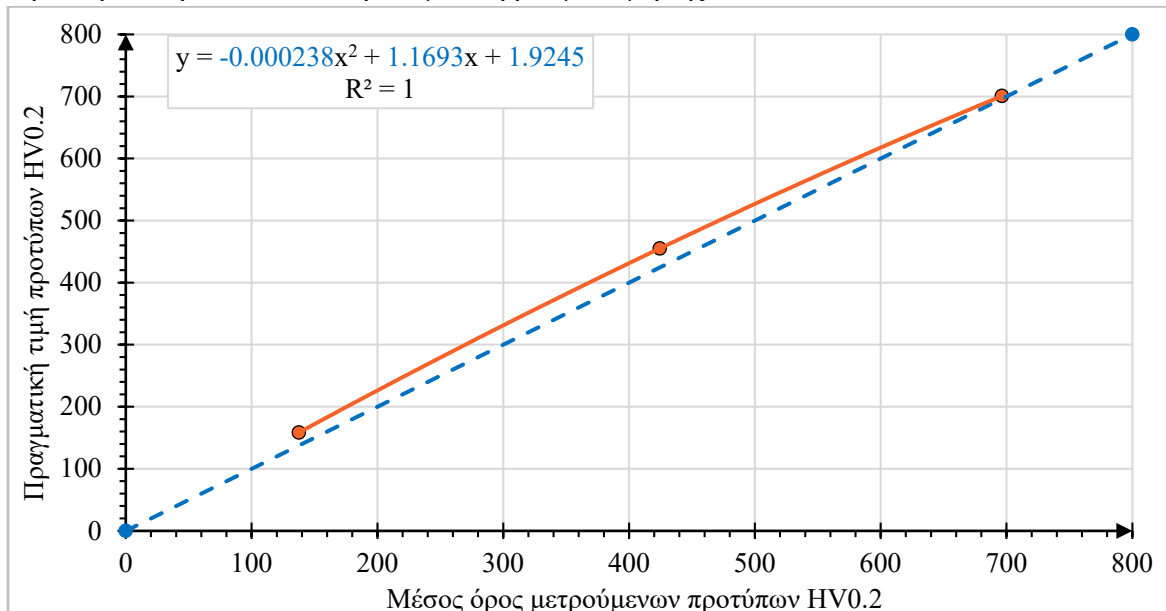
Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών επαναληψιμότητας και σχετικού σφάλματος όπως προέκυψαν από τις σκληρομετρήσεις.

Πίνακας 5.2: Επαναληψιμότητα και Σφάλμα πρότυπων δοκιμών

Επαναληψιμότητα και σφάλμα πρότυπων δοκιμών			
Πρότυπα δοκίμια	158.3 HV0.2	455.0 HV0.2	700.7 HV0.2
Επαναληψιμότητα [R]	3.18% < 13%	2.03% < 5%	1.73% < 4%
Σφάλμα [E]	-6.82% ∉[±2%]	-3.43% ∉[±2%]	-0.35% ∈[±2%]

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό, ότι το σκληρόμετρο παρουσιάζει αποδεκτή επαναληψιμότητα κατά συνέπεια δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παρούσα πτυχιακή.

Επίσης, για ενδείξεις μεγάλης σκληρότητας παρουσιάζει αποδεκτό σφάλμα αυτό συνεπάγεται ότι δεν χρειάζεται να διορθωθούν οι ενδείξεις των δοκιμίων από την καμπύλη βαθμονόμησης (Εικόνα 5.2) να για καθιστούν μετρήσεις, ενώ για ενδείξεις χαμηλής ή μεσαίας σκληρότητας το όργανο δεν παρουσιάζει αποδεκτό σχετικό σφάλμα, με συνέπεια την αναγκαία την διόρθωση αυτών από την καμπύλη βαθμονόμησης.

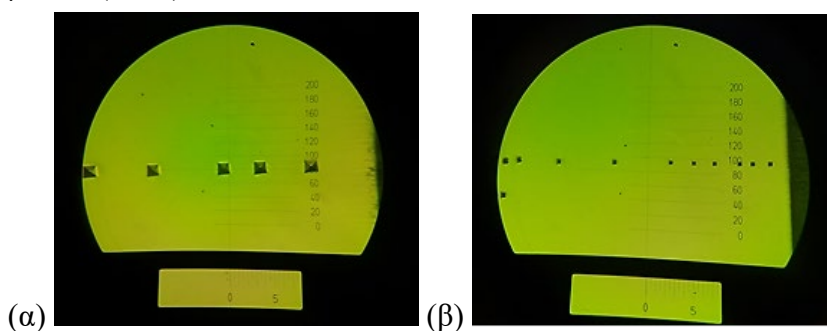


Εικόνα 5.2: Καμπύλη βαθμονόμησης μικροσκληρομέτρου Shimadzu (S/N: 341-64278) εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

Για την μικροσκληρομέτρηση, χρησιμοποιήθηκε όπως έχει αναφερθεί βάρος 200gr. με φόρτιση 15 δευτερολέπτων

Εξετάστηκαν δύο δοκίμια για κάθε μία από τις οκτώ ομάδες των θερμικών κατεργασιών και κάθε δοκίμιο σκληρομετρήθηκε από την επιφάνεια προς την καρδιά δύο φορές (αριστερά και δεξιά) με σκοπό τη μελέτη της ομοιογένειας του υλικού και της θερμικής κατεργασίας. Για την ευκολία στατιστικής ανάλυσης και σύγκρισης των αποτελεσμάτων, έγινε προσπάθεια ώστε οι σκληρομετρήσεις να είναι σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την επιφάνεια. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι εξής αποστάσεις: 80, 160, 240, 320, 400, 550, 750, 1000, 1500, 2500 (μm).

Στην εικόνα 5.3: φαίνονται τα αποτυπώματα της σκληρομέτρησης δύο διαφορετικών δοκιμίων σε διαφορετικές μεγεθύνσεις, εικόνα 4.9(α), δοκίμιο 33 (x400) και εικόνα 4.9(β) δοκίμιο 56 (x100).



Εικόνα 5.3 (α) Αποτυπώματα δοκιμίου 33 μεγέθυνση (x400), **(β)** αποτυπώματα δοκιμίου 56 μεγέθυνση (x100).

5.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ

Στην συνέχεια, πινακοποιούνται τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων για κάθε πλευρά των δύο δοκιμίων κάθε μιας από τις οκτώ διαφορετικές ομάδες θερμικών κατεργασιών (Πίνακες 5.3-5.18).

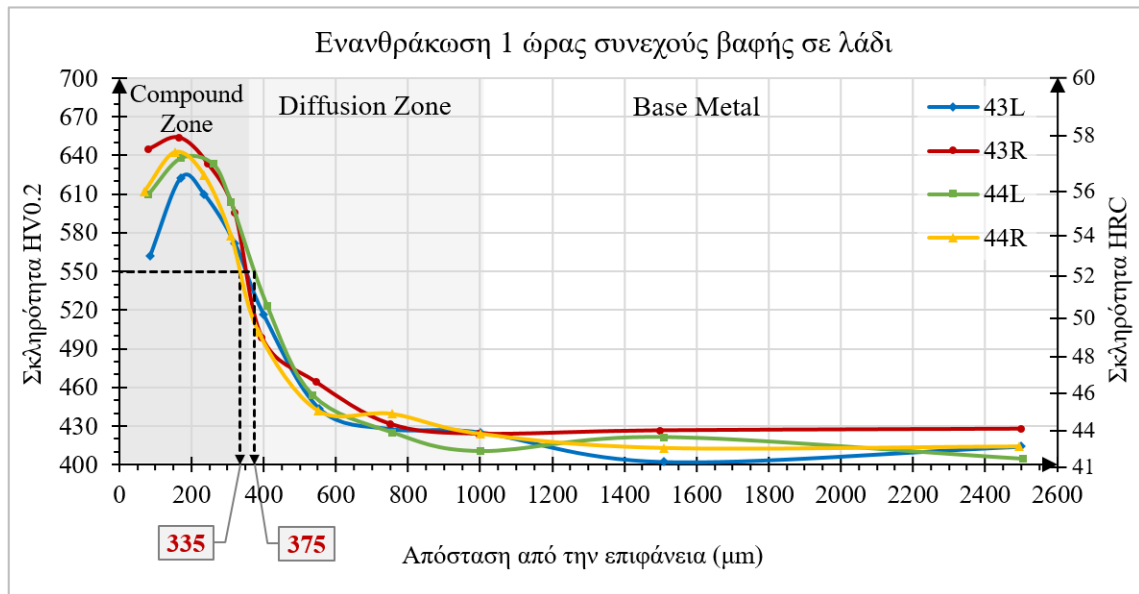
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 43

Δοκίμιο 43 (1h + Oil) - Μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	26,2	26,3	26,25	562,3	53,1	80	24,6	23,9	24,25	644,7	57,5
170	24,6	24,9	24,75	622,7	56,4	165	23,8	24,3	24,05	653,8	57,9
235	25,3	24,8	25,05	609,9	55,7	245	24,6	24,4	24,50	633,6	57,0
320	26,4	25,6	26,00	571,8	53,6	320	25,5	25,3	25,40	595,5	54,9
400	28,1	27,0	27,55	516,4	50,3	395	28,2	28,0	28,10	498,6	49,0
555	30,3	29,7	30,00	443,4	44,8	545	29,4	29,1	29,25	464,1	46,5
750	30,7	30,5	30,60	427,7	43,5	750	30,3	30,6	30,45	431,6	43,8
1000	31,6	29,8	30,70	425,2	43,2	995	31,0	30,5	30,75	423,9	43,1
1510	31,8	31,5	31,65	402,2	41,0	1500	30,5	30,8	30,65	426,5	43,3
2500	31,3	31,0	31,15	414,1	42,2	2500	30,9	30,3	30,60	427,7	43,5

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 44

Δοκίμιο 44 (1h + Oil) - Μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
80	25,1	25,0	25,05	609,9	55,7	70	25,1	24,9	25,00	612,0	55,8
170	24,5	24,3	24,40	638,0	57,2	155	24,2	24,4	24,30	642,5	57,4
260	24,7	24,3	24,50	633,6	57,0	235	24,7	24,7	24,70	624,8	56,4
310	24,9	25,5	25,20	603,6	55,4	310	25,7	26,0	25,85	577,6	54,0
410	27,2	27,5	27,35	523,2	50,6	385	28,0	27,9	27,95	503,5	49,3
535	29,4	29,8	29,60	454,2	45,6	550	30,2	29,9	30,05	442,0	44,7
755	30,7	30,7	30,70	425,2	43,2	755	30,4	29,9	30,15	439,4	44,5
1000	31,2	31,4	31,30	410,5	41,9	1000	30,5	31,0	30,75	423,9	43,1
1510	30,9	30,8	30,85	421,5	42,8	1510	31,3	31,1	31,20	412,9	42,1
2505	31,1	32,0	31,55	404,6	41,3	2495	31,0	31,3	31,15	414,1	42,2

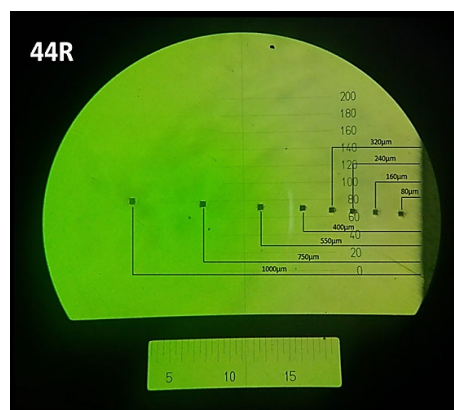
Στην εικόνα 5.4, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) συναρτήσεως της απόστασης από την επιφάνεια των δοκιμίων 43 και 44 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση μία ώρα και στην συνέχεια απόψυξη σε λάδι, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.3: Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.



Εικόνα 5.4: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 43 & 44 που υπέστησαν μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σημαντική ομοιογένεια για όλο το εύρος του προφίλ, μεταξύ των δοκιμίων 43, 44 και στις δύο πλευρές κάθε ενός δοκιμίου.
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 335μm έως και 375μm.
- Αντίθετα, υπάρχει μεγάλο εύρος σκληρότητας (μικρή ομοιογένεια) για απόσταση ίση με 80μm από την επιφάνεια η οποία κυμαίνεται από 560-645HV0.2 (53.0-57.5 HRC). Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού χρόνου ενανθράκωσης (60 λεπτά).
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσεως της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1000-1200μm με εύρος σκληρότητας 410-425HV0.2 (41.9-43.2 HRC), αυτό είναι το ολικό βάθος ενανθράκωσης.

Στην εικόνα 5.5, δίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 44 από την δεξιά παρειά σε μεγέθυνση (x100).



Εικόνα 5.5: Αποτυπώματα δοκιμίου 44 δεξιά παρειά (πλευρά) (x100).

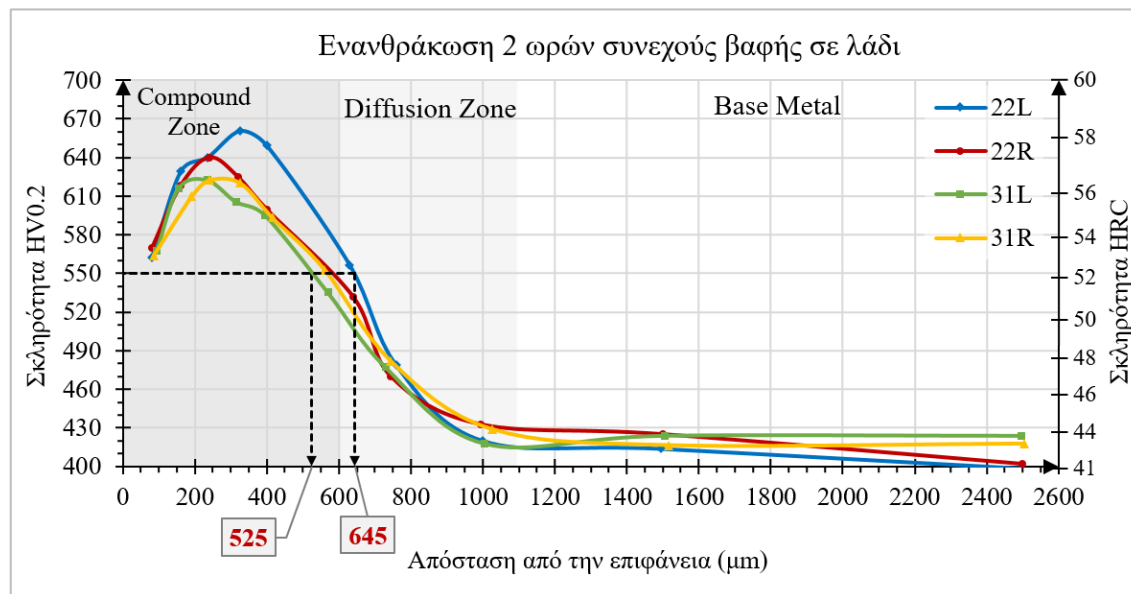
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 22

Δοκίμιο 22 (2h + Oil) - Δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
80	26,2	26,3	26,25	562,3	53,1	80	26,3	25,8	26,05	569,9	53,6
160	24,8	24,4	24,60	629,2	56,7	160	24,8	24,9	24,85	618,4	56,2
235	24,6	24,1	24,35	640,2	57,3	240	24,0	24,7	24,35	640,2	57,3
325	23,7	24,1	23,90	660,8	58,3	320	24,6	24,8	24,70	624,8	56,4
400	23,9	24,4	24,15	649,2	57,7	400	25,7	24,9	25,30	599,5	55,2
630	26,5	26,3	26,40	556,7	52,8	640	26,6	27,6	27,10	531,7	51,2
760	28,8	28,7	28,75	478,7	47,6	745	29,0	29,1	29,05	469,9	46,9
1000	30,9	30,9	30,90	420,2	42,7	995	30,4	30,4	30,40	432,8	43,6
1495	31,0	31,3	31,15	414,1	42,2	1500	30,9	30,5	30,70	425,2	43,2
2500	31,8	31,8	31,80	398,8	40,7	2500	32,0	31,3	31,65	402,2	41,0

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 31

Δοκίμιο 31 (2h + Oil) - Δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
95	25,9	26,3	26,10	568,0	53,4	85	26,0	26,4	26,20	564,2	53,2
155	24,7	25,1	24,90	616,2	56,0	190	24,9	25,2	25,05	609,9	55,7
235	24,8	24,7	24,75	622,7	56,4	240	24,7	24,8	24,75	622,7	56,4
315	25,1	25,2	25,15	605,8	55,5	325	24,6	25,0	24,80	620,5	56,2
395	25,2	25,6	25,40	595,5	54,9	415	25,0	25,9	25,45	593,4	54,8
570	26,7	27,3	27,00	535,3	51,4	560	26,6	26,4	26,50	553,1	52,4
730	28,3	29,3	28,80	477,1	47,5	745	28,7	28,6	28,65	481,6	47,6
1005	31,3	30,7	31,00	417,7	42,6	1025	30,7	30,4	30,55	429,0	43,5
1505	30,6	30,9	30,75	423,9	43,1	1515	30,9	31,2	31,05	416,5	42,5
2495	30,5	31,0	30,75	423,9	43,1	2505	30,7	31,3	31,00	417,7	42,6

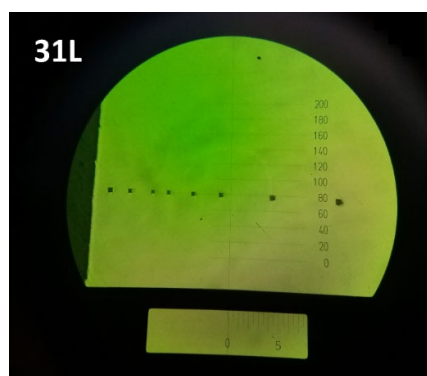
Στην εικόνα 5.6, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 22 και 31 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για δύο ώρες και στην συνέχεια απόψυξη σε λάδι, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.3: Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.



Εικόνα 5.6: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 22 & 31, δύο ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σημαντική ομοιογένεια για όλο το εύρος του προφίλ, μεταξύ των δοκιμίων 22,31 και στις δύο πλευρές κάθε ενός δοκιμίου.
- Μια μικρή ανομοιογένεια παρατηρείται στην περιοχή από 300-550μm όπου και η σκληρότητα του δοκιμίου 22 της δεξιάς πλευράς έχει μία αύξηση της τάξης του 4-7% συγκριτικά με την αντίστοιχη του ίδιου δοκιμίου της απέναντι πλευράς.
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 525μm έως και 645μm.
- Ακόμη, το ολικό βάθος ενανθράκωσης ισούται περίπου με 1100μm με εύρος σκληρότητας 400-425HV0.2 (40.8-43.2 HRC)

Στην εικόνα 5.7, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 31 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100)



Εικόνα 5.7: Αποτυπώματα δοκιμίου 31, αριστερή παρειά (x100)

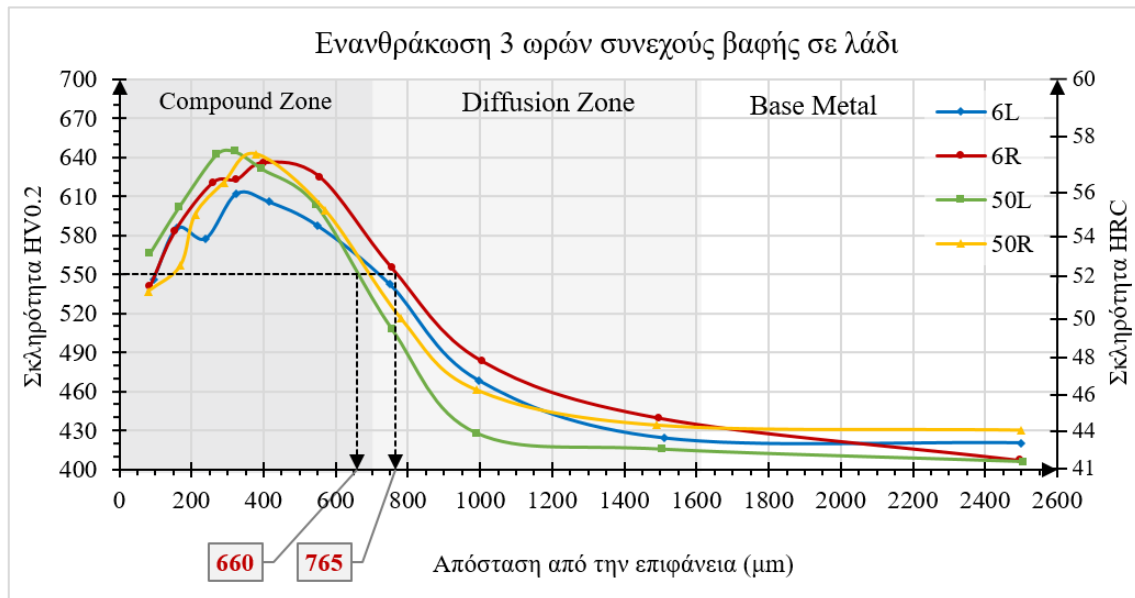
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 6

Δοκίμιο 6 (3h + Oil) – Τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
95	26,8	26,6	26,70	545,8	52,0	85	26,8	26,9	26,85	540,5	51,7
160	25,7	25,6	25,65	585,4	54,3	155	25,6	25,8	25,70	583,4	54,2
240	25,6	26,1	25,85	577,6	54,0	260	24,9	24,7	24,80	620,5	56,2
325	24,9	25,1	25,00	612,0	55,8	325	24,9	24,6	24,75	622,7	56,4
415	25,1	25,2	25,15	605,8	55,5	400	24,3	24,6	24,45	635,8	57,1
550	25,4	25,8	25,60	587,4	54,4	555	24,5	24,9	24,70	624,8	56,4
750	26,4	27,2	26,80	542,3	51,8	755	26,4	26,5	26,45	554,9	52,6
995	28,8	29,4	29,10	468,4	46,7	1005	28,6	28,6	28,60	483,2	47,9
1510	30,5	31,0	30,75	423,9	43,1	1495	30,0	30,3	30,15	439,4	44,5
2500	31,0	30,8	30,90	420,2	42,7	2495	31,5	31,4	31,45	406,9	41,5

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 50

Δοκίμιο 50 (3h + Oil) - Τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	25,9	26,4	26,15	566,1	53,3	80	27,0	26,9	26,95	536,9	51,5
165	25,4	25,1	25,25	601,6	55,3	170	26,4	26,4	26,40	556,7	52,8
270	24,3	24,3	24,30	642,5	57,4	210	25,3	25,5	25,40	595,5	54,9
320	24,2	24,3	24,25	644,7	57,5	290	24,7	24,9	24,80	620,5	56,2
395	24,4	24,7	24,55	631,4	56,8	380	24,3	24,3	24,30	642,5	57,4
545	25,0	25,4	25,20	603,6	55,4	570	25,3	25,3	25,30	599,5	55,2
755	27,6	28,0	27,80	508,3	49,7	780	27,7	27,4	27,55	516,4	50,3
990	29,8	31,4	30,60	427,7	43,5	990	29,6	29,1	29,35	461,2	46,0
1505	31,2	31,0	31,10	415,3	42,3	1490	30,6	30,1	30,35	434,1	44,0
2505	31,9	31,1	31,50	405,8	41,4	2500	30,7	30,3	30,50	430,3	43,6

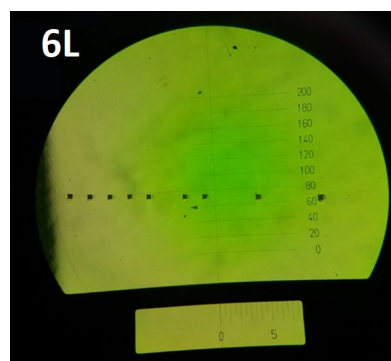
Στην εικόνα 5.8, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 6 και 50 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για τρεις ώρες και στην συνέχεια απόψυξη σε λάδι, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.3: Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.



Εικόνα 5.8: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 6 & 50, τριών ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μικρότερη ομοιογένεια μεταξύ των δοκιμίων 6 και 50 συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες ομάδες, αλλά εξακολουθεί να είναι αρκετά σημαντική ώστε να μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται μικρό εύρος σκληρότητας μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 535 HV0.2 έως και 570HV0.2 (51.4-53.3 HRC)
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμής σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 660μm έως και 765μm.
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσε της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1700μm με εύρος σκληρότητας 410-430HV0.2 (40.9-44.1 HRC)

Στην εικόνα 5.9, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 54 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100).



Εικόνα 5.9: Αποτυπώματα δοκιμίου 6 αριστερή παρειά (x100)

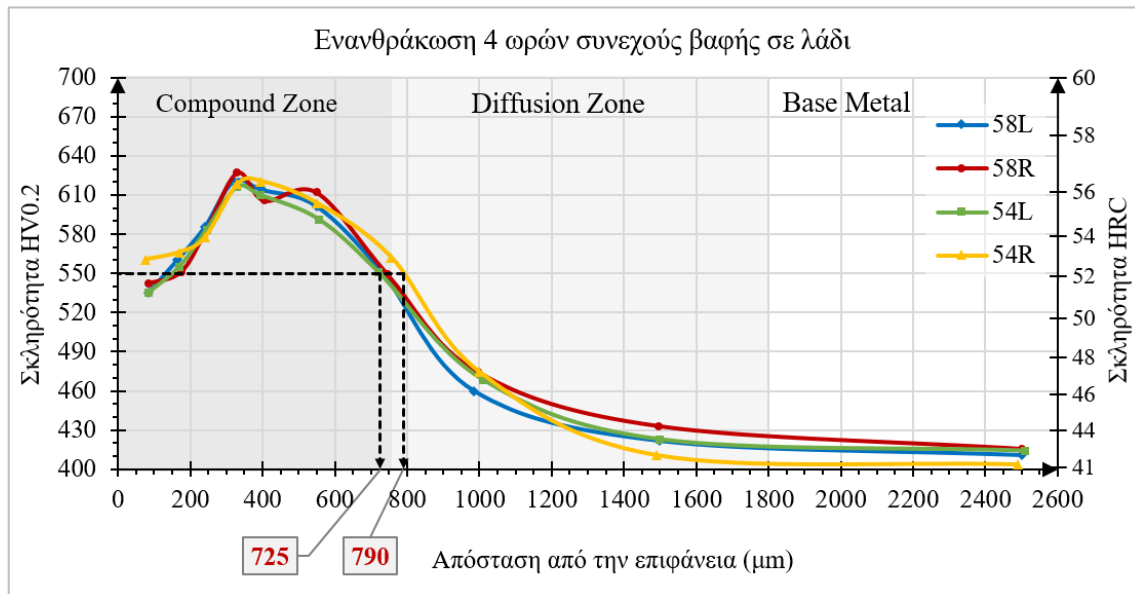
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 58

Δοκίμιο 58 (4h + Oil) - Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	27,7	26,8	27,00	535,3	51,4	85	25,2	26,8	26,80	542,3	51,8
165	27,4	26,3	26,30	560,5	53,0	175	25,5	26,8	26,55	551,2	52,3
240	26,4	25,7	25,65	585,4	54,3	245	25,2	25,8	25,70	583,4	54,2
320	25,1	24,8	24,80	620,5	56,2	330	24,3	24,7	24,65	627,0	56,6
400	25,2	25,0	24,95	614,1	55,9	405	24,3	25,2	25,15	605,8	55,5
550	24,7	25,2	25,25	601,6	55,3	550	25,0	25,0	25,00	612,0	55,8
730	24,8	26,8	26,55	551,2	52,3	745	25,9	26,4	26,60	549,5	52,0
985	28,0	29,5	29,40	459,8	46,1	995	28,3	29,0	28,90	474,3	47,2
1500	30,3	30,9	30,85	421,5	42,8	1495	30,1	30,2	30,40	432,8	43,6
2500	31,1	31,4	31,30	410,5	41,9	2500	31,9	31,0	31,10	415,3	42,3

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 54

Δοκίμιο 54 (4h + Oil) - Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	27,4	27,2	27,00	535,3	51,4	75	26,4	26,4	26,30	560,5	53,0
170	26,5	26,3	26,45	554,9	52,6	170	26,2	26,0	26,15	566,1	53,3
245	25,4	25,8	25,70	583,4	54,2	240	24,6	25,9	25,85	577,6	54,0
330	24,6	25,1	24,90	616,2	56,0	330	24,6	24,9	24,85	618,4	56,2
395	24,5	25,0	25,05	609,9	55,7	395	23,8	24,7	24,80	620,5	56,2
555	24,7	25,6	25,50	591,5	54,7	550	24,3	25,1	25,20	603,6	55,4
720	26,1	26,7	26,55	551,2	52,3	755	25,8	26,2	26,25	562,3	53,1
1010	28,5	29,4	29,10	468,4	46,7	1000	27,5	29,2	28,90	474,3	47,2
1500	30,5	31,0	30,80	422,7	43,0	1490	29,6	31,4	31,30	410,5	41,9
2510	30,8	0,0	31,15	414,1	42,2	2490	29,7	0,0	31,60	403,4	41,1

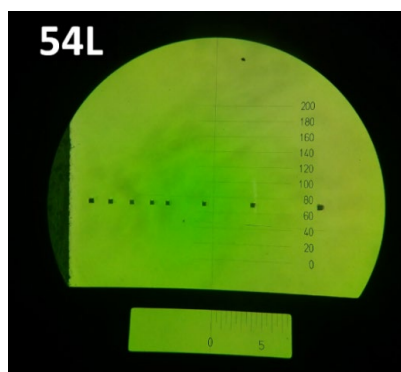
Στην εικόνα 5.10, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 54 και 58 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για τέσσερις ώρες και στην συνέχεια απόψυξη σε λάδι, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.3: Ενανθράκωση συνεχούς βαφής.



Εικόνα 5.10: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 58 & 54, τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή σε λάδι.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται πολύ μεγάλη ομοιογένεια μεταξύ των δοκιμίων 58 και 54.
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται ικανοποιητική ομοιογένεια μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 525 HV0.2 έως και 560HV0.2 (51.2-53.0 HRC)
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 745μm έως και 790μm.
- Ακόμη, η λήξη πτώσης της σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια που συνεπάγεται το ολικό βάθος ενανθράκωσης ισούται με 1800μm με εύρος σκληρότητας 405-425HV0.2 (41.5-43.7 HRC)

Στην εικόνα 5.11, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 54 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100)



Εικόνα 5.11: Αποτυπώματα δοκιμίου 54 αριστερή παρειά (x100)

5.4 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ

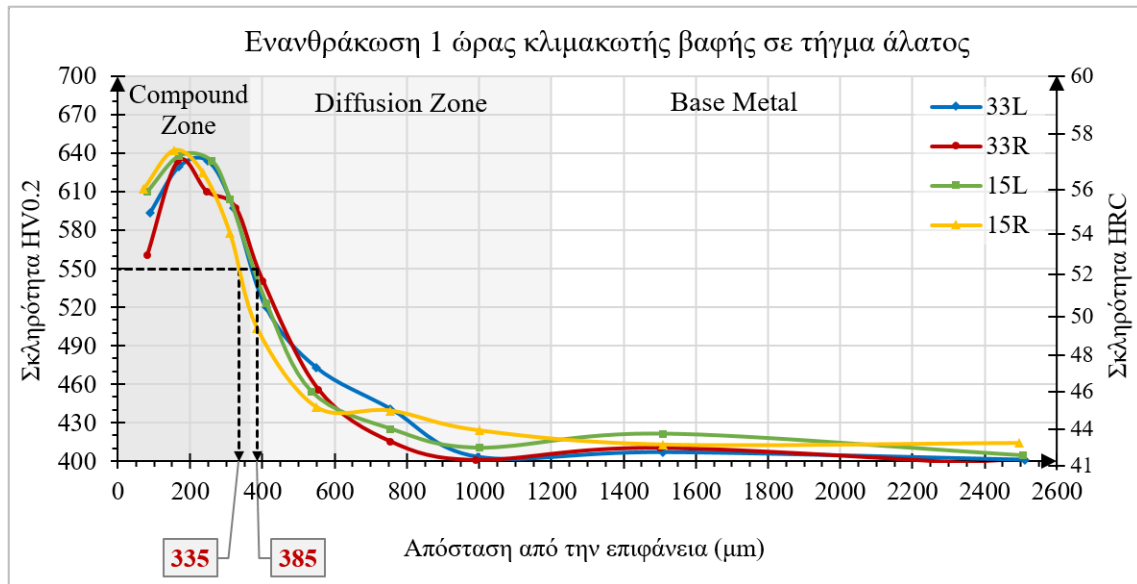
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 33

Δοκίμιο 33 (1h + AS140) – Μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
90	25,4	25,5	25,45	593,4	54,8	80	26,3	26,3	26,30	560,5	53,0
170	24,5	24,7	24,60	629,2	56,7	165	24,7	24,3	24,50	633,6	57,0
250	24,7	24,3	24,50	633,6	57,0	245	24,8	25,3	25,05	609,9	55,7
320	25,3	25,4	25,35	597,5	55,1	325	25,3	25,4	25,35	597,5	55,1
410	27,5	27,4	27,45	519,8	50,5	400	27,2	26,5	26,85	540,5	51,7
550	29,5	28,4	28,95	472,7	46,9	555	29,7	29,4	29,55	455,6	45,8
755	30,3	29,9	30,10	440,7	44,6	755	31,5	30,7	31,10	415,3	42,3
995	31,6	31,6	31,60	403,4	41,1	990	31,8	31,6	31,70	401,1	40,7
1510	31,5	31,4	31,45	406,9	41,5	1500	31,4	31,2	31,30	410,5	41,9
2510	31,6	31,8	31,70	401,1	40,7	2500	32,4	31,4	31,90	396,5	40,5

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 15

Δοκίμιο 15 (1h + AS140) - Μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
80	25,1	25,0	25,05	609,9	55,7	70	25,1	24,9	25,00	612,0	55,8
170	24,5	24,3	24,40	638,0	57,2	155	24,2	24,4	24,30	642,5	57,4
260	24,7	24,3	24,50	633,6	57,0	235	24,7	24,7	24,70	624,8	56,4
310	24,9	25,5	25,20	603,6	55,4	310	25,7	26,0	25,85	577,6	54,0
410	27,2	27,5	27,35	523,2	50,6	385	28,0	27,9	27,95	503,5	49,3
535	29,4	29,8	29,60	454,2	45,6	550	30,2	29,9	30,05	442,0	44,7
755	30,7	30,7	30,70	425,2	43,2	755	30,4	29,9	30,15	439,4	44,5
1000	31,2	31,4	31,30	410,5	41,9	1000	30,5	31,0	30,75	423,9	43,1
1510	30,9	30,8	30,85	421,5	42,8	1510	31,3	31,1	31,20	412,9	42,1
2505	31,1	32,0	31,55	404,6	41,3	2495	31,0	31,3	31,15	414,1	42,2

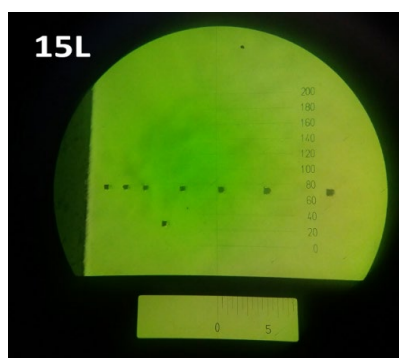
Στην εικόνα 5.12, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 33 και 15 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για μία ώρα, στην συνέχεια απόψυξη σε τήγμα άλατος για 15 λεπτά και έπειτα απόψυξη στο νερό, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.4: Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.



Εικόνα 5.12: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 33 & 15, μίας ώρας ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται πολύ σημαντική ομοιογένεια μεταξύ των δοκιμίων 33 και 15.
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται ικανοποιητική ομοιογένεια μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 560 HV0.2 έως και 610HV0.2 (53.0-55.7 HRC)
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 335μm έως και 385μm.
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1000-1200μm με εύρος σκληρότητας 400-420HV0.2 (40.8-42.7 HRC)

Στην εικόνα 5.13, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 15 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100)



Εικόνα 5.13: Αποτυπώματα δοκιμίου 15 αριστερή παρειά (x100)

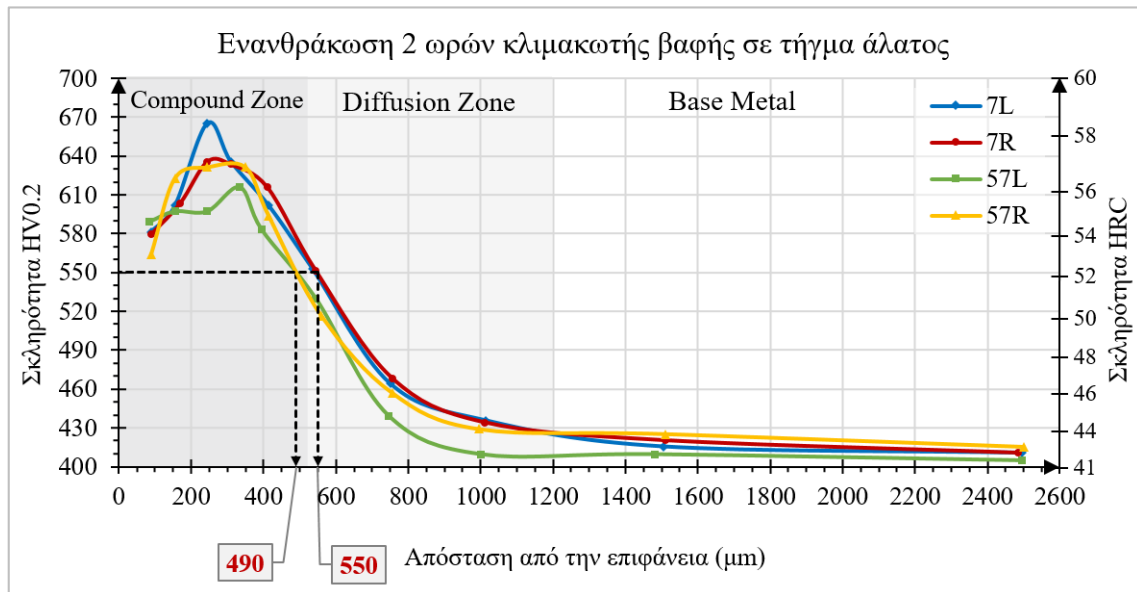
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 7

Δοκίμιο 7 (2h + AS140) – Δύο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
90	25,7	25,8	25,75	581,5	54,1	90	25,7	25,9	25,80	579,6	54,0
155	25,1	25,4	25,25	601,6	55,3	170	25,1	25,3	25,20	603,6	55,4
245	24,0	23,6	23,80	665,5	58,6	245	24,5	24,4	24,45	635,8	57,1
310	24,8	24,1	24,45	635,8	57,1	310	24,6	24,4	24,50	633,6	57,0
415	25,3	25,2	25,25	601,6	55,3	410	25,0	24,8	24,90	616,2	56,0
535	26,6	26,4	26,50	553,1	52,4	545	26,6	26,5	26,55	551,2	52,3
750	29,4	29,1	29,25	464,1	46,5	755	29,1	29,1	29,10	468,4	46,7
1015	30,4	30,2	30,30	435,5	44,1	1010	30,1	30,6	30,35	434,1	44,0
1505	30,5	31,7	31,10	415,3	42,3	1510	31,0	30,8	30,90	420,2	42,7
2495	31,3	31,3	31,30	410,5	41,9	2485	31,3	31,3	31,30	410,5	41,9

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 57

Δοκίμιο 57 (2h + AS140) - Δύο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	25,8	25,3	25,55	589,4	54,6	90	26,1	26,3	26,20	564,2	53,2
155	25,2	25,5	25,35	597,5	55,1	155	24,7	24,8	24,75	622,7	56,4
245	25,4	25,3	25,35	597,5	55,1	245	24,5	24,6	24,55	631,4	56,8
335	25,0	24,8	24,90	616,2	56,0	350	24,7	24,4	24,55	631,4	56,8
395	25,8	25,6	25,70	583,4	54,2	415	25,3	25,6	25,45	593,4	54,8
545	27,4	26,9	27,15	530,0	51,1	560	27,4	27,7	27,55	516,4	50,3
745	30,1	30,2	30,15	439,4	44,5	755	29,4	29,6	29,50	457,0	45,9
1000	31,4	31,3	31,35	409,3	41,7	995	30,7	30,4	30,55	429,0	43,5
1480	31,3	31,4	31,35	409,3	41,7	1510	30,7	30,7	30,70	425,2	43,2
2495	31,8	31,3	31,55	404,6	41,3	2500	31,0	31,2	31,10	415,3	42,3

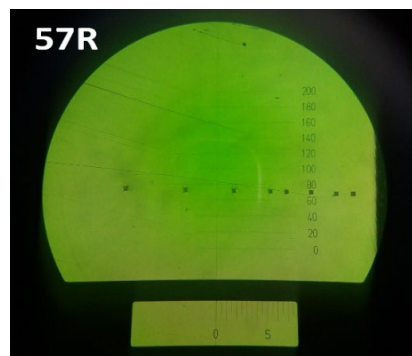
Στην εικόνα 5.14, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 7 και 57 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για δύο ώρες, στην συνέχεια απόψυξη σε τήγμα άλατος για 15 λεπτά και έπειτα απόψυξη στο νερό, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.4: Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.



Εικόνα 5.14: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 7 & 57, δύο ωρών ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ικανοποιητική ομοιογένεια για εξαγωγή συμπερασμάτων, μεταξύ των δοκιμίων 7 και 57.
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται πολύ μικρό εύρος σκληρότητας μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 560 HV0.2 έως και 590HV0.2 (53.0-55.3 HRC)
- Σε απόσταση 240μm από την επιφάνεια εντοπίζεται η μοναδική ανομοιογένεια σκληρότητας στην αριστερή πλευρά του δοκιμίου 7. Παρουσιάζεται αυξημένη σκληρότητα κατά 4.5% συγκριτικά με την αντίστοιχη στην απέναντι πλευρά του ίδιου δοκιμίου.
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 460μm έως και 550μm.
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσσει της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1100-1200μm με εύρος σκληρότητας 405-420HV0.2 (41.3-42.7 HRC)

Στην εικόνα 5.15, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 57 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100).



Εικόνα 5.15: Αποτυπώματα δοκιμίου 57 δεξιά παρειά (x100)

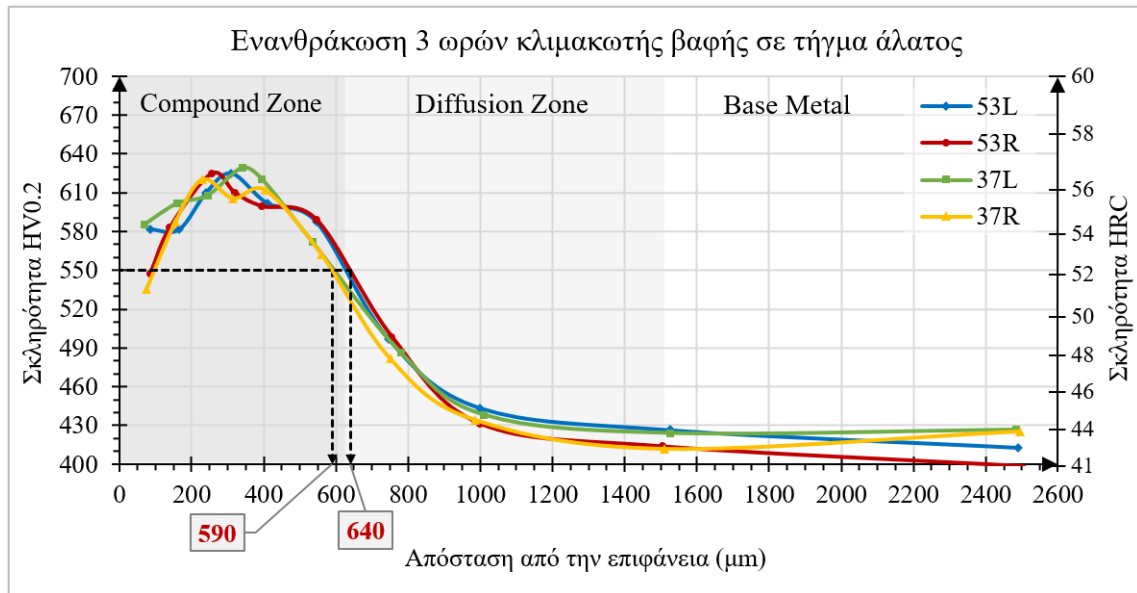
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 53

Δοκίμιο 53 (3h + AS140) – Τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	25,7	25,8	25,75	581,5	54,1	85	26,7	26,6	26,65	547,6	52,1
165	25,5	26,0	25,75	581,5	54,1	140	25,6	25,8	25,70	583,4	54,2
240	24,8	25,3	25,05	609,9	55,7	255	24,8	24,6	24,70	624,8	56,4
310	24,6	24,8	24,70	624,8	56,4	320	25,0	25,1	25,05	609,9	55,7
410	25,2	25,3	25,25	601,6	55,3	395	25,1	25,5	25,30	599,5	55,2
545	25,5	25,7	25,60	587,4	54,4	545	25,4	25,7	25,55	589,4	54,6
745	27,9	28,4	28,15	497,0	48,9	755	27,9	28,3	28,10	498,6	49,0
1000	29,8	30,2	30,00	443,4	44,8	1000	30,6	30,3	30,45	431,6	43,8
1525	30,7	30,6	30,65	426,5	43,3	1505	31,3	31,0	31,15	414,1	42,2
2490	30,7	31,7	31,20	412,9	42,1	2505	31,9	31,7	31,80	398,8	40,7

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 37

Δοκίμιο 37 (3h + AS140) - Τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
70	25,5	25,8	25,65	585,4	54,3	75	26,9	27,1	27,00	535,3	51,4
160	25,2	25,3	25,25	601,6	55,3	155	25,4	25,8	25,60	587,4	54,4
245	24,9	25,3	25,10	607,8	55,6	230	24,8	24,8	24,80	620,5	56,2
340	24,8	24,4	24,60	629,2	56,7	315	25,1	25,2	25,15	605,8	55,5
395	24,8	24,8	24,80	620,5	56,2	405	24,9	25,1	25,00	612,0	55,8
535	26,4	25,6	26,00	571,8	53,6	560	26,2	26,3	26,25	562,3	53,1
780	28,9	28,1	28,50	486,2	48,1	750	28,7	28,6	28,65	481,6	47,6
1010	30,3	30,1	30,20	438,0	44,4	985	30,6	30,1	30,35	434,1	44,0
1525	30,9	30,6	30,75	423,9	43,1	1510	31,2	31,3	31,25	411,7	42,0
2485	31,1	30,2	30,65	426,5	43,3	2495	30,7	30,7	30,70	425,2	43,2

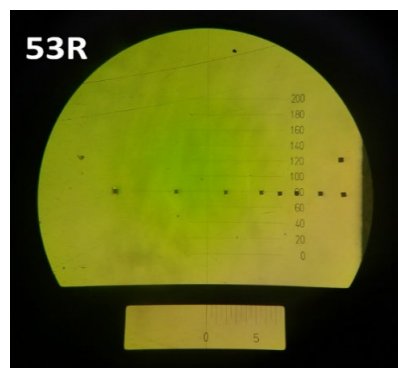
Στην εικόνα 5.16, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 53 και 37 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για τρεις ώρες, στην συνέχεια απόψυξη σε τήγμα άλατος για 15 λεπτά και έπειτα απόψυξη στο νερό, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.4: Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.



Εικόνα 5.16: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 53 & 37, τριών ωρών ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται μεγάλη ομοιογένεια μεταξύ των δοκιμίων 7 και 57.
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται εύρος σκληρότητας μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 535 HV0.2 έως και 585HV0.2 (51.4-54.3 HRC)
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 590μm έως και 640μm.
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1400-1500μm με εύρος σκληρότητας 400-430HV0.2 (40.8-43.6 HRC)

Στην εικόνα 5.17, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 53 από την δεξιά παρειά σε μεγέθυνση (x100).



Εικόνα 5.17: Αποτυπώματα δοκιμίου 53 δεξιά παρειά (x100)

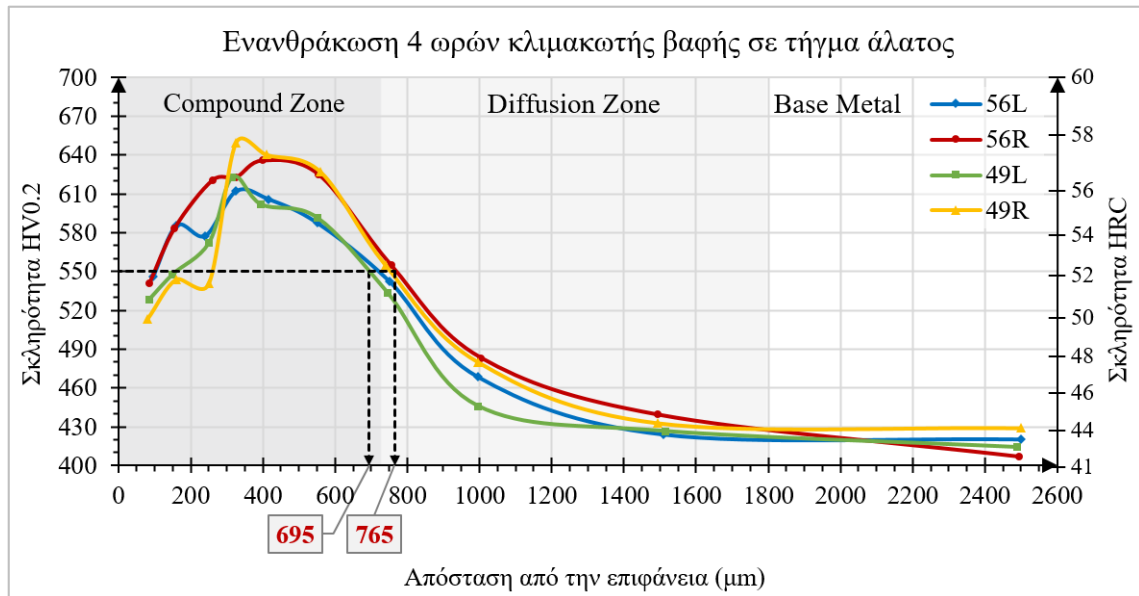
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 56

Δοκίμιο 56 (4h + AS140) – Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
95	26,8	26,6	26,70	545,8	52,0	85	26,8	26,9	26,85	540,5	51,7
160	25,7	25,6	25,65	585,4	54,3	155	25,6	25,8	25,70	583,4	54,2
240	25,6	26,1	25,85	577,6	54,0	260	24,9	24,7	24,80	620,5	56,2
325	24,9	25,1	25,00	612,0	55,8	325	24,9	24,6	24,75	622,7	56,4
415	25,2	25,1	25,15	605,8	55,5	400	24,3	24,6	24,45	635,8	57,1
550	25,4	25,8	25,60	587,4	54,4	555	24,5	24,9	24,70	624,8	56,4
750	26,4	27,2	26,80	542,3	51,8	755	26,4	26,5	26,45	554,9	52,6
995	28,8	29,4	29,10	468,4	46,7	1005	28,6	28,6	28,60	483,2	47,9
1510	30,5	31,0	30,75	423,9	43,1	1495	30,0	30,3	30,15	439,4	44,5
2500	31,0	30,8	30,90	420,2	42,7	2495	31,5	31,4	31,45	406,9	41,5

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα μικροσκληρομέτρησης δοκιμίου 49

Δοκίμιο 49 (4h + AS140) – Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος											
Αριστερά						Δεξιά					
Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC	Απόσταση από την επιφάνεια L (μm)	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	d _{M.O.} (μm)	HV0.2	HRC
85	27,6	26,8	27,20	528,3	50,9	80	27,6	27,7	27,65	513,1	50,0
150	26,5	26,8	26,65	547,6	52,1	160	26,8	26,7	26,75	544,0	51,9
250	26,2	25,8	26,00	571,8	53,6	250	26,4	27,3	26,85	540,5	51,7
315	24,7	24,8	24,75	622,7	56,4	325	24,4	23,9	24,15	649,2	57,7
395	25,5	25,0	25,25	601,6	55,3	410	24,1	24,6	24,35	640,2	57,3
550	25,5	25,5	25,50	591,5	54,7	560	24,2	25,1	24,65	627,0	56,6
745	27,3	26,8	27,05	533,5	51,2	740	26,4	26,5	26,45	554,9	52,6
995	29,8	30,0	29,90	446,0	45,1	995	28,5	28,9	28,70	480,2	47,7
1515	31,1	30,2	30,65	426,5	43,3	1495	30,1	30,7	30,40	432,8	43,6
2490	31,3	31,0	31,15	414,1	42,2	2500	30,3	30,8	30,55	429,0	43,5

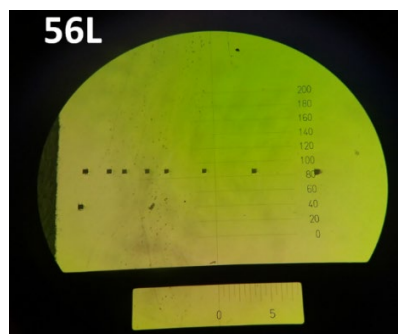
Στην εικόνα 5.18, απεικονίζονται σε μορφή διαγράμματος, τα προφίλ σκληρότητας (HV0.2 – HRC) των δοκιμίων 56 και 49 που ανήκουν στην ομάδα των δοκιμίων που υπέστησαν ενανθράκωση για τέσσερις ώρες, στην συνέχεια απόψυξη σε τήγμα άλατος για 15 λεπτά και έπειτα απόψυξη στο νερό, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην εικόνα 4.4: Ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής.



Εικόνα 5.18: Προφίλ σκληρότητας δοκιμίων 56 & 49, τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής σε τήγμα άλατος.

- Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται εμφανώς μικρότερη ομοιογένεια μεταξύ των δοκιμίων 56 και 49 συγκριτικά με τα προηγούμενα διαγράμματος κλιμακωτής βαφής. Ωστόσο, το επίπεδο ομοιογένειας είναι εντός επιτρεπτών ορίων προς εξαγωγή συμπερασμάτων.
- Σε απόσταση 80μm από την επιφάνεια παρουσιάζεται εύρος σκληρότητας μεταξύ των τεσσάρων προφίλ από 510 HV0.2 έως και 540HV0.2 (49.8-51.6 HRC)
- Γίνεται αντιληπτό, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης (το οποίο και υπολογίζεται για τιμές σκληρότητας ίση με 550HV0.2) κυμαίνεται από 695μm έως και 765μm.
- Ακόμη, η πτώση σκληρότητας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια λαμβάνει τέλος σε απόσταση περίπου ίση με 1800μm με εύρος σκληρότητας 415-430HV0.2 (42.3-43.6 HRC)

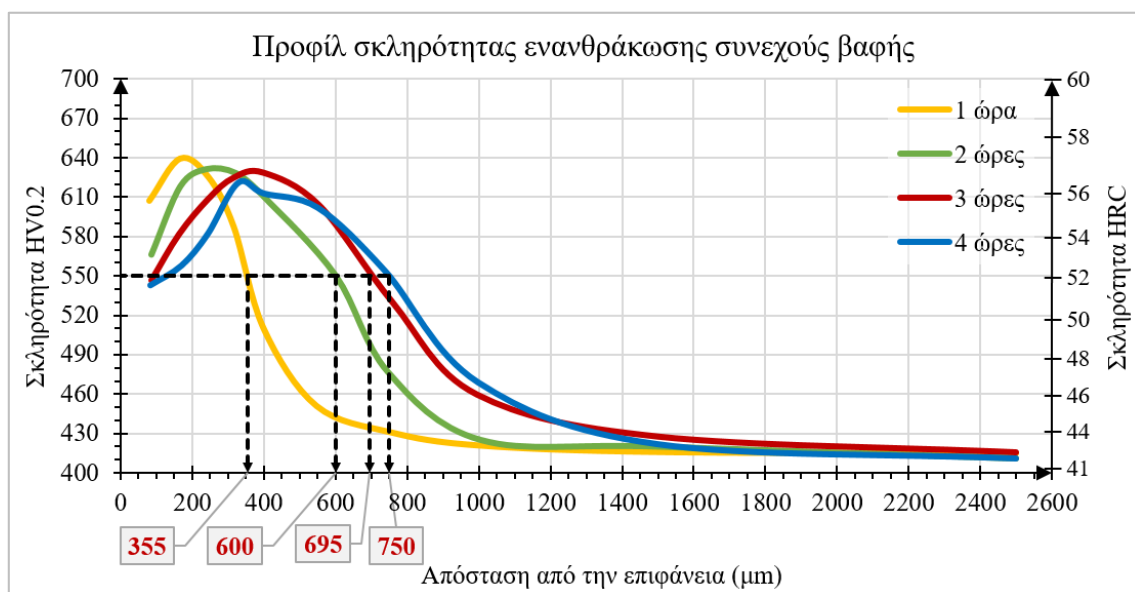
Στην εικόνα 5.19, φαίνονται τα αποτυπώματα του δοκιμίου 56 από την αριστερή παρειά σε μεγέθυνση (x100)



Εικόνα 5.19: Αποτυπώματα δοκιμίου 56 αριστερή παρειά (x100)

5.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΤΥΠΩΝ ΑΠΟΨΥΞΕΩΝ

Με σκοπό να γίνει ευκολότερη η σύγκριση των παραπάνω διαγραμμάτων προς εξαγωγή συμπερασμάτων, υπολογίζεται η μέση τάση του προφίλ σκληρότητας από τις τέσσερις συνολικές καμπύλες (δύο πλευρές για κάθε ένα και των δύο δοκιμίων κάθε περίπτωσης) για όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται στην ενανθράκωση συνεχούς βαφής. Τα αποτελέσματα των μέσων τάσεων κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στην εικόνα 5.20 «Προφίλ σκληρότητας των περιπτώσεων ενανθράκωσης μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών με συνεχή βαφή». Ομοίως δημιουργείται και το διάγραμμα της εικόνας 5.21 «Προφίλ σκληρότητας των περιπτώσεων ενανθράκωσης μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών με κλιμακωτή βαφή».



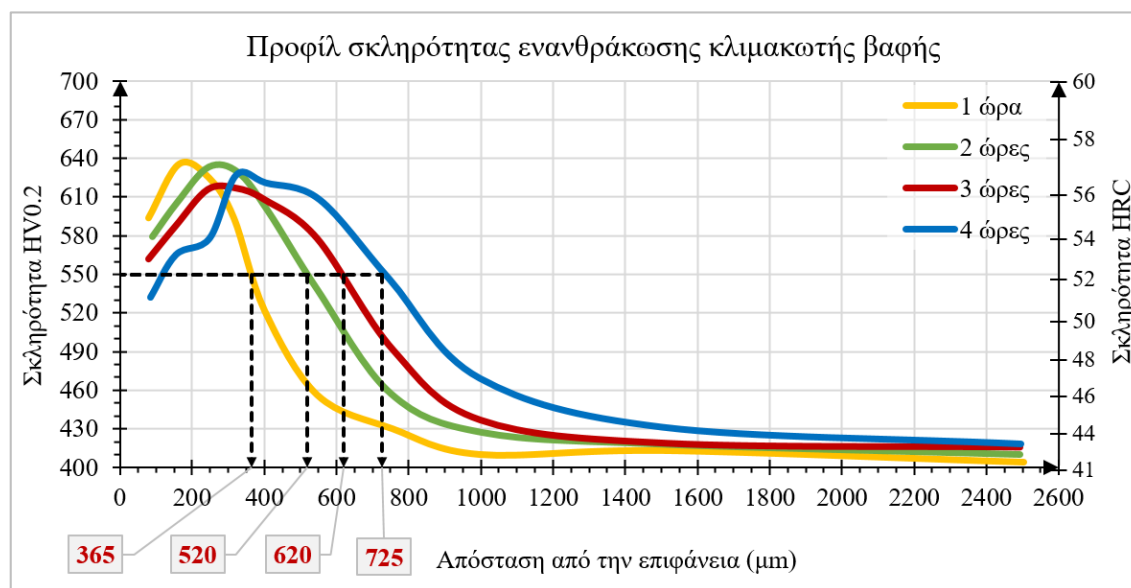
Εικόνα 5.20: Προφίλ σκληρότητας μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με συνεχή βαφή.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα γίνεται σαφές ότι τα μεγέθη «διάρκεια ενανθράκωσης» και «σκληρότητα» για συγκεκριμένη απόσταση από την επιφάνεια είναι ανάλογα, με εξαίρεση την περίπτωση των τεσσάρων ωρών κατά την οποία η τάση της σκληρότητας τείνει να πλησιάσει αυτή των τριών ωρών αλλά σε καμία περίπτωση δεν είναι η αναμενόμενη.

Όσον αφορά την περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης, είναι εύκολα αντιληπτό ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης ισούται με 355 μm (αναφέρεται στην απόσταση από την επιφάνεια κατά την οποία η σκληρότητα είναι 550 HV0.2). Η σκληρότητα του υποβάθρου (ισούται με την σκληρότητα του υλικού σε σημείο 1000 μm μακριά από την επιφάνεια) είναι 420 HV0.2 (42.7 HRC). Η περίπτωση των δύο ωρών ενανθράκωσης παρουσιάζει σημαντική αύξηση σκληρότητας έναντι αυτή της μίας, εξαιτίας της διάρκειας της ενανθράκωσης. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται σημαντική αύξηση στο ενεργό βάθος ενανθράκωσης, 600 μm έναντι 355 μm (αύξηση κατά 68%). Ενώ η σκληρότητα του υποβάθρου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με πολύ μικρή αύξηση 425 HV0.2 έναντι των 420 μm (αύξηση 2%).

Αναφορικά με την περίπτωση των τριών ενανθράκωσης συνεχούς βαφής, αυτή παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αύξηση του βάθους ενανθράκωσης έναντι των δύο προηγούμενων περιπτώσεων. Αναλυτικότερα, το ενεργό βάθος ενανθράκωσης στην περίπτωση των τριών ωρών ισούται με 800 μm έναντι 600 μm (αύξηση 33%). Ενώ, η σκληρότητα υποβάθρου αυξήθηκε και αυτή όπως αναμενόταν στα 500 μm έναντι 425 μm (αύξηση 18%).

Τελειώνοντας, η περίπτωση των τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης παρουσιάζει μη αναμενόμενα και σύμφωνα με την τάση του διαγράμματος αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργό βάθος ενανθράκωσης μειώθηκε κατά 4% συγκριτικά με την περίπτωση των τριών ωρών από 800 μm σε 765 μm . Ενώ και η σκληρότητα υποβάθρου μειώθηκε στα 469 HV0.2 έναντι 500 HV0.2 της ενανθράκωσης των τριών ωρών.



Εικόνα 5.21: Προφίλ σκληρότητας μίας, δύο, τριών και τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή.

Όπως και στο διάγραμμα της εικόνας 5.20 έτσι και στο παραπάνω, η γενική τάση των τεσσάρων προφίλ σκληρότητας παραμένει η ίδια και σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι η αναμενόμενη. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της ενανθράκωσης (από μία έως και τέσσερις ώρες) τόσο μεγαλύτερη είναι και η σκληρότητα για συγκεκριμένη απόσταση από την επιφάνεια και αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει και με το ενεργό βάθος ενανθράκωσης. Αναλυτικότερα για κάθε περίπτωση, από το συγκεντρωτικό διάγραμμα της κλιμακωτής βαφής (Εικόνα 5.16) εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

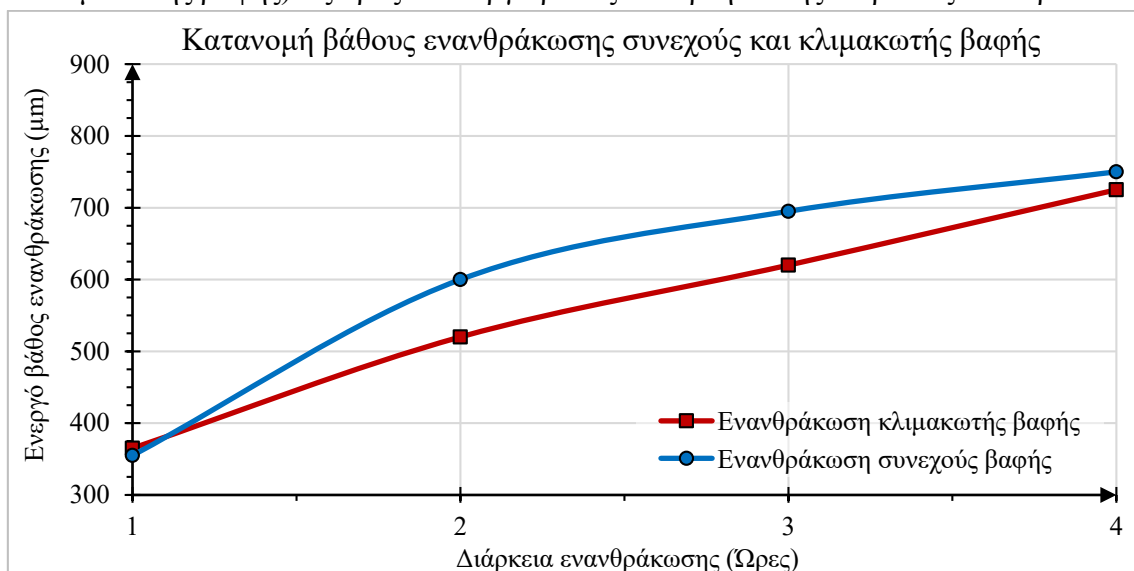
Για την περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης, το ενεργό βάθος κυμαίνεται στα 365 μm , ενώ η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 410 HV0.2 (41.9 HRC). Αναφορικά με την περίπτωση των δύο ωρών ενανθράκωσης, αυτή παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αύξηση στα αποτελέσματα της σκληρότητας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης είναι 520 μm (αυξημένο κατά 43%) ενώ η σκληρότητα του υποβάθρου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με πολύ μικρή αύξηση στα 425 HV0.2 από τα 410 HV0.2 (αύξηση 3.5 %)

Όσον αφορά, την περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης, υπάρχει και εδώ σημαντική αύξηση της σκληρότητας συγκριτικά με αυτήν των δύο ωρών. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης αυξήθηκε κατά 19% από τα 520 μm στα 620 μm ενώ η σκληρότητα του υποβάθρου

εντοπίζεται στα 445 HV0.2, παρουσιάζοντας μικρή αύξηση 5% συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Τέλος, η σημαντικότερη διαφορά στα αποτελέσματα της σκληρότητας, μεταξύ των δύο διαφορετικών προγραμμάτων ενανθράκωσης (συνεχούς βαφής και κλιμακωτής βαφής) αφορά την περίπτωση των τεσσάρων ωρών. Ενώ στην περίπτωση της ενανθράκωσης συνεχούς βαφής, το ενεργό βάθος ενανθράκωσης, παρουσιάζει μικρή μείωση (8%) συγκριτικά με αυτήν των τριών, δεν συμβαίνει το ίδιο και στην περίπτωση της κλιμακωτής βαφής.

Αναλυτικότερα, το ενεργό βάθος ενανθράκωσης των τεσσάρων ωρών έχει αναμενόμενη τάση, κυμαινόμενο στα 725 μm , δηλαδή αυξημένο κατά 22.5% έναντι του αντίστοιχου των τριών ωρών. Επίσης, η σκληρότητα ενανθράκωσης εντοπίζεται στα 470 HV0.2 (αύξηση κατά 5.5%).

Στην εικόνα 5.22, παρουσιάζεται η σύγκριση των προγραμμάτων ενανθράκωσης (συνεχούς και κλιμακωτής βαφής) ως προς το ενεργό βάθος συναρτήσει της διάρκειας ενανθράκωσης.



Εικόνα 5.22: Σύγκριση κατανομής ενεργού βάθους ενανθράκωσης των δύο τύπων απόψυξης.

Το παραπάνω διάγραμμα αποσκοπεί στην σύγκριση των δύο διαφορετικών προγραμμάτων ενανθράκωσης (συνεχούς και κλιμακωτής βαφής).

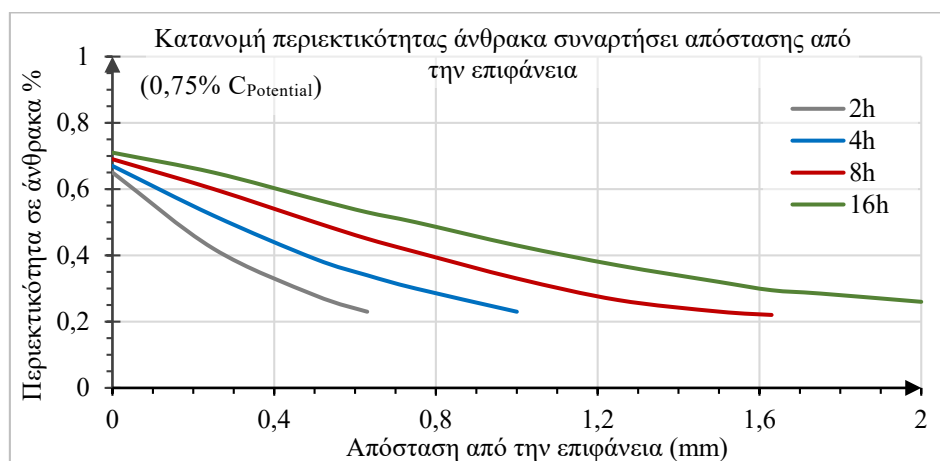
Αρχικά, για την μία ώρα ενανθράκωση παρατηρείται ότι το ενεργό βάθος κυμαίνεται και στις δύο περιπτώσεις στα επίπεδα των 360 μm με πολύ μικρές διαφορές. Στην συνέχεια, εμφανίζεται σημαντική αύξηση του ενεργού βάθους για τις δύο ώρες και στις δύο περιπτώσεις. Συγκρίνοντας τα δύο προγράμματα, η ενανθράκωση συνεχούς βαφής δημιουργεί ενεργό βάθος ενανθράκωσης σε απόσταση από την επιφάνεια μέχρι και τα 600 μm , ενώ αυτό της κλιμακωτής στα 520 μm .

Όσον αφορά την διάρκεια των τριών ωρών, επαναλαμβάνεται η ίδια τάση αύξησης του ενεργού βάθους λόγω αύξησης της διάρκειας ενανθράκωσης όπως έχει ήδη αναφερθεί. Το βάθος ενανθράκωσης για την συνεχή βαφή παραμένει αυξημένο κατά 12%, 695 μm έναντι

620 μm του αντίστοιχου της κλιμακωτής βαφής. Αναφορικά, με την περίπτωση των τεσσάρων ωρών, σε αυτήν παρατηρείται μία σύγκλιση μετρούμενων τιμών. Πιο συγκεκριμένα, το βάθος ενανθράκωσης για την συνεχούς βαφής είναι 750 μm έναντι 725 μm του αντίστοιχου της κλιμακωτής βαφής, αυξημένο κατά 3,5%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρόνος ενανθράκωσης (τέσσερις ώρες) είναι σημαντικός αυξάνοντας το μέγεθος του κόκκου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κορεσμό στην επίδραση του άνθρακα στην σκληρότητα.

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό ότι η ενανθράκωση συνεχούς βαφής παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερο ενεργό βάθος ενανθράκωσης καθ' όλο το προφίλ σκληρότητας συγκριτικά με αυτό της κλιμακωτής βαφής.

Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ρυθμού απόψυξης της ενανθράκωσης συνεχούς βαφής και κλιμακωτής βαφής. Στην περίπτωση της ενανθράκωσης με συνεχή βαφή, τα δοκίμια μετά το στάδιο της ωστενιτοποίησης, αποψύχονται ακαριαία σε λαδί. Από την άλλη, τα δοκίμια της κλιμακωτής βαφής, μετά το στάδιο της ωστενιτοποίησης, εισέρχονται σε κλίβανο που περιέχει τηγμένο αλάτι στους 180°C για 15 λεπτά. Συνεπώς, λόγω του ρυθμού απόψυξης των δοκιμίων συνεχούς βαφής, αυτά έχουν μεγαλύτερη σκληρότητα σε όλο το προφίλ τους, συγκριτικά με τα αντίστοιχα της κλιμακωτής.



Εικόνα 5.23: κατανομή περιεκτικότητας του άνθρακα συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια. [32]

Από το παραπάνω διάγραμμα, μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή του άνθρακα για τις 2h και 4h, της παρούσας μελέτης.

(κενή σελίδα)

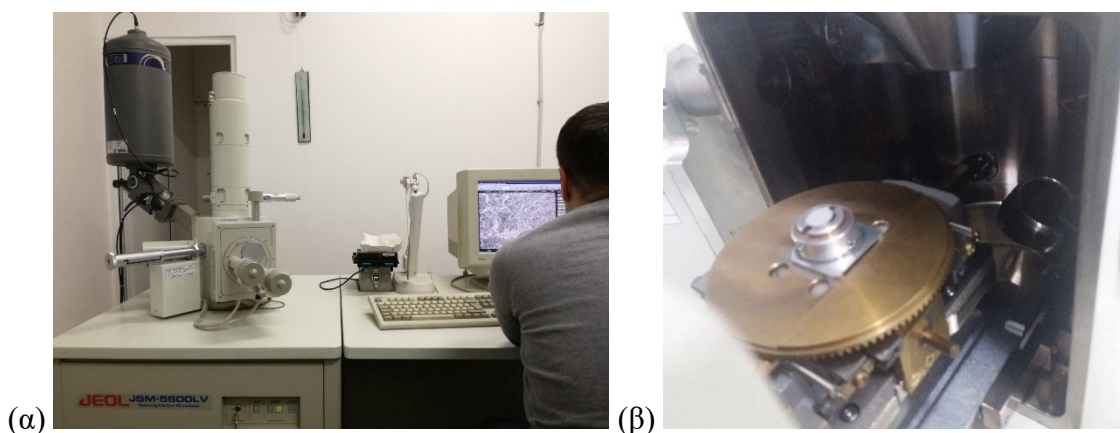
6 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕΣΩ S.E.M.

6.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η ανάλυση της θραυστογραφίας των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο πολυτεχνείο U.T.C.N. (Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca) της Ρουμανίας στο εργαστήριο ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (Laborator de microscopie electronica) υπό την εποπτεία του κ. Florin Popa. Μετά την μηχανική δοκιμή της κάμψης, 8 δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα για τον έλεγχο της επιφάνειας θραύσης τους.

Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο σάρωσης δέσμης ηλεκτρονίων (SEM) τύπου JEOL-JSM5600 LV. Χρησιμοποιήθηκε ένα μηχάνημα τύπου Oxford Inst. Inca 200 Soft (model: 6587, S/N: 16528-3390-TVI-0990). Πριν την μελέτη τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε αλκοόλη και καθαρίστηκαν με υπέρηχους.

Στην εικόνα 6.1(α), απεικονίζεται η διάταξη του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης κατά την διάρκεια μελέτης ενός δοκιμίου της παρούσας εργασίας. Η εικόνα 6.1(β), δείχνει την εισαγωγή ενός δοκιμίου τοποθετημένο σε κατάλληλη βάση στήριξης προς μελέτη.

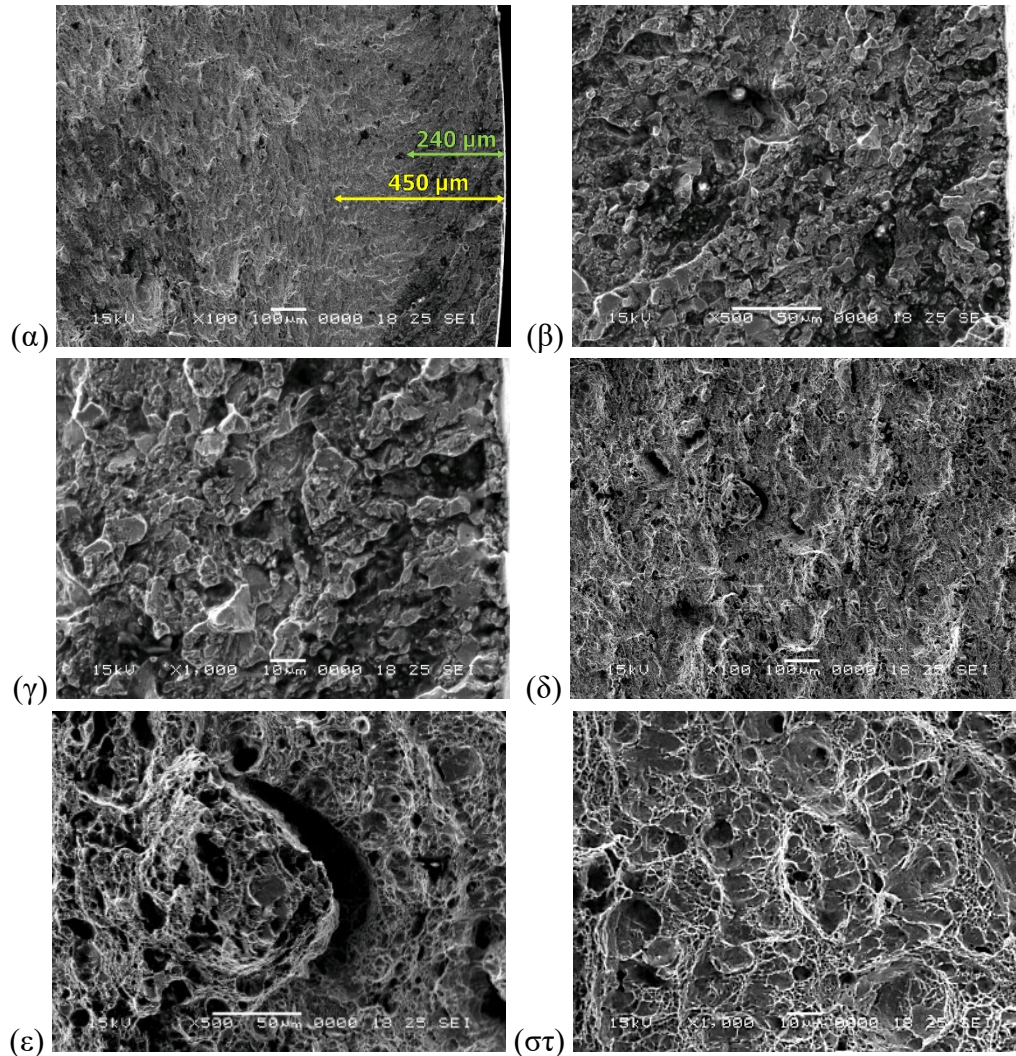


Εικόνα 6.1: (α) Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (S.E.M. JOEL JSM 5600LV),
(β) Εισαγωγή των δοκιμίων εντός θαλάμου.

6.2 ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ

6.2.1 Μία ώρα ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.2, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

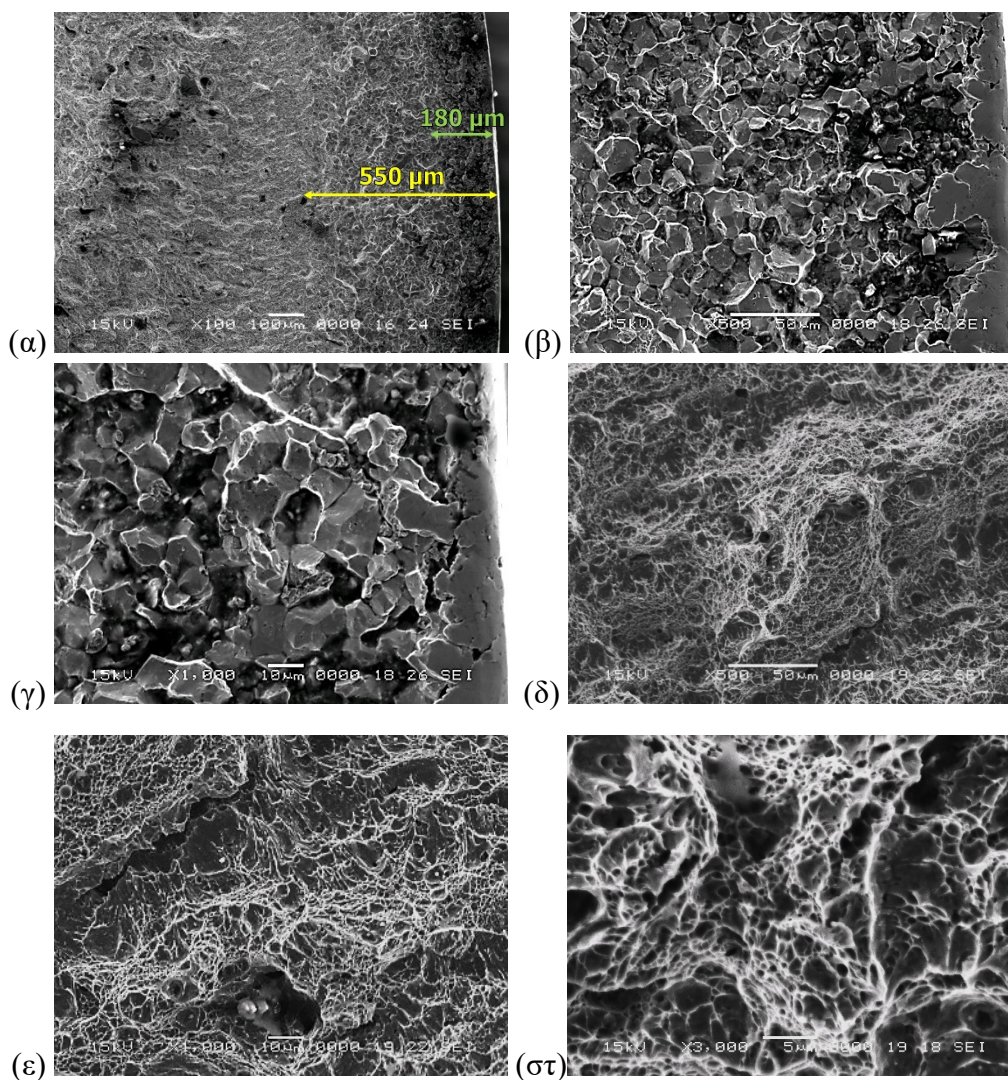


Εικόνα 6.2: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη μια ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

Από την εικόνα 6.2(α), διακρίνεται η αλλαγή χρωματισμού στα 240μm: η σκούρα περιοχή (επιφανειακή ζώνη) απεικονίζει μια απόλυτα ψαθυρή περιοχή με υψηλή περιεκτικότητα σε καρβίδια. Ταυτίζεται σε βάθος με την περιοχή όπου αυξάνεται βαθμιαία η σκληρότητα μέχρι τη μέγιστη τιμή της. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από οξείδωση και αποτελεί την διεπιφάνεια μεταξύ του μέσου ενανθράκωσης και του χάλυβα. Αυτό σημαίνει ότι είναι η περιοχή με την μεγαλύτερη παραμονή στη θερμοκρασία ενανθράκωσης και ταυτόχρονα είναι φτωχότερη στα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία του υλικού λόγω αντίστοιχης διάχυσής τους στο μέσο ενανθράκωσης. Περίπου στα 450μm παρατηρείται, πλέον η διαφορά στις επιφάνειες θραύσης, όπου σε διακριτό ποσοστό η θραύση είναι όλκιμη. Μεταξύ των δύο περιοχών βρίσκεται το ενεργό βάθος ενανθράκωσης που αντιστοιχεί σε σκληρότητα 550HV. Από τις εικόνες που αναφέρονται στην καρδιά του δοκιμίου, συμπεραίνεται ότι, η δομή του υλικού είναι λεπτόκοκκη, ενώ η επιφάνεια χαρακτηρίζεται αμιγώς ως ψαθυρή λόγω διακρυσταλλικής θραύσης.

6.2.2 Δύο ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.3, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

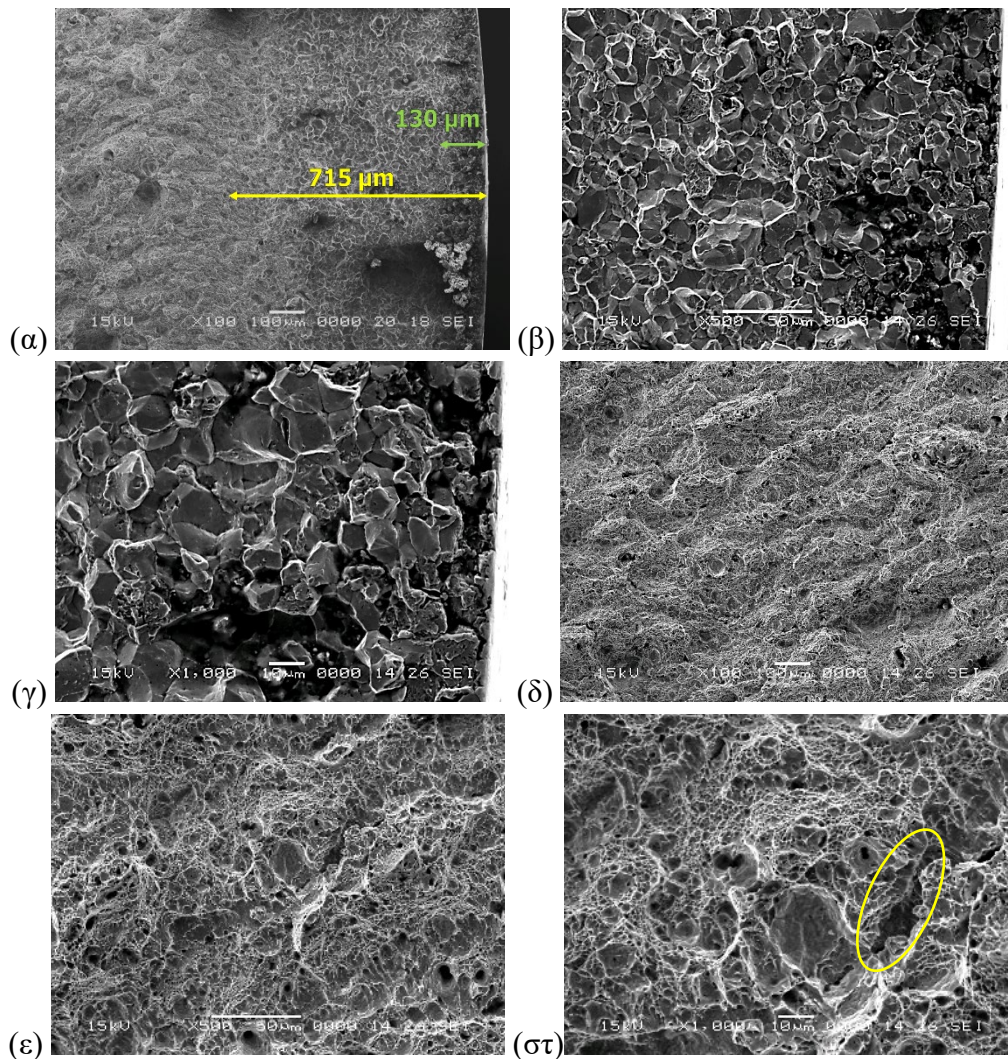


Εικόνα 6.3: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη δυο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

1.2.3 Από την εικόνα 6.3(α), συμπεραίνεται ότι το βάθος ενανθράκωσης είναι περίπου στα 550μm ενώ αυτό της επιφανειακής ζώνης στα 200μm. Η περιοχή αυτή ταυτίζεται με το βάθος όπου παρατηρείται βαθμιαία αύξηση της σκληρότητας, όπως και στην ενανθράκωση μίας ώρας. Η διάβρωση που έχει υποστεί το δοκίμιο, φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 6.3(β). Στην άκρη κάποιοι κόκκοι έχουν παραμορφωθεί (μεγαλώσει) κατά την οστενιτοποίηση, με αποτέλεσμα να είναι πιο δραστικοί στην διάβρωση. Επιπλέον, στην εικόνα 6.3(γ), απεικονίζεται έντονα το φαινόμενο της διακρυσταλλικής θραύσης, ενώ φαίνεται ότι η δομή στην επιφάνεια είναι λεπτόκοκκη με τους κόκκους να μην είναι ομαλά σχηματισμένοι. Όσον αφορά, την καρδιά του δοκιμίου, το υλικό εκεί, έχει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά θραύσης. Λόγω ολκιμότητας (ελλείπει άνθρακα) δημιουργούνται θύλακες (εικόνα 6.3ε), οι οποίοι είναι χαρακτηριστικό όλκιμης διακρυσταλλικής θραύσης. Στο κέντρο, οι κόκκοι είναι ομοιόμορφοι και ομαλά σχηματισμένοι με αποτέλεσμα η θραύση του δοκιμίου να έχει ξεκινήσει από την επιφάνεια.

6.2.3 Τρεις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.4, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

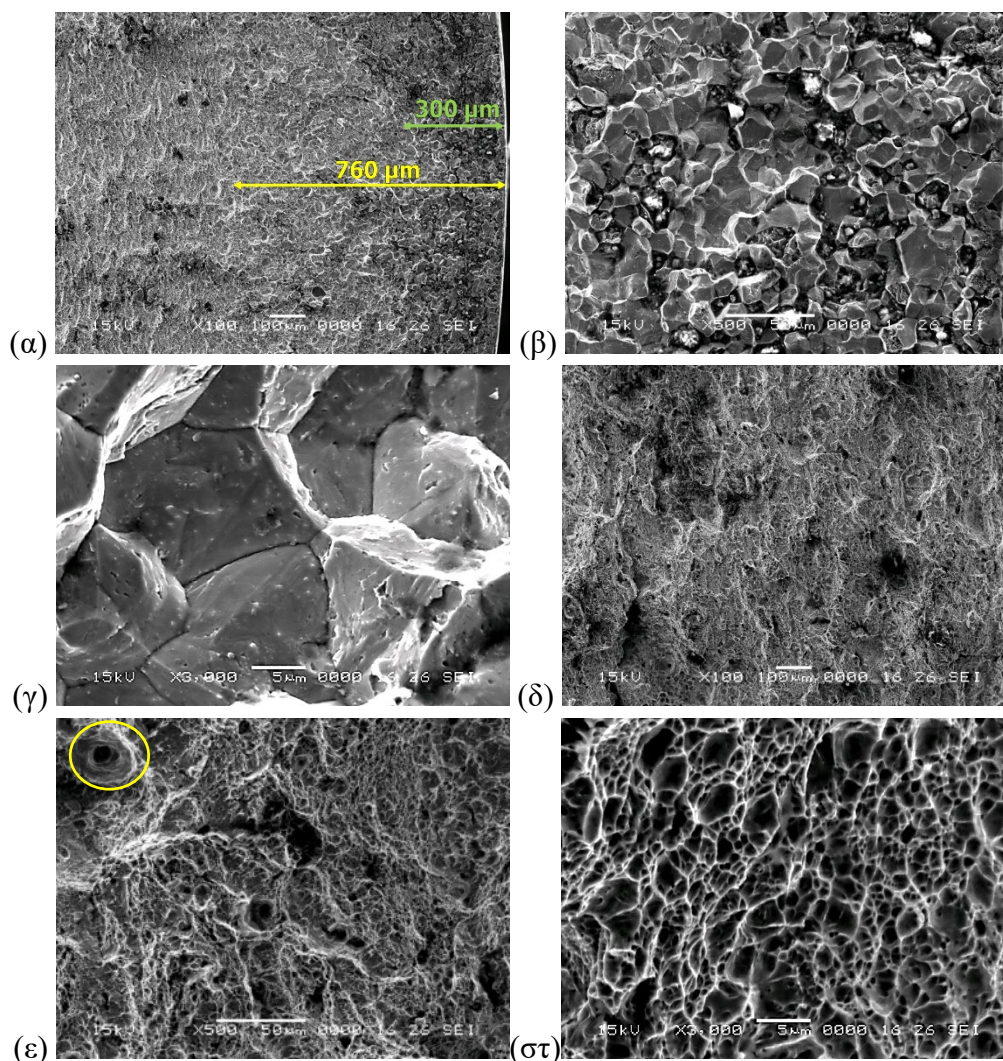


Εικόνα 6.4: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

Στην εικόνα 6.4(α), διακρίνεται το βάθος ενανθράκωσης για τις τρεις ώρες, το οποίο και είναι στα επίπεδα των 715μm σημαντικά αυξημένο συγκριτικά με αυτό των δύο ωρών (550μm). Ωστόσο, η επιφανειακή ζώνη είναι μειωμένη (130μm) σχετικά με την αντίστοιχη των δύο ωρών (200μm). Όσον αφορά, την καρδιά του δοκιμίου αυτή παρουσιάζει ακόμη λεπτότερη δομή συγκριτικά με αυτή των δύο ωρών. Η αύξηση της ολκιμότητας της καρδιάς (εξαιτίας της αύξησης της διάρκειας ενανθράκωσης) απεικονίζεται στην μείωση του μεγέθους των θυλάκων. Στην εικόνα 6.4(στ), εμφανίζεται μία ατέλεια πορώδους (κίτρινο πλαίσιο) το οποίο προϋπήρχε στο υλικό κατά την ενανθράκωση.

6.2.4 Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.5, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.



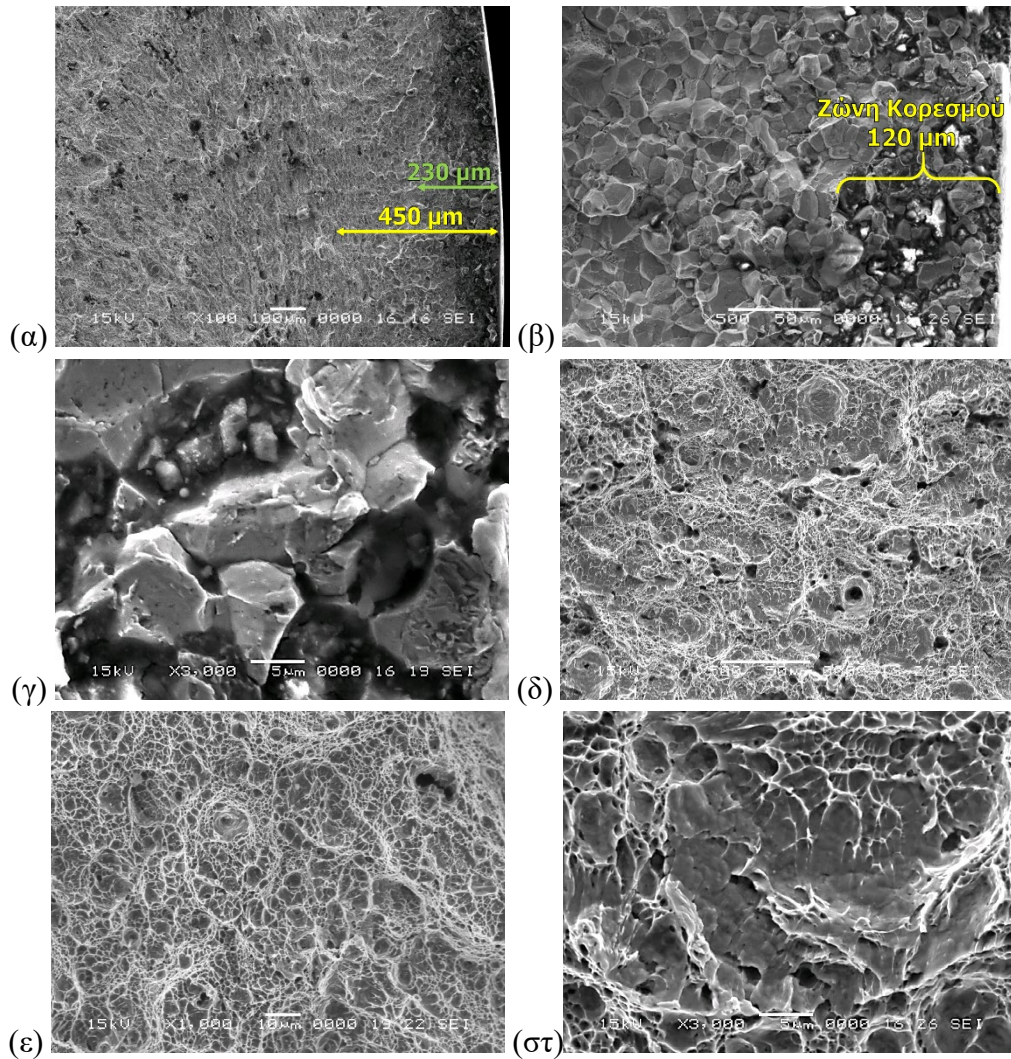
Εικόνα 6.5: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή.

Στην εικόνα 6.5(α) διακρίνεται το βάθος ενανθράκωσης το οποίο αυξήθηκε σημαντικά (760 μm) έναντι των τριών ωρών (715 μm). Επίσης, έχει αυξηθεί και η επιφανειακή ζώνη (300 μm). Η συμπεριφορά της επιφάνειας του δοκιμίου στις τέσσερις ώρες, μοιάζει αρκετά με αυτή των τριών ωρών. Εμφανίζεται έντονη περικρυσταλλική θραύση, η οποία φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 6.5(γ). Όσον αφορά την συμπεριφορά της καρδιάς, αυτή έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη των τριών ωρών. Πιο συγκεκριμένα, η καρδιά αποτελείται από μικρούς θύλακες που μαρτυρούν την έντονη ολκιμότητα της περιοχής και την διακρυσταλλική μορφή της θραύσης. Η μικροδομή στο κέντρο είναι λεπτόκοκκη και με όχι τόσο ομοιόμορφους γεωμετρικά κόκκους όσο στην περίπτωση των τριών ωρών. Τέλος, στην εικόνα 6.5(ε), πάνω αριστερά απεικονίζεται ένα σχετικά μεγάλων διαστάσεων καρβίδιο (κίτρινο πλαίσιο).

6.3 ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ

6.3.1 Μία ώρα ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.6, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

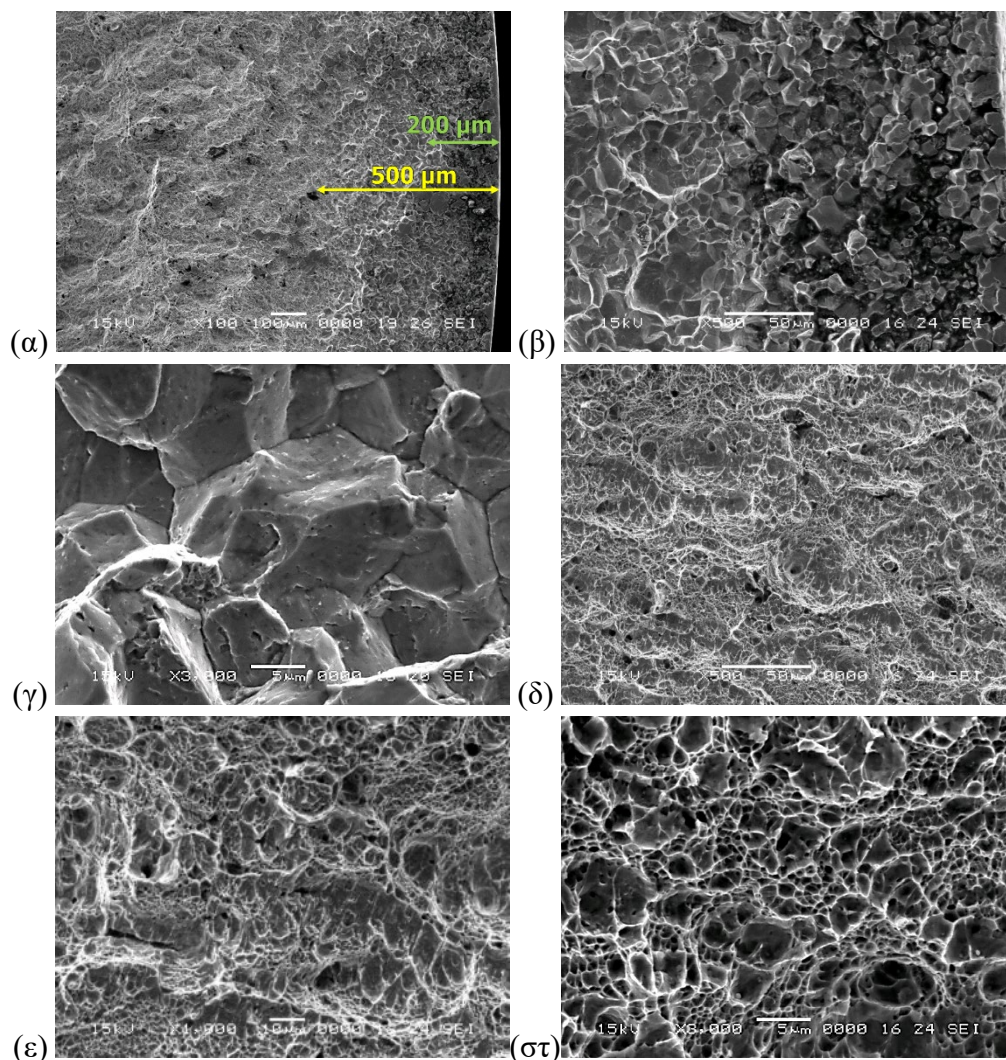


Εικόνα 6.6: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

Στην εικόνα 6.5(α), ξεχωρίζει το βάθος ενανθράκωσης (450μm) το οποίο είναι στα ίδια επίπεδα με το αντίστοιχο της συνεχούς βαφής. Ο έντονος χρωματισμός συνεπάγεται διαφοροποίηση της χημικής σύστασης τοπικά στο υλικό, όπως και στην περίπτωση της συνεχούς βαφής. Στα 120μm (εικόνα 6.5β) παρουσιάζεται ο κορεσμός της διείσδυσης του άνθρακα στην οποία το μέγεθος των κόκκων είναι ιδιαίτερος μικρό. Η εικόνα 6.5(γ) είναι εντός της μεταβατικής περιοχής του υλικού (120-450μm), εμφανίζονται και τα δύο είδη θραύσης (περικρυσταλλική και διακρυσταλλική). Στο κέντρο του δοκιμίου, η θραύση δεν είναι ομαλή αντίθετα παρουσιάζονται πολλές ανωμαλίες, επίσης υπάρχουν πολλά «κενά» λόγω της παραμόρφωσης που έχει υποστεί η περιοχή.

6.3.2 Δύο ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.7, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη δυο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

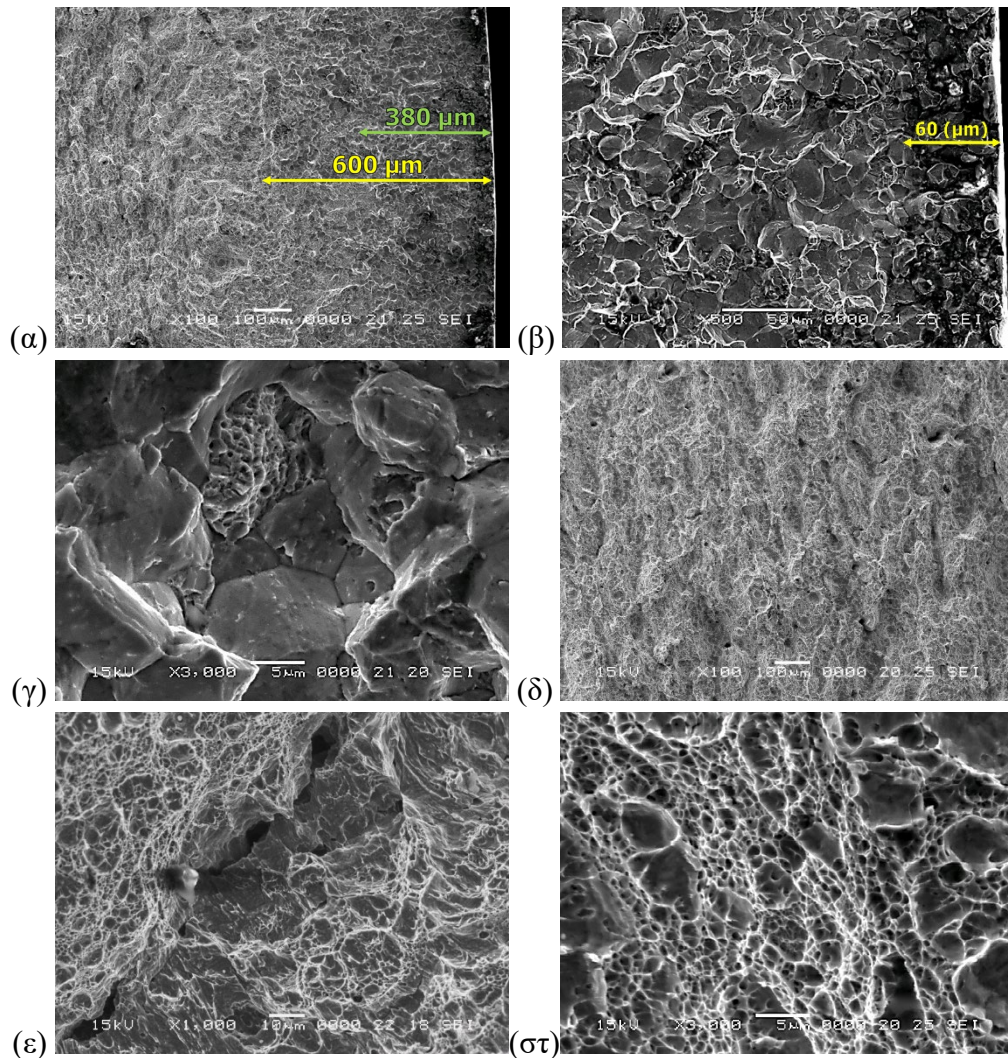


Εικόνα 6.7: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη δυο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

Στην εικόνα 6.7(α) παρατηρείται ότι το βάθος ενανθράκωσης φτάνει μέχρι τα επίπεδα των 500μm, ενώ επιφανειακή ζώνη μέχρι τα 180μm. Όσον αφορά την επιφάνεια του δοκιμίου, οι διαφορές με την περίπτωση της μίας ώρας είναι ελάχιστες. Στην μεταβατική περιοχή (εικόνα 6.7(γ), σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ η θραύση είναι έντονα περικρυσταλλική με σπάνια εμφάνιση της διακρυσταλλική και με κόκκους διαμέτρου περίπου 15μm. Το κέντρο παρουσιάζει ομαλότερη θραύση, χωρίς τα χαρακτηριστικά «ξεριζώματα» που υπήρχαν στην περίπτωση της μίας ώρας. Στην εικόνα 6.7(ε), φαίνεται ότι στην καρδιά του δοκιμίου, οι κόκκοι είναι ομαλά γεωμετρικά σχηματισμένοι και πολυγωνικοί. Εκεί, η θραύση εξακολουθεί να είναι έντονα περικρυσταλλική ενώ η δομή είναι ιδιαίτερος λεπτόκοκκη.

6.3.3 Τρεις ώρες ενανθράκωση

Στην εικόνα 6.8, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

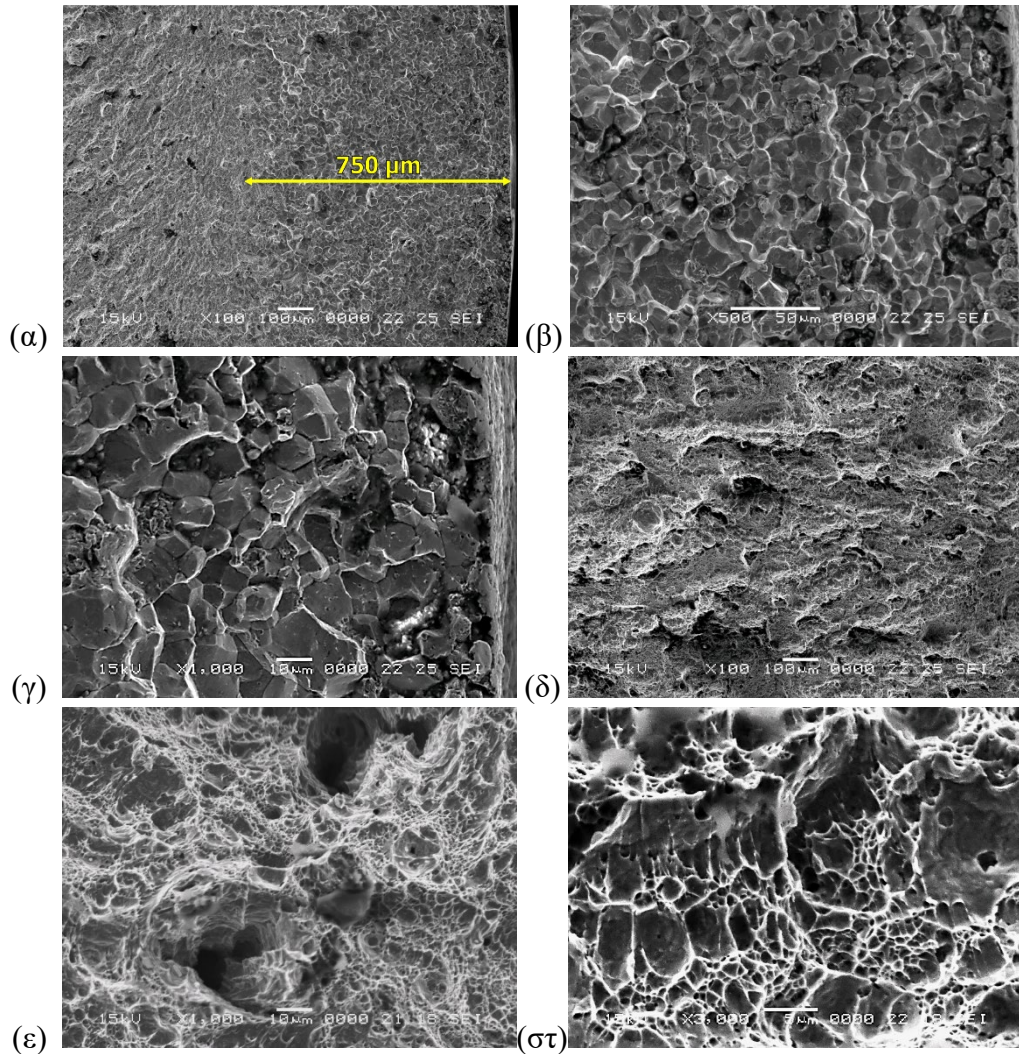


Εικόνα 6.8: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

Στην εικόνα 6.8(α), διακρίνεται το βάθος ενανθράκωσης παρουσιάζει μικρή αύξηση κατά 50μm (600μm) συγκριτικά με την περίπτωση των δυο ωρών. Στην εικόνα 6.8(β), φαίνεται χαρακτηριστικά η περιοχή κορεσμού του άνθρακα η οποία και αναπτύσσεται μέχρι τα 60μm. Στην περιοχή κορεσμού η θραύση χαρακτηρίζεται και με τα δύο είδη (περικρυσταλλική και διακρυσταλλική) ωστόσο στην πλειοψηφία της είναι διακρυσταλλική. Όσον αφορά, τη καρδιά του δοκιμίου, εκεί η δομή είναι ιδιαίτερος λεπτόκοκκη αλλά αρκετά ομοιομορφη. Η περιοχή μπορεί να χαρακτηριστεί ινώδης, δηλαδή εμφανίζονται περιοχές με ίνες (εικόνα 6.8δ), και κενά λόγω παραμόρφωσης (εικόνα 6.8ε).

6.3.4 Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 6.9, απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης της επιφάνειας και της καρδιάς του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.



Εικόνα 6.9: Μικροσκοπική απεικόνιση της επιφάνειας (α,β,γ) και της καρδιάς (δ,ε,στ) του δοκιμίου που υπέστη τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή.

Στην εικόνα 6.9(α), διακρίνεται χαρακτηριστικά το βάθος ενανθράκωσης το οποίο μετρήθηκε περίπου στα 750μm, σημαντικά αυξημένο συγκριτικά με την περίπτωση των δύο ωρών αλλά στα ίδια επίπεδα με αυτό των τριών ωρών. Αξίζει, να σημειωθεί ότι λόγω του χρόνου ενανθράκωσης η περιοχή κορεσμού και η επιφανειακή ζώνη δεν είναι ευδιάκριτες. Η επιφάνεια (εικόνα 6.9γ) αποτελείται και από τα δύο είδη θραύσης ωστόσο είναι εντονότερη αυτή, της διακρυσταλλικής. Όσον αφορά την καρδιά του υλικού, εκεί παρουσιάζονται έντονα «κρατήρες» (εικόνα 6.9ε), οι οποίοι αποτελούν την κορυφή των θυλάκων που εμφανίστηκαν στην περίπτωση των τριών ωρών. Αυτό είναι και ένα δείγμα ανάπτυξης της διείσδυσης του άνθρακα με το πέρασ του χρόνου. Στην εικόνα 6.9(στ), φαίνεται η παραμόρφωση των κόκκων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερος όλκιμοι, διακρυσταλλικοί λόγω θραύσης και μικρού μεγέθους, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της διάρκειας της ενανθράκωσης.

(κενή σελίδα)

7 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ

Η μακροσκοπική ανάλυση των επιφανειών θραύσης πραγματοποιήθηκε με στερεοσκόπιο Digital Microscope Premier Dino-Lite, στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών (Ε.Π.Τ.ΥΛ.) του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (Πα.Δ.Α.).

Στην εικόνα 7.1, απεικονίζεται το στερεοσκόπιο Digital Microscope Premier Dino-Lite, που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της μακροσκοπικής ανάλυσης των επιφανειών θραύσης.

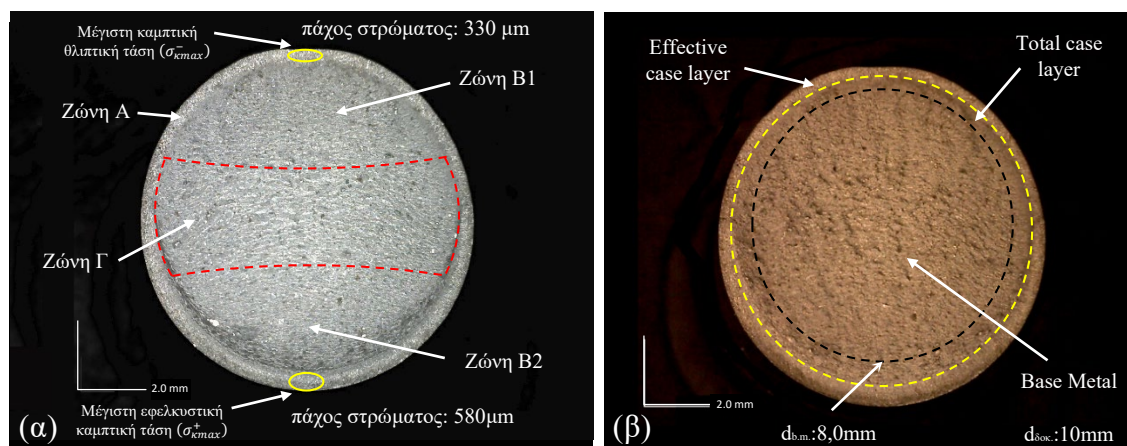


Εικόνα 7.1: Στερεοσκόπιο Digital Microscope Premier Dino-Lite

7.1 ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΒΑΦΗΣ

7.1.1 Μία ώρα ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.2 απεικονίζεται η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωσης και συνεχή βαφή, από την ανάλυση με στερεοσκόπιο.



Εικόνα 7.2: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

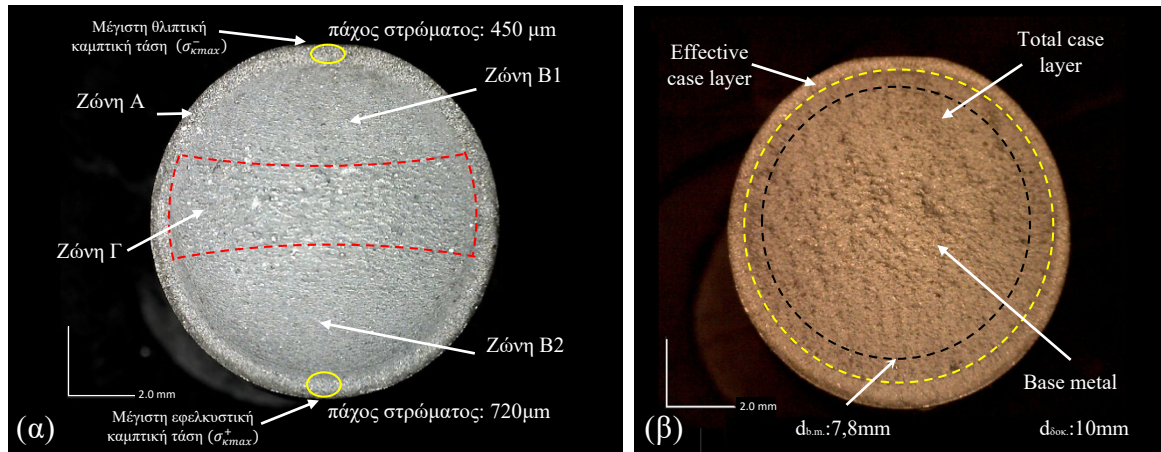
Στην εικόνα 7.2(α), διακρίνεται οπτικά ότι το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση στο χρωματισμό κυμαίνεται από τα 330 μm έως τα 580 μm . Δηλαδή, παρατηρείται διακύμανση $\pm 125\mu\text{m}$ ($455\pm 125\mu\text{m}$) αυτού του στρώματος και αυξημένο στην πλευρά που έχει υποστεί εφελκυσμό σε αντίθεση με την επιφάνεια που έχει υποστεί θλίψη λόγω κάμψης. Στην εικόνα 7.2(β), φαίνονται τα δύο βασικά στρώματα λόγω διάχυσης. Το πρώτο αφορά αυτό της επιφανειακής ζώνης (Effective case depth), ενώ το δεύτερο, το ολικό στρώμα διάχυσης (Total case depth), ο τρόπος θραύσης της επιφάνειας εκεί (περικρυσταλλική και διακρυσταλλική) μαρτυρά την παρουσία του άνθρακα. Το εσωτερικό της διατομής αφορά, αυτό του βασικού χάλυβα (Base metal) που έχει τις ιδιότητες αυτές, που θα είχε αν είχε υποστεί απλή βαφή και επαναφορά χωρίς ενανθράκωση.

Στην εικόνα 7.2(α), διακρίνονται οι 4 διαφορετικές ζώνες σύμφωνα με τον τρόπο θραύσης τους [52]. Αρχικά, στο εξωτερικό στρώμα του υλικού (ζώνη Α) η θραύση πραγματοποιείται δια αποχωρισμού (cleavage rupture) και χαρακτηρίζεται ως έντονα ψαθυρή-διακρυσταλλική. Λόγω του γεγονότος, ότι η θραύση εκεί είναι διακρυσταλλική, το φως προσπίπτει στο εσωτερικό των κόκκων και ανακλάται περισσότερο με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να φαίνεται πιο φωτεινή (εικόνα 7.2α) [53]. Εν συνεχεία, το εσωτερικό χωρίζεται σε 3 περιοχές. Αρχικά διακρίνονται οι δύο συμμετρικές ζώνες Β1 και Β2 (θλιπτικής και εφελκυστικής καταπόνησης αντίστοιχα) όπου η θραύση στην πλειοψηφία της είναι όλκιμη-περικρυσταλλική. Η τραχύτητα της θραύσης είναι μικρή εξαιτίας του αργού ρυθμού διάδωσης της, ενώ το φως έχει μικρή ανακλαστικότητα, εξαιτίας του γεγονότος ότι η θραύση πραγματοποιείται περικρυσταλλικά των κόκκων.

Τέλος, η ζώνη Γ που αναφέρεται στη περιοχή περίξ της ουδέτερης γραμμής, αποτελεί την περιοχή τελικής αποκόλλησης του υλικού. Χαρακτηρίζεται και από τα δύο είδη θραύσης (περικρυσταλλική και διακρυσταλλική). Πιο συγκεκριμένα, η ζώνη Γ χαρακτηρίζεται από θραύση κατά θύλακες, η οποία είναι εν γένει περικρυσταλλική και οφείλεται στη συνένωση μικροκενών (micronoid coalescence) στο εσωτερικό του υλικού, τα οποία πυρινώνονται σε θέσεις τοπικών ασυνεχειών. Τέτοιες θέσεις είναι τα όρια των κόκκων και οι δευτερογενείς φάσεις (καρβίδια). Εξαιτίας του γεγονότος ότι η περιοχή αυτή έχει αποκολληθεί τελευταία, έχει παραλάβει μεγαλύτερη τάση (όλο το ποσό της φόρτισης σε πολύ μικρότερη επιφάνεια), με αποτέλεσμα η θραύση εκεί να πραγματοποιείται με μεγάλο ρυθμό δημιουργώντας μεγάλη τραχύτητα. Αυτό έχει ως συνέπεια, η θραύση να πραγματοποιείται διακρυσταλλικά των κόκκων, εκεί οφείλεται το ότι η ζώνη Γ φαίνεται φωτεινότερη από τις ζώνες Β1 και Β2. Στην εικόνα 7.2(β) απεικονίζεται η περιοχή του βασικού χάλυβα, η οποία καταλαμβάνει το 64% της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου.

7.1.2 Δύο ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.3, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.

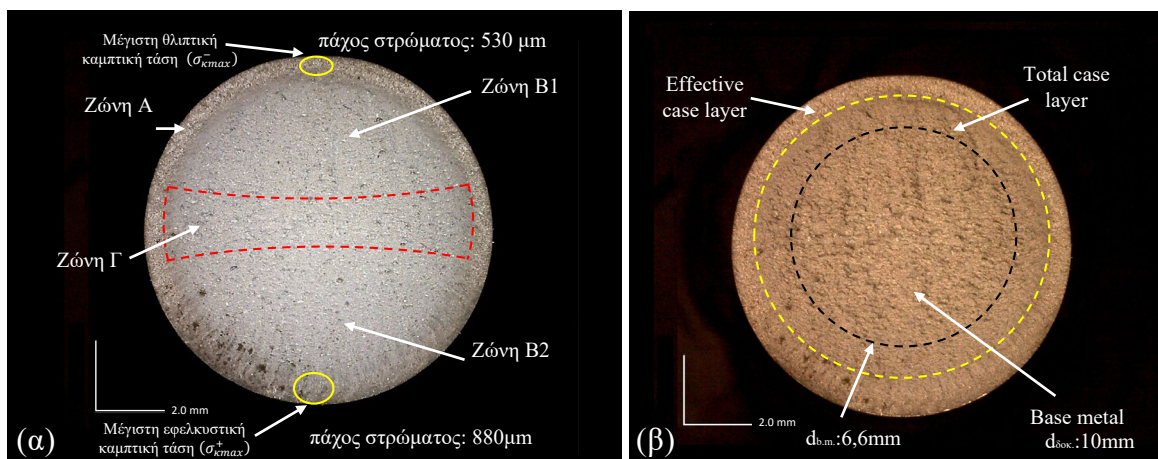


Εικόνα 7.3: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.3(α), διακρίνεται οπτικά το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού και το οποίο κυμαίνεται από τα 450μm έως τα 720μm. Δηλαδή, παρατηρείται διακύμανση $\pm 135\mu m$ ($585 \pm 135\mu m$) λόγω εφελκυσμού-θλίψης και ταυτόχρονα μέση αύξηση και των δύο κατά 30% συγκριτικά με τα αντίστοιχα της μίας ώρας. Στην εικόνα 7.3(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του «Effective case layer» που έχει έντονη ψαθυρή θραύση έχει αυξηθεί σημαντικά έναντι της μίας ώρας, όπως επιβεβαιώθηκε και από τα προφίλ σκληρότητας. Στην εικόνα 7.3(α), διακρίνονται οι 4 περιοχές θραύσης. Η ζώνη Γ είναι ελαφρώς μειωμένη, συγκριτικά με τις συμμετρικές B1-B2, αυτό οφείλεται στην αύξηση της διάρκειας της ενανθράκωσης η οποία κάνει το εσωτερικό του δοκιμίου ψαθυρότερο. Επίσης, από την εικόνα 7.3(β), φαίνεται ότι η περιοχή του βασικού μετάλλου καταλαμβάνει το 61% (μείωση κατά 3%, έναντι της μίας ώρας) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου. Ο λόγος που αυξήθηκε, αφορά την αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης, η οποία επιφέρει αύξηση της διάχυσης του άνθρακα.

7.1.3 Τρεις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.4, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωσης και συνεχή βαφή.

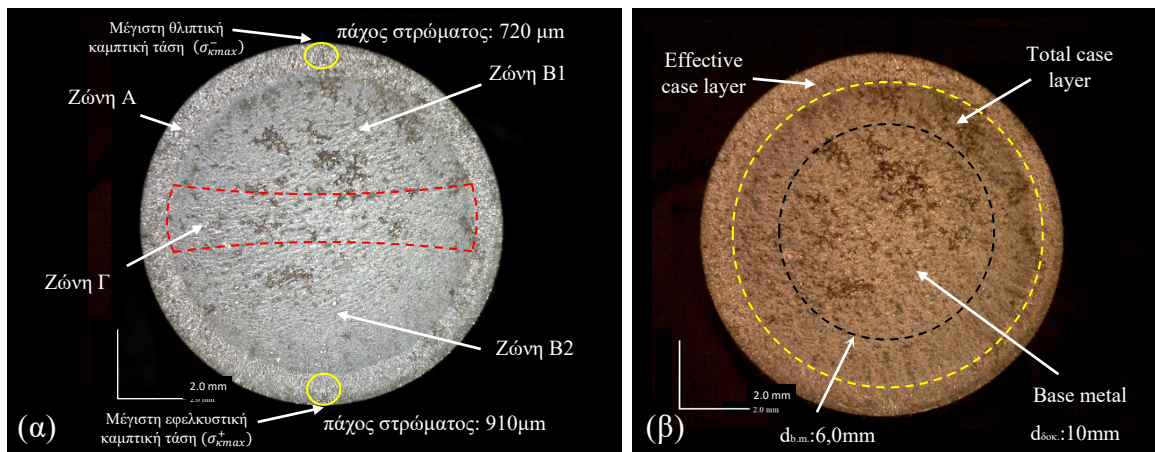


Εικόνα 7.4: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.4(α), διακρίνεται οπτικά το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού το οποίο κυμαίνεται από τα 530 μm έως τα 880 μm . Δηλαδή, παρατηρείται σημαντική διακύμανση $\pm 175\mu\text{m}$ ($705\pm 175\mu\text{m}$) μεταξύ των στρωμάτων, στις θέσεις μέγιστης καμπτικής τάσης εφελκυσμού και θλίψης. Επίσης, παρατηρείται μέση μείωση και των δύο κατά 21% συγκριτικά με τα αντίστοιχα των δύο ωρών. Στην εικόνα 7.4(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του στρώματος ενανθράκωσης (Effective case layer) που έχει έντονη ψαθυρή θραύση έχει αυξηθεί σημαντικά (45%) έναντι των δύο ωρών. Επίσης, από την εικόνα 7.4(β), φαίνεται ότι η περιοχή του βασικού μετάλλου καταλαμβάνει το 44% (μείωση κατά 17%, έναντι των δύο ωρών) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου.

7.1.4 Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.5, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωσης και συνεχή βαφή.



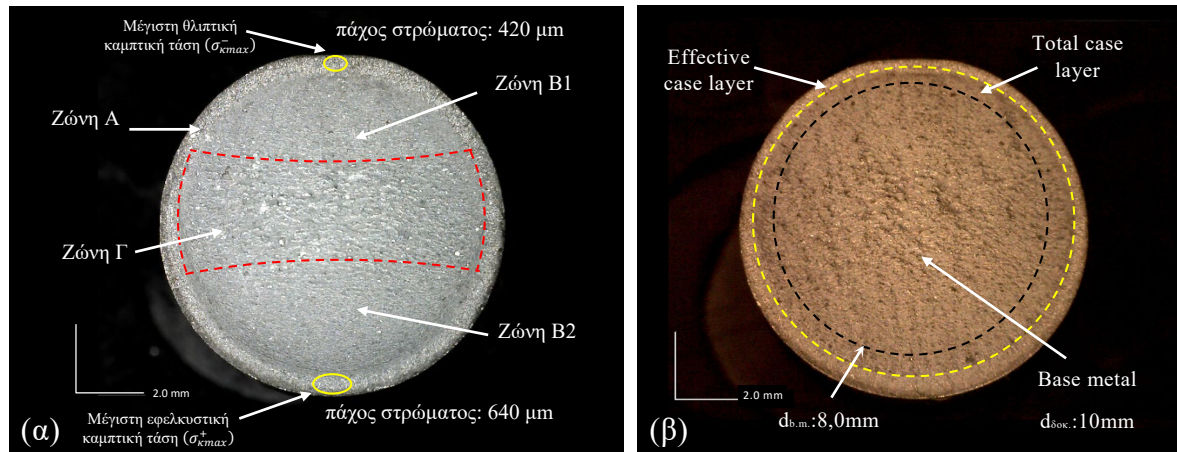
Εικόνα 7.5: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή: (α) με έντονο, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.5(α), διακρίνεται οπτικά το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού κυμαίνεται από τα 720 μm έως τα 910 μm . Δηλαδή, παρατηρείται διακύμανση $\pm 95\mu\text{m}$ ($815\pm 95\mu\text{m}$) λόγω εφελκυσμού έναντι θλίψης και ταυτόχρονα μέση αύξηση και των δύο κατά 16% συγκριτικά με τα αντίστοιχα των τριών ωρών. Στην εικόνα 7.5(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Γενικότερα, με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης, το ποσοστό περικρυσταλλικής θραύσης της ζώνης Γ του δοκιμίου αυξάνεται έναντι του αντίστοιχου της διακρυσταλλικής, με αποτέλεσμα οι ζώνες B1-B2 και Γ να διακρίνονται δυσκολότερα. Επίσης, η περιοχή του βασικού μετάλλου καταλαμβάνει το 36% (μείωση κατά 8%, έναντι των τριών ωρών) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου.

7.2 ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΛΙΜΑΚΩΤΗΣ ΒΑΦΗΣ

7.2.1 Μια ώρα ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.6, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωσης και κλιμακωτή βαφή.

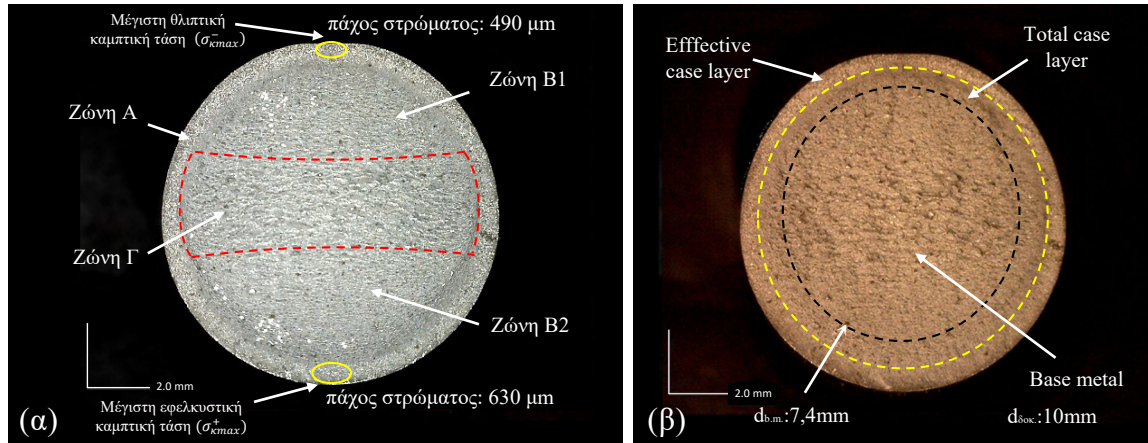


Εικόνα 7.6: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.6(α), διακρίνεται οπτικά ότι το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού κυμαίνεται από τα 420μm έως τα 640μm. Δηλαδή, παρατηρείται σημαντική διακύμανση $\pm 110\mu\text{m}$ ($530\pm 110\mu\text{m}$) μεταξύ των στρωμάτων, στις θέσεις μέγιστης καμπτικής τάσης εφελκυσμού και θλίψης. Επίσης, παρατηρείται μέση αύξηση και των δύο 15% συγκριτικά με τα αντίστοιχα της μίας ώρας ενανθράκωσης συνεχούς βαφής. Στην εικόνα 7.5(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Όπως και στην περίπτωση της ενανθράκωσης μίας ώρας με συνεχή βαφή, οι 4 περιοχές θραύσης διακρίνονται με ευκολία. Αναλυτικότερα, η ζώνη Α αποτελεί το επιφανειακό στρώμα ενανθράκωσης (Effective case layer), αυτό δηλαδή όπου παρατηρείται σκληρότητα 550HV. Η θραύση εκεί είναι έντονα ψαθυρή και διακρυσταλλική. Η ανακλαστικότητα του φωτός είναι αυξημένη, καθώς το φως προσπίπτει στο εσωτερικό των κόκκων. Οι συμμετρικές ζώνες B1-B2 αποτελούνται στην πλειοψηφία τους από περικρυσταλλική-όλκιμη θραύση. Ενώ, το εσωτερικό του δοκιμίου στην ζώνη Γ, αποτελείται ένα ποσοστό από περικρυσταλλική θραύση και το υπόλοιπο από διακρυσταλλική. Η συνένωση μικροκενών οδηγεί σε περικρυσταλλική θραύση, όπου εννοείται ο μηχανισμός της θραύσης δια θυλάκων. Η περιοχή αυτή ανακλάται περισσότερο από τις B1-B2 επειδή έχει αποκολληθεί τελευταία και με μεγαλύτερο ρυθμό, αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θραύση εκεί να πραγματοποιείται διακρυσταλλικά των κόκκων. Τέλος, η περιοχή του βασικού μετάλλου καταλαμβάνει το 64% (στα ίδια επίπεδα με το αντίστοιχο της συνεχούς βαφής) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου (εικόνα 7.6β).

7.2.2 Δύο ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.7, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωσης και κλιμακωτή βαφή.

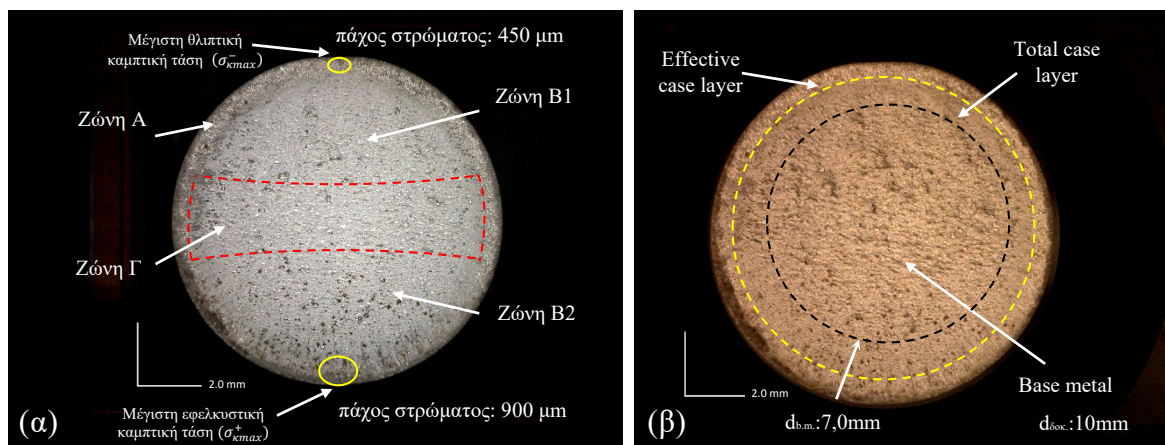


Εικόνα 7.7: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί δύο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.7(α), διακρίνεται οπτικά το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού το οποίο κυμαίνεται από τα 490μm έως τα 630μm. Δηλαδή, παρατηρείται μικρή διακύμανση $\pm 70\mu m$ ($560\pm 70\mu m$) λόγω εφελκυσμού-θλίψης. Στην εικόνα 7.7(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του εξωτερικού στρώματος που έχει έντονα ψαθυρή θραύση παρουσιάζει μικρή αύξηση 5% έναντι του αντίστοιχου της μίας ώρας. Η αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης μειώνει την περιοχή της ζώνης Γ και δυσκολεύει τη διακριτοποίηση των ζωνών Β1-Β2 και Γ. Επίσης, από την εικόνα 7.7(β), φαίνεται ότι η περιοχή του βασικού μετάλλου, καταλαμβάνει περίπου το 55% (μείωση κατά 9%, έναντι της μίας ώρας) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου.

7.2.3 Τρεις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.8, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωσης και κλιμακωτή βαφή.

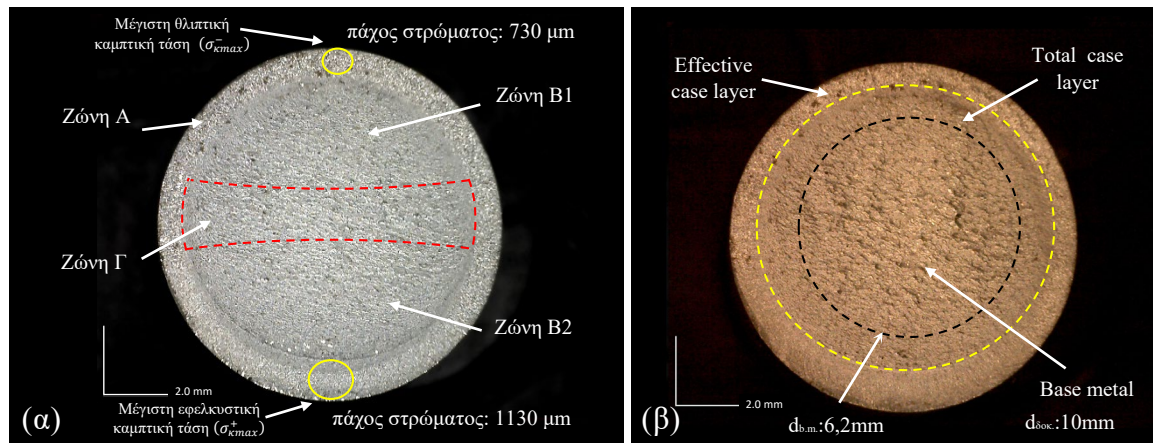


Εικόνα 7.8: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.8(α), διακρίνεται οπτικά ότι το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού το οποίο κυμαίνεται από τα 450 μm έως τα 900 μm . Σε αυτήν την περίπτωση, δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί ακριβώς το στρώμα λόγω θλίψης εξαιτίας του χρωματισμού. Στην εικόνα 7.8(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Πιο συγκεκριμένα, η επιφάνεια του εξωτερικού στρώματος (Effective case layer) που έχει έντονα ψαθυρή θραύση παρουσιάζει μέση αύξηση 20% έναντι του αντίστοιχου των δύο ωρών. Επίσης, από την εικόνα 7.8(β), φαίνεται ότι η περιοχή του βασικού μετάλλου, καταλαμβάνει περίπου το 49% (μείωση κατά 6%, έναντι των δύο ωρών) της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου.

7.2.4 Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης

Στην εικόνα 7.9, απεικονίζεται με στερεοσκόπιο η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωσης και κλιμακωτή βαφή.



Εικόνα 7.9: Στερεοσκοπική ανάλυση επιφάνειας θραύσης δοκιμίου που έχει υποστεί τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή: (α) με έντονο φωτισμό, (β) με χαμηλό φωτισμό.

Στην εικόνα 7.9(α), διακρίνεται οπτικά ότι το πάχος του στρώματος που έχει εμφανή διαφοροποίηση χρωματισμού κυμαίνεται από τα 730 μm έως τα 1130 μm . Η διακύμανση λόγω καταπόνησης εδώ είναι αρκετά μεγάλη και πιο συγκεκριμένα $\pm 200\mu\text{m}$ ($930\pm 200\mu\text{m}$). Στην εικόνα 7.9(β), απεικονίζονται τα δύο στρώματα λόγω διάχυσης. Επίσης, η επιφάνεια του εξωτερικού στρώματος που έχει έντονα ψαθυρή θραύση παρουσιάζει μέση αύξηση 35% έναντι του αντίστοιχου των τριών ωρών. Γενικότερα, με την αύξηση της διάρκειας της ενανθράκωσης, το ποσοστό περικρυσταλλικής θραύσης της ζώνης Γ του δοκιμίου αυξάνεται έναντι του αντίστοιχου της διακρυσταλλικής, με αποτέλεσμα οι ζώνες B1-B2 και Γ να διακρίνονται δυσκολότερα. Επίσης, η περιοχή του βασικού μετάλλου καταλαμβάνει το 38% της συνολικής επιφάνειας του δοκιμίου εμφανίζοντας μείωση 11% έναντι του αντίστοιχου των τριών ωρών.

(κενή σελίδα)

8 ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ

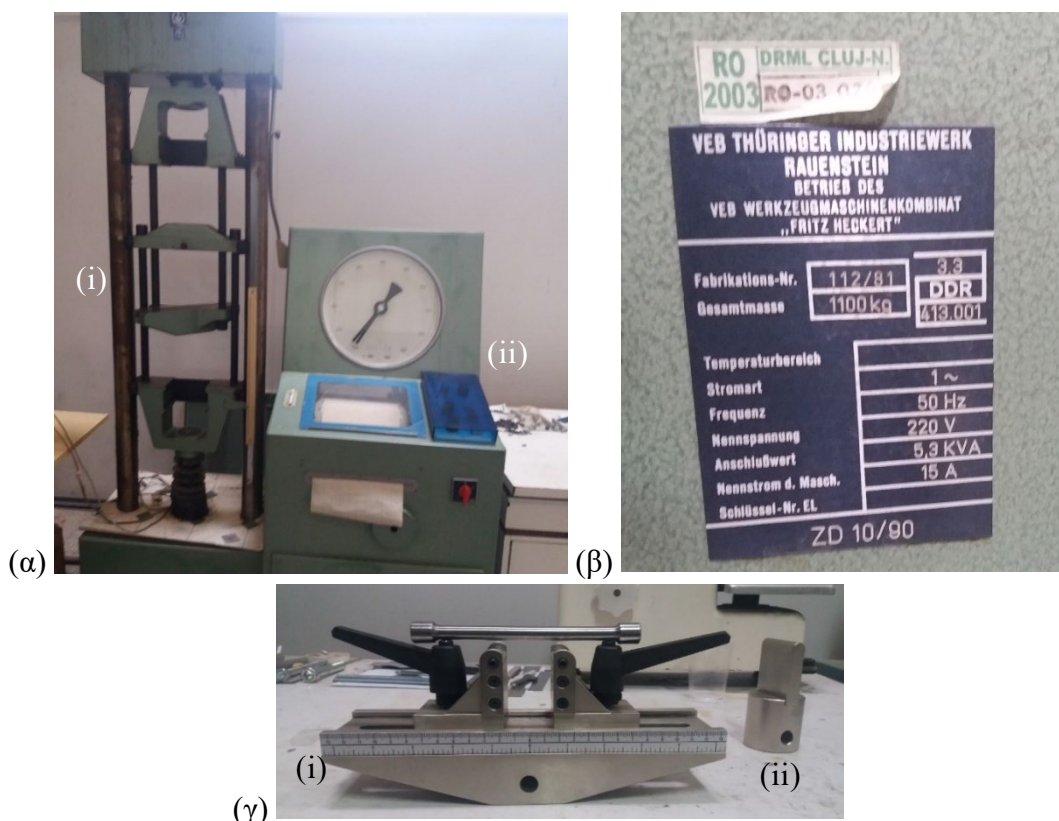
8.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Η δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Μηχανικών Δοκιμών του τμήματος Επιστήμης και Μηχανικής Υλικών του πολυτεχνείου U.T.C.N. (Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca) της Ρουμανίας υπό την εποπτεία του κ. Buna Alexandru.

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε υδραυλική πρέσσα 30tn, της κατασκευάστριας εταιρίας “Fritz Heckert” με τύπο μοντέλου ZD 10/90 και Serial No. 112/81.

Όλα τα δοκίμια ακολούθησαν τα στάδια ελέγχου καταλληλότητας σύμφωνα με το αντίστοιχο πρότυπο δοκιμής κάμψης για μεταλλικά δοκίμια STAS 1660-80.

Στην εικόνα 8.1(α), απεικονίζεται η μηχανή δοκιμής κάμψης που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο μηχανικών δοκιμών του Πολυτεχνείου της Κλουζ-Ναπόκα με τα παρελκόμενα της εικόνας 8.1(β). Μέσω της βάσης (i) προσαρμόζεται σταθερή η απόσταση L μεταξύ των δύο πείρων στήριξης.



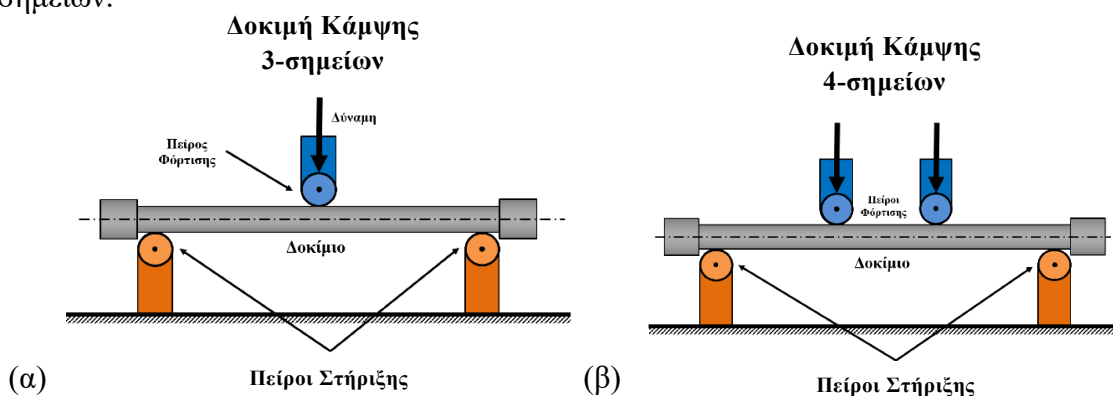
Εικόνα 8.1: (α) Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης, (i) Πρέσα δοκιμής κάμψης, (ii) Σύστημα Μέτρησης, (β) Τεχνικά χαρακτηριστικά της υδραυλικής πρέσας, (γ) Παρελκόμενα μηχανής δοκιμής κάμψης. (i) Βάση με πείρους στήριξης και (ii) πείρος φόρτισης.

8.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΚΑΜΨΗΣ

Γενικά, στις δοκιμές κάμψης (Bending Tests), στο υπό μελέτη δοκίμιο εμφανίζονται διατμητικές τάσεις λόγω κυρτότητας του κατά την παραμόρφωση, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων (καμπτικής τάσης θραύσης). Για να ελαχιστοποιηθεί η συνεισφορά των διατμητικών τάσεων και να επιτευχθούν οι παραδοχές της καθαρής κάμψης, είναι κυριαρχούσας σημασίας η εξασφάλιση της καθετότητας και της θέσης (στο μέσο του ενεργού μήκους του δοκιμίου) της φόρτισης.

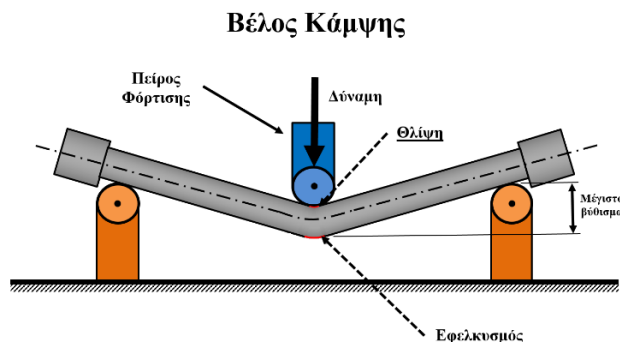
Σε δοκιμή 3 σημείων, όπως αυτή που επιλέχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής, οι διατμητικές τάσεις εμφανίζονται σε κάθε σημείο της κυρτωμένης επιφάνειας εκτός από το κατακόρυφο επίπεδο στο σημείο της φόρτισης. Αντίθετα, στην δοκιμή 4 σημείων (εικόνα 8.2β), οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές στην περιοχή εντός των σημείων φόρτισης (περιοχή καθαρής κάμψης) και μη μηδενικές στη περιοχή εκτός αυτών. Η κατεύθυνση των διατμητικών τάσεων είναι σχεδόν παράλληλη στην κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης φόρτισης, σε όλη την έκταση του εξεταζόμενου δοκιμίου. Εν κατακλείδι, αυτή είναι και η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των δύο τύπων κάμψης από πλευράς τάσεων.

Στην εικόνα 8.2, απεικονίζονται σχηματικά οι πειραματικές διατάξεις της κάμψης 3 και 4 σημείων.



Εικόνα 8.2: Διάταξη δοκιμής κάμψης (α) 3 σημείων, (β) 4 σημείων.

Στην εικόνα 8.3, απεικονίζεται σχηματικά το καμπτόμενο δοκίμιο οριακά πριν την θραύση. Εκεί, σε αυτό εμφανίζονται ταυτόχρονα τα φαινόμενα εφελκυσμού και θλίψη τα οποία και είναι υπεύθυνα για την τελική αστοχία του δοκιμίου.

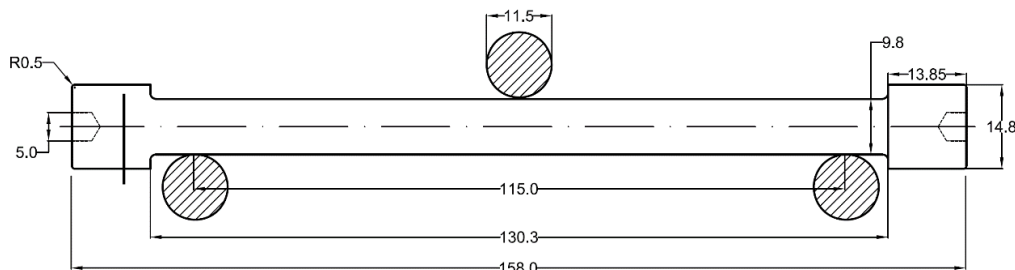


Εικόνα 8.3: Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου υπό κάμψη, οριακά πριν την έναρξη της θραύσης.

8.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η δοκιμή της κάμψης έγινε σύμφωνα με το πρότυπο STAS 1660-80. Κατά το οποίο καθορίζονται τα επιτρεπτά όρια των χαρακτηριστικών των αποτελούμενων μελών του πειράματος δηλαδή των δοκιμίων και των παρελκομένων του.

Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 8.4, απεικονίζονται αναλυτικά τα διαστατικά χαρακτηριστικά κάθε δοκιμίου τα οποία είναι εντός των επιτρεπτών ορίων του προαναφερθέν προτύπου.



Εικόνα 8.4: Διαστατικά χαρακτηριστικά δοκιμίων βάσει προτύπου

Για την διαδικασία του πειράματος, προετοιμάστηκαν στο σύνολο 33 δοκίμια των παραπάνω χαρακτηριστικών. Εν συνεχεία, για τις ανάγκες της δοκιμής κάμψης, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην υδραυλική πρέσα της εικόνας 8.1(α) και σε συνδυασμό με την ιδιοκατασκευή των πείρων στήριξης (έδρανα) και του πείρου φόρτισης της εικόνας 8.1(β), πραγματοποιήθηκε η δοκιμή.

Τα κυκλικής διατομής δοκίμια στηρίχθηκαν επάνω στα έδρανα και με την ενεργοποίηση του εμβόλου της πρέσας ασκήθηκε δύναμη κατακόρυφα και κάθετα στο επίπεδο διατομής του δοκιμίου, στο κέντρο του ενεργού μήκους (λόγω ελαχιστοποίησης διάτμησης, βλέπε παρ. 8.2) μέχρις ότου να επέλθει η αστοχία των δοκιμίων.

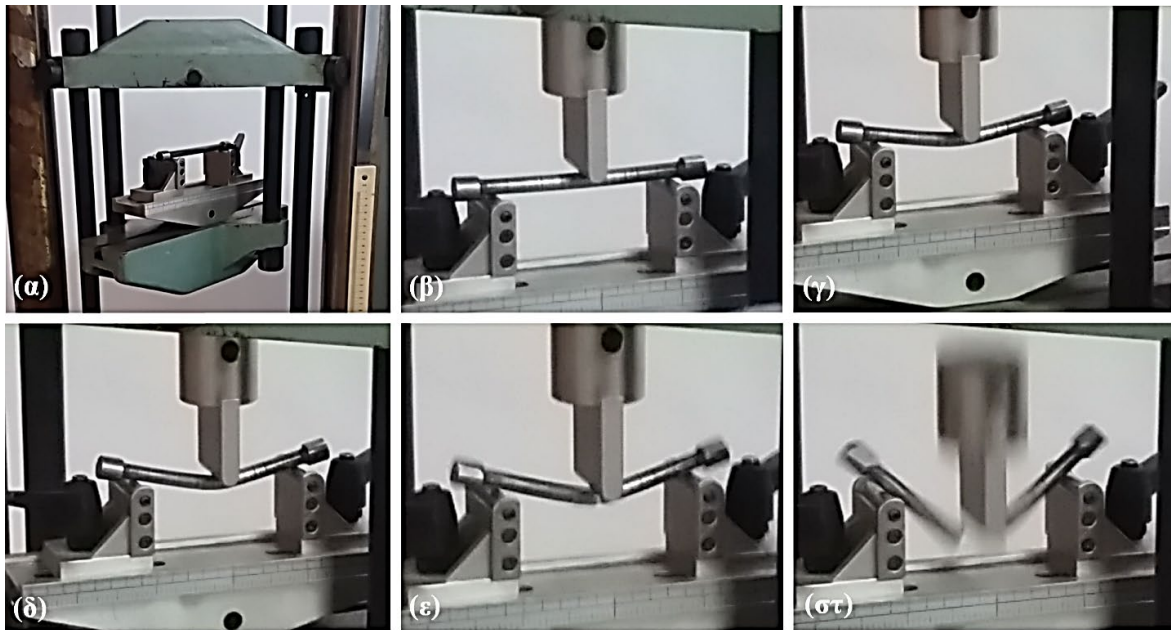
Εν συνεχεία, μέσω του συστήματος μέτρησης (εικόνα 8.1(α-ii)) καταγράφεται η δύναμη σε kN που οδήγησε σε ολική θραύση για το κάθε δοκίμιο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλο το πλήθος των δοκιμίων.

Στην εικόνα 8.4, φαίνεται χαρακτηριστικά σε ποιο σημείο σταμάτησε ο δείκτης μέτρησης την χρονική στιγμή της θραύσης του δοκιμίου 45 ($F_{\text{fracture}}=8.1\text{kN}$).



Εικόνα 8.5: Μέτρηση μέγιστης φόρτισης την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου 45

Στην εικόνα 8.5, απεικονίζονται σε στιγμιότυπα τα στάδια θραύσης του δοκιμίου, από το σημείο επαφή του πείρου φόρτισης με αυτό μέχρι και την τελική θραύση του.



Εικόνα 8.6: Στιγμιότυπα από την θραύση ενός τυχαίου δοκιμίου, (α) τοποθέτηση του δοκιμίου στα έδρανα στήριξης, (β) επαφή του πείρου φόρτισης με το δοκίμιο, (γ) εμφανής παραμόρφωση (βέλος κάμψης) του δοκιμίου μετά την κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου, (δ) μέγιστη βύθιση (μέγιστο βέλος κάμψης) λίγο πριν την θραύση, (ε) εμφανής ρωγμή από την πλευρά της θετικής ίνας εξαιτίας εφελκυσμού, (στ) ολική θραύση δοκιμίου.

8.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σκοπός αυτής της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός της μέγιστης καμπτικής τάσης που οδηγεί σε θραύση του δοκιμίου και σύγκριση αυτής για κάθε περίπτωση θερμικής κατεργασίας.

Με το σύστημα μέτρησης (εικόνα 8.1(α-ii)) καταγράφεται η μέγιστη φόρτιση σε kN, που αντέχει κάθε υλικό μέχρι να αστοχήσει. Με την χρήση των τύπων 8.1-8.3, και με δεδομένα τα διαστατικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων (εικόνα 8.4) υπολογίζεται η μέγιστη καμπτική τάση κάθε δοκιμίου.

$$\text{Ροπή αδρανείας (κυλίνδρου): } I_{yy} = \frac{\pi d^4}{64} \quad (8.1)$$

όπου $d = 8.8\text{mm}$ (σταθερό για όλα τα δοκίμια)

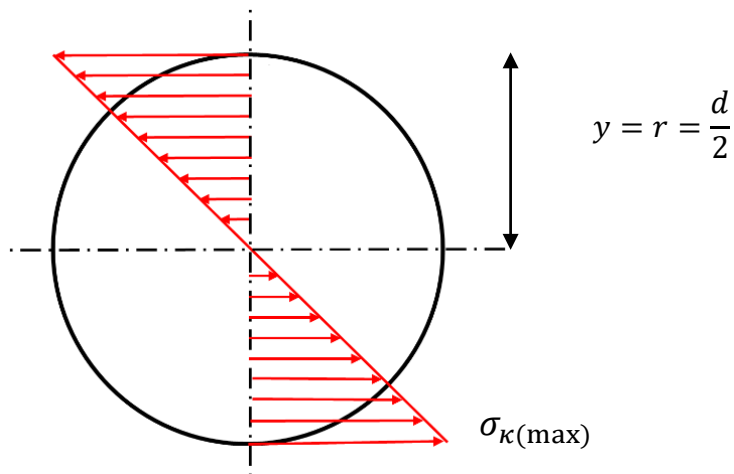
$$\text{Μέγιστη καμπτική ροπή: } M_{max} = F_{Fracture} \cdot \frac{l}{2} \quad (8.2)$$

όπου $F_{Fracture}$ η μέγιστη δύναμη σε kN κατά την θραύση και l το ενεργό μήκος σε m (115mm)

$$\text{Μέγιστη καμπτική τάση θραύσης: } \sigma_{κ(Fracture)} = \frac{M_{max}}{I_{yy}} \cdot y \quad (8.3)$$

, όπου $y = \frac{d}{2}$ (διατομή)

Στην εικόνα 8.7, παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών τάσεων για κάθε υλικό.



Εικόνα 8.7: Κατανομή των καμπτικών τάσεων για ένα κυκλικής διατομής δοκίμιο.

Στους πίνακες 8.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής για την ενανθράκωση και την συνεχή βαφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι πριν από κάθε δοκιμή μετρήθηκε το σφάλμα μηδενισμού της διάταξης σε kN και προστέθηκε αναλόγως στην τελική ένδειξη.

Πίνακας 8.1(α): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης μίας ώρας με συνεχή βαφή.

Μία ώρα ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι			
No Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
39	8,9	255,9	2769
43	9,7	278,9	3018
44	9,8	281,8	3049
35	9,5	273,1	2956
M.O.	9,48	272,4	2950

Πίνακας 8.1(β): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης δύο ωρών με συνεχή βαφή.

Δύο ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι			
No Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
22	8,9	255,9	2769
31	9	258,8	2800
29	8,7	250,1	2707
18	8,6	247,2	2676
26	9	258,8	2800
M.O.	8,84	254,1	2751

Πίνακας 8.1(γ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τριών ωρών με συνεχή βαφή

Τρεις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
36	8,9	255,9	2769
40	9	258,8	2800
58	8,5	2444	2645
54	8,7	250,1	2707
M.O.	8,78	252,3	2730

Πίνακας 8.1(δ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τεσσάρων ωρών με συνεχή βαφή.

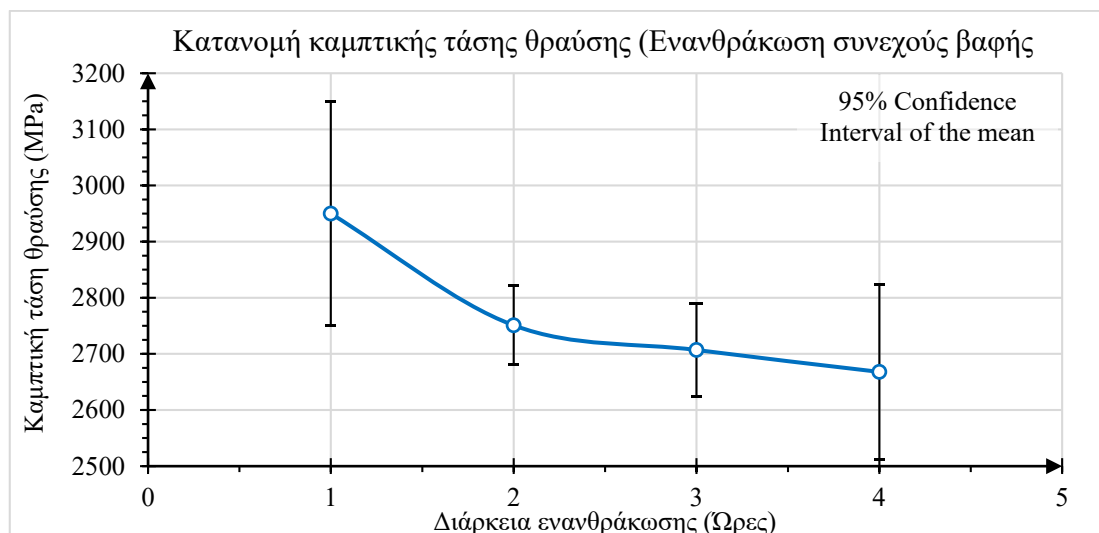
Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
36	8,8	253,0	2738
40	8,9	255,9	2769
58	8,0	230,0	2489
54	8,6	247,3	2676
M.O.	8,58	246,5	2668

Στον πίνακα 8.2, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής της κάμψης για την περίπτωση της ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.

Πίνακας 8.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης συνεχούς βαφής.

Καμπτική τάση θραύσης (MPa)	Διάρκεια ενανθράκωσης συνεχούς βαφής			
	1h	2h	3h	4h
Μέσος όρος	2950	2751	2707	2668
Τυπική απόκλιση	125,4	56,5	67,2	125,4
Αβεβαιότητα	199,6	70,2	83,5	155,7
Διάστημα εμπιστοσύνης C.I.(95%)	$2950 \pm 199,6$	$2751 \pm 70,2$	$2707 \pm 83,5$	$2668 \pm 155,7$

Στην εικόνα 8.6, απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης θραύσης συναρτήσει της διάρκειας ενανθράκωσης για την ενανθράκωσης και συνεχούς βαφής.



Εικόνα 8.8: Κατανομή καμπτικής τάσης θραύσης (MPa), ενανθράκωσης συνεχούς βαφής. Το διάγραμμα της εικόνας 8.6, έχει σκοπό την σύγκριση της αντοχής σε κάμψης για τα δοκίμια που υπέστησαν ενανθράκωση και συνεχή απόψυξη σε λάδι, για κάθε διάρκεια ενανθράκωσης.

Πιο συγκεκριμένα, για την μία ώρα ενανθράκωσης, η καμπτική τάση που οδήγησε σε θραύση υπολογίστηκε στα $2950 \pm 199,6$ MPa, ενώ η μέση δύναμη θραύσης είναι 9,48 kN. Το υλικό εμφανίζει τόσο υψηλή τιμή εξαιτίας της μικρής διάρκειας της ενανθράκωσης η οποία συνεπάγεται και διείδυση του άνθρακα σε μικρό βάθος κάνοντας έτσι το υλικό να συμπεριφέρεται ως «όλκιμο» συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις.

Για την περίπτωση των δύο ωρών ενανθράκωσης, παρατηρείται μεγάλη πτώση της καμπτικής τάσης που οδήγησε σε θραύση. Αναλυτικότερα, αυτή υπολογίστηκε στα $2751 \pm 70,2$ MPa ενώ η αντίστοιχη δύναμη στα 8,84 kN (μείωση 7%). Αυτό οφείλεται στο διπλασιασμό του χρόνου της ενανθράκωσης, ο οποίος αυξάνει το ενεργό βάθος ενανθράκωσης. Όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 6 και 7 (θραυστογραφία S.E.M. και στερεοσκοπική ανάλυση), δημιουργώντας, συγκριτικά με την περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης, «ψαθυρότερο» χάλυβα στην ολότητα του. Αυτό μεταφράζεται ως μικρότερη αντοχή σε κάμψη όπως απεικονίζεται και από το διάγραμμα.

Εν συνεχεία, για τις περιπτώσεις τριών και τεσσάρων ωρών, η συμπεριφορά του υλικού παραμένει σταθερή, καθώς η μέγιστη καμπτική τάση είναι στα επίπεδα με αυτή των δύο ωρών. Πιο συγκεκριμένα, η περίπτωση των τριών ωρών παρουσιάζει μικρή μείωση κατά 1% έναντι των δύο ωρών, 2707 έναντι 2751. Ενώ αυτή των τεσσάρων ωρών, εμφανίζει μικρή μείωση κατά 39 MPa (μείωση 1,5%) έναντι των τριών ωρών.

Στους πίνακες 8.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής για την ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής. Ομοίως όπως και προηγουμένως, έγινε διόρθωσης λόγω σφάλματος μηδενισμού.

Πίνακας 8.3(α): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης μίας ώρας με κλιμακωτή βαφή.

Μία ώρα ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
5	10,1	290,4	3143
15	8,9	255,9	2769
33	9,2	264,5	2863
32	9,6	276	2987
M.O.	9,45	271,7	2940

Πίνακας 8.3(β): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης δύο ωρών με κλιμακωτή βαφή.

Δύο ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
45	8,8	253	2738
7	9,2	264,5	2863
17	8,8	253	2738
57	9	258,8	2800
48	8,6	247,3	2676
M.O.	8,88	255,3	2763

Πίνακας 8.3(γ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τριών ωρών με κλιμακωτή βαφή.

Τρεις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
10	8,9	255,9	2769
37	8,5	244,4	2645
4	8,7	250,1	2707
53	8,5	244,4	2644
M.O.	8,65	248,7	2692

Πίνακας 8.3(δ): Αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης τεσσάρων ωρών με κλιμακωτή βαφή.

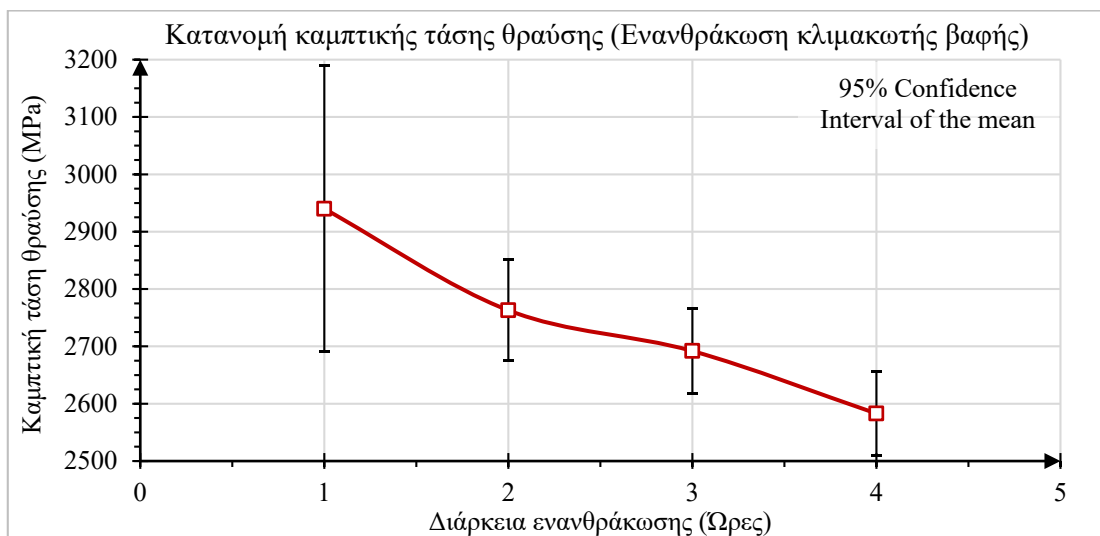
Τέσσερις ώρες ενανθράκωση και κλιμακωτή βαφή σε τήγμα άλατος			
Νο Δοκιμίου	Δύναμη θραύσης $P_{Fracture}$ (kN)	Μέγιστη καμπτική ροπή M_{max} (Nm)	Καμπτική τάση θραύσης $\sigma_{Fracture}$ (MPa)
49	8,3	238,6	2583
56	8,1	232,9	2520
21	8,5	244,4	2645
M.O.	8,3	238,6	2583

Στον πίνακα 8.4, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής της κάμψης για την περίπτωση της ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής σε τήγμα άλατος.

Πίνακας 8.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κάμψης ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.

Τάση Θραύσης (MPa)	Διάρκεια ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής			
	1h	2h	3h	4h
Μέσος όρος	2940	2763	2692	2583
Τυπική απόκλιση	161,7	71,0	59,7	62,2
Αβεβαιότητα	257,2	88,1	74,1	77,2
Διάστημα εμπιστοσύνης C.I.(95%)	2940 ± 257,2	2763 ± 88,1	2692 ± 74,1	2583 ± 77,2

Στην εικόνα 8.7, απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης θραύσης συναρτήσει της διάρκειας ενανθράκωσης για την ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής.

**Εικόνα 8.9:** Κατανομή καμπτικής τάσης θραύσης (MPa), ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής

Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 8.7, συμπεραίνουμε ότι, για την περίπτωση της ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής τα μεγέθη «Μέγιστη Καμπτική Τάση» και «Διάρκεια Ενανθράκωσης» είναι αντιστρόφως ανάλογα επαληθεύοντας πλήρως την βιβλιογραφία.

Αναλυτικότερα, για την περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης, έπειτα από την κάμψη των 4 δοκιμίων του πίνακα 8.2(α), υπολογίστηκε ότι η καμπτική τάση που οδηγεί σε θραύση το υλικό, κυμαίνεται στα $2940 \pm 257,2$ MPa, με την αντίστοιχη φόρτιση κατά τη θραύση στα 9.45kN.

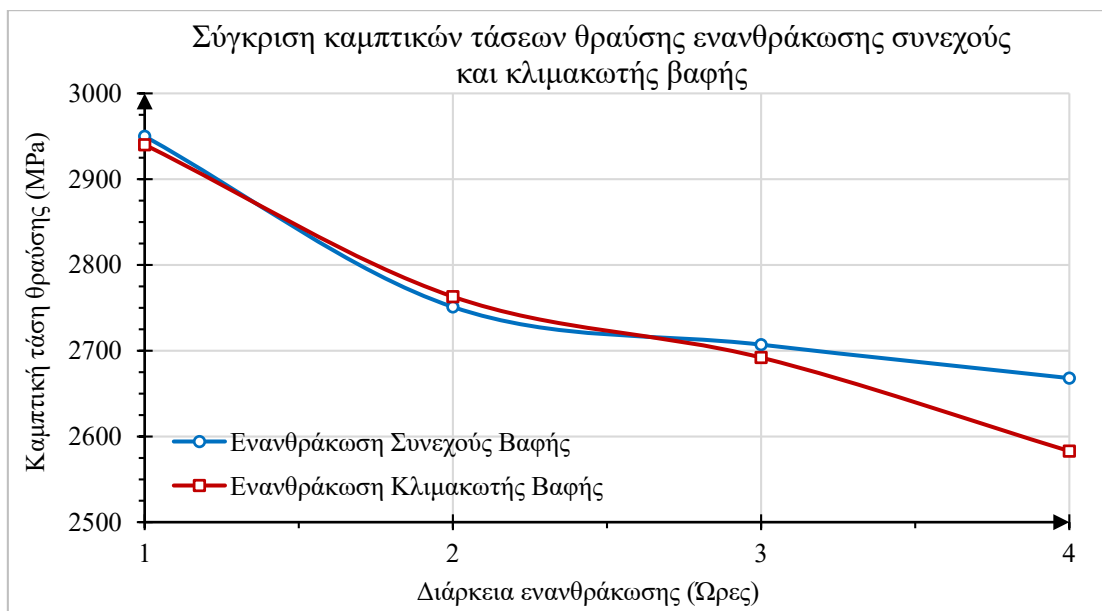
Όσον αφορά, την περίπτωση των δύο ωρών, για αυτή παρατηρείται σημαντική μείωση της καμπτικής τάσης κατά 6% ($2763 \pm 88,1$ MPa έναντι 2940 MPa). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό οφείλεται στο γεγονός της αύξησης του ισοδύναμου άνθρακα του χάλυβα εξαιτίας της αύξησης κατά μίας ώρας της διάρκειας ενανθράκωσης. Σύμφωνα με αυτό, το υλικό στην ολότητα του συμπεριφέρεται ως «ψαθυρότερο». γεγονός που μεταφράζεται ως μείωση της αντοχής σε κάμψη στο αντίστοιχο διάγραμμα.

Εν συνεχεία, η ίδια πτωτική τάση παραμένει και για την ομάδα δοκιμίων που υπέστησαν τρεις ώρες ενανθράκωση. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της αντοχής σε κάμψη

κατά 71.5MPa, δηλαδή 3% ($2692 \pm 74,1$ MPa έναντι 2763 MPa της περίπτωσης των δύο ωρών).

Επιπλέον, για τα δοκίμια των τεσσάρων ωρών, η μείωση συνεχίζεται με τον ίδιο ή και μεγαλύτερο ρυθμό. Πιο αναλυτικά, υπολογίστηκε σημαντική μείωση της τάξης των 115 MPa έναντι της περίπτωσης των τριών ωρών ($2583 \pm 77,2$ MPa έναντι 2698 MPa)

Εν κατακλείδι, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, η αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης με κλιμακωτή βαφή, οδηγεί σε αύξηση της ψαθυρότητας του χάλυβα. Γεγονός το οποίο συμπεραίνεται από την μείωση της αντοχής σε κάμψη και οφείλεται στην αύξηση της διείσδυσης του άνθρακα σε μεγαλύτερο βάθος από την επιφάνεια.



Εικόνα 8.10: Συγκριτικό διάγραμμα κατανομών καμπτικών τάσεων θραύσης ενανθράκωσης συνεχούς και κλιμακωτής βαφής

Σκοπός του παραπάνω διαγράμματος (εικόνα 8.8) είναι η σύγκριση των δύο τύπων απόψυξης, συνεχή και κλιμακωτή βαφή, ως προς την αντοχή του χάλυβα 15CrNi6 κατά την κάμψη. Παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές για τις περιπτώσεις μίας, δύο και τριών ωρών, ενώ για την περίπτωση των τεσσάρων ωρών, η διαφορά είναι αρκετά σημαντική. Πιο συγκεκριμένα, για την ενανθράκωση τεσσάρων ωρών, τα δοκίμια που υπέστησαν συνεχή βαφή σε λάδι παρουσιάζουν μείωση της καμπτικής τάσης κατά της θραύση τους κατά 125 MPa ($\approx 5\%$).

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

A. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ενεργό Βάθος Ενανθράκωσης

Στις επιφανειακές θερμοχημικές κατεργασίες εμποτισμού όπως είναι η ενανθράκωση, ένα ποσοτικό μέγεθος ποιότητας, αποτελεί το βάθος εκείνο όπου η σκληρότητα ισούται με 550HV, αυτό όπως έχει αναφερθεί, ονομάζεται ενεργό βάθος ενανθράκωσης [56].

- Για την ενανθράκωση μίας ώρας με συνεχή βαφή, υπολογίστηκε το ενεργό βάθος ενανθράκωσης στα 255μm. Η αύξηση της διάρκειας σε δύο ώρες, επιφέρει σημαντική αύξηση του βάθους κατά 245μm (600μm). Στην περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης, το βάθος κυμαίνεται στα 695μm, δηλαδή παρουσιάζει περαιτέρω αύξηση κατά 95μm συγκριτικά με αυτό, των δύο ωρών. Τέλος στην περίπτωση των τεσσάρων ωρών, το βάθος αυξάνεται λιγότερο (αναμενόμενο λόγω κορεσμού της διάχυσης του άνθρακα), πιο συγκεκριμένα αυτό κυμαίνεται στα 750μm.
- Στην ενανθράκωση μίας ώρας με κλιμακωτή βαφή, υπολογίζεται το ενεργό βάθος στα 365μm, ενώ σε αυτή των δύο ωρών, παρουσιάζεται σημαντική αύξηση κατά 155μm (520μm). Στην περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης, το ενεργό βάθος αυξάνεται κατά 100μm και υπολογίζεται στα 620μm. Τέλος, στις τέσσερις ώρες, το ενεργό βάθος ενανθράκωσης, παρουσιάζει σημαντική αύξηση κατά 105μm, πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται στα 725μm.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ενεργού βάθους ενανθράκωσης για τους δύο τύπους απόψυξης. Συμπεραίνεται ότι, για την περίπτωση της μίας ώρας τα αποτελέσματα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα, λόγω του μικρού χρόνου ενανθράκωσης. Ομοίως στις τέσσερις ώρες, η διαφορά είναι πολύ μικρή (25μm) ως προς το συνολικό βάθος ενανθράκωσης. Αυτό οφείλεται στον κορεσμό της διάχυσης του άνθρακα (2ος Νόμος του Fick). Οι διαφορές εμφανίζονται στις περιπτώσεις των δύο και τριών ωρών ενανθράκωσης. Πιο συγκεκριμένα, και στις δύο περιπτώσεις, το ενεργό βάθος για συνεχή απόψυξη εμφανίζει αύξηση 75-80μm έναντι αυτού της ισοθερμοκρασιακής απόψυξης. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη δραστηριότητα του λαδιού έναντι του λουτρού αλάτων. Αυτό έχει περαιτέρω επίπτωση στην κατανομή των τάσεων και συνεπώς στην αντοχή σε κόπωση. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.
- Η βιομηχανική απαίτηση το ενεργό βάθος να κυμαίνεται μεταξύ των 500-800μm, θα αποτελέσει σημαντικό κριτήριο για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών ενανθράκωσης για το συγκεκριμένο υλικό

Βάθος Υποβάθρου Ενανθράκωσης

Για όλες τις περιπτώσεις υπολογίζεται το βάθος υποβάθρου, δηλαδή το βάθος αυτό, όπου παύει η επίδραση του άνθρακα στην σκληρότητα του υλικού.

- Πιο συγκεκριμένα, στη περίπτωση της ενανθράκωσης με συνεχή βαφή, το βάθος υποβάθρου για την ενανθράκωση μίας και δύο ωρών κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα (1000-1100μm). Σημαντική διαφορά εντοπίζεται, στην περίπτωση των τριών ωρών, όπου το

βάθος υποβάθρου εμφανίζει αύξηση κατά 600μm, κυμαίνεται στα 1700μm. Στην περίπτωση των τεσσάρων ωρών, παρουσιάζεται μικρή αύξηση κατά 200μm.

- Στην περίπτωση της κλιμακωτής βαφής, τα αντίστοιχα αποτελέσματα κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με αυτά της συνεχούς βαφής. Μικρές διαφορές εντοπίζονται στην περίπτωση των δύο ωρών, όπου το βάθος υποβάθρου στη συνεχή απόψυξη είναι μειωμένο κατά 200μm έναντι αυτού της ισοθερμοκρασιακής. Ενώ στην περίπτωση των τριών ωρών, το βάθος υποβάθρου κατά τη συνεχή απόψυξη είναι αυξημένο κατά 200μm έναντι αυτού της ισοθερμοκρασιακής.

Βάθος μέγιστης σκληρότητας

- Μία ακόμη σημαντική ιδιότητα για την ενανθράκωση αποτελεί το βάθος εκείνο, στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη σκληρότητα του υλικού. Είναι υψίστης σημασίας, για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή στη φθορά/τριβή.
- Συγκρίνοντας τους δύο τύπους απόψυξης (συνεχής και ισοθερμοκρασιακή), το βάθος μέγιστης σκληρότητας κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για τις περιπτώσεις της μίας, των δύο και των τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης. Αντιθέτως, εμφανίζεται διαφορά της τάξης των 100μm του βάθους μέγιστης σκληρότητας για την περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης. Αναλυτικότερα, το βάθος ενανθράκωσης για την συνεχή βαφή υπολογίζεται στα 370μm, ενώ για την κλιμακωτή στα 270μm.

Καμπτική τάση θραύσης

Με σκοπό τον ποιοτικό προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη, υπολογίζεται η καμπτική τάση θραύσης (κεφάλαιο 8).

- Έπειτα από τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης, για την περίπτωση της ενανθράκωσης μίας ώρας συνεχούς βαφής, η καμπτική τάση θραύσης υπολογίζεται στα 2950MPa. Εν συνεχεία, για τις δύο, τρεις και τέσσερις ώρες ενανθράκωσης, η καμπτική τάση θραύσης μειώνεται βαθμιαία μέχρι την τιμή των 2668MPa, ήτοι 10% περίπου.
- Στην ενανθράκωση κλιμακωτής βαφής, η καμπτική τάση θραύσης για τη μία ώρα ενανθράκωσης βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με την περίπτωση της συνεχούς απόψυξης, ήτοι 2950MPa. Ομοίως υπάρχει βαθμιαία μείωση της καμπτικής αντοχής στις δύο, τρεις και τέσσερις ώρες μέχρι την τιμή των 2583MPa, ήτοι 12% περίπου.
- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τα δύο είδη απόψυξης, συμπεραίνεται ότι η καμπτική τάση θραύσης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Παρουσιάζει μείωση η οποία είναι φυσιολογική αφού με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης αυξάνεται το συνολικό βάθος εμποτισμού και επομένως οι μηχανικές αντοχές της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης. Η μεταβολή είναι σχεδόν η ίδια και εξαρτάται από τη ζώνη αυτή και μόνο, γεγονός που δείχνει ότι το συγκεκριμένο μέγεθος δεν αποτελεί παράμετρο μελέτης αφού αφορά τυποποιημένα δοκίμια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Ουσιαστικά, για τη δεδομένη διατομή, η μείωση αντοχής σε κάμψη είναι 10-12% μεταξύ της ενανθράκωσης για μία και τέσσερις ώρες αντίστοιχα και είναι ανεξάρτητη του μέσου απόψυξης.

Στον πίνακα 9.1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης και της δοκιμής κάμψης για τις δύο διαφορετικές αποψύξεις σε σχέση με το χρόνο ενανθράκωσης.

Πίνακας 9.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενανθράκωσης συνεχούς και κλιμακωτής βαφής.

Μηχανική ιδιότητα προς σύγκριση	Τύπος απόψυξης	Διάρκεια ενανθράκωσης			
		1h	2h	3h	4h
Ενεργό βάθος ενανθράκωσης (μm)	Συνεχής	355	600	695	750
	Κλιμακωτή	365	520	620	725
Βάθος υποβάθρου (μm)	Συνεχής	1000	1100	1700	2000
	Κλιμακωτή	1000	1300	1500	1900
Βάθος μέγιστης σκληρότητας (μm)	Συνεχής	180	260	370	340
	Κλιμακωτή	180	270	270	340
Καμπτική τάση θραύσης (MPa)	Συνεχής	2950	2751	2707	2668
	Κλιμακωτή	2940	2763	2692	2583

Παράμετροι ποιότητας του στρώματος ενανθράκωσης αποτελούν, το ενεργό βάθος, το βάθος υποβάθρου και το βάθος μέγιστης σκληρότητας.

- Το ενεργό βάθος εξαρτάται από την δραστικότητα του μέσου απόψυξης.
- Το βάθος υποβάθρου εξαρτάται από την εμβαπτότητα και το συντελεστή διάχυσης του υλικού, από το μέσο με το οποίο γίνεται ο εμποτισμός και από το χρόνο ενανθράκωση.
- Το βάθος μέγιστης σκληρότητας εξαρτάται από τη χημική σύσταση του υλικού, το μέσο εμποτισμού και το χρόνο εναθράκωσης.
- Η καμπτική τάση θραύσης εξαρτάται από τη χημική σύσταση του υλικού και το χρόνο ενανθράκωσης.

Θραυστογραφία μέσω S.E.M.

- Η αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης, δημιουργεί αναμενόμενα μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης του άνθρακα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ενεργό βάθος ενανθράκωσης. Πιο συγκεκριμένα από τις εικόνες 6.2-6.9, υπολογίζεται οπτικά το ενεργό βάθος ενανθράκωσης το οποίο κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με το αντίστοιχο, που υπολογίστηκε από την δοκιμή μικροσκληρομέτρησης.

Η αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης επιφέρει και στους δύο τύπους απόψυξης, τα εξής αποτελέσματα:

- Μεγαλύτερες περιοχές ψαθυρής θραύσης που οδηγεί σε μείωση της αντοχής στην κάμψη όπως αποδεικνύεται από την αντίστοιχη δοκιμή που διενεργήθηκε.
- Μείωση του μεγέθους των θυλάκων στην καρδιά του δοκιμίου, με αποτέλεσμα η θραύση να γίνεται εντονότερα ενδοκρυσταλλική.
- Δημιουργία ομαλότερων γεωμετρικά κόκκων, στην καρδιά του δοκιμίου. Γεγονός που οδηγεί σε ομαλότερη θραύση.
- Μείωση των κενών θραύσης που δημιουργούνται λόγω όλκιμης παραμόρφωσης.

- Μείωση των χαρακτηριστικών «ξεριζωμάτων» θραύσης, στην καρδιά του δοκιμίου. Με αυτό επιβεβαιώνεται ότι, η θραύση γίνεται όλο και πιο ψαθυρή με την αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης. Χαρακτηριστικό αυτού, αποτελεί η εικόνα 6.8(ε), όπου φαίνεται έντονα η παρουσία «κρατήρων» στις τέσσερις ώρες ενανθράκωσης. Οι οποίοι αποτελούν την κορυφή των «ξεριζωμάτων» που εμφανίζονται στις δύο και τρεις ώρες ενανθράκωσης.
- Συγκρίνοντας τις επιφάνειες θραύσης για τους δύο τύπους απόψυξης, στον ίδιο χρόνο ενανθράκωσης. Συμπεραίνεται ότι η συμπεριφορά αυτών είναι παρόμοια έχει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Επιβεβαιώνεται και μέσω των εικόνων 6.2-6.9, ότι το ενεργό βάθος ενανθράκωσης συνεχούς βαφής κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτό της κλιμακωτής για τις περιπτώσεις της μίας και τεσσάρων ωρών.

Οι διαφορές μεταξύ των μετρούμενων οπτικά ενεργών βαθών ενανθράκωσης και αυτών, μέσω της μικροσκληρομέτρησης οφείλονται στις στατιστικές αποκλίσεις της μικροσκληρομέτρησης, στις αποκλίσεις των μετρούμενων οπτικά βαθών ενανθράκωσης και στο γεγονός ότι, μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπίας εξετάστηκε ένα δοκίμιο κάθε ομάδα, ενώ σκληρομετρήθηκαν τέσσερα διαφορετικά προφίλ.

Στερεοσκοπική ανάλυση επιφανειών θραύσης.

Κατά την στερεοσκοπική ανάλυση, μετρήθηκαν δύο σημαντικά μεγέθη. Αρχικά, σε έντονο φωτισμό, ο βαθμός παραμόρφωσης - λόγω κάμψη του στρώματος του ενεργού βάθους ενανθράκωσης. Και έπειτα, σε χαμηλό φωτισμό, η περιοχή του βασικού μετάλλου που εμφανίζει έντονα όλκιμη θραύση.

Από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν σε έντονο φωτισμό, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για την περίπτωση της ενανθράκωσης συνεχούς βαφής και για τους τέσσερις χρόνους ενανθράκωσης, παρατηρείται ότι το στρώμα του ενεργού βάθους έχει παραμορφωθεί (λόγω κάμψης) κατά τον ίδιο ακριβώς βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε ότι η μέγιστη παραμόρφωση σε θλίψη και εφελκυσμό κυμαίνεται περίπου στα $\pm 125\mu\text{m}$ από το μέσο βάθος ενανθράκωσης.
- Στην περίπτωση της ενανθράκωσης κλιμακωτής βαφής, τα δοκίμια που υπέστησαν μία και δύο ώρες ενανθράκωση, εμφανίζουν παραμόρφωση περίπου $\pm 125\mu\text{m}$ από το μέσο ενεργό βάθος. Σε αντίθεση, με τα δοκίμια των τριών και τεσσάρων ωρών, στα οποία παρατηρείται μεγάλη παραμόρφωση λόγω κάμψης. Αναλυτικότερα, υπολογίστηκε παραμόρφωση $\pm 230\mu\text{m}$ λόγω θλίψης και εφελκυσμού.
- Συγκρίνοντας τις παραμορφώσεις που υπέστησαν τα δοκίμια των τεσσάρων ωρών για την περίπτωση της συνεχούς και της κλιμακωτής βαφής, συμπεραίνεται ότι τα δοκίμια της κλιμακωτής βαφής συμπεριφέρονται πιο όλκιμα και δύναται να απορροφήσουν μεγαλύτερη ενέργεια κατά την παραμόρφωση. Αυτό είναι εξαιρετικής σημασίας, όταν το υλικό προορίζεται για εφαρμογές που απαιτούν και αντοχή στη κόπωση, δηλαδή το υλικό να μπορεί να απορροφήσει εναλλασσόμενα φορτία και να μην συμπεριφερθεί τελείως ψαθυρά, που θα οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία.
- Ταυτοποιήθηκαν οι τέσσερις περιοχές θραύσης. Η Ζώνη Α αφορά το στρώμα επιφανειακής βαφής (Effective case layer), κατά το οποίο η θραύση είναι έντονα ψαθυρή και

διακρυσταλλική. Οι συμμετρικές περιοχές B1-B2 όπου η θραύση πραγματοποιείται κατά όλκιμο-περικρυσταλλικό τρόπο. Τέλος η περιοχή Γ εσωτερικά του δοκιμίου, όπου λαμβάνουν χώρα και οι δύο τύποι θραύσης. Το ποσοστό της περικρυσταλλικής οφείλεται στη συνένωση μικροκενών στο εσωτερικό του υλικού, τα οποία πυρινώνονται σε θέσεις τοπικών ασυνεχειών όπως είναι τα όρια των κόκκων και οι δευτερογενείς φάσεις (καρβίδια). Το υπόλοιπο ποσοστό περιλαμβάνει θραύση διακρυσταλλικά των κόκκων και οφείλεται στο γρήγορο ρυθμό διάδοσης της θραύσης. Συμπεραίνεται ότι η αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης μειώνει το ποσοστό της διακρυσταλλικής θραύσης στην ζώνη Γ ενώ συγκρίνοντας τους δύο τύπους απόψυξης ως προς τα παραπάνω χαρακτηριστικά, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές.

Από τις φωτογραφίες που ελήφθησαν σε χαμηλό φωτισμό, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η αύξηση της διάρκειας ενανθράκωσης, αυξάνει το μέγεθος των κόκκων στην καρδιά με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η περιοχή που συμπεριφέρεται όλκιμα κατά τη θραύση.
- Συγκρίνοντας τις επιφάνειες, των τεσσάρων ωρών για την συνεχή και την κλιμακωτή βαφή. Η επιφάνεια της περιοχής όλκιμης θραύσης για την περίπτωση της κλιμακωτής βαφής είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της συνεχούς βαφής, επιβεβαιώνοντας και το γεγονός ότι, έχει μεγαλύτερη αντοχή στη κόπωση λόγω μεγαλύτερης όλκιμότητας στην καρδιά.

9.1 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΑΠΟΚΤΩΜΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Στον παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται θεωρητικά και πειραματικά δεδομένα του βάθους ενανθράκωσης και της περιεκτικότητας του άνθρακα μετά από διάφορες διάρκειες. Ο στόχος είναι η σύγκριση των βιβλιογραφικών δεδομένων με τα αντίστοιχα της παρούσας μελέτης.

Αρχικά υπολογίζεται θεωρητικά το προφίλ του ενεργού βάθους ενανθράκωσης σύμφωνα με τον νόμο διάχυσης του Fick.

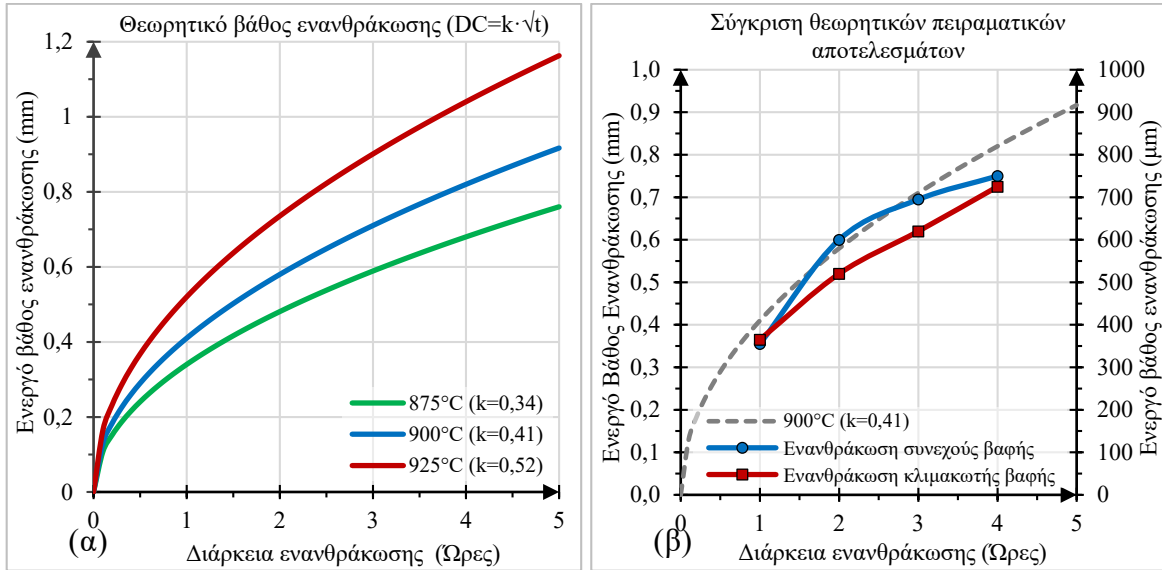
$$\text{Depth Case} = k \cdot \sqrt{t}, \text{ Νόμος διάχυσης του Fick} \quad (9.1)$$

όπου:

k: σταθερά και εξαρτάται από την θερμοκρασία ενανθράκωσης

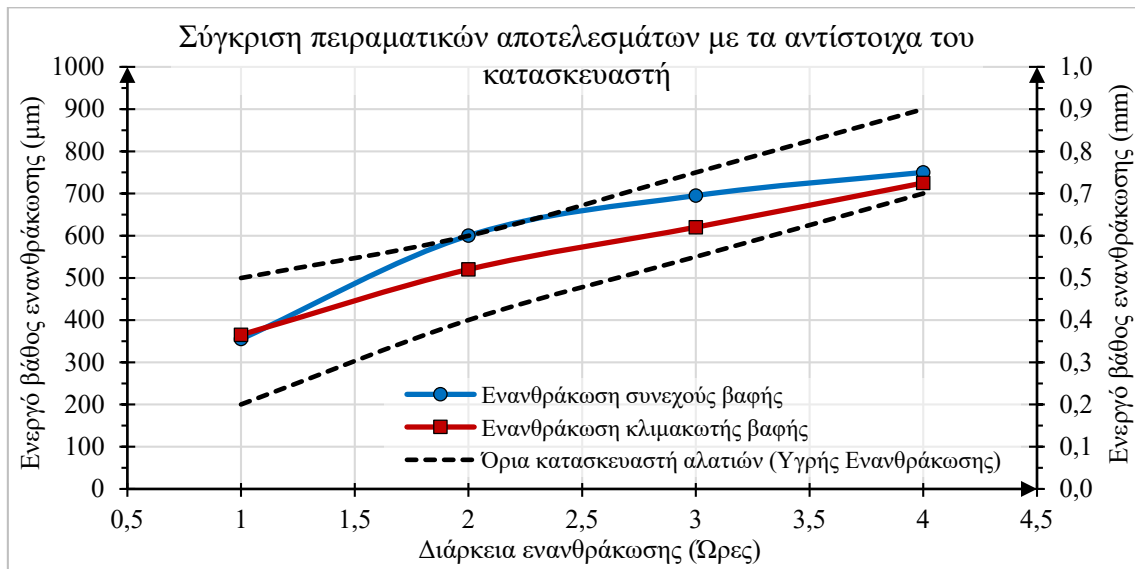
t: χρόνος σε ώρες της ενανθράκωσης

Στην εικόνα 5.23, παρουσιάζονται τα θεωρητικά προφίλ του ενεργού βάθους ενανθράκωσης για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες ενανθράκωσης. Οι σταθερές *k* έχουν υπολογιστεί πειραματικά.



Εικόνα 9.1: (α) Θεωρητικό βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει θερμοκρασίας και διάρκειας, (β) σύγκριση πειραματικών προφίλ ενεργού βάθους ενανθράκωσης για τα δύο είδη προγραμμάτων με την βιβλιογραφία [32]

Από το διάγραμμα 9.1, συμπεραίνεται ότι, τα πειραματικά αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων, έχουν πλήρη συνάφεια με την θεωρητική προσέγγιση του νόμου διάχυσης του Fick ($D.C. = k \cdot \sqrt{t}$). Για την περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης, τα αποτελέσματα είναι μικρότερα κατά 12% (0,36 μm έναντι 0,41 μm) ενώ, ποσοστιαία ίδιες αποκλίσεις εμφανίζονται στην περίπτωση των τεσσάρων ωρών όπου τα πειραματικά αποτελέσματα είναι μειωμένα κατά 10% (0,72 μm έναντι 0,81 μm των θεωρητικών)



Εικόνα 9.2: Συγκριτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων ενανθράκωσης με αντίστοιχα της κατασκευάστριας εταιρίας (Durferrit) των αλατιών της υγρής ενανθράκωσης (πηγή εταιρίας: Durferrit «Carburizing baths»)

Στο παραπάνω διάγραμμα, γίνεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με τα αντίστοιχα βάφη ενανθράκωσης που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία

Durferrit των αλατιών της ενανθράκωσής. Τα εύρη που δίνονται, αναφέρονται σε χάλυβες διαφορετικής χημικής σύστασης. Από το διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι εντός ορίων του κατασκευαστή, αυτό συνεπάγεται ότι δεν έχουν γίνει λάθη κατά την θερμική κατεργασία.

ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ: Με δεδομένο ότι οι ανάγκες της αγοράς αφορούν, ενεργά βάθη ενανθράκωσης μεταξύ 0,5 και 0,8mm. Και σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η θερμική κατεργασία που προτείνεται και οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για εφαρμογές που απαιτούν καλή συμπεριφορά σε φθορά και σε κόπωση είναι αυτή των τριών ωρών, με ισοθερμοκρασιακή απόψυξη σε λουτρό αλάτων. Παρουσιάζει το ζητούμενο ενεργό βάθος, έχει μεγαλύτερο ολικό βάθος και παρουσιάζει ιδανικό προφίλ σκληρότητας. Επιπλέον θα πρέπει μετά την ολοκλήρωση της θερμικής κατεργασίας να αφαιρεθεί μηχανουργικά στρώμα τουλάχιστον 0,1mm στην ακτίνα ώστε να απομακρυνθεί υλικό που πλέον έχει αλλοιωμένες ιδιότητες λόγω της διεργασίας

B. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Υπάρχουν δυνατότητες περαιτέρω διερεύνησης του θέματος με τους εξής τρόπους:

- Μελέτη της συμπεριφοράς των δοκιμίων έπειτα από δοκιμή εφελκυσμού.
- Ο προσδιορισμός των διαγραμμάτων βέλους κάμψης-καμπτικής τάσης, με σκοπό τον υπολογισμό βασικών μεγεθών όπως, μέτρο διάρρηξης (modulus of rupture) και ενέργειας παραμόρφωσης (δυσθραυστότητα) και σύγκρισης αυτών.
- Προσδιορισμό της κατανομής των συγκεντρώσεων των χημικών στοιχείων με την μέθοδο της μικροχημικής ανάλυσης με E.D.X (Energy Dispersive X-Ray)

(κενή σελίδα)

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Buy America Steel Products Association, <https://buyamericasteelproducts.org/> (accessed 07-05-2018)
- [2]. STEEL MARKETS | worldsteel, World Steel Accosiation, <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/steel-markets.html> (accessed 07-05-2018)
- [3]. ASTM EN 10027-1:2005, Designation systems for steel – Part 1: Steels names
- [4]. Πασπαλάς Γ. Κωνσταντίνος, (2009), Η ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων, <https://goo.gl/3YQyNd> (accessed 07-05-2018)
- [5]. Χρυσουλάκης Δ. Ιωάννης, Παντελής Ι. Δημήτριος, (2008), Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, σελ. 646, Αθήνα.
- [6]. Σημειώσεις «Βιομηχανικά Κράματα», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, <https://goo.gl/w2Ffs1> (accessed 07-05-2018)
- [7]. Σημειώσεις «Σιδηρούχα Κράματα», Πολυτεχνείο Κρήτης, <https://goo.gl/wUEY7K> (accessed 07-05-2018)
- [8]. Χάλυβες – steelcenter.gr, Κέντρο Χαλύβων Α.Ε.Β.Ε., <https://goo.gl/jXoTD5> (accessed 07-05-2018)
- [9]. ΥΛΙΚΑ 1 – e-Class, TEI Δυτικής Μακεδονίας, ΥΛΙΚΑ 1: Ιστορική ανασκόπηση της παραγωγής σιδήρου και χάλυβα, <https://goo.gl/WLTSDJ> (accessed 13-03-2018)
- [10]. Steel Structures - Nikos Mantzoros - Γενικά - Χάλυβας – Παραγωγή, Nikos Mantzoros steel structures, <http://www.steel-structures.eu/index.php?n=GrSteel-Composite-Structures.General> (accessed 13-03-2018)
- [11]. TUC 3M Lab, Comp. Numerical Control, Σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης «Κατεργασίες με παραμόρφωση», <https://goo.gl/QbCBtk> (accessed 13-03-2018)
- [12]. Κατεργασίες Ι, Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα «Κατεργασίες Ι», <https://goo.gl/wTmz5F> (accessed 13-03-2018)
- [13]. Αντωνιάδης Α., (2015), Μηχανουργική Τεχνολογία, κατεργασίες με Αφαίρεση υλικού, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, σελ. 464, (Αθήνα)
- [14]. Θερμικές Κατεργασίες, Σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης «Ι», <https://goo.gl/vEET6H> (accessed 13-03-2018)
- [15]. Μέντρεα Κάρμεν (2016), Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών», 7^η Έκδοση, σελ.123
- [16]. Khaira H.K., Hardenability, <http://slideplayer.biz.tr/slide/11785831/> (accessed 22-03-2018)
- [17]. Microstructures of Iron and Steels | ispatguru.com, InspatGuru, <https://goo.gl/RGdb87>(accessed 22-03-2018)

- [18]. Carbon dependance of martensite, Wikipedia, <https://goo.gl/NxYYyL> (accessed 13-03-2018)
- [19]. Microstructures of Iron and Steels | ispatguru.com, InspatGuru, <https://goo.gl/RGdb87> (accessed 22-03-2018)
- [20]. kaltarbeitsstahl cold work tool steel - BÖHLER Edelstahl, Prospectus K460 steel, <https://goo.gl/LG9LB1> (accessed 22-03-2018)
- [21]. CITIMATAL INDUSTRIES. INVESTMENT CASTING., Citimetal, <http://www.citimetal.com/> (accessed 22-03-2018)
- [22]. Dossett L. Jon, Totten G.E. (2013), Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, ASM International, pp.784
- [23]. Σημειώσεις «Επιφανειακές Θερμικές Κατεργασίες», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, <https://goo.gl/JbMHQg> (accessed 22-03-2018)
- [24]. Flame Hardening of Crane Wheel 2011 – YouTube, <https://goo.gl/44CgrT> (accessed 24-03-2018)
- [25]. Gear Hardening and Tempering - Heat Treating with the Flexscan Induction Scanner/Pop-Up – YouTube, <https://goo.gl/XNWTBw> (accessed 24-03-2018)
- [26]. Aquecedor indutivo Jamo modelo JMMF-20kW com calha pneumática – YouTube, <https://goo.gl/ujkz8s> (accessed 24-03-2018)
- [27]. Hardening of steel axles using lasers – YouTube, <https://goo.gl/6FDsMB> (accessed 24-03-2018)
- [28]. Ψυλλάκη Πανδώρα (2013), Θερμικές Κατεργασίες «Ενότητα Α: Επιφανειακές κατεργασίες υλικών για μηχανολογικές εφαρμογές», <https://goo.gl/bVtkqc> σελ.64, Αθήνα.
- [29]. Herring H. Daniel, Interpreting Carburized Case Depths, Part 1: Hardness Testing Methods, Industrial Heating, The International Journal of Thermal Technology, 2014-07-08, p.1-4
- [30]. Herring H. Daniel, Interpreting Carburized Case Depths, Part 2: Methods for Measuring Case Depth, Industrial Heating, The International Journal of Thermal Technology, 2014-07-08, p.1-4
- [31]. Dossett L. Jon, Boyer E. Howard (2006), Practical Heat Treatment: 2nd Edition, ASM International, pp.296
- [32]. Totten E. George (2006), Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies, 2nd Edition, CRC Press, pp.848
- [33]. Solar Atmospheres - Quality Vacuum Heat Treating, <https://solaratm.com/>, accessed 26-03-2018)
- [34]. Davis R.J. (2002), Surface Hardening of Steels, Chapter 4th «Pack and Liquid Carburizing», pp.115-126 και Chapter 3rd «Vacuum and Plasma Carburizing», pp.106-107, ASM International
- [35]. Opinions on Carburizing, <http://www.writeopinions.com/carburizing> (accessed 26-03-2018)
- [36]. Davis J.R. (2002), Surface Hardening of Steels, Chapter 2nd «Gas Carburizing», pp.23, ASM International

- [37]. Forno Camara / Batch Furnace – Youtube, <https://goo.gl/7PGBdE> (accessed 24-03-2018)
- [38]. Furnaces for heat treatment of fasteners and automobile parts, <https://www.crystec.com/syhare.htm> (accessed 26-03-2018)
- [39]. AvaC Process for Vacuum Carburizing with Acetylene | Ipsen, <https://goo.gl/y4wD5H> (accessed 26-03-2018)
- [40]. Piotr Kula, Konrad Dybowski, Emilia Wolowiec, Robert Pietrasik (2014), “Boost-diffusion” vacuum carburising - Process optimization, ELSEVIER, Vacuum 99, pp. 175-179
- [41]. Raj Bharath M (2013), Surface treatments with respect automotive industry, <https://goo.gl/3qkKwX> (accessed 26-03-2018)
- [42]. Davis R.J. (2002), Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics, ASM International, pp.364
- [43]. Wear Protection with Borocoat-Diffusion Layers - Avion Manufacturing, <https://goo.gl/5WRqiS>, accessed 26-03-2018)
- [44]. Inchromizing - soft inchromizing - hard inchromizing, Chromin Maastricht BV, <https://goo.gl/poeWLb> (accessed 26-03-2018)
- [45]. Παπάζογλου Δ. (2010), Υλικά Ι, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης, <https://goo.gl/XXCEhv> (accessed 26-03-2018)
- [46]. Design of the Week: DIY Material Testing Machine – Fabbaloo, Fabbaloo, <https://goo.gl/MK8USN> (accessed 27-03-2018)
- [47]. Donald R. Askeland, Wright L. Wendelin (2016), The Science and Engineering of Materials, 6th Edition, Chapter 6th, Mechanical Properties: Part One, pp.218
- [48]. Γιαννακόπουλος Ι. Κωνσταντίνος (2011), Σημειώσεις πειραματικής αντοχής υλικών, <https://goo.gl/WvC1q3>, σελ. 83, (accessed 26-03-2018), Αθήνα
- [49]. Λόκκα Γ. Φιλοθέου (2003), Αρχές και μέθοδοι στην αντοχή υλικών, <https://goo.gl/4yXvbX>, (accessed 26-03-2018), Λάρισα
- [50]. Amorphous Carbon Thin Films Prepared by Electron-Gun, AZO materials, <https://goo.gl/ZNXXb8> (accessed 27-03-2018)
- [51]. Γεωργατζίνος Κ Στ., Σημειώσεις εργαστηριακής αντοχή υλικών, Κεφάλαιο 5^ο «Κόπωση», <https://goo.gl/2o3Q55> (accessed 27-03-2018)
- [52]. Τριανταφυλλίδης Κ. Γεώργιος (2014), Μεταλλογνωσία, Κεφάλαιο 16^ο «Αστοχία των μετάλλων – Θραυστομηχανική», 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, σελ.753-803, Θεσσαλονίκη, ISBN: 978-960-418-451-4
- [53]. Alan F. Liu (2005), Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction, Chapter 2: Deformation and Fracture Mechanisms and Static Strength of Metals, ASM International, ISBN: 0-87170-802-7
- [54]. ASTM Welding Procedures A36 to A930 - Weld Reality, www.weldreality.com. (accessed 27-03-2018)
- [55]. ΕΛΟΤ 1389/25-02-204, «Τεκμηρίωση – Παρουσίαση διατριβών και παρόμοιων τεκμηρίων»

-
- [56]. ASTM, “E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, (2017).
- [57]. ASTM, “E140-05e1 Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness.”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 03.01, (2006).
- [58]. EN ISO 2639:2003, Steels- Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases.
- [59]. Τεχνικό φυλλάδιο χάλυβα ecn 150 εταιρίας metalravne, SQUAL 5919 Steel - SIJ Metal Ravne Steel Selector v. 5.0, <https://steelselector.sij.si/steels/ECN150.html>, (accessed 20.12.18)
- [60]. DIN 17210: Case hardening steel-Technical delivery conditions, (1986)