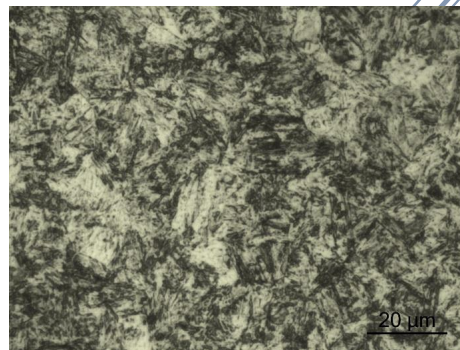
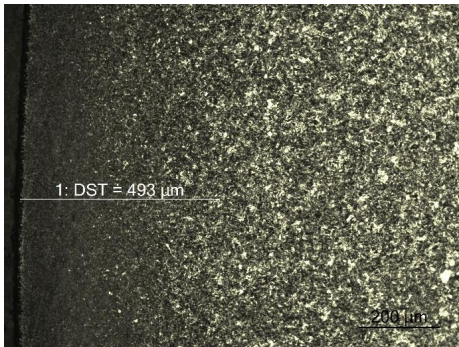


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΧΑΛΥΒΑ 15CrNi6 ΚΑΤΑ DIN
ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΔΙΠΛΗ ΒΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ**

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΚΑΡΑΚΑΤΣΑΝΗ ΣΤΑΣΙΝΗ

ΑΜ: 40167



**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ
ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΟΣ ΜΕΤΑΛΟΥΡΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

Αφιερωμένη,

Στην οικογένειά μου, και ειδικότερα στη μητέρα μου και την αδερφή μου
Που είναι πάντα δίπλα μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά την μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από σταδιακή ενανθράκωση διάρκειας τεσσάρων ωρών και διπλή βαφή. Ο χάλυβας 15CrNi6 είναι ελαφρά κραμματωμένος επιφανειακής βαφής και βρίσκεται εφαρμογές σε στοιχεία μηχανών (άξονες, άτρακτοι) και σε κατασκευή εργαλείων που δουλεύουν εν ψυχρώ (κοπτικά εργαλεία και διαμορφωτικά καλούπια). Το υλικό υποβάλλεται σε επιφανειακή θερμική κατεργασία ενανθράκωσης και στη συνέχεια σε διπλή βαφή σε αλάτι και επαναφορά. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης, της βαφής στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις οδηγίες των τεχνικών φυλλαδίων του κατασκευαστή του υλικού και οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν βάσει προτύπων.

Για τη διεκπεραίωση της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου (όπως σκληρομέτρηση) καθώς και καταστροφικές μέθοδοι (όπως μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία, χημική ανάλυση, και μικροχημική ανάλυση EDX). Τέλος, πραγματοποιήθηκε δοκιμή κρούσης προκειμένου να εκτιμηθεί η δυσθραυστότητα του υλικού συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης. Η εργασία ολοκληρώνεται με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές.

Λέξεις κλειδιά: χάλυβας 15CrNi6, ενανθράκωση, διπλή βαφή, βάθος ενανθράκωσης μικροδομή - δυσθραυστότητα.

ABSTRACT

The present work examines the microstructure and the mechanical properties of 15CrNi6 steel after progressive carburization for four hours and double martempering. DIN 15CrNi6 is a low alloyed case hardening carbon steel, suitable for machine elements (shafts, crankshafts) and cold working tools (cutting tools and deformation dies). The material is case-hardened through carburization and then quenched. The objective of this study is to investigate the effect of carburizing time on the microstructure and the mechanical properties of the steel.

The study was conducted according to the technical prospectus of the material manufacturer and the tests according to the related standards.

Non destructive testing (hardness measurements) and destructive testing (microhardness, light microscopy, chemical analysis, scanning and EDX) were conducted. Finally, a series of Charpy tests were carried out in order to estimate the effect of carburizing time on the material toughness. Experimental results are analyzed and the relevant conclusions are presented.

Key words: 15CrNi6 steel, case hardening, carburization, double martempering, carburization depth, microstructure – toughness.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με το άρθρο 16 του Κανονισμού σπουδών του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ (Απόφαση Συνέλευσης Α.Ε.Ι. αριθ. 5/16-12-98, ΦΕΚ 861/21-05-99, τ. Β'), με εισήγηση και επίβλεψη του Εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Αίθ.Β216) του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Η δομή, η τεκμηρίωση και η παρουσίασή της έγινε κατά το δυνατόν σύμφωνα με τους Κανόνες και τις Οδηγίες του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης, καθώς και της πρακτικής που έχει αναπτυχθεί και εξελιχθεί στο συγκεκριμένο εργαστήριο.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η παρούσα διερεύνηση της μικροδομής και των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από ενανθράκωση και διπλή βαφή και στόχος της η μελέτη της επιρροής των παραπάνω εφαρμογών.

Για τη διεκπεραίωση της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου (όπως σκληρομέτρηση) καθώς και καταστροφικές μέθοδοι (όπως μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία, χημική ανάλυση και μικροχημική ανάλυση EDX) και δοκιμή κρούσης προκειμένου να εκτιμηθεί η δυσθραυστότητα του υλικού συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης. Για την ολοκλήρωση της εργασίας πραγματοποιείται επεξεργασία των αποτελεσμάτων και παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από αυτά.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της πτυχιακής και το δεύτερο τις πειραματικές διαδικασίες, οι οποίες συνοδεύονται από αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Το πρώτο μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο ασχολείται με τους χάλυβες. Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται τις ιδιότητες των χαλύβων και τις τυποποιημένες μηχανικές δοκιμές. Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τις θερμικές κατεργασίες χαλύβων.

Το πειραματικό μέρος της πτυχιακής εργασίας αποτελείται συνολικά από επτά επιμέρους κεφάλαια. Εν συνεχεία, το τέταρτο κεφάλαιο της πτυχιακής παρουσιάζει την περιγραφή του πειράματος και το σχεδιασμό του. Το πέμπτο κεφάλαιο ασχολείται με την μέτρηση και εκτίμηση της σκληρότητας του υλικού. Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται μετρήσεις μικροσκληρότητας και ερευνάται η επιρροή του χρόνου ενανθράκωσης στο βάθος ενανθράκωσης. Το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της θραυστογραφίας, μικροσκοπική εξέταση του υλικού. Το όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μικροσκοπική ανάλυση

του υλικού. Το ένατο κεφάλαιο αξιολογεί τις μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων με τη δοκιμή κρούσης.

Το δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την γενική εξέταση καθώς και τις προτάσεις και τις διορθωτικές κινήσεις που απαιτούνται για την αποφυγή μελλοντικών παρόμοιων αστοχιών.

Η τεχνογνωσία, που ακολουθήθηκε σε όλες τις εργαστηριακές δοκιμές, προέκυψε από μελέτη και εφαρμογή των προτύπων του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης ISO (International Organization for Standardization), του οργανισμού ASTM (American Society for Testing and Materials), αλλά και από την εμπειρία προηγούμενων πτυχιακών εργασιών του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. Οι μετρήσεις και γενικά οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας έγιναν από διακριβωμένα όργανα μέτρησης διαφόρων εταιρειών καθώς και από βαθμονομημένα (άτυπα) όργανα εντός του ιδρύματος, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. Η αξιοπιστία των μετρήσεων κρίνεται πολύ σημαντική τόσο για εκπαιδευτικούς λόγους και απόκτηση εμπειρίας του σπουδαστή όσο και για την αξιοπιστία των συμπερασμάτων.

Για την διεκπεραίωση της πειραματική διαδικασία χρειάστηκε μείζονος σημασίας βοήθεια από εταιρείες και ιδιώτες εκτός Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ, διότι χωρίς τη συνδρομή τους πολλά μέρη των πειραματικών διαδικασιών θα ήταν πρακτικά αδύνατον να πραγματοποιηθούν.

Δίνεται η ευκαιρία με την περάτωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας να σημειωθεί ότι, είναι ιδιαίτερα δύσκολο και κοπιαστικό να ολοκληρωθεί το έργο που ξεκινάει κάποια

στιγμή έχοντας ταυτόχρονα και άλλες υποχρεώσεις που πρέπει να διεκπεραιωθούν. Πολλές φορές είναι μάταιο και άλλες πάλι εφικτό.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλονται θερμές ευχαριστίες σε όλες τις παρακάτω εταιρείες και εργαστήρια που συνεργάστηκαν για την πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, καθώς και στους ειδικότερα αναφερόμενους επιστήμονες και μηχανικούς, όχι μόνο για την συμβολή τους στο όλο κόστος των εργασιών, αλλά και για την προσφορά τους στο γενικότερο σχεδιασμό της εργασίας.

- Στην εταιρεία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ – UDDEHOLM ΧΑΛΥΒΕΣ Α.Ε.Β.Ε. και ιδιαίτερα στον Κον Ι.Φ. Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ, Τεχνικό Διευθυντή της εταιρείας, και Ειδικό Συνεργάτη του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ για τη γενική χορηγία της πτυχιακής εργασίας, για τις πολύτιμες συμβουλές, αλλά και για την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης έρευνας. στον Κον Δ.Γ. Παπαγεωργίου, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε. Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. και Πανεπιστημιακό Υπότροφο του Π.Ε.Τ.ΥΛ..
- Στην εταιρεία SPECTRUMLABS Α.Ε. όπου πραγματοποιήθηκε μέρος των δοκιμών και ιδιαίτερα την κυρία Μαριάννα Κουκούλη, Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ. , μηχανικό της εταιρείας και Πανεπιστημιακή Υπότροφο του Π.Ε.Τ.ΥΛ. για την πολύτιμη βοήθειά της.
- Στην εταιρία ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. και ιδιαίτερα τον Κο Β. Σκαράκη, Χημικό του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και Διευθυντή Παραγωγής της εταιρίας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. για την προσφορά του, άνευ αποδοχών.
- Στην Δρ. Κάρμεν Μέντρεα, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό (Polytechnical Institute of Cluj-Napoca), και καθηγήτρια του μαθήματος Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ και εισηγήτρια της πτυχιακής εργασίας για την αμέριστη βοήθειά της και τις πολύτιμες συμβουλές.
- Στον Κον Δ.Γ. Παπαγεωργίου, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε. Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. και Πανεπιστημιακό Υπότροφο του Π.Ε.Τ.ΥΛ. για την πολύτιμη βοήθειά του, για το χρόνο που αφιέρωσε για τη διεκπεραίωση ειδικότερα του πειραματικού μέρους της πτυχιακής και την πολύτιμη καθοδήγηση του.

- Στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Π.Ε.Τ.ΥΛ.) του τμήματος Μηχανολογίας, το οποίο πρόσφερε τον εξοπλισμό του στις υπηρεσίες της πτυχιακής εργασίας και ιδιαίτερα την κα Κατσάπη Άννα πτυχιούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ. και Πανεπιστημιακή Υπότροφο του εργαστηρίου για την αμέριστη βοήθειά της στην διεξαγωγή των δοκιμών.
- Στην ΕΑΒ (Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία) , και ιδιαίτερα τον Κο Β. Στεργίου, Μεταλλειολόγο Μηχανικό του ΕΜΠ, για τη πολύτιμη βοήθειά του στη προετοιμασία των δοκιμών για τη διεξαγωγή των δοκιμών.
- Στους συμφοιτητές μου, Κατσαρό Δημήτρη, Δραγάτη Αρσένη, Τσιρογιάννη Άγγελο και τον Λεπτίδη Στέφανο για την βοήθεια και την υποστήριξη τους.
- Τέλος, στην οικογένεια μου και ειδικότερα, την αδερφή μου και τη μητέρα μου, για τη στήριξη τους στα βήματα μου μέχρι και σήμερα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
ABSTRACT.....	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	IV
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	VI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VIII
A' ΜΕΡΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	- 2 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο ΧΑΛΥΒΕΣ	- 3 -
1.1 Εισαγωγή	- 3 -
1.2 Ονοματολογία χάλυβων.....	- 4 -
1.2.1 Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI – SAE.....	- 4 -
1.2.2 Ονοματολογία χάλυβων κατά το αγγλικό B.S.	- 6 -
1.2.3 Ονοματολογία χάλυβων κατά το γαλλικό σύστημα AFNOR.	- 7 -
1.2.4 Ονοματολογία χάλυβων κατά το γερμανικό σύστημα DIN.....	- 7 -
1.3 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες	- 8 -
1.4 Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χάλυβων	- 11 -
1.5 Κραματωμένοι χάλυβες	- 13 -
1.5.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.....	- 14 -
1.5.2 Μέτρια και Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες.....	- 14 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ- ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	- 17 -
2.1 Εισαγωγή	- 17 -
2.1.1 Φυσικές ιδιότητες των χάλυβων.....	- 17 -
2.1.2 Χημικές ιδιότητες των χάλυβων	- 17 -
2.1.3 Μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων	- 18 -
2.2 Μηχανικές δοκιμές	- 20 -
2.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού	- 20 -
2.2.2 Κλασική δοκιμή θλίψης	- 31 -
2.2.3 Δοκιμή σε λυγισμό (κάμψη).....	- 32 -

2.2.4	Δοκιμή κρούσης	- 34 -
2.2.5	Δοκιμή κόπωσης	- 35 -
2.2.6	Δοκιμή σκληρότητας.....	- 36 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ.....		- 41 -
3.1	Τεχνικές επεξεργασίας χάλυβων. Ταξινόμηση κατεργασιών.....	- 41 -
3.1.1	Ταξινόμηση κατά DIN	- 41 -
3.1.2	Ταξινόμηση κατά ενέργεια.....	- 41 -
3.1.3	Ταξινόμηση κατά θερμοκρασία	- 42 -
3.2	Πλαστικές παραμορφώσεις	- 42 -
3.2.1	Πλαστικές παραμορφώσεις εν θερμώ	- 42 -
3.2.2	Πλαστικές παραμορφώσεις εν ψυχρώ.....	- 45 -
3.2.3	Κονιομεταλλουργία.....	- 47 -
3.3	Δευτεροβάθμιες τεχνικές επεξεργασίας	- 48 -
3.3.1	Μηχανουργική κατεργασία	- 48 -
3.3.2	Μη μηχανουργική κατεργασία.....	- 49 -
3.3.3	Τεχνικές ένωσης.....	- 49 -
3.4	Θερμικές κατεργασίες χάλυβων.	- 51 -
3.4.1	Ανοπτήσεις χάλυβων.....	- 52 -
3.4.2	Ανόπτηση κατεργασίας.	- 53 -
3.4.3	Ανόπτηση εξομάλυνσης.....	- 53 -
3.4.4	Πλήρης ανόπτηση.	- 54 -
3.4.5	Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης.....	- 55 -
3.4.6	Ανόπτηση αποκατάστασης.....	- 56 -
3.4.7	Αποτατική ανόπτηση.....	- 56 -
3.4.8	Ανόπτηση σφαιροποίησης.....	- 56 -
3.5	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ.....	- 58 -
3.5.1	Βαφή χάλυβων.	- 58 -

3.5.2	Βαφή (hardening).....	- 58 -
3.5.3	Αστοχίες κατά τη βαφή.....	- 59 -
3.5.4	Ταχύτητες απόψυξης.....	- 60 -
3.5.5	Μέσα βαφής - Δραστικότητα μέσων βαφής.....	- 60 -
3.5.6	Εμβαπτότητα (ικανότητα σκλήρυνσης μετά από βαφή).....	- 62 -
3.5.7	Τεχνικές βαφής χάλυβων.....	- 64 -
3.5.8	Επαναφορά χάλυβων.....	- 67 -
3.6	Επιφανειακές θερμικές και θερμοχημικές κατεργασίες.....	- 69 -
3.6.1	Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες.....	- 70 -
3.6.2	Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες.....	- 71 -
3.6.3	Εναζώτωση.....	- 73 -
B' ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ.....		- 75 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....		- 76 -
4.1	Υλικό πειράματος.....	- 76 -
4.2	Σχεδιασμός πειράματος.....	- 76 -
4.3	Χημική Ανάλυση Υλικού.....	- 79 -
4.4	Διεξαγωγή πειράματος.....	- 81 -
4.5	Επιλογή δειγμάτων.....	- 82 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ.....		- 89 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ.....		- 100 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ.....		- 119 -
7.1	Ανάλυση επιφανειών θραύσης.....	- 119 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ.....		- 125 -
8.1	Έλεγχος με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο.....	- 125 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΟΚΙΜΗ ΚΡΟΥΣΗΣ.....		- 134 -
9.1	Διαδικασία δοκιμής.....	- 134 -
9.2	Προετοιμασία της μηχανής.....	- 135 -
9.3	Δοκιμή Κρούση.....	- 135 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		- 138 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - 141 -

Α' ΜΕΡΟΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΧΑΛΥΒΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι χάλυβες είναι κράματα Fe-C (σιδήρου - άνθρακα), με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη του 2,06% κ.β, λιγότερο από 1,0% μαγγάνιο και μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου και θείου. Ο άνθρακας είναι το στοιχείο που δίνει εξαιρετικές ιδιότητες στο σίδηρο και τα εμπορικά του κράματά. Ανάλογα με τα στοιχεία και το ποσοστό κραμάτωσης οι χάλυβες ταξινομούνται με διάφορα κριτήρια [1].

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες και
- κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες.

Οι κραματωμένοι χάλυβες, με τη σειρά τους διακρίνονται ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών στοιχείων σε:

- ελαφρά κραματωμένους,
- μέτρια κραματωμένους και
- ισχυρά κραματωμένους.

Ως προς τον προορισμό τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- χάλυβες διαμόρφωσης
- χάλυβες χύτευσης

Ως προς τις χρήσεις τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε:

- χάλυβες κατασκευών
- εργαλειοχάλυβες
- ανοξείδωτους και πυρίμαχους χάλυβες
- χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

1.2 Ονοματολογία χάλυβων

1.2.1 Ονοματολογία χάλυβων κατά AISI – SAE.

Η ονοματολογία των χάλυβων κατά AISI - SAE περιλαμβάνει 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 δύο τελευταία ψηφία δίνουν την % περιεκτικότητά του σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένη επί 100 (Πίνακα 1.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 Ονοματολογία των χάλυβων κατά AISI-SAE.

(Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.513)

ΚΥΡΙΑ ΣΕΙΡΑ	ΕΙΔΟΣ ΧΑΛΥΒΑ	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΕΙΡΩΝ – ΥΠΟΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ
1000	Κοινός ανθρακούχος	10zz: κοινός χάλυβας με Mn, έως 1% 11zz: κοινός χάλυβας με θείο 12zz: κοινός χάλυβας με θείο και φόσφορο 15zz: κοινός χάλυβας με 1,00-1,65% Mn
2000	Μαγγανιούχος Νικελιούχος	13zz: κοινός χάλυβας με 1,75% Mn 23zz: χάλυβας με 3,5% Ni 25zz: χάλυβας με 5,0% Ni
3000	Νικελιοχρωμιούχος	31zz: χάλυβας με 1,25% Ni και 0,65 ή 0,8% Cr 32zz: χάλυβας με 1,75% Ni και 1,07% Cr 33zz: χάλυβας με 3,5% Ni και 1,5 ή 1,57% Cr 34zz: χάλυβας με 3,00% Ni και 0,77% Cr
4000	Μολυβδαινιούχος Χρωμιομολυβδαινιούχος Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου Νικελιομολυβδαινιούχος	40zz: χάλυβας με 0,20 ή 0,25% Mo 44zz: χάλυβας με 0,40 ή 0,52% Mo 41zz: χάλυβας με 0,50, 0,80 ή 0,95% Cr και 0,12, 0,20, 0,25 ή 0,30% Mo 43zz: χάλυβας με 1,82% Ni, 0,50 ή 0,80% Cr και 0,25% Mo
5000	Χρωμιούχος	46zz: χάλυβας με 0,85 ή 1,82% Ni και 0,20 ή 0,25% Mo 50zz: χάλυβας με 0,27, 0,40, 0,50 ή 0,65% Cr 51zz: χάλυβας με 0,80, 0,87, 0,92, 0,95, 1,00 ή 1,05% Cr
6000	Χρωμιοβαναδιούχος	61zz: χάλυβας με 0,6, 0,8 ή 0,95% Cr και 0,10 ή 0,15% V
7000	Βολφραμίου-Χρωμίου	72zz: χάλυβας με 1,75% W και 0,75% Cr
8000	Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου	81zz: χάλυβας με 0,30% Ni, 0,40% Cr και 0,12% Mo 86zz: χάλυβας με 0,55% Ni, 0,50% Cr και 0,20% Mo 87zz: χάλυβας με 0,55% Ni, 0,50% Cr και 0,25% Mo 88zz: χάλυβας με 0,55% Ni, 0,50% Cr και 0,35% Mo
9000	Μαγγανιοπυριτιούχος Νικελίου-Χρωμίου-Μολυβδαινίου	92zz: χάλυβας με 1,40 ή 2,00% Si, 0,65, 0,82 ή 0,85% Mn και Cr 0,65% 93zz: χάλυβας με 3,25% Ni, 1,20% Cr και 0,12% Mo 94zz: χάλυβας με 0,45% Ni, 0,40% Cr και 0,12% Mo 97zz,98zz: χάλυβας με 0,55-1,00% Ni, 0,20-0,8% Cr και 0,20-0,25% Mo

Μπροστά από τους τετραψήφιους κωδικούς μπορεί να υπάρχουν γράμματα του λατινικού αλφαβήτου, με σκοπό να υποδηλωθεί η μεταλλουργική κατεργασία, με την οποία έχει παραχθεί ο χάλυβας (Πίνακας 1.2). Το σύστημα βρίσκει εφαρμογή σε σφυρήλατα, σε ράβδους θερμής εξέλασης, σε μορφοσίδηρους κατασκευών, λαμαρίνες, φύλλα και συγκολλημένους σωλήνες.

<p><i>ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 Προθέματα δηλωτικά της μεταλλουργικής κατεργασίας, με την οποία έχει παραχθεί ο χάλυβας. (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.514)</i></p>	
ΠΡΟΘΕΜΑ	ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ
A	Κραματωμένος χάλυβας παραχθείς σε κάμινο όξινης επένδυσης
B	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο Bessemer
C	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο ανοιχτής εστίας με βασική τένδυση
D	Κοινός χάλυβας παραχθείς σε κάμινο ανοιχτής εστίας με όξινη τένδυση
E	Χάλυβας παραχθείς σε ηλεκτρική κάμινο
X	Χάλυβας με ειδική σύσταση, εκτός των προδιαγεγραμμένων

1.2.2 Ονοματολογία χάλυβων κατά το αγγλικό B.S.

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

- Το πρώτο τριψήφιο μέρος του κωδικού αφορά τον τύπο του χάλυβα (Πίνακας 1.3).
- Το δεύτερο μέρος είναι ένα γράμμα, που δίνει ιδιαίτερες πληροφορίες για τον χάλυβα (Πίνακας 1.4).
- Το τρίτο διψήφιο μέρος του κωδικού δίνει το ποσοστό του χάλυβα σε άνθρακα, πολλαπλασιασμένο επί 100.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 Πρώτο μέρος της κωδικής ονομασίας χάλυβων, κατά το σύστημα B.S. (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.514)

1 ^ο ΩΔΙΚΟΥ	ΜΕΡΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΧΑΛΥΒΑ
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
300-499		Ανοξειδωτος χάλυβας υψηλής αντοχής εν θερμώ
500-900		Κραματωμένος χάλυβας

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.4 Δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας χάλυβων, κατά το σύστημα B.S. (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.515)

2 ^ο ΩΔΙΚΟΥ	ΜΕΡΟΣ	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΩΔΙΚΟΥ
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

1.2.3 Ονοματολογία χάλυβων κατά το γαλλικό σύστημα AFNOR.

Οι ονομασίες των κοινών χάλυβων κατά το γαλλικό σύστημα AFNOR 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 ποσοδιορίζουν τις προδιαγραφές των περιεκτικότητων 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.

Οι ονομασίες των ελαφρά κραματωμένων χάλυβων δίνονται με τη μορφή zzK₁K₂K₃x₁x₂x₃, με zz δίνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα 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 επί 4, για περιεκτικότητες 1-3%, και επί 10, για μικρότερες.

Οι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, δηλώνονται με το γράμμα Z, ενώ οι ποσότητες x₁, x₂, x₃... είναι διψήφιες και δίνουν τις περιεκτικότητες των προσθηκών.

1.2.4 Ονοματολογία χάλυβων κατά το γερμανικό σύστημα DIN.

Οι κωδικοί των χάλυβων αυτών έχουν τη μορφή Styy, όπου το St (γερμανική λέξη Stahl) δηλώνει ότι πρόκειται για κοινό χάλυβα και με yy δίνεται η αντοχή σε εφελκυσμό, σε kg/mm². Αρκετές φορές ακολουθούν δύο ψηφία, τα οποία αφορούν, τον αντίστοιχο πίνακα DIN ορισμένων προδιαγραφών. Οι κοινοί χάλυβες, που προορίζονται για επιβελτίωση ή ενανθράκωση, δηλώνονται με το γράμμα C, ακολουθούμενο από την περιεκτικότητα σε άνθρακα επί 100. Κάποιες φορές προστίθεται το γράμμα K, το οποίο δηλώνει ότι το ποσοστό των ακαθαρσιών είναι πολύ χαμηλό. Επίσης, ειδικά προθέματα χρησιμοποιούνται, προκειμένου να δηλωθεί η θερμική κατεργασία που έχει υποστεί ο χάλυβας. Το E δηλώνει θερμική κατεργασία ενανθράκωσης, το G ανόπτηση, το N εξομάλυνση, το V επιβελτίωση, κλπ. Με GS αναφέρονται οι χάλυβες χύτευσης. Για το συμβολισμό των στοιχείων προσθήκης χρησιμοποιείται, στο κωδικό ονομασίας των κραματωμένων χάλυβων, ο αντίστοιχος χημικός συμβολισμός, ακολουθούμενος από τις περιεκτικότητες πολλαπλασιασμένες επί 4, για τα Co, Cr, Mn, Ni, Si και W, επί 10 για τα Al, Mo, Cu, Ti και V, και επί 100 για τα S, P, N και C.

1.3 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες καλούνται τα κράματα Fe-C, τα οποία, εκτός από συνήθεις προσμίξεις (Mn και Si) και ακαθαρσίες (έως 0,04% P και 0,05% S), δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης (Πίνακας 1.5). Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται σε:

- **Υποευτηκτοειδείς**, χαμηλά ανθρακούχοι χάλυβες (low-carbon steels), με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερο από 0,10% κ.β. Το μεγαλύτερο ποσοστό των υλικών αυτών αναφέρεται σε επίπεδα προϊόντα κυρίως ψυχρής εξέλασης και σε ανοπτημένη κατάσταση. Όσοι περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό από 0,10% έως 0,25% κ.β., ονομάζονται μαλακοί χάλυβες, από 0,20% έως 0,50%, χάλυβες μετρίου άνθρακα και για ποσοστά μεγαλύτερα από 0,50% ονομάζονται χάλυβες υψηλού άνθρακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.5 Σύσταση κοινών ανθρακούχων χάλυβων, κατά AISI-SAE.

(Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.517)

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΚΑΤΑ AISI-SAE	% κ.β. ΠΟΣΟΣΤΟ C	% κ.β. ΠΟΣΟΣΤΟ Mn
1006	<0,08	0,25-0,40
1010	0,08-0,13	0,30-0,60
1015	0,13-0,18	0,30-0,60
1020	0,18-0,23	0,30-0,60
1025	0,22-0,28	0,30-0,60
1030	0,28-0,34	0,60-0,90
1035	0,32-0,38	0,60-0,90
1040	0,37-0,44	0,60-0,90
1045	0,43-0,50	0,60-0,90
1050	0,48-0,55	0,60-0,90
1055	0,50-0,60	0,60-0,90
1060	0,55-0,66	0,60-0,90
1065	0,60-0,70	0,60-0,90
1070	0,65-0,75	0,60-0,90
1075	0,70-0,80	0,40-0,70
1080	0,75-0,88	0,60-0,90
1085	0,80-0,93	0,70-1,00
1090	0,85-0,98	0,60-0,90
1095	0,90-1,03	0,30-0,50

- **Ευτηκτοειδείς**, υψηλά ανθρακούχοι χάλυβες (high-carbon steels), που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0,80% κ.β. Συνήθως χρησιμοποιούνται για κατασκευή ελατηρίων και συρμάτων υψηλής μηχανικής αντοχής.
- **Υπερευτηκτοειδείς**, χάλυβες πολύ υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (ultrahigh-carbon steels) με ποσοστό από 0,80-2,00% κ.β. Παράγονται με εφαρμογή θερμομηχανικών διεργασιών και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη παραγωγή φύλλων με υψηλή ικανότητα μορφοποίησης.
- **Χάλυβες HSLA** (High-Strength Low-Alloy steels), χάλυβες μικροκραματοποίησης. Αποτελούν μια εξελιγμένη κατηγορία χαλύβων τα οποία είναι προορισμένα να αντέχουν και να έχουν καλύτερη συμπεριφορά στην ατμοσφαιρική διάβρωση. Η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα είναι χαμηλή (0,05 έως 25%) και έτσι παρουσιάζουν μεγάλη δυνατότητα μορφοποίησης και συγκολλησιμότητας.

Όταν οι χάλυβες μορφοποιούνται με κατεργασία διαμόρφωσης, χαρακτηρίζονται ως **χάλυβες διαμόρφωσης**, όταν μορφοποιούνται με απευθείας χύτευση σε κατάλληλα καλούπια, καλούνται **χάλυβες χύτευσης** ή **χυτοχάλυβες**. Οι κύριες χρήσεις των χαλύβων διαμόρφωσης καθορίζονται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.6. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, η μηχανική αντοχή των χαλύβων αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητα και η συγκολλησιμότητα τους ελαττώνεται.

Ως χάλυβες χύτευσης χρησιμοποιούνται, συνήθως, οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0,5%. Μετά την στερεοποίησή τους παρουσιάζουν μικροδομή περλίτη, στον οποίο ο προευτηκτοειδής φερρίτης έχει βελονοειδή μορφή, που καθιστά τον χάλυβα εύθραυστο. Γι' αυτό το λόγο, μετά την χύτευση είναι αναγκαία η ανόπτηση για την εξομάλυνση του χάλυβα, προκειμένου να ληφθεί ομαλή κυτταροειδής μικρογραφική μορφή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.6 Χάλυβες διαμόρφωσης και χρήσεις τους.

(Από Γ.Α. Χρυσουλάκης, 2003, σ.518)

% κ.β. C	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΧΡΗΣΕΙΣ
<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	–	–	Τμήματα μηχανών
0,45	–	Αρκετή σκληρότητα, καλή αντοχή σε φθορά, ανεκτή κατεργασιμότητα	–
0,45-0,60	Μετά από βαφή και επαναφορά	Μεγάλη σκληρότητα	–
0,50	Χωρίς θερμική κατεργασία, μετά, από επαναφορά ή ανόπτηση	Μεγάλη σκληρότητα	Άξονες, ελατήρια, οδοντωτοί τροχοί, αλυσίδες, λάμες κοπίδια, κλπ
0,70-1,20	Μαρτενσιτική βαφή	Υψηλή σκληρότητα, αντοχή σε φθορά	Εργαλεία κοπής, τμήματα εργαλειομηχανών, μήτρες
1,50-2,00	–	–	Χωρίς πρακτική σημασία

1.4 Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων

Οι απλοί ανθρακούχοι χάλυβες έχουν ιδιότητες που για συγκεκριμένες εφαρμογές είναι ελλιπής [2]. Η προσθήκη άλλων χημικών στοιχείων έχει τη δυνατότητα να βελτιώσουν τις ιδιότητες τους με διάφορους τρόπους:

- Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.
- Σχηματισμός καρβιδίων (προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων).
- Υποβόηθηση αποβολής του άνθρακα από το πλέγμα του σιδήρου, με τη μορφή γραφίτη.
- Σταθεροποίηση του πλέγματος του ωστενίτη (γ-φερρογόνα στοιχεία) ή του φερρίτη (α-φερρογόνα στοιχεία).
- Μεταβολή της κρίσιμης ταχύτητας βαφής.
- Βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
- Επίδραση στην ανάπτυξη των κόκκων.
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας.

Ενδεικτικά, ο άνθρακας αποτελεί το πλέον σημαντικό στοιχείο διαμόρφωσης των μηχανικών ιδιοτήτων, ο φώσφορος και ο θείο έχουν καταστροφικές συνέπειες στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα με το θείο να έχει την υψηλότερη τάση διαφορισμού και έτσι επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες επιφάνειας του χαμηλά ανθρακούχου χάλυβα. Το πυρίτιο, το αλουμίνιο και το τιτάνιο θεωρούνται ισχυρά αποξειδωτικά. Στον Πίνακα 1.7 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η επίδραση και άλλων διαφόρων στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.7 Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων.

(Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.520)

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ	ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΧΡΗΣΕΙΣ
Ni	γ-φερρογόνο και γραφιτίζον	10% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί σημαντική αύξηση της εμβαιπτότητας, αύξηση της αντοχής σε ταναφορά και παρεμποδίζει την ανακρυστάλλωση. Προστίθεται, επίσης, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.
Mn	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	3% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας, πολύ μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη μείωση των σημείων M_f και M_s .
Cr	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	Άνευ ορίου στον α-Fe, 12,8% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας, πολύ μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μεγάλη βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση.
Si	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	18,5% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας και αύξηση της σκληρότητας. Δίνει φερριτικούς χάλυβες, με μεγάλους κόκκους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται, επίσης, για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.
Mo	α-φερρογόνο καρβιδιογόνο	37,5% στον α-Fe, 5% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, αύξηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας και παρεμποδίζει την γήρανση. Προστίθεται για αύξηση της αντοχής σε επαναφορά, σε φθορά και διάβρωση και για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.
W	α-φερρογόνο και ισχυρά καρβιδιογόνο	33,0% στον α-Fe, 6% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά, βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση και αποτελεί βασικό στοιχείο των ταχυχαλύβων.
V	α-φερρογόνο και πολύ ισχυρά καρβιδιογόνο	Άνευ ορίου στον α-Fe, 1% στον γ-Fe	Προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, υποβοηθά στο μέγιστο τη διατήρηση της σκληρότητας από δευτερογενή σκλήρυνση. Προστίθεται για επιβελτίωση αντοχής σε επαναφορά και μηχανική φθορά.
Al	α-φερρογόνο και γραφιτίζον	36,0% στον α-Fe, 1,1% στον γ-Fe	Προκαλεί μικρή αύξηση της εμβαιπτότητας και παρεμποδίζει τη μεγέθυνση των κόκκων.
Ti	α-φερρογόνο και ισχυρότατα καρβιδιογόνο	6,0% στον α-Fe, 0,1% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαιπτότητας, μικρή αύξηση της αντοχής σε επαναφορά και παρεμποδίζει τη γήρανση.
Co	γ-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	75,0% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί μείωση της εμβαιπτότητας και μεταθέτει προς τα αριστερά τις καμπύλες TTT. Βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας.

1.5 Κραματωμένοι χάλυβες

Οι κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν μέχρι 1% άνθρακα και στοιχεία προσθήκης από τα οποία Ni, Mn, Cr, Si και Mo θεωρούνται κύριες προσθήκες και V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb ,δευτερεύουσες προσθήκες. Στον Πίνακα 1.8 δίνονται οι κύριες εφαρμογές τους. Οι κραματωμένοι χάλυβες διακρίνονται σε:

- **Ελαφρά κραματωμένους**, με στοιχεία προσθήκης κάτω από 2%.
- **Μετρίως κραματωμένους**, με στοιχεία προσθήκης από 2% έως 10%.
- **Ισχυρά κραματωμένους**, με στοιχεία προσθήκης πάνω από 10%.

ΧΑΛΥΒΕΣ	ΚΥΡΙΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ
Μαγνανιούχοι 1330 1340	Όπου απαιτείται υψηλότερη αντοχή από αυτή των κοινών ανθρακούχων, όπως για την κατασκευή αξόνων, ατράκτων, ελκυστήρων, κλπ.
Μολυβδαινιούχοι 4037	Για την κατασκευή των αξόνων των πίσω τροχών των αυτοκινήτων.
Χρωμιομολυβδαινιούχοι 4130 4140	Σε σχέση με τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες παρουσιάζουν αυξημένη βαπτότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά. Επιδέχονται βαφή σε λάδι και χρησιμοποιούνται για αεροναυπηγικές κατασκευές, άξονες αυτοκινήτων και δοχεία υψηλής πίεσης.
Χρωμιούχοι 5130 5140	Επιδέχεται επιφανειακή κατεργασία ενανθράκωσης. Συγκρινόμενος με τους κοινούς, παρουσιάζει αυξημένη εμβαπτότητα, μηχανική αντοχή και αντοχή σε φθορά.
5160	Χρησιμοποιείται ως χάλυβας έλασης.
Χάλυβες Ni-Cr-Mo 4340	Συγκρινόμενος με τους κοινούς, παρουσιάζει υψηλότερο όριο ελαστικότητας, αντοχή σε ούση και κόπωση και αυξημένη εμβαπτότητα. Χρησιμοποιείται για τμήματα κατασκευών, όπως δέχονται ισχυρές καταπονήσεις, π.χ. σύστημα τροχοπέδησης.
8620 8630 8640	Επιδέχεται επιφανειακή κατεργασία ενανθράκωσης. Χρησιμοποιούνται για κατασκευή ατράκτων και σφυρήλατων εξαρτημάτων όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές αντοχές.
Πυριτιούχοι 9260	Χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελασμάτων.

1.5.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.

Ένας χάλυβας θεωρείται ελαφρά κραματωμένος όταν περιέχει Mn έως 1,5% και Si 0,6% και Nb, V ή Ti έως 0,1% και δεν απαιτείται ελάχιστη περιεκτικότητα, ή δεν προσδιορίζεται, για τα στοιχεία Cr, Co, Mo, W, Zr, Ni. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται μεταξύ 400...650 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 500...850 MPa, ενώ έχουν σημαντικό ποσοστό επιμήκυνσης μέχρι τη θραύση, της τάξης του 14...27%. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων, και η ικανότητα μορφοποίησής τους εν ψυχρώ είναι μικρή. Ο κύριος ρόλος των στοιχείων κραματοποίησης στη κατηγορία αυτή των χάλυβων προσδίδει βελτίωση στην εμβαιπτότητα για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της δυσθραυστότητας μετά από θερμική κατεργασία. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή τμημάτων για τα οποία απαιτούνται υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα (κιβώτια ταχυτήτων, φρένα, άξονες, κλπ).

Παρότι έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες από τους κοινούς, η χρήση τους περιορίζεται λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής τους. Αναφορικά η οικογένεια των χάλυβων αυτών χωρίζεται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

- Χαμηλά ανθρακούχοι χάλυβες βαφής και επαναφοράς (low-carbon quenched and tempered steels).
- Χάλυβες μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα και πολύ υψηλής αντοχής (medium carbon ultrahigh-strength steels).
- Χάλυβες τριβέων (bearing steels).
- Χρωμιο-μολυβδαινιούχοι χάλυβες αντοχής σε ερπυσμό (Cr-Mo heat resistant steels).

1.5.2 Μέτρια και Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες

Οι μέτρια κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10% [3]. Οι ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν προσμείξεις πάνω από 10%. Όσο περισσότερο αυξάνεται το ποσοστό κραματοποιητικών στοιχείων τόσο περισσότερο σύνθετη γίνεται η δομή τους. Οι πιο σημαντικές κατηγορίες κεκραμένων χάλυβων είναι οι εργαλειοχάλυβες διαμόρφωσης (wrought tool steels), εργαλειοχάλυβες κονιομεταλλουργίας (P/M tool steels) οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρανσης (Maraging steels) και περιέχουν μεγάλα ποσοστά βολφράμιου (W), βανάδιου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρώμιου (Cr), νικέλιου (Ni) και κοβάλτιου (Co).

- **Εργαλειοχάλυβες διαμόρφωσης** Συνίσταται κάθε χάλυβα που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή εργαλείων για κοπή και διαμόρφωση άλλων υλικών. Οι χάλυβες αυτής της κατηγορίας πρέπει να αντέχουν στη τριβή και τη κρούση και να μη παραμορφώνονται πλαστικά κατά τη χρήση τους.

Σύμφωνα με το AISI οι κατηγορίες των χάλυβων αυτών είναι οι παρακάτω:

1. Βολφραμιούχοι χάλυβες υψηλής ταχύτητας - Tungsten high-speed steels.
 2. Μολυβδαινιούχοι χάλυβες υψηλής ταχύτητας - Molybdenum high-speed steels.
 3. Ενδιάμεσοι χάλυβες υψηλής ταχύτητας - Intermediate high-speed steels.
 4. Χρωμιούχοι χάλυβες κατεργασιών εν θερμώ - Chromium hot-work steels.
 5. Βολφραμιούχοι χάλυβες κατεργασιών εν θερμώ - Tungsten hot-work steels.
 6. Χάλυβες αέρος μέσης κραματοποίησης κατεργασιών εν ψυχρώ - Air-hardening, medium alloy, cold-work steels.
 7. Χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε C και Cr για κατεργασίες εν ψυχρώ - High carbon, High chromium cold-work steels.
 8. Χάλυβες βαφής σε έλαιο για κατεργασίες εν ψυχρώ - oil hardening cold-work steels.
 9. Χάλυβες αντοχής σε κρούση - Sock-resisting steels
 10. Χάλυβες χαμηλής κραματοποίησης ειδικών χρήσεων - low alloy special purpose steels.
 11. Χαμηλά ανθρακούχοι χάλυβες καλουπιών - low carbon mold steels.
 12. Εργαλειοχάλυβες βαφής στο νερό - water hardening tool steels.
- **Ανοξειδωτοι χάλυβες.** Το κύριο στοιχείο προσθήκης των ανοξειδωτων χάλυβων είναι το χρώμιο, σε ποσοστό τουλάχιστον 11%, και αναπτύχθηκαν για να καλυφθεί η απαίτηση αντοχής σε διαβρωτικό περιβάλλον αλλά και στην οξείδωση από το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά οφείλεται στο σχηματισμό ενός επιφανειακού στρώματος οξειδίου, το οποίο προστατεύει την επιφάνεια του χάλυβα (παθητικοποίηση επιφάνειας). Εκτός από το χρώμιο συνήθως, περιέχονται και μικρά ποσοστά ακαθαρσιών: έως 0,03% S, έως 0,04% P, έως 1% Si και πολύ μικρά ποσοστά Ni, Nb, Cu, Ti, Mo, Al, N . Οι ανοξειδωτοι χάλυβες, οι οποίοι επιδέχονται ωστενιτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες, κατά τη βαφή αποκτούν μαρτενιτική δομή και καλούνται ανοξειδωτοι μαρτενιτικοί χάλυβες. Πρόκειται για χάλυβες με περιεκτικότητα σε χρώμιο μικρότερη του 17% και σε άνθρακα έως 0,5%. Όταν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρή, μικρότερη από 0,08% και μέχρι 0,12%, ο χρωμιούχος χάλυβας, έχει φερριτική δομή σε όλες τις θερμοκρασίες και δεν είναι δυνατό να υποστεί μαρτενιτική βαφή. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται ανοξειδωτοι φερριτικοί, περιέχουν χρώμιο από 12% έως 30% και έχουν κυβική χωροκεντρωμένη

δομή (bcc), όπου και παραμένει σταθερή μέχρι τη θερμοκρασία τήξης τους και συνεπώς οι χάλυβες αυτοί δε μεταβάλλουν τους κατά τη θερμική κατεργασία. Ισχυροποιούνται μόνο με τη ψυχρή παραμόρφωση. Αναλόγως της περιεκτικότητας του χάλυβα σε Cr, Ni και C, ορισμένοι ανοξείδωτοι χάλυβες είναι δυνατό να παρουσιάζουν την κυβική εδροκεντρωμένη δομή του ωστενίτη, ακόμη και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτής του περιβάλλοντος. Οι χάλυβες αυτοί καλούνται ανοξείδωτοι ωστενιτικοί. Γενικά, οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν τις καλύτερες αντιδιαβρωτικές ιδιότητες (μέχρι και θερμοκρασία 900 °C), καλές μηχανικές ιδιότητες και κατεργασιμότητα. Η ωστενιτική δομή σταθεροποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με προσθήκη ενός γάμμα - φερρογόνου στοιχείου (Ni, Mn). Όταν η περιεκτικότητα του στοιχείου αυτού είναι αρκετή η περιοχή σταθερότητας της φάσης γ (ωστενίτης) μεγαλώνει μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ ταυτόχρονα καταστέλλεται η εμφάνιση της φάσης α (φερρίτης). Πρόκειται για μη μαγνητικά υλικά και δεν επιδέχονται θερμική κατεργασία και ισχυροποιούνται με τη διαδικασία της εν ψυχρώ πλαστικής παραμόρφωσης. Με αύξηση του ποσοστού του χρωμίου (18-28%) και τη μείωση του ποσοστού του νικελίου (6-9%), παίρνουμε χάλυβες μικτής ωστενιτοφερριτικής δομής, οι οποίοι καλούνται ανοξείδωτοι ωστενιτοφερριτικοί χάλυβες. Οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες: δεν είναι εύθραυστοι, όπως οι φερριτικοί, και, συγχρόνως, η τιμή του ορίου διαρροής είναι τριπλάσια εκείνης των αντίστοιχων ωστενιτικών ανοξείδωτων χαλύβων. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση, σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση και σε διάβρωση λόγω κόπωσης. Τέλος, αναφορικά, κάποιες ακόμα κατηγορίες ανοξείδωτων χαλύβων είναι οι ανοξείδωτοι χάλυβες χύτευσης, ανοξείδωτοι χυτοχάλυβες ανθεκτικοί στη διάβρωση και ανοξείδωτοι χυτοχάλυβες ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ- ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ

ΔΟΚΙΜΕΣ

2.1 Εισαγωγή

Για την επιλογή ενός υλικού, ώστε να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένη εφαρμογή, ερευνούνται πάντα οι ιδιότητες του. Αυτές, μπορούν να κατανεμηθούν σε τέσσερις κύριους τύπους: φυσικές ιδιότητες, χημικές ιδιότητες, μηχανικές ιδιότητες και ιδιότητες επεξεργασίας.

2.1.1 Φυσικές ιδιότητες των χαλύβων

Δύο από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες αποτελούν, στην επιστήμη της Μηχανολογίας, η πυκνότητα και οι θερμικές ιδιότητες ενός υλικού. Συντελούν βασικοί παράγοντες για την ορθή λειτουργία και επιλογή ενός υλικού που προορίζεται για συγκεκριμένη κατασκευή. Όταν ένα προϊόν σχεδιάζεται για να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι αναγκαίο να ελεγχθούν οι ιδιότητες του στην πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας διότι οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να διαφοροποιηθούν σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Τα μεταλλικά υλικά ταξινομούνται στη κατηγορία των καλών θερμικών αγωγών. Σημαντικές θερμικές ιδιότητες η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής της θερμικής επέκτασης. Εξ ορισμού, η θερμική αγωγιμότητα είναι το ποσοστό ροής της θερμικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου πέρα από έναν κύβο του υλικού που έχει μοναδιαίες διαστάσεις έτσι ώστε η διαφορά θερμοκρασίας σε δύο παράλληλες επιφάνειες του κύβου να είναι 1°C. Ο γραμμικός συντελεστής της θερμικής επέκτασης ορίζεται ως η αύξηση του μήκους, ανά μονάδα μήκους, ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 1°C.

2.1.2 Χημικές ιδιότητες των χαλύβων

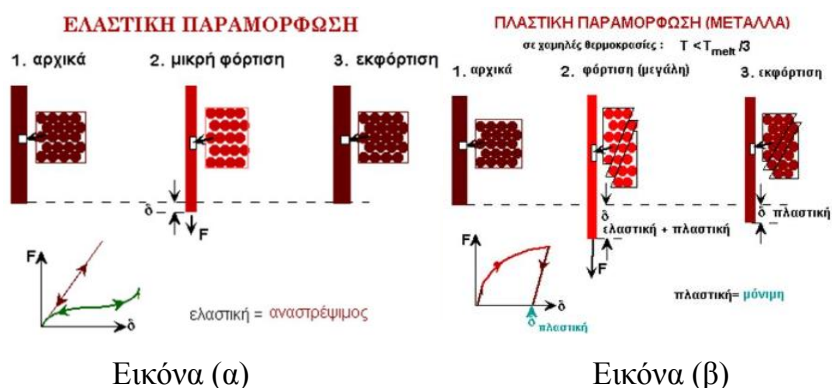
Η αλληλεπίδραση μεταξύ ενός υλικού με το περιβάλλον και τα επιμέρους στοιχεία του (π.χ., οξυγόνο, θείο, χλώριο, άνθρακας), είναι εκείνη που παρέχει πληροφορίες για τις χημικές ιδιότητές του, αλληλεπίδραση γνωστή ως διάβρωση. Η διάβρωση ελαττώνει την απόδοση και την αντοχή του υλικού προκαλώντας αστοχία. Διαχωρίζεται σε δύο τύπους: την υδάτινη διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας και την υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση. Η υδάτινη διάβρωση αναφέρεται στις χημικές αντιδράσεις στην υγρή κατάσταση. Σε αντίθεση, η υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση αναφέρεται στις αντιδράσεις που εμφανίζονται στην αερίωδη κατάσταση. Τα τήγματα ουσίας σε υγρή κατάσταση περιλαμβάνονται σε έναν τύπο διάβρωσης υψηλής θερμοκρασίας γνωστό ως καυτή διάβρωση. Το ουσιαστικότερο αποτέλεσμα της διάβρωσης είναι ότι τα προϊόντα της αντίδρασης υφίσταται απώλεια μεταλλικών στοιχείων. Αυτό κάνει την επιφάνεια του προϊόντος πορώδες. Έτσι το πάχος του υλικού μειώνεται και

συνεπώς μειώνεται και η αντοχή του. Οι ιδιότητες διάβρωσης δίνονται ανάλογα με το ποσοστό απώλειας μετάλλων (αλλαγή σε πάχος ή βάρος) στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα.

2.1.3 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων

Όλα τα υλικά, πολύ περισσότερο τα μέταλλα, επιβάλλεται να εμφανίζουν αποδεκτές τιμές στις μηχανικές ιδιότητές τους προκειμένου να γίνουν χρήσιμα στις διάφορες εφαρμογές. Οι μηχανικές ιδιότητες περιγράφουν την ανταπόκριση του υλικού στις εξωτερικά εφαρμοζόμενες μηχανικές δυνάμεις ή φορτία. Κάθε υλικό αντιδρά σε μια εφαρμοζόμενη δύναμη (γνωστή ως καταπόνηση) με στρέβλωση ή παραμόρφωση, προκαλώντας του μορφολογικές και διαστασιολογικές μεταβολές. Ταυτόχρονα, το υλικό αναπτύσσει εσωτερικές δυνάμεις οι οποίες αντιδρούν στην επίδραση της εφαρμοζόμενης δύναμης, γνωστές ως τάσεις. Η καταπόνηση μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αλλά η τάση μπορεί μόνο να υπολογιστεί από τη γνώση της καταπόνησης.

Για ένα υλικό, το μέγεθος καταπόνησης καθορίζεται από το μέγεθος της εφαρμοζόμενης δύναμης. Διακρίνονται δύο τύποι: ελαστική και πλαστική καταπόνηση (Εικόνα 2.1).



ΕΙΚΟΝΑ 2.1: (α) ελαστική παραμόρφωση (για φορτίο σχετικά μικρό),
(β) πλαστική παραμόρφωση (μεγάλο φορτίο)

Όταν το φορτίο που εφαρμόζεται είναι σχετικά μικρό, η καταπόνηση καλείται ελαστική διότι όταν αποβάλλεται η εφαρμοζόμενη δύναμη, το υλικό αποκτά εξ' αρχής τις διαστάσεις του. Όταν το εφαρμοσμένο φορτίο υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο (το οποίο είναι εξαρτώμενο από το υλικό) το υλικό υφίσταται πλαστική παραμόρφωση δηλαδή, μια μόνιμη αλλαγή στη μορφή ή στις διαστάσεις του. Η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται με την αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου μέχρις ότου τελικά αυτό σπάσει. Τα υλικά που μπορούν εύκολα να παραμορφωθούν πλαστικά θεωρούνται όλκιμα. Το ποσοστό παραμόρφωσης και η θερμοκρασία επηρεάζουν τη πλαστική παραμόρφωση που θα υποστεί ένα υλικό. Σε δεδομένη θερμοκρασία, εάν η δύναμη εφαρμόζεται σχετικά αργά κατά τρόπο ανοδικό, το υλικό μπορεί εύκολα να παραμορφωθεί. Στη

περίπτωση που το φορτίο εφαρμοστεί απότομα και πολύ γρήγορα, το ίδιο υλικό μπορεί να σπάσει χωρίς να υποβληθεί σε υπολογίσιμη παραμόρφωση. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει την ίδια επίδραση με τη μείωση του ποσοστού καταπόνησης.

Το αποτέλεσμα και η συμπεριφορά ενός δεδομένου υλικού από εφαρμοζόμενη δύναμη περιγράφεται από τρία φαινόμενα: την ελαστική παραμόρφωση, την πλαστική παραμόρφωση και τέλος τη θραύση. Το εφαρμοζόμενο φορτίο μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό ανάλογα με το σύνολο των μηχανικών ιδιοτήτων. Εξ ορισμού, ένα στατικό φορτίο, όπως ένα απλό βάρος, εφαρμόζεται μόνο μία φορά.

Τα δυναμικά φορτία είναι ταξινομημένα σε δύο τύπους: κρουστικά φορτία και φορτία κόπωσης. Ένα κρουστικό φορτίο μοιάζει με ένα στατικό φορτίο, δεδομένου ότι μπορεί να είναι μια ενιαία εφαρμογή της δύναμης. Σε αντίθεση με ένα στατικό φορτίο, το ποσοστό παραμόρφωσης είναι πολύ υψηλό και μπορεί να συγκεντρώσει τις τάσεις στα αδύνατα τμήματα του στοιχείου προκαλώντας τη θραύση. Η αντίσταση στη θραύση κάτω από συνθήκες κρούσης μετριέται από το μέγεθος της ενέργειας που απαιτείται για να προκληθεί η θραύση, το οποίο είναι γνωστό ως σφοδρότητα κρούσης. Τα φορτία κόπωσης είναι από τα πιο κοινά δυναμικά φορτία. Σε αυτή την περίπτωση, ένα φορτίο αρκετά μικρότερο από το στατικό φορτίο που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής εφαρμόζεται στο στοιχείο κατ' επανάληψη. Παρότι το φορτίο κόπωσης είναι μικρό, οδηγεί τελικά στη θραύση ύστερα από ορισμένους κύκλους λειτουργίας. Η δύναμη κόπωσης εκφράζεται με τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για να προκληθεί η θραύση, κάτω από μια δεδομένη τάση.

Η αντίσταση στη θραύση ενός υλικού εκφράζεται στα πλαίσια μίας παραμέτρου που αποκαλείται δυσθραυστότητα. Ουσιαστικά είναι το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια ως τη θραύση. Υπάρχουν δύο περιπτώσεις χαρακτηρισμού της παραμέτρου αυτής, σε δυσθραυστότητα ελαστικής περιοχής (resilience, δείκτης R) και σε δυσθραυστότητα πλαστικής περιοχής (toughness, δείκτης T). Συσχετίζεται η τάση που απαιτείται για να διαδοθεί μια υπάρχουσα ρωγμή με το αρχικό μήκος της ρωγμής.

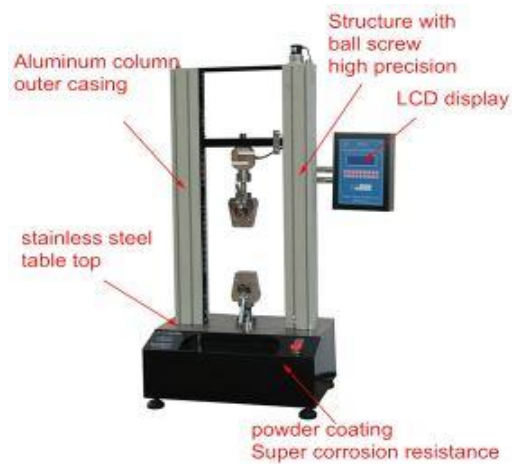
Επίσης, μία ακόμα σημαντική μηχανική ιδιότητα που χρησιμοποιείται συχνά για να αξιολογηθεί η ποιότητα των υλικών είναι η σκληρότητα. Η σκληρότητα γενικά είναι η αντίσταση ενός υλικού στη παραμόρφωση και εξαρτάται άμεσα από τη μέθοδο, καθώς επίσης και από τις συνθήκες μέτρησης. Όταν η σκληρότητα καθοριστεί ακριβώς, υπάρχει άμεσος συσχετισμός μεταξύ της σκληρότητας και της δύναμης. Για παράδειγμα, μια υψηλότερη σκληρότητα απεικονίζει την υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού και κάμψης.

2.2 Μηχανικές δοκιμές

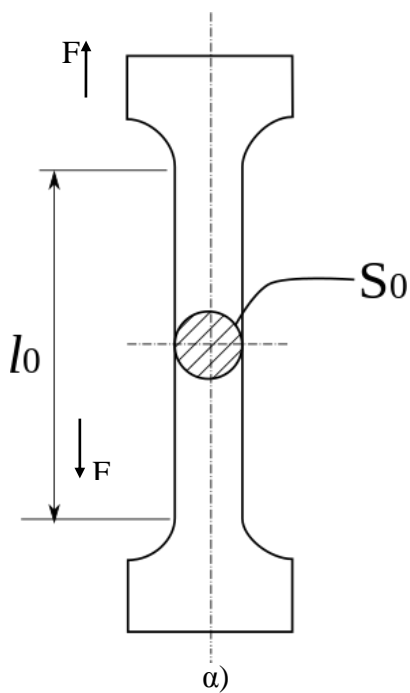
Όλα τα υλικά και ειδικότερα τα μέταλλα πρέπει να εμφανίζουν αποδεκτές τιμές στις μηχανικές δοκιμές ώστε να είναι αποδεκτά και χρήσιμα στις διάφορες εφαρμογές. Οι μηχανικές δοκιμές είναι τυποποιημένες και αναφέρονται στο σχήμα, τη διαδικασία και τις διαστάσεις του δοκιμίου. Επίσης στα όργανα που χρησιμοποιούνται και η βαθμονόμηση τους, αλλά και στην επεξεργασία και διατύπωση των αποτελεσμάτων. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται διότι προσδιορίζουν ένα υλικό. Σε κάποιες περιπτώσεις όμως εφαρμόζονται με σκοπό τον έλεγχο προϊόντων. Σε αυτήν την περίπτωση διατηρούνται οι βασικές αρχές της δοκιμής αλλά υπάρχουν διαφοροποιήσεις σχετικά με την γεωμετρία, τις διαστάσεις των δοκιμίων και τον συμβολισμό των βασικών μεγεθών.

2.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Η πιο δεδομένη πειραματική μέθοδος για να το προσδιορισμό της αντοχής και των μηχανικών ιδιοτήτων είναι η δοκιμή εφελκυσμού [4]. Δίνει πληροφορίες για τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού, τον χαρακτήρα και το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης, το όριο διαρροής, την εφελκυστική αντοχή, και την δυσθραυστότητα. Η δοκιμή αυτή περιλαμβάνει τη πάκτωση του υπό εξέταση δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού όπου και υποβάλλεται σε μονοαξονικό προοδευτικά φορτίο προκαλώντας την επιμήκυνσή του, μέχρι και τη τελική του θράυση. Σαν μηχανές εφελκυσμού χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις οι οποίες είναι ικανές να εφαρμόσουν ελεγχόμενο εφελκυστικό φορτίο και μπορούν να μετρούν με ακρίβεια τις δυνάμεις, τις επιμηκύνσεις και τις παραμορφώσεις καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής (Εικόνα 2.2). Κατά τη δοκιμή επίσης, καταγράφεται συνήθως το μέτρο των ίσων και αντίθετων δυνάμεων F που ασκούνται πάνω στο δοκίμιο (Εικόνα 2.3α) και η προκαλούμενη επιμήκυνση του δοκιμίου $\Delta l=l-l_0$. Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτείται η διαμόρφωση τυποποιημένων δοκιμίων (tensile specimen) δηλαδή, συγκεκριμένης μορφής και διαστάσεων έτσι ώστε τα αποτελέσματα της δοκιμής να είναι συμβατά με τις διεθνείς προδιαγραφές. Το δοκίμιο είναι ράβδος κυκλικής διατομής ή ένα έλασμα με τυποποιημένες διαστάσεις και διακρίνονται από το επίμηκες τμήμα τους, όπου εκεί πραγματοποιείται η μέτρηση τη επιμήκυνσης και της ελάττωσης της διατομής αλλά και τη παρατήρηση ου δοκιμίου μετά τη θράυση. Τα ακραία σημεία ή κεφαλές προσαρμογής είναι αυτά στα οποία συγκρατείται το δοκίμιο στις αρπάγες της μηχανής (Εικόνα 2.3β).



EIKONA 2.2: Μηχάνημα δοκιμής εφελκυσμού[5]



Ευρώπη	$l_0=10d_0$ ή $l_0=5d_0$
Η.Π.Α	$l_0= 4d_0$ με $l_0= 2$ in ή $l_0= 1/2$
Αγγλία	$l_0= d_0$ με $l_0= 2$ in ή $l_0= 564$ in

β)

EIKONA 2.3:(α) Γεωμετρία των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή εφελκυσμού.

(β) Πίνακας με τυποποιημένες διαστάσεις κυλινδρικών δοκιμίων εφελκυσμού [1]

A_0 η αρχική διατομή του δοκιμίου και l_0 το αρχικό του ωφέλιμο μήκος, τότε ορίζεται:

Συμβατική τάση: $\sigma = \frac{F}{A_0}$

Συμβατική παραμόρφωση: $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$

Οι μετρήσεις κάθε δοκιμής αποτυπώνονται σε διάγραμμα $\sigma - \epsilon$. Προφανώς, οι καμπύλες $F - \Delta l$ και $\sigma - \epsilon$ έχουν ακριβώς την ίδια μορφή, διότι A_0 και l_0 είναι σταθεροί αριθμοί.

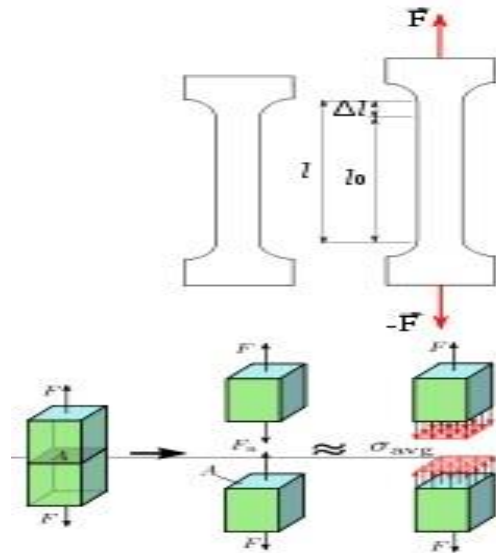
Ορθή τάση

Έστω ότι στο άκρο μιας ευθύγραμμης μακριάς ράβδου εφαρμόζεται μία εξωτερική δύναμη P κάθετα στην διατομή της A_0 και ότι η δύναμη αυτή αντισταθμίζεται με μία ίση και αντίθετη δύναμη που εξασκείται στο άλλο άκρο της (Εικόνα 2.4α). Τότε η ράβδος φορτίζεται αξονικά σε εφελκυσμό. Αν κάνουμε μια τομή στο επίπεδο Π , παράλληλη στην διατομή, τότε οποιοδήποτε από τα δυο τμήματα της ράβδου βρίσκεται σε ισορροπία, πράγμα που σημαίνει ότι η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων F που ασκείται στην τομή ενός εκ των δύο τμημάτων (Εικόνα 2.4β ή 2.4γ) είναι ίση και αντίθετη με την εξωτερική δύναμη P στο άκρο της ράβδου. Επομένως, ασκείται μια εσωτερική δύναμη $F=P$ κάθετη σε κάθε διατομή A_0 και κάθε σημείο της διατομής υπόκειται σε μια σταθερή ορθή τάση:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{P}{A_0}$$

Η τάση αυτή λέγεται **συμβατική** επειδή η δύναμη P διαιρείται με το αρχικό εμβαδό της διατομής. Όμως η διατομή της ράβδου μειώνεται με την επιβολή φορτίου. Διαίρεση του φορτίου με το εμβαδόν που έχει η διατομή A τη στιγμή που αυτό επιβάλλεται, δίνει την **πραγματική τάση**. Κάθε τάση που προκαλείται από δύναμη κάθετη στην επιφάνεια του κύβου ονομάζεται **ορθή τάση**. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου η ασκούμενη δύναμη τείνει να επιφέρει επιμήκυνση του στερεού ονομάζεται **εφελκυστική** και έχει θετικό πρόσημο.

Σε αντίθετη περίπτωση θα ονομαζόταν **θλιπτική** και θα είχε αρνητικό πρόσημο.



ΕΙΚΟΝΑ 2.4 Δυνάμεις ορθής τάσης

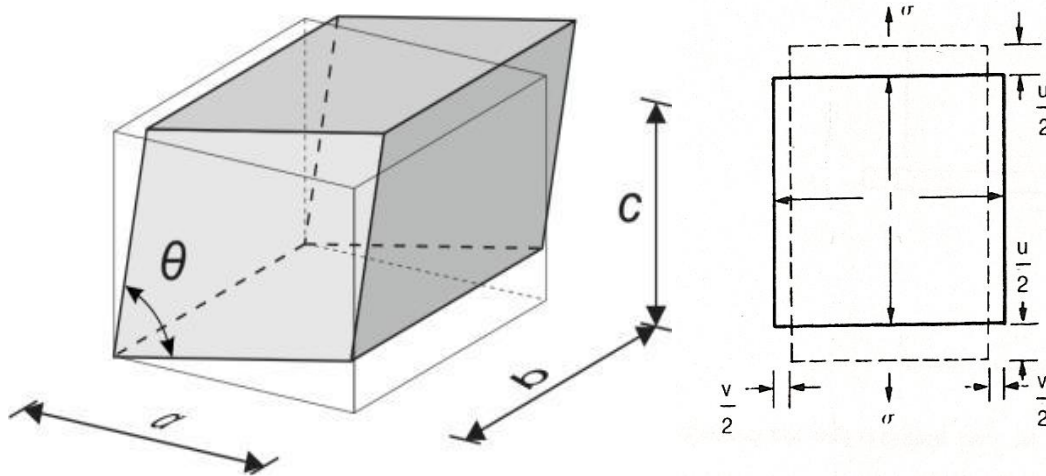
Ορθή και Διατμητική παραμόρφωση

Η απόκριση των μεταλλικών υλικών στις εξωτερικές δυνάμεις - τάσεις ονομάζεται παραμόρφωση. Τα υλικά εμφανίζουν δύο ειδών συμπεριφοράς: την **ελαστική** και την **πλαστική συμπεριφορά**. Στην ελαστική το υλικό υπόκειται τάση τέτοια που καταπονείται ελαστικά, δηλαδή μετά την απομάκρυνση του φορτίου το υλικό επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις. Πάνω από ένα όριο εφαρμογής της τάσης όπου είναι συγκεκριμένο για κάθε υλικό εμφανίζονται μόνιμες μεταβολές στο σχήμα του σώματος οι οποίες καλούνται **πλαστικές παραμορφώσεις (πλαστική συμπεριφορά)** [6]. Όταν μεταβάλλεται το μήκος της και η διάμετρος του δοκιμίου χωρίς να μεταβολή του κυλινδρικού σχήματός του κατά τη δοκιμή εφελκυσμού τότε το υλικό υφίσταται ορθή (διαμήκη) παραμόρφωση. Από την άλλη πλευρά, όταν το δοκίμιο υφίσταται διατμητικές δυνάμεις, δηλαδή δυνάμεις που τείνουν τα περιστρέψουν ένα σώμα τότε θα παραμορφωθεί το σχήμα του και η παραμόρφωση αυτή καλείται διατμητική παραμόρφωση. Στην Εικόνα 2.5 η **εφελκυστική τάση σ** που εφαρμόζεται σε έναν κύβο προκαλεί επιμήκυνση u παράλληλα στον άξονα φόρτισης, την **συμβατική εφελκυστική παραμόρφωση**:

$$\varepsilon_n = \frac{u}{l}$$

Κατά τη διάρκεια αυτής της παραμόρφωσης ο κύβος τείνει ταυτόχρονα να συμπιεστεί κάθετα στον άξονα της φόρτισης. Αν οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές ο βαθμός συμπίεσης δίνεται από το **λόγο του Poisson** (Εικόνα 2.5α):

$$\nu = - \frac{\text{πλευρική παραμόρφωση}}{\text{αξονική παραμόρφωση}}$$

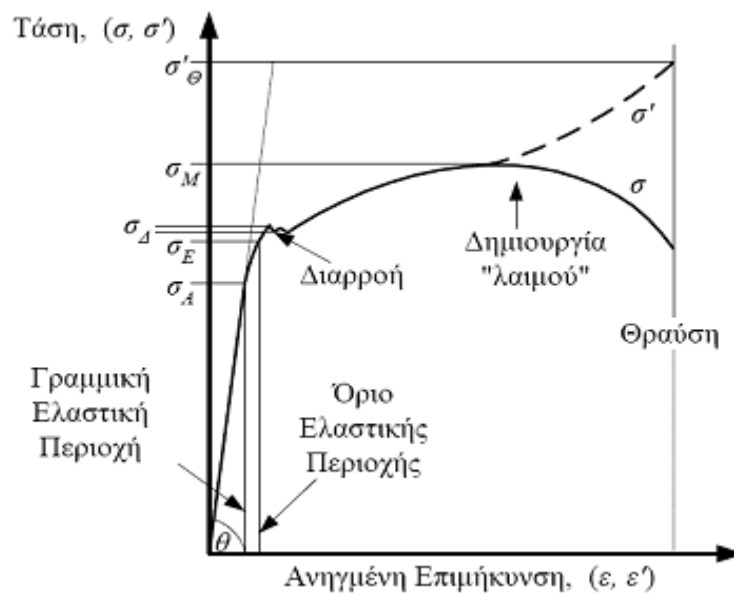


ΕΙΚΟΝΑ 2.5: (α) Εφελκυστική παραμόρφωση, (β) Διατμητική παραμόρφωση

Συμβατική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Κατά τη δοκιμή σε εφελκυσμό, τα διάφορα στοιχεία και τιμές δίνονται με τη βοήθεια ενός διαγράμματος - καμπύλης. Η καμπύλη είναι γνωστή ως καμπύλη μηχανικής τάσης - μηχανικής παραμόρφωσης.

Στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (Εικόνα 2.6) διακρίνεται μία ελαστική περιοχή, και έπειτα, η πλαστική περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες [7].

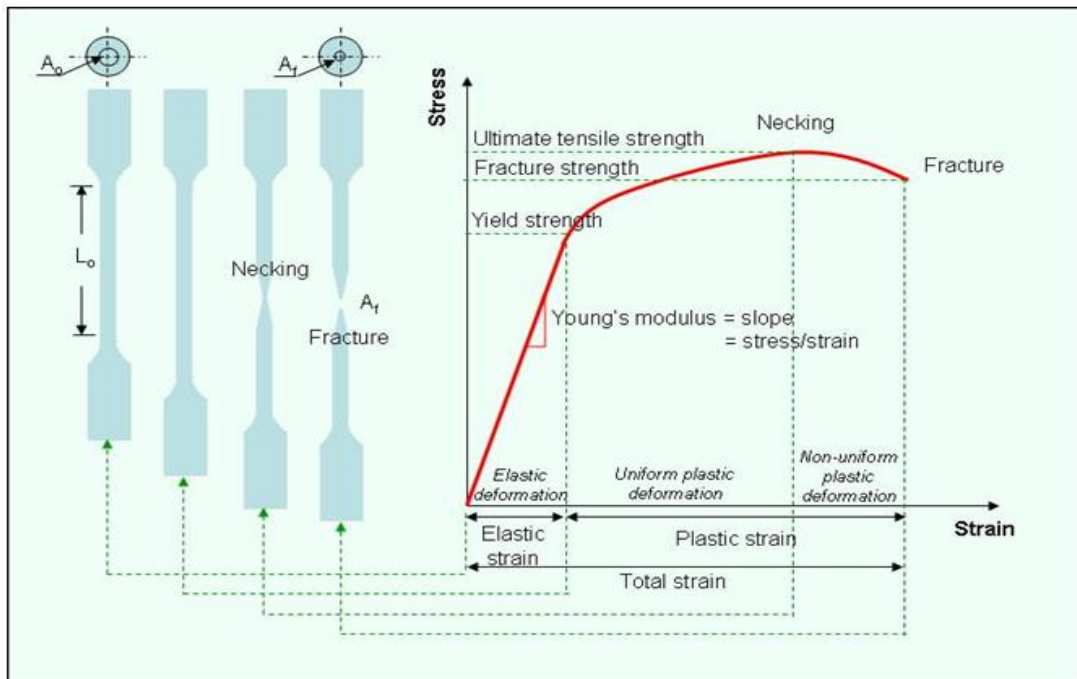


Εικόνα 2.6 : Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης

Αυτές οι περιοχές διαχωρίζονται στη καμπύλη από το όριο ελαστικότητας, σ_e . Κατά τη δοκιμή το υλικό αρχικά παραμορφώνεται ελαστικά. Στην ελαστική περιοχή η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης και η σχέση των δύο είναι γραμμική. Στο σημείο σ_δ της καμπύλης αρχίζει να γίνεται αισθητή η πλαστική παραμόρφωση και αντιστοιχεί στην τάση διαρροής ή στο όριο διαρροής. Επειδή το όριο αυτό είναι δύσκολο να προσδιοριστεί απόλυτα το σημείο έναρξης της διαρροής, συνήθως χρησιμοποιείται το **συμβατικό όριο διαρροής** $\sigma_{p0,2\%}$ που αντιστοιχεί σε μια συμβατική παραμένουσα παραμόρφωση του δοκιμίου **0,2%**. Κάποια υλικά δε παρουσιάζουν γραμμικό τμήμα στη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και έτσι το σύνηθες είναι να ορίζεται το όριο διαρροής ως τάση, η οποία δημιουργεί κάποια συνολική παραμόρφωση.

Μετά το όριο διαρροής και μέχρι λίγο πριν το σημείο σ_M αντιστοιχεί στην περιοχή της ομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης. Αν και ξεπερνώντας το όριο διαρροής θεωρητικά θα επερχόταν θραύση αυτό δε συμβαίνει διότι το φορτίο εφαρμόζεται παράλληλα στη δομή προκαλώντας επιμήκυνση των κόκκων με αποτέλεσμα να διατηρείται η αντοχή του. Έτσι, στη περιοχή αυτή απαιτείται αύξηση της τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης για περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση, και η κλίση της καμπύλης είναι αύξουσα έως μία μέγιστη τιμή της τάσης, τη **μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό**, σ_{UTS} όπου πρόκειται ουσιαστικά για το λόγο της μέγιστης τιμής του φορτίου P_{max} προς την αρχική διατομή του δοκιμίου A_0 . Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται **ενδοτράχυνση ή κράτυνση**.

Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η διατομή του δοκιμίου μειώνεται. Όταν η τάση πλησιάζει την τιμή της μέγιστη αντοχής, εμφανίζεται σε κάποιο σημείο του δοκιμίου τοπική αστάθεια με τη μορφή μιας στένωσης, γνωστής ως λαιμός, σημείο σ_M . Το σημείο αυτό χαρακτηρίζεται ως **περιοχή αστάθειας στον εφελκυσμό** και επιτρέπει την επιβολή τριαξονικής καταπόνησης στο δοκίμιο. Ο λαιμός αυξάνει ραγδαία όσο αυξάνει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου μέχρι τη θραύση (αποκόλληση) του δοκιμίου (Εικόνα 2.7), στην περιοχή της ανομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης.



ΕΙΚΟΝΑ 2.7: Στάδια όλκιμης θραύσης

Ελαστικότητα

Στην περιοχή της ελαστικής καταπόνησης (τμήμα ΟΑ στην Εικ.2.6) ισχύει ο **νόμος του Hooke** όπου η τάση είναι σ είναι ευθέως ανάλογη της παραμόρφωσης ε :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{ή} \quad E = \sigma / \varepsilon$$

όπου ο συντελεστής E είναι το μέτρο του Young ή μέτρο ελαστικότητας (tensile modulus) και μετριέται σε μονάδες πίεσης (MPa, Gra).

Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίζεται από τη κλίση της γραμμής στη καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης και αποδίδει τον βαθμό αντίστασης ενός υλικού στην ελαστική παραμόρφωση δηλαδή το μέτρο της ακαμψίας του υλικού. Είναι φυσική ιδιότητα του υλικού και ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας όταν δεν λαμβάνει χώρα αλλαγή στην κρυσταλλική δομή του υλικού.

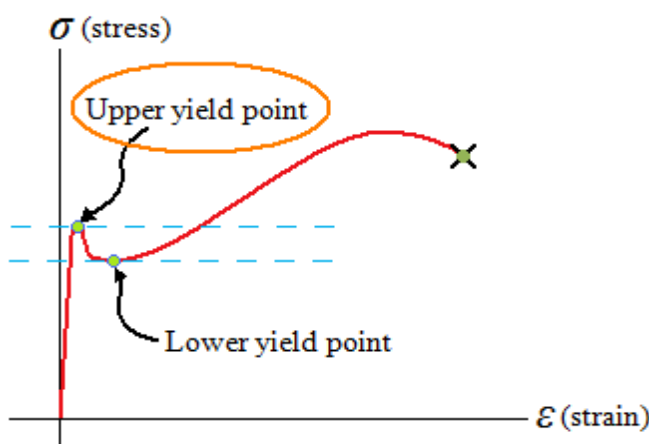
Ως **όριο αναλογίας**, σ_a ορίζεται η μέγιστη τιμή της τάσης στην οποία η παραμόρφωση συνεχίζει να παραμένει γραμμικά ανάλογη προς την τάση (τιμή τάσης στο σημείο σ_a –Εικ.2.6). Το τμήμα της ελαστικής περιοχής στο οποίο έχουμε γραμμική σχέση μεταξύ των συμβατικών τάσεων και παραμορφώσεων είναι πολύ περιορισμένη σε πολλά υλικά. [8].

Το **όριο ελαστικότητας** (τάση στο σημείο σ_e -Εικ.2.6) είναι η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ένα υλικό χωρίς να υποστεί μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Το όριο ελαστικότητας εξακολουθεί να υφίσταται ακόμα κι αν δεν υπάρχει περιοχή γραμμικής ελαστικότητας.

Το όριο διαρροής

Το **όριο διαρροής**, σ_y είναι η τάση, κατά την οποία αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση και αρχίζει να αυξάνεται η παραμόρφωση χωρίς να απαιτείται αύξηση της τάσης. Σε ορισμένα υλικά (πχ. χάλυβες) το φαινόμενο της διαρροής είναι φανερό στη καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και το δοκίμιο συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς αύξηση του φορτίου. Μερικές φορές μάλιστα εμφανίζεται μία απότομη πτώση του φορτίου. Αυτό συμβαίνει σε κάποιο σημείο όπου καλείται **ανώτερο όριο διαρροής**. Στη συνέχεια το φορτίο παραμένει στη πτώση αυτή σε κάποιο σημείο, όπου τώρα καλείται **κατώτερο όριο διαρροής**. Έτσι εμφανίζεται το **ανώτερο και το κατώτερο όριο διαρροής** (σημεία Δ και Δ' -Εικ.2.8).

Σε πολλές περιπτώσεις το όριο διαρροής δεν μπορεί να εντοπιστεί εύκολα και χρησιμοποιείται το **συμβατικό όριο διαρροής** $\sigma_{p0,2\%}$.



EIKONA 2.8

Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό

Η μέγιστη τιμή της τάσης στη συμβατική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης ονομάζεται **μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ή αντοχή σε εφελκυσμό**, σ_m (τάση στο σημείο σ_m της καμπύλης –Εικ. 2.6). Το όριο διαρροής και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό αυξάνονται σημαντικά στις χαμηλές θερμοκρασίες και ελαττώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας [9].

Ολκιμότητα

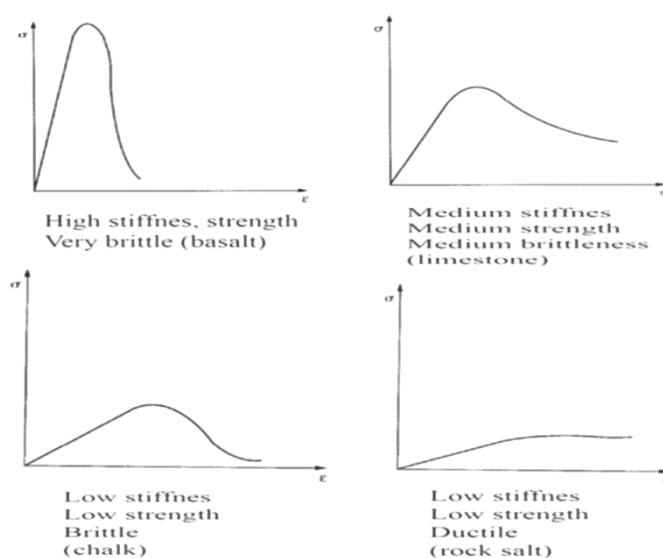
Ολκιμότητα ονομάζεται η ικανότητα ενός υλικού να παραμορφώνεται πλαστικά ανεξάρτητα από το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάστηκαν για να προκληθεί η μόνιμη παραμόρφωση. Η ολκιμότητα μετριέται:

- με την παραμένουσα επιμήκυνση μετά από την θραύση.
- με τη μείωση της διατομής του δοκιμίου στο σημείο που αποκολλήθηκε.

Δυσθραυστότητα

Η υψηλή ολκιμότητα και η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό είναι δύο ιδιότητες που σπάνια συμβαδίζουν. Η δυσθραυστότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά μηχανική ενέργεια ανά μονάδα όγκου χωρίς να υφίσταται θραύση. Επιτρέπει να προβλεφθεί αν ένα υλικό συμπεριφέρεται ως ψαθυρό ή ως όλκιμο. Το μέγεθος αυτό είναι ίσο με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (Εικόνα 2.9).

Σημαντικό ρόλο έχει η περιοχή καταπόνησης όπου γίνεται η απορρόφηση αυτής της ενέργειας. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν δύο τρόποι χαρακτηρισμού του μεγέθους αυτού και χωρίζεται σε δυσθραυστότητα ελαστικής περιοχής (resilience, δείκτης R) και σε δυστραυστότητα πλαστικής περιοχής (toughness, δείκτης T), όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 2.1.3.



EIKONA 2.9: (α) Υλικό με χαμηλή ολκιμότητα και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό

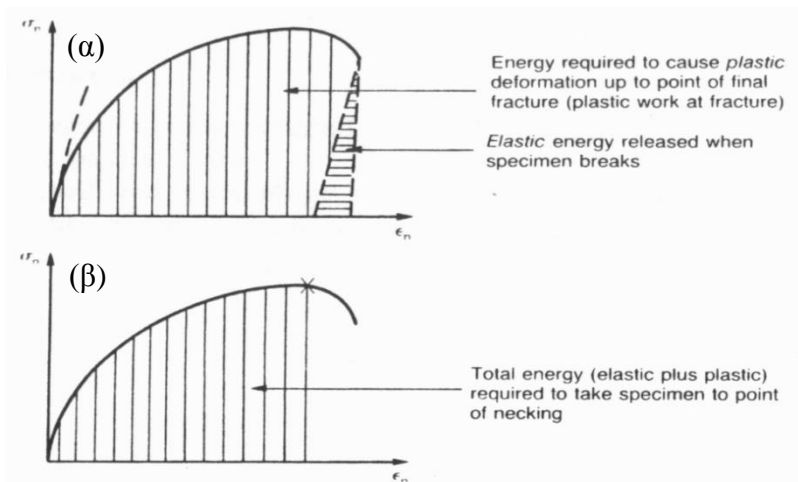
(β) Υλικό με υψηλή ολκιμότητα και χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό

(γ) Υλικό με ικανοποιητική ολκιμότητα και αντοχή σε εφελκυσμό

Η δυσθραυστότητα ελαστικής περιοχής είναι η ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια υπό κρουστικό φορτίο όπου και παραμορφώνεται ελαστικά, και να επανέρχεται φυσικά στις αρχικές του διαστάσεις καθώς αποφορτίζεται. Η ιδιότητα αυτή είναι η ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου U_0 , όπου απαιτείται για να φορτίσει το υλικό από μηδενική εντατική κατάσταση μέχρι το όριο διαρροής, και καλείται μέτρο δυσθραυστότητας ελαστικής περιοχής U_R .

Η δυσθραυστότητα πλαστικής περιοχής είναι η ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια, στη πλαστική περιοχή, υπό κρουστικό φορτίο χωρίς να υφίσταται θραύση. Η ιδιότητα αυτή καλείται, μέτρο δυσθραυστότητας της πλαστικής περιοχής ή απλά μέτρο δυσθραυστότητας U_T

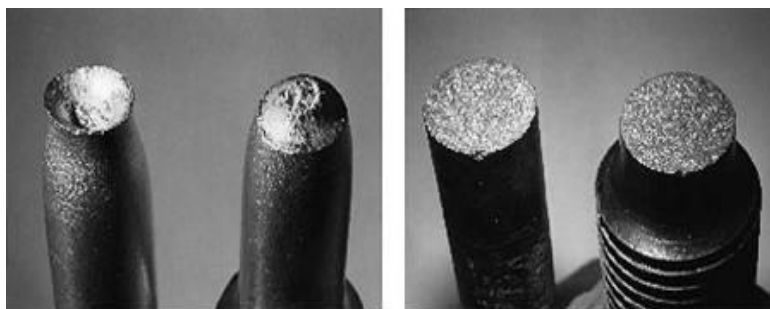
και στην ουσία είναι η συνολική επιφάνεια υπό την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού. Οι ενέργειες και των δύο μεγεθών απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10.



ΕΙΚΟΝΑ 2.10: (α) Ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης (έργο πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση) και ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης (ελαστική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την αποκόλληση) μέχρι τη θραύση.
(β) Συνολική ενέργεια (ελαστική και πλαστική) που απαιτείται μέχρι το σημείο έναρξης σχηματισμού λαιμού.

Όλκιμη και ψαθυρή θραύση

Ανάλογα με το βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που προηγείται της αποκόλλησης, η εφελκυστική θραύση χωρίζεται στην όλκιμη και την ψαθυρή (Εικόνα 2.11). Στην περίπτωση της όλκιμης θραύσης η ελάττωση της διατομής στη περιοχή της αποκόλλησης είναι σημαντική ενώ στην περίπτωση της ψαθυρής είναι αμελητέα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.11: (α) Όλκιμη θραύση μαλακού χάλυβα και
(β) Ψαθυρή θραύση φαιού χυτοσιδήρου

Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

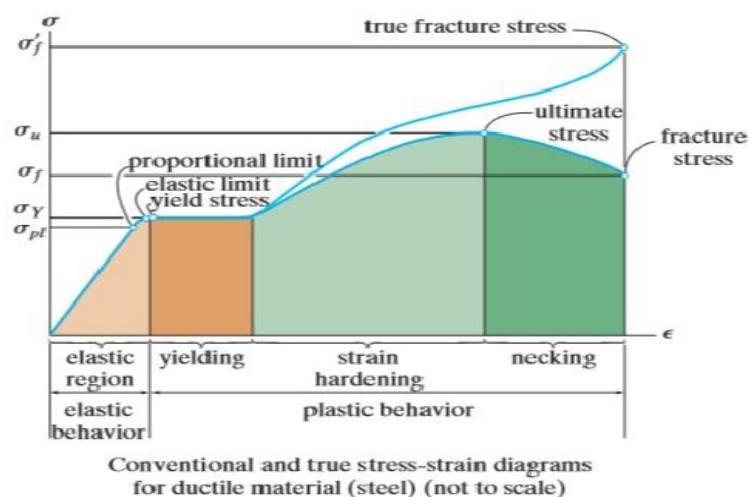
Η μορφή του **συμβατικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης** δεν αποδίδει απόλυτα το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης κράτυνσης, δηλαδή της συνεχούς σκλήρωσης του μεταλλικού

σώματος όσο αυξάνεται η παραμόρφωσή του, η οποία συνοδεύεται από μείωση της διατομής του, χαρακτηριστικό παράδειγμα η δημιουργία λαιμού στα όλκιμα μέταλλα.. Αυτό συμβαίνει, διότι η συμβατική τάση και παραμόρφωση αναφέρονται καθ' όλη τη δοκιμή, στις τιμές των αρχικών διαστάσεων του δοκιμίου και όχι στη πραγματική στιγμιαία διατομή A_i και στο στιγμιαίο ωφέλιμο μήκος l . Επειδή η κάθετη διατομή του δοκιμίου μειώνεται συνεχώς το φορτίο που απαιτείται για τη παραμόρφωση μειώνεται δραστικά επίσης. Η μέση τάση η οποία βασίζεται στην αρχική διατομή επίσης ελαττώνεται προκαλώντας τη πτώση της συμβατικής (μηχανικής) καμπύλης έπειτα το υψηλότερο σημείο φορτίου έως και τη θραύση του δοκιμίου. Έτσι αν και η παραμόρφωση μετράται στιγμιαία τότε η καμπύλη που προκύπτει καλείται **πραγματική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης**.

Συμβατική τάση:
$$\sigma_{\text{eng}} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Συμβατική παραμόρφωση:
$$\varepsilon_{\text{eng}} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Μόνο αν ληφθούν υπόψη οι στιγμιαίες πραγματικές των τάσεων και των αντίστοιχων παραμορφώσεων γίνεται αυτό το φαινόμενο αισθητό. Η παραπάνω ιδιότητα δεν ισχύει στις συμβατικές παραμορφώσεις και γι' αυτό όσο το μεταλλικό σώμα έχει μεγαλύτερη πλαστικότητα τόσο περισσότερο αποκλίνει η συμβατική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης από την πραγματική (Εικόνα 2.12).



ΕΙΚΟΝΑ 2.12: Συμβατική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (engineering) σε σχέση με την πραγματική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (true)

Από την πραγματική καμπύλη μπορούν να προσδιοριστούν κάποια βασικά μεγέθη για το χαρακτηρισμό ενός υλικού κατά τη δοκιμή του εφελκυσμού. Η πραγματική τάση στο μέγιστο φορτίο όπου είναι και η πραγματική αντοχή σε εφελκυσμό. Επίσης, η πραγματική τάση στη θραύση η οποία είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια λόγω της παρουσίας τριαξονικής εντατικής κατάστασης στη θραύση.

2.2.2 Κλασική δοκιμή θλίψης

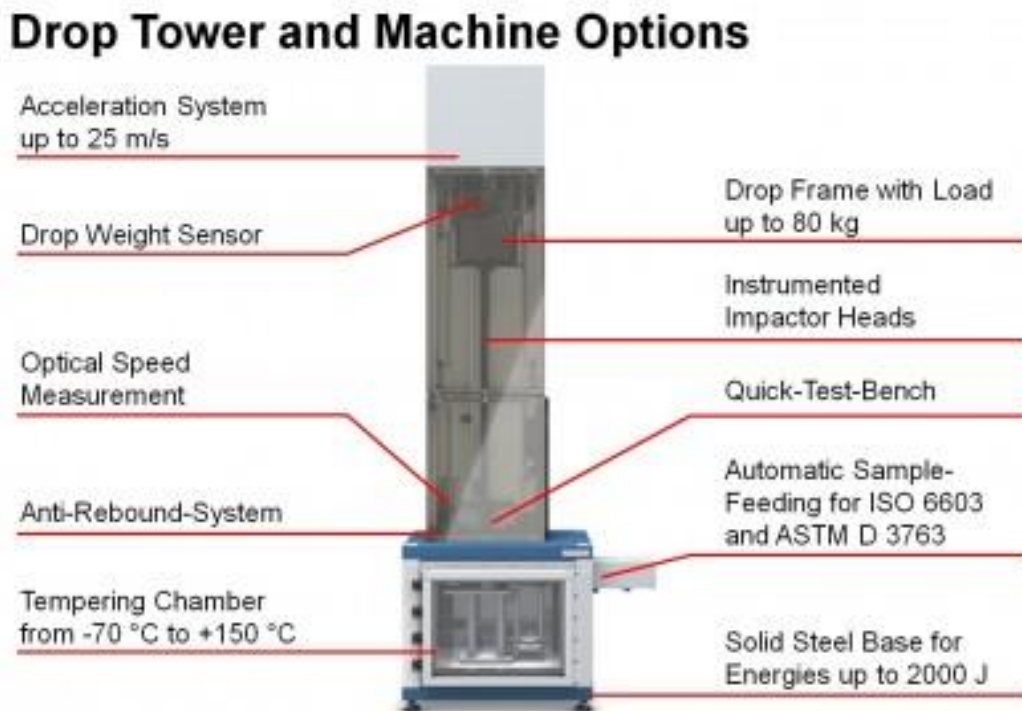
Η δοκιμή σε θλίψη χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στη κλασική δοκιμή σε θλίψη και σε θλίψη υπό υψηλή ταχύτητα παραμόρφωσης. Η κλασική δοκιμή σε θλίψη των μετάλλων είναι η δοκιμή κατά την οποία ένα τυποποιημένο δοκίμιο καταπονείται με μία δύναμη η οποία εφαρμόζεται κάθετα στην διατομή του με τάση να μειώνει την επιμήκη διάστασή του και να αυξάνει τη διάμετρό του (Εικόνα 2.13). Τα δοκίμια θλίψης είναι κυλινδρικά ή έχουν μορφή δακτυλίου. Σε πολλές περιπτώσεις η δοκιμή εκτελείται υπό υψηλές θερμοκρασίες υπάρχουν ειδικές διατάξεις οι οποίες επιτρέπουν την παράλληλη θέρμανση του δοκιμίου. Επίσης η λίπανση είναι σημαντικός παράγοντας για την αποφυγή της "βαρελοποίησης" της μορφής κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής. Λαμβάνεται καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και με κατάλληλη μετρητική διάταξη καταγράφει την πραγματική τάση ροής (σ) και την πραγματική παραμόρφωση (τ). Για δοκίμιο με αρχικό μήκος μικρότερο του τριπλάσιου της αρχικής διατομής η θλίψη δεν οδηγεί σε θραύση παρά μόνο στα ψαθυρά υλικά. Για δοκίμια με μήκος μεγαλύτερο πρόκειται για λυγισμό. Στις συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές θλίψης μεταλλικών υλικών, εάν πρόκειται για όλκιμα υλικά ορίζεται η συμβατική τάση αστοχίας σε θλίψη σ_a , αν δε για ψαθυρά υλικά, η συμβατική τάση θραύσης σ_{θ} [10].



ΕΙΚΟΝΑ 2.13. Δοκιμή θλίψης

2.2.2.1 2.2.2.1 Δοκιμή σε θλίψη υπό υψηλή ταχύτητα παραμόρφωσης

Η δοκιμή αυτή στηρίζεται στην ελεύθερη πτώση ενός φορτίου σε κατάλληλο διαμορφωμένο δοκίμιο. Πραγματοποιείται από δεδομένο ύψος και δημιουργεί την εφαρμογή μεγάλων φορτίων με ενδιάμεσες τιμές της ταχύτητας παραμόρφωσης. Η δοκιμή αυτή εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη με θραύση των δοκιμίων, στον προσδιορισμό της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης κατά τη θλίψη των δοκιμίων και στην εκτίμηση της ορθότητας των διαστάσεων δοκιμίων τα οποία καταπονούνται σε θλιπτικά φορτία. Στη δοκιμή αυτή πρέπει να τηρούνται δύο σημαντικές προσεγγίσεις όπου οι θλιπτικές τάσης - παραμόρφωσης απαιτούν η ταχύτητα παραμόρφωσης να μη μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διεξαγωγή της και είναι σημαντικός ο υπολογισμός της επίδρασης των υποκρίσιμων φορτίων στο δοκίμιο.



EIKONA 2.14 Πειραματική διάταξη της τεχνικής.

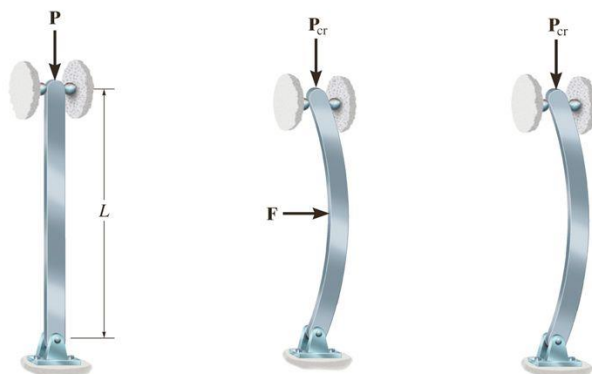
2.2.3 Δοκιμή σε λυγισμό (κάμψη)

Η καταπόνηση σε κάμψη ή σε λυγισμό εφαρμόζεται για να προσδιοριστεί η ικανότητα του υλικού σε ελατότητα (ολκιμότητα) να εκτιμηθεί η αντίστοιχη αντοχή. Οι δοκιμές κάμψης διαφέρουν από τις άλλες μηχανικές καταπονήσεις διότι δεν έχουν σχεδιαστεί για να αποδίδουν ποσοτικό αποτέλεσμα. Οι περισσότερες εφαρμόζονται για την αποδοχή-απόρριψη του υλικού με βασικό κριτήριο την εμφάνιση ρωγμής στη κυρτή επιφάνεια του δοκιμίου [11].

Η δοκιμή σε λυγισμό χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, στην δοκιμή ολκιμότητας λυγισμού και στην δοκιμή αντοχής λυγισμού. Η δοκιμή ολκιμότητας λυγισμού προσδιορίζει τη μικρότερη ακτίνα γύρω από την οποία ένα δοκίμιο έχει την ικανότητα να καμφθεί χωρίς να εμφανίσει στην επιφάνειά του ρωγμές. Η ακτίνα αυτή ονομάζεται ελάχιστη ακτίνα λυγισμού και εκφράζεται ως το πολλαπλάσιο του πάχους (t) του. Η δοκιμή αυτή οι διατάξεις πρέπει να είναι κατασκευασμένα από ανθεκτικά υλικά για να μην υφίστανται τα ίδια παραμορφώσεις. Η προετοιμασία των τυποποιημένων δοκιμίων εστιάζεται στη επιπεδοποίηση της επιφάνειας τους και η κατασκευή στον τρόπο που κόβονται τα δοκίμια κατά τη διέλασή τους. Η δοκιμή αντοχής λυγισμού πραγματοποιείται με στόχο τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας σε λυγισμό και της αντοχής σε λυγισμό επίπεδων μεταλλικών προϊόντων (Εικόνα 2.15).

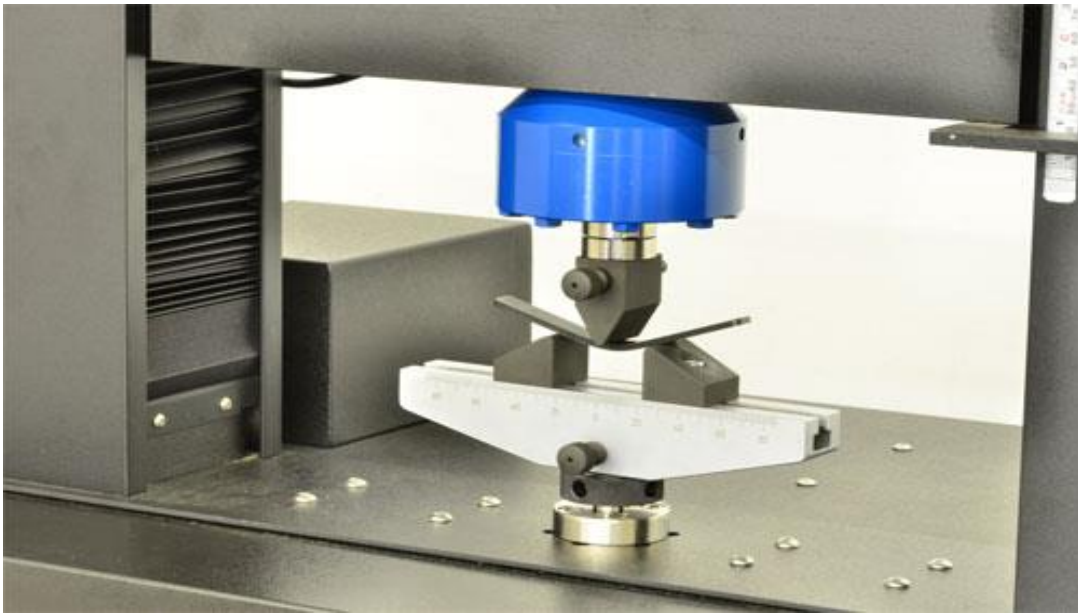
Ideal Column Buckling

Ideal Column : Pin supports at both ends
 Homogenous material
 Load applied through centroid
 Linearly elastic
 Column bends in a single plane



EIKONA 2.15 Δοκίμια αντοχής σε λυγισμό.

Στην Εικόνα 2.16 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής.

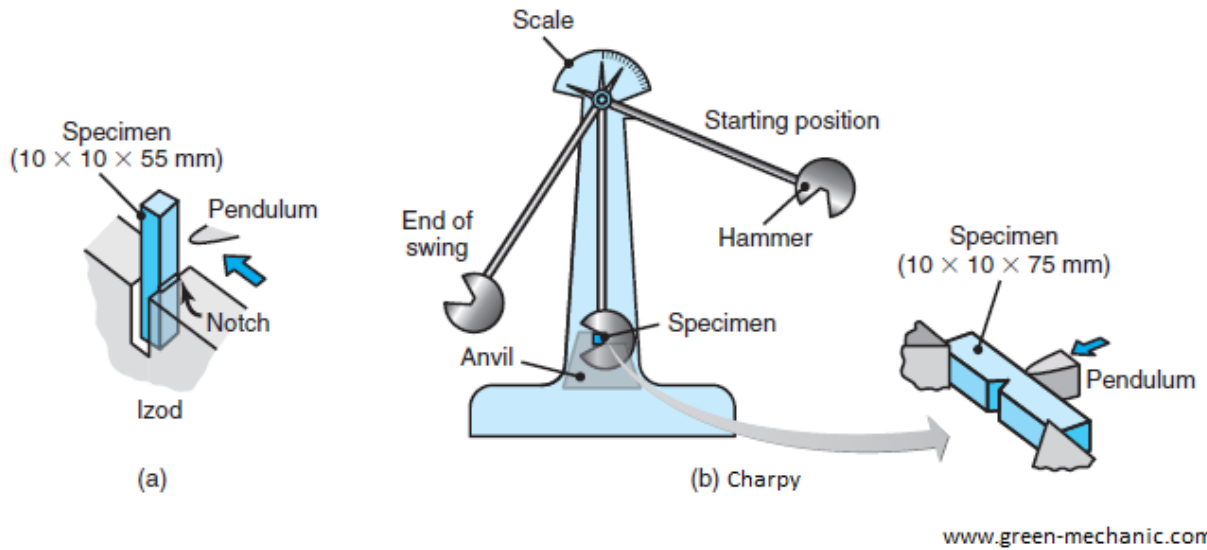


EΙΚΟΝΑ 2.16 Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή κάμψης.

2.2.4 Δοκιμή κρούσης

Αν η καταπόνηση ασκείται δυναμικά και όχι στατικά, η αντίδραση του υλικού αλλάζει σημαντικά. Η δυσθραυστότητα (toughness) είναι η βασική ιδιότητα στην περίπτωση που κατά τη χρήση τους τα υλικά θα αναλάβουν κρουστικά φορτία [12]. Η δυσθραυστότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν την θραύση του και επιτρέπει να εκτιμηθεί σε ποιο βαθμό ένα υλικό συμπεριφέρεται ως όλκιμο ή ως ψαθυρό. Αριθμητικά η δυσθραυστότητα μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν της καμπύλης εφελκυσμού ενώ τις περισσότερες φορές, η δυσθραυστότητα υπολογίζεται πειραματικά με δοκιμή κρούσης.

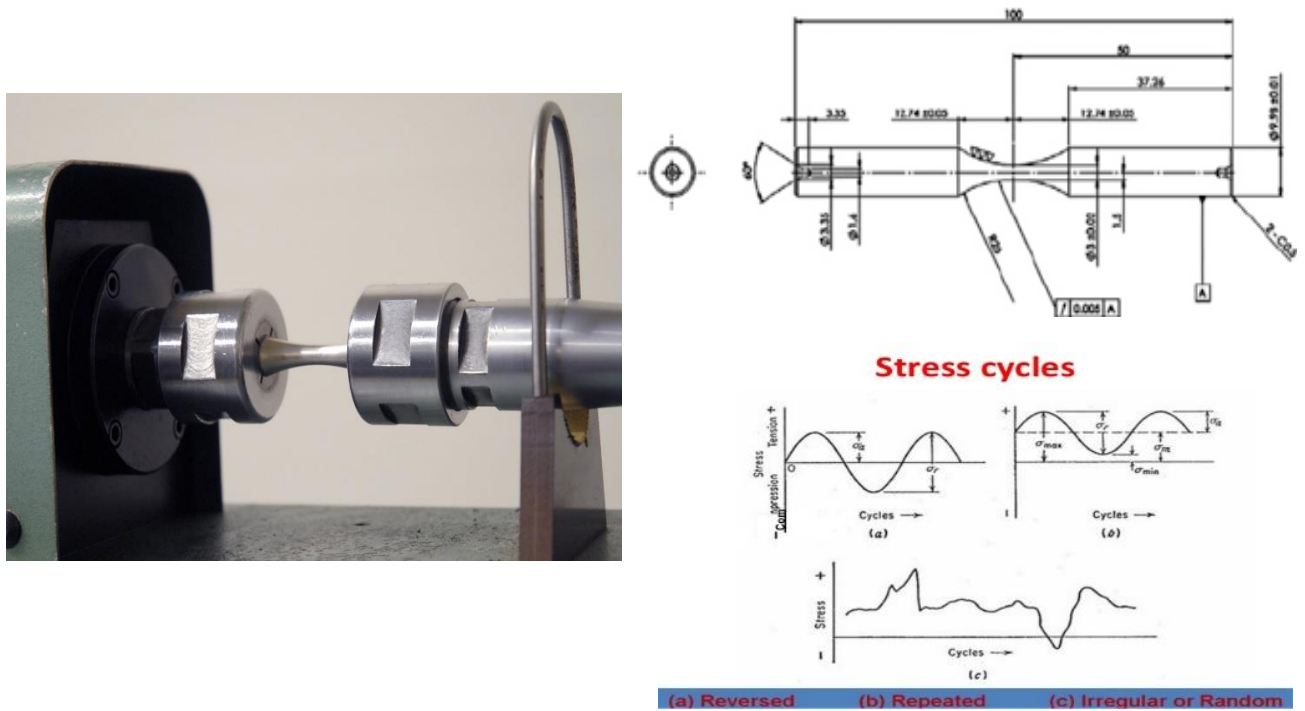
Ο συνήθης έλεγχος γίνεται με διατάξεις Charpy (διατάξεις εκκρεμούς), σε δοκίμια με εγκοπή V ή U, τυποποιημένης γεωμετρίας (Εικόνα 2.14). Σε μια τέτοια διάταξη, το δοκίμιο του εξεταζόμενου υλικού είναι στερεωμένο σε υποστήριγμα στην κατώτερη θέση της τροχιάς αιωρούμενης σφύρας γνωστής μάζας, η οποία αφήνεται να κινηθεί από γνωστό ύψος. Η γνωστή δυναμική ενέργεια της σφύρας στο ανώτερο σημείο της (h_0) μετατρέπεται ολικά σε κινητική στο κατώτερο σημείο της τροχιάς της, όπου και συγκρούεται με το δοκίμιο. Η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο προκειμένου αυτό να σπάσει υπολογίζεται από τη διαφορά της αρχικής ενέργειας του εκκρεμούς με τη δυναμική ενέργεια της σφύρας, που μετά τη θραύση, ανυψώνεται ελεύθερα ως ύψος (h), με $h < h_0$. Υπολογίζεται η ενέργεια που απορροφά το υλικό για την θραύση συγκεκριμένης επιφάνειας (J/cm^2).



EIKONA 2.15: (α) Μηχανή δοκιμής κρούσης Cha

2.2.5 Δοκιμή κόπωσης

Εάν ένα μεταλλικό υλικό υποβληθεί σε εναλλασσόμενες περιοδικές και συνεχείς καταπονήσεις, είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε θραύση για πολύ μικρότερες τάσεις από τις προσδιορισμένες από τον εφελκυσμό. Η θραύση επέρχεται χωρίς προηγούμενη παραμόρφωση και οφείλεται στο φαινόμενο της κόπωσης του υλικού. Κατά την δοκιμή κόπωσης τα φορτία μπορεί να επιβάλλονται με εφελκυσμός και θλίψη, με κάμψη-ανάκαμψη ή με στρέψη-αντίστρεψη. Τα δοκίμια είναι τυποποιημένα και με την δοκιμή κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάση συνάρτηση του αριθμού των κύκλων που οδηγούν σε θραύση, από την οποία προσδιορίζεται ή αντοχή σε κόπωση του υλικού (Εικόνα 2.16).



ΕΙΚΟΝΑ 2.16: (α) Μηχανή δοκιμής κόπωσης; (β) Τυποποιημένα δοκίμια και επιβαλλόμενη εναλλασσόμενη καταπόνηση; (γ) Διάγραμμα κόπωσης

2.2.6 Δοκιμή σκληρότητας

Η σκληρότητα είναι μία ιδιότητα η οποία εκφράζει τον βαθμό αντίστασης ενός υλικού στην πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται από τη διείδυση άλλων σωμάτων σε αυτό[13].

Η σκληρομέτρηση αποτελεί ταχεία τεχνική που επιτρέπει να έχουμε μια πρώτη ένδειξη για τις μηχανικές ιδιότητες ενός μεταλλικού αντικειμένου, την ομοιόμορφη κατανομή των εσωτερικών τάσεων σ' αυτό, καθώς και την επιτυχία ή όχι της θερμικής του κατεργασίας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι δοκιμών για το προσδιορισμό της σκληρότητας οι οποίοι χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αναφέρεται σε στατικές δοκιμές διείδυσης, η δεύτερη σε δυναμικές δοκιμές σκληρότητας και η τρίτη σε δοκιμές χάραξης.

Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με διάφορα θέματα που χαρακτηρίσουν τα υλικά όπως για παράδειγμα:

- Προσδιορισμός του υλικού.
- Έλεγχος ορθής διαδικασίας και εκτέλεσης θερμικής κατεργασίας.
- Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών κατεργασιών.
- Συμπεριφορά και αντοχή του υλικού στη διάρκεια του χρόνου.
- Συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες φθοράς και καταπόνησης.
- Έλεγχος μείωσης αντοχής μετά από θερμική κατεργασία.
- Πληροφορίες σχετικά με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Σε γενικές γραμμές η σκληρότητα έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Είναι μια γρήγορη, απλή, εύκολη και αξιόπιστη μέτρηση.
- Δίνει στοιχεία σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και έτσι μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την αντοχή στον εφελκυσμό (Tensile Strength). Μεγαλύτερη σκληρότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση.
- Είναι ένας Μη Καταστροφικός Έλεγχος.

Στη κατηγορία των στατικών μεθόδων έγκειται στην αρχή του ότι μέσω μιας συσκευής που λέγεται διεισδυτής, ασκείται στο δοκίμιο στατικά, ένα συγκεκριμένο φορτίο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και δημιουργεί ένα αποτύπωμα πάνω σε αυτό. Ο διεισδυτής έχει σχήμα μπάλας, κώνου ή πυραμίδας και είναι κατασκευασμένος από σκληρό υλικό. Η τιμή της σκληρότητας προκύπτει από την ανάγνωση των στοιχείων του αποτυπώματος.

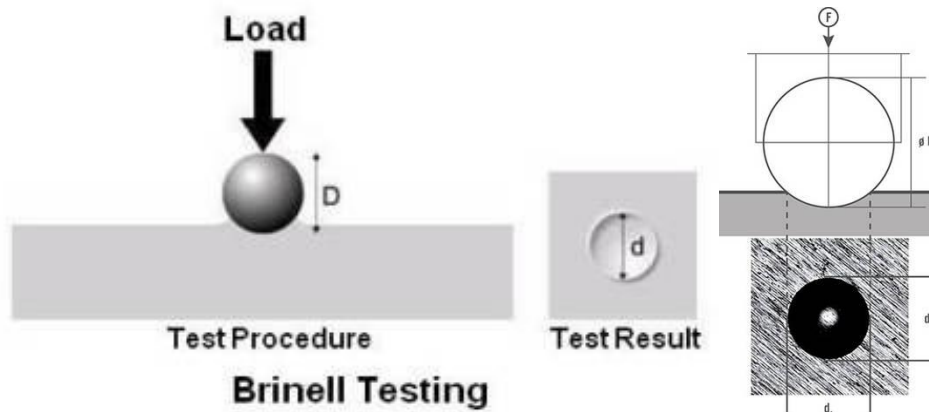
Συνήθως, η σκληρομέτρηση γίνεται σε σταθερά σκληρόμετρα που μετρούν το βάθος ή τις διαστάσεις της προβολής του αποτυπώματος που αφήνει ο διεισδυτής στην επιφάνεια του υλικού, μετά την επιβολή κάθετης δύναμης γνωστής τιμής. Ανάλογα με το εξεταζόμενο υλικό, το πάχος του και τις αναμενόμενες τιμές σκληρότητας, έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται τέσσερις (4) τεχνικές σκληρομέτρησης σε βιομηχανική κλίμακα: Brinell, Vickers, Rockwell B, Rockwell C, Knoop και Ultrasonic.

Εκτός από τα συνήθη σταθερά σκληρόμετρα εργαστηρίου, χρησιμοποιούνται και φορητά σκληρόμετρα για επιτόπιες μετρήσεις σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η λήψη δοκιμίου του υλικού που έχει αστοχήσει ή σε περιπτώσεις επιθεώρησης όπου το εξάρτημα βρίσκεται σε λειτουργία, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η χρήση του δεν έχει επιφέρει αλλαγές στη σκληρότητά του και κατ' επέκταση στην αντοχή του. Μαζί με την τεχνική της ρέπλικας, η χρήση φορητού σκληρόμετρου, αποτελούν τα κύρια εργαλεία περιοδικού ελέγχου της αρτιότητας μιας μεταλλικής κατασκευής. Η λειτουργία του φορητού σκληρομέτρου στηρίζεται στην «αρχή της αναπήδησης σφαίρας» γνωστής μάζας και κατασκευασμένο από σκληρό υλικό στην επιφάνεια του εξεταζόμενου αντικειμένου από δεδομένο ύψος. Η ενέργεια που μετράται μετά την αναπήδηση μετατρέπεται με ειδικό αλγόριθμο που είναι ενσωματωμένος στο όργανο, σε ενδείξεις σκληρότητας, με την προϋπόθεση ότι η ποιότητα του μεταλλικού υλικού είναι ήδη γνωστή.

Η σκληρότητα συνδέεται άμεσα με την πλαστική παραμόρφωση του υλικού και κατά συνέπεια με τις μηχανικές του ιδιότητες. Για τη μέτρηση της υπάρχουν τυποποιημένες μέθοδοι ανάλογα με το είδος του εξεταζόμενου υλικού (π.χ. χάλυβας, αλουμίνιο, κλπ.), τις συνθήκες μέτρησης, την επιθυμητή ακρίβεια του αποτελέσματος, κλπ.

Μέθοδος Brinell:

Η δοκιμή Brinell είναι μια απλή μέθοδος και κατά τη δοκιμή πραγματοποιείται διείσδυση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με σφαιρικό διεισδυτή, από σκληρυμένο χάλυβα ή από καρβίδιο του βολφραμίου, διαμέτρου D . Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνται διεισδυτές μεγάλης διαμέτρου και μεγάλα φορτία για τη διείσδυση. Η διείσδυση γίνεται κάθετα στην λειασμένη επιφάνεια του προς εξέταση δοκιμίου, υπό την επίδραση βαθμιαία αυξανόμενης δύναμης F για συγκεκριμένο χρόνο [14]. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου, στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει δημιουργηθεί ένα σφαιρικό αποτύπωμα διαμέτρου d και βάθους h , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.17.



Εικόνα 2.17: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σκληρομέτρησης Brinell και κάτοψη αποτυπώματος

Η σκληρότητα κατά Brinell (HB) του εξεταζόμενου υλικού είναι αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας του αποτυπώματος που προκλήθηκε υπό την επίδραση της δύναμης F , οπότε:

$$HB = 0,102x \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

όπου : F = η ασκούμενη δύναμη σε N

D = η διάμετρος του σφαιρικού διεισδυτή σε mm

d = η μέση τιμή δυο κάθετων διαμέτρων του αποτυπώματος ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$) σε mm.

Το βάθος διείσδυσης h δίνεται από τη σχέση:
$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Η τιμή σκληρότητας κατά Brinell προσδιορίζεται βάσει του συνδυασμού των παραμέτρων F , D και του χρόνου που ασκήθηκε συνολικά το φορτίο στο υπό εξέταση δοκίμιο. Συνήθως

λαμβάνεται ο μέσος όρος από δύο μετρήσεις της διαμέτρου του αποτυώματος σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, χωρίς να είναι απαραίτητο να γίνονται, μετά από κάθε δοκιμή, υπολογισμοί

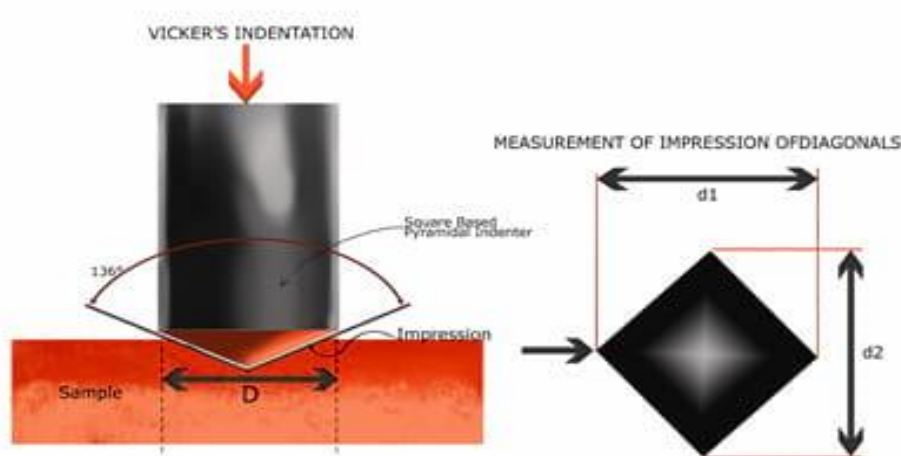
Η δύναμη της δοκιμή F προκύπτει από τις διαμέτρους των σφαιρικών διεισδυτών D και τη τιμή του λόγου F/D^2 . Οι διάμετροι είναι τυποποιημένες ώστε ο λόγος F/D^2 να παίρνει συγκεκριμένες τιμές. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του λόγου, τόσο σκληρότερο είναι το υλικό.

Η δοκιμή αυτή είναι αποδοτικότερη και αξιόπιστη όταν εφαρμόζεται σε ομογενή υλικά. Όσο αναφορά στους χάλυβες η δοκιμή βρίσκει εφαρμογή στις κατηγορίες χαλύβων βαφής και επαναφοράς και χάλυβες ανόπτησης. Δεν είναι εφαρμόσιμη σε περιπτώσεις χαλύβων επιφανειακών βαφών και σκλήρυνσης.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ότι λόγω της σφαιρικής μορφής του διεισδυτή είναι κατάλληλη για τον καθορισμό της σκληρότητας σε υλικά που έχουν μεγάλο μέγεθος κόκκων, όπως είναι τα σφυρήλατα και τα χυτά. Επίσης, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό.

Μέθοδος Vickers:

Η δοκιμή Vickers ταυτίζεται με τη διαδικασία σκληρομέτρησης της μεθόδου Brinell. Η διαφορά ότι ο διεισδυτής που χρησιμοποιεί η οποία είναι αδαμάντινη τετραγωνική πυραμίδα με γωνία μεταξύ δυο απέναντι πλευρών 136° (Εικόνα 2.17). Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε σκληρά ή/και λεπτά υλικά.



Εικόνα 2.18: Σχηματική απεικόνιση της σκληρομέτρησης κατά Vickers και κάτοψη του αποτυώματος

Το αποτύωμα που προκαλεί ο διεισδυτής (πυραμίδα) υπό την επίδραση του προκαθορισμένου φορτίου P , έχει σχήμα τετραγωνικό και η σκληρότητα κατά Vickers ορίζεται αντίστοιχα ως δύναμη ανά επιφάνεια αποτυώματος διείσδυσης και δίνεται από τη σχέση [15]:

$$HV = 2P \sin \frac{(a/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

όπου : P = η ασκούμενη δύναμη σε kgf

α = η γωνία μεταξύ δυο απέναντι πλευρών της πυραμίδας = 136°.

d = η μέση τιμή των διαγωνίων του τετραγωνικού αποτυπώματος ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$) σε mm.

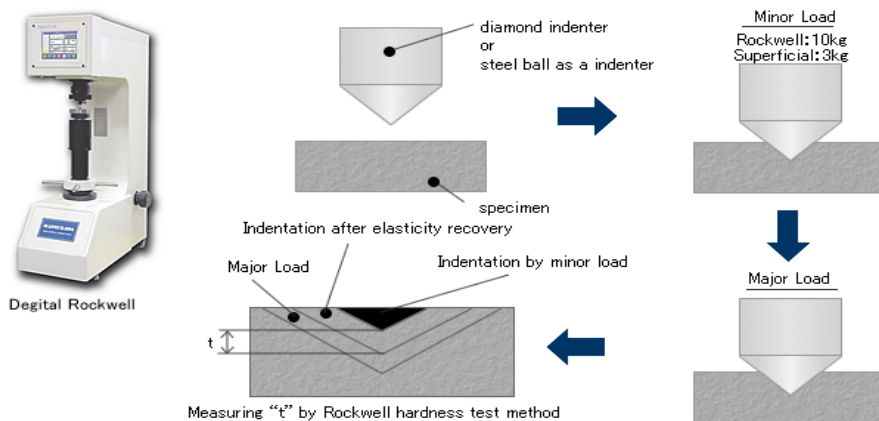
Το d μετράται από μικρόμετρο σε διάταξη μικροσκοπίου που διαθέτει το σκληρόμετρο.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται τόσο στη κλίμακα μακρο-σκληρότητας όσο και στη κλίμακα μικρο-σκληρότητας και νάνο-σκληρότητας, λόγω της μορφής του διεισδυτή και του τελικού αποτυπώματος, τα οποία δίνουν την ίδια τιμή σκληρότητας ανεξαρτήτως του φορτίου.

Μέθοδος Rockwell

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία καθώς είναι αρκετά απλή και δίνει άμεσα το αποτέλεσμα. Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές της μεθόδου ανάλογα με το είδος του διεισδυτή, η μέθοδος Rockwell C (HRC) με αδαμάντινο κώνο γωνίας κορυφής 120° και η μέθοδος Rockwell B (HRB) με χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 1/16". Υπάρχουν διαφορετικές κλίμακες εκτός των δύο που αναφέρθηκαν, που έχουν διαφορετικά φορτία και διαφορετικούς διεισδυτές ανάλογα με το υπό εξέταση δοκίμιο.

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας ενός υλικού βασίζεται στη διαφορά του βάθους διείσδυσης μεταξύ των δύο βημάτων διείσδυσης. Δηλαδή, είναι η τιμή της πλαστικής (παραμένουσας) παραμόρφωσης που προκαλείται στο υλικό από το διεισδυτή, κατά την εφαρμογή μεταβαλλόμενης δύναμης F, η οποία αυξάνεται από μια αρχική τιμή προφόρτισης (F₀) στη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια επιστρέφει στην αρχική τιμή της προφόρτισης [16]. Η βασική αρχή μέτρησης της σκληρότητας με τη μέθοδο Rockwell απεικονίζεται στην Εικόνα 2.19.



Εικόνα 2.19: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σκληρομέτρησης κατά Rockwell.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

3.1 Τεχνικές επεξεργασίας χάλυβων. Ταξινόμηση κατεργασιών.

3.1.1 Ταξινόμηση κατά DIN

Οι κατεργασίες διακρίνονται **κατά DIN** και ταξινομούνται σε :

- Αρχέγονες κατεργασίες: το υλικό αρχικά δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία κλπ.).
- Διαμορφώσεις: Χαρακτηριστικό τους είναι η πλαστική παραμόρφωση και η διατήρηση της μάζας του υλικού. Διακρίνονται σε κατεργασίες διαμόρφωσης του συμπαγούς υλικού (σφυρηλάτηση, έλαση, διέλαση, ολκή κλπ.) και σε κατεργασίες διαμόρφωσης του επιπέδου ελάσματος (κάμψη, απότμηση, βαθειά κοίλανση κλπ.).
- Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού: η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κλπ.).
- Επιφανειακές κατεργασίες: δεν επιφέρουν αλλαγή σχήματος στο τεμάχιο αλλά μεταβολή στις ιδιότητες της κατεργασμένης επιφάνειας (ενίσχυση και προστασία). Διακρίνονται σε θερμικές, θερμόχημικές και επικαλύψεις.
- Κατεργασίες σύνδεσης: διακρίνονται σε μεταλλουργικές συνδέσεις (συγκολλήσεις) και μηχανικές συνδέσεις.

3.1.2 Ταξινόμηση κατά ενέργεια

Με κριτήριο την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό διακρίνονται σε:

- Συμβατικές: Χρησιμοποιείται μηχανική ενέργεια και συμβατικός εξοπλισμός (μηχανουργικές κατεργασίες).
- Μη συμβατικές: ως βασική ενέργεια κατεργασίας χρησιμοποιείται κάποια άλλη μορφή ενεργείας πέραν της μηχανικής, ενώ ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός είναι προσαρμοζόμενος στις ιδιαιτερότητες της κατεργασίας (μαγνητική διαμόρφωση, εκρηκτική συμπίεση, ηλεκτροδιάβρωση, κοπή με laser, εκρηκτική συγκόλληση).

3.1.3 Ταξινόμηση κατά θερμοκρασία

Με κριτήριο την εφαρμοζόμενη θερμοκρασία κατεργασίας, T

Για την ταξινόμηση αυτή λαμβάνονται υπόψη δύο χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του κατεργαζόμενου υλικού, η θερμοκρασία τήξης, T_M και η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, T_r ($0,4 - 0,5T_M$):

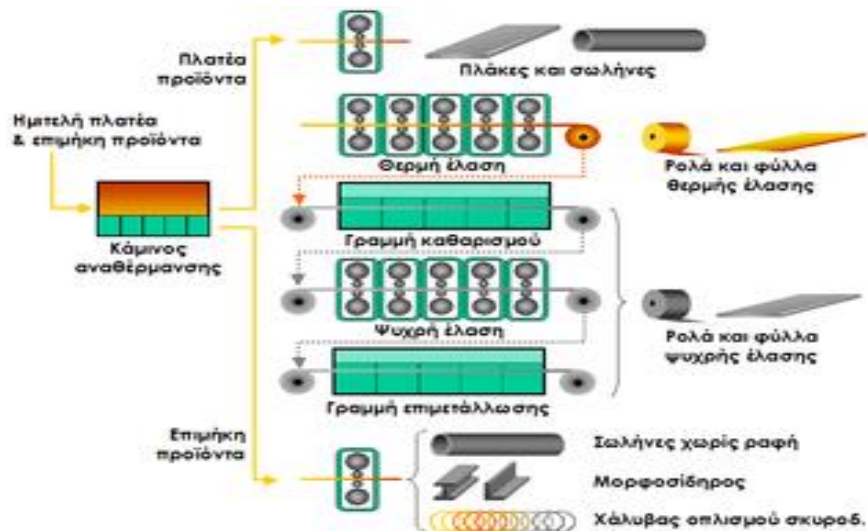
- Ψυχρές κατεργασίες: επιτελούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Θερμές κατεργασίες: πραγματοποιούνται σε θερμοκρασία $T \in [T_r, T_M]$.
- Ημίθερμες κατεργασίες: Συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και μετριάζουν τα μειονεκτήματα των δύο παραπάνω ομάδων και λαμβάνουν δε χώρα σε θερμοκρασία $T \in (T_e, T_r)$.

3.2 Πλαστικές παραμορφώσεις

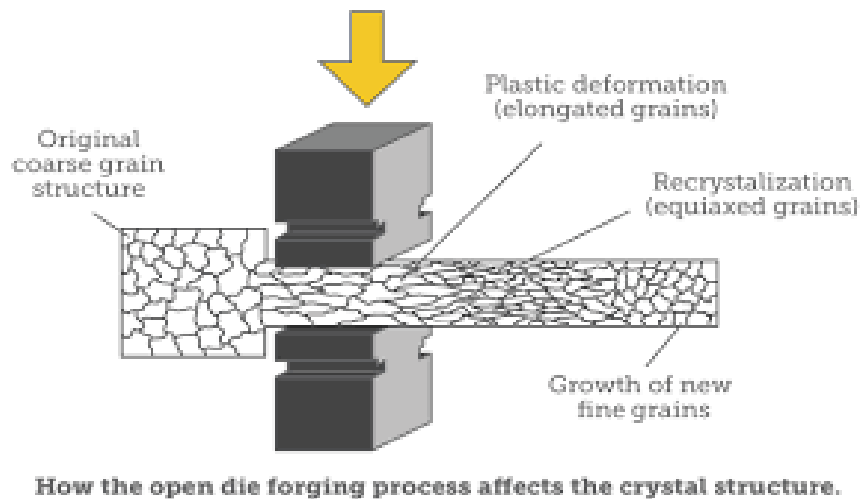
3.2.1 Πλαστικές παραμορφώσεις εν θερμώ

Οι αρχικές κατεργασίες διενεργούνται πρώτιστα εν θερμώ στα χυτά πλινθώματα για να παραγάγουν ομοιόμορφο κόκκο και να αποβάλουν μέρος από τις ατέλειες που δημιουργούνται με τη διαδικασία στερεοποίησης. Το πλίνθωμα θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία και σταδιακά παραμορφώνεται πλαστικά για να επιτευχθεί το απαραίτητο πάχος. Οι συνήθεις εν θερμώ παραμορφώσεις είναι ταξινομούνται έλαση, σφυρηλάτηση και διέλαση (Εικόνα 3.1). Οι διαδικασίες αυτές, ιδιαίτερα η σφυρηλάτηση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα τελικά προϊόντα ή στα ημιτελή.

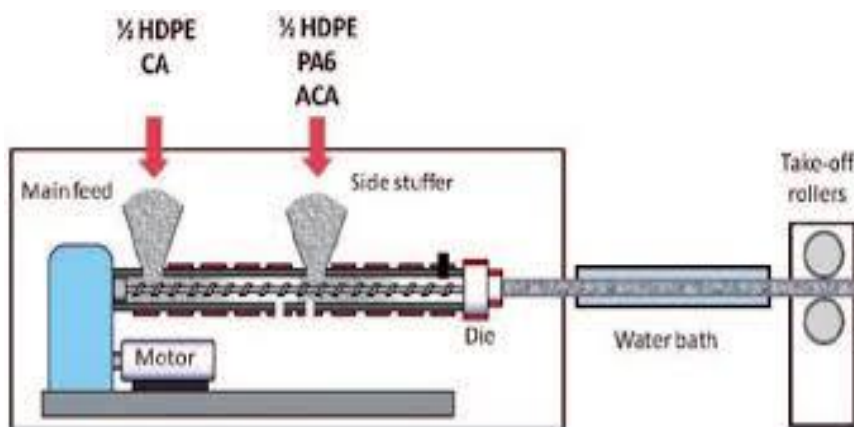
Η έλαση είναι μια τεχνική επεξεργασίας που χρησιμοποιείται πρώτιστα για να μειώσει τη διατομή ενός στοιχείου. Η θερμή έλαση ως αρχική κατεργασία χρησιμοποιείται για να διορθώσει τη δομή κόκκων των χυτών πλινθωμάτων. Επίσης, ισιώνει τους κόκκους και τα εγκλείσματα και τα επιμηκύνει στην κατεύθυνση της έλασης, με συνέπεια μια σύσταση ινών που οδηγεί σε διαφορετικές ιδιότητες στις διαμήκεις (κατεύθυνση έλασης) και εγκάρσιες κατευθύνσεις. Οι «φούσκες» ως αποτέλεσμα της στερεοποίησης είτε μειώνονται σε μέγεθος είτε κλείνουν εντελώς με τη θερμή έλαση. Επιπλέον, η θερμή έλαση χρησιμοποιείται για να παραχθούν ορισμένα αντικείμενα, όπως τα ελάσματα θερμής έλασης, οι δοκοί, τα δομικά τμήματα και οι σωλήνες.



(α)



(β)



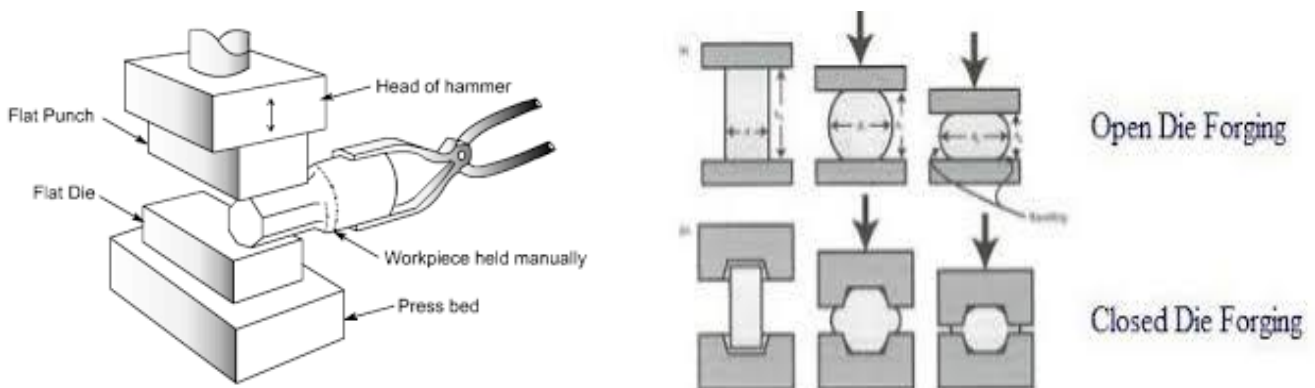
(γ)

Εικόνα 3.1: Κύριοι τύποι εν θερμώ κατεργασιών: (α) Έλαση; (β) Σφυρηλάτηση; (γ) Διέλαση

Η εξέλαση είναι μια πρόσθετη τεχνική θερμής έλασης, όπου δύο ανόμοια μεταλλικά υλικά ενώνονται σε στερεά κατάσταση από την πίεση. Μερικές από τις χαρακτηριστικές ατέλειες έλασης είναι η ακανόνιστη μορφή, το ράγισμα και οι ατέλειες επιφάνειας, όπως η δημιουργία φυσαλίδων, οι γρατσουνιές και η εισαγωγή ρύπων λόγω έλασης.

Η σφυρηλάτηση μπορεί να είναι ανοικτής και κλειστής μήτρας (Εικόνα 3.2). Η πρώτη χρησιμοποιείται για να επεξεργαστούν τα μεγάλα αντικείμενα όπως ένα πλίνθωμα ή μεγάλα αντικείμενα απλής μορφής, όπως δοχεία πίεσης, άξονες και δαχτυλίδια. Η σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας γίνεται για να είναι σε επαφή με το κομμάτι κατεργασίας μόνο ένα μέρος της επιφάνειάς του. Αυτό περιορίζει την παραμόρφωση στο συγκεκριμένο σημείο.

Η σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας κύβων χρησιμοποιείται στα τελικά προϊόντα ή σε μικρά αντικείμενα περίπλοκων μορφών. Σε αυτή την περίπτωση, το πλίνθωμα ή το κομμάτι κατεργασίας προετοιμάζεται αρχικά με σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας και έπειτα παραμορφώνεται μεταξύ δύο παρόμοιων καλουπιών χύτευσης, έτσι ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή τελική μορφή. Ο τρόπος παραμόρφωσης είναι πιο περίπλοκος από αυτόν της ανοικτής μήτρας.



Εικόνα 3.2: Τεχνικές σφυρηλάτησης: (α) Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας κύβων; (β) Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας κύβων.

Η θερμή διέλαση σχεδόν πάντα χρησιμοποιείται για να διορθώσει τη δομή κόκκων των χυτών πλινθωμάτων, χρησιμοποιείται και για την παραγωγή σύνθετων μορφών. Σε αυτήν την τεχνική, το κομμάτι κατεργασίας εισάγεται σε ένα κυλινδρικό δοχείο όπου αναγκάζεται να διατρέξει μέσω ενός στομίου. Αν και η μορφή παραμόρφωσης, χαρακτηριστικό της εξώθησης είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την εξάλειψη ατελειών στερεοποίησης, η εξώθηση αφήνει πίσω της άλλες ατέλειες. Λόγω της φύσης της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της εξώθησης, οι συνυπολογισμοί στο κομμάτι προς κατεργασία τείνουν να διαμορφώσουν ένα δαχτυλίδι που

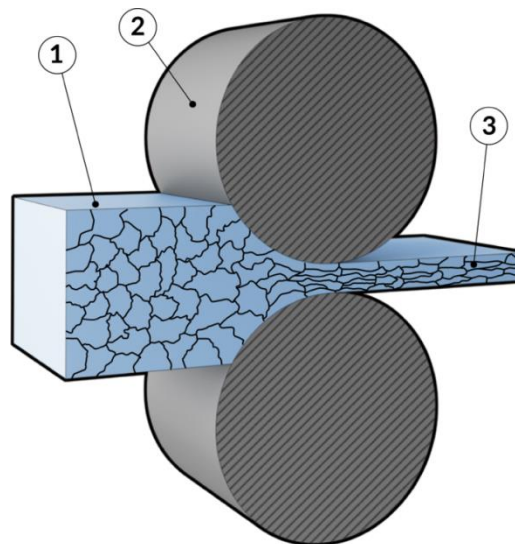
επεκτείνεται πέρα από το οπίσθιο άκρο του εξωθημένου μέρους. Τα επιφανειακά ραγίσματα, τα ξεφλουδίσματα, και οι φουσκάλες είναι άλλες ατέλειες διέλασης.

3.2.2 Πλαστικές παραμορφώσεις εν ψυχρώ

Η πλαστική παραμόρφωση εν ψυχρώ πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και χρησιμοποιείται αυστηρά στα τελικά προϊόντα. Η διαστασιακή ακρίβεια, η καλύτερη ποιότητα επιφάνειας καθώς και οι βελτιωμένες ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν μέσω αυτών των διαδικασιών. Η έλαση, η εξέλαση και η βαθειά κοίλανση εν ψυχρώ είναι οι πιο χρησιμοποιούμενες τεχνικές. Η σφυρηλάτηση εν ψυχρώ χρησιμοποιείται σε μικρότερη έκταση στην παραγωγή συγκεκριμένων αντικειμένων.

Η έλαση εν ψυχρώ χρησιμοποιείται κυρίως για να παραχθούν τα φύλλα και οι λουρίδες. Συνήθως, το προς διαμόρφωση υλικό είναι πλάκα ή λωρίδα από εν θερμό έλαση. Το υλικό προς εν ψυχρώ έλαση μπορεί να είναι άμεσο προϊόν χύτευσης, εξέλασης ή σφυρηλάτησης. Η ψυχρή εξώθηση χρησιμοποιείται για την παραγωγή αντικειμένων, όπως οι σωλήνες χωρίς ραφή και οι σωληνώσεις. Μία στενά συνδεδεμένη τεχνική είναι αυτή της έλξης. Διαφέρει από την εξώθηση μόνο στο ότι το κομμάτι προς κατεργασία έλκεται παρά ωθείται. Η έλξη χρησιμοποιείται για να παραχθούν ράβδοι, καλώδια και σωλήνες.

Όταν μια σταδιακά αυξανόμενη εφελκυστική δύναμη ενεργεί πάνω σε ένα υλικό, πρώτα παραμορφώνεται ελαστικά, κατόπιν πλαστικά, και τελικά σπάει. Η πλαστική παραμόρφωση αναφέρεται σε μια μόνιμη αλλαγή στη μορφή ή τις διαστάσεις. Η σοβαρή πλαστική παραμόρφωση όπως αυτή που αντιμετωπίζεται κατά τη διάρκεια της έλασης αναγκάζει τους κόκκους του υλικού να επιμηκυνθούν κατά μήκος της κατεύθυνσης έλασης (εικόνα 3.3). Μια τέτοια δομή κόκκου διατηρείται και η σκλήρυνση καταπόνησης εμμένει εφ' όσον παραμορφώνεται πλαστικά το υλικό κάτω από μια ορισμένη θερμοκρασία. Το φαινόμενο καλείται εργοσκλήρυνση και υπό αυτές τις συνθήκες, το υλικό λέγεται ότι είναι ψυχρής-κατεργασίας.



1-The work piece

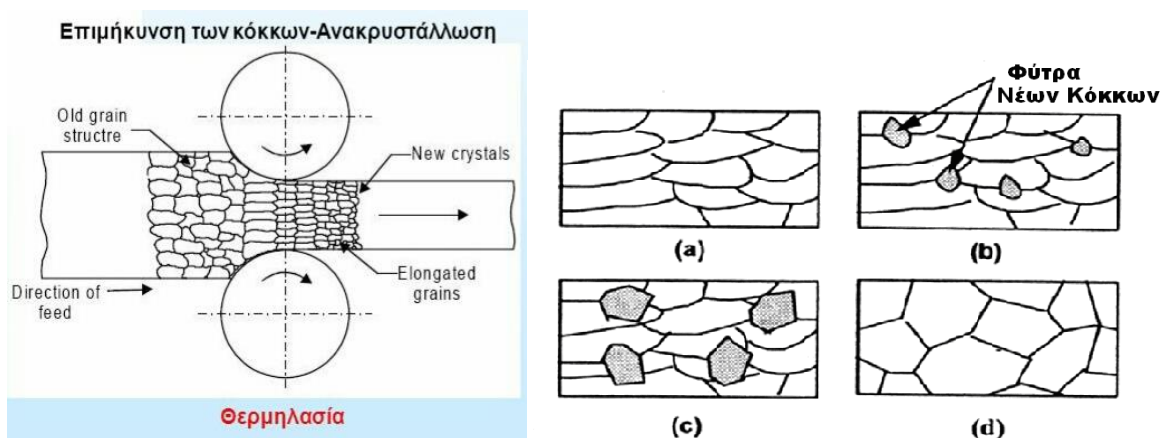
2- Rotating rollers

3-Εν ψυχρώ κατεργασμένοι (παραμορφωμένοι) κόκκοι

ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Πλαστική παραμόρφωση με εν ψυχρώ έλαση [17]

Ανακρυστάλλωση

Αν ένα υλικό έχει υποστεί ψυχρή επεξεργασία και θερμαίνεται πάνω από μία χαρακτηριστική θερμοκρασία, ένα νέο σύνολο πολύ λεπτών κόκκων δημιουργείται κατά τη θέρμανση. Το φαινόμενο ονομάζεται ανακρυστάλλωση (εικόνα. 3.4). Περιλαμβάνει την αναδιοργάνωση των ατόμων μέσα στους παλαιά παραμορφωμένους κόκκους για να διαμορφωθούν νέοι κόκκοι, ενώ η μόνιμη αλλαγή στη μορφή ή τις διαστάσεις από την ψυχρή κατεργασία διατηρείται.



Εικόνα 3.4: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας ανακρυστάλλωσης [1]

Υπάρχει ένας άμεσος συσχετισμός μεταξύ της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης και του σημείου τήξης. Τα υλικά υψηλότερου σημείου τήξης ανακρυσταλλώνονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες σχετικά με τα υλικά των χαμηλότερων σημείων τήξης. Ένας τέτοιος συσχετισμός προέρχεται από το γεγονός ότι η αναδιοργάνωση των ατόμων κατά τη διάρκεια

ανακρυστάλλωσης εμφανίζεται με μια διαδικασία αποκαλούμενη διάχυση, με την οποία τα άτομα μεταφέρονται από μια θέση σε άλλη υπό την επήρεια της θερμότητας. Επίσης, για ένα δεδομένο υλικό, η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης επηρεάζεται από το βαθμό ενδοτράχυνσης. Η αύξηση του βαθμού ενδοτράχυνσης μειώνει τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και αντίστροφα.

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός δεδομένου υλικού είναι ανάλογες του μεγέθους του κόκκου του. Η μείωση του μεγέθους κόκκου αυξάνει την εφελκυστική δύναμη κάμψης, εντούτοις, μειώνει την αύξηση θερμοκρασίας ερπυσμού. Όπως και στη διαδικασία στερεοποίησης, η ανακρυστάλλωση περιλαμβάνει δύο στάδια: (i) το σχηματισμό φύτρων των νέων κόκκων και (ii) την ανάπτυξη των κόκκων. Το μέγεθος κόκκου που παράγεται από την ανακρυστάλλωση εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές, κυρίως τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης, το χρόνο έκθεσης σε αυτή τη θερμοκρασία και το ποσοστό προηγούμενης εργοσκλήρυνσης. Για ένα δεδομένο υλικό και ένα συγκεκριμένο βαθμό εργοσκλήρυνσης, υπάρχει μια ελάχιστη θερμοκρασία έναρξης ανακρυστάλλωσης. Εάν το υλικό θερμαίνεται σε εκείνη την θερμοκρασία, οι αρχικά διαμορφωμένοι κόκκοι είναι σχετικά μικροί. Η αύξηση κόκκου εμφανίζεται με τη συνεχή έκθεση σε αυτή τη θερμοκρασία. Οι συγκριτικά μεγαλύτεροι κόκκοι διαμορφώνονται, εάν το υλικό θερμανθεί σε μια θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία έναρξης ανακρυστάλλωσης. Αντιθέτως, για δεδομένη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και χρόνο το μέγεθος κόκκου μειώνεται με την αύξηση του βαθμού ενδοτράχυνσης.

Σε αντίθεση με την ψυχρή κατεργασία, η ανακρυστάλλωση έχει ως επίδραση τη μείωση της δύναμης και της σκληρότητας. Με απλά λόγια η ανακρυστάλλωση «μαλακώνει» το υλικό. Καθορίζοντας τη διαδικασία ανακρυστάλλωσης, είναι δυνατό να επαναπροσδιοριστεί η ψυχρή κατεργασία ως οποιαδήποτε πλαστική διαδικασία παραμόρφωσης που πραγματοποιείται σε μια θερμοκρασία κάτω από την αντίστοιχη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης.

3.2.3 Κονιομεταλλουργία

Η κονιομεταλλουργία είναι κατάλληλη για επεξεργασία μετάλλων με υψηλό σημείο τήξης, όπως το βολφράμιο, το μολυβδαίνιο, το ταντάλιο και το νιόβιο. Για μερικά κράματα των οποίων τα συστατικά μέταλλα είναι αδιάλυτα σε στερεά κατάσταση και έχουν περιορισμένη διαλυτότητα στην υγρή κατάσταση, η τεχνική αυτή μπορεί να είναι η μόνη εφικτή μέθοδος επεξεργασίας. Η επεξεργασία της κονιομεταλλουργίας αποτελείται από: τη δημιουργία της σκόνης, τη μείξη, την πίεση, τη συμπίεση ή την πλινθοποίηση και την τήξη. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν απόθεση για να προετοιμάσουν τις μεταλλικές σκόνες περιλαμβάνουν τη μείωση

των οξειδίων, τη συμπύκνωση ατμού, τον ψεκασμό των υγρών με τη βοήθεια εκτόξευσης αερίου και την ηλεκτρολυτική απόθεση. Συνήθως, περισσότερα από ένα μεταλλικά συστατικά χρησιμοποιούνται για να προετοιμάσουν τη σκόνη. Επομένως, η έτοιμη σκόνη πρέπει να αναμειχθεί λεπτομερώς για να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του τελικού προϊόντος. Τα λιπαντικά προστίθενται συνήθως κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου για να διευκολύνουν την επικείμενη συμπίεση. Υδραυλικές ή μηχανικές πρέσες που εξοπλίζονται με κατάλληλα καλούπια χρησιμοποιούνται για τη συμπίεση των μεταλλικών σκονών στην επιθυμητή μορφή. Αυτό ακολουθείται τελικά από τη συμπύκνωση, η οποία συντελείται με τη θέρμανση σε μια υψηλή θερμοκρασία κάτω από το σημείο τήξης, επιτρέποντας στα συστατικά των ατόμων να ρυθμιστούν εκ νέου από τη διάχυση και να διαμορφωθεί το τελικό στερεό προϊόν.

3.3 Δευτεροβάθμιες τεχνικές επεξεργασίας

Ο αρχικός στόχος των τελικών τεχνικών επεξεργασίας είναι να επιτευχθεί η απαραίτητη διαστασιακή ακρίβεια και η επιθυμητή μορφή ενός προϊόντος. Δεδομένου ότι αυτές οι τεχνικές είναι συνήθως ακριβείς, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μια ουσιαστική αύξηση στο κόστος, ο σχεδιαστής προσπαθεί πάντα να ελαχιστοποιεί την ανάγκη για δευτεροβάθμια κατεργασία. Επομένως, η απόλυτη διαστασιακή ανοχή και το τελείωμα των επιφανειών γίνεται μόνο στα προϊόντα, όπου είναι απολύτως απαραίτητο.

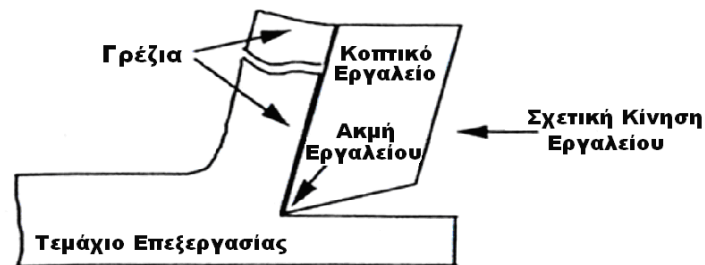
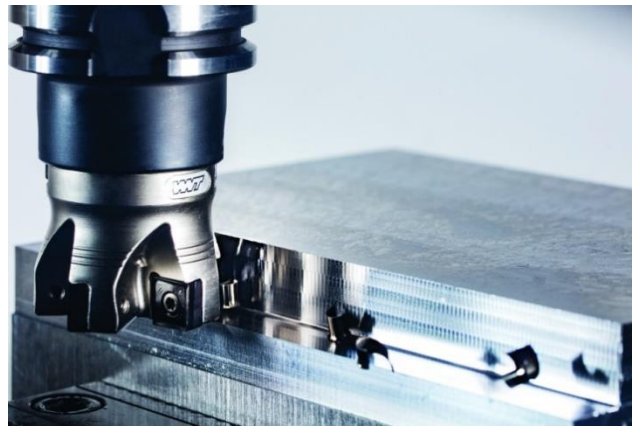
Οποιαδήποτε δευτεροβάθμια τεχνική επεξεργασίας είναι βασισμένη στην ελεγχόμενη αφαίρεση του υλικού από την επιφάνεια, υπό μορφή τσιπ, η οποία ορίζεται ως μηχανική επεξεργασία.

3.3.1 Μηχανουργική κατεργασία

Η μηχανουργική κατεργασία είναι η πιο συμβατική και παγκοσμίως η συνηθέστερη τεχνική της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Βασικά αποτελείται από την κίνηση του αντικείμενου σε μια μηχανή, σχετικά με ένα εργαλείο κοπής, που αφαιρεί τα λεπτά στρώματα επιφάνειας από το αντικείμενο, υπό μορφή γρεζιού, όπως διευκρινίζεται στην εικόνα 3.5. Ανάλογα με τον τύπο αυτής της σχετικής μετακίνησης, οι διαφορετικές μηχανικές μέθοδοι κατεργασίας διαχωρίζονται σε, π.χ., λείανση, στίλβωση, πλάνισμα, γλύφανση, τρνίρισμα, φρεζάρισμα, διάτρηση, πριόνισμα και τρύπημα.

Σε οποιαδήποτε μηχανουργική τεχνική κατεργασίας, το εργαλείο κοπής πρέπει να ικανοποιήσει δύο απαιτήσεις: να είναι σκληρότερο από το αντικείμενο που επεξεργάζεται στη

μηχανή και να διατηρήσει μια αιχμηρή κοπτική επαφή. Η κατεργασιμότητα είναι μια σημαντική ιδιότητα των μηχανολογικών κραμάτων και καθορίζει την ευκολία ή την δυσκολία με την οποία επεξεργάζεται μηχανουργικά ένα υλικό.



ΕΙΚΟΝΑ 3.5: Αναπαράσταση μηχανουργικής κατεργασίας.

3.3.2 Μη μηχανουργική κατεργασία

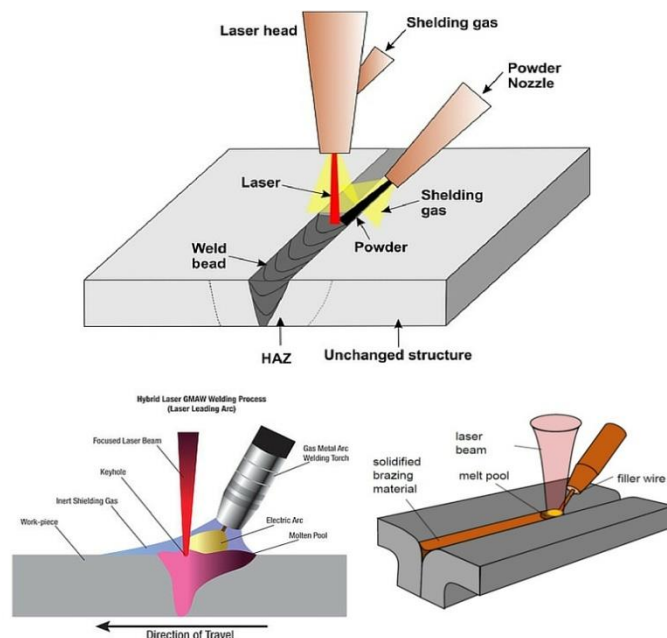
Αν και η μηχανουργική κατεργασία θεωρείται η σημαντικότερη δευτερεύουσα τεχνική επεξεργασίας, δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε αντικείμενα σύνθετων διαμορφώσεων. Για να παρακαμφθεί αυτός ο περιορισμός, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μη μηχανουργικές τεχνικές κατεργασίας. Περιλαμβάνουν: την κατεργασία ηλεκτρικής αποφόρτισης (EDM), την ηλεκτροχημική κατεργασία (ECM), την ηλεκτροχημική λείανση (ECG) και τις μεθόδους αφαίρεσης υλικού μέσω ακτινοβολίας.

3.3.3 Τεχνικές ένωσης

Τα μέρη που παράγονται από τις αρχικές και τελικές τεχνικές επεξεργασίας, που περιγράφονται ανωτέρω, μπορούν να συναρμολογηθούν σε εξαρτήματα με μια ευρεία ποικιλία τεχνικών ένωσης, η οποία μπορεί να ταξινομηθεί: σε ηλεκτροσυγκόλληση, χαλκοκόλληση, λευκοκόλληση και κάρφωμα.

Τεχνικές συγκόλλησης

Οι τεχνικές συγκόλλησης μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριους τύπους: συγκόλληση τήξης, όπου μόνο η θερμότητα εφαρμόζεται στις επιφάνειες που ενώνονται και συγκόλληση πίεσης, όπου η θερμότητα και η πίεση εφαρμόζονται στην επιφάνεια ένωσης. Οι περισσότερες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις μηχανολογικές εφαρμογές είναι του τύπου τήξης. Για τη συγκόλληση τήξης, οι αλλαγές δομής που εμφανίζονται στην ένωση συγκόλλησης μοιάζουν με εκείνες της στερεοποίησης. Στην κατάσταση αμέσως μετά την ηλεκτροσυγκόλληση παρατηρούνται στην ένωση συγκόλλησης δενδριτικές δομές (Εικόνα. 3.6). Επίσης, η ένωση συγκόλλησης διατηρεί ατέλειες, όπως το πορώδες και τις αυλακώσεις. Στην επηρεασμένη θερμικά ζώνη συγκόλλησης παρατηρούνται αλλαγές δομής παρόμοιες με εκείνες από την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες.



ΕΙΚΟΝΑ 3.6: Απεικόνιση της συγκόλλησης

3.4 Θερμικές κατεργασίες χάλυβων.

Τα μεταλλικά υλικά υποβάλλονται σε κάποια από τα στάδια της παραγωγής τους σε θερμικές κατεργασίες [18]. Μια θερμική κατεργασία αφορά τον συνδυασμό θέρμανσης και ψύξης των μετάλλων σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες με σκοπό την επίτευξη επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας το μέταλλο παραμένει σε στερεά κατάσταση και με ίδια χημική σύσταση. Μεταβάλλονται η μορφολογία (μέγεθος, σχήμα) των κόκκων του υλικού, η κρυσταλλική δομή τους καθώς και ο τρόπος διασποράς τους. Το αποτέλεσμα μιας θερμικής κατεργασίας καθορίζεται από τους κάτωθι τρεις λόγους:

- την ανώτατη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το υλικό.
- το χρόνο παραμονής του στη θερμοκρασία αυτή.
- τη ταχύτητα της ψύξης που καθορίζεται από το μέσο απόψυξης που χρησιμοποιείται.

Οι θερμικές κατεργασίες των χάλυβων περιλαμβάνουν θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χάλυβων (Πίνακας 1.9) και επιφανειακές κατεργασίες.

Οι θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χάλυβων έχουν σκοπό την αποτελεσματική βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες είναι γνωστό ότι η αύξηση της τιμής της τάσης διαρροής και της αντίστασης σε εφελκυσμό συνοδεύεται από ελάττωση της τιμής της δυσθραυστότητας και της ολκιμότητας. Είναι συνεπώς αναγκαίο, να βρεθεί ένας αποδεκτός συνδυασμός των τιμών των ιδιοτήτων αυτών, εάν θέλουμε να βελτιώσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων.

Πίνακας 3.1 Θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χάλυβων.

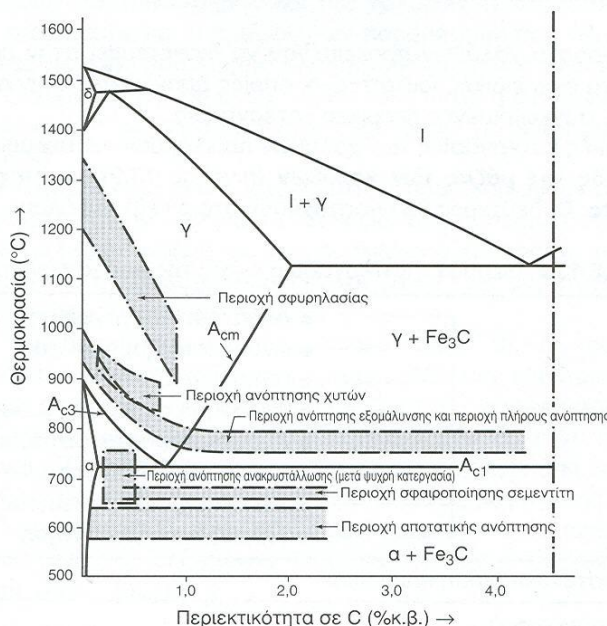
	<ul style="list-style-type: none"> • Ανόπτηση κατεργασίας • Ανόπτηση εξομάλυνσης • Πλήρης ανόπτηση
1. Ανόπτηση:	<ul style="list-style-type: none"> • Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης • Ανόπτηση αποκατάστασης • Αποτατική ανόπτηση • Ανόπτηση σφαιροποίησης
2.	Ωστενιτοποίηση και βαφή
3.	Επαναφορά

Γενικά, οι θερμικές κατεργασίες εντός της μάζας των χάλυβων οδηγούν, κυρίως, στη σκλήρυνσή τους, σε ελάττωση ή ολική απαλοιφή των μηχανικών τάσεων και σε ρύθμιση του μεγέθους των κόκκων και των μηχανικών ή άλλων ιδιοτήτων τους.

3.4.1 Ανοπτήσεις χάλυβων.

Η ανοπτηση περιλαμβάνει μια δέσμη τεχνικών, όπου εφαρμόζονται κατά περίπτωση και προσδίδουν στο χάλυβα τη φυσιολογική τους δομή εφόσον αυτή έχει αλλάξει λόγω διαφόρων κατεργασιών όπως χύτευση, βαφή, διαμόρφωση κτλ. Οι τεχνικές αυτές δίνουν προϊόντα με κρυσταλλική δομή κοντά στη φυσιολογική, η οποία συνδυάζει φερρίτη, περλίτη και σεμεντίτη, ανάλογα με το ποσοστό περιεκτικότητας του άνθρακα. Οι ανοπτημένοι χάλυβες παρουσιάζουν αυξημένη πλαστικότητα και συνεκτικότητα, μειωμένη σκληρότητα και υψηλή ολκιμότητα.

Στην Εικόνα 3.7, παρουσιάζεται μέρος του διαγράμματος ισορροπίας των φάσεων Fe-Fe₃C (περιοχή χάλυβων) και οι περιοχές των θερμικών κατεργασιών ανοπτησης (οι πληροφορίες ισχύουν μόνο για ανθρακούχους χάλυβες).



Εικόνα 3.7 Διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-Fe₃C (περιοχές των θερμικών κατεργασιών στις οποίες υποβάλλονται οι μη κραματομένοι χάλυβες). (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.472)

Η οριζόντια γραμμή A_{c1}, οριοθετεί τη **χαμηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία** (ευτηκτοειδής **θερμοκρασία**), κάτω από την οποία, σε κατάσταση ισορροπίας όλος ο ωστενίτης υφίσταται μετασχηματισμό σε φερρίτη και σεμεντίτη. Οι καμπύλες A_{c3} και A_{cm} παραστούν τα όρια της **υψηλότερης κρίσιμης θερμοκρασίας** για τους υποευτηκτοειδείς και υπereυτηκτοειδείς χάλυβες αντίστοιχα, επάνω από την οποία υπάρχει μόνον η ωστενιτική φάση.

3.4.2 Ανόπτηση κατεργασίας.

Η **ανόπτηση κατεργασίας** εφαρμόζεται σε ενδιάμεσα στάδια της παραγωγής για να συνεχιστεί η ψυχρή έλαση και η συρματοποίηση συνήθως μαλακού ή πολύ μαλακού χάλυβα. Είναι μια θερμική κατεργασία, στην οποία υποβάλλεται το μέταλλο προκειμένου να αφαιρεθούν οι επιπτώσεις της ψυχρής κατεργασίας, με σκοπό να αυξήσουμε την ολκιμότητα του μετάλλου, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Η ανόπτηση κατεργασίας εφαρμόζεται ώστε να είναι δυνατή η συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, χωρίς να επέλθει θραύση του και χωρίς να καταναλωθούν υπερβολικά ποσά ενέργειας. Κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας, είναι δυνατόν να συμβούν ταυτόχρονα αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση. Η κύρια δομή που εμφανίζεται μετά από ανόπτηση κατεργασίας είναι φερρίτης και η κατεργασία αυτή πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες μεταξύ 600 °C και 700 °C.

Η οξείδωση της επιφάνειας αποφεύγεται, εάν η θερμοκρασία της ανόπτησης παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα, υψηλότερα όμως της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, ή εάν η διεργασία πραγματοποιηθεί σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα.

3.4.3 Ανόπτηση εξομάλυνσης.

Η **ανόπτηση εξομάλυνσης** πραγματοποιείται ώστε να δημιουργηθεί ομοιόμορφη, κυτταροειδής και λεπτοκρυσταλλική φερριτοπερλιτική δομή. Για το σκοπό αυτό, ο χάλυβας θερμαίνεται κατά 55-85 °C υψηλότερα της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c3} ή A_{cm} , για ώρα που επέρχεται η πλήρης ωστενιτοποίησή του. Ο χάλυβας μετατρέπεται σε λεπτόκοκκο ωστενίτη που με τη σειρά του μετατρέπεται κατά τη ψύξη σε λεπτόκοκκο φερρίτη και περλίτη με λεπτές λουρίδες. Η κατεργασία περατώνεται με ψύξη στον αέρα, μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μειώνονται ή εξαφανίζονται οι ανισοτροπίες των ιδιοτήτων του χάλυβα και βελτιώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες. Η ψύξη στον αέρα επιβάλλει μία σειρά ταχυτήτων ψύξης σε συνάρτηση με το πάχος δοκιμίου.

Πολλές φορές, λόγω της σχετικά μεγάλης ταχύτητας απόψυξης, οι υποευθηκτοειδείς χάλυβες που υφίστανται ανόπτηση εξομάλυνσης παρουσιάζουν ομοιογενή, λεπτόκοκκο περλίτη, χωρίς σχηματισμό προευθηκτοειδούς φερρίτη. Για τους υπereυθηκτοειδείς χάλυβες, η ανόπτηση εξομάλυνσης εφαρμόζεται προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά του σεμεντίτη.

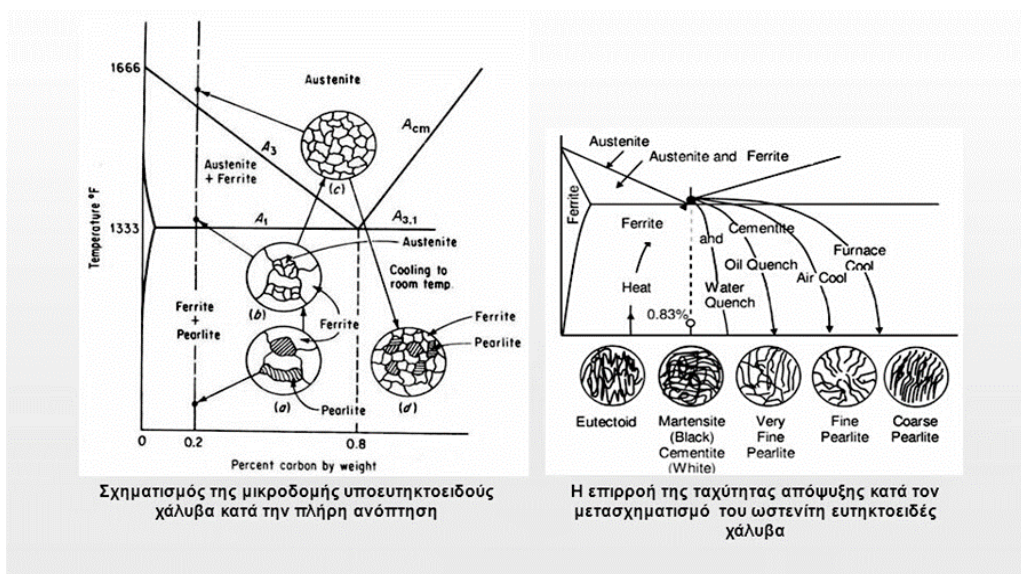
Η κύρια βιομηχανική εφαρμογή της ανόπτησης εξομάλυνσης είναι η εκλέπτυνση των κόκκων του ωστενίτη (refining of the austenite size), -χαρακτηριστικό υψίστης τεχνολογικής σημασίας- αντικειμένων από χυτοχάλυβα, ή από τυχόν υπερθερμανθέντα χάλυβα, ο οποίος δηλαδή, κατά

το στάδιο της ωστενιτοποίησης, υπέστη υπερβολική αύξηση του μεγέθους των ωστενιτικών κόκκων, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.

3.4.4 Πλήρης ανόπτηση.

Η **πλήρης** ή απλώς **ανόπτηση**, μοιάζει με την ανόπτηση εξομάλυνσης. Ο όρος πλήρης ανόπτηση (full annealing) αναφέρεται σε θέρμανση του χάλυβα στη μονοφασική ωστενιτική περιοχή και πολύ αργή ψύξη. Εφαρμόζεται στους χάλυβες χαμηλής έως μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι πρόκειται να υποστούν πλαστική παραμόρφωση κατά τη διάρκεια κατεργασιών μορφοποίησης ή κοπής.

Το κράμα έρχεται στη φάση ωστενιτοποίησης, με θέρμανση κατά 15-40 °C υψηλότερα της καμπύλης A_{c3} για τους υποευτηκτοειδής χάλυβες και λίγο πάνω από την A_{c1} για τους υπereυτηκτοειδής, μέχρι να αποκατασταθεί πλήρης ισορροπία (ωστενιτοποίηση). Τέλος, παραμένει για αρκετές ώρες, μέσα σε φούρνο, όπου αποψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την ίδια ταχύτητα απόψυξης, όπως εκείνη του φούρνου (περίπου 20°C / ώρα). Η αργή ταχύτητα απόψυξης οδηγεί σε προευτηκτοειδούς φερρίτη αρχικά και περλίτη με χαμηλή αντοχή και σκληρότητα και αυξημένη πλαστικότητα. Ο λόγος για θέρμανση των υπereυτηκτοειδών χαλύβων στη διφασική περιοχή πραγματοποιείται για τη συσσωμάτωση ή τη σφαιροποίηση του προευτηκτοειδούς σεμεντίτη, Εικόνα 3.8. Όταν οι χάλυβες αυτοί θερμανθούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της A_{cm} και ψυχθούν αργά, σχηματίζεται προευτηκτοειδής σεμεντίτης στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Πρόκειται λοιπόν πρακτικά, για δίκτυο διασυνδεδεμένων κόκκων του σεμεντίτη, ο οποίος όντας σκληρός, παρουσιάζει εύκολη θραύση και τελική αστοχία του χάλυβα κατά τη χρήση του.

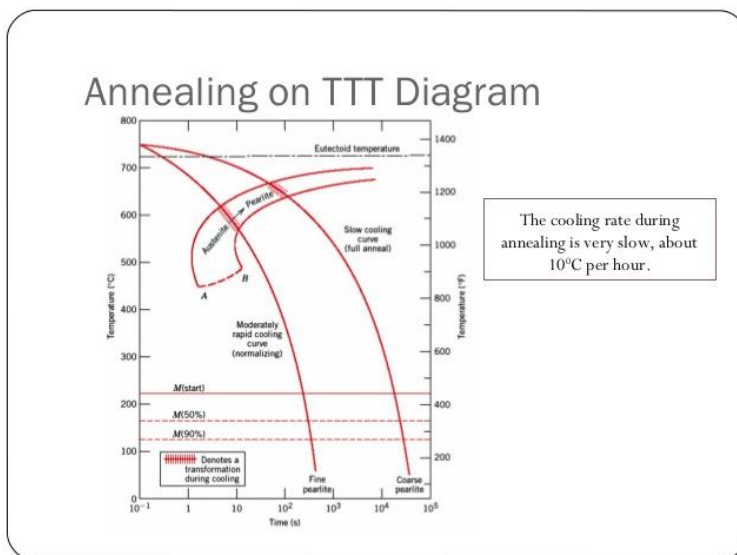


Εικόνα 3.8 Σχηματισμός σεμεντίτη κατά τη τεχνική της πλήρης ανόπτηση.

Ο σκοπός της θέρμανσης του ισχυρά ανθρακούχου χάλυβα στη διφασική περιοχή είναι το σπάσιμο τους συνεχούς δικτύου των καρβιδίων, με τη συσσωμάτωσή του σε χωριστά, διακριτά μεταξύ τους, σφαιρικά σωματίδια καρβιδίων. Στην Εικόνα 3.9, δίνονται οι καμπύλες απόψυξης πλήρους ανόπτωσης εξομάλυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα, σε διάγραμμα TTT.

Η πλήρης ανόπτωση 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.



Εικόνα 3.9 Διαγράμματα TTT (CCT) - Καμπύλες απόψυξης για την πλήρη ανόπτωση και την ανόπτωση εξομάλυνσης υποευτηκτοειδούς χάλυβα.

3.4.5 Ανόπτωση ανακρυστάλλωσης.

Η **ανόπτωση ανακρυστάλλωσης** θεωρείται υποκρίσιμη θερμική κατεργασία. Κατά την κατεργασία αυτή, ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσής του, εντός της διφασικής περιοχής φερρίτη-σεμεντίτη (650-750 °C), επομένως δε παρατηρείται μεταβολή φάσεων κατά την εκτέλεσή τους. Συγχρόνως, ελέγχεται η απόψυξή του (αργή απόψυξη 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. Σε γενικές

γραμμές, οι μικροδομές των χάλυβων με χαμηλή και μέση περιεκτικότητα σε άνθρακα, πριν την εν ψυχρώ κατεργασία, είναι είτε σφαιροποιημένου σεμεντίτη είτε χονδροκρυσταλλικού φερρίτη, με μικρές ποσότητες περλίτη. Η παραμόρφωση εν ψυχρώ του χάλυβα επιδρά στο σχήμα των κόκκων του φερρίτη, αλλά και στη εσωτερική τους κατάσταση από πλευράς αταξιών. Θέρμανση του χάλυβα πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης κινεί το μηχανισμό της ανακρυστάλλωσης και στη θέση των επιμηκυνθέντων κόκκων δημιουργούνται νέοι ισοαξονικοί κόκκοι, μια μικροδομή κατάλληλη να υποστεί περαιτέρω κατεργασία και περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση.

3.4.6 Ανόπτηση αποκατάστασης.

Η **ανόπτηση αποκατάστασης** εφαρμόζεται για τους ίδιους λόγους, που πραγματοποιείται και η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, αλλά η θέρμανση γίνεται σε θερμοκρασία 450-600 °C, χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του χάλυβα. Κατά τη θέρμανση του παραμορφωμένου υλικού σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες η ενέργεια παραμόρφωσης αρχικά κινεί το μηχανισμό της αποκατάστασης (recovery). Κατά τη διεργασία αυτή ένα σημαντικό μέρος των αταξιών δομής είτε απαλείφεται είτε αναδιατάσσεται σε μορφές χαμηλότερης ενέργειας, αποδίδοντας στο υλικό τμήμα της χαμένης του ολκιμότητας.

3.4.7 Αποτατική ανόπτηση.

Κατά την **αποτατική ανόπτηση**, το κράμα θερμαίνεται εντός της φερριτικής περιοχής, 580-650°C, και, στη συνέχεια, υφίσταται αργή απόψυξη.

Λόγω της διάχυσης των ατόμων εξαιτίας της βραδείας μεταβολής των θερμοκρασιών, πραγματοποιείται μείωση ή τέλεια εξάλειψη των εσωτερικών μηχανικών τάσεων οι οποίες είχαν συσσωρευθεί κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής κατεργασίας και παραγωγής των χάλυβων.

Η ανόπτηση αποκατάστασης και η αποτατική ανόπτηση δε μεταβάλλουν τη μικρογραφική μορφή των χάλυβων.

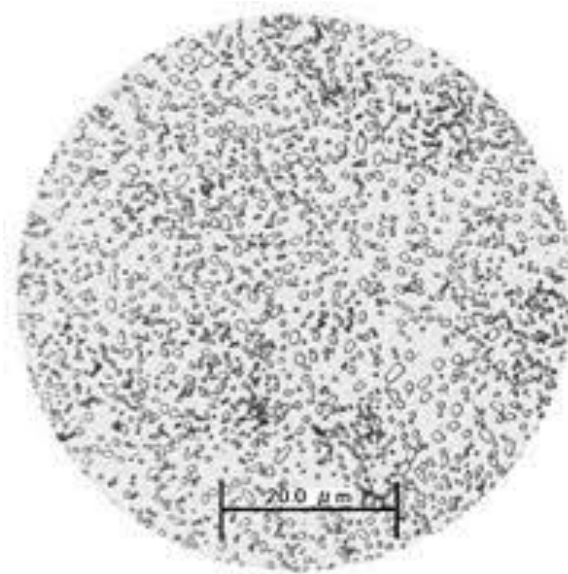
3.4.8 Ανόπτηση σφαιροποίησης.

Η **ανόπτηση σφαιροποίησης (spheroidizing annealing)** συνίσταται ώστε να υπάρξει μία δομή η οποία να παρουσιάζει ολκιμότητα και πλαστικότητα. Μία τέτοια μικροδομή αποτελείται από σφαιρίδια καρβιδίων διεσπαρμένων σε φερριτική μήτρα (Εικόνα 3.10).

Η καλή ολκιμότητα της σφαιροποιημένης μικροδομής είναι σημαντική για τους χάλυβες με χαμηλή και μέση περιεκτικότητα σε άνθρακα, οι οποίοι υφίστανται πλαστική παραμόρφωση εν

ψυχρώ και εξίσου σημαντική για χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα οι οποίοι υφίστανται μηχανουργική επεξεργασία μεγάλης έκτασης πριν τη βαφή.

Οποιαδήποτε αρχική μικροδομή θα μπορούσε να μετασχηματιστεί σε μικροδομή σφαιροποιημένων καρβιδίων εάν γίνει θέρμανση σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλές και για ικανούς χρόνους, συνθήκες οι οποίες επιτρέπουν τη σφαιροποίηση με μηχανισμούς διάχυσης. Για τη σφαιροποίηση περλιτικών μικροδομών απαιτούνται αρκετές ώρες. Σφαιροποίηση με μεγαλύτερες ταχύτητες επιτυγχάνεται με μερική ή ολική ωστενιτοποίηση και ακολούθως διατήρηση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη της ευτηκτοειδούς θερμοκρασίας Ac1 (περίπου 700 °C), στην περιοχή α -Fe+Fe₃C, και στην εν συνεχεία αργή απόψυξη του μέσα στο φούρνο για πολλές ώρες (έως και 25 ώρες).



Εικόνα 3.10 Δομή από σφαιρίδια καρβιδίων διεσπαρμένων σε φερριτική μήτρα.

Με την κατεργασία αυτή επιτυγχάνεται και η σφαιροποίηση του σεμεντίτη στην οποία ζωνώδεις μορφές σεμεντίτη σπάζουν σε μικρότερα τεμάχια τα οποία τείνουν να παρουν σφαιρικό σχήμα. Τα πιο μικρά απ' αυτά επαναδιαλύονται, ενώ τα μεγαλύτερα αναπτύσσονται τείνοντας προς το σφαιρικό σχήμα. Ο σεμεντίτης μετά τη διεργασία αυτή παίρνει σφαιροειδή μορφή αντί την πλακοειδή μορφή που παρουσιάζει στο συνηθισμένο περλίτη. Ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης, χωρίς να υποστεί μετασχηματισμό φάσης, βελτιώνει τη κατεργαστικότητα και τη καλή πλαστικότητα του χάλυβα, δεδομένου ότι αυτός γίνεται μαλακότερος και ολκιμότερος.

3.5 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ

3.5.1 Βαφή χάλυβων.

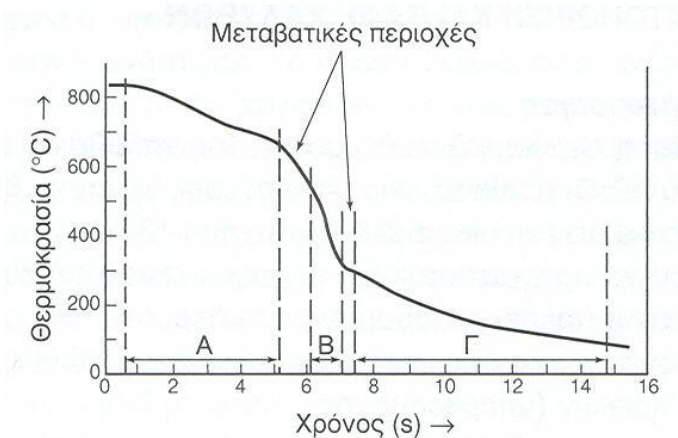
3.5.1.1 Ωστενιτοποίηση.

Ο ωστενίτης είναι η πλέον σημαντική φάση στο πεδίο των θερμικών κατεργασιών των χάλυβων [19]. Σε πρώτο επίπεδο είναι δομή fcc και επιδέχεται εύκολα πλαστική παραμόρφωση. Αυτό είναι ιδιαίτερο εφικτό όταν είναι απαλλαγμένος από άλλες φάσεις (καρβίδια, εγκλείσματα, ακαθαρσίες κλπ.). Ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε άλλες φάσεις ή μικροδομές όπως είναι ο φερρίτης, ο περλίτης, ο σεμεντίτης, ο μπαινίτης και ο μαρτενσίτης. Στη περίπτωση αυτή η χημική σύσταση και η ταχύτητα απόψυξης ρυθμίζουν τη τελική μικροδομή.

Η **ωστενιτοποίηση** είναι απαραίτητη για την βαφή των χάλυβων και περιλαμβάνει θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50°C, περίπου, της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας, A_{c3} . Οι υπερευτηκτοειδείς χάλυβες υφίστανται θέρμανση 50°C, της κάτω κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c1} 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. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί πλήρης μετατροπή του κράματος σε ομογενή ωστενίτη, πρέπει η παραμονή στη θερμοκρασία αυτή να διαρκέσει αρκετά, χωρίς όμως να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους των κόκκων (υπερθέρμανση). Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, παρατηρείται συχνά μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού της μάζας του κράματος, γεγονός που είναι δυνατό να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη. Επιβάλλεται, συνεπώς, η θέρμανση να γίνεται με τόσο βραδύ ρυθμό όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή του χάλυβδινου αντικειμένου. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης προς ωστενιτοποίηση, ο χάλυβας οξειδώνεται, με αποτέλεσμα επιφανειακή απώλεια υλικού και ελάττωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Τα προβλήματα αντιμετωπίζονται με θέρμανση σε φούρνους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας.

3.5.2 Βαφή (hardening).

Κατά την βαφή η απόψυξη πραγματοποιηθεί με πολύ ταχύτερους ρυθμούς (απουσία διάχυσης των ατόμων) και τα λαμβανόμενα προϊόντα είναι φάσεις εκτός ισορροπίας. Σκοπός της είναι να μετασχηματιστεί όλη η δομή του χάλυβα σε μαρτενσίτη. Οι μαρτενσιτικές μικροδομές είναι οι σκληρότερες δομές που μπορούν να παραχθούν σε ανθρακούχους χάλυβες. Η μικροδομή αυτή παρουσιάζει υψηλή σκληρότητα με τη συνεπακόλουθη υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και την υψηλή αντοχή σε κόπωση και σε τριβή. Η καμπύλη απόψυξης του χάλυβα δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ψύξης, ως συνάρτηση του χρόνου, (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.11 Καμπύλη ταχείας απόψυξης (βαφής) μικρού χάλυβδινου κυλίνδρου, μετά την εμβάπτιση του σε χλιαρό νερό. (Από Γ.Α. 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). Στη περιοχή Α η θερμοκρασία είναι τόσο υψηλή, ώστε το υγρό ψύξης εξατμίζεται ακαριαία, μόλις έρθει σε επαφή με τη μεταλλική επιφάνεια, σχηματίζοντας συγχρόνως ένα λεπτό στρώμα ατμών γύρω από αυτή, διαμέσου του οποίου πραγματοποιείται η ψύξη με αγωγή και ακτινοβολία. Η ταχύτητα απόψυξης είναι αργή, -μικρή κλίση της εφαπτομένης $\Delta T/\Delta t$, - λόγω της μικρής αγωγιμότητας των ατμών. Στη περιοχή Β το στρώμα ατμών σχεδόν διαλύεται. Το υγρό ψύξης εμφανίζει έντονο φαινόμενο βρασμού, λόγω της επαφής του με την ψυχόμενη, μεταλλική επιφάνεια. Η απαγωγή της θερμότητας γίνεται ταχύτατα, άρα η ταχύτητα της απόψυξης είναι μεγάλη. Στη περιοχή Γ όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας του μετάλλου φθάσει στη θερμοκρασία βρασμού του ψυκτικού υγρού, η εξάτμιση του υγρού σταματά και η ψύξη συνεχίζεται με απαγωγή διαμέσου του όγκου του υγρού. Η ταχύτητα απόψυξης, κατά το στάδιο αυτό, είναι η 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 ανάδευσή του, αλλά και από το μέγεθος, τη γεωμετρία, τη μάζα και την κατάσταση της επιφάνειας του μετάλλου.

3.5.3 Αστοχίες κατά τη βαφή

Χαρακτηριστικές αστοχίες συμβαίνουν συνήθως κατά την απόψυξη του χάλυβα. Οι πιο συνηθισμένες είναι:

1. Ανομοιογένεια του χάλυβα, λόγω ανομοιόμορφης θέρμανση ή ανομοιόμορφης ψύξη και ελέγχεται με μέτρηση σκληρότητας σε διάφορες θέσεις της επιφάνειάς του. Η ανομοιογένεια οφείλεται σε
2. Ανεπαρκής βαφή, όπου ο χάλυβας δεν αποκτά τη ζητούμενη τελική σκληρότητα. Συνήθη αίτια είναι η μικρότερη από την απαιτούμενη δραστηριότητα του μέσου απόψυξης βαφής αλλά και θέρμανση σε κατώτερη θερμοκρασία από την ορισμένη θερμοκρασία βαφής. Η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται σχολαστικά με κατάλληλο όργανο μέτρησης (θερμοστοιχείο). Η ανεπαρκής βαφή ελέγχεται με μέτρηση της σκληρότητάς του.
3. Ρωγμές και στρεβλώσεις οι οποίες οφείλονται σε μηχανικές εσωτερικές τάσεις. Τάσεις αναπτύσσονται διότι ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη κατά τη βαφή έχει ως επακόλουθο την εξόγκωση του τεμαχίου, η οποία δεν είναι ομοιόμορφη λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του πυρήνα, ειδικά στη περίπτωση χάλυβα με μεγάλη διατομή. Επειδή ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται γρήγορα ο χάλυβας δε στρεβλώνεται όσο χρειάζεται και επομένως αναπτύσσονται μεγάλες μηχανικές εσωτερικές τάσεις. Σ' αυτές προστίθενται και άλλες οι οποίες μπορεί να προϋπήρχαν στον χάλυβα πριν από τη βαφή.

3.5.4 Ταχύτητες απόψυξης.

Την απομάκρυνση της θερμότητας από το χαλύβδινο αντικείμενο κατά τη βαφή επηρεάζουν δύο σημαντικοί παράγοντες. Αρχικά, η ικανότητα του υλικού να αποβάλλει τη θερμότητα από το εσωτερικό του προς το μέσο βαφής με διάχυση. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται από τη θερμική αγωγιμότητα, η οποία αυξάνεται όσο πέφτει η θερμοκρασία για τα προϊόντα μετασχηματισμού ου ωστενίτη. Για δεδομένο έσο βαφής η θερμική αγωγιμότητα προσδιορίζει τη κατανομή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση της απόστασης του σημείου μέτρησής της από την επιφάνεια του δοκιμίου. Τέλος, η ικανότητα του μέσου βαφής να απομακρύνει τη θερμότητα από την επιφάνεια του δοκιμίου.

3.5.5 Μέσα βαφής - Δραστηριότητα μέσων βαφής.

Ένα ιδανικό ψυκτικό μέσο θα έπρεπε να επιβάλλει μεγάλη ταχύτητα απόψυξης στην περιοχή Α, ώστε να προλαμβάνονται ανεπιθύμητοι μετασχηματισμοί του μετάλλου, και μικρή ταχύτητα απόψυξης στην περιοχή Γ, ώστε να αποφεύγονται έντονες παραμορφώσεις. Μεταξύ των υπάρχοντων ψυκτικών μέσων, το νερό και τα διαλύματα οργανικών αλάτων παρουσιάζουν

μεγάλη ταχύτητα απόψυξης σε όλες τις περιοχές και ορισμένα ειδικά λάδια παρουσιάζουν μεγάλη έκταση της περιοχής A και μικρότερη στην περιοχή B.

Η αποτελεσματικότητα για κάθε μέσο βαφής δίνεται από έναν αριθμητικό συντελεστή, ο οποίος καλείται **δραστικότητα του μέσου βαφής (H)**. Ο συντελεστής αυτός είναι αύξουσα συνάρτηση της ταχύτητας απόψυξης, η οποία επιτυγχάνεται με το δεδομένο μέσο βαφής, και έχει χαρακτηριστική τιμή. Η τιμή του εξαρτάται από την ανάδευση ή όχι του μέσου. Η δραστικότητα νερού, θερμοκρασίας 20°C, σε ηρεμία, ισούται με τη μονάδα (H=1). Ο συντελεστής H, για το νερό, αυξάνεται με την προσθήκη αλάτων (NaCl, Na₂CO₃, NH₄Cl) και ελαττώνεται με την προσθήκη γλυκερίνης, σαπουνιού ή Na₂SiO₃. Ο συντελεστής δραστικότητας παίρνει, πρακτικά, τη μέγιστη τιμή του (5), για υδατικό διάλυμα άλατος (15% NaCl).

Από την άποψη της ταχύτητας απόψυξης, η **σειρά φθίνουσας δραστικότητας των ψυκτικών μέσων (H)** είναι: αλατούχο υδατικό διάλυμα H₂O, τήγματα ή υγρά άλατα, διαλύματα λαδιών, καθαρά λάδια, ατμοσφαιρικός αέρας ή ελεγχόμενη ατμόσφαιρα (Πίνακας 3.2).

Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού μέσου, τόσο ελαττώνεται η ταχύτητα της ψύξης της επιφάνειας του μετάλλου. Στην περίπτωση των λαδιών, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τους αυτά γίνονται περισσότερο λεπτόρρευστα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός απαγωγής της θερμότητας, λόγω αγωγής και ως εκ τούτου, αυξάνεται και η δραστικότητά τους ως ψυκτικά μέσα.

Πίνακας 3.2 Τιμές δραστικότητας διαφόρων ψυκτικών μέσων χάλυβων κάτω από διάφορες συνθήκες. (Από Γ.Α. Χρυσουλάκης, 2003, σ.479)

ΜΕΣΟ ΒΑΦΗΣ	ΣΕ ΡΕΜΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ ΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΗ ΝΑΔΕΥΣΗ	ΙΣΧΥΡΟΤΑΤ ΑΝΑΔΕΥΣΗ
Αέρας	0,02	-	-	-
Λάδι	0,30	0,40	0,80	1,00
Νερό	1,00	1,30	2,00	4,00
Υδατικό λάτος	2,00	-	-	5,00
Ιδανικό ψυκτικό μέσο	∞	-	-	-

Τα δραστικά λουτρά προκαλούν μεγαλύτερες εσωτερικές τάσεις και ενδέχεται να προκαλέσουν τη ρηγματώση του χάλυβα, κατά τη βαφή. Λεπτές πλάκες και σύρματα μικρής διαμέτρου παρουσιάζουν γρηγορότερη ψύξη από τις σφαιρικές μεταλλικές μορφές.

Η μάζα του αντικειμένου παίζει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο βαφής. Κατά τη βαφή, λαμβάνει χώρα διάχυση θερμότητας από το θερμό χάλυβινο αντικείμενο προς το ψυχρό λουτρό, προκειμένου να εξισωθούν οι δύο θερμοκρασίες. Μια ράβδος μεγάλης διαμέτρου απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο για την εξίσωση των θερμοκρασιών, από μια ράβδο μικρότερης διαμέτρου.

Σχετικά με τα σχηματιζόμενα οξειδία, στη μεταλλική επιφάνεια, επιβραδύνουν, γενικά, την ταχύτητα απόψυξης, εκτός από την περίπτωση που ένα μέρος τους αποκολλάται ή αποσπάται από τη μεταλλική επιφάνεια, οπότε συντελούν στην ανομοιόμορφη ψύξη της. Προκειμένου να μειωθεί η παραγωγή των οξειδίων αυτών, είτε γίνεται επικάλυψη της μεταλλικής επιφάνειας με Cu ή ενδεχομένως με Al (ηλεκτρολυτικό) ή άλλο μέταλλο, είτε η ψύξη πραγματοποιείται σε αδρανή ατμόσφαιρα (υδρογονωμένου αζώτου), είτε χρησιμοποιούνται υγρά άλατα ουδέτερα ως προς το χάλυβα, είτε το μέταλλο θερμαίνεται σε κάμινο που περιέχει ρινίσματα σιδήρου, τα οποία δεσμεύουν ευκολότερα το οξυγόνο προς δημιουργία οξειδίων.

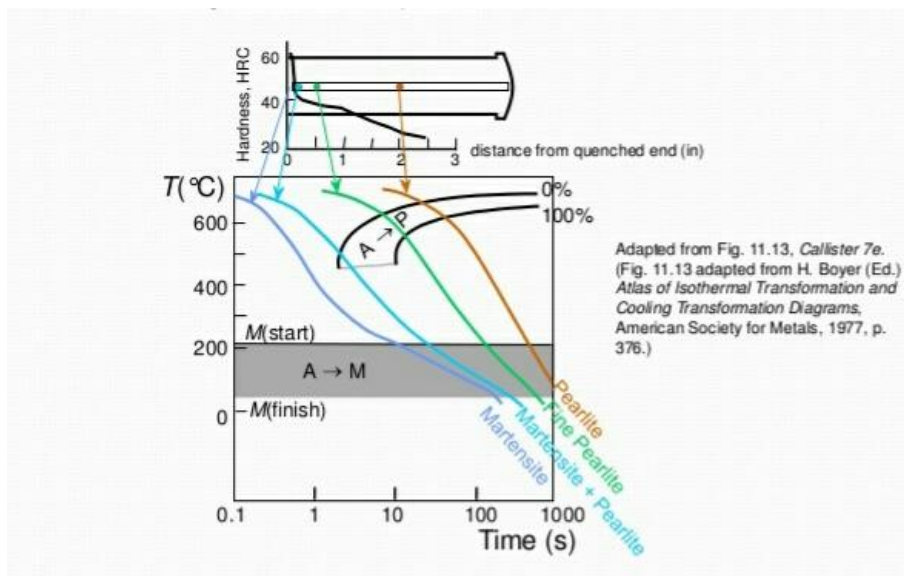
3.5.6 Εμβαπτότητα (ικανότητα σκλήρυνσης μετά από βαφή).

Η εμβαπτότητα ή η ικανότητα σκλήρυνσης ενός χάλυβα ορίζεται ως η ιδιότητα που εκφράζει το βάθος από την επιφάνεια κι την κατανομή της σκλήρυνσης που δημιουργείται. Η εμβαπτότητα εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του χάλυβα και από το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη. 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.

Όσο περισσότερος άνθρακας περιέχεται στο χάλυβα, τόσο η ταχύτητα του μετασχηματισμού λόγω της διάχυσης μειώνεται. 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.

Οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες των διαγραμμάτων TTT μετατοπίζονται προς τα δεξιά στους κραματωμένους χάλυβες, γεγονός το οποίο επιτρέπει σε πολλούς από αυτούς να εμφανίζουν υψηλές τιμές **εμβαπτότητας**, της ικανότητας, δηλαδή, να εμφανίζουν τη μαρτενσιτική δομή σε μεγάλο βάθος από την επιφάνεια, ακόμη και όταν η απόψυξη πραγματοποιείται στον αέρα. Μετά από μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, το μεταλλικό αντικείμενο υφίσταται επαναφορά, έτσι ώστε να αποκτήσει τον επιθυμητό συνδυασμό αντοχής και σκληρότητας.

Η εμβαπτότητα προσδιορίζεται, πειραματικά, με τη **δοκιμή Jominy** (Εικόνα 3.12). Πρόκειται για τη βαφή ενός κυλινδρικού μεταλλικού δοκιμίου μήκους 100mm και διαμέτρου 25,4mm από το χάλυβα για τον οποίο επιχειρείται να κατασκευαστεί το διάγραμμα CT. Κατά μήκος της γενέτειρας του δοκιμίου έχει παραχθεί με μηχανουργική κατεργασία μία επίπεδη επιφάνεια κατάλληλη για πραγματοποίηση σκληρομετρήσεων. Το δοκίμιο θερμαίνεται σε φούρνο, ώστε να επέλθει πλήρης ωστενιτικός μετασχηματισμός. Εξερχόμενο από το φούρνο, τοποθετείται σε ειδική διάταξη (συσκευή Jominy), έτσι ώστε το ένα του άκρο να ψύχεται με πίδακα νερού. Η επιφάνεια του άκρου αυτού ψύχεται ταχύτατα, αλλά όλες οι άλλες διατομές που είναι παράλληλες προς αυτή, αποψύχονται με προοδευτικά βραδύτερους ρυθμούς. Όταν όλο το κυλινδρικό δοκίμιο φθάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, αφαιρείται και εκτελείται σειρά σκληρομετρήσεων κατά μήκος μιας γενέτειρας του κυλινδρικού δοκιμίου. Οι τιμές καταγράφονται σε προφίλ σκληρότητας συναρτήσεως της απόστασης από το άκρο του δοκιμίου. Κάθε σημείο σκληρομέτρησης αντιστοιχεί σε ταχύτητα ψύξης προοδευτικά ελαττούμενη και συνδέεται με διαφοροποιημένη μικροδομή του υλικού.

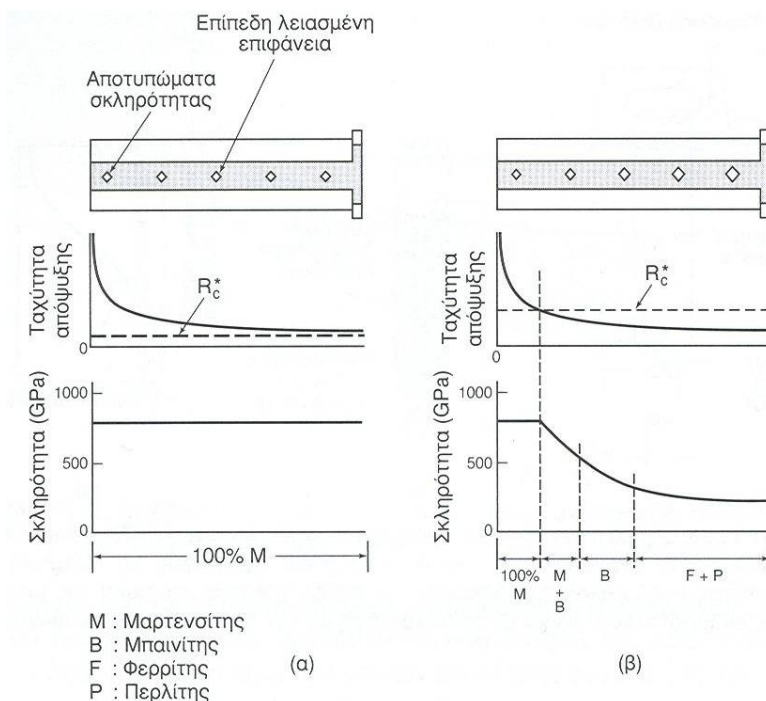


Εικόνα 3.12 Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής Jominy. Σχηματιζόμενη φάση ανάλογα το βάθος.

Ένας χάλυβας υψηλής εμβαπτότητας παρουσιάζει σταθερή τιμή, υψηλής σκληρότητας, σε όλο το μήκος του δοκιμίου (Εικόνα 3.13), διότι η ταχύτητα απόψυξης, ακόμη και στο μη ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης ταχύτητας απόψυξης (R_c^*). 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 βαφής, μόνο λίγα εκατοστά μακρύτερα της ψυχόμενης επιφάνειας. Μόλις η ταχύτητα απόψυξης γίνει μικρότερη της κρίσιμης ταχύτητας βαφής, 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 3.13 Δοκιμή Jominy: (α) ενός χάλυβα υψηλής εμβαπτότητας, (β) ενός χάλυβα μέτριας εμβαπτότητας. (Από Γ.Α. Χρυσουλάκης, 2003, σ.484)

Ως **βάθος βαφής (β)**, κατά τη δοκιμή Jominy, ορίζεται η απόσταση από το ψυχόμενο άκρο του δοκιμίου, στην οποία ο ωστενίτης έχει μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά 50%. 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 χαλύβδινου 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 (V_c) και, αύξηση του βάθους βαφής. Η αύξηση των κόκκων του ωστενίτη προκαλεί, επίσης, μετατόπιση των καμπυλών TTT και CCT προς τα δεξιά. Η εμβαπτότητα ενός χάλυβα είναι μεγαλύτερη για χάλυβα μικρής κρίσιμης ταχύτητας βαφής και αυξάνεται, με την αύξηση των κόκκων του ωστενίτη.

3.5.7 Τεχνικές βαφής χάλυβων.

Κατά την απόψυξη του ωστενίτη παρουσιάζονται μεταβολές του όγκου, οφειλόμενες:

- Σε διαστολή, λόγω των μετατροπών $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \text{M}$.
- Σε συστολή κατά την κατακρήμνιση του καρβιδίου Fe_3C .

- Σε συστολή, λόγω μείωσης της θερμοκρασίας.

Οι μεταβολές αυτές, πραγματοποιούνται από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό, και δημιουργούν τάσεις. Συνεπώς, κατά την επακολουθούσα σκλήρυνση ή επαναφορά των μεταλλικών αντικειμένων, θα παρουσιασθούν ρωγματώσεις στα σημεία απότομης αλλαγής της διατομής. Για το σκοπό αυτό, ο σχεδιασμός των αντικειμένων πρέπει να περιλαμβάνει στρογγυλεμένες γωνίες και όχι απότομες αλλαγές διατομών.

Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ωστενιτοποίηση του χάλυβα, τη βαφή με παραμονή του χάλυβα εντός ψυκτικού μέσου, μέχρι την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διαδικασία αυτή αφορούσε τη βαφή, σε ένα στάδιο (**συνεχή βαφή**). Η βαφή των χαλύβων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περισσότερα στάδια (**κλιμακωτή βαφή**). Ανάλογα με τις αποκτώμενες, μικροδομές, διακρίνονται η **κλιμακωτή μαρτενσιτική**, η **κλιμακωτή μπαινιτική** και η **κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή** (Εικόνα 3.14).

- Κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή

Η ψύξη από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, γίνεται σε δύο στάδια (Εικόνα 3.14, καμπύλη 1,2). Αρχικά, ο χάλυβας αποψύχεται σε θερμοκρασία T , λίγο ανώτερη της M_s όπου παραμένει πολύ μικρό χρονικό διάστημα ώστε να μην αρχίσει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται λουτρό τηγμένων αλάτων, θερμοκρασίας T . Εν συνεχεία, ο χάλυβας εμβαπτίζεται σε ψυχρό λουτρό, ή αφήνεται να αποψυχθεί πλήρως στον αέρα όπου λαμβάνει χώρα ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός. Με την παραμονή του σε θερμοκρασία T , ο χάλυβας αποκτά ομοιογενή θερμοκρασία στη μάζα του και κατά το δεύτερο στάδιο, επιτυγχάνονται τα ίδια ποσοστά μαρτενσίτη στην επιφάνεια και στο πυρήνα του χάλυβα αρά αναπτύσσονται λιγότερες τάσεις στο υλικό και, συνεπώς, μειώνονται οι πιθανότητες ρωγμάτωσής του. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε αντικείμενα μικρών διαστάσεων, όπως κοπτικά εργαλεία, οδοντωτοί τροχοί κλπ.

- Κλιμακωτή μπαινιτική βαφή

Ο ωστενιτοποιημένος χάλυβας αποψύχεται σε ενδιάμεση θερμοκρασία T , τόσο όσο να επιτυγχάνεται πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μπαινίτη ή λεπτόκοκκο περλίτη, ανάλογα με τη θερμοκρασία (Εικόνα 3.14, καμπύλες 4). Στη συνέχεια, ο χάλυβας ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σε ήρεμο αέρα. Τελος προκύπτει μπαινίτης, ο οποίος έχει καλή μηχανική αντοχή, δεν είναι τόσο σκληρός όσο ο μαρτενσίτης και παρουσιάζει σημαντικά επίπεδα ολκιμότητας. Πρόκειται ουσιαστικά για ισόθερμο μετασχηματισμό. Η τεχνική μπορεί να αντικαταστήσει τη μαρτενσιτική βαφή και επαναφορά. Ο χάλυβας θα έχει υψηλό όριο

διαρροής και θραύσης, καλή δυσθραυστότητα και υψηλή αντοχή σε κόπωση. Συνήθως, μετά την κλιμακωτή μπαινιτική βαφή ακολουθεί ελαφρά θέρμανση του χάλυβα, που αντιστοιχεί σε σύντομη επαναφορά.

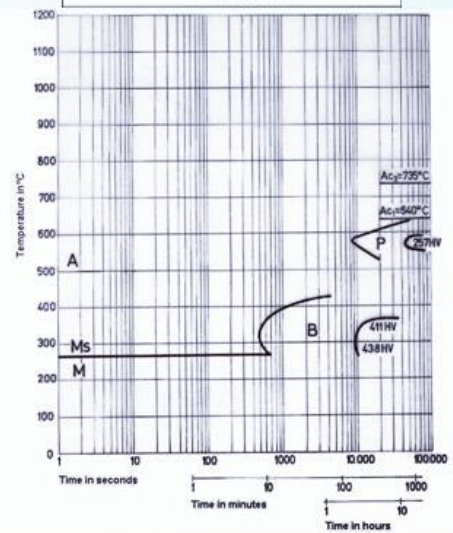
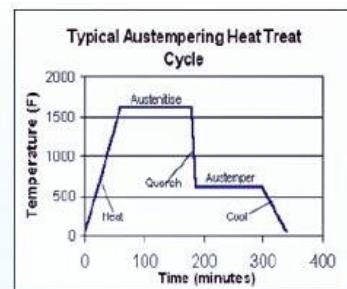
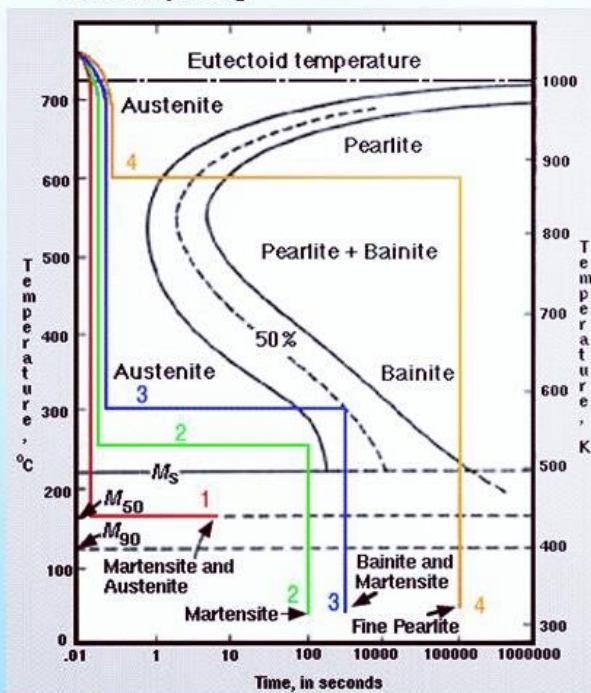
Τα μειονεκτήματα της κατεργασίας αυτής είναι ότι απαιτούνται ειδικά λουτρά τηγμένων αλάτων και ότι μπορεί να βρει εφαρμογή σε περιορισμένα ήδη χάλυβων.

- Κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή

Πρόκειται για μια ενδιάμεση κατάσταση των δυο προηγούμενων ειδών βαφής, επίσης, δύο σταδίων. Ο χρόνος παραμονής του χάλυβα στην ενδιάμεση θερμοκρασία (T) είναι της τάξης των μερικών λεπτών (Εικόνα 3.15, καμπύλη 3). Σε πρώτη φάση, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται μερικά σε μπαινίτη και, εν συνεχεία, ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη. Το σχετικό ποσοστό μπαινίτη και μαρτενσίτη, στην τελική δομή, εξαρτάται από το χρόνο παραμονής του χάλυβα στην ενδιάμεση θερμοκρασία.

Διάγραμμα IT-Κλιμακωτή βαφή

- Martempering
- Austempering



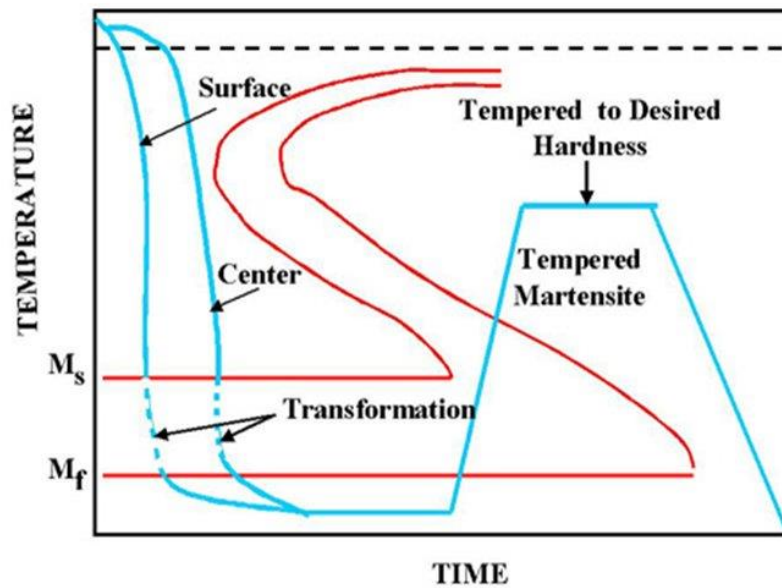
Εικόνα 3.14 Διάγραμμα TTT. Καμπύλη 1: κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή, Καμπύλη 2 : κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή, Καμπύλη 3: κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή.

3.5.8 Επαναφορά χαλύβων.

Η μαρτενσιτική βαφή οδηγεί στη παρουσία ενός πολύ σκληρού και ψαθυρού υλικού (χαμηλή ολκιμότητα και αντοχή σε κρούση). Υπό αυτές τις συνθήκες, οι χάλυβες δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και η επαναφορά τους είναι αναγκαία. Η μαρτενσιτική φάση είναι ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα Fe-C με τετραγωνική δομή BCT, με μεγάλη πυκνότητα των αταξιών. Κατά την επαναφορά τα άτομα του άνθρακα καθώς και τα σφάλματα μικροδομής (οπές και αταξίες) αποκτούν κινητικότητα με αποτέλεσμα την χαλάρωση των ελαστικών εσωτερικών τάσεων, ανακατανομή των αταξιών και μείωση της πυκνότητάς τους, ανάπτυξη των κόκκων, καθίζηση μετασταθών ή σταθερών φάσεων (κυρίως καρβιδίων) στο μαρτενσιτικό πλέγμα ή σε αταξίες, μετασχηματισμός του παραμένοντα ωστενίτη. Όλες αυτές οι διεργασίες μειώνουν την σκληρότητα και αυξάνουν την ολκιμότητα του χάλυβα. Στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία M_s είναι υψηλή, τότε ενεργοποιούνται κάποιες από τις παραπάνω διεργασίες κατά την διάρκεια της βαφής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *αυτοεπαναφορά* (autotempering). Η διαδικασία της επαναφοράς ξεκινά με τη θέρμανση των βαμμένων μαρτενσιτικών χαλύβων σε θερμοκρασία T , με $M_s < T < A_1$, και για χρόνο t , ώστε ο μαρτενσίτης να εξελιχθεί μερικώς στην κατάσταση ισορροπίας (Εικόνα 3.15). Ο μαρτενσίτης καθίσταται υπέρκορος και δημιουργούνται διάφοροι τρόποι κατανομής των καρβιδίων σιδήρου και άλλων στοιχείων. Η δομή αυτή καλείται **μαρτενσίτης από επαναφορά**. Κατά την επαναφορά επέρχεται σημαντική μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες και στη μικροδομή του υλικού. Η επαναφορά συνοδεύεται από μία σταδιακή μείωση της σκληρότητας και αντίστοιχα του ορίου διαρροής του χάλυβα γεγονός που οφείλεται κυρίως στην απώλεια της τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη και την διαφυγή του άνθρακα από το μαρτενσιτικό πλέγμα για σχηματισμό σεμεντίτη. Επίσης επέρχεται βελτίωση της ολκιμότητας και της αντοχής σε κρούση αλλά και ελάττωση των εσωτερικών τάσεων. Στις μεγαλύτερες θερμοκρασίες επαναφοράς η μείωση της σκληρότητας οφείλεται στην διεύρυνση της διασποράς σεμεντίτη και στην ανακρυστάλλωση του φερρίτη. Η μείωση του ορίου διαρροής συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ολκιμότητας του χάλυβα. Έτσι με την επαναφορά είναι δυνατόν να επιτευχθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός αντοχής και ολκιμότητας. Στις αρχές αυτές βασίζεται η ανάπτυξη των χαλύβων βαφής και επαναφοράς (quenched and tempered steels, ή Q&T Steels) με εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής και δυσθραυστότητας. Η επαναφορά συνοδεύεται ακόμα και με συγκεκριμένα προβλήματα ευθραυστότητας του χάλυβα. Οι χάλυβες υψηλής αντοχής βαφής είναι πολύ ευαίσθητοι σε διάφορους τύπους μηχανισμών ευθραυστότητας. Οι μηχανισμοί αυτοί συνδέονται με τη περικρυσταλλική θραύση στα όρια των κόκκων του πρότερου ωστενίτη.

Οι δομές που λαμβάνονται κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη εξαρτώνται από τη θερμοκρασία επαναφοράς και από το χρόνο ταυτόχρονα.

CONVENTIONAL QUENCHING AND TEMPERING

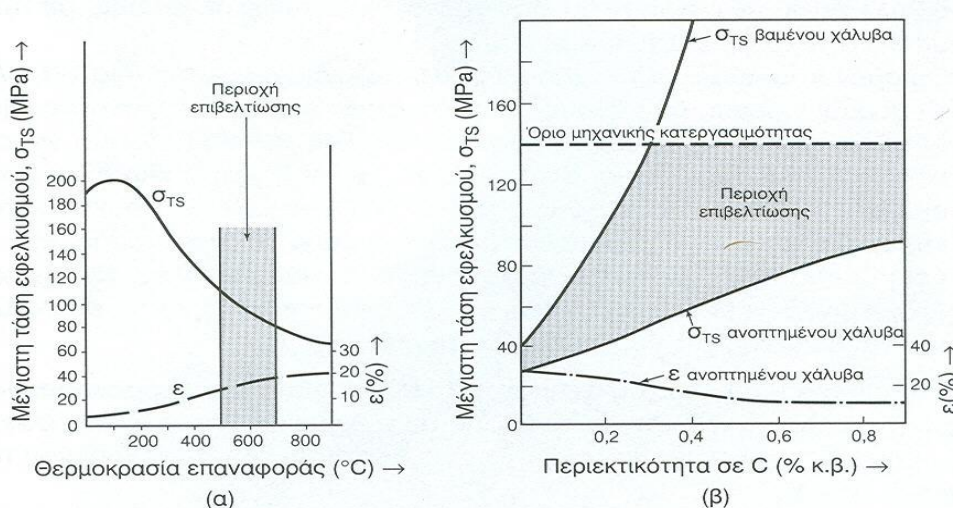


Εικόνα 3.15 : Διαδικασία της τεχνικής βαφής και επαναφοράς.

Στην Εικόνα 3.16 δίνεται η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινού χάλυβα, συναρτήσει της θερμοκρασίας (α), επαναφοράς και στην Εικόνα 3.16 (β), η ίδια μεταβολή συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Στα σχήματα αυτά, ως **περιοχή επιβελτίωσης**, ορίζεται η θερμοκρασιακή περιοχή όπου σημειώνεται σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας. Πρακτικά, η περιοχή επιβελτίωσης περιορίζεται προς τα επάνω από την ευθεία της μέγιστης σκληρότητας, για την οποία η κατεργασιμότητα του χάλυβα καθίσταται απαγορευτική.

Οι κραματωμένοι χάλυβες διατηρούν, κατά την επαναφορά, την υψηλή τους σκληρότητα, ιδιότητα η οποία καλείται **αντοχή σε επαναφορά**. Αυτό συμβαίνει όταν κάποια στοιχεία κραματοποίησης βοηθούν στην επιβράδυνση του ρυθμού μαλάκυνσης κατά την επαναφορά. Τα πιο δραστήρια στοιχεία είναι τα ισχυρά καρβιδιογόνα Cr, Mo, V. Για παράδειγμα, το πυρίτιο (Si) σταθεροποιεί το ε-καρβίδιο και αναστέλλει την μετατροπή του σε σεμεντίτη μέχρι και τους 400°C. Η παρουσία των στοιχείων Cr, W, Mo, Ti, V, Si έχει σαν αποτέλεσμα την διατήρηση της τετραγωνικότητας του μαρτενσίτη σε θερμοκρασίες επαναφοράς που φθάνουν και τους 500°C και οι χάλυβες αυτοί διατηρούν την υψηλή τους σκληρότητα. Αντίθετα τα Ni και Mn επιταχύνουν την απώλεια τετραγωνικότητας. Ορισμένα κραματικά στοιχεία, όπως τα Si, Cr, Mo και W επιβραδύνουν την διεύρυνση της διασποράς σεμεντίτη με αποτέλεσμα ο σεμεντίτης να διατηρεί την λεπτή διασπορά του σε μεγάλες θερμοκρασίες επαναφοράς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να λειτουργεί ως διασπορά για εκλέπτυνση των κόκκων διαμορφώνοντας έτσι μικρό μέγεθος φερριτικού κόκκου. Κατά την επαναφορά όλα τα παραπάνω κραματοποιητικά στοιχεία

σε υψηλές, ειδικά, θερμοκρασίες επαναφοράς αφενός επιβραδύνουν τη μαλάκυνση, αφετέρου σχηματίζουν καρβίδια τα οποία συνεισφέρουν στην αύξηση της σκληρότητας. Το φαινόμενο αυτό συχνά αναφέρεται ως **δευτερογενής σκλήρυνση**. Γενικά, χάλυβες που περιέχουν καρβιδιογόνα στοιχεία, εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε επαναφορά, διατηρούν την σκληρότητά τους, ενώ, ταυτόχρονα, γίνονται ολκιμότεροι.



Εικόνα 3.16 (α) Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων κοινού χάλυβα με 0,45% κ.β. άνθρακα, συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς. (β) Μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων των κοινών χάλυβων συναρτήσει του ποσοστού περιεχόμενου άνθρακα. (Από Γ.Δ. Χρυσουλάκης, 2003, σ.491)

3.6 Επιφανειακές θερμικές και θερμοχημικές κατεργασίες

Πολλά εξαρτήματα καλούνται να έχουν σκληρή επιφάνεια, ώστε να αντέχουν στην φθορά, και συγχρόνως πυρήνα με ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και δυσθραυστότητα [20]. Ο συνδυασμός αυτός επιτυγχάνεται με συγκεκριμένες επιφανειακές θερμικές κατεργασίες. Οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών αποβλέπουν στην ενίσχυση της αντοχής των υλικών και αφορούν την επιφανειακή σκλήρυνση. Αποκτούν αντοχή στη φθορά και σε κόπωση και προστασία από διάβρωση και οξείδωση. Οι συνηθέστερες είναι οι επιφανειακές θερμικές κατεργασίες (φλογοβαφή, επαγωγική επιφανειακή θέρμανση, κλπ) και οι θερμοχημικές κατεργασίες (ενανθράκωση, εναζώτωση, κλπ). Στο Πίνακα 3.3 ταξινομούνται όλες οι επιφανειακές κατεργασίες.

Πίνακας 3.3 Κατηγορίες επιφανειακών κατεργασιών

Υποκατηγορία	Χαρακτηριστικά	Είδος κατεργασίας
Μηχανικές επιφανειακές κατεργασίες	Εισαγωγή «επωφελών» πεδίων παραμενουσών τάσεων στην επιφάνεια του υλικού. Κρυσταλλική δομή και χημική σύσταση της επιφάνειας παραμένουν αμετάβλητες.	<ul style="list-style-type: none"> • Σφαιροβολή • Επιφανειακή έλαση
Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες	Επιβολή συνδυασμένων κύκλων θέρμανσης/ψύξης. Μεταβάλλεται μόνο η κρυσταλλική δομή της επιφάνειας, ενώ η χημική της σύσταση δεν αλλάζει.	<ul style="list-style-type: none"> • Φλογοβαφή • Επαγωγική βαφή • Βαφή με δέσμη laser • Βαφή με δέσμη ηλεκτρονίων
Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες ή εμποτισμοί	Η επιφάνεια εμπλουτίζεται με άτομα άλλου στοιχείου μέσω μηχανισμών διάχυσης, με αποτέλεσμα την αλλαγή της χημικής της σύστασης.	<ul style="list-style-type: none"> • Ενανθράκωση • Εναζώτωση • Ενανθρακαζώτωση • Ενδοκυάνωση • Εγχρωμίωση • Εναργιλίωση • Ενσιλίκωση • Βορίωση • Σεραρδίωση • Βαναδίωση • Εμφύτευση ιόντων

3.6.1 Θερμικές επιφανειακές κατεργασίες

Με τις θερμικές επιφανειακές κατεργασίες επιτυγχάνεται σκλήρυνση του επιφανειακού στρώματος του αντικειμένου, ενώ το εσωτερικό του συνήθως δεν αλλάζει. Εφαρμόζονται και δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αντικείμενα από χάλυβα και φαιό χυτοσίδηρο. Συνίστανται σε θέρμανση των επιφανειακών στρωμάτων σε θερμοκρασία μεταξύ A_{c3} και T_m και απότομη ψύξη (βαφή). Οι βασικές θερμικές επιφανειακές κατεργασίες είναι η φλογοβαφή (επιφανειακή σκλήρυνση με φλόγιστρα) επαγωγική επιφανειακή σκλήρυνση και ο βομβαρδισμός με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας.

Η φλογοβαφή εφαρμόζεται κυρίως στην επιφανειακή σκλήρυνση μεγάλων επιφανειών ή εξαρτημάτων πολύπλοκης γεωμετρίας και μικρού αριθμού παραγωγής, καθώς επίσης και σε περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι συμφέρουσα η μέθοδος των επαγωγικών ρευμάτων (οδοντωτοί τροχοί). Η επαγωγική επιφανειακή σκλήρυνση εφαρμόζεται κυρίως για την επιφανειακή σκλήρυνση εξαρτημάτων μικρών διαστάσεων και/ή απλής σχετικά γεωμετρίας

και για μεγάλη σειρά παραγωγής. Η τεχνική του βομβαρδισμού με δέσμες υψηλής πυκνότητας ενέργειας έχει αναπτυχθεί σχετικά πρόσφατα όπου εφαρμόζονται στα δοκίμια δέσμες ηλεκτρονίων ή ιόντων και δέσμες ακτίνων laser.

3.6.2 Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες

Οι θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες αναφέρονται στον εμπλουτισμό μίας επιφανειακής στοιβάδας του υλικού, μέσω μηχανισμών διάχυσης, σε κάποιο χημικό στοιχείο (C, N, Cr, B, Al, Zn και Si) το οποίο είναι ικανό να προσδώσει αύξηση της σκληρότητας και κατά συνέπεια της αντοχής σε φθορά του υλικού. Οι κατεργασίες αυτές πραγματοποιούνται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και κατηγοριοποιούνται βάση του χημικού στοιχείου εμπλουτισμού. Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες θερμοχημικές κατεργασίες σε βιομηχανική κλίμακα είναι η ενανθράκωση, η εναζώτωση και η ενανθρακαζώτωση.

3.6.2.1 Ενανθράκωση

Κατά τη τεχνική της ενανθράκωσης, η επιφανειακή στοιβάδα, φτωχού σε άνθρακα, χάλυβα εμποτίζεται επιφανειακά από άτομα άνθρακα του περιβάλλοντος μέχρι σε σημείο κορεσμού. Η κατεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες πλήρους ωστενιτοποίησης (900°C - 950°C). Ακολουθεί αργή απόψυξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Λόγο της συνεχόμενης θέρμανσης σε υψηλή θερμοκρασία παρατηρούνται κόκκοι μεγάλου μεγέθους τόσο στο πυρήνα όσο και στην επιφάνεια με συνέπεια την ελάττωση της δυσθραυστότητας του τεμαχίου. Έτσι, είναι αναγκαία η περαιτέρω θερμική κατεργασία του αντικειμένου (βαφή).

Σε πρώτη φάση ο χάλυβας υφίσταται θέρμανση σε θερμοκρασία άνω της A_{c3} , όπου επιτυγχάνεται μετασχηματισμός του χονδρόκοκκου ωστενίτη στον πυρήνα σε λεπτόκοκκο ωστενίτη. Ακολουθεί βαφή σε νερό και δημιουργείται μετασχηματισμός του λεπτόκοκκου ωστενίτη σε λεπτόκοκκο φερρίτη και μαρτενσίτη. Όμως, η δομή της εμποτισμένης επιφάνειας παραμένει χονδρόκοκκη, γι' αυτό το αντικείμενο επαναθερμαίνεται σε θερμοκρασία άνω των 760 °C για να επιτευχθεί ο σχηματισμός λεπτόκοκκου ωστενίτη, ευτεικτοειδούς σύστασης, στην εμποτισμένη επιφάνεια. Ακολουθεί βαφή σε λάδι που έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό λεπτόκοκκου, σκληρού μαρτενσίτη.

Μέσα ενανθράκωσης

Τα μέσα ενανθράκωσης μπορούν να είναι στερεά, υγρά αλλά και αέρια. Στα **στερεά**, σκόνη μίγματος ξυλάνθρακα και ανθρακούχων ενώσεων ($BaCO_3$ και Na_2CO_3) καλύπτουν την προς

κατεργασία επιφάνεια. Με τη θέρμανση οι σκόνες διασπώνται προς CO και CO₂ που αποτελούν το φορέα του C που διαχέεται στο επιφανειακό στρώμα. Μια τυπική σειρά αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την ενανθράκωση παρουσιάζονται παρακάτω:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$	(3.1)
$BaCO_3 \rightarrow BaO + CO_2$	(3.2)
$CO_2 + C \rightarrow 2CO$	(3.3)
$2CO \rightarrow CO_2 + C$	(3.4)
$Fe-\gamma + C \rightarrow Fe-\gamma (C)$	(3.5)

Τα **υγρά** μέσα είναι λουτρά τηγμάτων ανθρακούχων ενώσεων (Ba(CN)₂, NaCN, Na₂CO₃). Με τη θέρμανση διασπώνται και επιτελείται η διάχυση των ατόμων C ως ανωτέρω. Ως ενεργοποιητές της διεργασίας χρησιμοποιούνται χλωρίδια Na, Ba, Sr (τα δύο τελευταία είναι τοξικά). Εφαρμόζονται στην ενανθράκωση αντικειμένων μικρών διαστάσεων, όπου απαιτείται μικρό βάθος εμποτισμού.

Τα **αέρια** μέσα είναι μίγματα H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆. Με τη θέρμανση αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν τον απαραίτητο C για την ενανθράκωση. Περιοχές που δεν πρέπει να ενανθρακωθούν επικαλύπτονται με ηλεκτρολυτικό Cu, που αφαιρείται μετά το πέρας της κατεργασίας. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 950°C οδηγούν σε μεγέθυνση των κόκκων και ψαθυροποίηση του χάλυβα.

Βάθος Εμποτισμού

Ο βάθος εμποτισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο ενανθράκωσης. Για δεδομένη θερμοκρασία, υπολογίζεται από τη σχέση: $x = \sqrt{Dt}$, όπου: **D** ο συντελεστής διάχυσης και **t** ο χρόνος ενανθράκωσης.

Συνήθως επιλέγεται $x \leq 10\%$ της μέγιστης διάστασης της διατομής του χαλύβδινου αντικειμένου. Ο χρόνος ενανθράκωσης κυμαίνεται μεταξύ 4h και 5h. Ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται με αύξηση του ποσοστού του άνθρακα, C.

Οι περιοχές που δεν πρέπει να ενανθρακωθούν επικαλύπτονται με ηλεκτρολυτικό Cu, που αφαιρείται μετά το πέρας της κατεργασίας. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 950 °C οδηγούν σε μεγέθυνση των κόκκων και ψαθυροποίηση του χάλυβα.

3.6.3 Εναζώτωση

Εναζώτωση είναι η κατεργασία κατά την οποία η επιφανειακή στρώση του τεμαχίου εμπλουτίζεται σε άζωτο. Το άζωτο σχηματίζει με το σίδηρο πολύ σκληρές χημικές ενώσεις οι οποίες προσδίδουν αυξημένη σκληρότητα στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί χάλυβες εναζωτώσεων. Μετά την εναζώτωση δεν εφαρμόζονται συνήθως θερμικές κατεργασίες.

Άλλες θερμοχημικές κατεργασίες παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4 Αναφορά στις λοιπές θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες.

Τεχνική	Μέσο εμποτισμού Αντίδραση	Θερ/σία κατ/σία (°C)	Επιπλέον θερμική κατ/σία	Περιορισμοί - Παρατηρήσεις
Ενδοκυάνωση	Λουτρά τηγμένων αλάτων τυπικής σύ-στασης: NaCN (30%), Na ₂ CO ₃ (40%), NaCl (30%)	760-870	Βαφή	Εμπλουτισμός σε C και N. Βάθος εμποτισμού: 30-50 μm. Επικίνδυνη κατεργασία λόγω του -CN Απαιτείται σύστημα απαγωγής τοξικών αερίων. Επιτυγχάνεται επιφανειακή σκλήρωση Εφαρμογές: Χάλυβες μικρής π(C).
Εναργιλίωση	Σκόνη Al και NH ₄ Cl σε ειδικό φούρνο $Fe + AlCl_3 \rightarrow FeCl_3 + Al$	800-1000	-	Εμπλουτισμός σε Al. Βάθος εμποτισμού: <1 μm. Διάρκεια κατεργασίας: 40-50 h. Επιτυγχάνεται προστασία σε διάβρωση μέχρι 750 °C λόγω σχηματισμού Al ₂ O ₃ στην επιφάνεια. Εφαρμογές: Χάλυβες με π(C)=0.08-0.2% κ.β., εσχάρεις φούρνων, σωλήνες ατμού, σερπαντίνες κλπ.
Εγγρωμίωση	Σκόνη Cr	1300-1400	-	Εμπλουτισμός σε Cr. Βάθος εμποτισμού: <1 μm. Επιτυγχάνεται προστασία σε διάβρωση σε περιβάλλον HNO ₃ και σε θερμό περιβάλλον. Εφαρμογές: Χάλυβες με π(C)=0.05-0.2% κ.β., σε χημικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας HNO ₃ .
Ενσιλικώση	Σκόνη SiC ή SiCl ₄ σε ατμόσφαιρα Cl ₂ .	930-1010	-	Εμπλουτισμός σε Si, που παράγεται με διάσπαση της σκόνης από το Cl ₂ . Βάθος εμποτισμού: 0.1-2.5 μm. Διάρκεια κατεργασίας: ~2 h. Επιτυγχάνεται προστασία σε διάβρωση σε υψηλή θερμοκρασία. Εφαρμογές: Κοινοί χάλυβες με μικρές π(C) και π(Si), εξαρτήματα αντλιών αυτ/του, βαλβίδες, κύλινδροι MEK, εγκαταστάσεις επεξεργασίας πετρελαίου

Σεραρδίωση	Λεπτή σκόνη Zn.	350-380	-	<p>Εμπλουτισμός σε Al και σχηματισμός των φάσεων FeZn₇ και FeZn₁₀. Βάθος εμποτισμού: < 300 μm. Διάρκεια κατεργασίας: πολύ μεγάλη. Υψηλό κόστος. Επιτυγχάνεται βελτίωση της αντοχής σε διάβρωση και οξείδωση. Εφαρμόζεται σπάνια.</p>
Βορίωση	Σκόνη B.	815-980	Διάφοροι θερμοί κύκλοι	<p>Εμπλουτισμός σε B και σχηματισμός των σκληρών ενώσεων FeB και Fe₂B. Βάθος εμποτισμού: 25-125 μm. Διάρκεια κατεργασίας: 15 min – 2 h. Επιτυγχάνονται πολύ μεγάλη σκληρότητα (1500-2000 HV), προστασία σε φθορά και διάβρωση σε όξινο περιβάλλον. Εφαρμογές σε πολλά είδη χάλυβων, γρανάζια αντλιών λαδιού σε MEK, εγχυτήρες καυστήρων υψηλής πίεσης, βαλβίδες ασφαλείας, βάνες διαβρωτικών ρευστών κλπ.</p>

Β' ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Υλικό πειράματος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τη διαδικασία της ενανθράκωσης σε συγκεκριμένες συνθήκες σε χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN. Το υλικό προμηθεύτηκε σε βέργες με λεία επιφάνεια διαμέτρου 23 mm. Οι ράβδοι προέρχονται από έλαση εν θερμώ (hot rolled steel bars) από χάλυβα 15CrNi6 βάσει του προτύπου DIN 10200-86 και έχουν παραδοθεί σε ανοπτημένη κατάσταση (annealed). Το υλικό συνοδεύεται με πιστοποιητικό ποιότητας της εταιρείας, το οποίο σχετίζεται με τον τρόπο κατασκευής και την χημική σύσταση του χάλυβα.

Ο χάλυβας 15CrNi6 κατά DIN (AISI 3115, W.Nr 1.5919) ανήκει στους ελαφρά κραματωμένους χάλυβες επιφανειακής βαφής. Έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,16%) και κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το Cr και το Ni. Το υλικό βρίσκει εφαρμογή σε κατασκευές που απαιτούν υψηλή επιφανειακή σκληρότητα και αντοχή στη φθορά και την τριβή και ταυτόχρονα διατηρούν ανάλογη αντοχή στον πυρήνα. Επίσης, χρησιμοποιείται σε στοιχεία μηχανών ή εργαλείων διαμόρφωσης, όπως πείροι ακροαξόνιων, οδοντωτοί τροχοί κιβωτίων ταχυτήτων, δακτύλιοι εδράνων, σιαγόνες για τσοκ τόννου, κοχλίες εργαλειομηχανών, κλπ. Παραλαμβάνεται συνήθως σε ανοπτημένη κατάσταση ή κατόπιν μαλακτοποίησης για καλύτερη κατεργαστικότητα (170 – 235 HB). Ο χάλυβας αυτός είναι κατάλληλος για συγκόλληση πριν από την ενανθράκωση, κατόπιν προθέρμανσης. Το υλικό μετά τη βαφή του ακολουθεί τη διαδικασία της επαναφοράς η οποία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία 150 – 200 °C και γίνεται για τη βελτίωση της αντοχής του μειώνοντας ελάχιστα τη σκληρότητά του [21].

4.2 Σχεδιασμός πειράματος

Ο κύριος σκοπός της μελέτης είναι να ελεγχθεί η επιρροή του χρόνου ενανθράκωσης στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στην περίπτωση της διπλής βαφής και αυτός είναι ο κύριος σκοπός της εργασίας. Για την διεξαγωγή του πειράματος επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις ενανθράκωσης (ως προς την διάρκειά της) και παρέμειναν σταθερές όλες οι υπόλοιπες συνθήκες των μετέπειτα θερμικών κατεργασιών. Μια ομάδα δοκιμών υπέστη εξομάλυνση δομής ώστε να συγκριθεί με τη κύρια θερμική κατεργασία της ενανθράκωσης, όπου είναι και η συνηθέστερη κατάσταση διάθεσης πολλών χάλυβων αντίστοιχης ποιότητας. Οι δοκιμές εφαρμόστηκαν και σε δοκίμια από χάλυβα σε κατάσταση εξομάλυνσης καθώς και στην

κατάσταση παράδοσης. 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 αποτυπώνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τυχαία επιλογή δειγμάτων

A/A	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΤΥΧΑΙΟ ΠΟΙΗΣΗ	A/A (CHARPY DBL)	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΤΥΧΑΙΟ ΠΟΙΗΣΗ	A/A (CHARPY SINGLE)	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ	ΤΥΧΑΙ ΟΠΟΙΗΣΗ
1	1	36	1	9	15	21	1	32
2	1	2	2	9	5	22	1	27
3	1	16	3	9	6	23	1	25
4	1	38	4	9	14	24	1	56
5	2	46	5	10	13	25	2	54
6	2	19	6	10	2	26	2	30
7	2	27	7	10	12	27	2	28
8	2	52	8	10	9	28	2	24
9	3	20	9	11	11	29	3	52
10	3	41	10	11	3	30	3	40
11	3	5	11	11	17	31	3	21
12	3	55	12	11	20	32	3	23
13	4	31	13	12	10	33	4	29
14	4	37	14	12	4	34	4	26
15	4	18	15	12	19	35	4	51
16	4	6	16	12	16	36	4	43
17	5	39	17		8	37	5	33
18	5	54	18		18	38	5	59
19	5	33	19		1	39	5	55
20	5	34	20		7	40	5	44
21	6	45				41	6	57
22	6	40				42	6	45
23	6	28				43	6	47
24	6	7				44	6	46
25	7	22				45	7	35
26	7	13				46	7	39
27	7	30				47	7	49
28	7	42				48	7	34
29	8	11				49	8	58
30	8	50				50	8	41
31	8	3				51	8	31
32	8	53				52	8	22
33	9	15				53	13	36
34	9	14				54	13	37
35	9	8				55	13	53

36	9	49				56	13	60
37	10	1				57	14	50
38	10	35				58	14	38
39	10	26				59	14	42
40	10	9				60	14	48
41	11	17						
42	11	44						
43	11	56						
44	11	25						
45	12	48						
46	12	4						
47	12	21						
48	12	24						
49	13	51						
50	13	10						
51	13	12						
52	13	47						
53	14	29						
54	14	23						
55	14	32						
56	14	43						

Στον πίνακα 4.2 φαίνεται το πρόγραμμα των θερμικών κατεργασιών που εφαρμόστηκε στα δοκίμια.

Πίνακας 4.2 Πίνακας θερμικών κατεργασιών.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ				ΒΑΦΗ 1				ΒΑΦΗ 2						ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ				
		ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ		ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΨΥΞΗ Ι		ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΨΥΞΗ Ι		ΨΥΞΗ ΙΙ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΨΥΞΗ			
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ		T (C)	t (min)	T (C)	t (min)	T (C)	t (min)	T (C)	t (min)	ΜΕΣΟ	T (C)	t (min)	T (C)	t (min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ	T (C)	t (min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ
ΑΝΟΠΤΗΣΗ	29																			
	23																			
	32																			
	43																			
ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΔΟΜΗΣ	51					840	30	ΑΕΡΑΣ												
	10																			
	12																			
	47																			
ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ 1 ΩΡΑ	8																			
	49	630	30	900	60	840	30	180	15	ΑΕΡΑΣ	840	30	180	15	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	14																			
ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ 2 ΩΡΕΣ	26																			
	9	630	30	900	120	840	30	180	15	ΑΕΡΑΣ	840	30	180	15	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	35																			
	1																			
ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ 3 ΩΡΕΣ	17																			
	25	630	30	900	180	840	30	180	15	ΑΕΡΑΣ	840	30	180	15	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	44																			
	56																			
ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ 4 ΩΡΕΣ	4																			
	48	630	30	900	240	840	30	180	15	ΑΕΡΑΣ	840	30	180	15	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ	180	120	ΑΛΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	24																			
	21																			

4.3 Χημική Ανάλυση Υλικού

Απολύτως απαραίτητος είναι ο έλεγχος της ποιότητας για κάθε υλικό καθ' όλη τη διαδικασία και τα στάδια της παραγωγής του [22]. Η χημική ανάλυση αποτελεί έναν από τους ελέγχους οι οποίοι διεξάγονται υποχρεωτικά και ακολουθούν αυστηρά πρότυπα. Σήμερα χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι για την χημική ανάλυση μεταλλικών υλικών. Από τις πιο διαδεδομένες είναι η φασματοσκοπική ανάλυση ατομικής εκπομπής.

Η φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής, στοιχειακής ανάλυσης, χρησιμοποιεί διέγερση σπινθήρα (spark) και arc, η οποία προτιμάται ως μέθοδος για την στοιχειακή ανάλυση δειγμάτων μετάλλου. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες επεξεργασίας, ανακύκλωσης μετάλλων κλπ. Οι φασματογράφοι ατομικής εκπομπής αποτελούν το πιο αποτελεσματικό μέσο για τον έλεγχο των κραμάτων εξαιτίας της ταχείας ανάλυσης και της εξαιρετικής ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Οι εργαστηριακοί φασματογράφοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα στάδια της παραγωγής, όπως έλεγχος εισερχόμενης ποιότητας μετάλλου, στο χώρο παραγωγής και επεξεργασίας, στον ποιοτικό έλεγχο του παραγόμενου προϊόντος και σε όσες άλλες εφαρμογές απαιτείται η χημική ανάλυση δειγμάτων μετάλλου.

Στη χημική ανάλυση μεταλλικών μηχανολογικών εξαρτημάτων χρησιμοποιείται κατά κανόνα η φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy), λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας. Τα άτομα των στοιχείων του εξεταζόμενου υλικού διεγείρονται, συνήθως με τη δημιουργία πλάσματος, και στη φάση της αυτοδιέγερσης τους εκπέμπουν μια σειρά χαρακτηριστικών για κάθε στοιχείο ακτινοβολιών. Η παρουσία του είδους των στοιχείων (ποιοτική ανάλυση) ταυτοποιείται με την ανίχνευση των κύριων φασματικών γραμμών, ενώ η περιεκτικότητα των στοιχείων στο δείγμα (ποσοτική ανάλυση) προσδιορίζεται μετά από κατάλληλη μέτρηση της έντασής τους με τη χρήση προτυποποιημένων δειγμάτων του αντίστοιχου στοιχείου.

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 4.1).



ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Φασματογράφος Οπτικής Εκπομπής

Μετά την αγορά του υλικού, προετοιμάστηκε κατάλληλο δοκίμιο για τη χημική ανάλυση. Αρχικά η επιφάνεια του καθαρίστηκε και γυαλίστηκε με λειαντικά χαρτιά P80 και P120. Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο φασματογράφο (Εικόνα 4.2) και πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος. Η χημική ανάλυση εμφανίζεται σε οθόνη υπολογιστή και στη συνέχεια εκτυπώνεται.



ΕΙΚΟΝΑ 4.2: Θέση Υποδοχής του δοκιμίου στο φασματογράφο

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πραγματικής χημικής ανάλυσης του δοκιμίου ως μέσος όρος πέντε διαδοχικών μετρήσεων. Στον Πίνακα 4.4 αποτυπώνεται η χημική ανάλυση του υλικού σε σύγκριση με την ονομαστική χημική ανάλυση του κατασκευαστή [23] και την τυπική χημική ανάλυση κατά DIN 17210 αντίστοιχα [24].

Πίνακας 4.3: Πραγματική χημική ανάλυση υλικού

Χημικό Στοιχείο	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu	V	Al	Sn
Περιεκτικότητα (%)	0.169	0.428	0.027	0.012	0.252	1.80	1.94	0.179	0.005	0.030	0.022
Χημικό Στοιχείο	Fe	Ti	Pb	Co	As	W	Nb	Zr	B	Mo	
Περιεκτικότητα (%)	94.9	0.019	0.001	0.055	0.029	0.070	0.004	0.001	0.005	0.043	

Πίνακας 4.4: Ταυτοποίηση Χημικής Ανάλυσης Υλικού

	Χημικό Στοιχείο (%)							
	C	Si	Mn	Cr	S	Ni	P	Al
Πραγματική Χημική Ανάλυση Υλικού	0.169	0.252	0.428	1.94	0.027	1.80	0.012	0.030
Ονομαστική Χημική Ανάλυση (Κατασκευαστής)	0.17	0.29	0.50	1.47	0.010	1.42	0.018	0.033
Τυπική Χημική Ανάλυση κατά DIN 17210	0.14 – 0.19	max. 0.40	0.40 – 0.60	1.40 – 1.70	max. 0.035	1.40 – 1.70	max. 0.035	-

Συμπεράσματα:

Βάση των στοιχείων της χημικής ανάλυσης, επιβεβαιώνεται ότι το υλικό αντιστοιχεί στο χάλυβα 15CrNi 6 κατά DIN (W.Nr. 1.5919).

4.4 Διεξαγωγή πειράματος

Το βασικό πείραμα αναφέρεται στις θερμικές κατεργασίες του υλικού οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ-Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε. υπό την εποπτεία του κ. Δ. Παπαγεωργίου.

Κατά την εξομάλυνση δομής μια ομάδα δοκιμίων υπέστη θέρμανση για ωστενιτοποίηση σε φούρνο τετηγμένων αλάτων για το απαραίτητο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια ψύξη στον αέρα. Για την ενανθράκωση όλα τα δοκίμια έχουν υποστεί προθέρμανση σε κλίβανο τύπου pit type για το απαραίτητο χρονικό διάστημα. Στη συνέχεια εισήχθησαν σε κλίβανο pit τύπου, τετηγμένων αλάτων για την ενανθράκωση για την οποία χρησιμοποιήθηκε υγρό τήγμα

αποτελούμενο από μείγμα αλατιών GS750, CECONTROL 110B και GS540. Πρώτα τοποθετήθηκε μια ομάδα δοκιμίων, έπειτα από μια ώρα μια δεύτερη ομάδα, μετά από δυο ώρες μια τρίτη και μετά από τρεις ώρες μια τέταρτη ομάδα η οποία παρέμεινε και αυτή για μία ώρα μέσα στο κλίβανο. Έτσι διασφαλίστηκαν παρόμοιες συνθήκες ενανθράκωσης για διαφορετικό χρόνο. Μετά την ενανθράκωση, στον ίδιο κλίβανο, πραγματοποιήθηκε η ωστενιτοποίηση στους 840°C, ακολουθώντας το πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών, δηλαδή παραμονή στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης για 30 λεπτά. Ακολούθησε απόψυξη σε ήρεμο αέρα. Μετά τη διαδικασία της απόψυξης στον αέρα σε απαιτούμενο χρόνο τα δοκίμια ξανά τοποθετούνται στο κλίβανο σε θερμοκρασία ωστενιτοποίησης για μισή ώρα και στη συνέχεια αποψύχονται ισοθερμοκρασικά σε τήγμα άλατος τύπου AS140 στους 180°C. Ακολουθεί η επαναφορά του υλικού σε κλίβανο τετηγμένων αλάτων σε θερμοκρασία 180°C για δύο ώρες. Μετά την επαναφορά, αποψύχθηκαν όλα τα δείγματα σε στον αέρα έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

4.5 Επιλογή δειγμάτων

Μετά τις θερμικές κατεργασίες, διαμορφώνονται δοκίμια σχήματος ράβδου τα οποία αποτελούν υλικό για την περαιτέρω μελέτη. Η μελέτη αναφέρεται στην ανάλυση μικροδομής (οπτική μικροσκοπία) και στην εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρηση σκληρότητας, μικροσκληρότητας και δοκιμή κρούσης).

Στάδιο 1°:

Για την κοπή χρησιμοποιήθηκε 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.



EIKONA 4.3: Παλινδρομικό πριόνι κοπής

Στάδιο 2^ο:

Οι ράβδοι επεξεργάστηκαν σε εργαλειομηχανή (τόρνο), με σκοπό την αφαίρεση του εξωτερικού στρώματος (Εικόνα 4.4). Η μηχανουργική κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα πάσα ξεχονδρίσματος, (0,75 mm κάθε πάσο, 1500 rpm) και τέσσερα πάσα φινιρίσματος (0,5 mm κάθε πάσο και 2500 rpm). Τέλος πραγματοποιήθηκε λείανση των επιφανειών με λειαντικά χαρτιά P320 και P600 διαδοχικά (Εικόνα 4.5).



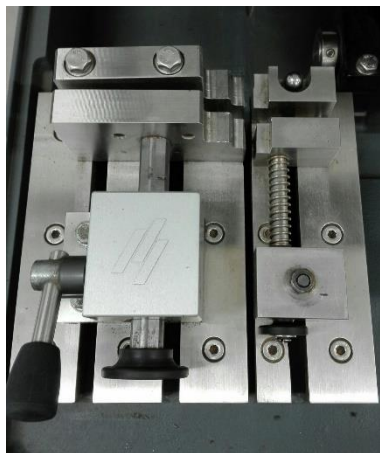
EIKONA 4.4: Επεξεργασία δοκιμίων σε τόρνο



ΕΙΚΟΝΑ 4.5: Ράβδοι θερμικών κατεργασιών

Στάδιο 3^ο:

Οι ράβδοι χρησιμοποιήθηκαν τεμαχίστηκαν στο κοπτικό μηχάνημα του εργαστηρίου τύπου 5326146 Labotom-3 της Struers , Type 05326146 και S.No.5321698 (Εικόνα 4.6).



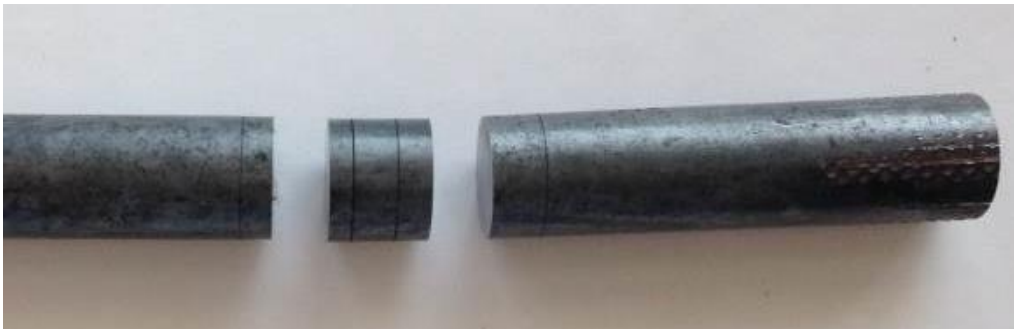
EIKONA 4.6: Κοπή των δοκιμίων σε κοπτικό Labotom-3

Πρώτα αφαιρέθηκε ένα κομμάτι μήκους 20 mm και στη συνέχεια κόπηκαν διαδοχικά δυο δοκίμια μήκους 15mm (Εικόνα 4.7). Η κοινή διατομή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε για την μεταλλογραφική ανάλυση δομής στο πρώτο δοκίμιο και για την μέτρηση σκληρότητας /μικροσκληρότητας στο δεύτερο.



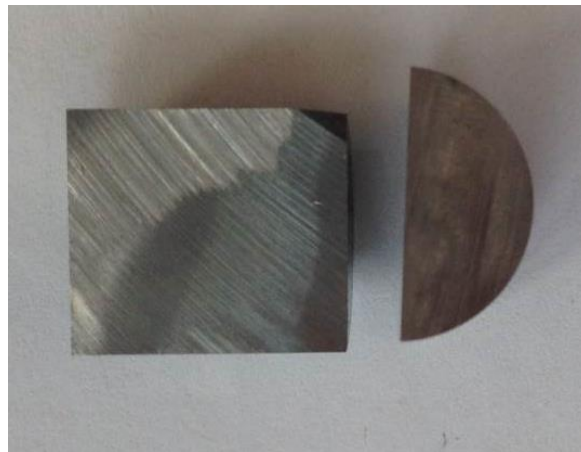
EIKONA 4.7: Κοπή των δοκιμίων για την ανάλυση στην εγκάρσια διατομή

Από μια άλλη βέργα της τετράδας αφαιρέθηκε από την άκρη μια φέτα 40 mm και στη συνέχεια κόπηκε ένα δοκίμιο 20 mm (Εικόνα 4.8).



EIKONA 4.8: Κοπή των δοκιμίων για την ανάλυση στην διαμήκη διατομή

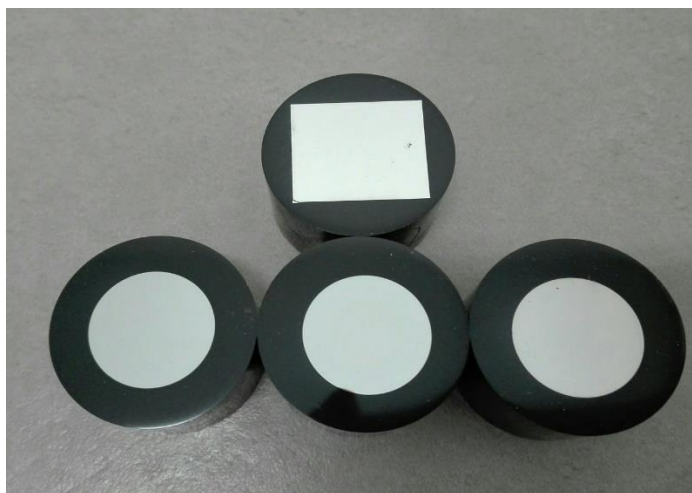
Το δοκίμιο τεμαχίστηκε διαμήκως και πάρθηκαν δυο δείγματα (Εικόνα 4.9). Το ένα χρησιμοποιήθηκε για μεταλλογραφική ανάλυση δομής και στερεοσκόπιο και το δεύτερο για την μέτρηση σκληρότητας/μικροσκληρότητας.



EIKONA 4.9: Τεμαχισμός των δοκιμίων για την ανάλυση στην διαμήκη διατομή

Στάδιο 4°:

Όλα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν στο μηχάνημα Citopress-1 της εταιρίας Struers type 05776127 και S.No. 5770313. Χρησιμοποιήθηκε μίγμα ρητινών Phenocure Black και Epomet Molding Compound της εταιρίας Buehler (Εικόνα 4.10).



ΕΙΚΟΝΑ 4.10: Εγκιβωτισμένα δοκίμια.

Κατόπιν έγινε επιλογή των δοκιμίων και πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη αρίθμηση. Κάθε δοκίμιο εγκάρσιας διατομής συμβολίζεται με X1.X2, όπου X1 είναι ο τυχαίος αριθμός της θερμικής κατεργασίας και X2 αντιπροσωπεύει τον έλεγχο που πραγματοποιείται. Το X2 είναι είτε 1 στη περίπτωση της μεταλλογραφικής ανάλυσης, είτε 2 στην περίπτωση μέτρησης σκληρότητας. Στην περίπτωση ελέγχου σε διαμήκη διατομή ανάμεσα στους 2 αριθμούς τοποθετείται T.

Στάδιο 5^ο:

Μετά τον εγκιβωτισμό όλα τα δοκίμια προετοιμάστηκαν για μεταλλογραφική ανάλυση. Λειάνθηκαν με λειαντικά χαρτιά (P80, P120, P180, P240, P320, P600, P800, P1000 και P1200) και χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανήματα του εργαστηρίου Struers (250 rpm), MecaPol (350 rpm) και Boehler (350 rpm). Ακολούθησε στίλβωση σε 4 πάσα. Πρώτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε μετάξι, στο μηχάνημα MecaPol, με 150 rpm. Χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνιας 6 μm. Δεύτερο πάσο πραγματοποιήθηκε σε βελούδο, στο μηχάνημα Struers, με 250 rpm. Χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνιας 3 μm. Τρίτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε βελούδο, στο μηχάνημα Struers, με 250 rpm. Χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνιας 1 μm. Τέταρτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε τσόχα, στο μηχάνημα Buehler, με 150 rpm. Χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνιας 0,25 μm. Μετά από κάθε πάσο οι επιφάνειες ξεπλένονταν με jet αιθανόλης, σκουπίστηκαν με βαμβάκι και στεγνώθηκαν με σεσουάρ.

Στάδιο 6^ο:

Για την δοκιμή δυσθραυστότητας, προετοιμάστηκαν τυποποιημένα δοκίμια, ορθογωνικής διατομής μήκους 55 mm και πλάτους 10 mm καθώς και η κατάλληλη εγκοπή στο μέσον τύπου

V, βάσει προτύπων (Εικόνα 4.11). Η μηχανουργική κατεργασία πραγματοποιήθηκε σε εξειδικευμένο μηχανουργείο.

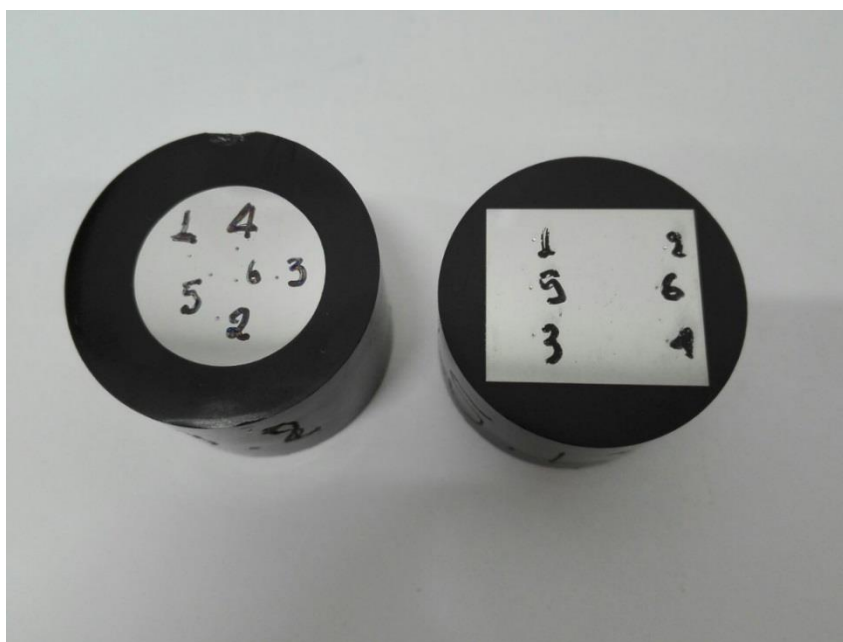


ΕΙΚΟΝΑ 4.11: Τυποποιημένα δοκίμια για την δοκιμή δυσθραυστότητας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Όλες οι μετρήσεις σκληρότητας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών (Π.Ε.Τ.Υ.Λ) του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. Χρησιμοποιήθηκε σκληρόμετρο τύπου ALPHA DUROMATIC, model 25850, με αριθμό κατασκευής: 2026. Εφαρμόστηκε η μέθοδος δοκιμής Vickers βάσει προτύπου ASTM [25]. Πριν τις μετρήσεις πραγματοποιήθηκε έμμεση επαλήθευση του οργάνου, όπως προβλέπει το πρότυπο.

Για τις σκληρομετρήσεις χρησιμοποιήθηκε δύναμη 30 kp. Τα αποτυπώματα εξετάστηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων φακών του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.Υ.Λ., τύπου Metalvert της Leica, στην μεγέθυνση x100. Χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από κάθε ράβδο. Στο ένα δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν σκληρομετρήσεις στη διατομή της ράβδου (εγκάρσια) και στο άλλο δοκίμιο στη διαμήκη τομή κατά τον άξονα της ράβδου. Λήφθηκαν μετρήσεις στο 1/2 της ακτίνας και στο κέντρο της για την περίπτωση της εγκάρσιας διατομής. Τα σημεία μέτρησης απεικονίζονται στις Εικόνα 5.1 .



ΕΙΚΟΝΑ 5.1: Σημεία μέτρησης σκληρότητας στην εγκάρσια και διαμήκη διατομή της ράβδου

Για τα δοκίμια στην εγκάρσια διατομή τα σημεία μέτρησης 1, 2, 3 χαρακτηρίστηκαν ως μετρήσεις της μισής ακτίνας (1/2 R) και οι μετρήσεις 4, 5, 6 ως μετρήσεις στο κέντρο (R). Παρακάτω στο πίνακα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Τιμές σκληρότητας στην εγκάρσια διατομή της ράβδου.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ HV 30							
		½ R			R		
ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	1	2	3	4	5	6
<i>ΑΝΟΠΤΗΣΗ (ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΑΡΑΛΙΘΩΣΗΣ)</i>	29	198.0	205.7	205.7	198,0	198.0	201.8
	23	194.4	190.8	194.4	194,4	194.4	190.8
	32	222.5	222.5	218.1	218,1	213.9	218.1
	43	231.7	231.7	236.5	222,5	231.7	231.7
<i>ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΔΟΜΗΣ</i>	51	300.9	294.0	294.0	274,7	274.7	274.7
	10	308.0	294.0	294.0	274,7	287.4	300.9
	12	294.0	294.0	294.0	274,7	287.4	300.9
	47	300.9	294.0	300.9	287,4	274.7	287.4
<i>1 ΩΡΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ</i>	8	429.3	429.3	406,4	395,8	395.8	406.4
	49	365.8	375.5	385.3	365,8	365.8	365.8
	14	454.1	454.1	454.1	454.1	454.1	454.1
	15	481,2	467,7	454,1	467,7	467,7	481,2
<i>2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ</i>	9	454,1	454,1	467,7	481,2	454,1	454,1
	35	429,3	429,3	429,3	406,4	406,4	481,2
	26	406,4	385,3	406,4	375,5	385,3	365,8
	1	454,1	454,1	454,1	454,1	454,1	454,1
<i>3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ</i>	25	406,4	406,4	406,4	385,3	385,3	395,3
	56	406,4	429,3	406,4	406,4	406,4	406,4
	44	406,4	429,3	406,4	395,8	406,4	406,4
	17	454,1	429,3	429,3	385,3	385,3	395,3
<i>4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ</i>	4	406,4	429,3	429,3	406,4	429,3	406,4
	21	481,2	467,7	510,9	467,7	467,7	467,7
	24	455,3	454,1	455,3	417,8	417,8	417,8
	48	406,4	406,4	406,4	385,3	385,3	385,3

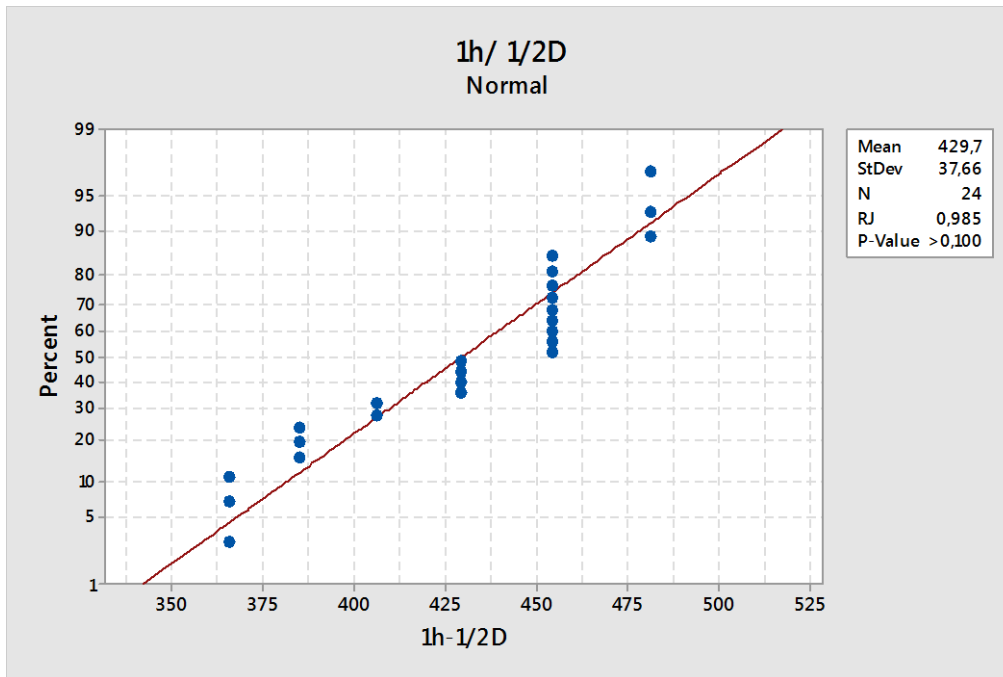
Στον παρακάτω Πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα στη διαμήκη διατομή των δοκιμίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Τιμές σκληρότητας στη διαμήκη διατομή της ράβδου

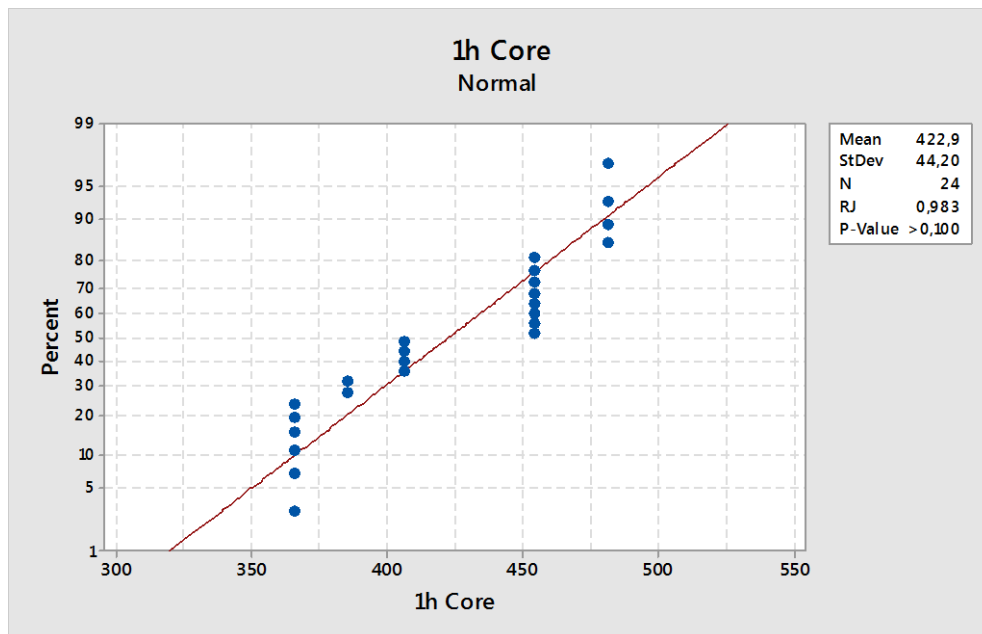
		ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ HV 30					
		½ R			R		
ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	1	2	3	4	5	6
ΑΝΟΠΤΗΣΗ	43	222.5	222.5	222.5		218.1	227.0
1 ΩΡΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	14	454.1	454.2	454.3	481.2	454.1	454.1
2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	35	406.4	417.8	395.8	406.4	417.8	406.4
3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	25	429.3	429.3	429.3	429.3	417.8	406.4
4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	21	481.2	467.7	467.7	481.2	467.7	467.7

Με δεδομένα τις τιμές σκληρότητας που προέκυψαν, βασισμένες από το προγράμμα MINITAB 17, πραγματοποιήθηκαν διαγράμματα κανονικότητας ώστε να εξεταστεί η διασπορά των τιμών ανά δοκίμιο. Στις Εικόνες 5.2 – 5.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου κανονικότητας της σκληρότητας στην περίπτωση δοκιμίων στην εγκάρσια και διαμήκη διατομή για μετρήσεις στο ½ της ακτίνας και στο κέντρο, αντίστοιχα. Επιλέχτηκε 95% βαθμός εμπιστοσύνης.

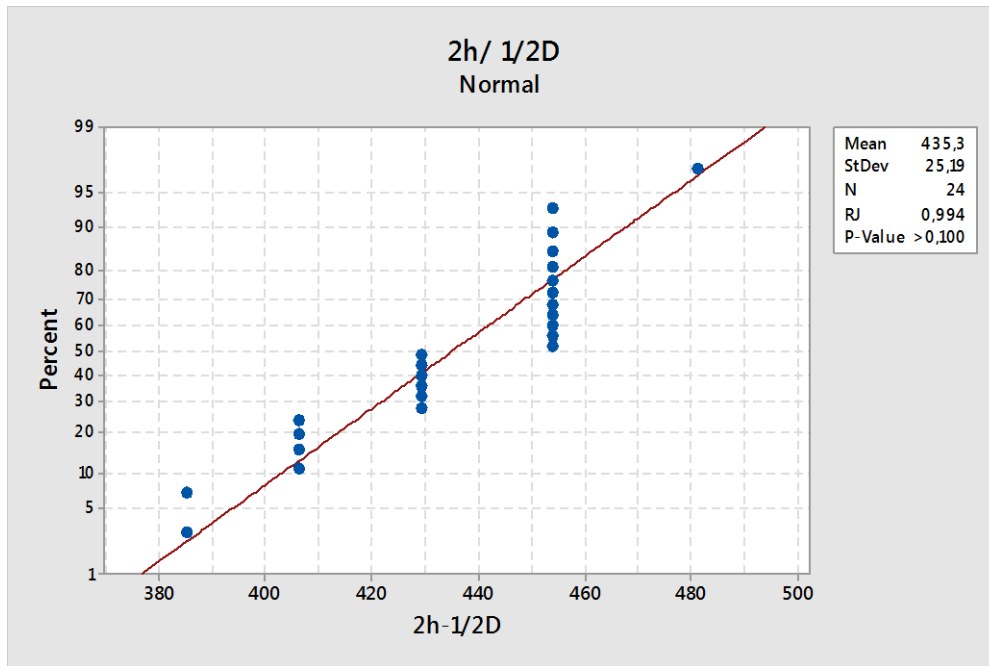
Κριτήριο για να μην ακολουθούν τα δεδομένα κανονική κατανομή είναι η τιμή Roy-Joiner (RJ) να είναι μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή που δίδεται σε πίνακα και εξαρτάται από το σύνολο των μετρήσεων του δείγματος και το επίπεδο σημαντικότητας α (5%).



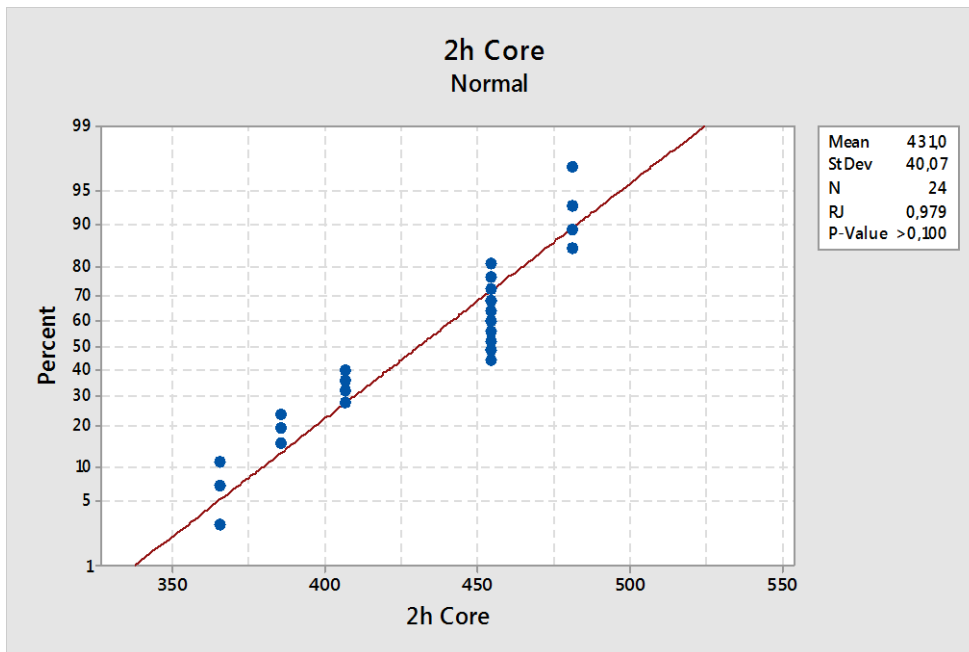
ΕΙΚΟΝΑ 5.2: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 1 ώρα ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια των δοκιμίων.



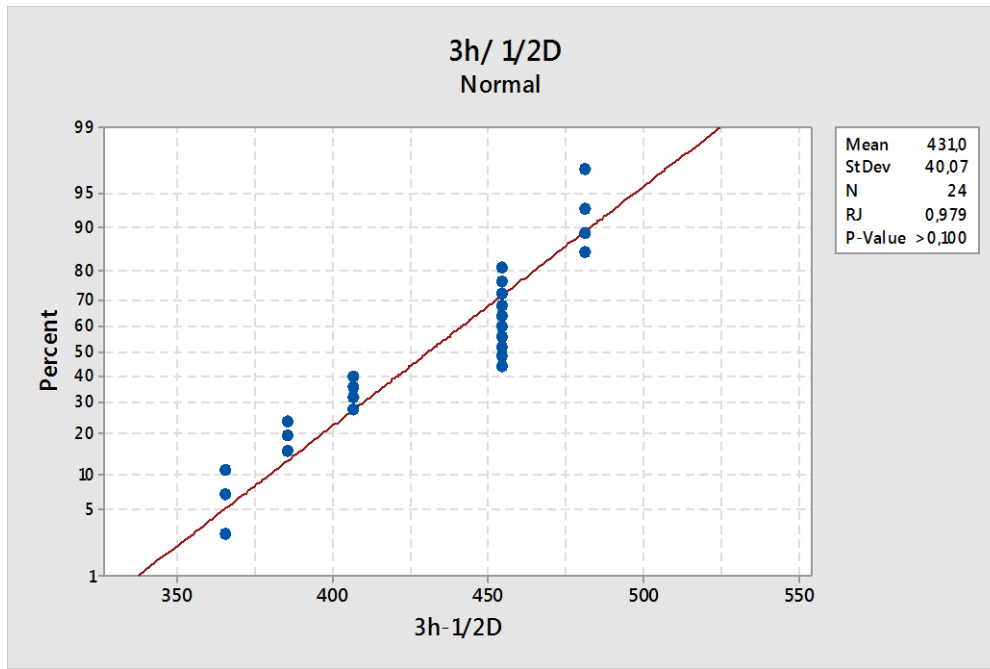
ΕΙΚΟΝΑ 5.3: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 1 ώρα ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στον πυρήνα των δοκιμίων.



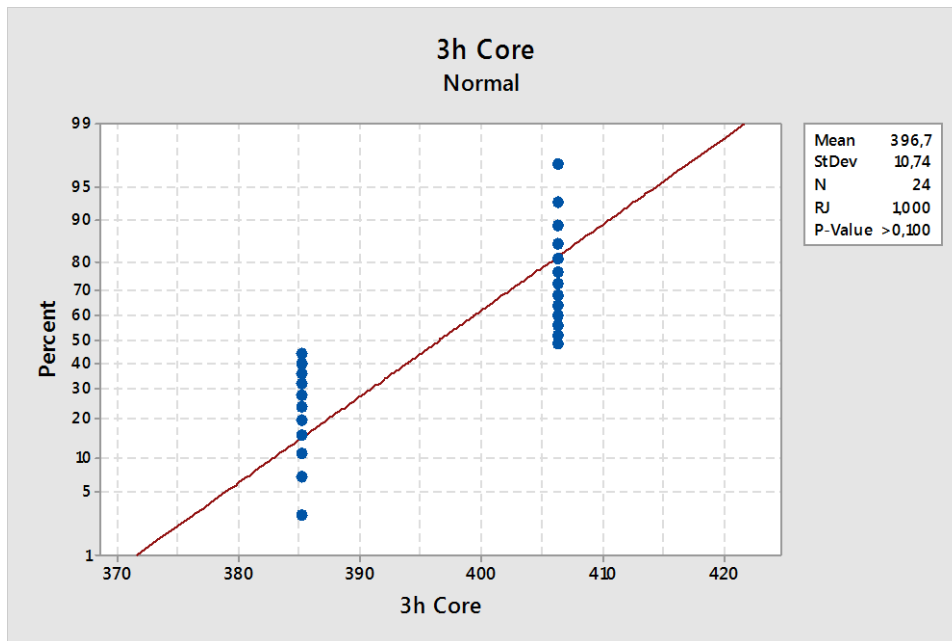
ΕΙΚΟΝΑ 5.4: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 2 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος στην εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο 1/2 της ακτίνας.



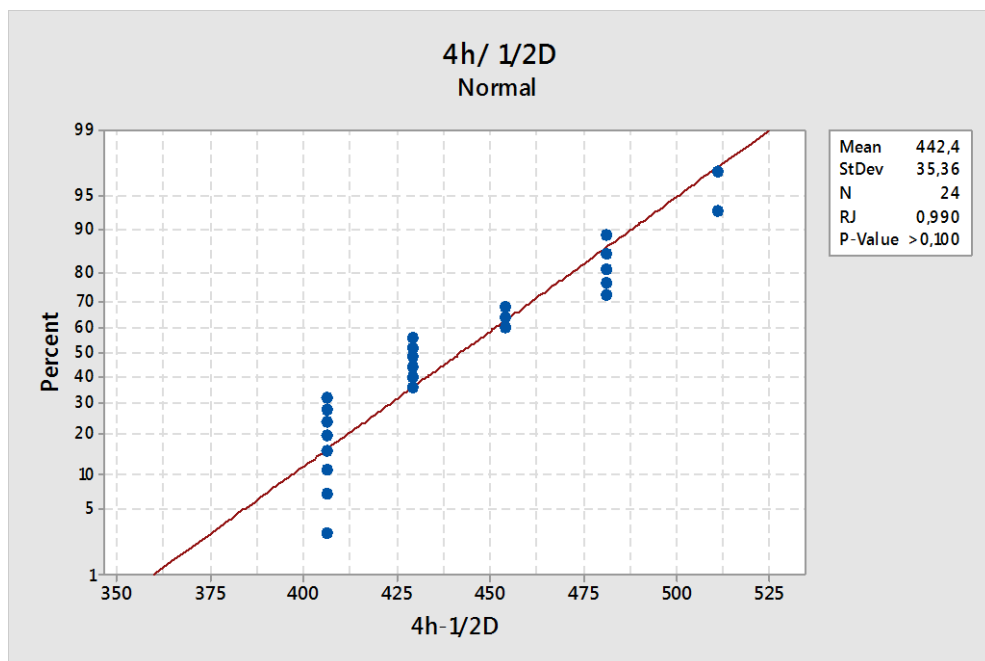
ΕΙΚΟΝΑ 5.5: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 2 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο κέντρο των δοκιμίων.



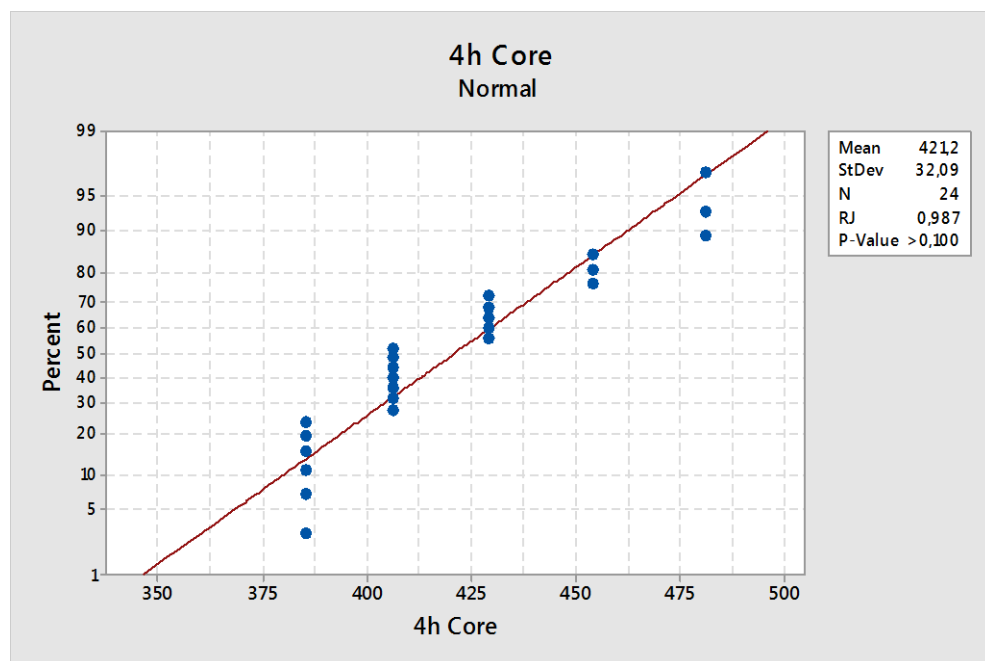
ΕΙΚΟΝΑ 5.6: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 3 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο 1/2 της ακτίνας.



ΕΙΚΟΝΑ 5.7: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 3 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο κέντρο των δοκιμίων.



ΕΙΚΟΝΑ 5.8: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 4 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο 1/2 της ακτίνας.



ΕΙΚΟΝΑ 5.9: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας τιμών σκληρότητας του υλικού μετά από 4 ώρες ενανθράκωσης: Έλεγχος σε εγκάρσια και διαμήκη διατομή στο κέντρο των δοκιμίων.

Από τα ανωτέρω διαγράμματα προκύπτουν οι τιμές Roy-Joiner (RJ) για κάθε περίπτωση. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Τιμές RJ για έλεγχο κανονικότητας.

Για N=24 και α= 0,05		
Χρόνος	1/2 D	Core
1 ώρα ενανθράκωση	RJ=0,985 > 0,916	RJ=0,983 > 0,916
2 ώρες ενανθράκωση	RJ=0,994 > 0,916	RJ=0,979 > 0,916
3 ώρες ενανθράκωση	RJ=0,979 > 0,916	RJ=0,990 > 0,916
4 ώρες ενανθράκωση	RJ=0,990 > 0,916	RJ=0,987 > 0,916

Από τις τιμές του ανωτέρω πίνακα αποδεικνύεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η σκληρότητα του υλικού στο κέντρο και σε απόσταση μισής ακτίνας ακολουθεί κανονική κατανομή με βεβαιότητα 95% αφού η τιμές Roy-Joiner (RJ) είναι μικρότερες της 0,916. Το κριτήριο που ακολουθείται αποτελεί χαρακτηριστικό ομοιογένειας σκληρότητας. Δύο είναι οι βασικοί λόγοι της απόκλισης αυτής:

- Ενώ έχει απόλυτα καθοριστεί η μέτρηση για την απόσταση της μισής ακτίνας, δεν συμβαίνει το ίδιο για τα σημεία που λαμβάνονται στο κέντρο της διατομής.
- Λόγω της παρατεταμένης παραμονής στην θερμοκρασία των 900 °C, λαμβάνει χώρα το φαινόμενο μεγέθυνσης των κόκκων το οποίο εξελίσσεται με ακαθόριστο ρυθμό και οδηγεί σε μικροδομή υψηλής ανομοιομορφίας. Σε περίπτωση λήψης μεγαλύτερου δείγματος το φαινόμενο ενδεχομένως να περιοριστεί.

Μπορεί να πραγματοποιηθεί στατιστική εκτίμηση της σκληρότητας [26], καταχρηστικά και για την περίπτωση της ενανθράκωσης των τεσσάρων ωρών για λόγους πληρότητας. Για τον σκοπό αυτό υπολογίζεται:

$$\text{η μέση τιμή: } \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

$$\text{η τυπική απόκλιση: } S = \sqrt{S^2}, \text{ όπου } S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

$$\text{επί του 95\% διάστημα εμπιστοσύνης: } t_{0,975,5} \frac{S}{\sqrt{n}}, \text{ όπου } t \text{ συντελεστής Student}$$

$$\text{το πεδίο τιμών: } \delta = \bar{\mu} \pm t_{0,975,5} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Κατόπιν υπολογισμού η σκληρότητα του υλικού σε HV30 είναι:

Για 1 ώρα ενανθράκωση:

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $413,8 \leq H \leq 445,6$
- στο κέντρο του υλικού: $404,3 \leq H \leq 441,5$

Για 2 ώρες ενανθράκωση :

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $424,7 \leq H \leq 445,9$
- στο κέντρο του υλικού: $414,1 \leq H \leq 447,9$

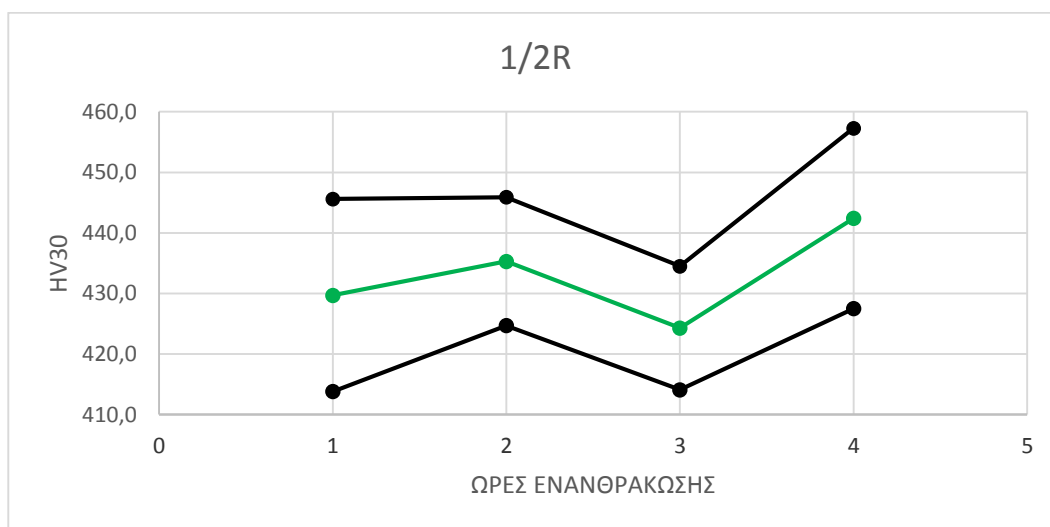
Για 3 ώρες ενανθράκωση :

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $414,1 \leq H \leq 434,5$
- στο κέντρο του υλικού: $392,2 \leq H \leq 401,2$

Για 4 ώρες ενανθράκωση :

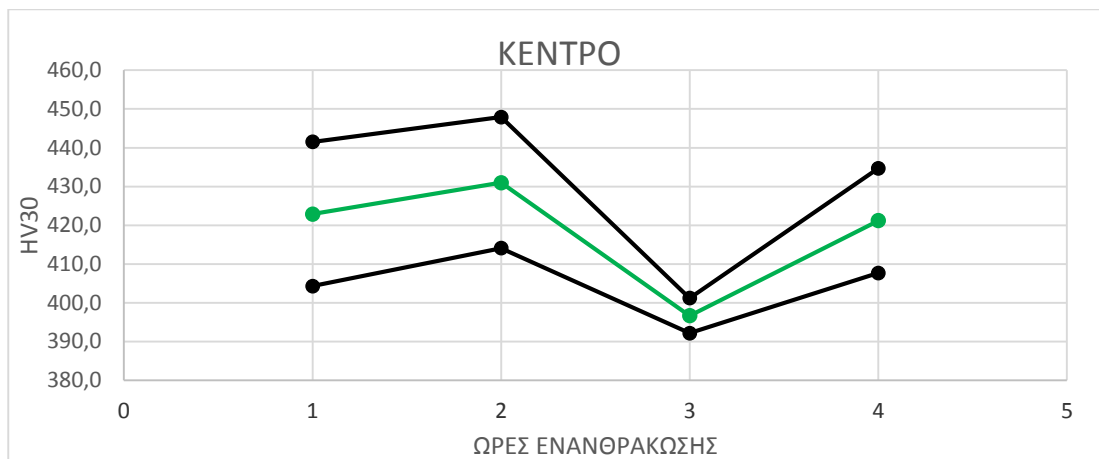
- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $427,5 \leq H \leq 457,3$
- το κέντρο του υλικού: $407,7 \leq H \leq 434,7$

Με βάση το μέσο όρο σκληρότητας ανά δοκίμιο, εξετάστηκε η επιρροή του χρόνου ενανθράκωσης στην σκληρότητα του υλικού μακριά από την περιοχή της ενανθράκωσης (Εικόνες 5.10 – 5.11)



ΕΙΚΟΝΑ 5.10: Κατανομή σκληρότητας στο $\frac{1}{2}$ της ακτίνας, συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα εμβαπτότητας του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη τις ακραίες τιμές ελαχίστου και μεγίστου, το εύρος σκληρότητας σε βάθος 1/2R (5.25mm), κυμαίνεται μεταξύ 36-46 HRC (354-458HV). Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, οι τιμές σκληρότητας συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης κυμαίνονται από 413,8 έως 457,3HV, των οποίων η διασπορά βρίσκεται εντός των ορίων που ορίζεται στο αντίστοιχο πρότυπο [27] Διαφαίνεται πτωτική τάση μέχρι τις 3 ώρες ενανθράκωσης και στη συνέχεια η τιμή αυξάνεται μέχρι τα 440HV, όσον αφορά τη μέση τιμή. Η διασπορά των τιμών και στις τέσσερις περιπτώσεις κρίνεται ικανοποιητική.



ΕΙΚΟΝΑ 5.11: Κατανομή σκληρότητας στο κέντρο του δοκιμίου, συνάρτηση του χρόνου ενανθράκωσης.

Το διάγραμμα 5.11 δείχνει μια αύξηση της σκληρότητας στο κέντρο του υλικού με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης από την μία σε δυο ώρες και στην συνέχεια η συνεχής μείωσή της. Η συμπεριφορά της σκληρότητας στο κέντρο του υλικού είναι ανάλογη της συμπεριφοράς στο κέντρο, για τους ίδιους λόγους.

Παράγοντας ο οποίος ενισχύει τις παραπάνω εκτιμήσεις είναι το γεγονός ότι η μεταβολή της σκληρότητας στο κέντρο της διατομής μεταβάλλεται κατά το ίδιο μοτίβο, μειωμένη κατά μικρό ποσοστό. Αυτό οφείλεται εν μέρει στη μικρή διαφορά του ρυθμού απόψυξης του υλικού μετά την ωστενιτοποίηση. Στην περίπτωση που η διάμετρος του υλικού προς μελέτη ήταν μεγαλύτερη, η διαφορά σκληρότητας μεταξύ κέντρου και μέσου απόστασης θα ήταν μεγαλύτερη.

Για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων σε βιομηχανικές εφαρμογές πραγματοποιήθηκε μετατροπή των τιμών από HV σε HRC βάσει προτύπου ASTM [28]. Η σκληρότητα του υλικού διαμορφώνεται ως:

Για 1 ώρα ενανθράκωση:

- ½ της ακτίνας από την επιφάνεια: $42.1 \leq H \leq 44.9$
- στο κέντρο του υλικού: $41.2 \leq H \leq 44.6$

Για 2 ώρες ενανθράκωση:

- ½ της ακτίνας από την επιφάνεια: $43.2 \leq H \leq 44.9$
- στο κέντρο του υλικού: $42.1 \leq H \leq 45.1$

Για 3 ώρες ενανθράκωση:

- ½ της ακτίνας από την επιφάνεια: $42.2 \leq H \leq 44.0$
- στο κέντρο του υλικού: $40.1 \leq H \leq 40.9$

Για 4 ώρες ενανθράκωση:

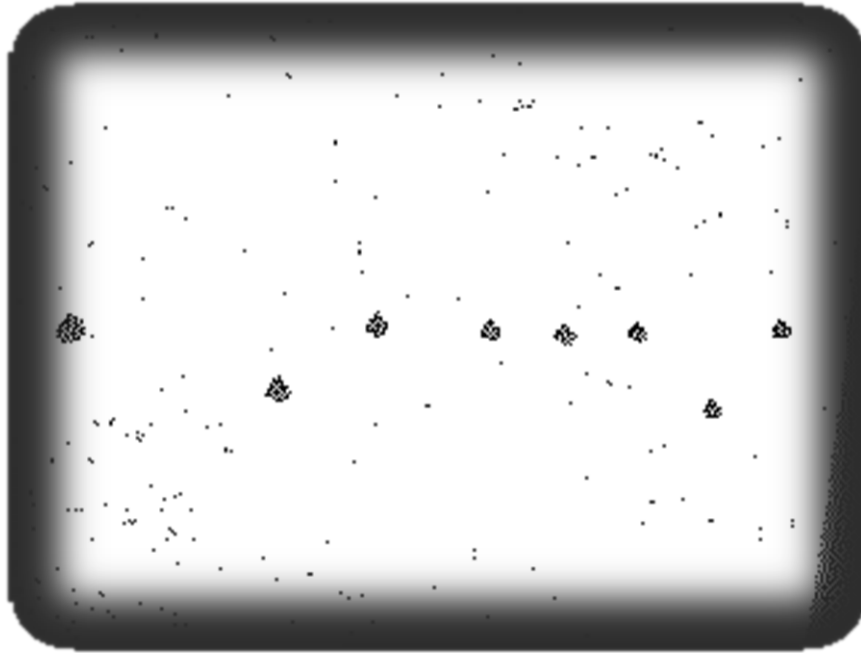
- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $43.4 \leq H \leq 45.9$
- στο κέντρο του υλικού: $41.6 \leq H \leq 44.1$

Συμπεράσματα:

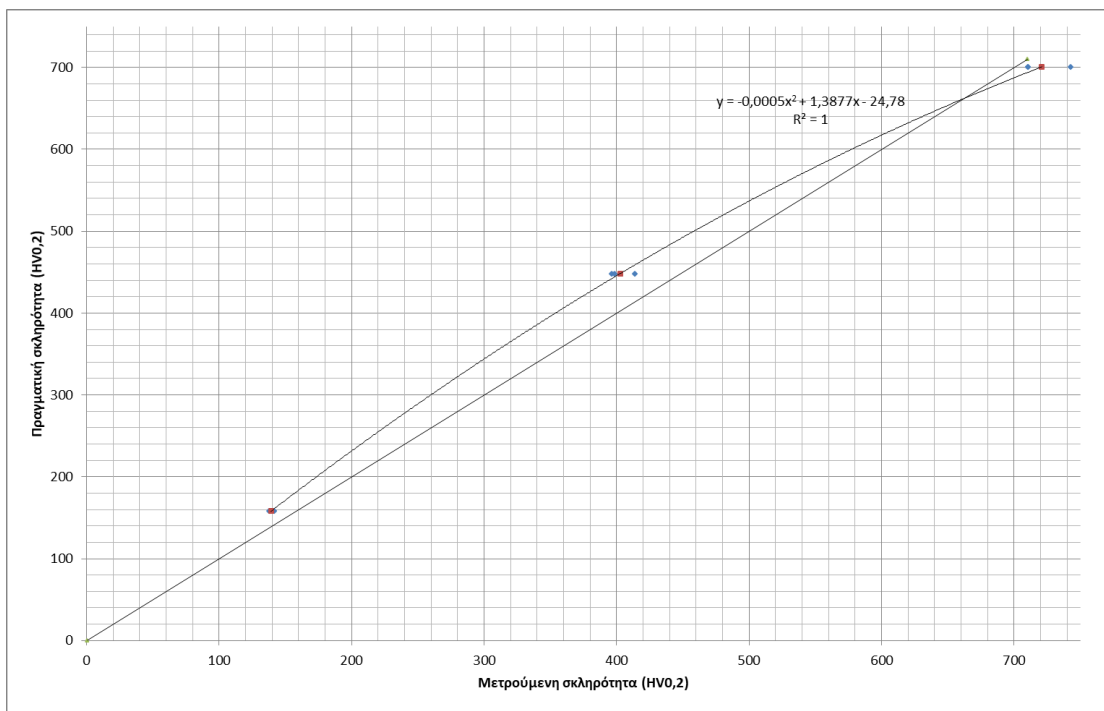
Οι θερμικές κατεργασίες που συνήθως υποβάλλεται ο συγκεκριμένος χάλυβας επιφέρουν σημαντική αύξηση της σκληρότητάς του τόσο στην επιφάνεια όσο και στο σύνολο της διατομής. Η σκληρότητα μετά και από τις τέσσερις διαφορετικές χρονικές περιόδους ενανθράκωσης βρίσκεται εντός των ορίων στα οποία ο συγκεκριμένος χάλυβας παρουσιάζει τη μέγιστη ολκιμότητά του. Η σκληρότητα αυτή ελαττώνεται αισθητά μετά τις τρεις και αυξάνεται στις τέσσερις ώρες ενανθράκωσης. Η μείωση αυτή συμβαίνει τόσο στο κέντρο όσο και στο μέσο της ακτίνας του υλικού, είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και οφείλεται σε δομικούς μετασχηματισμούς του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Για την διερεύνηση της επιφανειακής κατεργασίας σκλήρυνσης και της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στο βάθος εμπλουτισμού σε άνθρακα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής στο μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type- M. (S/N 341-64278). Εφαρμόστηκε φορτίο 200gr για 15 sec. Το αποτύπωμα εκτιμήθηκε σε συνολική μεγέθυνση x400. Η δοκιμή μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκε βάσει προτύπου ASTM E 384-11 [25]. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σε εγκάρσια διατομή από κάθε ράβδο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά ζεύγη, ξεκινώντας από την επιφάνεια προς το κέντρο, ώστε να δημιουργηθούν δύο διαφορετικά προφίλ μικροσκληρότητας. Ο υπολογισμός του ενεργού βάθους ενανθράκωσης έγινε με βάση το πρότυπο ISO 2639 με δύο παραλλαγές, λόγω του ότι η παρούσα εργασία αξιολογεί την αποτελεσματικότητα της ενανθράκωσης συγκεκριμένου εξοπλισμού θερμικών κατεργασιών. Ειδικότερα, λήφθηκε ως κριτήριο για τον καθορισμό του ενεργού βάθους ενανθράκωσης τιμή σκληρότητας ίση με 550 HV_{0,2} καθώς επίσης τα δύο απαιτούμενα προφίλ μικροσκληρότητας λήφθηκαν αντιδιαμετρικά [29]. Επίσης, οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν με το ίδιο βάρος φόρτισης ανεξαρτήτως βάθους ενανθράκωσης για λόγους ομοιογένειας των αποτελεσμάτων, (βάθη ενανθράκωσης μικρότερα των 0,3mm μετρούνται με βάρος 1kp) Για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μετατροπή των τιμών σε HRC [28]. Στην Εικόνα 6.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτυπώματα μικροσκληρομέτρησης για ένα τυχαίο δοκίμιο. Στους Πίνακες 6.1,6.3,6.5 και 6.7 δίνονται τα αποτελέσματα.



ΕΙΚΟΝΑ 6.1: Αποτυπώματα μικροσκληρομέτρησης.

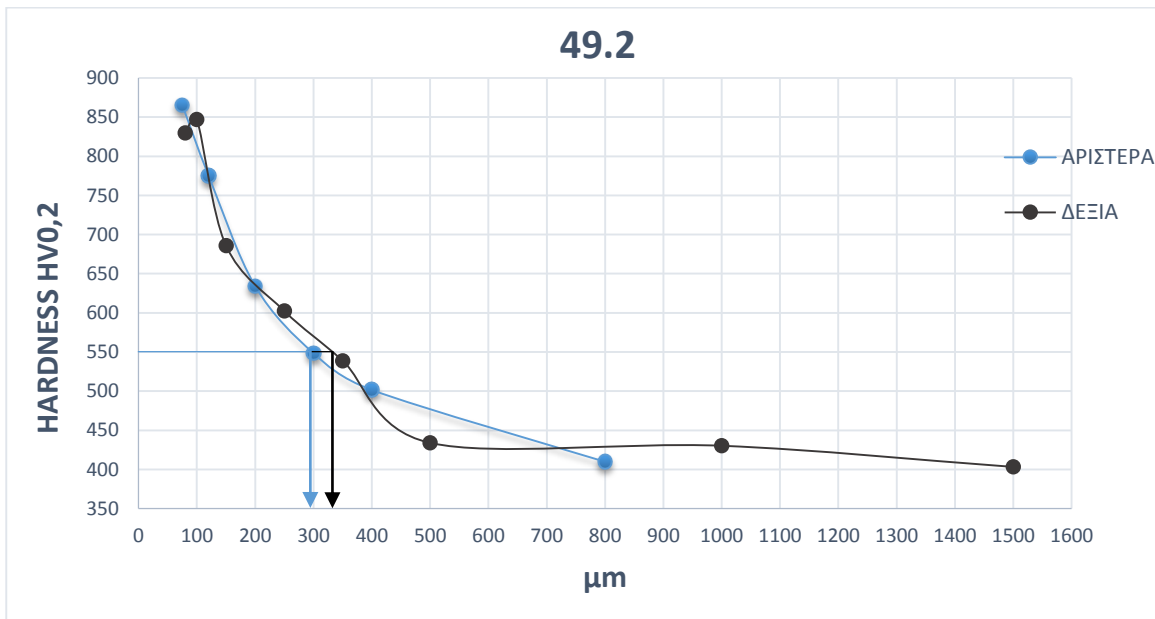


ΕΙΚΟΝΑ 6.2: Καμπύλη βαθμονόμησης μικροσκληρομέτρου

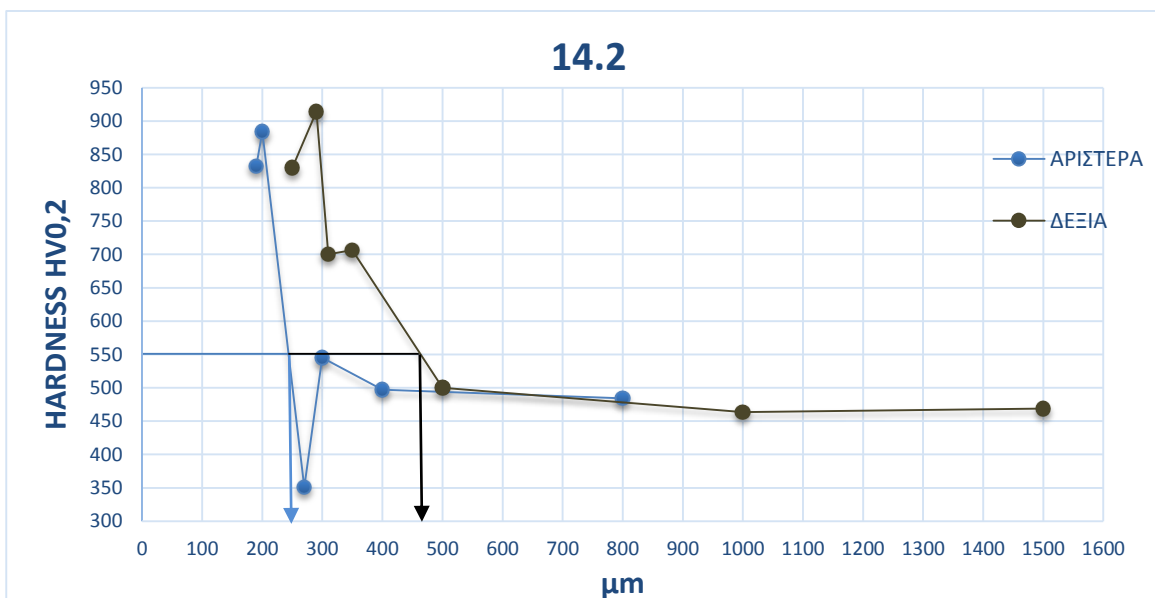
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1: Τιμές μικροσκληρότητας του υλικού στην περίπτωση μίας ώρας ενανθράκωσης.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV0,2	HRC
1 ΩΡΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ	49	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	1006,1	66
			120	0,12	817,5	63,2
			200	0,2	607,9	57
			300	0,3	505	49
			400	0,4	453,4	41,7
			800	0,8	359,9	65
		ΔΕΞΙΑ	80	0,08	922,5	65
			100	0,1	960,5	65,5
			150	0,15	685,8	59,5
			250	0,25	602,2	55,4
			350	0,35	538,7	51,6
			500	0,5	433,8	43,8
			1000	1	430,1	43,5
			1500	1,5	403	41,1
	14	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	190	0,19	832,0	65,1
			200	0,2	884,1	66,5
			270	0,27	350,8	35,9
			300	0,3	545,2	52,0
			400	0,4	497,2	48,8
			800	0,8	484,2	47,8
		ΔΕΞΙΑ	250	0,25	830,1	65,0
			290	0,29	914,4	67,3
			310	0,31	700,3	60,2
			350	0,35	706,6	60,5
			500	0,5	500,2	49,0
			1000	1	463,5	46,3
			1500	1,5	468,9	46,7
			1	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075
	120	0,12			758,0	62,6
	200	0,2			740,7	61,9
300	0,3	653,5			58,1	
400	0,4	595,0			55,0	
500	0,5	546,9			52,1	
1000	1	524,5			50,7	

ΔΕΞΙΑ	70	0,07	721,4	61,1
	80	0,08	727,8	61,4
	100	0,1	736,4	61,7
	150	0,15	694,0	60,0
	250	0,25	620,7	56,4
	350	0,35	560,2	53,0
	450	0,45	518,3	50,2
	800	0,8	468,9	46,7
	1500	1,5	455,5	45,6



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 49.2



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 14.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2: Τιμές απόστασης από την επιφάνεια σε μm όταν η σκληρότητα ισούται με 550HV0,2.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	ΔΕΞΙΑ
2.2	-	-
16.2	110,6	131,9
36.2	103,14	100,46
38.2	-	-

Συμπεράσματα:**Μία ώρα ενανθράκωση:**

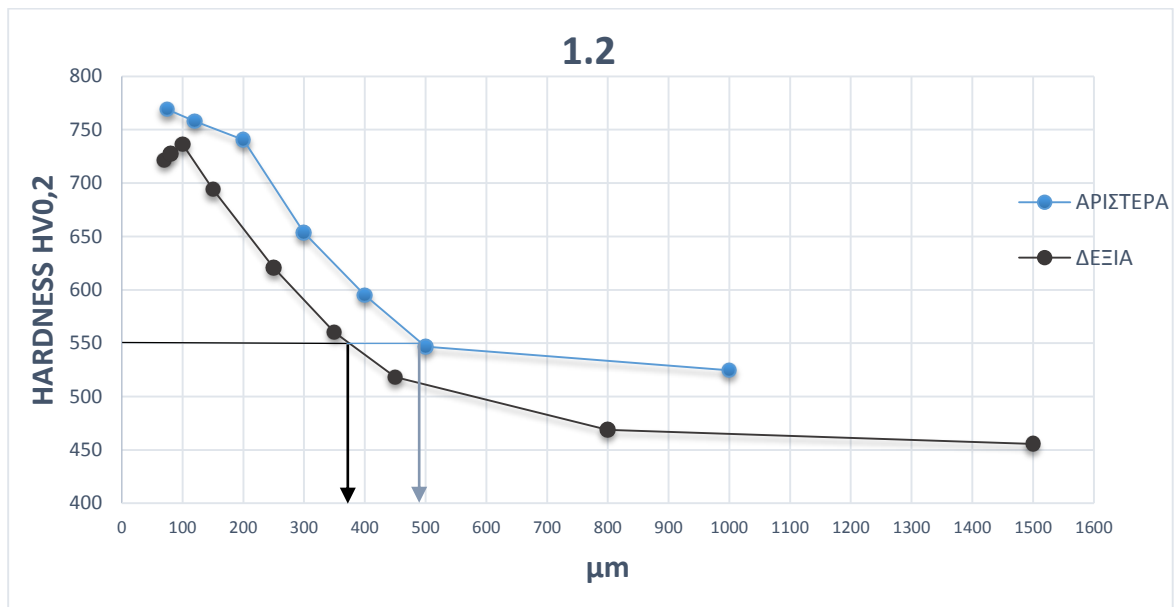
- Παρατηρήθηκε μεγάλο εύρος σκληρότητας στο βάθος των 75-80 μm από την επιφάνεια, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 520-615HV0,2 (50,5 – 56 HRC), με κυρίαρχη τάση τα 570HV0,2 (54 HRC). Η απόκλιση σχετίζεται κυρίως με το γεγονός του μικρού χρόνου ενανθράκωσης. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,35% κατά προσέγγιση [30].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι ομοιογενής και κυμαίνεται από 460-490HV0,2 (46-48 HRC).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3: Τιμές μικροσκληρότητας του υλικού στην περίπτωση δύο ωρών ενανθράκωσης.

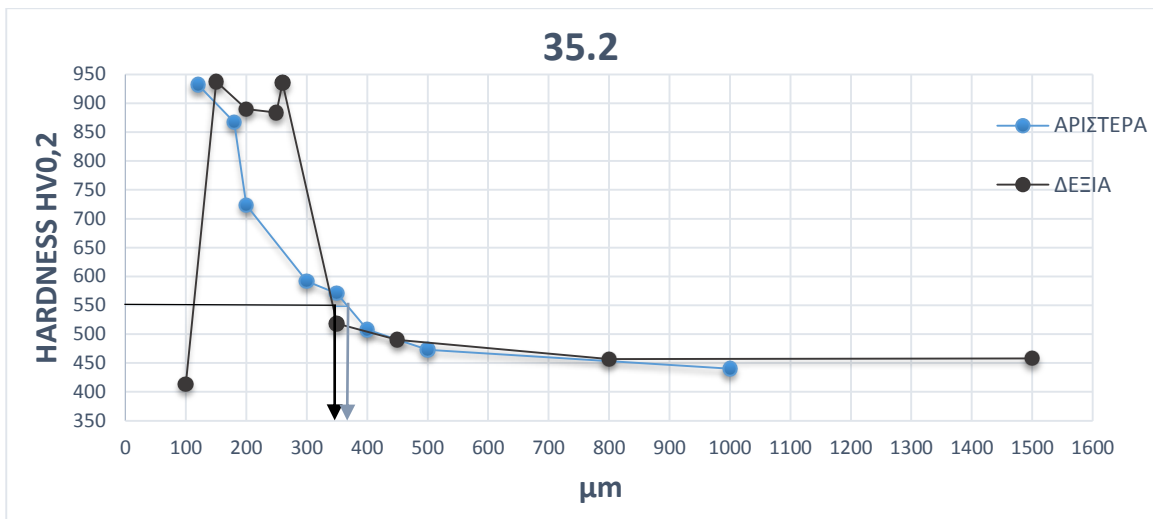
ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV0,2	HRC
2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ	35	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	120	0,12	932,3	67,7
			180	0,18	867,3	66,1
			200	0,2	723,5	61,2
			300	0,3	591,4	54,8
			350	0,35	570,4	53,6
			400	0,4	507,6	49,5
			500	0,5	473,0	47,0
			1000	1	440,1	44,4
		ΔΕΞΙΑ	100	0,1	413,4	42,1
			150	0,15	937,8	67,8
			200	0,2	890,1	66,7
			250	0,25	884,1	66,5
			260	0,26	935,4	67,7
			350	0,35	518,3	50,2
			450	0,45	490,0	48,3
			800	0,8	456,8	45,7

			1500	1,5	458,2	45,8
9	ΑΡΙΣΤΕΡΑ		75	0,075	938,0	67,8
			120	0,12	840,5	65,3
			150	0,15	719,2	61,0
			200	0,2	692,0	59,9
			300	0,3	604,1	55,5
			400	0,4	558,5	52,8
			500	0,5	530,7	51,1
			1000	1	503,1	49,2
	ΔΕΞΙΑ		80	0,08	867,3	66,1
			100	0,1	747,2	62,2
			160	0,16	935,6	67,7
			180	0,18	795,2	63,9
			250	0,25	641,8	57,5
			350	0,35	587,8	54,6
			450	0,45	558,5	52,8
			800	0,8	485,7	47,9
		1500	1,5	495,8	48,7	
	26	ΑΡΙΣΤΕΡΑ		75	0,075	729,9
			120	0,12	712,9	60,8
			200	0,2	702,4	60,3
			300	0,3	591,4	54,8
			400	0,4	550,1	52,3
			500	0,5	492,8	48,5
			1000	1	413,4	42,1
ΔΕΞΙΑ			80	0,08	749,3	62,3
			100	0,1	723,5	61,2
			150	0,15	683,7	59,5
			250	0,25	622,6	56,5
			350	0,35	570,4	53,6
			450	0,45	518,3	50,2
			800	0,8	446,4	44,9
			1500	1,5	446,4	44,9
		1	ΑΡΙΣΤΕΡΑ		75	0,075
	120			0,12	758,0	62,6
	200			0,2	740,7	61,9
	300			0,3	653,5	58,1

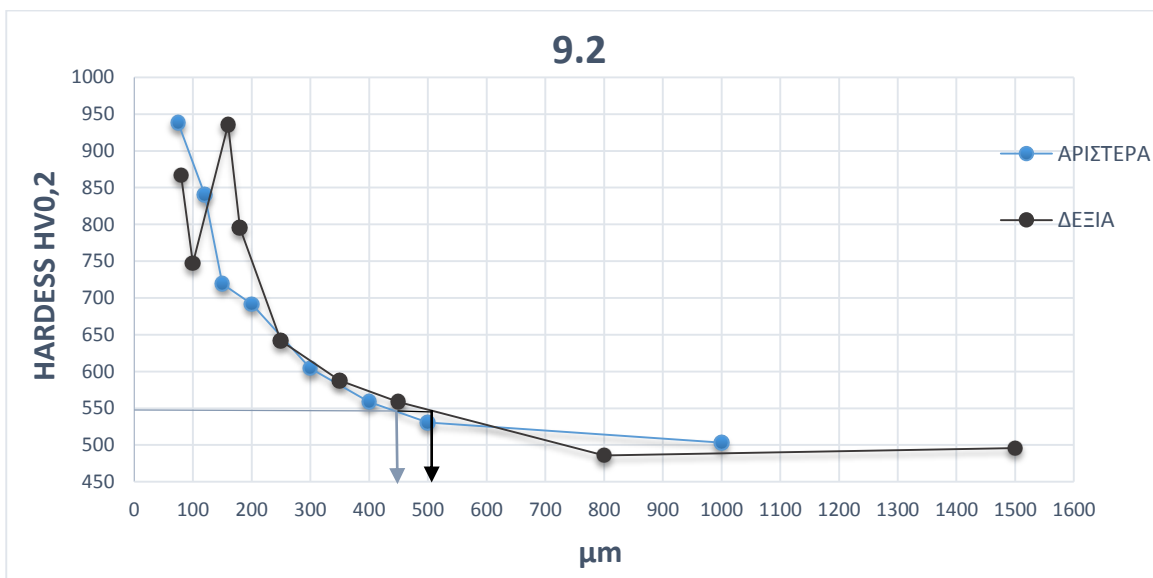
ΔΕΞΙΑ	400	0,4	595,0	55,0
	500	0,5	546,9	52,1
	1000	1	524,5	50,7
	70	0,07	721,4	61,1
	80	0,08	727,8	61,4
	100	0,1	736,4	61,7
	150	0,15	694,0	60,0
	250	0,25	620,7	56,4
	350	0,35	560,2	53,0
	450	0,45	518,3	50,2
	800	0,8	468,9	46,7
	1500	1,5	455,5	45,6



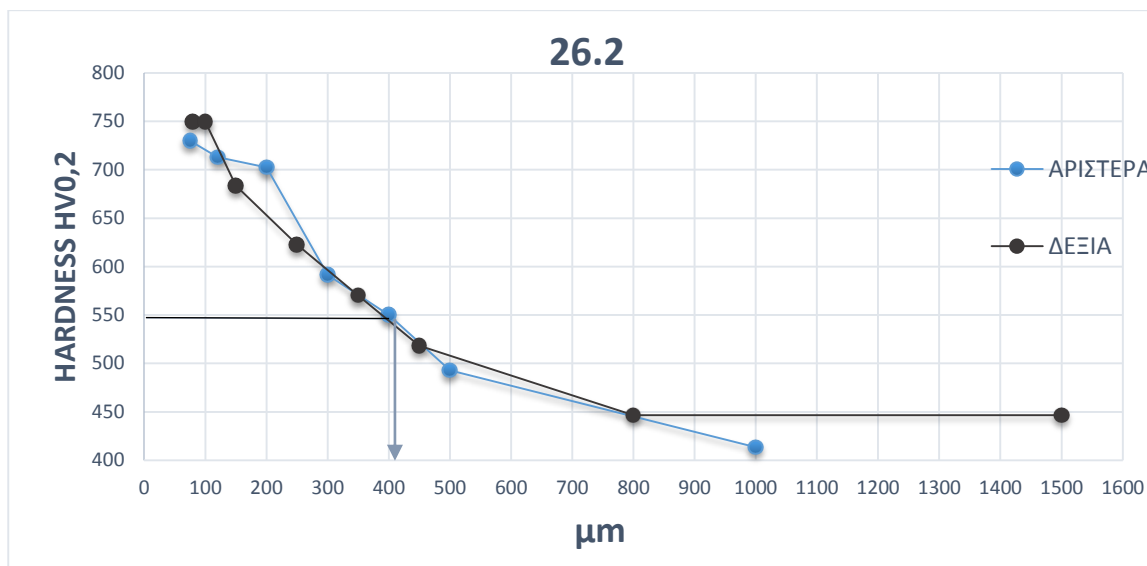
Εικόνα 6.5: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 1.2



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 35.2



Εικόνα 6.7: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 9.2



Εικόνα 6.8: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 26.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4: Τιμές απόστασης από την επιφάνεια σε μm όταν η σκληρότητα ισούται με 550HV0,2.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	ΔΕΞΙΑ
19.2	296,03	99,9
27.2	309,38	343,97
46.2	254,74	245,75
52.2	200,28	267,8

Δύο ώρες ενανθράκωσης:

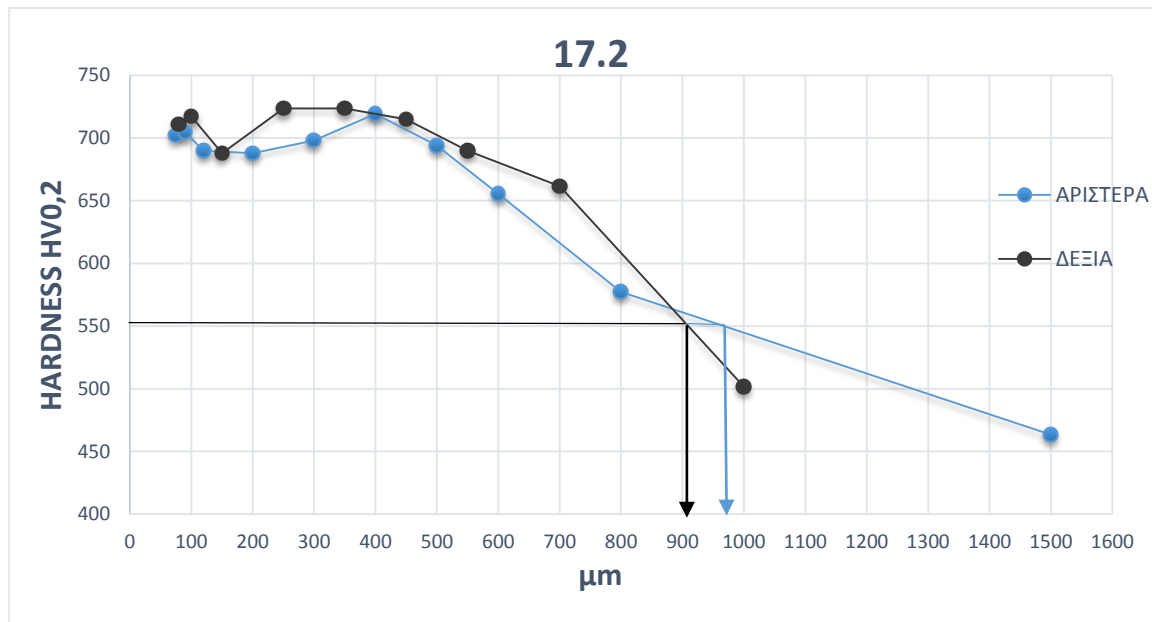
- Ομοιογένεια σκληρότητας στο βάθος των 75-80μm από την επιφάνεια με εύρος 650-670HV0,2 (58 – 59 HRC). Η σκληρότητα είναι κατά 50-70 HV0,2 μεγαλύτερη σε σχέση με την ενανθράκωση της μίας ώρας. Ο χρόνος των δύο ωρών χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητικός για την εξασφάλιση ομοιογενούς στρώματος ενανθράκωσης σε 900°C. Έχει ενισχυθεί οριακά σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για μια ώρα, οφειλόμενη κυρίως στην αύξηση της περιεκτικότητας του άνθρακα επιφανειακά. Η ενίσχυση σε άνθρακα οδήγησε σε αύξηση της εμβαπτότητας των δοκιμίων. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,45% κατά προσέγγιση [30].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι ομοιογενής και κυμαίνεται από 480-500HV0,2 (48-49 HRC).
- Η χημική σύσταση του υλικού και το ποσοστό των κραματοποιητικών στοιχείων που διαθέτει, δικαιολογεί την σκλήρυνση σε αυτές τις τιμές ως πολύ ικανοποιητική (βρίσκεται στα άνω όρια των δυνατοτήτων του υλικού).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5: Τιμές μικροσκληρότητας του υλικού στην περίπτωση τριών ωρών ενανθράκωσης.

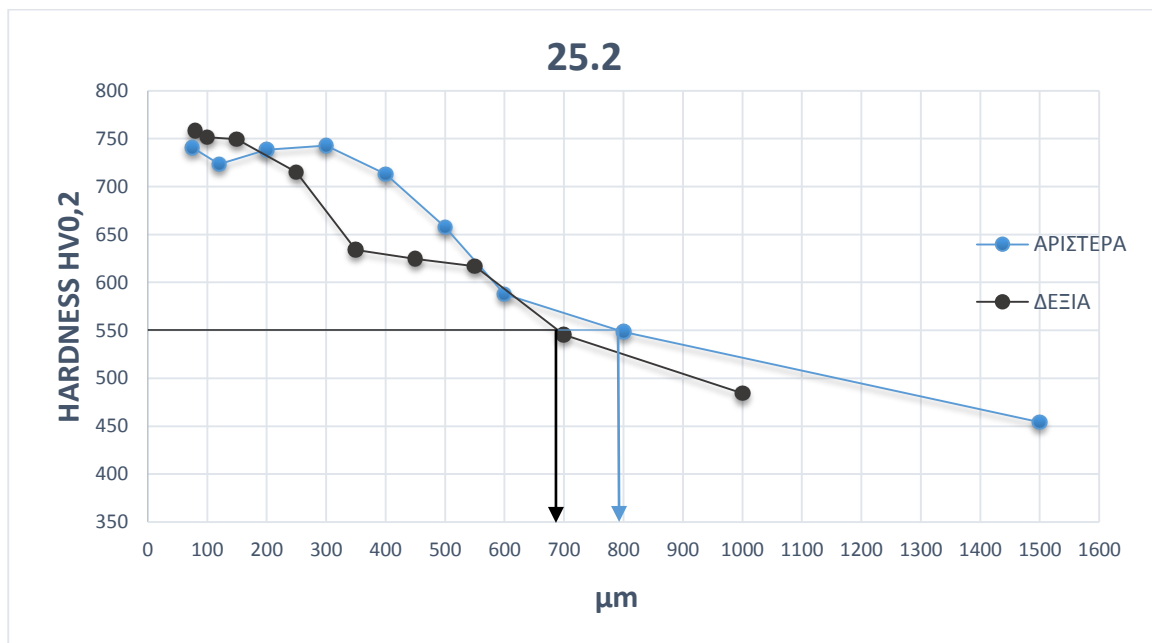
ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV0,2	HRC
3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ	17	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	702,4	60,3
			90	0,09	704,5	60,4
			120	0,12	689,9	59,8
			200	0,2	687,8	59,7
			300	0,3	698,2	60,2
			400	0,4	719,2	61,0
			500	0,5	694,0	60,0
			600	0,6	655,5	58,2
			800	0,8	577,3	54,0
		1500	1,5	463,5	46,3	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,08	710,8	60,7
			100	0,1	717,1	61,0
			250	0,25	723,5	61,2
			350	0,35	723,5	61,2
	450		0,45	715,0	60,9	
	550		0,55	689,9	59,8	
	700		0,7	661,4	58,5	
	1000		1	501,6	49,1	
	25		ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	740,7
		120		0,12	723,5	61,2
		200		0,2	738,5	61,8
		300		0,3	742,8	62,0
		400		0,4	712,9	60,8
		500		0,5	657,5	58,3
		600		0,6	587,8	54,6
		800		0,8	548,5	52,2
		1500		1,5	454,2	45,5
		ΔΕΞΙΑ	80	0,08	758,0	62,6
100			0,1	751,5	62,3	
150			0,15	749,3	62,3	
250			0,25	715,0	60,9	
350			0,35	634,0	57,1	
	450	0,45	624,5	56,6		
	550	0,55	617,0	56,2		
	700	0,7	545,2	52,0		

			1000	1	484,2	47,8
44	ΑΡΙΣΤΕΡΑ		75	0,075	830,1	65,0
			120	0,12	934,2	67,7
			170	0,17	853,1	65,7
			200	0,2	712,9	60,8
			300	0,3	708,7	60,6
			400	0,4	675,5	59,1
			500	0,5	634,0	57,1
			600	0,6	584,3	54,4
			800	0,8	524,5	50,7
			1500	1,5	440,1	44,4
	ΔΕΞΙΑ		80	0,08	823,9	64,8
			100	0,1	937,1	67,8
			150	0,15	847,3	65,5
			190	0,19	788,6	63,7
			250	0,25	702,4	60,3
			350	0,35	675,5	59,1
			450	0,45	602,2	55,4
			550	0,55	577,3	54,0
			700	0,7	565,2	53,3
		1000	1	477,2	47,3	
56	ΑΡΙΣΤΕΡΑ		140	0,14	-6306,7	-1883,6
			150	0,15	875,1	66,3
			160	0,16	-2650,1	-426,7
			200	0,2	522,4	50,5
			210	0,21	931,8	67,6
			270	0,27	706,6	60,5
			380	0,38	689,9	59,8
			520	0,52	651,5	58,0
			600	0,6	632,1	57,0
			800	0,8	503,1	49,2
			1500	1,5	433,8	43,9
	ΔΕΞΙΑ		100	0,1	765,0	62,8
			150	0,15	862,6	66,0
			160	0,16	891,4	66,7
			200	0,2	827,8	65,0
			250	0,25	732,1	61,6
		350	0,35	717,1	61,0	

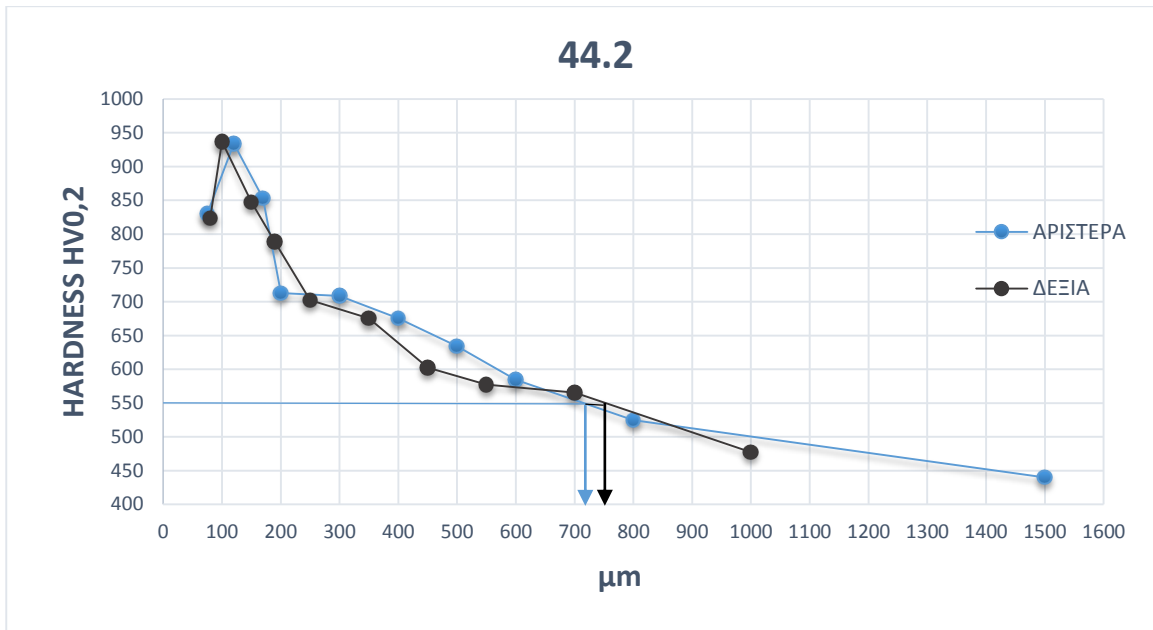
			450	0,45	677,6	59,2
			550	0,55	647,6	57,8
			700	0,7	566,9	53,4
			1000	1	473,0	47,0



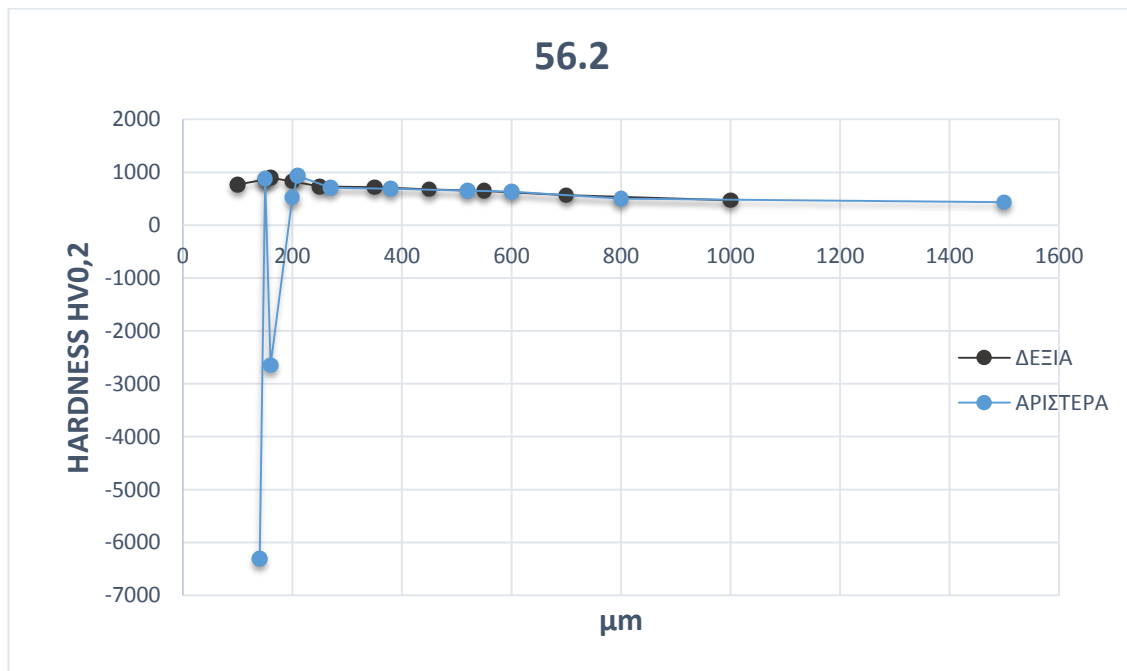
Εικόνα 6.9: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 17.2



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 25.2



Εικόνα 6.11: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 44.2



Εικόνα 6.12: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 56.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6: Τιμές απόστασης από την επιφάνεια σε μm όταν η σκληρότητα ισούται με 550HV0,2.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	ΔΕΞΙΑ
5.2	781,31	662,68
20.2	915,71	946,62
41.2	659,47	530,42
55.2	762,98	642,46

Στην περίπτωση του δοκιμίου 56.2 δεν ήταν δυνατή η δημιουργία του προφίλ μικροσκληρότητας λόγω πολύ ακραίων τιμών. Οι λόγοι μελετούνται.

Τρεις ώρες ενανθράκωση:

- Μεγάλο εύρος σκληρότητας στο βάθος των 75-80μm από την επιφάνεια, που κυμαίνεται μεταξύ 660-760HV_{0,2} (58 – 62HRC). Η σκληρότητα αυξήθηκε κατά 50-70 HV_{0,2} σε σχέση με την ενανθράκωση των δύο ωρών. Με δεδομένη τη χημική σύσταση του υλικού ο χρόνος είναι παρατεταμένος για την ενανθράκωση σε 900°C και οδηγεί σε ανομοιόμορφη μεγέθυνση κόκκων. Η μεγέθυνση των κόκκων έχει αρνητική επίπτωση στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και στην εμβαπτότητα, το οποίο γίνεται αντιληπτό μακροσκοπικά στην αποκτηθείσα σκληρότητα της επιφάνειας. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,60% κατά προσέγγιση [30].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι ανομοιογενής και κυμαίνεται από 400-500HV_{0,2} (41-50HRC). Έχει ενισχυθεί το άνω όριο σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για δύο ώρες με ευρεία διασπορά οφειλόμενη κυρίως στην αύξηση του μεγέθους κόκκων.
- Η χημική σύσταση του υλικού και το ποσοστό των κραματοποιητικών στοιχείων που διαθέτει, δικαιολογεί την σκλήρυνση σε αυτές τις τιμές ως πολύ ικανοποιητική (βρίσκεται στα άνω όρια των δυνατοτήτων του υλικού).

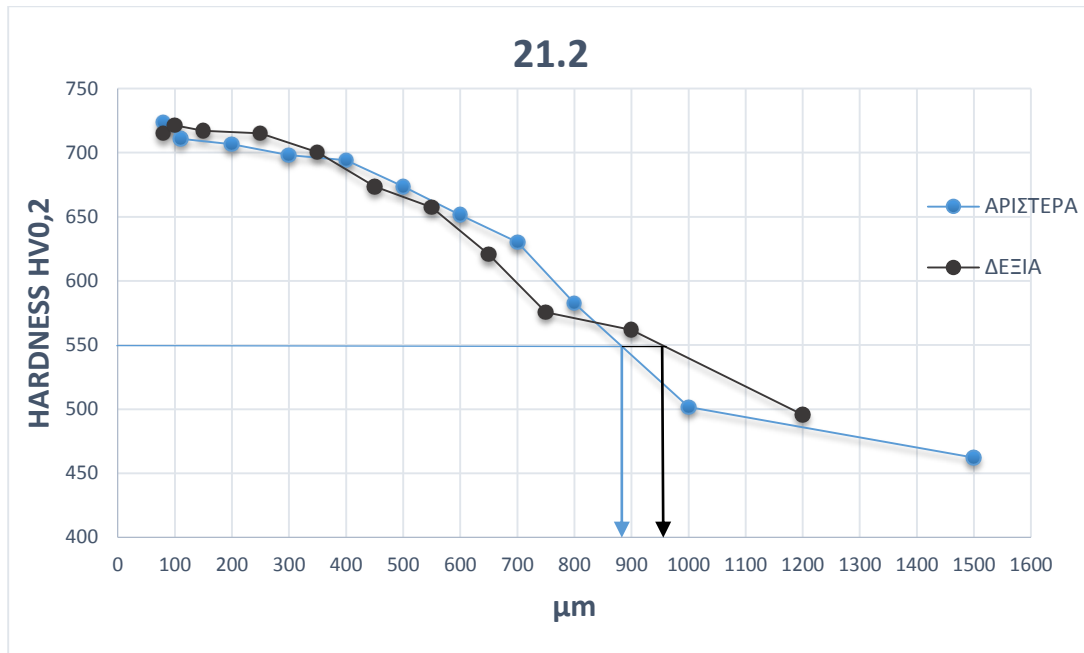
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7: Τιμές μικροσκληρότητας του υλικού στην περίπτωση τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης.

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV _{0,2}	HRC
4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ	21	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	80	0,08	723,5	61,2
			110	0,11	710,8	60,7
			200	0,2	706,6	60,5
			300	0,3	698,2	60,2
			400	0,4	694,0	60,0
			500	0,5	673,5	59,0
			600	0,6	651,5	58,0
			700	0,7	630,2	56,9
800	0,8	582,5	54,3			

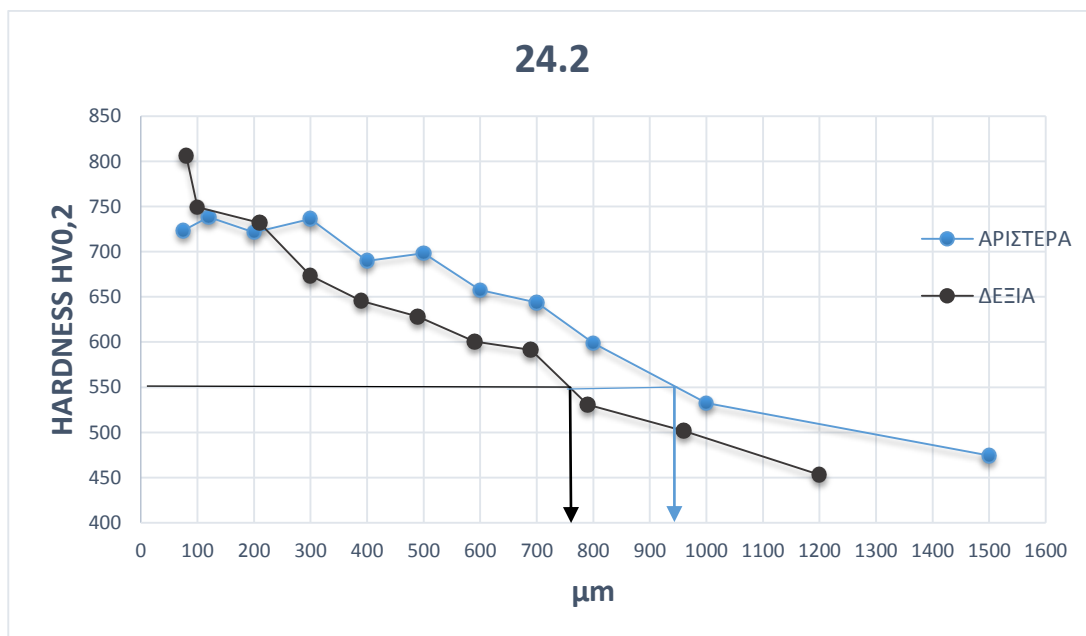
			1000	1	501,6	49,1
			1500	1,5	462,2	46,2
		ΔΕΞΙΑ	80	0,08	715,0	60,9
			100	0,1	721,4	61,1
			150	0,15	717,1	61,0
			250	0,25	715,0	60,9
			350	0,35	700,3	60,2
			450	0,45	673,5	59,0
			550	0,55	657,5	58,3
			650	0,65	620,7	56,4
			750	0,75	575,5	53,9
			900	0,9	561,8	53,1
			1200	1,2	495,8	48,7
			24	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075
	120	0,12			738,5	61,8
	200	0,2			721,4	61,1
	300	0,3			736,4	61,7
	400	0,4			689,9	59,8
	500	0,5			698,2	60,2
	600	0,6			657,5	58,3
	700	0,7			643,7	57,6
	800	0,8			598,6	55,2
	1000	1			532,3	51,2
	1500	1,5		474,4	47,1	
	ΔΕΞΙΑ	80		0,08	806,1	64,3
		100		0,1	749,3	62,3
		210		0,21	732,1	61,6
		300		0,3	673,5	59,0
		390		0,39	645,7	57,7
		490	0,49	628,3	56,8	
590		0,59	600,4	55,3		
690		0,69	591,4	54,8		
790		0,79	530,7	51,1		
960		0,96	501,6	49,1		
1200	1,2	452,9	45,4			
48	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	717,1	61,0	
		120	0,12	712,9	60,8	
		200	0,2	683,7	59,5	

			300	0,3	683,7	59,5	
			400	0,4	671,5	58,9	
			500	0,5	607,7	55,7	
			600	0,6	579,0	54,1	
			700	0,7	551,8	52,4	
			800	0,8	503,1	49,2	
			1000	1	480,0	47,5	
			1500	1,5	397,5	40,6	
			ΔΕΞΙΑ	80	0,08	721,4	61,1
				100	0,1	696,1	60,1
				150	0,15	719,2	61,0
				250	0,25	734,2	61,7
				350	0,35	721,4	61,1
				450	0,45	723,5	61,2
				550	0,55	710,8	60,7
	650	0,65		661,4	58,5		
	750	0,75		600,4	55,3		
	900	0,9	550,1	52,3			
	1200	1,2	481,4	47,6			
	4	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	710,8	60,7	
			120	0,12	717,1	61,0	
			200	0,2	721,4	61,1	
			300	0,3	740,7	61,9	
			400	0,4	721,4	61,1	
			500	0,5	717,1	61,0	
			600	0,6	700,3	60,2	
			700	0,7	632,1	57,0	
			800	0,8	600,4	55,3	
			1000	1	518,3	50,2	
			1500	1,5	447,7	45,0	
		ΔΕΞΙΑ	90	0,09	719,2	61,0	
			100	0,1	704,5	60,4	
150			0,15	727,8	61,4		
250			0,25	729,9	61,5		
350			0,35	717,1	61,0		
450			0,45	655,5	58,2		
550	0,55	667,5	58,8				
650	0,65	620,7	56,4				

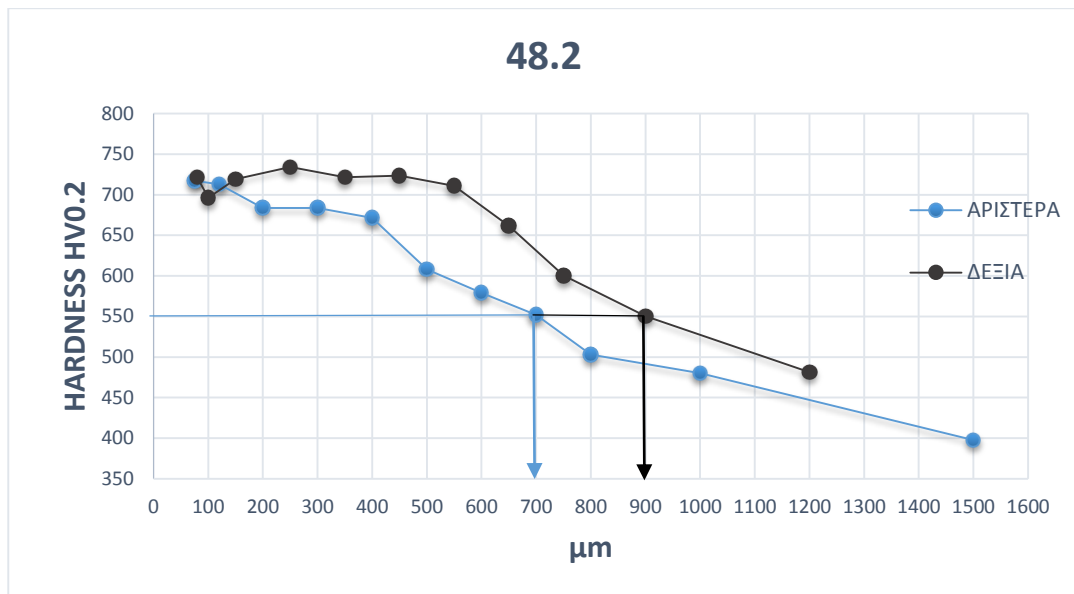
			750	0,75	587,8	54,6
			900	0,9	527,6	50,9
			1200	1,2	452,9	45,4



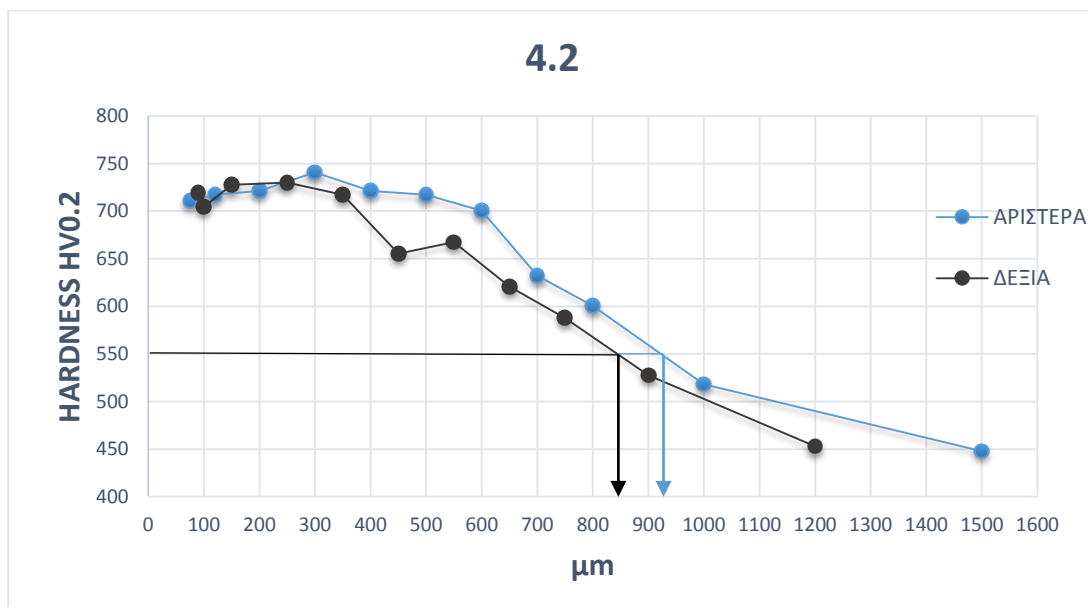
Εικόνα 6.13: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 21.2



Εικόνα 6.14: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 24.2



Εικόνα 6.15: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 48.2



Εικόνα 6.16: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 4.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8: Τιμές απόστασης από την επιφάνεια σε μm όταν η σκληρότητα ισούται με 550HV0,2.

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	ΔΕΞΙΑ
6.2	974,22	810,03
18.2	490,37	608,26
31.2	922,81	907,64
37.2	800,42	822,05

Τέσσερις ώρες ενανθράκωση:

- Μεγάλο εύρος σκληρότητας στο βάθος των 75-80 μm από την επιφάνεια, που κυμαίνεται από 720-820HV0,2 (61 – 64HRC). Η σκληρότητα είναι κατά 70-100 HV0,2 μεγαλύτερη σε σχέση με την ενανθράκωση των τριών ωρών. Κύρια αιτία αυτού του εύρους είναι ότι ο χρόνος των τεσσάρων ωρών, με δεδομένη τη χημική σύσταση του υλικού, χαρακτηρίζεται ως παρατεταμένος για την συγκεκριμένη θερμοκρασία των 900 $^{\circ}\text{C}$, οδηγώντας σε ανομοιόμορφη μεγέθυνση κόκκων. Η μεγέθυνση των κόκκων έχει αρνητική επίπτωση στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και στην εμβαπτότητα του υλικού. Η αύξηση της σκληρότητας της επιφάνειας οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού άνθρακα της επιφανείας. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,90% κατά προσέγγιση [30].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι περισσότερο ανομοιογενής σε σχέση με την περίπτωση των τριών ωρών και κυμαίνεται από 420-550HV0,2 (43-53HRC). Έχει ενισχυθεί το άνω όριο σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για τρεις ώρες με ευρεία διασπορά οφειλόμενη κυρίως στην αύξηση του μεγέθους κόκκων.
- Η χημική σύσταση του υλικού και το ποσοστό των κραματοποιητικών στοιχείων που διαθέτει, δικαιολογεί την σκλήρυνση σε αυτές τις τιμές ως πολύ ικανοποιητική (βρίσκεται στα άνω όρια των δυνατοτήτων του υλικού).

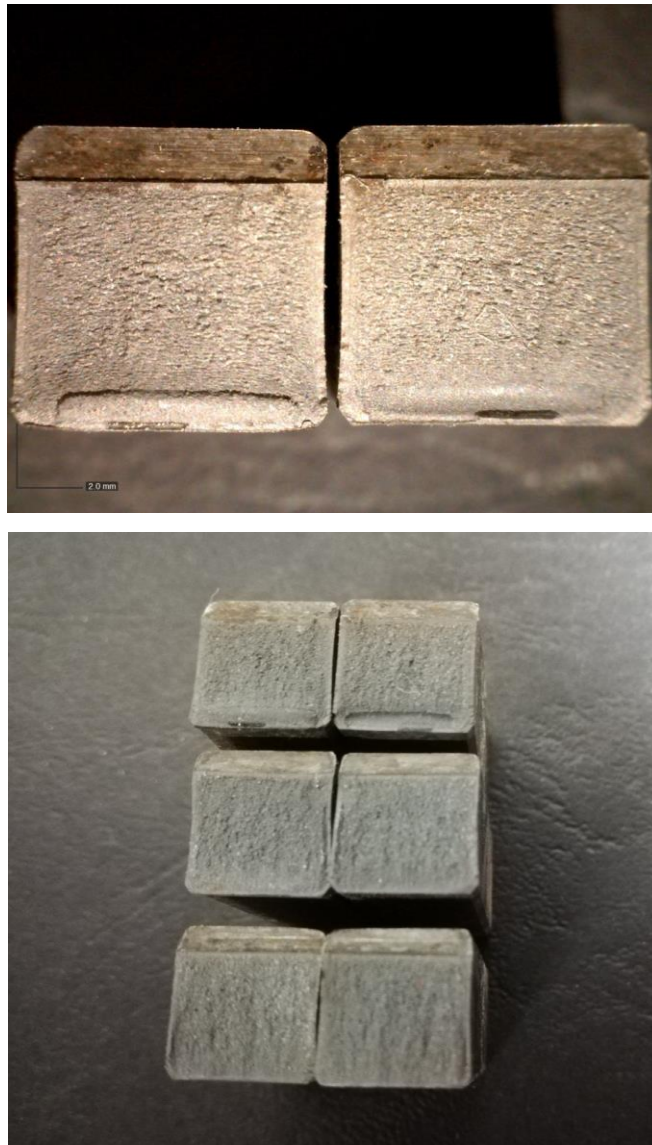
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ανάλυση επιφανειών θραύσης

Πραγματοποιήθηκε ανάλυση επιφανειών θραύσης στην εταιρεία Spectrumlabs S.A., με την υποστήριξη της Κα. Μαριάννα Κουκούλη.

Για την ανάλυση των επιφανειών επιλέχθηκαν δοκίμια τα οποία προέκυψαν από τη δοκιμή Charpy. Χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό στερεοσκόπιο τύπου Leica MZ6, S.N:30111350, στο εργαστήριο ελέγχου ποιότητας, για την εξέταση αυτών. Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός με μίγμα HCL, HNO₃ και νερό, βάσει προτύπων ASTM [31]. Ο καθαρισμός που υπέστησαν τα προς εξέταση δοκίμια πραγματοποιήθηκε με χρήση οργάνου εκπομπής υπερήχων τύπου BANDELIN-SONOREX Electronics, model: RK255H, S/N: 316.00034246.009 και το μέσο ήταν etilic + alcool Izopropilic + N-propanol (μίγμα αιθανόλης, ισοτροπλικής αλκοόλης και N προπανόλης). Για τη ανάλυση επιλέχθηκαν μεγεθύνσεις Mx20 και Mx40.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται στις Εικόνες 7.1 έως 7.4. Η παρατήρηση των επιφανειών δείχνει ότι:



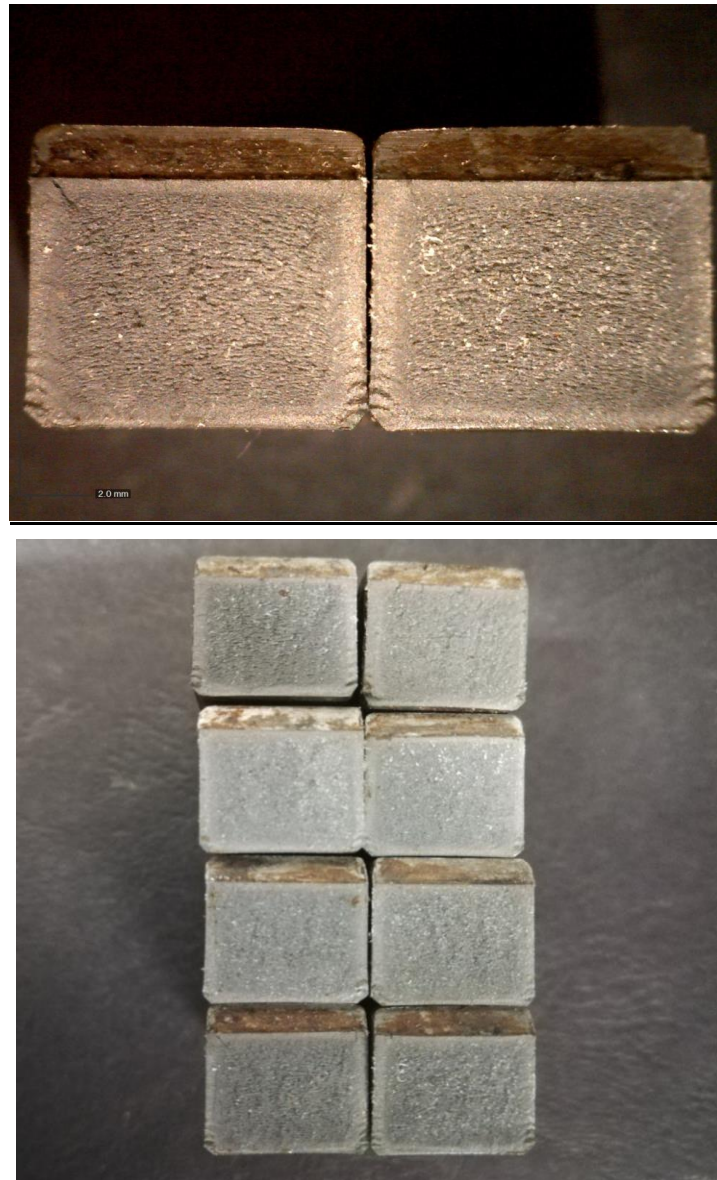
EIKONA 7.1: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου Νο6 (1ώρα ενανθράκωση)

Έπειτα από μία ώρα ενανθράκωσης, η επιφάνεια φαίνεται να έχει υποστεί έντονη πλαστική παραμόρφωση κατά τη θραύση η οποία γίνεται αντιληπτή κατά το πλάτος του δοκιμίου (καμπύλο εσωτερικό τμήμα) αλλά και στο μέτωπο της κρούσης. Περιμετρικά η επιφάνεια αποτελείται από μία πλήρως ψαθυρή περιοχή.



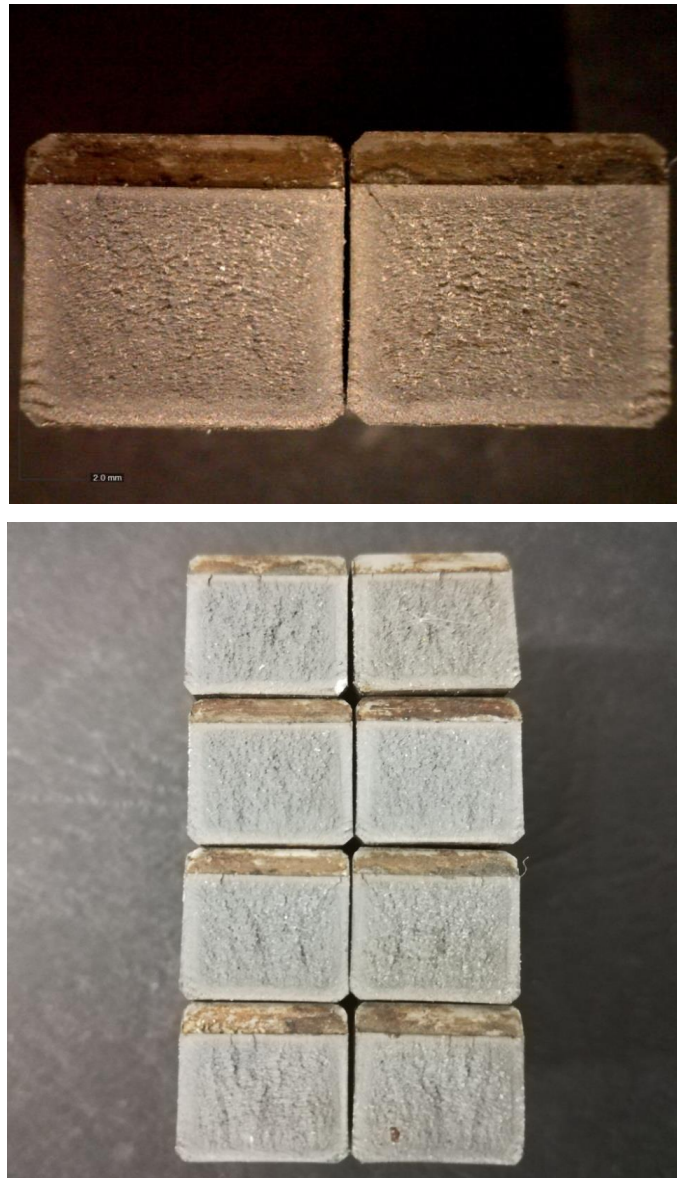
ΕΙΚΟΝΑ 7.2: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου Νο8 (2 ώρες ενανθράκωση)

Μετά τις δύο ώρες, παρουσιάζεται πιο εμφανές και ομοιογενές το στρώμα της ενανθράκωσης. Ταυτόχρονα φαίνεται να υπάρχει μια μικρή ελάττωση της πλαστικής παραμόρφωσης κατά τη διεύθυνση του μετώπου της θραύσης. Επίσης προς το εσωτερικό του δοκιμίου υποδεικνύεται όλκιμη θραύση λόγω της τραχύτερης μορφής της επιφάνειας. Σε αντίθεση με την εξωτερική επιφάνεια που φαίνεται πιο λεία υποδεικνύοντας ότι έχει υποστεί ψαθυρή θραύση.



EIKONA 7.3: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου No7 (3 ώρες ενανθράκωση)

Έπειτα των τριών ωρών ενανθράκωσης δε παρουσιάζεται πλαστική παραμόρφωση στις έτερες διαστάσεις. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το μέγεθος των περιοχών απόσχισης οι οποίες δεν είναι επίπεδες. Ταυτόχρονα γίνεται ακόμη πιο αντιληπτό το πάχος της ενανθράκωσης όπου σταδιακά αυξάνεται.



EIKONA 7.4: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου Νο26 (4 ώρες ενανθράκωση)

Και σ' αυτή τη περίπτωση συναντάται όλκιμη καρδιά. Δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση και επίσης απεικονίζονται περιοχές με αυλακώσεις κοντά στο μέτωπο της κρούσης όπου οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη διάρκεια ενανθράκωσης είναι οι δύο ώρες.

Η παρατήρηση των επιφανειών δείχνει ότι:

- η επιφάνεια αποτελείται από μια πλήρως ψαθυρή περιοχή, περιμετρικά, κατά την επιφάνεια ενανθράκωσης και από μια εσωτερική περιοχή στην οποία πριν την θραύση προηγείται πλαστική παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση περιορίζεται με την αύξηση των ωρών ενανθράκωσης. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το μέγεθος και το πλήθος των περιοχών απόσχισης οι οποίες βαθμιαία μειώνονται με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης.

- Ο ψαθυρότερος χαρακτήρας των περιοχών της εξωτερικής επιφάνειας αλλά και του στρώματος που έχει επηρεαστεί συνολικά από την ενανθράκωση της περιοχής ενισχύεται με την εκτεταμένη λάμψη περιοχών, ενδεικτικό ότι έχει συντελεστεί αποκόλληση διακρυσταλλικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ

8.1 Έλεγχος με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο

Χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων αντικειμενικών φακών τύπου ZEISS AXIO, ώστε να μελετηθεί η δομή του υλικού μικροσκοπικά έπειτα τη θερμική κατεργασία. Πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με S/N:38480011221. Επιλέχθηκαν δοκίμια από τη συμπληρωματική επιφάνεια αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη σκληρότητας και μικροσκληρότητας για την μεταλλογραφική μελέτη, ώστε να είναι μεγαλύτερο το ποσοστό συσχέτισης μεταξύ των αποτελεσμάτων μικροδομής και μηχανικών ιδιοτήτων.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με πρότυπα ASTM [31]. Ο εγκιβωτισμός πραγματοποιήθηκε σε μηχάνημα Struers “Citopress-1” (S/N: 5770313) (Εικόνα 8.1) και χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός ρητινών Struers “DuroFast” και “Multifast”.

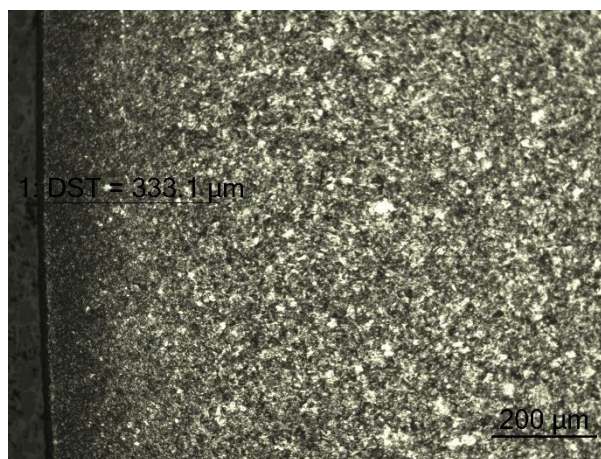
Η διαδικασία της λείανσης των δοκιμίων έγινε με διάφορα λειαντικά χαρτιά και χρησιμοποιήθηκε λειαντικό μηχάνημα “Presi Mecapol P262” (S/N: 244). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε στίλβωση με αιώρηματα αλουμίνας “AP-A Suspension” των 6μm, 3μm, 1μm και 0.3μm αντίστοιχα, στο ίδιο λειαντικό μηχάνημα, με χρήση πανιών από υλικό βελούδο. Στο τέλος, τα δοκίμια υπέστησαν χημική προσβολή δύο σταδίων, Picral 4% (μείγμα μεθυλικής αλκοόλης CH₃OH με 4gr πικρικό οξύ (O₂N)₃C₆H₂OH με την επιπλέον προσθήκη 4ml υδροχλωρικού οξέος HCl) και Nital 3% (μείγμα μεθυλικής αλκοόλης CH₃OH και 3% νιτρικού οξέος HNO₃). Η χημική προσβολή πραγματοποιήθηκε με διαδοχικές και βυθίσεις τμήματος του δοκιμίου στα δύο αντιδραστήρια, Picral και Nital, ώστε να προσβληθούν εξίσου οι διάφορες φάσεις της μικροδομής.



EIKONA 8.1: Μηχάνημα εγκιβωτισμού Struers Citopress-1

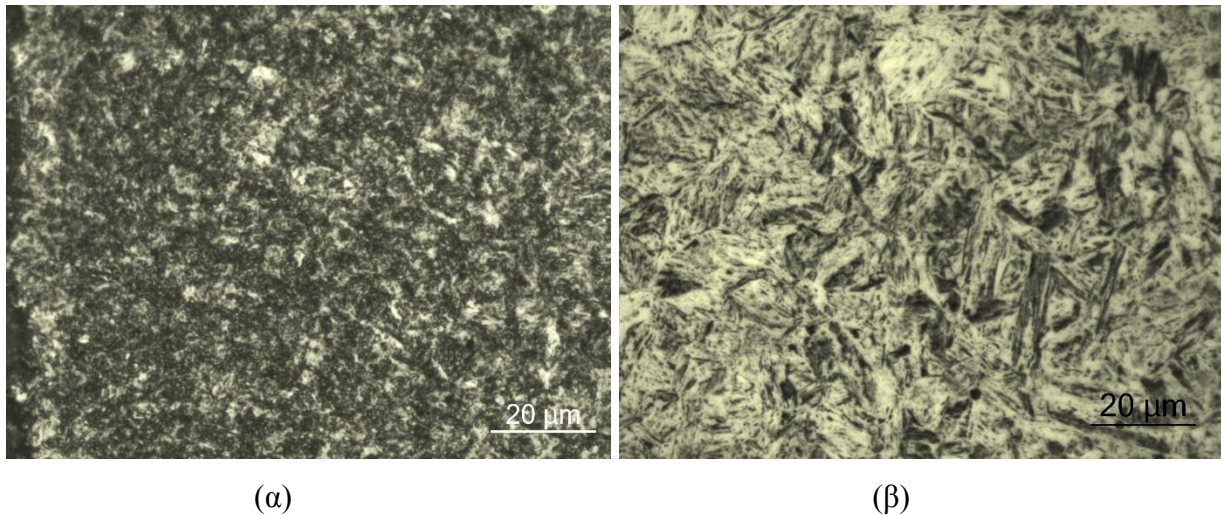
Ο χάλυβας που μελετάται, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως χάλυβας ενανθράκωσης, διότι περιέχει μικρό ποσοστό άνθρακα και περίπου 1,5% Cr και Ni. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων οδηγεί κυρίως σε μείγμα περλίτη, φερρίτη, μπαινίτη και μαρτενσίτη μετά από απόψυξη σε συγκεκριμένα μέσα και σε σχέση με την ισοδύναμη διάμετρο σκλήρυνσης. Ο επιφανειακός εμποτισμός με άνθρακα αυξάνει την εμβαπτότητα της επιφάνειας με αποτέλεσμα να ευνοείται ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, ο εκτεταμένος σχηματισμός καρβιδίων αλλά και η ύπαρξη υπολειπόμενου ωστενίτη. Στις Εικόνες 8.2 έως 8.12 αποτυπώνεται, το επιφανειακό στρώμα ενανθράκωσης συνολικά, η μικροδομή πολύ κοντά στην επιφάνεια αλλά και στο κέντρο της διατομής, συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

- Μία ώρα ενανθράκωσης στους 900⁰C, διπλή βαφή σε αλάτι και επαναφορά:



EIKONA 8.2: Μικροδομή του υλικού μετά από μία ώρα ενανθράκωσης: : Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση στρώματος εναθράκωσης. (Μεγέθυνση X100).

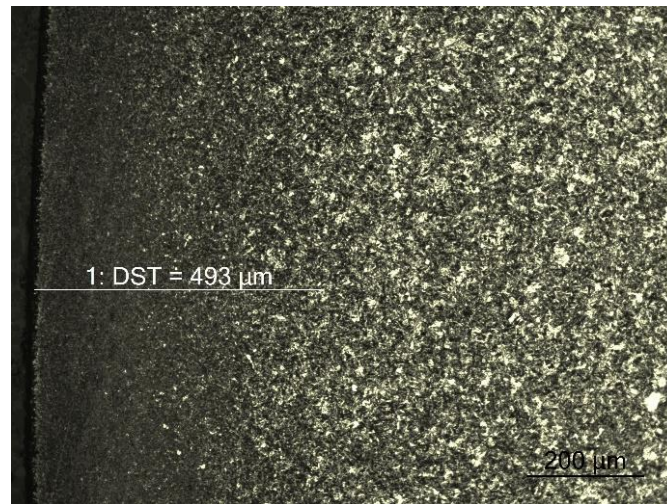
Απεικονίζεται ζώνη η οποία υποδεικνύει την εισχώρηση του άνθρακα. Η ζώνη αυτή είναι διακριτά διαβαθμισμένη και το στρώμα ενανθράκωσης φτάνει περίπου τα 350 μm περίπου. Η μικροδομή στο υπόβαθρο είναι λεπτόκοκκη, καλής ομοιομορφίας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης περιορίζεται στα 130 μm περίπου (Εικ. 8.2).



EIKONA 8.3: Μικροδομή του υλικού μετά από μία ώρα ενανθράκωσης: (α) ζώνη ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X500) (β) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

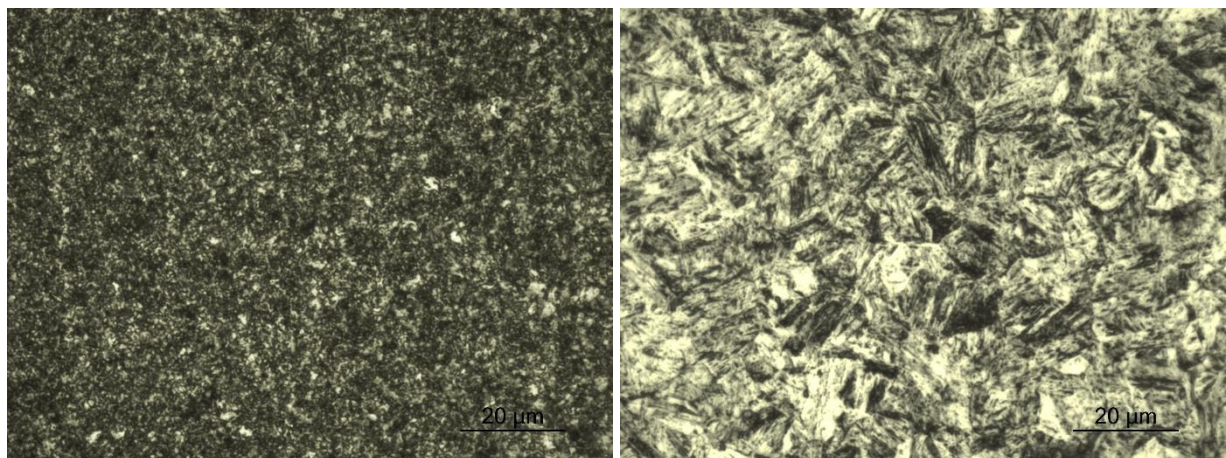
Στη ζώνη ενανθράκωσης η μικροδομή αποτελείται κυρίως μικρό ποσοστό κατώτερου μπαινίτη, μη καλοσχηματισμένους περλίτες και επαναφερμένο μαρτενσίτη. Το ποσοστό καρβιδίων είναι μη αξιολογήσιμο. Η σκληρότητα υπολογίζεται στα 52 HRC (Εικ. 8.3α). Στο κέντρο της διατομής του δοκιμίου, απεικονίζονται μια βελονοειδή μπανιτική δομή (σκούρες περιοχές) σχετικά ομοιογενής. Επίσης δε παρουσιάζεται επαναφερμένος μαρτενσίτης όπως στη μικροδομή κοντά στην επιφάνεια (Εικ 8.3β). Η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 47 HRC.

- Δύο ώρες ενανθράκωση στους 900⁰C, διπλή βαφή σε αλάτι και επαναφορά.



EIKONA 8.4: Μικροδομή του υλικού μετά από δύο ώρες ενανθράκωση: : Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X100).

Το στρώμα παρουσιάζεται με μεγαλύτερη ομοιογένεια συγκριτικά με τη μία ώρα ενανθράκωσης. Παρουσιάζεται διάχυση σε μεγαλύτερο βάθος το οποίο φτάνει περίπου τα 500μm περίπου. Η μικροδομή στο υπόβαθρο είναι λεπτόκοκκη, καλής ομοιομορφίας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης υπολογίζεται στα 300μm, κατά προσέγγιση (Εικ. 8.4).



(α)

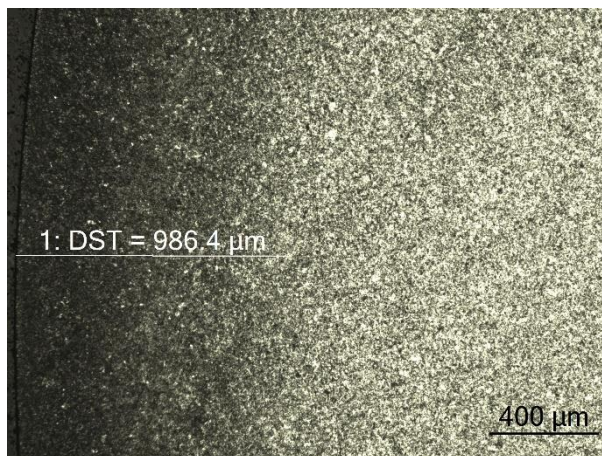
(β)

EIKONA 8.5: Μικροδομή του υλικού μετά από δύο ώρες ενανθράκωσης: (α) ζώνη ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X500), (β) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

Η μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια, κατώτερο μαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. Σκληρότητα 55 HRC (Εικ. 8.5α). Στο κέντρο της διατομής παρατηρείται, επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα, κατώτερος μαινίτης, περλίτης και μικρά ποσοστά υπολειπόμενου ωστενίτη (Εικ 8.5β). Η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 47 HRC. Η μικροδομή στον πυρήνα παρουσιάζεται πιο λεπτόκοκκη σε σχέση

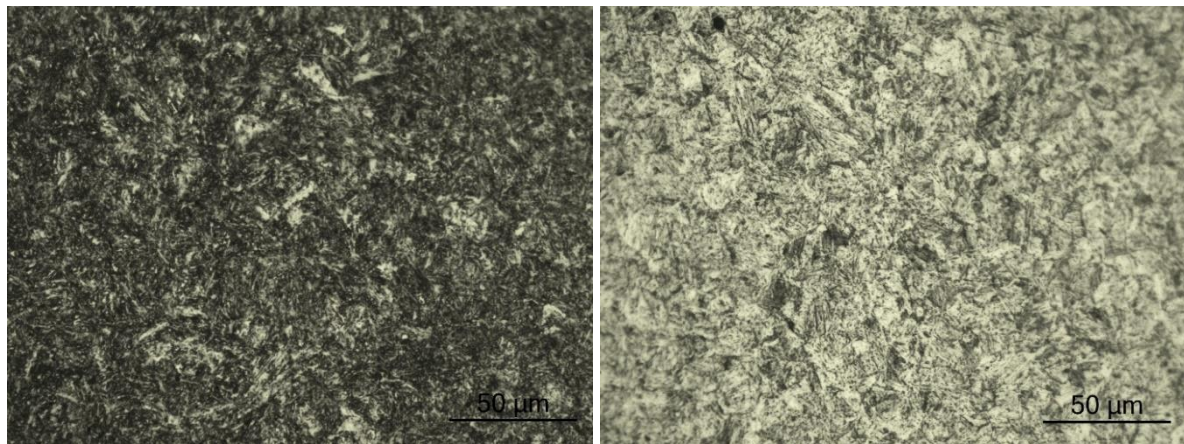
με την αντίστοιχη δομή στον πυρήνα του δοκιμίου μετά από μία ώρα ενανθράκωσης. Η ζώνη ενανθράκωσης, αποτελείται από μεγαλύτερο ποσοστό καρβιδίων συγκριτικά με τη μία ώρα.

- Τρεις ώρες ενανθράκωση στους 900⁰C, διπλή βαφή σε λάδι και επαναφορά.



ΕΙΚΟΝΑ 8.6: Μικροδομή του υλικού μετά από τρεις ώρες ενανθράκωσης: Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Η διάχυση του άνθρακα παρουσιάζεται σε μεγαλύτερο βάθος καλύτερης ομοιογένειας σε σχέση με τις δύο ώρες ενανθράκωσης. Το στρώμα ενανθράκωσης αποτελείται από δύο επιμέρους ζώνες -την εξωτερική και εσωτερική- και φτάνει συνολικά τα 1000μm περίπου. Η εξωτερική ζώνη, μήκους περίπου 500μm παρουσιάζει μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, υψηλή ομοιογένεια και χαρακτηρίζεται από το ίδιο ποσοστό άνθρακα. Η εσωτερική ζώνη, είναι εξίσου ομοιογενής και χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση του ποσοστού του άνθρακα. Η μικροδομή στο υπόβαθρο απεικονίζεται λεπτόκοκκη, καλής ομοιομορφίας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης υπολογίζεται στα 920μm, κατά προσέγγιση (Εικ.8.6).



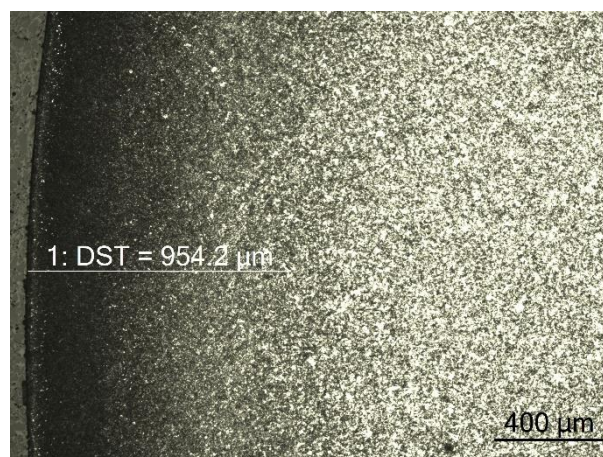
(α)

(β)

ΕΙΚΟΝΑ 8.7: Μικροδομή του υλικού μετά από τρεις ώρες ενανθράκωσης: (α) Μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X500). (β) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

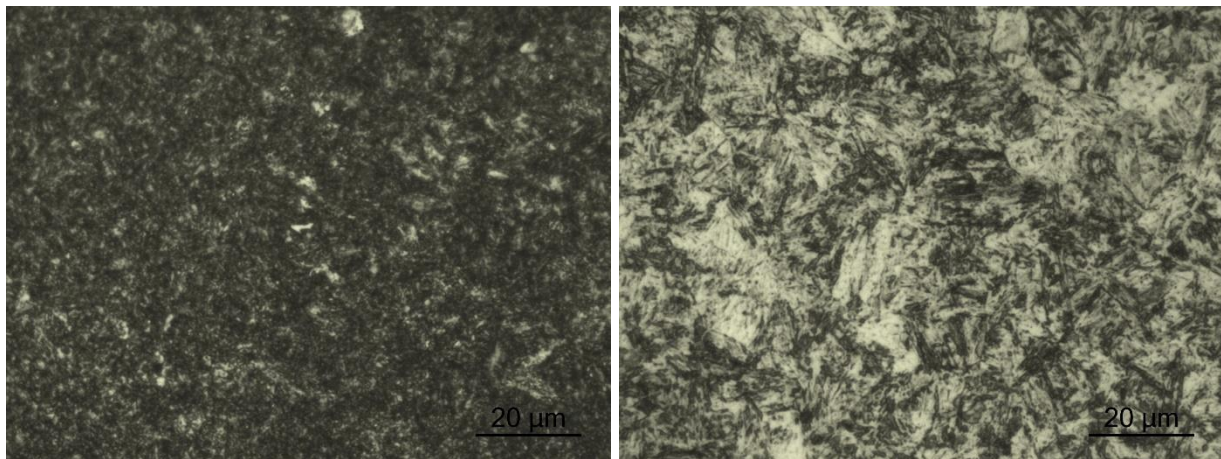
Παρατηρείται πολύ μεγάλη αναλογία περιεκτικότητας σε καρβίδια καθ' όλη την επιφάνεια στην εξωτερική ζώνη. Η μικροδομή αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη σε ποσοστό περίπου 20%. Σ' αυτές τις περιπτώσεις προτιμάται να ακολουθούνται δύο επαναφορές όπου αναμένεται η ποσότητα του υπολειπόμενου ωστενίτη να μειωθεί στο 5 – 8%. Σκληρότητα 60,5 HRC (Εικ. 8.7α). Στο κέντρο του δοκιμίου παρατηρείται, μπαινίτης και επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα (Εικ 8.7β). Η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 46 HRC. Η μικροδομή στον πυρήνα παρουσιάζεται λεπτόκοκκη. Η ζώνη ενανθράκωσης, αποτελείται από μεγαλύτερο ποσοστό καρβιδίων συγκριτικά με τις δύο ώρες, ενώ συγχρόνως αποτελείται από δύο ζώνες.

- Τέσσερις ώρες ενανθράκωση στους 900°C, βαφή σε αλάτι και επαναφορά.



ΕΙΚΟΝΑ 8.8: Μικροδομή του υλικού μετά από τέσσερις ώρες ενανθράκωσης: Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Παρατηρείται παρόμοια, αλλά μικρότερη διάχυση όσον αφορά το βάθος ενανθράκωσης και την ομοιογένεια σε σχέση με τις τρεις ώρες. Αντίστοιχα, το στρώμα ενανθράκωσης αποτελείται από δύο επιμέρους ζώνες -την εξωτερική και εσωτερική- και φτάνει συνολικά τα 960μm περίπου. Η εξωτερική ζώνη, μήκους περίπου 500μm παρουσιάζει μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, υψηλή ομοιογένεια και χαρακτηρίζεται από το ίδιο ποσοστό άνθρακα. Η εσωτερική ζώνη, είναι εξίσου ομοιογενής και χαρακτηρίζεται από σταδιακή μείωση του ποσοστού του άνθρακα. Η μικροδομή στο υπόβαθρο απεικονίζεται πιο χονδρόκοκη σε σχέση με αυτή των τριών ωρών ενανθράκωσης. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης υπολογίζεται στα 880 μm, κατά προσέγγιση (Εικ.8.9).

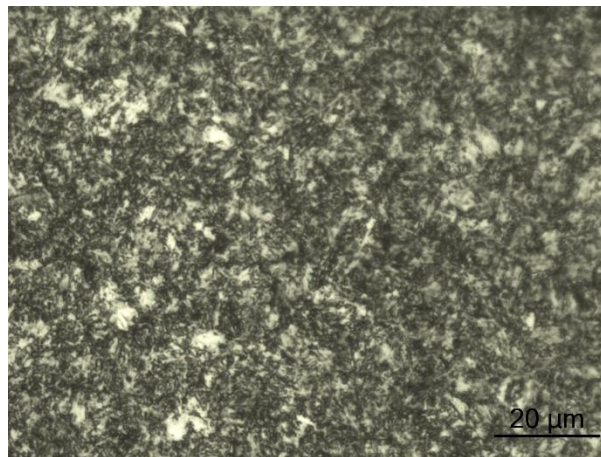


(α)

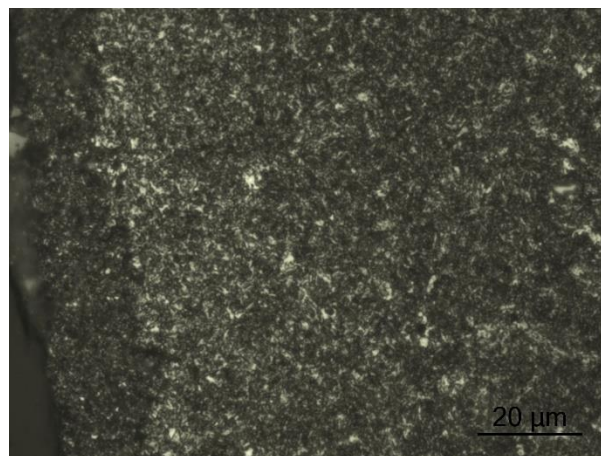
(β)

EIKONA 8.9: Μικροδομή του υλικού μετά από τέσσερις ώρες ενανθράκωσης: (α) Μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X500) (β) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

Η μικροδομή στην εξωτερική ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται από εξίσου μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, επαναφερμένο μαρτενσίτη και μειωμένο ποσοστό υπολειπόμενο οστενίτη. Σκληρότητα 61 HRC (Εικ. 8.10α). Στο κέντρο της διατομής παρατηρείται, κυρίως επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα και κατώτερος μπαινίτης (Εικ 8.10β). Η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 47 HRC. Η μικροδομή στον πυρήνα παρουσιάζεται πιο συμπαγής από αυτή των τριών ωρών, με μεγαλύτερο ποσοστό επαναφερμένου μαρτενσίτη. Η ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται και σε αυτή την περίπτωση από δύο περιοχές και από παρόμοιο ποσοστό καρβιδίων με αυτό των τριών ωρών.



Εικόνα 8.10: Απεικόνιση της ενδιάμεσης περιοχής της επιφάνειας του δοκιμίου (Μεγέθυνση X1000)



Εικόνα 8.11: Απεικόνιση της οξείδωσης της επιφάνειας (Μεγέθυνση X1000)

Η εξωτερική ζώνη του στρώματος ενανθράκωσης χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, το οποίο είναι πάχους 75μm, κατά 50% μεγαλύτερο σε σχέση με την περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης (Εικ. 8.11). Συμπερασματικά, το στρώμα της ενανθράκωσης συνολικά, μετά από τέσσερις ώρες παραμονή στην αντίστοιχη θερμοκρασία, αποτελείται από τρία διαφορετικά στρώματα ως προς το ποσοστό των περιεχόμενων σε αυτά καρβιδίων.

Συμπεράσματα

Για την επιφάνεια:

Στην περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης το ποσοστό άνθρακα που αποκτήθηκε επιφανειακά ήταν ανομοιογενές σε πάχος και βάθος με συνέπεια η αποκτώμενη σκληρότητα να είναι αποτέλεσμα μίξης επαναφερμένου μαρτενσίτη και μπαινίτη. Στην περίπτωση των δύο ωρών, το ποσοστό του άνθρακα στην επιφάνεια, έχει διαχυθεί ομοιόμορφα. Το ποσοστό του

είναι τέτοιο που η μικροδομή εκτός του επαναφερμένου μαρτενσίτη και του κατώτερου μπαινίτη, περιέχει καρβίδια και υπολειπόμενο ωστενίτη. Στις τρεις ώρες παραμονής, το στρώμα εναθράκωσης είναι πλήρως ανεπτυγμένο παρουσιάζοντας δύο διακριτές ζώνες, μία διαβαθμισμένου ποσοστού καρβιδίων και μία διάχυσης. Η μικροδομή, όπως και στις δύο ώρες, αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, κατώτερο μπαινίτη, υπολειπόμενο ωστενίτη καθώς και μεγαλύτερο ποσοστό καρβιδίων. Παρόμοια μικροδομή παρουσιάζει η περίπτωση των τεσσάρων ωρών εναθράκωσης, με τη διαφορά ότι το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη είναι μικρότερο. Σε αυτή τη περίπτωση η ζώνη εναθράκωσης αποτελείται επίσης από δύο ζώνες, την εξωτερική όπου η διαβάθμιση στο ποσοστό των καρβιδίων είναι εκτενέστερη και τη ζώνη διάχυσης.

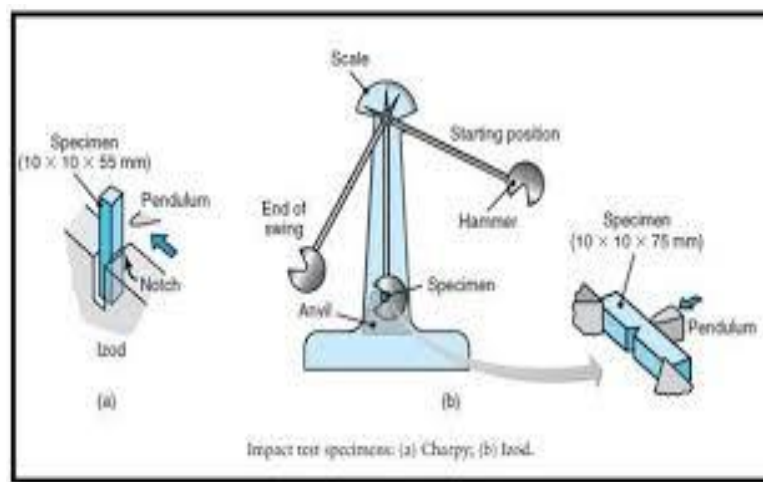
Για τον πυρήνα:

Στην περίπτωση της μιας ώρας εναθράκωση η δομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μπαινίτη. Στις δύο και τρεις ώρες, η μικροδομή παρουσιάζεται όμοια, αποτελούμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη, κατώτερο μπαινίτη, περλίτη και μη αξιολογήσιμο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη. Στις τέσσερις ώρες εναθράκωσης, η δομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μπαινίτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΔΟΚΙΜΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

9.1 Διαδικασία δοκιμής

Πραγματοποιήθηκε δοκιμή κρούσης στην εταιρεία Spectrum Labs A.E. βάσει προτύπου [32]. Η μηχανή δοκιμών αντοχής σε κρούση που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή είναι της κατασκευάστριας εταιρείας Heckert με Serial No. 423/75/6 και η μέγιστη ενέργεια της είναι 30 kpm = 294,3 Joule (Εικόνα 7.1).

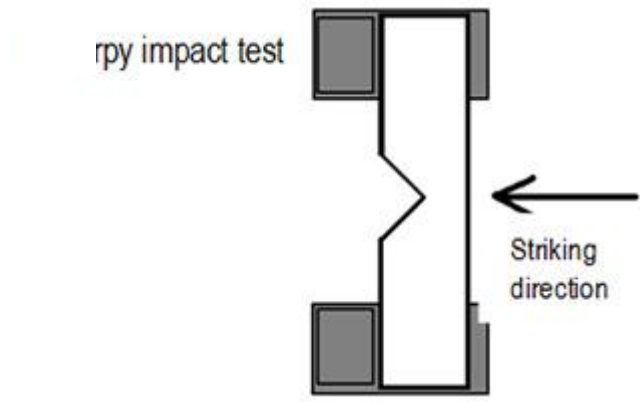


ΕΙΚΟΝΑ 7.1: Η μηχανή της δοκιμής κρούσης και τα βασικά χαρακτηριστικά της.

Από το διαθέσιμο υλικό μορφοποιήθηκαν τυποποιημένα δοκίμια, μήκους 55 mm, πλάτους και ύψους 10 mm (Εικόνα 7.2) [37]. Βάσει του προτύπου, τα δοκίμια έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Οι επιφάνειες τους είχαν τραχύτητα $Ra < 5 \mu m$, εκτός από τις άκρες.
- Η εγκοπή V προετοιμάστηκε έτσι ώστε, η ακτίνα ρίζας της εγκοπής να είναι ελεύθερη από σημάδια που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στην ενέργεια που απορροφάται.
- Το πρόσωπο συμμετρίας της εγκοπής V να είναι κάθετο στο διαμήκη άξονα του δοκιμαστικού κομματιού.
- Η εσωτερική γωνία της εγκοπής V να είναι 45° , σε βάθος 2 mm και η ακτίνα της ρίζας της να είναι 0.25 mm. Έγινε έλεγχος με χρήση V Notch Caliper Gauge σε κάθε δοκιμαστικό κομμάτι, πριν την εκτέλεση της δοκιμής. Αν είχε παρατηρηθεί μη ομαλή εισαγωγή του δοκιμίου στην εγκοπή αυτή, τότε πρέπει να ελεγχθεί το αίτιο και να κατασκευαστούν εκ νέου δοκίμια.

- Τα δοκιμαστικά κομμάτια προετοιμάστηκαν με τρόπο που να ελαχιστοποιηθεί ο επηρεασμός του υλικού. Μπορούν να χαρακτηρίζονται σε σημεία τέτοια, ώστε να αποφεύγονται τα αποτελέσματα της πλαστικής παραμόρφωσης και τυχόν ασυνεχειών στην επιφάνεια που μετριέται η απορροφημένη ενέργεια της δοκιμής.



ΕΙΚΟΝΑ 7.2: Τυποποιημένα δοκίμια

9.2 Προετοιμασία της μηχανής

Η προετοιμασία της μηχανής για την δοκιμή περιέχει τα ακόλουθα στάδια:

- Σηκώνουμε το εκκρεμές με το χέρι έως τη θέση υποδοχής όπου ασφαλίζει αυτόματα.
- Ο δείκτης τοποθετείται στον δείκτη στο δυναμόμετρο του οργάνου στη θέση 30 kpm γυρίζοντας τον πάντα προς τα αριστερά.
- Κατεβάζουμε τους μοχλούς του οργάνου προς τα κάτω.
- Το εκκρεμές ελευθερώνεται και διαγράφει κυκλική τροχιά έως ένα ορισμένο ύψος και επιστρέφει κοντά στη θέση ασφάλισής του.
- Το εκκρεμές συγκρατείται με τα χέρια και επαναφέρεται στην θέση ασφάλισης του.
- Διαβάζουμε την ένδειξη του δείκτη στο δυναμόμετρο. Αν δείχνει μηδέν, τότε η μηχανή είναι έτοιμη για τον έλεγχο. Η ένδειξη μηδέν μας δείχνει ότι η μηχανή δεν απορρόφησε ενέργεια.

9.3 Δοκιμή Κρούση

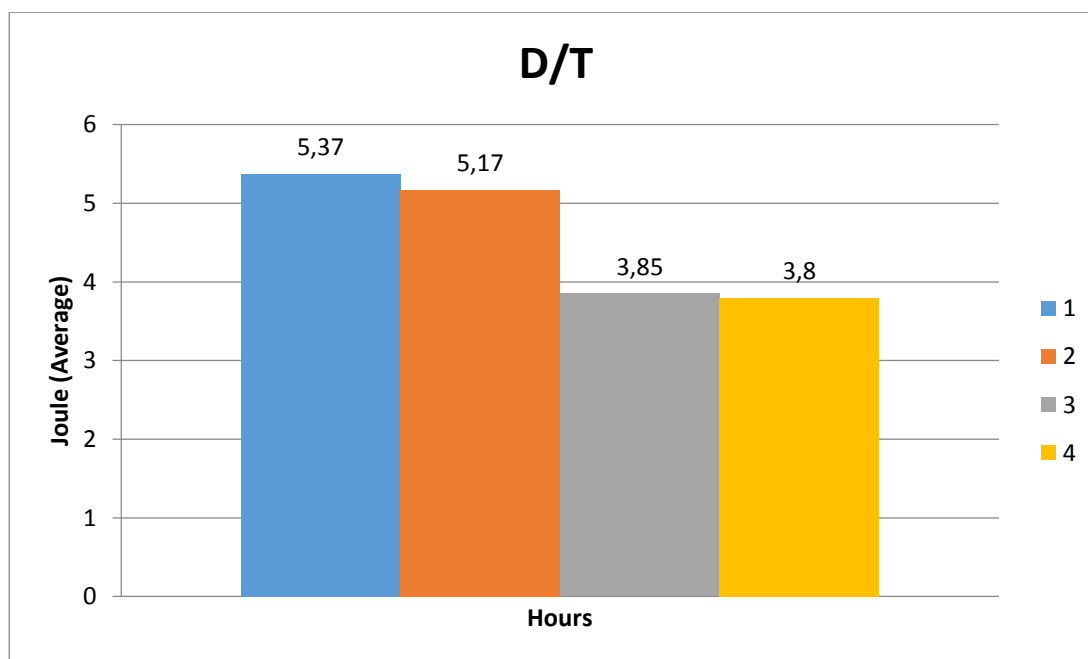
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τα ακόλουθα βήματα:

- Γυρίζουμε τον δείκτη του δυναμόμετρου στη θέση 30 kpm με φορά πάντα προς τα αριστερά.

- Τοποθετούμε το δοκίμιο στη θέση υποδοχής της βάσης του μηχανήματος έτσι ώστε η εγκοπή να βρίσκεται στην απέναντι πλευρά από αυτή που θα χτυπήσει το εκκρεμές. Η εγκοπή τοποθετείται στο κέντρο του ανοίγματος και γίνεται έλεγχος με το πρότυπο δοκίμιο.
- Ασφαλίζουμε το εκκρεμές στην θέση εκκίνησης.
- Κατεβάζουμε τους μοχλούς της μηχανής και ελευθερώνουμε το εκκρεμές, το οποίο διαγράφει κυκλική τροχιά και συγκρούεται με το δοκίμιο χάνοντας μέρος της ενέργειάς του.
- Επαναφέρουμε το εκκρεμές στην αρχική του θέση.
- Διαβάζουμε την ένδειξη στο δυναμόμετρο (σε kpm) και την καταγράφουμε στο Δελτίο Ελέγχου. Η ένδειξη σε kpm πολλαπλασιαζόμενη με 9.81 m/sec^2 δίνει το αποτέλεσμα της δοκιμής σε Joules. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 7.1 και παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 7.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1: Δυσθραυστότητα του υλικού συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Χρόνος Ενανθράκωσης	(1)	(2)	(3)	(4)	M.O.
	Δυσθραυστότητα (Joule/cm ²)				
1 h	5	5,9	5,2	-	5,37
2 h	5,2	5,3	5	5,2	5,17
3 h	3,9	3,9	3,8	3,8	3,85
4 h	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8

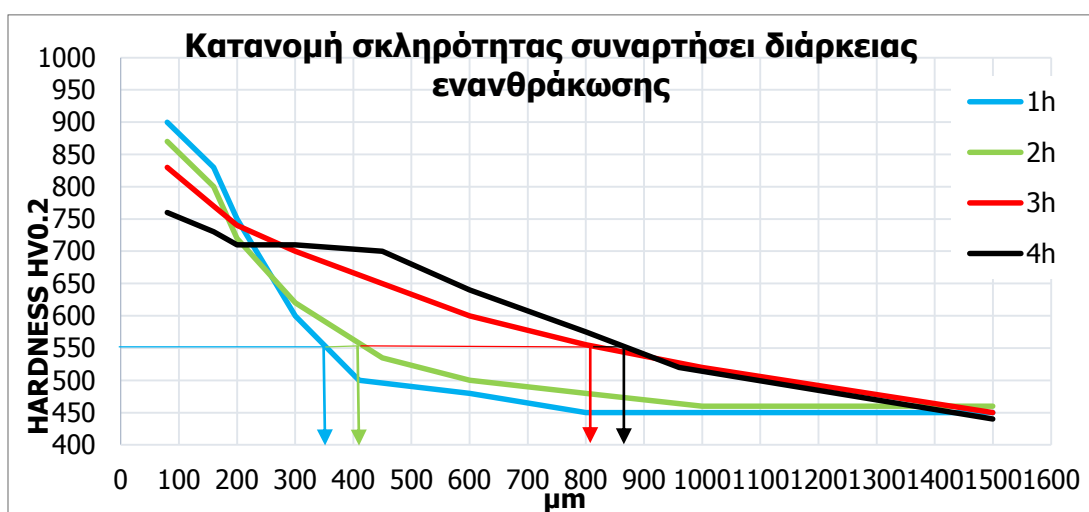


ΕΙΚΟΝΑ 7.3: Διάγραμμα δυσθραυστότητας συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανής η πτώση της τιμής της απορροφούμενης ενέργειας μετά τις 3 ώρες, κατ' επέκταση και στις 4 ώρες, σε σύγκριση με την 1 και 2 ώρες εναθράκωσης. Η μείωση της δυσθραυστότητας των 3-4 ωρών (52 Joule/cm^2) σε σχέση με τις λιγότερες ώρες (37 Joule/cm^2) είναι περίπου 28,8%. Η συγκεκριμένη δοκιμή έγινε με σκοπό την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το στρώμα εναθράκωσης με το υπόβαθρο, σε σχέση με τη δυσθραυστότητα του υλικού μετά από συγκεκριμένες ώρες εναθράκωσης. Παρατηρείται σημαντική μείωση της δυσθραυστότητας μετά από 3 και 4 ώρες εναθράκωση ενδεικτικό της ψαθυρότητας επιφανειακού στρώματος και υποβάθρου. Επίσης, το υλικό απορροφά λιγότερη ενέργεια μέχρι την ολική θραύση του σε σύγκριση με τη μία και της δύο ώρες διότι εμφανίζεται το φαινόμενο της μεγένθυσης των κόκκων για μεγαλύτερη έκθεση του στη διαδικασία της εναθράκωσης.

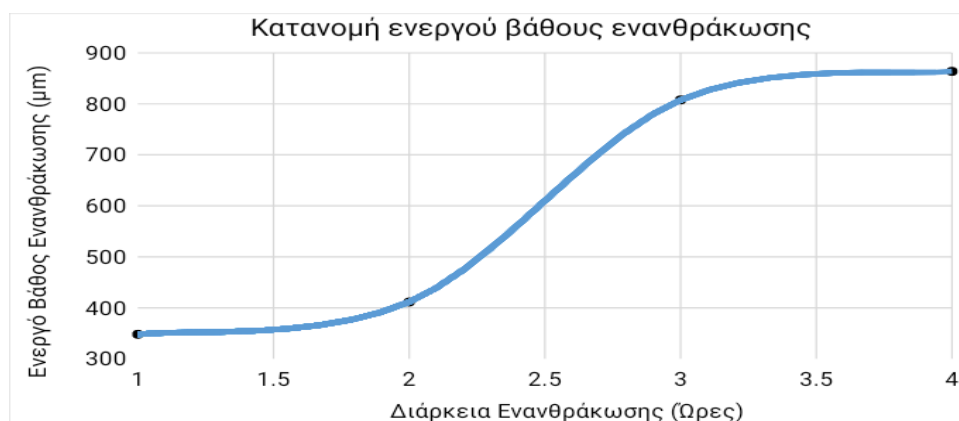
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εικόνα 10.1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, η κατανομή σκληρότητας συναρτήσει διάρκειας ενανθράκωσης. Η σκληρότητα στην επιφάνεια μειώνεται με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης πιθανότατα λόγω μεγέθυνσης των κόκκων του επιφανειακού στρώματος αλλά και λόγω αύξησης του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη (βαφή υλικού με μεγαλύτερο ποσοστό άνθρακα). Ταυτόχρονα, με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης, αυξάνεται και η περιοχή που υφίσταται σκλήρυνση λόγω εκτενέστερης διάχυσης του άνθρακα.



Εικόνα 10.1: Κατανομή σκληρότητας συναρτήσει διάρκειας ενανθράκωσης

Στην εικόνα 10.2, παρουσιάζεται η κατανομή του ενεργού βάθους ενανθράκωσης συναρτήσει διάρκειας ενανθράκωσης.



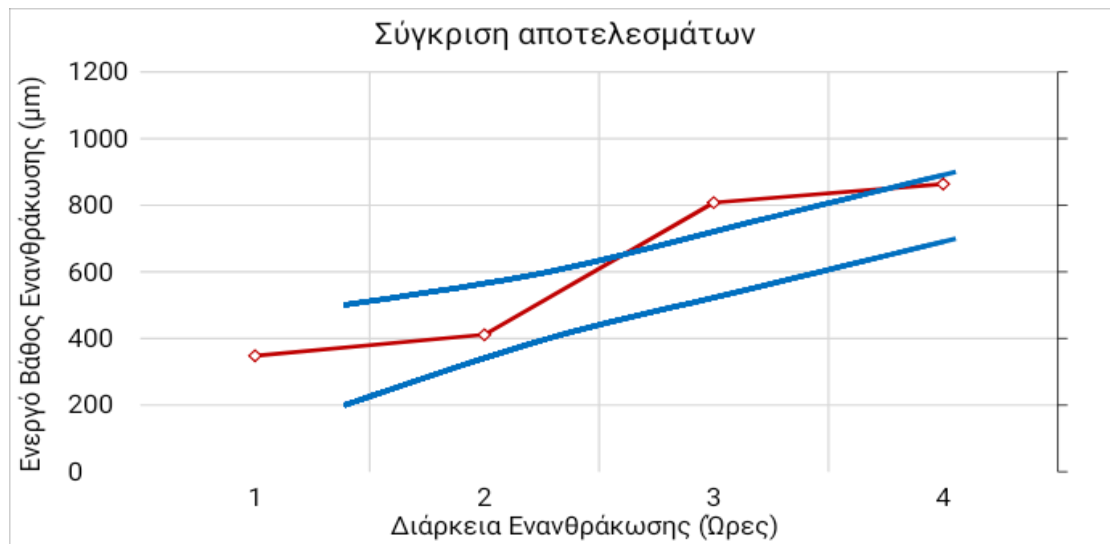
Εικόνα 10.2: Κατανομή ενεργού βάθους

Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης. Αυξάνεται ραγδαία (διπλασιάζεται) για παραμονή μεταξύ των 2 και 3 ωρών. Η παραβολική μορφή της καμπύλης σχετίζεται με το νόμο του Fick. Η μικρή διαφορά μεταξύ παραμονής 3 και 4 ωρών σχετίζεται με τον κορεσμό του στρώματος μετά από 3 ώρες ενανθράκωσης.

- Η σκληρότητα του υποβάθρου υπολογίστηκε ουσιαστικά στο 1/2R και στο κέντρο των δοκιμίων η οποία βρίσκεται εντός του εύρους σκληρότητας για το συγκεκριμένο υλικό, όπως δίδεται στο αντίστοιχο πρότυπο, και για τις τέσσερις χρονικές περιόδους ενανθράκωσης. Η σκληρότητα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στο 1/2 της ακτίνας σε σχέση με το κέντρο αλλά μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο. Και στις τέσσερις περιπτώσεις η τιμή βρίσκεται στην περιοχή μέγιστης ολκιμότητας του χάλυβα όπως προβλέπεται να παρουσιάζει το συγκεκριμένο υλικό.
- Με βάση τα προφίλ μικροσκληρότητας που λήφθηκαν, υπάρχει, όπως είναι φυσικό, βαθμιαία αύξηση της τιμής σκληρότητας καθώς και το βάθος με την αύξηση του χρόνου παραμονής στη θερμοκρασία éνανθράκωσης. Η αύξηση με την αύξηση του χρόνου παραμονής σχετίζεται με την αύξηση του ποσοστού του άνθρακα που έχει διαχυθεί στην επιφάνεια το όποιο ξεκινά με 0.35% μετά από μία ώρα και φτάνει το 0.9% μετά από τέσσερις ώρες. Η σκληρότητα του υποβάθρου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αύξηση όμως του εύρους με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης που οφείλεται στη μεγέθυνση των κόκκων λόγω του χρόνου έκθεσης στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης.
- Από τη θραυστογραφία των επιφανειών μετά τη δοκιμή δυσθραυστότητας, παρατηρείται βαθμιαία μείωση της πλαστικής παραμόρφωσης αλλά και της επιφάνειας απόσχισης με την αύξηση του χρόνου ενανθράκωσης χαρακτηριστικό της αύξησης της ψαθυρής περιοχής. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της δοκιμής κρούσης όπου η απορροφούμενη ενέργεια βαίνει μειούμενη. Το επιφανειακό στρώμα είναι αυτό που καθορίζει σε κυρίαρχο βαθμό την συνολική συμπεριφορά του υλικού κατά την κρούση.
- Κατά το μεταλλογραφικό έλεγχο για τις διαφορετικές περιπτώσεις χρόνου ενανθράκωσης παρατηρήθηκε στην επιφάνεια κυρίως επαναφερμένος μαρτενσίτης με αυξανόμενη περιεκτικότητα σε καρβίδια αλλά και αυξανόμενη ζώνη διάχυσης. Στον πυρήνα, η μικροδομή αποτελείται σταθερά από ένα μείγμα. Στην περίπτωση της μίας ώρας ενανθράκωσης το ποσοστό άνθρακα που αποκτήθηκε επιφανειακά ήταν ανομοιογενές σε πάχος και βάθος με συνέπεια η αποκτώμενη σκληρότητα να είναι αποτέλεσμα μίξης επαναφερμένου μαρτενσίτη και μπαινίτη. Στην περίπτωση των δύο

- ωρών, το ποσοστό του άνθρακα στην επιφάνεια, έχει διαχυθεί ομοιόμορφα. Το ποσοστό του είναι τέτοιο που η μικροδομή εκτός του επαναφερμένου μαρτενσίτη και του κατώτερου μαινίτη, περιέχει καρβίδια και υπολειπόμενο ωστενίτη. Στις τρεις ώρες παραμονής, το στρώμα ενανθράκωσης είναι πλήρως ανεπτυγμένο παρουσιάζοντας δύο διακριτές ζώνες, μία διαβαθμισμένου ποσοστού καρβιδίων και μία διάχυσης. Η μικροδομή, όπως και στις δύο ώρες, αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, κατώτερο μαινίτη, υπολειπόμενο ωστενίτη καθώς και μεγαλύτερο ποσοστό καρβιδίων. Παρόμοια μικροδομή παρουσιάζει η περίπτωση των τεσσάρων ωρών ενανθράκωσης, με τη διαφορά ότι το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη είναι μικρότερο. Σε αυτή τη περίπτωση η ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται επίσης από δύο ζώνες, την εξωτερική όπου η διαβάθμιση στο ποσοστό των καρβιδίων είναι εκτενέστερη και τη ζώνη διάχυσης. Όσον αφορά τον πυρήνα, στην περίπτωση της μιας ώρας ενανθράκωση η δομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μαινίτη. Στις δύο και τρεις ώρες, η μικροδομή παρουσιάζεται όμοια, αποτελούμενη από επαναφερμένο μαρτενσίτη, κατώτερο μαινίτη, περλίτη και μη αξιολογήσιμο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη. Στις τέσσερις ώρες ενανθράκωσης, η δομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μαινίτη.
- Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να βρεθεί ο βέλτιστος χρόνος ενανθράκωσης όπου θα περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο αντοχής και βάθους της επιφανειακής ζώνης ενανθράκωσης καθώς και ελαστικότητας του υποβάθρου. Ταυτόχρονα επιδιώκεται το ενεργό βάθος ενανθράκωσης να βρίσκεται μεταξύ 0,7-1,0mm, σύμφωνα με τις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές. Αξιολογώντας το σύνολο των αποτελεσμάτων και δοκιμών ο βέλτιστος χρόνος ενανθράκωσης είναι οι 2 ώρες. Το ενεργό βάθος του επιφανειακού στρώματος έχει αναπτυχθεί στα 0.7-0.8mm ενώ ταυτόχρονα η συνολική συμπεριφορά του υλικού μαζί με το υπόβαθρο είναι ικανοποιητικά δύσθραυστη. Μια δοκιμή στις 2,5 ώρες ενανθράκωση μπορεί να δώσει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα.

Στην εικόνα 10.2 παρουσιάζεται το βάθος ενανθράκωσης βάση προδιαγραφών του κατασκευαστή για συγκεκριμένο μέσο απόψυξης (αλάτι κατασκευαστή). Ποσοτικά, η διπλή βαφή αποκτά μεγαλύτερο βάθος για ενανθράκωσης διάρκειας άνω των δύο ωρών.



Εικόνα 10.2: Βάθος ενανθράκωσης βάση προδιαγραφών κατασκευαστή [27]

Στον πίνακα 10.1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης και της δοκιμής κάμψης για τους δύο τύπους απόψυξης ενανθράκωσης.

Πίνακας 10.1: Συγκριτικά αποτελέσματα μηχανικών ιδιοτήτων ενανθράκωσης διπλής βαφής.

Μηχανική ιδιότητα προς σύγκριση	Διάρκεια ενανθράκωσης				
	1h	2h	3h	4h	
Ενεργό βάθος ενανθράκωσης (μm)	348.1	411.4	807.6	863.8	
Μέγιστη Σκληρότητα	878,4	831,0	726,3	739,2	
Σκληρότητα (HRC)	½ R	43.5 ± 1.4	44.1 ± 1.0	43.1 ± 0.9	44.7 ± 1.2
	Πυρήνας	42.9 ± 1.7	43.6 ± 1.5	40.5 ± 0.4	44.9 ± 1.3
Charpy (Joule/cm ²)	5.37	5.17	3.85	3.80	

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, η βέλτιστη περίπτωση διπλής βαφής για ένα στρώμα από 0,5-0,9mm με τις βέλτιστες ιδιότητες είναι μεταξύ των 2 και 3 ωρών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Γ.Δ. Χρυσουλάκης, Δ.Ι. Παντελής: «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Κεφάλαιο 15, «Βιομηχανικά Κράματα», σελ. 511-537, Κεφάλαιο 13, «Θερμικές Κατεργασίες Μεταλλικών Υλικών», σελ. 471-493, (2003).

[2] Σηδηρούχα Κράματα: <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6>

[3]Τεχνικές Προδιαγραφές Χάλυβα SD:<http://www.sidenor.gr/Downloads.aspx? Menu Txtid=54&lang=GR>

[4] Γ .Ι. Τσαμασφύρος: «Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων Ι», Εκδόσεις Συμμετρία, 1997.

[5]Μηχάνημα δοκιμής εφελκυσμού.

<http://www.keywordpicture.com/keyword/tensile%20strength%20machine/>

[6]Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Γενική Μεταλλογνωσία Ι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1989.

[7] M. F. Ashby and D. Jones: “Engineering Materials”, Second Edition, Ed. Butterworth - Heinemann, 1996.

[8] Κ. Μέντρεα: «Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Μεταλλικών Υλικών», Διδακτικές Σημειώσεις, Τέταρτη Έκδοση, 2014.

[9] R. W. Hertzberg: ”Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”, Fourth edition, Wiley, 1996.

[10] Α. Γ. Μάμαλη: «Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών», Εκδ. Φοίβος, Αθήνα, 1996.

[11] Γ. Δ. Παπαδημητρίου, Γενική Μεταλλογνωσία Ι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1989.

[12] Π. Ψυλλάκη: «Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής τους για βιομηχανικές εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2006.

[13] Μηχανική Συμπεριφορά των υλικών, Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

[14] ASTM E10-01, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.

[15] ASTM E92-82 (2003), Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.

[16] ASTM E18-07, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

[17] Technical facts. “Cold rolling of sheets”, Manufacturing Guide, <https://www.manufacturingguide.com/en/cold-rolling-sheets>.

[18] Γ.Κ. Τριανταφυλλίδης: «Μεταλλογνωσία», 2η Έκδοση, Εκδ.Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2014.

[19]Π. Γ. Πετρόπουλος, Μεταλλουργεία, Εκδόσεις Ευγενίδου Ίδρυμα, 1995.

[20] Επιφανειακές κατεργασίες:

http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Epifaniakes_%20katergasies.pdf

[21] www.bitros.gr, www.tsiotassteel.com

[22]Φασματομετρία Ατομικής / Οπτικής Εκπομπής, Νοέμβριος 2014, Σχολή Χημικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- [23] Inspection Certificate No. 2162656, Mechel Trading Ltd.
- [24] DIN 17210, Case hardening steels, September 1986.
- [25] ASTM E 384 – 11 ε1, “Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials”.
- [26] Γ.Χ Ζιούτας, Πιθανότητες και Στοιχεία Στατιστικής για Μηχανικούς, 2013.
- [27] DIN 17210:1986, Case hardening steels- Technical delivery conditions.
- [28] ASTM E140 – 07, Standard Hardness Conversion Tables for Metals.
- [29] EN ISO 2639:2003, Steels – Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases.
- [30] ASTM 18-03, Standard Test Methods Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials, 2004
- [31] Metallographic Guide, Manual for metallographic structure preparation, Struers, M.I.Priniotakis A.E.B.E.
- [32] EN ISO 148 – 1: 2010, Metallic Materials – Charpy pendulum impact test.