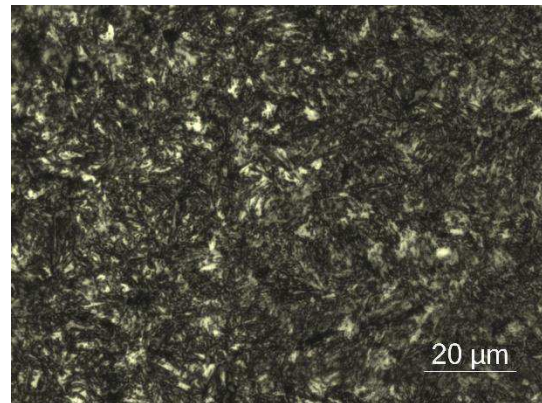
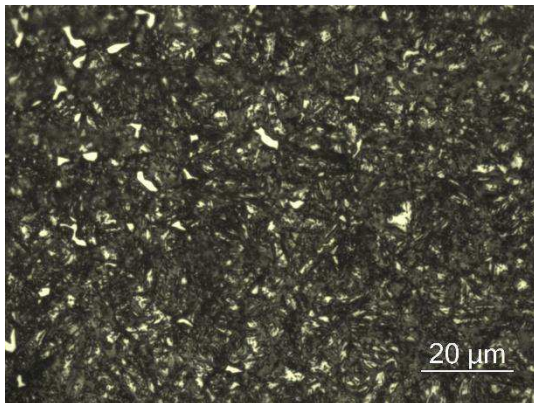
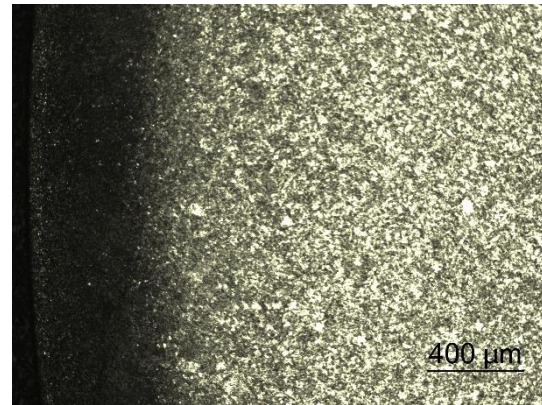
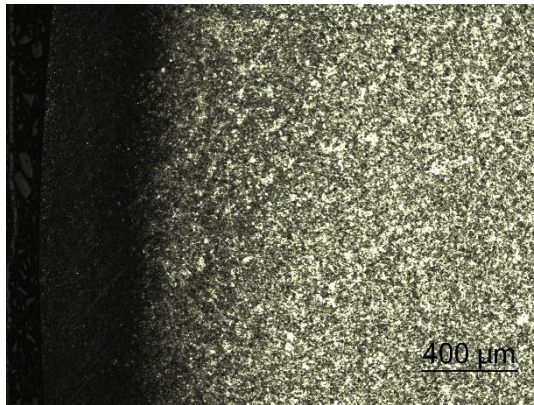




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Διερεύνηση μικροδομής και μηχανικών
ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από
βαφή σε λάδι και επαναφορά»*



**Σπουδαστής: Τσιρογιάννης Άγγελος
(Α.Μ. 37656)**

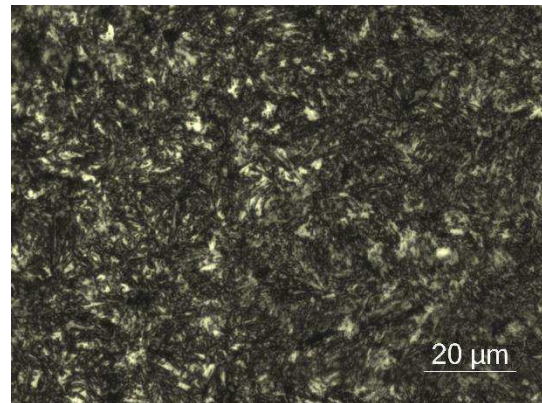
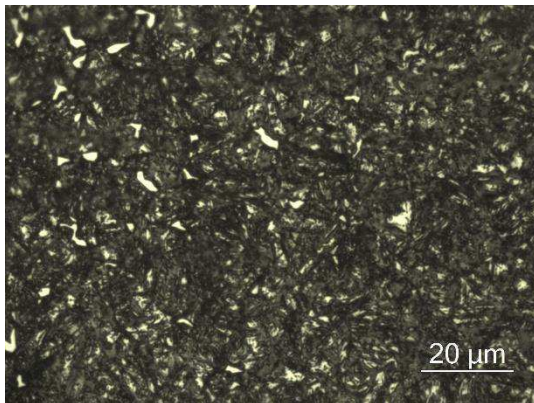
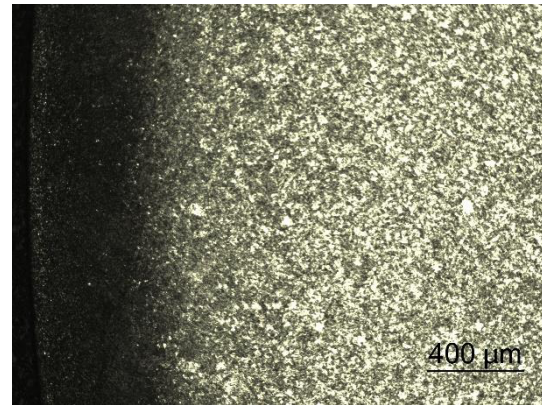
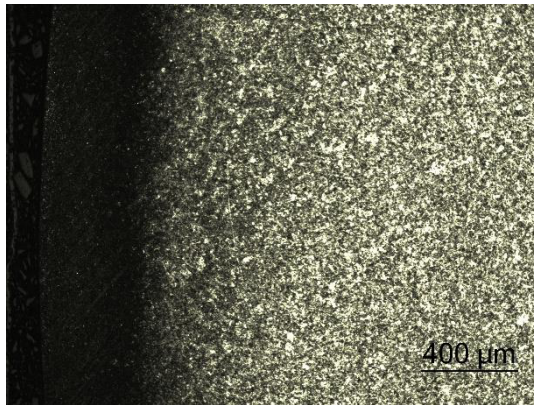
**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ
ΣΥΝΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Διερεύνηση μικροδομής και μηχανικών
ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από
βαφή σε λάδι και επαναφορά»*



**Σπουδαστής: Τσιρογιάννης Άγγελος
(Α.Μ. 37656)**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΜΕΝΤΡΕΑ ΚΑΡΜΕΝ
ΣΥΝΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά την μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από ενανθράκωση και συνεχή βαφή σε λάδι. Ο συγκεκριμένος χάλυβας είναι ελαφρά κραματωμένος, επιφανειακής βαφής και βρίσκει 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 συνεχή βαφή σε λάδι. Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις συμβουλές 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 (μικροσκληρομέτρηση, οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία). 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 αυτά.

Λέξεις κλειδί: χάλυβας 15CrNi6, ενανθράκωση, συνεχής βαφή, βάθος ενανθράκωσης, μικροδομή - δυσθραυστότητα.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ABSTRACT

The present work is referred to the microstructure and mechanical properties of 15CrNi6 steel after carburization and quenching in oil. DIN 15CrNi6 is a low alloyed, case hardening, constructional steel, suitable for machine elements (gears, 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, scanning electron microscopy and EDX) were conducted. Finally, a series of Charpy-V 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, martempering, carburization depth, microstructure – toughness.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε σύμφωνα με το άρθρο 16 του Κανονισμού σπουδών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (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 Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. 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 βαφή σε λάδι. Ο χάλυβας 15CrNi6 βρίσκει εφαρμογές σε στοιχεία μηχανών και σε κατασκευή εργαλείων που δουλεύουν εν ψυχρώ. Το υλικό υποβάλλεται σε επιφανειακή θερμική κατεργασία ενανθράκωσης και στη συνέχεια σε συνεχή βαφή σε λάδι. Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα.

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

Για τη διεκπεραίωση της μελέτης, πραγματοποιήθηκαν μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου (όπως σκληρομέτρηση) καθώς και καταστροφικές μέθοδοι (όπως μικροσκληρομέτρηση, οπτική μικροσκοπία, χημική ανάλυση. Επίσης 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 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 από επτά κεφάλαια. Το τέταρτο κεφάλαιο 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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

βάθος ενανθράκωσης. Στο έβδομο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση στις επιφάνειες θραύσης - θραυστογραφία επιλεγμένων δοκιμίων. Το όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μικροσκοπική εξέταση του υλικού. Το ένατο κεφάλαιο αξιολογεί τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων 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 πειραματική διαδικασία χρειάστηκε σημαντική βοήθεια από εταιρείες και ιδιώτες εκτός Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Χωρίς την βοήθεια αυτή 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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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 κο Ι.Φ. Σιδέρη, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό ΕΜΠ, Τεχνικό Διευθυντή της εταιρείας, και Ειδικό Συνεργάτη του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής 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.
- 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.
- Στο εργαστήριο Ελέγχου ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής , το οποίο προσέφερε τον εξοπλισμό του στις υπηρεσίες της πτυχιακής εργασίας και ιδιαίτερα Στην Κα Άννα Κατσάπη Μηχανολόγο Μηχανικό ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ και πανεπιστημιακό υπότροφο στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την αμέριστη βοήθειά της στη διεξαγωγή των δοκιμών.
- Στον Κ^ο Δ.Γ. Παπαγεωργίου Μηχανολόγο Μηχανικό ΕΜΠ υπεύθυνο ποιοτικού ελέγχου της εταιρίας Στασινόπουλος – Uddeholm Χάλυβες Α.Ε.Β.Ε., και επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την πολύτιμη και αμέριστη βοήθεια τόσο την διενέργεια των στατιστικών ελέγχων όσο και στην καθοδήγηση για την σωστή εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας.
- Στην Δρ. Κάρμεν Μέντρεα, Μεταλλειολόγο Μεταλλουργό Μηχανικό (Polytechnical Institute of Cluj-Napoca), και καθηγήτρια του μαθήματος Π.Ε.Τ.ΥΛ. του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής και εισηγήτρια της πτυχιακής εργασίας για την αμέριστη βοήθειά της και τις πολύτιμες συμβουλές.

Στην οικογένειά μου για την στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Α' ΜΕΡΟΣ «ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Χάλυβες

1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Ονοματολογία χαλύβων.....	2
1.2.1 Ονοματολογία χαλύβων κατά DIN EN 10 027-1.....	3
1.2.1.1 Ονοματολογία κατά τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του χάλυβα	3
1.2.1.2 Ονοματολογία κατά τη χημική σύσταση του χάλυβα.....	10
1.2.2 Ονοματολογία κατά DIN EN 10027-2.....	12
1.3 Κοινοί ή Ανθρακούχοι χάλυβες.....	12
1.4 Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων.....	14
1.5 Κραματωμένοι χάλυβες.....	16
1.5.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.....	16
1.5.2 Μέτρια και Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες	16
1.6 Χάλυβες επιφανειακής βαφής.....	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Μηχανικές Δοκιμές χαλύβων

2.1 Ιδιότητες χαλύβων.....	18
2.1.1 Φυσικές ιδιότητες των χαλύβων.....	18
2.1.2 Χημικές ιδιότητες των χαλύβων.....	18
2.1.3 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων.....	19
2.2 Μηχανικές δοκιμές.....	20
2.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού.....	21
2.2.2 Δοκιμή θλίψης.....	30
2.2.3 Δοκιμή κάμψης.....	30
2.2.4 Δοκιμή κρούσης.....	30

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

2.2.5 Δοκιμή κόπωσης.....	31
2.2.6 Δοκιμή σκληρότητας.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Θερμικές κατεργασίες χάλυβων

3.1 Τεχνικές επεξεργασίας χάλυβων- Ταξινόμηση κατεργασιών.....	36
3.1.1 Ταξινόμηση κατά DIN.....	36
3.1.2 Ταξινόμηση κατά την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμο.....	36
3.1.3 Ταξινόμηση κατά θερμοκρασία.....	36
3.2 Πλαστικές παραμορφώσεις.....	37
3.2.1 Πλαστικές παραμορφώσεις εν θερμώ.....	37
3.2.2 Πλαστικές παραμορφώσεις εν ψυχρώ.....	39
3.2.3 Κονιομεταλλουργία.....	40
3.3 Δευτεροβάθμιες τεχνικές επεξεργασίας.....	40
3.3.1 Μηχανουργική κατεργασία.....	40
3.3.2 Μη μηχανουργική κατεργασία.....	41
3.3.3 Τεχνικές ένωσης.....	41
3.4 Θερμικές κατεργασίες χάλυβων.....	41
3.4.1 Θερμικές κατεργασίες με διάχυση ατόμων.....	42
3.4.2 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης.....	43
3.4.3 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες.....	45
3.4.3.1 Μέσα ενανθράκωσης.....	46
3.4.3.2 Βάθος εμποτισμού.....	47

Β' ΜΕΡΟΣ «ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Πειραματική διαδικασία

4.1 Υλικό πειράματος.....	49
4.2 Σχεδιασμός πειράματος.....	49

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

4.3 Χημική Ανάλυση Υλικού.....	53
4.4 Διεξαγωγή πειράματος.....	55
4.5 Επιλογή δειγμάτων.....	56
4.5.1 Κοπή των ράβδων.....	56
4.5.2 Μηχανουργική κατεργασία.....	56
4.5.3 Τεμαχισμός και επιλογή δειγμάτων.....	57
4.5.4 Εγκιβωτισμός δειγμάτων.....	59
4.5.5 Προετοιμασία δοκιμίων για μεταλλογραφική ανάλυση.....	59
4.5.6 Προετοιμασία δοκιμίων για τον έλεγχο δυσθραυστότητας.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

Μετρήσεις σκληρότητας	61
------------------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

Μετρήσεις μικροσκληρότητας.....	68
--	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°

Θραυστογραφία.....	87
---------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8°

Μικροσκοπική ανάλυση δομής.....	90
--	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9°

Δοκιμή κρούσης.....	98
----------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10°

Σχόλια και συμπεράσματα.....	101
-------------------------------------	------------

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	104
---------------------------------	------------

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

A' ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΧΑΛΥΒΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Χάλυβες ορίζονται τα κάρματα Fe-C στα οποία η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι θεωρητικά μικρότερη ή ίση του 2% κατά βάρος [1,2]. Πρακτικά, οι χάλυβες περιέχουν σε μικρή ποσότητα και άλλα στοιχεία τα οποία αλλάζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό τις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι χάλυβες αποτελούν μια τεράστια ομάδα υλικών και αντιμετωπίζονται κατά περήπτωση με κάποιο κριτήριο ταξινόμησης. Γενικά ταξινομούνται ως πρως:

- Την χημική σύσταση, όπου διακρίνονται σε:
 - Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες: περιέχουν σίδηρο, άνθρακα, μικρές ποσότητες μαγγανίου και πυριτίου ως προσθήκες ($\leq 1\%$ κ.β.) και ελάχιστες ποσότητες φωσφόρου και θείου ως ακαθαρσίες ($\leq 0,035\%$ κ.β.).
 - Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες: εκτός από την βασική σύσταση περιέχουν και άλλα χημικά στοιχεία. Τα συνηθέστερα στοιχεία προσθήκης είναι Ni, Mn, Cr, Si και Mo, ως κύριες προσθήκες και V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb, ως δευτερεύουσες προσθήκες. Σε σχέση με το βαθμό κραματοποίησης διακρίνονται σε: ελαφρά κραματωμένους (το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%), μετρίως κραματωμένους (το ποσοστό στοιχείων προσθήκης από 2% έως 10%) και ισχυρά κραματωμένους (το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%).
- Τον προορισμό τους: οι χάλυβες διακρίνονται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χάλυβες χύτευσης (Χυτοχάλυβες).
- Τις χρήσεις τους, όπου οι χάλυβες διακρίνονται σε:
 - Χάλυβες κατασκευών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές κατασκευές καθώς και στις κατασκευές στοιχείων μηχανών (στροφαλοφόρων αξόνων, διωστήρων, βαλβίδων, κλπ.).
 - Εργαλειοχάλυβες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εργαλείων κάθε τύπου.
 - Αανοξειδωτους χάλυβες χάλυβες οι οποίοι έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση.
 - Πυρίμαχους χάλυβες οι οποίοι έχουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
 - Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών
- Ως προς τις θερμικές κατεργασίες οι χάλυβες διακρίνονται οι χάλυβες που προορίζονται για τελική θερμική κατεργασία:
 - Χάλυβες για επιβελτίωση (οι μοποίοι υφίστανται βαφή και επαναφορά).
 - Χάλυβες για γύραυση.
 - Χάλυβες για επιφανειακές θερμικές κατεργασίες (επιφανειακής βαφής, ενανθράκωσης, εναζότωσης, κλπ.).

1.2 Ονοματολογία χαλύβων

Σήμερα παράγονται πάνω από 2500 διαφορετικά είδη χαλύβων. Κατά σηνέπεια είναι αναγκαία η κωδικοποίηση αυτών για άμεση και σαφή συνεννόηση των ατόμων που εμπλέκονται με τα υλικά αυτά. Η κωδικοποίηση πρέπει να αποδίδει με ακρίβεια σε ελάχιστο αριθμό χαρακτήρων πληροφορίες Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

για τον τρόπο παρασκευής, τη χημική του σύσταση, τη χρήση και τις δυνατότητες του χάλυβα όσον αφορά την μηχανουργική κατεργασία και την θερμική επεξεργασία του.

Πολλές χώρες έχουν συστήματα τυποποίησης των χαλύβων, τα οποία προσπαθούν να συστηματοποιήσουν και να κατηγοριοποιήσουν σε κωδικούς τις βασικές πληροφορίες σχετικά με κάθε υλικό. Στην ελληνική όπως και στην ευρωπαϊκή αγορά έχουν υπερισχύσει τα γερμανικά συστήματα κατά DIN EN 10027-1 και DIN EN 10 027-2.

1.2.1 Ονοματολογία κατά DIN EN 10 027-1

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σύστημα τυποποίησης αρχικά γίνεται διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες (Πίνακας 1.1) [3]. Οι συντομογραφίες της πρώτης κατηγορίας σχηματίζονται με γνώμονα τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του χάλυβα και αφορά χάλυβες που δεν προορίζονται για θερμική επεξεργασία. Στη δεύτερη κατηγορία σχηματίζονται με γνώμονα την χημική τους σύνθεση και αφορά χάλυβες που επιδέχονται τελική θερμική επεξεργασία. Οι κατηγορίες αυτές χωρίζονται σε επιμέρους ομάδες όπου σε καθεμία από αυτές προσδίδεται κάποιο χαρακτηριστικό σύμβολο η διακριτικό.

1.2.1.1 Ονοματολογία κατά τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του χάλυβα

Σε αυτή την περίπτωση το διακριτικό σύμβολο της εκάστοτε ομάδας ακολουθείται από έναν αριθμό ο οποίος αναφέρεται σε κάποιο μηχανικό ή φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με τις ιδιότητες του χάλυβα. Πολλές φορές ακολουθούν επιπλέον διακριτικά που δίνουν πληροφορίες για τον τρόπο παρασκευής η για κάποιες ιδιαίτερες μηχανικές ιδιότητες του κράματος. Στην περίπτωση του χυτοχάλυβα προστίθεται στην αρχή της ονομασίας το διακριτικό G (ή GS). Κάποιες φορές προσθέθονται επιπλέον διακριτικά τα οποία αναφέρονται σε ιδιαίτερες ιδιότητες του κράματος, σε συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες, η σε τυχών προστατευτικές επικαλύψεις που έχει υποστεί το κράμα κατά την παρασκευή του (Πίνακας 1.2).

S: Χάλυβες κατασκευών για για μηχανολογικές ή δομικές εφαρμογές.

S xxx XX +X

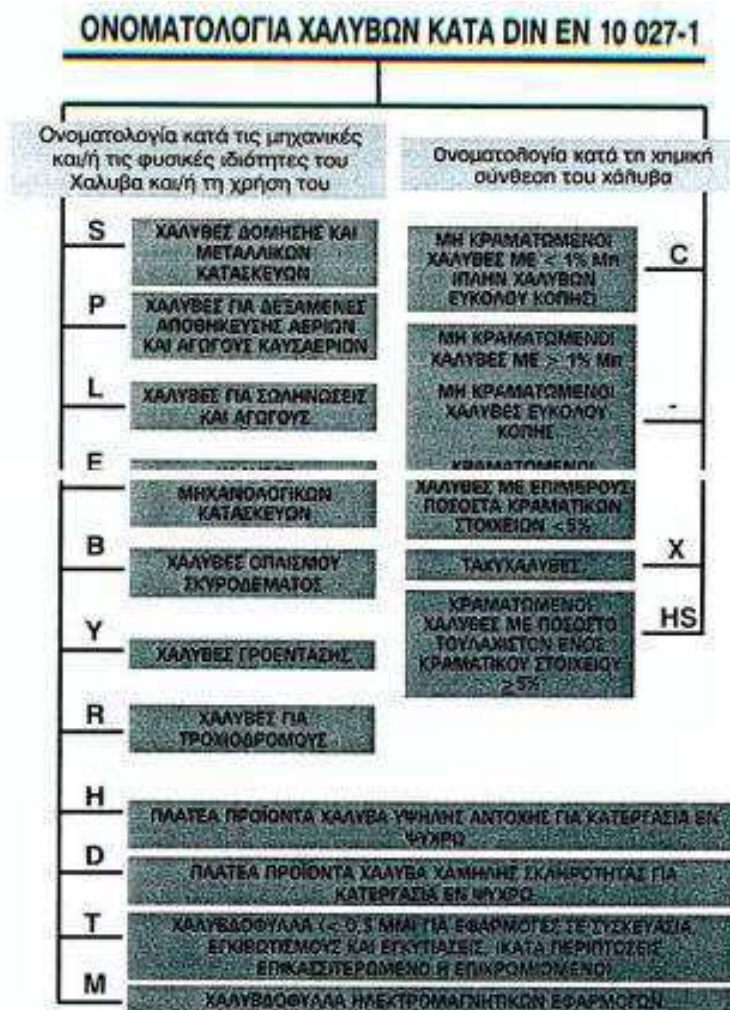
xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε MPa

XX: J,K,L= δυσθραυστότητα 27,40J και 60J αντίστοιχα ακολουθούμενο από R,0,2,3,4,5 ή 6= θερμοκρασία ελέγχου της δυσθραυστότητας 20,0,-20,-30,-40,-50 και -60 °C.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Πίνακας 1.1: Διαχωρισμός χαλύβων σε κατηγορίες και ομάδες σύμφωνα με την ονοματολογία κραμάτων όπως αυτή ορίζεται από το γερμανικό σύστημα τυποποίησης DIN EN 10 027-1 [3].



- A**= Σκληρυμένος μέσω κατακρήμνισης
- C**= Με ιδιαίτερη κατεργασιμότητα εν ψυχρώ
- D**= Για επικάλυψη μέσω εν θερμώ εμβάπτισης
- E**= Για συμβατικές επικαλύψεις εμαγιέ
- F**= Για σφυρηλασία
- H**= Για διάτρητα προφίλ
- L**= Για εφαρμογή σε χαμηλές θερμοκρασίες
- M**= Θερμομηχανικά ελατός
- N**= Ομαλοποιημένος
- Q**= Επιβελτιωμένος
- S**= Ναυπηγικός
- T**= Για αγωγούς και σωληνώσεις\
- W**= Με ιδιαίτερη αντοχή στις καιρικές συνθήκες
- +X**: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Παράδειγμα: S 355 MC (χάλυβας δόμησης μεταλλικών κατασκευών με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 355$ MPa θερμομηχανικά ελατός και με ιδιαίτερης κατεργασιμότητα εν ψυχρώ).

P: Χάλυβες για δεξαμενές αποθήκευσης αερίων και αγωγούς καυσαερίων

Pxxx XX +X

xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε MPa

XX: **B**= Για φιάλες αερίου

M= Θερμομηχανικά ελατός

N= ομαλοποιημένος

S= Κοινές δεξαμενές

Q=Επιβελτιωμένος

T= Για αγωγούς και σωληνώσεις

H=Για εφαρμογή σε υψηλές θερμοκρασίες

L= Για εφαρμογή σε χαμηλές θερμοκρασίες

R= Για εφαρμογή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος

X=Για εφαρμογή τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες

G= Άλλη ιδιότητα

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: P 265 NB (Χάλυβας για δεξαμενές αποθήκευσης αερίων με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 265$ MPa, ομαλοποιημένος και κατάλληλος για κατασκευή φιαλών αερίου).

L: Χάλυβες για σωληνώσεις και αγωγούς

Lxxx XX +X

xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε MPa

XX: **M**= Θερμικά ελατός

N= Ομαλοποιημένος

Q= Επιβελτιωμένος

G= Άλλη ιδιότητα

A,B,C,...=Κατηγορία προδιαγραφών

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: L 360 QC (Χάλυβας για σωληνώσεις και αγωγούς με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 360$ MPa , επιβελτιωμένος και κατηγορίας προδιαγραφών C).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Πίνακας 1.2: Πρόσθετα διακριτικά ονοματολογίας σύμφωνα με το γερμανικό κανόνα τυποποίησης DIN EN 10 027-1[3]

Πρόσθετα διακριτικά ιδιότροπων προδιαγραφών για τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα	
+CH	εμβάπτιση του πυρήνα
+Z15	ελάχιστη συρρίκνωση (υπολογισμένη κάθετη στην επιφάνεια) διατομής θραύσης 15%
+Z25	ελάχιστη συρρίκνωση (υπολογισμένη κάθετη στην επιφάνεια) διατομής θραύσης 25%
+Z35	ελάχιστη συρρίκνωση (υπολογισμένη κάθετη στην επιφάνεια) διατομής θραύσης 35%
Πρόσθετα διακριτικά ιδιότροπων προδιαγραφών για επικαλύψεις του χάλυβα	
(Προς αποκλειγ. παρανόησης προστίθεται εντός το σύμβολο S μετά το θετικό πρόσημο, π.χ. +SA αντί για +A)	
+A	επαργίλωση μέσω εν θερμώ εμβάπτισης
+AR	συνέλιξη με φύλλο αλουμινίου
+AS	επικόλυση με κράμα Al-Si
+AZ	επικόλυση με κράμα Al-Zn (>50% Al)
+CE	ηλεκτρολυτική επεξεργασία
+CU	επιχάλκωση
+IC	επικόλυση ανόργανων χημικών ενώσεων
+OC	επικόλυση οργανικών χημικών ενώσεων
+S	επισσώστρωση μέσω εν θερμώ εμβάπτισης (γόνιμα)
+SE	ηλεκτρολυτική επισσώστρωση
+T	εμβάπτιση εν θερμώ σε τήγμα κράματος Pb-Sn
+TE	ηλεκτρολυτική επικόλυση με κράμα Pb-Sn
+Z	επιμεταστροφή μέσω εν θερμώ εμβάπτισης (γαλβανισμός)
+ZA	επικόλυση με κράμα Zn-Al (>50% Zn)
+ZE	ηλεκτρολυτική επιμεταστροφή
+ZF	επικόλυση με διάχυση κράματος Zn-Fe (galvannealed)
+ZN	ηλεκτρολυτική επικόλυση με κράμα Zn-Ni
Πρόσθετα διακριτικά ιδιότροπων προδιαγραφών για θερμοικές επεξ/σεις κατά την παραγωγή του χάλυβα	
(Προς αποκλειγ. παρανόησης προστίθεται εντός το σύμβολο T μετά το θετικό πρόσημο, π.χ. +TA αντί για +A)	
+A	ανάπτυξη κατεργασίας
+AC	ανάπτυξη σφαιροποίησης καρβιδίων
+AR	κατόπιν έλασης, χωρίς θερμική επεξεργασία
+A1	αντίστροφη σιαιματοποίησης
+C	σκληρυνση με ενδοτράχυνση (από κατεργασία εν ψυχρώ)
+C xxx	σκληρυνση με ενδοτράχυνση σε προδιαγεγραμμένο ελάχιστο όριο αντοχής σε MPa
+CP xxx	σκληρυνση με ενδοτράχυνση σε προδιαγεγραμμένο ελάχιστο όριο διαρροής σε MPa
+CR	ψυχρή έλαση
+DC	επεξεργασία γνωστή μόνο από τον παραγωγό
+FP	φερριτοπεριλική δομή με προδιαγεγραμμένη σκληρότητα
+HC	κατεργασία εν θερμώ και εν ψυχρώ
+I	ισοθερμική επεξεργασία
+LC	μικρού βαθμού εν ψυχρώ ελακή ή έλαση πριν την παράδοση (skin passed)
+M	θερμομηχανική κατεργασία
+N	ανάπτυξη σφαιλοποίησης
+NT	σφαιλοποίηση και επαναφορά
+P	σκληρυνση με κατακρημνίσματα (γήρανση)
+Q	βαφή
+QA	βαφή με ψύξη σε βεβρασμένο αέρα
+QO	βαφή με ψύξη σε λάδι
+QT	επιβελτίωση (βαφή και επαναφορά)
+QW	βαφή με ψύξη σε νερό
+RA	ανάπτυξη ανακρυστάλλωσης
+S	θερμική επεξεργασία για αντοχή σε διάτμηση εν ψυχρώ
+SR	αποδοτική ανάπτυξη
+T	επαναφορά
+TH	θερμική επεξεργασία σε τελική προδιαγεγραμμένη σκληρότητα
+U	χωρίς συγκεκριμένη επεξεργασία
+WW	σκληρυνση με ενδοτράχυνση (από κατεργασία εν θερμώ)

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

E: Χάλυβες μηχανολογικών κατασκευών

E_{xxx} XX +X

xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε MPa

XX: J,K,L= δυσθραυστότητα 27,40 και 60 Joule αντίστοιχα ακολουθούμενο από R,0,2,3,4,5 ή 6= θερμοκρασία ελέγχου της δυσθραυστότητας 20,0,-20,-30,-40,-50 και -60 °C

C= Για ψυχρή ολκή

G= Άλλη ιδιότητα

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: E 355 K2 (Χάλυβας μηχανολογικών κατασκευών με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 355$ MPa ,με δυσθραυστότητα 40J στους -20 °C).

B: χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος

B_{xxx} X +X

xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε MPa

XX: A,B,C,...=Κατηγορία ολκιμότητας

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: B 500 A (Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 500$ MPa και κατηγορία ολκιμότητας A).

Y: Χάλυβες προέντασης

Y_{xxxx} X +X

xxxx: Αριθμός που δηλώνει το ονομαστικό όριο αντοχής του υλικού σε MPa

X: C= Σύρμα από ψυχρή ολκή

H= Ράβδοι κατεργασμένες εν ψυχρώ

Q= Επιβελτιωμένος

G= Άλλη ιδιότητα

S= Για εφαρμογή συνδέσμων σε πολύκλωνους αγωγούς

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: Y1770C (Χάλυβας προέντασης με ονομαστικό όριο αντοχής $R_m \geq 1770$ MPa και μορφοποιημένος με συρματοποίηση ψυχρής ολκής)

R: Χάλυβες για τροchioδρόμους

R_{xxxx} XX +X

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

xxxx: Αριθμός που δηλώνει την ελάχιστη σκληρότητα του υλικού HBW.

X: Cr= προσθήκη χρωμίου

Mn=Προσθήκη μαγγανίου

aa= Χημικό σύμβολο πρόσθετου συγκεκριμένου κραματικού στοιχείου ακολουθούμενο από το δεκαπλάσιο της μέσης επιτρεπτής τιμής του ποσοστού του στοιχείου αυτού στο κράμα

Q= Επιβελτιωμένος

G= Άλλη ιδιότητα

HT= Θερμικά επεξεργασμένος

LHT= Χαμηλής κραμάτωσης και θερμικά επεξεργασμένος

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: R0290MnHT (Χάλυβας για τροchioδρόμους με ονομαστικό ελάχιστη σκληρότητα 290 HBw με προσθήκη μαγγανίου στη χημική του σύνθεση και θερμικά επεξεργασμένος).

H: Πλατέα προϊόντα χάλυβα υψηλής αντοχής για κατεργασία εν ψυχρώ

H(T)xxx XX +X

xxx: Αριθμός που δηλώνει το ελάχιστο όριο διαρροής ή το ονομαστικό όριο αντοχής του υλικού σε MPa. Στη δεύτερη περίπτωση προστίθεται πρίν τον αριθμό το επιπλέον T(=tensile).

XX: B= Brake hardening

I=Ισότροπος

LA= χαμηλής κραμάτωσης\

M= Θερμομηχανικά κ εν ψυχρώ ελατός

P= Προσθήκη φωσφόρου

T= Χάλυβας TRIP

X= Διφασικός χάλυβας

Y= Χάλυβας IF

G= Άλλη ιδιότητα

D= Για επικάλυψη μέσω εν θερμώ εμβάπτισης

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: H220BD (Πλατύ προϊόν χάλυβα υψηλής αντοχής για κατεργασία εν ψυχρώ με ελάχιστο όριο διαρροής $R_e \geq 220$ MPa κατάλληλο για επικάλυψη μέσω εν θερμώ εμβάπτισης μορφοποιημένος με συρματοποίηση ψυχρής ολκής).

D: Πλατέα προϊόντα χάλυβα χαμηλής σκληρότητας στα οποία θα ακολουθήσει κατεργασία εν ψυχρώ

D Xxx X +X

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Xxx: Cxx: προϊόν ψυχρής έλασης

Dxx: προϊόν θερμής έλασης

Xxx: προϊόν μη προδιαγεγραμμένου τύπου έλασης

X: **D**= Για επικάλυψη μέσω εν θερμώ εμβάπτισης

ED= Για επικάλυψη εμαγιέ χωρίς δεύτερο υπόστρωμα

EK= Για συμβατικές επικαλύψεις εμαγιέ

H= Για διάτρητα και προφίλ

T= Για σωληνώσεις και αγωγούς

G= Άλλη ιδιότητα

aa= Χημικό σύμβολο πρόσθετου συγκεκριμένου κραματικού στοιχείου ακολουθούμενο από το δεκαπλάσιο της μέσης επιτρεπτής τιμής του ποσοστού του στοιχείου αυτού στο κράμα

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: D C04 EK (Πλατύ προϊόν χάλυβα από ψυχρή έλαση χαμηλής σκληρότητας, κατάλληλο για συμβατικές επικαλύψεις εμαγιέ στο οποίο θα ακολουθήσει περεταίρω κατεργασία εν ψυχρώ).

T: Χαλυβδόφυλλα ($0,15 < d < 0,5 \text{mm}$) για εφαρμογές σε συσκευασία, εγκιβωτισμούς και εγκυτιώσεις (κατά περίπτωση επικασσιτερωμένα ή επιχρωμιωμένα).

T Xxxx +X

Xxxx: Cxxx: προϊόν από αδιάκοπη ανόπτηση

Dxxx: προϊόν από διακοπτόμενη ανόπτηση

Ο συνοδευτικός αριθμός δηλώνει την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής του υλικού σε MPa.

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: TS550 (Κατά περίπτωση επικασσιτερωμένο ή επιχρωμιωμένο χαλυβδόφυλλο ($< 0,5 \text{mm}$). Προϊόν διακοπτόμενης ανόπτησης για εφαρμογές σε συσκευασία και εγκυτιώσεις τροφίμων με ονομαστικό όριο διαρροής $R_e = 550 \text{MPa}$.

M: Χαλυβδόφυλλα ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών

M xxxx - xx X

xxxx: Συνοδευτικός αριθμός που δηλώνει το εκατονταπλάσιο της μέγιστης επιτρεπτής απώλειας μαγνητισμού για το δεδομένο πάχος του χαλυβδόφυλλου σε συχνότητα 50Hz και ένταση μαγνητικού πεδίου 1,5 Tesla για τους τύπους A,D,E και N, και 1,7 Tesla για τους τύπους S και P.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

xx: Συνοδευτικός αριθμός που δηλώνει το εκατονταπλάσιο της ονομαστικής τιμής του πάχους του χαλυβδόφυλλου σε mm.

X: A = Μη προσανατολισμένοι κόκκοι

D = Μη κραματωμένος χάλυβας

E = Κραματωμένος χάλυβας

N = Προσανατολισμένος κόκκος με φυσιολογικές απώλειες μαγνητισμού

P = Προσανατολισμένος κόκκος με περιορισμένες απώλειες μαγνητισμού

S = Προσανατολισμένος κόκκος με ελάχιστες απώλειες μαγνητισμού

Παράδειγμα: M660-50D (Μη κραματωμένο χαλυβδόφυλλο ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών μέγιστης απώλειας μαγνητισμού 6,6 W/Kg σε συχνότητα 50Hz και ένταση μαγνητικού πεδίου 1,5 Tesla, πάχους 50mm).

1.2.1.2 Ονοματολογία κατά τη χημική σύσταση του χάλυβα

Σε αυτή την περίπτωση οι χάλυβες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: μη κραματωμένοι χάλυβες με περιεκτικότητα σε μαγγάνιο, Mn<1%, μη κραματωμένοι χάλυβες με περιεκτικότητα σε μαγγάνιο, Mn>1%, υψηλά κραματωμένοι χάλυβες και ταχυχάλυβες. Σύμφωνα με τον γερμανικό σύστημα τυποποίησης DIN EN 10 020, ορίζεται ένα μέγιστο ποσοστό για κάθε πυθανό χημικό στοιχείο που πυθανώς να περιέχει ο χάλυβας (Πίνακας 1.3). Στην περίπτωση όπου κανένα στοιχείο του χάλυβα δεν ξεπερνάει το ποσοστό αυτό, τότε ο χάλυβας κατατάσσεται στους μη κραματωμένους.

Πίνακας 1.3: Οριακά ποσοστά κραματικών στοιχείων προς διαχωρισμό σε κραματωμένους και μη κραματωμένους χάλυβες, όπως αυτό ορίζεται από το DIN EN 10 020 [3]

Χημικά στοιχεία και ποσοστό % κ.β.			
Al	0,30	Pb	0,40
B	0,0008	Se	0,10
Bi	0,10	Si	0,60
Co	0,30	Te	0,10
Cr	0,30	Ti	0,05
Cu	0,40	V	0,10
Mn	1,65	W	0,30
Mo	0,08	Zr	0,05
Nb	0,06	Λοιπά (πλην C, P, S και N)	0,10
Ni	0,30		

C: Μη κραματωμένοι χάλυβες με <1%Mn (πλην χαλύβων ευκόλου κοπής)

Cxx XX +X

xx: Αριθμός που δηλώνει το εκατονταπλάσιο της μέσης τιμής του ποσοστού του κράματος σε άνθρακα.

XX:C = Για επεξεργασία εν ψυχρώ

D = Για ψυχρή ολκή

E = Προδιαγεγραμμένο μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό Θείου στο κράμα

R = προδιαγεγραμμένο εύρος ποσοστού Θείου στο κράμα

S = Για ελατήρια

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σελίδα 10

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

U = Για εργαλεία

W = Για σύρμα συγκολλησης

G = Άλλη ιδιότητα

aa = Χημικό σύμβολο πρόσθετου συγκεκριμένου κραματικού στοιχείου ακολουθούμενο από το δεκαπλάσιο της μέσης επιτρεπτής τιμής του ποσοστού του στοιχείου αυτού στο κράμα

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: C35R (Μη κραματωμένος χάλυβας με 0,35%C και προδιαγεγραμμένο εύρος ποσοστού Θείου στη χημική του σύνθεση).

Χωρίς διακριτικό: Μη κραματωμένοι χάλυβες με >1% Mn, μη κραματωμένοι χάλυβες ευκόλου κοπής, κραματωμένοι χάλυβες με επιμέρους ποσοστά κραματικών στοιχείων <5%.

xx XXx-x +X

xx: Αριθμός που δηλώνει το εκατονταπλάσιο της μέσης τιμής του ποσοστού του κράματος σε άνθρακα.

XXx-x:

aa = Χημικό σύμβολο πρόσθετων κραματικών στοιχείων (ταξινομημένα κατά φθίνον ποσοστό ή αλφαβητικά στην περίπτωση ίδιου ποσοστού των δυο στοιχείων) και ακολουθούμενα από αριθμούς (χωρισμένους με παύλα) που δηλώνουν τα ποσοστά των στοιχείων αυτών στο κράμα πολλαπλασιασμένα με τους παρακάτω συντελεστές.

- **Cr, Co, Mn, Ni, Si, V** : 4
- **Al, Se, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Z** : 10
- **Ca, N, P, S** : 100
- **B** : 1000

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: 11SMnPb30 (Κραματωμένος χάλυβας με 0,11%C, 0,30%S και μη προδιαγεγραμμένα ποσοστά Mn, Pb)

X: Κραματωμένοι χάλυβες με ποσοστό τουλάχιστον ενός κραματικού στοιχείου >5% (υψηλά κραματωμένοι χάλυβες)

Xxx XXx-x +X

xx: Αριθμός που δηλώνει το εκατονταπλάσιο της μέσης τιμής του ποσοστού του κράματος σε άνθρακα.

XXx-x:

aa = Χημικό σύμβολο πρόσθετων κραματικών στοιχείων (ταξινομημένα κατά φθίνον ποσοστό ή αλφαβητικά στην περίπτωση ίδιου ποσοστού των δυο στοιχείων) και ακολουθούμενα από αριθμούς (χωρισμένους με παύλα) που δηλώνουν τα ποσοστά των στοιχείων αυτών στο κράμα στρογγυλοποιημένα σε ακέραιους αριθμούς.

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σελίδα 11

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Παράδειγμα: X5 CrNi18-10 (Κραματωμένος χάλυβας με 0,50%C, 18%Cr και 10%Ni)

HS: Ταχυχάλυβες

HS x-x-x-x X +X

x-x-x-x: Αριθμοί διαχωρισμένοι με παύλες που δηλώνουν τα ποσοστά των παρακάτω στοιχείων με την ακόλουθη σειρά.

W – Mo – V – Co

X: Χημικά σύμβολα κραματικών στοιχείων με υψηλότερο ποσοστό (σε περίπτωση ίδιων ποσοστών στα βασικά κραματικά στοιχεία της προηγούμενης ομάδας)

+X: όπως αναφέρεται στον πίνακα 1.2.

Παράδειγμα: HS6-5-2C (Ταχυχάλυβας με 6%W, 5%Mo, 2% V)

1.2.2 Ονοματολογία κατά DIN EN 10027-2

Εκτός από την παραπάνω μέθοδο ονοματολογίας υπάρχει και μια, αποκλειστικά αριθμητική, η Werkstoffnummer[4]. Σε αυτή τη μεθοδολογία όλες οι ποιότητες χάλυβα που αναφέρθηκαν παραπάνω βρίσκουν αντιστοιχία σε κάποιο αριθμό, το Werk.-Nr. Το Werk.-Nr αποτελείται από ένα πενταψήφιο νούμερο. Η λογική για τον σχηματισμό του ονόματος είναι η εξής:

X. XX XX(XX)

X. : Αριθμός κατηγορίας κράματος **0.= Χυτοσίδηρος**

1.= Χάλυβας

2.= Χαλκός

3.= Αλουμίνιο

XX : Αριθμός κατηγορίας ποιότητας χάλυβα (Πίνακας 1.4).

XX(XX): Αύξον αριθμός της συγκεκριμένης κατηγορίας

Ο διαχωρισμός σε ποιότητες έχει γίνει σύμφωνα με το DIN EN 10020. Αρχικά γίνεται διαχωρισμός σε μη κραματωμένους χάλυβες και ύστερα σε κραματωμένους, σύμφωνα με τον πίνακα 1.3. Οι μη κραματωμένοι χωρίζονται σε βασικούς, ποιοτικούς και ευγενείς (εξαιρετικής ποιότητας). Οι κραματωμένοι σε ποιοτικούς και ευγενείς.

Παράδειγμα: 1.5919 (κραματωμένος χάλυβας, κραματική ομάδα Cr-Ni με ποσοστό χρωμίου $1,5\% \leq Cr \leq 2,0\%$).

1.3 Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες καλούνται τα κράματα Fe-C, τα οποία, έχουν τις συνήθεις προσμίξεις (Mn και Si), τις ακαθαρσίες (έως 0,04% P και 0,05% S) και δεν περιέχουν άλλα στοιχεία κραμάτωσης.

Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα διακρίνονται σε:

- **Υποευτηκτοιδείς**, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο από 0,80% κ.β. Όσοι περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό από 0,10% έως 0,25% κ.β., ονομάζονται

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

μαλακοί χάλυβες, από 0,20% έως 0,50% χάλυβες μετρίου άνθρακα και για ποσοστά μεγαλύτερα από 0,50%, ονομάζονται χάλυβες υψηλού άνθρακα.

Πίνακας 1.4: Ονοματολογία χαλύβων σύμφωνα με το γερμανικό κανόνα τυποποίησης DIN EN 10027-2 [4].

Μη κραματωμένοι χάλυβες – Βασικοί χάλυβες		Ανοξείδωτοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου <2,5%Ni, με κραματική προσθήκη Mo και άνευ κραματικής προσθήκης Nb και Ti	
1.00xx	Βασικοί κοινοί χάλυβες	1.42xx	-
1.90xx	Βασικοί κοινοί χάλυβες	1.43xx	Ανοξείδωτοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου ≥2,5%Ni, άνευ κραματικής προσθήκης Mo, Nb και Ti
Μη κραματωμένοι χάλυβες – Ποιοτικοί χάλυβες		Ανοξείδωτοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου ≥2,5%Ni, με κραματική προσθήκη Mo και άνευ κραματικής προσθήκης Nb και Ti	
1.01xx	Χάλυβες γενικών κατασκευών με όριο αντοχής $R_m < 500MPa$	1.44xx	Ανοξείδωτοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου <2,5%Ni, με κραματική προσθήκη Mo και άνευ κραματικής προσθήκης Nb και Ti
1.91xx	Χάλυβες γενικών κατασκευών με όριο αντοχής $R_m < 500MPa$ για τους οποίους δεν προβλέπεται θερμική επεξεργασία	1.45xx	Ανοξείδωτοι χάλυβες με ιδιαίτερες κραματικές προσθήκες
1.02xx	Χάλυβες κατασκευών με όριο αντοχής $R_m < 500MPa$ για τους οποίους δεν προβλέπεται θερμική επεξεργασία	1.46xx	Ανοξείδωτοι οξυμχοί χάλυβες και χάλυβες με βασική κραματική προσθήκη Ni ιδιαίτερης μηχανικής αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες
1.92xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα <0,12%C ή όριο αντοχής $R_m < 400MPa$	1.47xx	Ανοξείδωτοι πυρίμαχοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου <2,5%Ni
1.03xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα <0,12%C ή όριο αντοχής $R_m < 400MPa$	1.48xx	Ανοξείδωτοι πυρίμαχοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου ≥2,5%Ni
1.93xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα 0,12%≤C<0,25% ή όριο αντοχής $400MPa \leq R_m < 500MPa$	1.49xx	Κράματα με ιδιαίτερη μηχανική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες
1.04xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα 0,25%≤C<0,55% ή όριο αντοχής $500MPa \leq R_m < 700MPa$	Κραματωμένοι χάλυβες – Ευγενείς χάλυβες – Χάλυβες διάφορων μηχανολογικών κατασκευών	
1.94xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα >0,55%C ή όριο αντοχής $R_m > 700MPa$	1.50xx	Κραματική προσθήκη Mn και/ή Si και/ή Cu
1.05xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα <0,50% ή όριο αντοχής $500MPa \leq R_m < 700MPa$	1.51xx	Κραματικές ομάδες Mn-Si, Mn-Cr
1.95xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα <0,50% ή όριο αντοχής $500MPa \leq R_m < 700MPa$	1.52xx	Κραματικές ομάδες Mn-Cu, Mn-V, Si-V και Mn-Si-V
1.06xx	Χάλυβες με μέσο ποσοστό άνθρακα >0,55%C ή όριο αντοχής $R_m > 700MPa$	1.53xx	Κραματικές ομάδες Mn-Ti και Si-Ti
1.96xx	Χάλυβες με υψηλότερο ποσοστό S ή P	1.54xx	Κραματική προσθήκη Mo και/ή Nb, Ti, V και/ή W
1.07xx	Χάλυβες με υψηλότερο ποσοστό S ή P	1.55xx	Κραματική προσθήκη B και κραματική ομάδα Mn-B με ποσοστό μαγγανίου <1,65%Mn
1.97xx	Χάλυβες με υψηλότερο ποσοστό S ή P	1.56xx	Κραματική προσθήκη Ni
Μη κραματωμένοι χάλυβες – Ευγενείς χάλυβες		1.57xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni με ποσοστό χρωμίου <1,00%Cr
1.10xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες	1.58xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni με ποσοστό χρωμίου 1,00%≤Cr<1,50%
1.11xx	Χάλυβες γενικών κατασκευών, μηχανολογικών κατασκευών και χάλυβες για δεξαμενές αποθήκευσης υγρών και αερίων με ποσοστό άνθρακα <0,50%C	1.59xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni με ποσοστό χρωμίου 1,50%≤Cr<2,00%
1.12xx	Χάλυβες μηχανολογικών κατασκευών με ποσοστό άνθρακα ≥0,50%C	1.60xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni με ποσοστό χρωμίου 2,00%≤Cr<3,00%
1.13xx	Χάλυβες γενικών κατασκευών, μηχανολογικών κατασκευών και χάλυβες για δεξαμενές αποθήκευσης υγρών και αερίων ιδιαίτερων προδιαγραφών	1.61xx	-
1.14xx	-	1.62xx	Κραματικές ομάδες Ni-Si, Ni-Mn και Ni-Cu
1.15xx	Εργαλειοχάλυβες	1.63xx	Κραματικές ομάδες Ni-Mo, Ni-Mo-Mn, Ni-Mo-Cu, Ni-Mo-V και Ni-Mn-V
1.16xx	Εργαλειοχάλυβες	1.64xx	-
1.17xx	Εργαλειοχάλυβες	1.65xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni-Mo με ποσοστό μολυβδανίου <0,40%Mo και ποσοστό νικελίου <2,00%Ni
1.18xx	Εργαλειοχάλυβες	1.66xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni-Mo με ποσοστό μολυβδανίου <0,40%Mo και ποσοστό νικελίου 2,00%≤Ni<3,50%
1.19xx	-	1.67xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni-Mo με ποσοστό μολυβδανίου <0,40%Mo και ποσοστό νικελίου 3,50%≤Ni<5,00% ή με ποσοστό μολυβδανίου ≥0,40%Mo
Κραματωμένοι χάλυβες – Ποιοτικοί χάλυβες		1.68xx	Κραματικές ομάδες Cr-Ni-V, Cr-Ni-W και Cr-Ni-V-W
1.08xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες	1.69xx	Κραματική ομάδα Cr-Ni (πλην κατηγοριών 57 έως 68)
1.98xx	Χάλυβες ιδιαίτερων εφαρμογών	1.70xx	Κραματική προσθήκη Cr και κραματική ομάδα Cr-B
1.09xx	Χάλυβες ιδιαίτερων εφαρμογών	1.71xx	Κραματικές ομάδες Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-B και Cr-Si-Mn
1.99xx	Χάλυβες ιδιαίτερων εφαρμογών	1.72xx	Κραματική ομάδα Cr-Mo με ποσοστό μολυβδανίου <0,35%Mo και κραματική ομάδα Cr-Mo-B
Κραματωμένοι χάλυβες – Ευγενείς χάλυβες - Εργαλειοχάλυβες		1.73xx	Κραματική ομάδα Cr-Mo με ποσοστό μολυβδανίου ≥0,35%Mo
1.20xx	Κραματική προσθήκη Cr	1.74xx	-
1.21xx	Κραματικές ομάδες Cr-Si, Cr-Mn και Cr-Mn-Si	1.75xx	Κραματική ομάδα Cr-V με ποσοστό χρωμίου <2,00%Cr
1.22xx	Κραματικές ομάδες Cr-V, Cr-V-Si, Cr-V-Mn και Cr-V-Mn-Si	1.76xx	Κραματική ομάδα Cr-V με ποσοστό χρωμίου ≥2,00%Cr
1.23xx	Κραματικές ομάδες Cr-Mo, Cr-Mo-V και Mo-V	1.77xx	Κραματική ομάδα Cr-Mo-V
1.24xx	Κραματικές ομάδες W και Cr-W	1.78xx	-
1.25xx	Κραματικές ομάδες W-V και Cr-W-V	1.79xx	Κραματικές ομάδες Cr-Mn-Mo και Cr-Mn-Mo-V
1.26xx	Κραματική προσθήκη W (πλην κατηγοριών 24,25,27)	1.80xx	Κραματικές ομάδες Cr-Si-Mo, Cr-Si-Mn-Mo, Cr-Si-Mo-V και Cr-Si-Mn-Mo-V
1.27xx	Κραματική προσθήκη Ni	1.81xx	Κραματικές ομάδες Cr-Si-V, Cr-Mn-V, και Cr-Si-Mn-V
1.28xx	Λοιποί εργαλειοχάλυβες	1.82xx	Κραματικές ομάδες Cr-Mo-W και Cr-Mo-W-V
1.29xx	-	1.83xx	-
Κραματωμένοι χάλυβες – Ευγενείς χάλυβες – Διάφοροι χάλυβες		1.84xx	Κραματικές ομάδες Cr-Si-Ti, Cr-Mn-Ti, και Cr-Si-Mn-Ti
1.30xx	-	1.85xx	Χάλυβες εναζωτώσεως
1.31xx	-	1.86xx	-
1.32xx	Ταχυχάλυβες με κραματική προσθήκη Co	1.87xx	Χάλυβες, που δεν προορίζονται για θερμική επεξεργασία
1.33xx	Ταχυχάλυβες άνευ κραματικής προσθήκης Co	1.88xx	Χάλυβες, που δεν προορίζονται για θερμική επεξεργασία με υψηλή μηχανική αντοχή και καλή συγκολλησιμότητα
1.34xx	-	1.89xx	Χάλυβες, που δεν προορίζονται για θερμική επεξεργασία με υψηλή μηχανική αντοχή και καλή συγκολλησιμότητα
1.35xx	Χάλυβες εδράνων κύλισης		
1.36xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες μαγνητικές ιδιότητες άνευ κραματικής προσθήκης Co		
1.37xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες μαγνητικές ιδιότητες με κραματική προσθήκη Co		
1.38xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες άνευ κραματικής προσθήκης Ni		
1.39xx	Χάλυβες με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες με κραματική προσθήκη Ni		
Κραματωμένοι χάλυβες – Ευγενείς χάλυβες – Χημικά αδρανείς χάλυβες			
1.40xx	Ανοξείδωτοι χάλυβες με ποσοστό νικελίου <2,5%Ni, άνευ κραματικής προσθήκης Mo, Nb και Ti		

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- **Ευτηκτοειδείς**, που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0,80% κ.β.
- **Υπερευτηκτοειδείς**, με ποσοστό από 0,80-2,00% κ.β.

Οι χάλυβες μορφοποιούνται είτε με κατεργασία διαμόρφωσης και ονομάζονται **χάλυβες διαμόρφωσης**, είτε με απευθείας χύτευση σε κατάλληλα καλούπια, και ονομάζονται **χάλυβες χύτευσης** (ή χυτοχάλυβες). Οι κύριες χρήσεις των χαλύβων διαμόρφωσης καθορίζονται από την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.5. Με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα, η μηχανική αντοχή των χαλύβων αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητα και η συγκολλησιμότητα τους ελαττώνεται.

Για χύτευση χρησιμοποιούνται συνήθως οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα μικρότερο του 0,5%. Μετά την στερεοποίησή τους παρουσιάζουν μικροδομή περλίτη και προευτηκτοειδές φερρίτης. Ο 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 1.5 Χάλυβες διαμόρφωσης και χρήσεις τους [1].

% 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	Χωρίς θερμική κατεργασία ή μετά από ανόπτηση	–	Τμήματα μηχανών
0,45	Μετά από ανόπτηση	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 ιδιότητες των κοινών χαλύβων είναι ανεπαρκείς για πολλές μηχανολογικές εφαρμογές. Με προσθήκη άλλων χημικών στοιχείων μπορούν να παράγονται βελτιωμένοι χάλυβες[5]. Τα στοιχεία κραμάτωσης βελτιώνουν τις ιδιότητες των χαλύβων με ποικίλους τρόπους:

- Σκλήρυνση του χάλυβα με τη δημιουργία στερεού διαλύματος.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- Σχηματισμός καρβιδίων (προσθήκη καρβιδιογόνων στοιχείων).
- Υποβοήθηση 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.

Στον Πίνακα 1.6 παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.6 Επίδραση στοιχείων προσθήκης στις ιδιότητες των χαλύβων [1].

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ	ΔΙΑΛΥΤΟΤΗΤΑ	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΕ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΧΡΗΣΕΙΣ
Ni	γ-φερρογόνο και γραφιτίζον	10% στον α-Fe, άνευ ορίου στον γ-Fe	Προκαλεί σημαντική αύξηση της εμβαπτότητας, αύξηση της αντοχής σε επαναφορά 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 εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας και αύξηση της σκληρότητας. Δίνει φερρικούς χάλυβες, με μεγάλους κόκκους για ηλεκτρομαγνητικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται, επίσης, για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής σε διάβρωση.
Mo	α-φερρογόνο και καρβιδιογόνο	37,5% στον α-Fe, 5% στον γ-Fe	Προκαλεί μεγάλη αύξηση της εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας 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 εμβαπτότητας, 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 εμβαπτότητας και μεταθέτει προς τα αριστερά τις καμπύλες TTT. Βοηθά στη διατήρηση της σκληρότητας.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

1.5 Κραματωμένοι χάλυβες

Οι κραματωμένοι χάλυβες έχουν πρακτικά μέχρι 1% άνθρακα και διάφορα στοιχεία κραμάτωσης. Το Ni, Mn, Cr, Si και Mo θεωρούνται κύριες προσθήκες και το V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb. 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%.

1.5.1 Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες.

Οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν μικρά ποσοστά προσθήκης (συνήθως έχουν Mn έως 1,5% και Nb, V ή Ti έως 0,1%). Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται μεταξύ 400...650 MPa, η αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 500...850 MPa, ενώ η επιμήκυνσή τους μέχρι τη θραύση είναι της τάξης του 14...27%. Έχουν πολύ καλύτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τους κοινούς χάλυβες. Έχουν όμως χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά (λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων) και εμφανίζουν μικρή ικανότητα μορφοποίησής εν ψυχρώ.

Η χρήση τους περιορίζεται λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής. Συνήθως, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή τμημάτων για τα οποία απαιτούνται υψηλή αντοχή και δυσθραυστότητα (κιβώτια ταχυτήτων, φρένα, άξονες, κλπ).

1.5.2 Μέτρια και Υψηλά κραματωμένοι χάλυβες

Οι μέτρια κραματωμένοι χάλυβες περιέχουν προσμείξεις από 2% έως 10% και οι ισχυρά κραματωμένοι πάνω από 10% αντίστοιχα [6]. Ανάλογα με την χημική σύσταση διακρίνονται οι εργαλειοχάλυβες, οι ταχυχάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι χάλυβες μαρτενγήρασης (Maraging). Συνήθως περιέχουν μεγάλα ποσοστά βολφραμίου (W), βαναδίου (V), μολυβδαίνιου (Mo), χρωμίου (Cr), νικελίου (Ni) και κοβαλτίου (Co).

- **Ανοξείδωτοι χάλυβες.** Το κύριο στοιχείο προσθήκης των ανοξείδωτων χαλύβων είναι το χρώμιο (σε ποσοστά μεγαλύτερα του 12%). Συνήθως, περιέχουν και μικρά ποσοστά ακαθαρσιών (έως 0,03% S, έως 0,04% P) και προσθηκών (έως 1% Si). Η υψηλή αντοχή σε διάβρωση οφείλεται στο χρώμιο. Το χρώμιο σχηματίζει ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίου, το οποίο προστατεύει την επιφάνεια του χάλυβα (παθητικοποίηση επιφάνειας). Οι ανοξείδωτοι χάλυβες με περιεκτικότητα σε χρώμιο μικρότερη του 17% και σε άνθρακα έως 0,5%, επιδέχονται ωστενιτοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες, αποκτούν μαρτενσιτική δομή κατά τη βαφή και καλούνται ανοξείδωτοι μαρτενσιτικοί χάλυβες. Μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε άνθρακα (έως 1,1%) οδηγούν στο σχηματισμό καρβιδίων, τα οποία δεσμεύουν χρώμιο και μειώνουν την αντοχή

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

σε διάβρωση. Όταν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρότερη (από 0,08% και μέχρι 0,12%), ο χρωμιούχος χάλυβας, έχει φερριτική δομή σε όλες τις θερμοκρασίες και δεν είναι υφίστανται μαρτενσιτική βαφή. Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν από 12% έως 30% χρώμιο, έχουν κυβική χωροκεντρωμένη δομή μέχρι τη θερμοκρασία τήξης τους και καλούνται ανοξειδωτοί φερριτικοί. Είναι μαγνητικοί και παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε διάβρωση, αλλά μικρότερη μηχανική αντοχή συγκρινόμενοι με τους μαρτενσιτικούς.

Ορισμένοι ανοξειδωτοί χάλυβες παρουσιάζουν δομή ωστενίτη, ακόμη και σε θερμοκρασίες χαμηλότερες αυτής του περιβάλλοντος. Γενικά, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση (μέχρι και θερμοκρασία 900°C), καλές μηχανικές ιδιότητες και κατεργασιμότητα.

Για συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε χρώμιο (18-28%) και νικέλιο (6-9%), λαμβάνονται χάλυβες μικτής ωστενιτοφερριτικής δομής. Οι χάλυβες αυτοί παρουσιάζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή σε διάβρωση, σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση και σε διάβρωση λόγω κόπωσης.

1.6 Χάλυβες επιφανειακής βαφής

Χάλυβες επιφανειακής βαφής ορίζονται οι χάλυβες κατασκευών με σχετικά χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα, συνήθως 0,10-0,25%C [7]. Χρησιμοποιούνται για εξαρτήματα των οποίων η επιφανειακή ζώνη υφίσταται ενανθράκωση ή ενανθρακαζώτωση πριν τη σκλήρυνση με βαφή και επαναφορά. Τα επιφανειακά σκληρυμένα εξαρτήματα παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά σκληρότητας μεταξύ της επιφανειακής ζώνης και του πυρήνα του υλικού. Οι συγκεκριμένοι χάλυβες μπορεί να υφίστανται επιφανειακές θερμοχημικές κατεργασίες όπως εναζώτωση (nitriding) και ενανθρακαζώτωση (carbonitriding), εναζωτοενανθράκωση (nitrocarburizing), ενβορίωση (boriding) καθώς και θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης όπως βαφή και επαναφορά άνευ ενανθρακώσεως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

2.1 Ιδιότητες χαλύβων

Η επιλογή κάθε υλικού για συγκεκριμένη εφαρμογή πραγματοποιείται βάσει των ιδιοτήτων του. Οι ιδιότητες ταξινομούνται σε τέσσερις κύριους τύπους: φυσικές, χημικές, μηχανικές και ιδιότητες επεξεργασίας.

2.1.1 Φυσικές ιδιότητες των χαλύβων

Η πυκνότητα και οι θερμικές ιδιότητες αποτελούν τις πιο σημαντικές φυσικές ιδιότητες στη μηχανολογία. Όταν ένα προϊόν σχεδιάζεται για να λειτουργήσει σε υψηλές θερμοκρασίες, πρέπει να ελεγχθούν οι ιδιότητες του στην θερμοκρασία λειτουργίας, διότι οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να διαφοροποιηθούν σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Τα μεταλλικά υλικά θεωρούνται καλοί θερμικοί αγωγοί. Οι θερμικές ιδιότητες εκφράζονται μέσω θερμικής αγωγιμότητας και του συντελεστή 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

Οι χημικές ιδιότητες αναφέρονται στην αλληλεπίδραση ενός δεδομένου υλικού με τα στοιχεία του περιβάλλοντος (π.χ., οξυγόνο, θείο, χλώριο, άνθρακας). Η αλληλεπίδραση είναι γνωστή ως διάβρωση, υποβιβάζει την απόδοση του υλικού και μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία του. Διαχωρίζεται σε δύο κύριους τύπους: χαμηλής θερμοκρασίας υδάτινη διάβρωση και υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση. Η χαμηλής θερμοκρασίας υδάτινη διάβρωση περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις στην υγρή κατάσταση. Αντίθετα, η υψηλής θερμοκρασίας διάβρωση αναφέρεται στις αντιδράσεις που εμφανίζονται στην αερώδη κατάσταση. Κάποια τήγματα περιλαμβάνουν έναν τύπο διάβρωσης υψηλής θερμοκρασίας γνωστό ως καυτή διάβρωση. Όταν τα προϊόντα της αντίδρασης στη διάβρωση γίνονται πορώδη υπάρχει απώλεια μετάλλων, το πάχος του στοιχείου μειώνεται και συνεπώς μειώνεται και η αντοχή του. Οι ιδιότητες διάβρωσης εκφράζονται με το ποσοστό απώλειας μετάλλων (αλλαγή σε πάχος ή βάρος) στα συγκεκριμένα περιβάλλοντα.

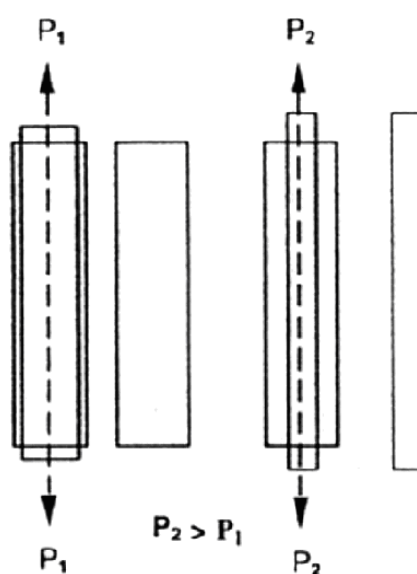
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

2.1.3 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων

Οι μηχανικές ιδιότητες περιγράφουν την ανταπόκριση του υλικού στις εξωτερικά εφαρμοζόμενες φορτία. Κάθε υλικό αντιδρά σε μια εφαρμοζόμενη δύναμη (γνωστή ως καταπόνηση) με στρέβλωση ή παραμόρφωση, προκαλώντας αλλαγή στη μορφή ή στις διαστάσεις του. Ταυτόχρονα, το υλικό αναπτύσσει εσωτερικές τάσεις οι οποίες αντιδρούν στην επίδραση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Η καταπόνηση μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αλλά η τάση μπορεί μόνο να υπολογιστεί συνάρτηση της καταπόνησης.

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



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

Για σχετικά μικρό εφαρμοσμένο φορτίο η καταπόνηση είναι ελαστική και αν μετά την αφαίρεση της δύναμης, το υλικό επιστρέφει στις αρχικές του διαστάσεις. Όταν το εφαρμοσμένο φορτίο υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο (το οποίο εξαρτάται από το υλικό) το υλικό υφίσταται μια μόνιμη αλλαγή στη μορφή ή στις διαστάσεις του η οποία εμφανίζει την πλαστική παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται με την αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου μέχρις ότου τελικά το υλικό σπάσει. Τα υλικά τα οποία παραμορφώνονται εύκολα πλαστικά θεωρούνται όλκιμα.

Η πλαστική παραμόρφωση κάθε υλικού επηρεάζεται από το ποσοστό παραμόρφωσης και τη θερμοκρασία. Σε μια δεδομένη θερμοκρασία, εάν η δύναμη εφαρμόζεται σχετικά αργά κατά τρόπο προοδευτικό, το υλικό μπορεί εύκολα να παραμορφωθεί, εντούτοις, εάν το φορτίο εφαρμοστεί πολύ γρήγορα, το ίδιο υλικό μπορεί να σπάσει χωρίς να υποβληθεί σε κάποια υπολογίσιμη

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

παραμόρφωση. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει την ίδια επίδραση με τη μείωση του ποσοστού καταπόνησης.

Η ανταπόκριση ενός υλικού σε μια εφαρμοζόμενη δύναμη μπορεί να περιγραφεί από τρία διαφορετικά φαινόμενα: την ελαστική παραμόρφωση, την πλαστική παραμόρφωση και τη θραύση του. 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 μπορεί να είναι κρουστικά ή 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, 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 κατ' επανάληψη στο στοιχείο. 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 μέσω της δυσθραυστότητας του. Συσχετίζεται η τάση που απαιτείται για να διαδοθεί μια υπάρχουσα ρωγμή με το αρχικό μήκος της ρωγμής.

Μία άλλη μηχανική ιδιότητα που χρησιμοποιείται συχνά ευρέως στην αξιολόγηση των υλικών είναι η σκληρότητα. Η σκληρότητα εξαρτάται άμεσα από τη μέθοδο και από τις συνθήκες μέτρησης. Υπάρχει άμεσος συσχετισμός μεταξύ της σκληρότητας και της δύναμης: υψηλότερη σκληρότητα απεικονίζει υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού και κάμψης και χαμηλότερη ολκιμότητα.

2.2 Μηχανικές δοκιμές

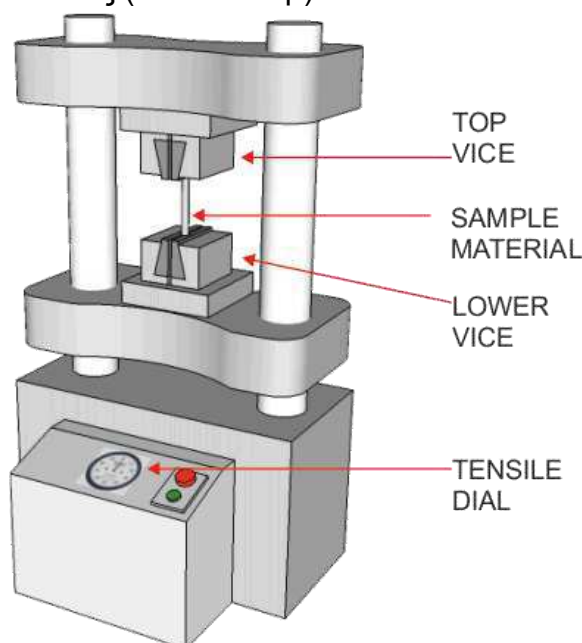
Οι μηχανικές δοκιμές είναι τυποποιημένες. Η τυποποίηση αναφέρεται στην διαδικασία, το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου, τα όργανα που χρησιμοποιούνται και η βαθμονόμηση τους καθώς και στην επεξεργασία και διατύπωση των αποτελεσμάτων. Οι δοκιμές εφαρμόζονται συνήθως με σκοπό τον χαρακτηρισμό των υλικών. Σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως στην περίπτωση του χάλυβα σπλισμού σκυροδέματος) εφαρμόζονται με σκοπό τον έλεγχο προϊόντων. Σε αυτήν την περίπτωση διατηρούνται οι βασικές αρχές της δοκιμής αλλά υπάρχουν διαφοροποιήσεις σχετικά με την γεωμετρία και οι διαστάσεις του δοκιμίων και τον συμβολισμό των βασικών μεγεθών.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

2.2.1 Δοκιμή εφελκυσμού

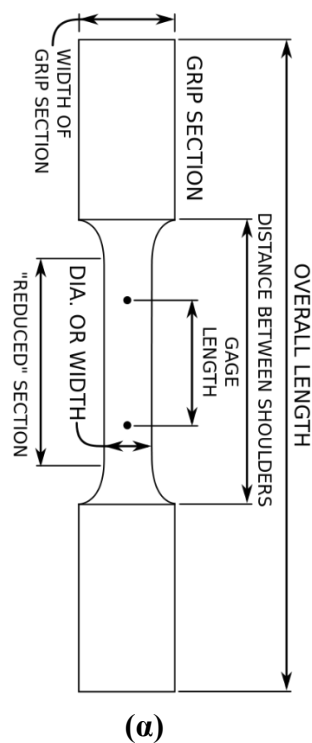
Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η πιο διαδεδομένη πειραματική μέθοδος προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών [8]. Δίνει πληροφορίες για τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού, τον χαρακτήρα και το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης του, το όριο διαρροής, την εφελκυστική αντοχή, και την δυσθραυστότητα. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε ειδική μηχανή που υποβάλει το υπό εξέταση υλικό σε μονοαξονική καταπόνηση προκαλώντας την επιμήκυνσή του με σταθερή ταχύτητα (Εικόνα 2.2). Κατά τη δοκιμή καταγράφεται συνήθως το μέτρο των ίσων και αντίθετων δυνάμεων F που ασκούνται πάνω στο δοκίμιο (Εικόνα 2.3α) και η επιμήκυνση του δοκίμιου $\Delta l = l - l_0$. Το δοκίμιο είναι είτε ράβδος κυκλικής διατομής είτε έλασμα και έχει τυποποιημένες διαστάσεις (Εικόνα 2.3β).



ΕΙΚΟΝΑ 2.2: Μηχάνημα δοκιμής εφελκυσμού[9]

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Ευρώπη	$l_0=10d_0$ ή $l_0=5d_0$
Η.Π.Α	$l_0= 4d_0$ με $l_0= 2$ in ή $l_0= 1/2$ in
Αγγλία	$l_0= d_0$ με $l_0= 2$ in ή $l_0= 0.564$ in

ΕΙΚΟΝΑ 2.3:(α) Γεωμετρία των δοκιμών που χρησιμοποιούνται στη δοκιμή εφελκυσμού, (β) Πίνακας με τυποποιημένες διαστάσεις κυλινδρικών δοκιμών εφελκυσμού [1]

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

Συμβατική τάση:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Σχέση 2.1})$$

Συμβατική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

Οι μετρήσεις κάθε δοκιμής αποτυπώνονται σε διάγραμμα $\sigma_{eng} - \varepsilon_{eng}$. Προφανώς, οι καμπύλες $F - \Delta l$ και $\sigma_{eng} - \varepsilon_{eng}$ 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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

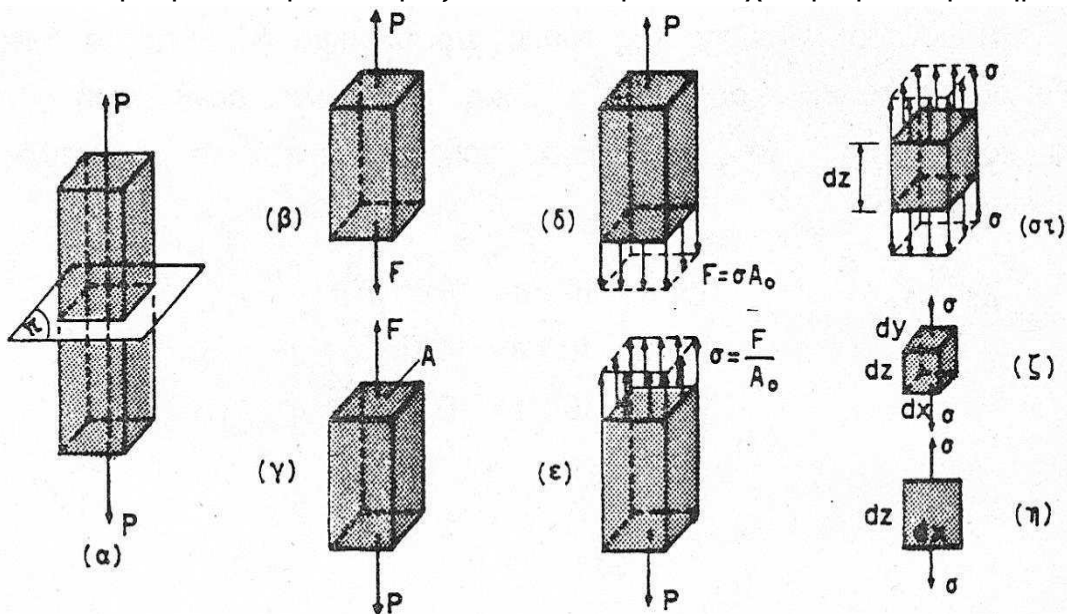
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Δυο τμήματα της ράβδου βρίσκεται σε ισορροπία, διότι η συνισταμένη των εσωτερικών δυνάμεων F που ασκείται στην τομή ενός εκ των δύο τμημάτων είναι ίση και αντίθετη με την εξωτερική δύναμη P στο άκρο της ράβδου (Εικόνα 2.4β ή 2.4γ). Επομένως, ασκείται μια εσωτερική δύναμη $F=P$ κάθετη σε κάθε διατομή A_0 και κάθε σημείο της διατομής υπόκειται σε μια σταθερή ορθή τάση:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{P}{A_0} \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

Η τάση αυτή ονομάζεται συμβατική διότι η δύναμη P διαιρείται με το αρχικό εμβαδό της διατομής. Στην πραγματικότητα 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, η ασκούμενη δύναμη τείνει να επιφέρει επιμήκυνση του στερεού, ονομάζεται εφελκυστική και έχει θετικό πρόσημο.

Σε αντίθετη περίπτωση θα ονομάζεται θλιπτική και θα έχει αρνητικό πρόσημο.



EIKONA 2.4

Ορθή και Διατμητική παραμόρφωση

Η απόκριση των υλικών στην εφαρμογή της τάσης ονομάζεται παραμόρφωση. Τα μεταλλικά σώματα επιδεικνύουν ελαστική συμπεριφορά μέσα σε πολύ στενά όρια παραμόρφωσης. Πάνω από αυτό το όριο εμφανίζονται μόνιμες μεταβολές στο σχήμα του σώματος που καλούνται πλαστικές παραμορφώσεις [10]. Στην Εικόνα 2.5 η εφελκυστική τάση σ που εφαρμόζεται σε έναν κύβο προκαλεί

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

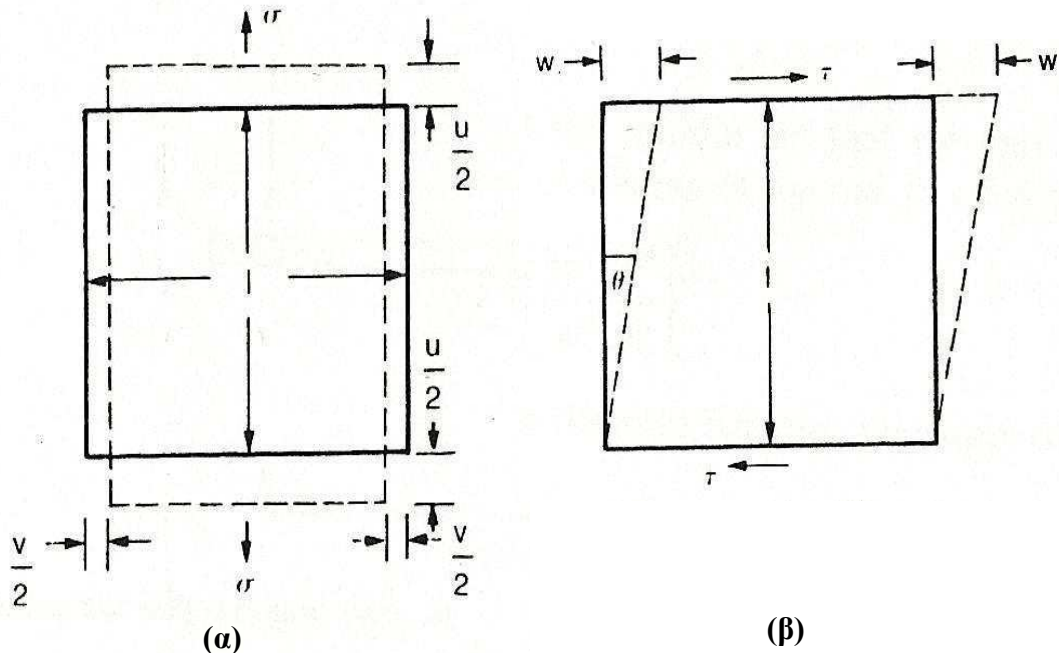
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

επιμήκυνση u παράλληλα στον άξονα φόρτισης, την συμβατική εφελκυστική παραμόρφωση:

$$\varepsilon_n = \frac{u}{l} \quad (\text{Σχέση 2.4})$$

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):

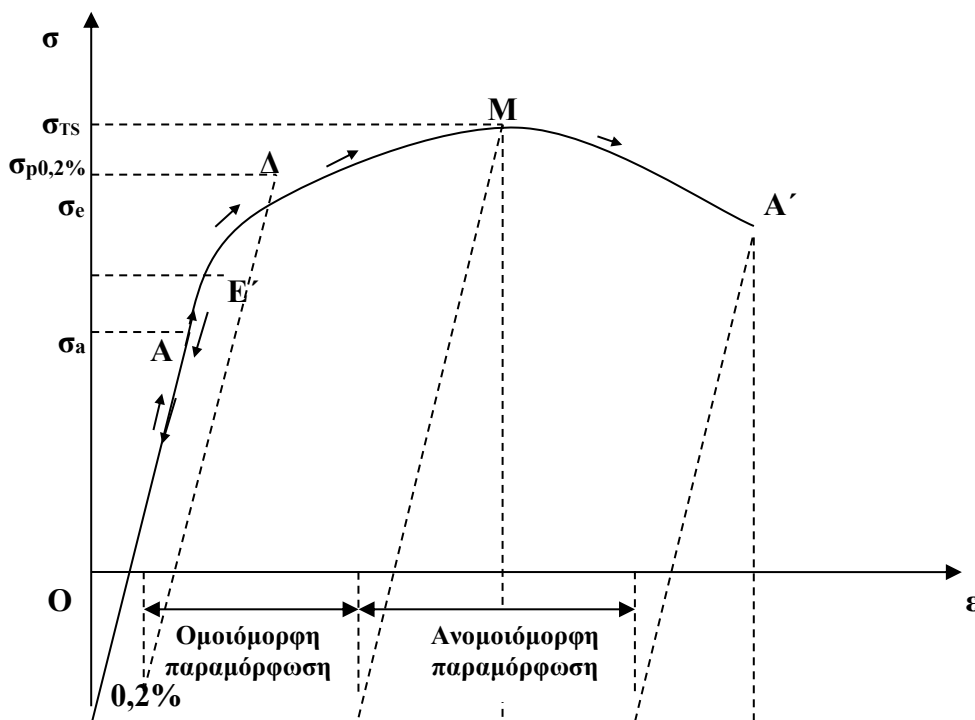
$$\nu = - \frac{\text{πλευρική παραμόρφωση}}{\text{αξονική παραμόρφωση}} \quad (\text{Σχέση 2.5})$$



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

Συμβατική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (Εικόνα 2.6) διακρίνεται μία ελαστική περιοχή, και μια πλαστική περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες [11].



ΕΙΚΟΝΑ 2.6: Τυπική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης

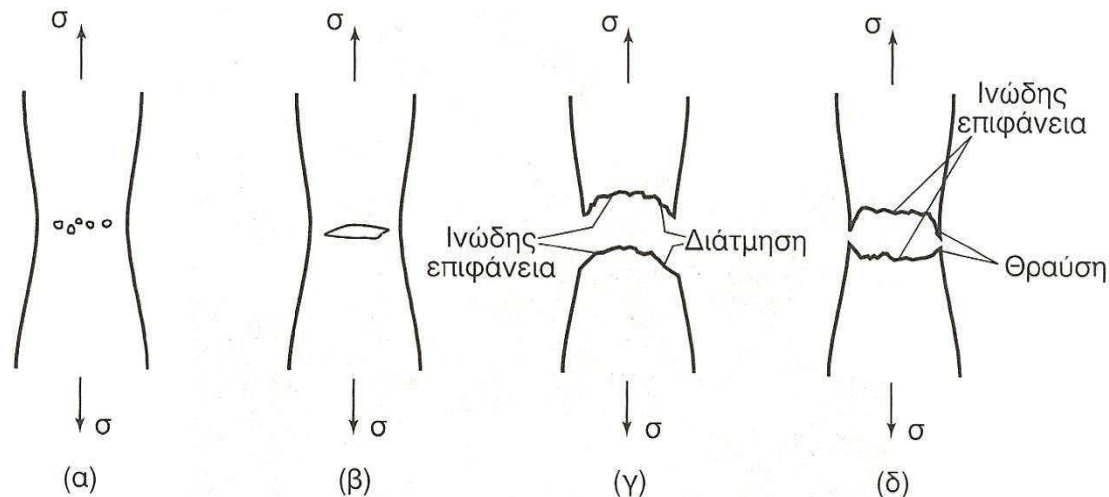
Οι δυο περιοχές διαχωρίζονται στη καμπύλη από το όριο ελαστικότητας, σ_e (Εικόνα 2.6. - σημείο E'). Το ευθύγραμμο τμήμα OA αντιστοιχεί στην περιοχή της γραμμικής ελαστικότητας και το τμήμα AE' στην περιοχή της μη γραμμικής ελαστικότητας. Το σημείο Δ αντιστοιχεί στην τάση διαρροής ή στο όριο διαρροής όπου αρχίζει να γίνεται αισθητή η πλαστική παραμόρφωση. Αυτό το όριο δύσκολα εντοπίζεται και συνήθως χρησιμοποιείται το συμβατικό όριο διαρροής $\sigma_{p0,2\%}$. Το συμβατικό όριο διαρροής αντιστοιχεί σε μια συμβατική παραμένουσα παραμόρφωση 0,2%.

Το τμήμα ΔM αντιστοιχεί στην περιοχή της ομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης. Στην περιοχή αυτή απαιτείται αύξηση της τάσης για περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση, και η κλίση της καμπύλης είναι αύξουσα έως μία μέγιστη τιμή της τάσης, τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, σ_{TS} . Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ενδοτράχυνση ή κράτυνση.

Σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η διατομή του δοκιμίου μειώνεται, Όταν η τάση πλησιάζει την μέγιστη αντοχή, σε κάποιο σημείο του δοκιμίου εμφανίζεται τοπική αστάθεια με τη μορφή μιας στένωσης, γνωστής ως λαιμός. Το τμήμα MA' της εικόνας 2.6 είναι η περιοχή της ανομοιόμορφης πλαστικής παραμόρφωσης όπου ο λαιμός αυξάνεται ραγδαία με την αύξηση της πλαστικής παραμόρφωσης, μέχρι τη θραύση (αποκόλληση) του δοκιμίου (Εικόνα 2.7),

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 2.7: Στάδια όλκιμης θραύσης: (α) Δημιουργία μικροκενών, (β) Συνένωση μικροκενών, (γ) Θραύση με διάτμηση άκρων και (δ) Θραύση με διάρρηξη άκρων.

Ελαστικότητα

Στην περιοχή της γραμμικής ελαστικότητας (τμήμα ΟΑ στην Εικ.2.6) ισχύει ο νόμος του Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Σχέση 2.6})$$

όπου E είναι το μέτρο του Young ή μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας μετριέται με την κλίση του τμήματος ΟΑ και αποδίδει τον βαθμό αντίστασης ενός υλικού στην ελαστική παραμόρφωση. 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 οριακή τάση πάνω από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ανάλογη προς την αντίστοιχη τάση (τιμή τάσης στο σημείο Α –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, όπως στην περίπτωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος [14].

Το όριο ελαστικότητας (τάση στο σημείο Ε' -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.

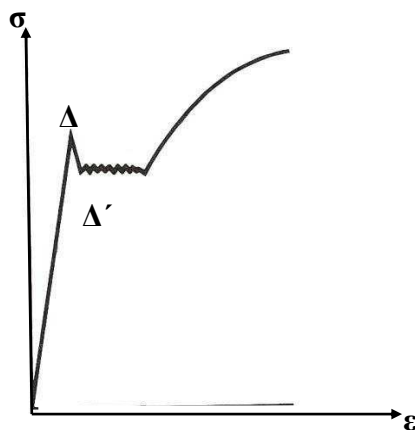
Το όριο διαρροής

Το όριο διαρροής, σ_y είναι η τάση, κατά την οποία αρχίζει να αυξάνεται η παραμόρφωση χωρίς να απαιτείται αύξηση της τάσης. Σε ορισμένα υλικά (πχ. χάλυβες) το φαινόμενο της διαρροής είναι φανερό, το δοκίμιο συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς αύξηση του φορτίου και εμφανίζεται το ανώτερο και το κατώτερο όριο διαρροής (σημεία Δ και Δ' -Εικ.2.8). Στις περισσότερες

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

περιπτώσεις το όριο διαρροής δεν μπορεί να εντοπιστεί 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_{TS} (τάση στο σημείο 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 [15].

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:

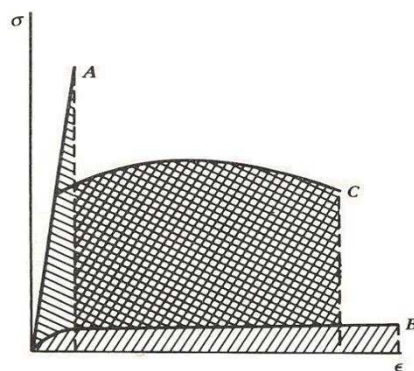
- με την παραμένουσα επιμήκυνση μετά από την θραύση.
- με τη μείωση της διατομής του δοκιμίου στο σημείο που αποκολλήθηκε.

Δυσθραυστότητα

Η υψηλή ολκιμότητα και η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό σπάνια συμβαδίζουν. Τα μέταλλα τα οποία κατέχουν ικανοποιητικό συνδυασμό ολκιμότητας και αντοχής σε εφελκυσμό θεωρούνται δύσθραυστα. Η δυσθραυστότητα επιτρέπει να προβλεφθεί αν ένα υλικό συμπεριφέρεται ως ψαθυρό ή ως όλκιμο, υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (Εικόνα 2.9) και εκφράζει την μηχανική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει η μονάδα του όγκου του υλικού μέχρι την θραύση.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

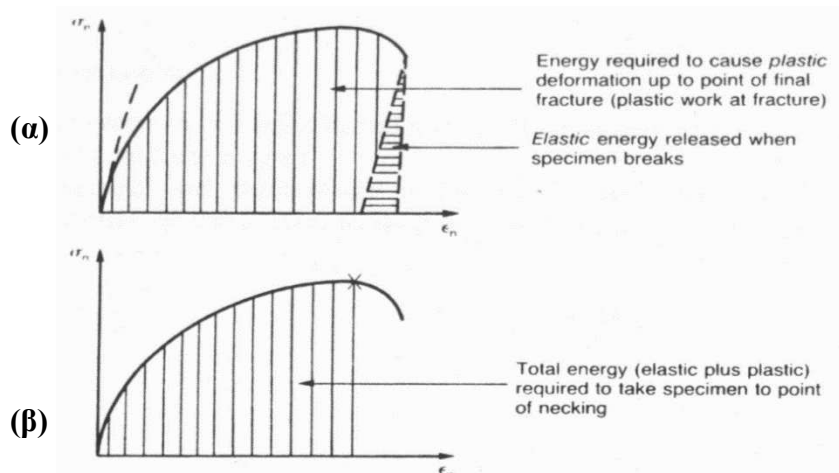
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 2.9: A. Υλικό με χαμηλή ολκιμότητα και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
B. Υλικό με υψηλή ολκιμότητα και χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό
C. Υλικό με ικανοποιητική ολκιμότητα και αντοχή σε εφελκυσμό

Ενέργεια ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης

Η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα όγκου του υλικού κατά την παραμόρφωση του διακρίνεται σε ελαστική και πλαστική, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.10.



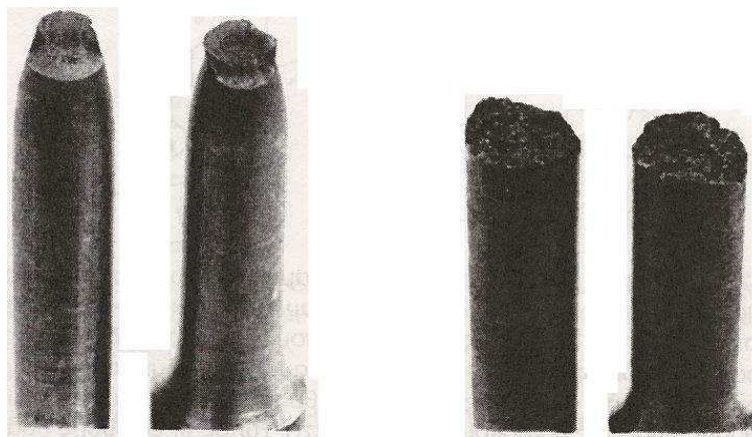
ΕΙΚΟΝΑ 2.10: (α) Ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης (έργο πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι τη θραύση) και ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης (ελαστική ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την αποκόλληση) μέχρι τη θραύση,
(β) Συνολική ενέργεια (ελαστική και πλαστική) που απαιτείται μέχρι το σημείο έναρξης σχηματισμού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

Όλκιμη και ψαθυρή θραύση

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



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

Πραγματικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

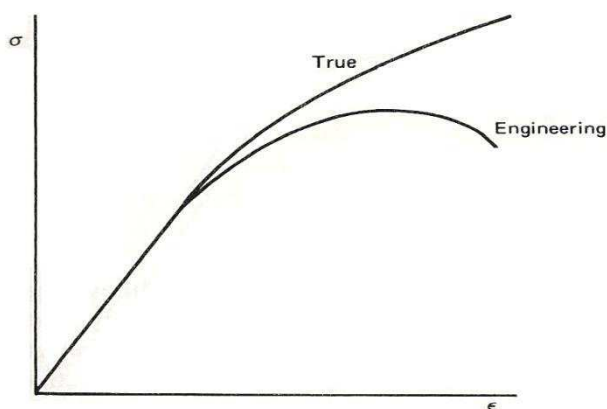
Η μορφή του συμβατικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης δεν αποδίδει απόλυτα το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης κράτυνσης, δηλαδή της συνεχούς σκλήρωσης του μετάλλου με την αύξηση της παραμόρφωσής του. Η συμβατική τάση και η παραμόρφωση αναφέρονται, στις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου (A_0 η αρχική διατομή του δοκιμίου και l_0 το αρχικό του ωφέλιμο μήκος) και όχι στη πραγματική στιγμιαία διατομή A_i και στο στιγμιαίο ωφέλιμο μήκος l :

Συμβατική τάση:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (1) \quad (\text{Σχέση 2.7})$$

Συμβατική παραμόρφωση:

Μόνο αν ληφθούν υπόψη οι στιγμιαίες πραγματικές τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων γίνεται αισθητό το φαινόμενο. 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)

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

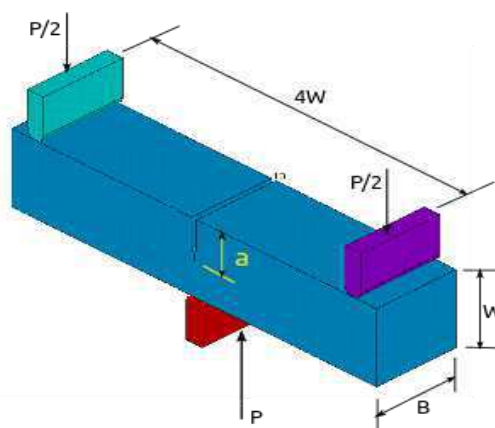
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

2.2.2 Δοκιμή θλίψης

Κατά την δοκιμή θλίψης ένα τυποποιημένο δοκίμιο καταπονείται με μία δύναμη η οποία εφαρμόζεται κάθετα στην διατομή του με τάση να μειώνει το μήκος του. Λαμβάνεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. 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 και αν πρόκειται για ψαθυρά υλικά, η συμβατική τάση θραύσης σ_{θ} [12].

2.2.3 Δοκιμή κάμψης

Η καταπόνηση σε κάμψη ή σε λυγισμό εφαρμόζεται για να προσδιοριστεί η ικανότητα του υλικού σε ελατότητα και 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 [13]. Στην Εικόνα 2.13 παρουσιάζεται η μηχανή κάμψης και η πειραματική διάταξη για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων.



ΕΙΚΟΝΑ 2.13: (α) Μηχανή δοκιμής κάμψης, (β) Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης

2.2.4 Δοκιμή κρούσης

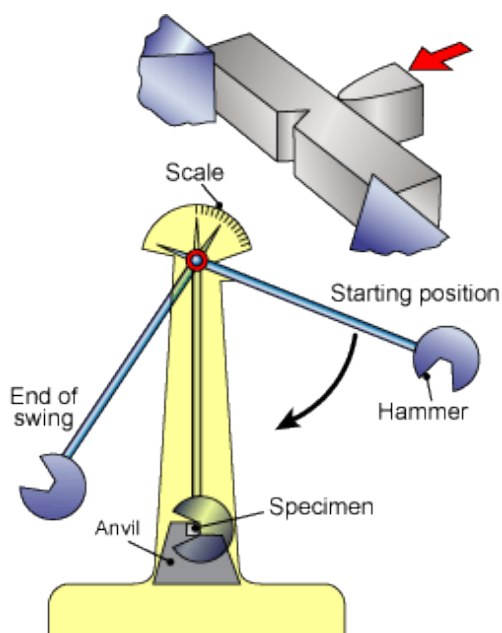
Αν η καταπόνηση ασκείται δυναμικά η αντίδραση του υλικού αλλάζει σημαντικά. Η δυσθραυστότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν την θραύση του και επιτρέπει να εκτιμηθεί σε ποιο βαθμό ένα υλικό συμπεριφέρεται ως όλκιμο ή ως ψαθυρό [16]. Αριθμητικά η δυσθραυστότητα μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν της καμπύλης εφελκυσμού ενώ τις περισσότερες φορές, η δυσθραυστότητα υπολογίζεται πειραματικά με δοκιμή κρούσης.

Ο συνήθης έλεγχος γίνεται με διατάξεις Charpy, σε δοκίμια με εγκοπή V ή U, τυποποιημένης γεωμετρίας (Εικόνα 2.14). Το δοκίμιο του εξεταζόμενου υλικού

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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 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).



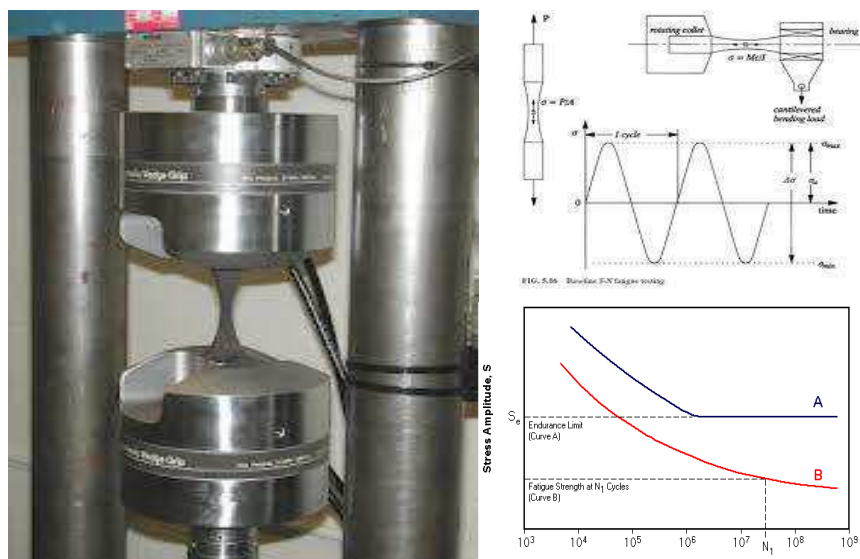
ΕΙΚΟΝΑ 2.14: Μηχανή δοκιμής κρούσης Charpy και τυποποιημένο δοκίμιο.

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 στην κόπωση του υλικού. Κατά την δοκιμή κόπωσης τα φορτία μπορεί να επιβάλλονται με εφελκυσμός και θλίψη, με κάμψη ανάκαμψη ή με στρέψη αντίστροφη. 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 2.15).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 2.15: (α) Μηχανή δοκιμής κόπωσης; (β) Τυποποιημένα δοκίμια και επιβαλλόμενη εναλλασσόμενη καταπόνηση; (γ) Διάγραμμα κόπωσης

2.2.6 Δοκιμή σκληρότητας

Η σκληρότητα ορίζεται ως τον βαθμό αντίστασης ενός υλικού στην πλαστική παραμόρφωση που προκαλείται από τη διείδυση άλλων σωμάτων σε αυτό. [17]. Η σκληρομέτρηση αποτελεί ταχεία τεχνική που δείνει 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. Τα αποτελέσματα της σκληρομέτρησης παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με διάφορα θέματα που χαρακτηρίσουν τα υλικά όπως:

- Προσδιορισμός υλικού.
- Έλεγχος ορθής διαδικασίας θερμικής κατεργασίας.
- Έλεγχος ποιότητας επιφανειακών κατεργασιών.
- Συμπεριφορά και αντοχή του υλικού κατά τη 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.

Η σκληρότητα είναι μια γρήγορη, απλή, εύκολη και αξιόπιστη μέτρηση, δίνει στοιχεία σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και είναι ένας Μη Καταστροφικός Έλεγχος.

Η σκληρότητα είναι ένα χαρακτηριστικό του υλικού και η τιμή της έχει άμεση σχέση με τη μεθοδολογία που ασχολήθηκε για την εύρεσή της. Οι μέθοδοι σκληρομέτρησης, αναλόγως με το αν θα εφαρμοστούν στατικά ή κρουστικά φορτία, χωρίζονται στις παρακάτω πιο διαδεδομένες μεθόδους: α) στατικές μέθοδοι, β) δυναμικές μέθοδοι. Η βασική αρχή των στατικών μεθόδων έγκειται στην αρχή του ότι μέσω μιας συσκευής που λέγεται δεισοδυτής, ασκείται στο

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

δοκίμιο στατικά, ένα συγκεκριμένο φορτίο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και δημιουργεί ένα αποτύπωμα πάνω σε αυτό. Η τιμή της σκληρότητας προκύπτει από την ανάγνωση των στοιχείων του αποτυπώματος. Συνήθως, η σκληρομέτρηση γίνεται σε σταθερά σκληρόμετρα εργαστηρίου που μετρούν το βάθος ή τις διαστάσεις της προβολής του αποτυπώματος που αφήνει ο διεισδυτής σκληρού υλικού στην επιφάνεια του υλικού, μετά την επιβολή κάθετης δύναμης γνωστής τιμής. Ανάλογα με το εξεταζόμενο υλικό, το πάχος του και τις αναμενόμενες τιμές σκληρότητας, χρησιμοποιούνται τέσσερις τεχνικές σκληρομέτρησης: Brinell, Vickers, Rockwell B και Rockwell C.

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 επιθεωρήσης λειτουργούντος εξαρτήματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η χρήση του δεν έχει επιφέρει αλλαγές στη σκληρότητά του. Μαζί με την τεχνική της ρέπλικας, η χρήση φορητού σκληρόμετρου, αποτελούν τα κύρια εργαλεία περιοδικού ελέγχου της αρτιότητας μιας μηχανολογικής μεταλλικής κατασκευής. Η λειτουργία του φορητού σκληρομέτρου στηρίζεται στην «αρχή της αναπήδησης σφαίρας» σκληρού υλικού 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.

Μέθοδος Brinell:

Στη μέθοδο Brinell ένας σφαιρικός διεισδυτής, από σκληρυμένο χάλυβα ή από καρβίδιο του βολφραμίου, διαμέτρου D πιέζεται κάθετα στην λειασμένη επιφάνεια του προς εξέταση δοκιμίου, υπό την επίδραση βαθμιαία αυξανόμενης δύναμης F για συγκεκριμένο χρόνο [18]. Μετά την απομάκρυνση του φορτίου, στην επιφάνεια του δοκιμίου έχει δημιουργηθεί ένα σφαιρικό αποτύπωμα διαμέτρου d και βάθους h , όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.16. Η σκληρότητα κατά Brinell (HB) είναι αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας του αποτυπώματος που προκλήθηκε υπό την επίδραση της δύναμης F , οπότε:

$$HB = 0,102x \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Σχέση 2.8})$$

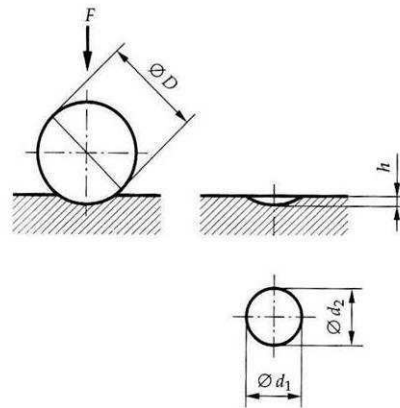
όπου : F = η ασκούμενη δύναμη σε N

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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Εικόνα 2.16: Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σκληρομέτρησης Brinell και κάτοψη αποτυπώματος

Το βάθος διείσδυσης h δίνεται από τη σχέση:

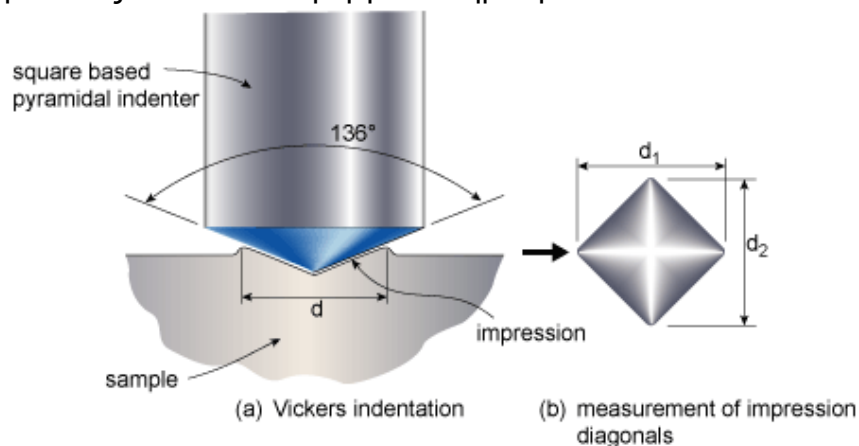
$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (\text{Σχέση 2.9})$$

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.

Οι δυνάμεις F και οι διάμετροι των σφαιρικών διεισδυτών D είναι τυποποιημένες, έτσι ώστε ο λόγος F/D^2 να παίρνει συγκεκριμένες τιμές.

Μέθοδος Vickers:

Η μέθοδος Vickers έχει την ίδια διαδικασία σκληρομέτρησης με την μέθοδο Brinell, με τη διαφορά ότι ο διεισδυτής που χρησιμοποιεί είναι αδαμάντινη τετραγωνική πυραμίδα με γωνία μεταξύ δυο απέναντι πλευρών 136° (Εικόνα 2.17). Η μέθοδος είναι κατάλληλη για σκληρά ή/και λεπτά υλικά.



Εικόνα 2.17: Σχηματική απεικόνιση της σκληρομέτρησης κατά Vickers και κάτοψη του αποτυπώματος

Το αποτύπωμα που προκαλεί ο διεισδυτής (πυραμίδα) υπό την επίδραση του προκαθορισμένου φορτίου P , έχει σχήμα τετραγωνικό και η σκληρότητα κατά

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Vickers ορίζεται αντίστοιχα ως δύναμη ανά επιφάνεια αποτυπώματος διείσδυσης και δίνεται από τη σχέση [19]:

$$HV = 2P \sin \frac{(\alpha/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \quad (\text{Σχέση 2.9})$$

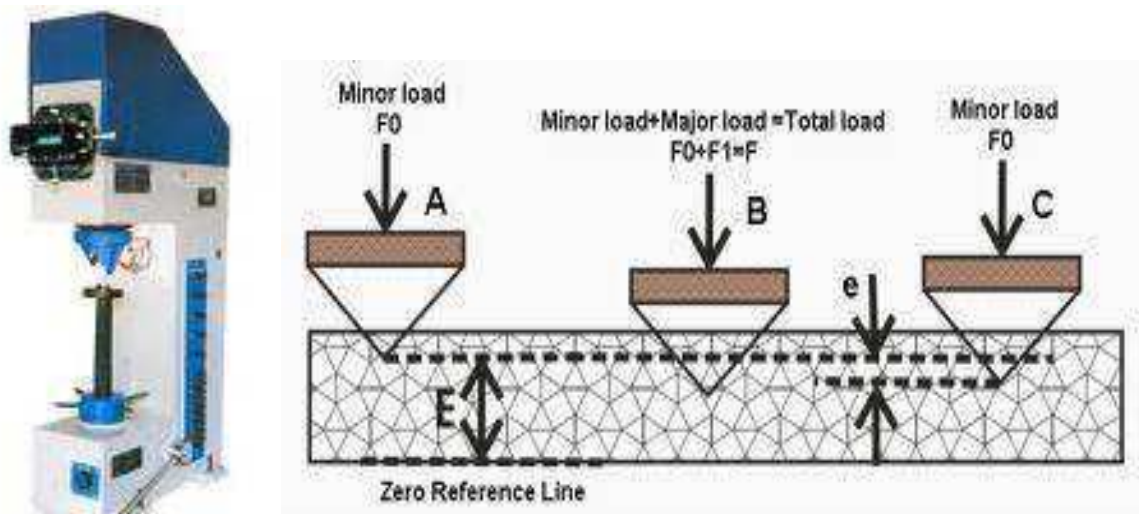
όπου :P = η ασκούμενη δύναμη σε kgf

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

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

Μέθοδος Rockwell

Πρόκειται για μια μέθοδο σκληρομέτρησης που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία καθώς δίνει άμεσα το αποτέλεσμα. Ο προσδιορισμός της σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση 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 (F_0) στη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια επιστρέφει στην αρχική τιμή της προφόρτισης [20]. Η βασική αρχή μέτρησης της σκληρότητας με τη μέθοδο Rockwell απεικονίζεται στην Εικόνα 2.18β.



ΕΙΚΟΝΑ 2.18: (α) Σκληρόμετρο; (β) Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου σκληρομέτρησης κατά Rockwell

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΑΛΥΒΩΝ

3.1 Τεχνικές επεξεργασίας χαλύβων- Ταξινόμηση κατεργασιών.

3.1.1 Ταξινόμηση κατά DIN

Οι κατεργασίες διακρίνονται **κατά DIN** σε:

- Αρχέγονες κατεργασίες θεωρούνται οι κατεργασίες στις οποίες το υλικό δεν έχει αρχικά προσδιορισμένο σχήμα, αλλά αποκτά καθορισμένη γεωμετρία μετά τη μορφοποίηση (χύτευση, κονιομεταλλουργία κλπ.).
- Διαμορφώσεις θεωρούνται οι διαδικασίες της πλαστικής παραμόρφωσης με 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, βαθιά κοίλανση κλπ.).
- Κοπές ή κατεργασίες αποβολής υλικού είναι οι κατεργασίες όπου η μορφοποίηση επιτυγχάνεται με συνδυασμό πλαστικής παραμόρφωσης σε διάτμηση και αποβολή υλικού (τόρνευση, διάτρηση, φρεζάρισμα, λείανση κλπ.).
- Επιφανειακές κατεργασίες είναι εκείνες οι οποίες 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 την χρησιμοποιούμενη ενέργεια και εξοπλισμό

Με το παραπάνω κριτήριο διακρίνονται σε:

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

3.1.3 Ταξινόμηση κατά θερμοκρασία

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- Ψυχρές κατεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Θερμές κατεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης και κάτω από την θερμοκρασία τήξης T_e [T_r, T_M].
- Ημίθερμες κατεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται λίγο πάνω της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και μετριάζοντας τα μειονεκτήματα των δύο παραπάνω ομάδων T_e (T_e, T_r).

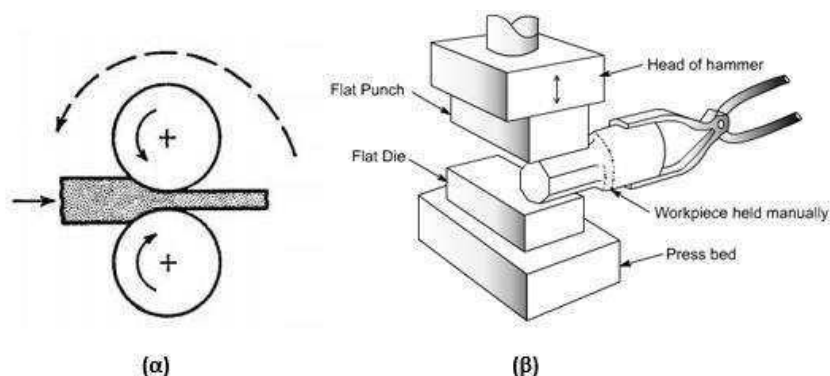
3.2 Πλαστικές παραμορφώσεις

Οι πλαστικές παραμορφώσεις εφαρμόζονται με σκοπό την αλλαγή της γεωμετρίας και των διαστάσεων των μεταλλικών υλικών. Διεξάγονται εν θερμώ και εν ψυχρώ.

3.2.1 Πλαστικές παραμορφώσεις εν θερμώ

Στα χυτά πλινθώματα οι κατεργασίες διενεργούνται αρχικά εν θερμώ, με σκοπό τη δημιουργία ομοιόμορφων κόκκων και την αποβολή μέρος των ατελειών που δημιουργούνται κατά την στερεοποίηση. Το πλίνθωμα θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία και σταδιακά παραμορφώνεται πλαστικά για να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Οι συνήθεις εν θερμώ παραμορφώσεις είναι η έλαση, η σφυρηλάτηση και η διέλαση (Εικόνα 3.1). Οι διαδικασίες αυτές, μπορούν να εφαρμοστούν σε τελικά προϊόντα ή σε ημιτελή.

Η έλαση αποσκοπεί στη μείωση της διατομής του προς κατεργασία αντικειμένου. Η θερμή έλαση, ως αρχική επεξεργασία των χυτών πλινθωμάτων, χρησιμοποιείται και για να διορθώσει τη δομή των κόκκων. Επιπλέον, η θερμή έλαση χρησιμοποιείται για να παραχθούν ορισμένα αντικείμενα, όπως τα ελάσματα θερμής έλασης, οι δοκοί, τα δομικά τμήματα και οι σωλήνες.



ΕΙΚΟΝΑ 3.1: Κύριοι τύποι εν θερμώ κατεργασιών: (α) Έλαση; (β) Σφυρηλάτηση[21,22].

Η εξέλαση είναι μια τεχνική θερμής έλασης, όπου μετά από πίεση μέσα από μία φιλιέρα το προϊόν αυξάνει το μήκος και μειώνει την διατομή του.

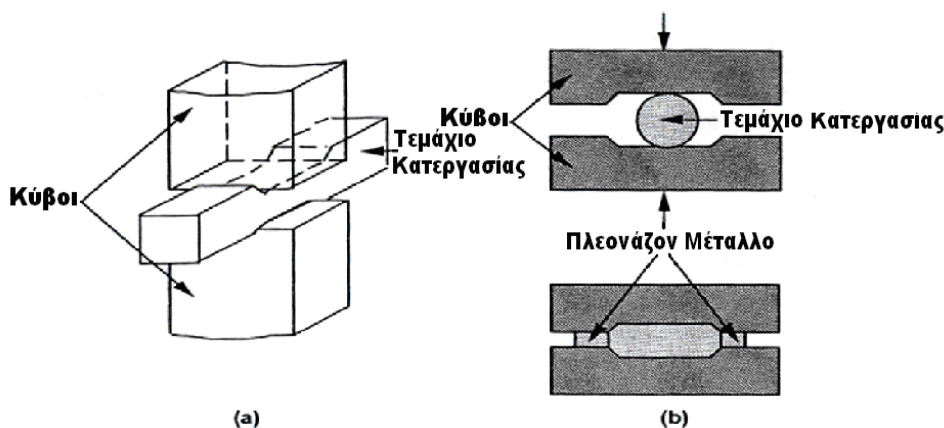
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Εφαρμόζεται εν θερμώ και εν ψυχρώ. Ορισμένες χαρακτηριστικές ατέλειες της εξέλασης είναι η ακανόνιστη μορφή, το ραγίσμα 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 πλινθώματα ή μεγάλα αντικείμενα απλής μορφής. Κατά την σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας μόνο ένα μέρος της επιφάνειάς της είναι σε επαφή με το κομμάτι κατεργασίας. 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 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.



ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Τεχνικές σφυρηλάτησης: (α) Σφυρηλάτηση ανοικτής μήτρας κύβων; (β) Σφυρηλάτηση κλειστής μήτρας κύβων. [21]

Η θερμή διέλαση σχεδόν πάντα χρησιμοποιείται για να διορθώσει τη δομή κόκκων των χυτών πλινθωμάτων καθώς και για την παραγωγή σύνθετων μορφών. Σε αυτήν την τεχνική, το κομμάτι κατεργασίας εισάγεται σε ένα κυλινδρικό δοχείο όπου αναγκάζεται να διατρέξει μέσω ενός στομιού. 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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

3.2.2 Πλαστικές παραμορφώσεις εν ψυχρώ

Η πλαστική παραμόρφωση εν ψυχρώ πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και χρησιμοποιείται αυστηρά στα τελικά προϊόντα. Οι πλαστικές παραμορφώσεις εν ψυχρώ οδηγούν σε καλύτερη διαστασιακή ακρίβεια, καλύτερη ποιότητα επιφάνειας καθώς και βελτιωμένες ιδιότητες. Οι πιο συνήθεις τεχνικές είναι η έλαση, η εξέλαση και η βαθειά κοίλανση.

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 θερμώ έλαση. Το υλικό προς εν ψυχρώ έλαση μπορεί να είναι άμεσο προϊόν χύτευσης, εξέλασης ή σφυρηλάτησης. Η εν ψυχρώ έλαση επιμηκύνει τους κόκκους και τα εγκλείσματα στην κατεύθυνση της έλασης, με συνέπεια μια σύσταση ινών που οδηγεί σε διαφορετικές ιδιότητες στις διαμήκεις (κατεύθυνση έλασης) και εγκάρσιες κατευθύνσεις.

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.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3: Πλαστική παραμόρφωση με εν ψυχρώ έλαση [22]

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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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. Σε αντίθεση με την ψυχρή κατεργασία, η ανακρυστάλλωση έχει ως επίδραση τη μείωση της δύναμης και της σκληρότητας. 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 τα κράματα των οποίων τα συστατικά μέταλλα είναι αδιάλυτα σε στερεά κατάσταση και έχουν περιορισμένη διαλυτότητα στην υγρή κατάσταση, η κονιομεταλλουργία μπορεί να είναι η μόνη εφικτή μέθοδος επεξεργασίας. Η μεθοδολογία προϋποθέτει δημιουργία σκόνης, τη μείξη της, την πίεση της, τη συμπίεση ή την πλινθοποίησή της και την σύντηξή της. Συνήθως, περισσότερα από ένα μεταλλικά συστατικά χρησιμοποιούνται ώστε να παρασκευαστεί η σκόνη. Επομένως, η έτοιμη σκόνη πρέπει να αναμειχθεί λεπτομερώς για να εξασφαλιστεί η ομοιογένεια του τελικού προϊόντος. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου συνήθως προστίθενται λιπαντικά για να διευκολύνουν την συμπίεση η οποία χρησιμοποιείται σε υδραυλικές και μηχανικές πρέσες. Στη συνέχεια ακολουθεί 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 κύριος στόχος των τεχνικών επεξεργασίας είναι να επιτευχθεί η διαστασιακή ακρίβεια και η επιθυμητή μορφή ενός προϊόντος. Αυτές οι τεχνικές είναι συνήθως ακριβείς, οδηγούν σε αύξηση του κόστους και κατά συνέπεια ο σχεδιαστής προσπαθεί 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 η συνηθέστερη τεχνική. Βασικά αποτελείται από την κίνηση του αντικειμένου σε μια μηχανή, σχετικά με ένα εργαλείο κοπής, που αφαιρεί τα λεπτά στρώματα επιφάνειας από το

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

αντικείμενο, υπό μορφή γρεζιού . Ανάλογα με τον τύπο της σχετικής μετακίνησης, οι μηχανικές μέθοδοι κατεργασίας διαχωρίζονται σε: λείανση, στίλβωση, πλάνισμα, γλύφανση, τορνίρισμα, φρεζάρισμα, διάτρηση, πριόνισμα και τρύπημα.

3.3.2 Μη μηχανουργική κατεργασία

Οι 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 διάφορα μεταλλικά μέρη μπορούν να συναρμολογηθούν σε εξαρτήματα με τεχνικόν ένωσης, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε: ηλεκτροσυγκόλληση, χαλκοκόλληση, λευκοκόλληση και κάρφωμα.

Τεχνικές συγκόλλησης

Οι τεχνικές συγκόλλησης μπορούν να ταξινομηθούν: στη συγκόλληση τήξης, όπου μόνο η θερμότητα εφαρμόζεται στις επιφάνειες που ενώνονται και στη συγκόλληση πίεσης, όπου η θερμότητα και η πίεση εφαρμόζονται στην επιφάνεια ένωσης. Οι περισσότερες από τις τεχνικές συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στις μηχανολογικές εφαρμογές είναι του τύπου τήξης. Μετά τη συγκόλληση τήξης, το προϊόν εμφανίζει τρεις χαρακτηριστικές περιοχές: η ραφή ή ένωση συγκόλλησης, η θερμικά επηρεασμένη ζώνη και το μέταλλο βάσης. Η ένωση συγκόλλησης έχει δενδριτική μικροδομή και περιέχει ατέλειες, όπως το πορώδες και τις αυλακώσεις. Στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη οι αλλαγές μικροδομής είναι παρόμοιες με εκείνες από την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες (θερμική γήρανση ή θερμική επεξεργασία).

3.4 Θερμικές κατεργασίες χαλύβων

Μεγάλο ποσοστό χαλύβων προκειμένου να διοχετευθεί στην παραγωγή, θα πρέπει να έχει ειδικές ιδιότητες. Συνήθως οι συγκεκριμένες ιδιότητες αποκτούνται με ορισμένες θερμικές κατεργασίες. Κάθε θερμική κατεργασία είναι μια διαδικασία ελεγχόμενης θέρμανσης του υλικού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και ελεγχόμενη ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η ψύξη και η θέρμανση μπορεί να διεξάγονται ενιαία ή κλιμακωτά. Επιπλέον μπορεί να αναφέρεται σε όλη την μάζα ή μόνο στην επιφάνεια του υλικού.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

3.4.1 Θερμικές κατεργασίες με διάχυση ατόμων

Ανόπτηση κατεργασίας

Η ανόπτηση κατεργασίας εφαρμόζεται μετά από ψυχρή κατεργασία προκειμένου να αυξηθεί η ολκιμότητα του χάλυβα το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Εφαρμόζεται ώστε να επιτρέψει τη συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Κατά τη διάρκεια αυτής της κατεργασίας, είναι δυνατόν να συμβούν αποκατάσταση και ανακρυστάλλωση. Η οξειδωση 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.

Ανόπτηση εξομάλυνσης

Πολλές φορές, η δομή των υποευτηκτοιδών χαλύβων, όπως για παράδειγμα των χυτοχαλύβων, αποτελείται από κόκκους φερρίτη βελονοειδούς μορφής και περλίτη. Η μικρογραφική αυτή μορφή, προσδίδει στο χάλυβα ευθραυστότητα. Η εξομάλυνση εφαρμόζεται προκειμένου να δημιουργηθεί ομοιόμορφη, κυτταροειδής και λεπτόκοκκη φερριτοπερλιτική δομή. Για το σκοπό αυτό, ο χάλυβας θερμαίνεται κατά 55-85°C υψηλότερα της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c3} ή A_1 (εξαρτώμενης από την % κ.β. συγκέντρωση σε C) για ωστενιτοποίηση και ψύχεται 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.

Για τους υπερευτηκτοιδείς χάλυβες, η ανόπτηση εξομάλυνσης εφαρμόζεται προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διασπορά του σεμεντίτη.

Πλήρης ανόπτηση

Η πλήρης ανόπτηση ή απλώς ανόπτηση, 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 ωστενιτοποιείται, με θέρμανση κατά 15-40°C υψηλότερα της καμπύλης A_{c3} για ωστενιτοποίηση, παραμένει για αρκετές ώρες μέσα σε φούρνο και αποψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την ταχύτητα απόψυξης του φούρνου (περίπου 20°C / ώρα). Μετά την κατεργασία, οι κόκκοι του περλίτη είναι μεγαλύτερου μεγέθους και τραχείς, ο χάλυβας, όμως, είναι μαλακός και όλκιμος.

Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης

Κατά την ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσής του, εντός της

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

φερριτο-περλιτικής περιοχής, και στην συνέχεια αποψύχεται στον αέρα. Εφαρμόζεται στους "εν ψυχρώ" παραμορφωμένους χάλυβες, προκειμένου να εξαλειφθεί ο ιστός της ενδοτράχυνσης και να καταστεί δυνατή η περαιτέρω κατεργασία μορφοποίησης.

Ανόπτηση αποκατάστασης

Η ανόπτηση αποκατάστασης πραγματοποιείται για τους ίδιους λόγους, που πραγματοποιείται και η ανόπτηση ανακρυστάλλωσης, αλλά η θέρμανση γίνεται σε χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του χάλυβα.

Αποτατική ανόπτηση

Κατά την αποτατική ανόπτηση, το κράμα θερμαίνεται εντός της φερριτο-περλιτικής περιοχής με αργή απόψυξη. Λόγω της συντελούμενης 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 χαλύβων.

Ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη

Η ανόπτηση σφαιροποίησης του σεμεντίτη συνίσταται στη θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία λίγο πάνω ή κάτω της ευτηκτοειδούς θερμοκρασίας A_{c1} , και στην εν συνεχεία αργή απόψυξή του μέσα στο φούρνο. Με την κατεργασία αυτή, επιτυγχάνεται η σφαιροποίηση του σεμεντίτη. Ο σφαιροποιημένος σεμεντίτης, για την βελτίωση της κατεργασιμότητας του χάλυβα. Η ταλαντευτική ανόπτηση προϋποθέτει διαδοχική θέρμανση του χάλυβα λίγο πάνω και λίγο κάτω της A_1 με σκοπό τη σημαντική μείωση του χρόνου της θερμικής κατεργασίας.

3.4.2 Θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης

Η ανόπτηση μετά το πέρας της απόψυξης, καταλήγει σε φάσεις ισορροπίας φερρίτη και σεμεντίτη και στην μικροδομή του περλίτη, όπως αυτές προβλέπονται από το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων Fe-Cem. Εάν η απόψυξη πραγματοποιηθεί με πολύ ταχύτερους ρυθμούς η διάχυση των ατόμων δεν είναι εφικτή και λαμβανόμενα προϊόντα (φάσεις) εκτός ισορροπίας. Η κατεργασία αυτή ονομάζεται βαφή.

Ωστενιτοποίηση

Η μοναδική φάση η οποία μετασχηματίζεται κατά την ψύξη του χάλυβα είναι ο ωστενίτης. Κατά συνέπεια, η βαφή του χάλυβα προϋποθέτει ωστενιτοποίηση. Η ωστενιτοποίηση περιλαμβάνει θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

υψηλότερη της άνω κρίσιμης θερμοκρασίας A_{c3} για τους υποευθηκτοειδείς χάλυβες και της κάτω κρίσιμης A_{c1} για τους υπερευθηκτοειδείς χάλυβες.

Για την πλήρη μετατροπή του κράματος σε ομογενή ωστενίτη, η παραμονή στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης θα διαρκέσει αρκετό χρόνο, χωρίς να οδηγήσει σε αύξηση του μεγέθους των κόκκων (υπερθέρμανση). Κατά τη θέρμανση, παρατηρείται συχνά μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και της καρδιάς του εξαρτήματος, το οποίο εξαρτάται από τις διαστάσεις και την γεωμετρία του. Η διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει ρηγμάτωση κατά την απόψυξη οδηγώντας σε αστοχία. Κατά συνέπεια η θέρμανση των αντικειμένων μεγάλων διαστάσεων πραγματοποιείται κλιμακωτά. Κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης, ο χάλυβας οξειδώνεται, με αποτέλεσμα την επιφανειακή απώλεια υλικού και ελάττωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται είτε προστατεύοντας κατευθείαν το εξάρτημα είτε με θέρμανση σε κλιβάνους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας.

Βαφή

Η βαφή του χάλυβα μετά την ωστενιτοποίηση πραγματοποιείται σε διαθέσιμα μέσα βαφής όπως το νερό και το λάδι, τα οποία διασφαλίζουν ταχύτητα απόψυξης μεγαλύτερη της διάχυσης των ατόμων. Η αποτελεσματικότητα τους δίνεται από έναν αριθμητικό συντελεστή, ο οποίος καλείται δραστηριότητα του μέσου βαφής. Η δραστηριότητα του μέσου εξαρτάται από τον βαθμό ανάδευσης. Η φθίνουσα δραστηριότητα των ψυκτικών μέσων είναι: αλατούχο υδατικό διάλυμα H_2O , τήγματα ή υγρά άλατα, διαλύματα λαδιών, καθαρά λάδια, ατμοσφαιρικός αέρας ή ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού με βάση το νερό, τόσο ελαττώνεται η ταχύτητα της ψύξης της επιφάνειας του μετάλλου. Αντίθετα, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία των λαδιών γίνονται πιο λεπτόρρευστα, και αυξάνεται η δραστηριότητά τους ως ψυκτικά μέσα.

Η ταχύτητα ανάδευσης επιδρά θετικά στην ταχύτητα απόψυξης, καταστρέφοντας το σχηματιζόμενο στρώμα ατμών. Τα δραστικά λουτρά προκαλούν μεγαλύτερες εσωτερικές τάσεις και ενδέχεται να προκαλέσουν τη ρηγμάτωση του χάλυβα, κατά τη βαφή.

Επαναφορά

Η βαφή του χάλυβα δίνει μαρτενσιτική μικροδομή. Ο μαρτενσίτης είναι ιδιαίτερα σκληρή και ψαθυρή φάση, εκτός ισορροπίας, η οποία εισάγει στο βαμμένο εξάρτημα υψηλές εσωτερικές τάσεις. Κατά συνέπεια αμέσως μετά την βαφή οι χάλυβες υφίστανται επαναφορά. Για την επαναφορά, οι βαμμένοι χάλυβες θερμαίνονται σε χαρακτηριστική θερμοκρασία $T(M_s < T < A_1)$ και για συγκεκριμένο χρόνο t (συνήθως μεταξύ μίας και δύο ωρών) και ψύχονται στον αέρα μέχρι την

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά την επαναφορά ο μαρτενσίτης μετασχηματίζεται σε φάσεις ισορροπίας. Η μικροδομή αυτή καλείται μαρτενσίτης από επαναφορά. Με τον τρόπο αυτό, σκληρότητα του χάλυβα ελαττώνεται, ενώ αυξάνεται η δυσθραυστότητα και βελτιώνεται η ολκιμότητά του. Οι δομές που λαμβάνονται κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη εξαρτώνται άμεσα από την θερμοκρασία και τον χρόνο της κατεργασίας.

3.4.3 Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες

Οι χάλυβες μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα έχουν μικρή αντοχή και σκληρότητα αλλά καλή πλαστικότητα και συνεκτικότητα, ενώ οι υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα το αντίθετο. Πολλά εξαρτήματα κατά την λειτουργία τους καλούνται να έχουν σκληρή επιφάνεια, ώστε να αντέχουν στην φθορά, και συγχρόνως ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και δυσθραυστότητα [23]. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων επιτυγχάνεται με συγκεκριμένες επιφανειακές θερμικές κατεργασίες. Οι επιφανειακές κατεργασίες των υλικών αποβλέπουν στην ενίσχυση της αντοχής των υλικών και αφορούν κυρίως την επιφανειακή σκλήρυνση.

Τεχνικές επιφανειακής σκλήρυνσης

- **Μηχανικές** (Σφαιροβολή, αμμοβολή, υαλοβολή κλπ., Κρουστικά κύματα Laser)
- **Θερμικές** (Βαφή: φλογοβαφή, επαγωγική επιφανειακή θέρμανση, με δέσμες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας)
- **Θερμοχημικές** (Ενανθράκωση, εναζώτωση, ενανθρακαζώτωση, κλπ.)

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.

Η ενανθράκωση είναι μία κατεργασία κατά την οποία η επιφανειακή στοιβάδα φτωχού σε άνθρακα χάλυβα (λιγότερο από 0,20% C) εμποτίζεται με άτομα άνθρακα. Κατά την κατεργασία αυτή ακολουθείται συνδυασμός θερμικών κατεργασιών για τη σκλήρυνση της επιφανειακής στοιβάδας του τεμαχίου και την εκλέπτυνση των κόκκων της επιφάνειας και του πυρήνα του (για αύξηση της δυσθραυστότητας)

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Κατά την ενανθράκωση, το χαλύβδινο εξάρτημα θερμαίνεται σε θερμοκρασία πλήρους ωστενιτοποίησης 900-950 ° C και εμποτίζεται επιφανειακά από άτομα άνθρακα. Αποτέλεσμά της είναι η αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα μίας επιφανειακής στοιβάδας. Στη συνέχεια, με κατάλληλη βαφή επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της σκληρότητας. Για την ενανθράκωση χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα στερεά, υγρά, ή αέρια.

Η ενανθράκωση εξαρτήματος συγκεκριμένου χάλυβα δημιουργεί επιφανειακό στρώμα πλούσιο σε άνθρακα (συνήθως πάνω από 0,8% C), ενώ συγχρόνως ο πυρήνας διατηρεί την αρχική του χημική σύσταση (συνήθως κάτω από 0,2% C). Η παρατεταμένη θέρμανση του χάλυβα στην υψηλή θερμοκρασία της ενανθράκωσης, συντελεί στην αύξηση του μεγέθους των κόκκων, με συνέπεια την ελάττωση της δυσθραυστότητας του τεμαχίου. Για τον λόγο αυτό, μετά την ενανθράκωση εκτελούνται μία σειρά από θερμικές κατεργασίες με σκοπό την εκλέπτυνση του πυρήνα. Αυτές οι θερμικές κατεργασίες είναι συνήθως επιβελτιώσεις διαφορετικών συνδυασμών.

3.4.3.1 Μέσα ενανθράκωσης

Στερεά μέσα ενανθράκωσης

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 CO_2 που αποτελούν το φορέα του C που διαχέεται στο επιφανειακό στρώμα. Μια τυπική σειρά αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την ενανθράκωση παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω [24]:



Υγρά μέσα ενανθράκωσης

Λουτρά τηγμάτων ανθρακούχων ενώσεων ($\text{Ba}(\text{CN})_2$, NaCN, Na_2CO_3) κατά τη θέρμανσή τους διασπώνται και επιτελείται η διάχυση των ατόμων C ως ανωτέρω (οι χημικές αντιδράσεις 3.1-3.5). Ως ενεργοποιητές της διεργασίας χρησιμοποιούνται χλωρίδια Na, Ba, Sr. Χρησιμοποιούνται στην ενανθράκωση αντικειμένων μικρών διαστάσεων, όπου απαιτείται μικρό βάθος εμποτισμού.

Αέρια μέσα ενανθράκωσης

Αποτελούνται από αέρια μίγματα H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_2H_6 . Κατά τη θέρμανση αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν τον απαραίτητο ελεύθερο C για την ενανθράκωση.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

3.4.3.2 Βάθος εμποτισμού

Το βάθος εμποτισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο ενανθράκωσης. Για δεδομένη θερμοκρασία, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$x = \sqrt{2Dt} \quad (\text{Σχέση 3.6})$$

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 εξαρτάται από το μέγεθος και την γεωμετρία του εξαρτήματος καθώς και από τις προσδοκώμενες ιδιότητες της επιφάνειας. Ο συντελεστής διάχυσης αυξάνεται με αύξηση του ποσοστού C.

Η εναζώτωση είναι η επιφανειακή κατεργασία κατά την οποία η επιφανειακή στοιβάδα 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, οι οποίοι ονομάζονται χάλυβες εναζωτώσεων. Μετά την εναζώτωση συνήθως δεν εφαρμόζονται θερμικές κατεργασίες.

Η ενδοκυάνωση κατά την οποία η επιφανειακή στοιβάδα του τεμαχίου εμποτίζεται με άνθρακα και άζωτο συγχρόνως. Μετά την ενδοκυάνωση ακολουθεί κατάλληλη θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

B' ΜΕΡΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Υλικό πειράματος

Το αντικείμενο της παρακάτω μελέτης αφορά συγκεκριμένες συνθήκες ενανθράκωσης σε χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN. Ο χάλυβας 15CrNi6 κατά DIN (AISI 3115, W.No 1.5919) ανήκει στην ομάδα των ελαφρώς κραματωμένων χαλύβων επιφανειακής βαφής – ενανθράκωσης. Η περιεκτικότητά του σε άνθρακα είναι χαμηλή (0,16%) και τα κύρια κραματοποιητικά στοιχεία το Cr και το Ni. Η χρήση του συναντάται σε κατασκευές που απαιτούν υψηλή επιφανειακή σκληρότητα και αντοχή στη φθορά και στην τριβή, ενώ διατηρούν παράλληλα πυρήνα καλής αντοχής. Χαρακτηριστικές εφαρμογές αποτελούν στοιχεία μηχανών ή εργαλείων διαμόρφωσης, όπως πύροι ακραξονίων, οδοντωτοί τροχοί κιβωτίων ταχυτήτων, δακτύλιοι ρουλμάν, σιαγόνες για τσοκ τόννου, κοχλίες εργαλειομηχανών, κλπ.

Το υλικό παραλαμβάνεται συνήθως σε ανοπτημένη κατάσταση ή κατόπιν μαλακτοποίησης για καλύτερη κατεργασιμότητα (170 – 235 HB). Είναι κατάλληλος για συγκόλληση τήξεως πριν από την ενανθράκωση και κατόπιν προθέρμανσης. Η βαφή και επαναφορά του χάλυβα σε θερμοκρασία 150 – 200 °C αυξάνει σημαντικά την αντοχή του, μειώνοντας ελάχιστα τη σκληρότητά του [25].

Για την μελέτη προμηθεύτηκε επαρκές υλικό σε ράβδους λείας επιφάνειας με διάμετρο 23mm. Οι ράβδοι προέρχονται από έλαση εν θερμώ (hot rolled steel bars) και έχουν παραδοθεί σε ανοπτημένη κατάσταση (annealed). Η εταιρία διέθεσε το υλικό συνοδευόμενο από πιστοποιητικό ποιότητας. Στο πιστοποιητικό αναφέρονται η ποιότητα και η χημική σύσταση του χάλυβα. Πρόκειται για χάλυβα 15CrNi6 βάσει του προτύπου DIN 10200-86 [26].

4.2 Σχεδιασμός πειράματος

Η εργασία έχει κύριο στόχο την μελέτη της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στην μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού στην περίπτωση που μετά την ενανθράκωση ακολουθεί συνεχής βαφή του σε λάδι. Για την διεκπεραίωση του πειράματος επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις ενανθράκωσης (ως προς την διάρκεια της) και διατηρήθηκαν σταθερές όλες οι υπόλοιπες συνθήκες θερμικών κατεργασιών που ακολούθησαν αυτής. Για σύγκριση, μια ομάδα δοκιμών υπέστη εξομάλυνση δομής, ως η συνηθέστερη κατάσταση διάθεσης πολλών χαλύβων αντίστοιχης ποιότητας. Οι δοκιμές εφαρμόστηκαν τόσο σε δοκίμια από εξομάλυνση καθώς και σε κατάσταση αγοράς. Για την κάθε περίπτωση προετοιμάστηκαν τέσσερα δοκίμια ώστε να είναι δυνατή η στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: Τυχαία επιλογή δειγμάτων

A/A (ΕΦΕΛΚ)	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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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						

Ο πίνακας 4.2 παρουσιάζει το πρόγραμμα των θερμικών κατεργασιών που εφαρμόστηκε για όλα τα δοκίμια.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά:

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Πίνακας 4.2: Πρόγραμμα θερμικών κατεργασιών

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΟΙΩΚΙΩΝ	ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ				ΒΑΦΗ			ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ			
		ΠΡΟΘΕΡΜΑΣΝΣΗ		ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ		ΩΣΤΕΝΙΤΟΠΟΙΗΣΗ		ΨΥΞΗ	ΘΕΡΜΑΝΣΗ		ΨΥΞΗ	
		T(C)	t(min)	T(C)	t(min)	T(C)	t(min)	ΜΕΣΟ	T(C)	t(min)	ΜΕΣΟ	ΜΕΣΟ
ΑΝΟΠΤΗΣΗ	29											
	23											
	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	43											
ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΔΟΜΗΣ	51											
	10					840	30	ΑΕΡΑΣ				
	12	-	-	-	-				-	-	-	-
	47											
	2											
	16	630	30	900	60	840	30	ΛΑΔΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	36											
	38											
	19											
	27	630	30	900	120	840	30	ΛΑΔΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	46											
	52											
	5											
	20	630	30	900	180	840	30	ΛΑΔΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	41											
	55											
	6											
	18	630	30	900	240	840	30	ΛΑΔΙ	180	120	ΑΛΑΤΙ	ΑΕΡΑΣ
	31											
	37											

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

4.3 Χημική Ανάλυση Υλικού

Κατά την επεξεργασία μετάλλων και κραμάτων πραγματοποιείται υποχρεωτικά ο ποιοτικός έλεγχος του υλικού σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας [27]. Η χημική ανάλυση αποτελεί έναν από τους ελέγχους οι οποίοι διεξάγονται απαραίτητος και ακολουθεί συγκεκριμένα πρότυπα. Σήμερα χρησιμοποιούνται διάφοροι μέθοδοι χημικής ανάλυσης, από τις οποίους η πιο διαδεδομένη είναι η φασματοσκοπική ανάλυση ατομικής εκπομπής.

Η φασματοσκοπία ατομικής εκπομπής αποτελεί 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.

Στην χημική ανάλυση μεταλλικών υλικών για μηχανολογικές εφαρμογές χρησιμοποιείται 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 των στοιχείων (ποιοτική ανάλυση) ταχτοποιείται 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 επιλέχτηκε ανάλυση με φασματοσκοπία 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).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Φασματογράφος Οπτικής Εκπομπής

Για την χημική ανάλυση προετοιμάστηκε κατάλληλα δοκίμιο από το υλικό εξέταση υλικό. Η επιφάνεια του δοκιμίου λειάνθηκε 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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Ο πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης του δοκιμίου ως μέσος όρος πέντε διαδοχικών μετρήσεων. Στον Πίνακα 4.4 διατυπώνεται η χημική ανάλυση του υλικού σε σύγκριση με την ονομαστική χημική ανάλυση του κατασκευαστή [28] και την τυπική χημική ανάλυση κατά το πρότυπο DIN 17210, αντίστοιχα [26].

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3: Η χημική ανάλυση υλικού σε κατάσταση παραλαβής

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	

ΠΙΝΑΚΑΣ 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:

Με βάση την χημική ανάλυση, διαπιστώνεται ότι το υλικό αντιστοιχεί σε χάλυβα 15CrNi 6 κατά DIN (W.Nr. 1.5919).

4.4 Διεξαγωγή πειράματος

Το βασικό πείραμα αναφέρεται σε συγκεκριμένες θερμικές κατεργασίες του υλικού. Οι θερμικές κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν στην εταιρία ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ-Uddeholm Χάλυβες ΑΕΒΕ υπό την εποπτεία του κ. Δ. Παπαγεωργίου.

Για την εξομάλυνση δομής μια ομάδα δοκιμών υπέστη θέρμανση για ωστενιτοποίηση σε φούρνο τετηγμένων αλάτων για το απαραίτητο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια ψύξη στον αέρα. Για την ενανθράκωση αρχικά, όλα τα δοκίμια υπέστησαν προθέρμανση, για το απαραίτητο χρονικό διάστημα, σε κλίβανο τύπου pit type. Στη συνέχεια, τα δοκίμια εισήχθησαν σε κλίβανο τύπου τετηγμένων αλάτων για την ενανθράκωση. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε υγρό τήγμα αποτελούμενο από μείγμα αλατιών GS750,

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

CECONTROL 110B και GS540. Αρχικά τοποθετήθηκε μια ομάδα δοκιμών, μετά από μια ώρα μια δεύτερη ομάδα, μετά από δυο ώρες μια τρίτη και μετά από τρεις ώρες μια τέταρτη ομάδα. Κατά αυτόν τον τρόπο διασφαλίστηκαν παρόμοιες συνθήκες ενανθράκωσης με διαφορετικό χρόνο. Μετά από την ενανθράκωση, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον κλίβανο ωστενιτοποίησης βάσει του προγράμματος θερμικών κατεργασιών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε συνεχής βαφή σε λάδι και κατάλληλη επαναφορά.

4.5 Επιλογή δειγμάτων

Μετά τις θερμικές κατεργασίες διαμορφώθηκαν κατάλληλα δοκίμια και πραγματοποιήθηκε ανάλυση της μικροδομής (για την οποία χρησιμοποιήθηκαν μεταλλογραφική) και εκτίμηση μηχανικών ιδιοτήτων (όπως η μέτρηση σκληρότητας, μικροσκληρότητας και η δοκιμή κρούσης).

4.5.1 Κοπή των ράβδων (1° Στάδιο)

Οι ράβδοι κόπηκαν με παλινδρομικό πριόνι τύπου S.N.40 C με αριθμό παραγωγής 084010970095 με λάμα κοπής 500-38-0,2 εφελκυστικού τύπου με 4 οδόντες ανά ίντσα (Εικόνα 4.3).



ΕΙΚΟΝΑ 4.3: Παλινδρομικό πριόνι κοπής

4.5.2 Μηχανουργική κατεργασία (2° Στάδιο)

Οι ράβδοι υπέστησαν μηχανουργική κατεργασία σε τόρνο για τελικές διαστάσεις: διάμετρο 18mm και μήκος 260mm. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τέσσερα πάσα ξεχονδρίσματος (0,75 mm κάθε πάσο, 1500 rpm) και τέσσερα πάσα φινιρίσματος (0,5 mm κάθε πάσο και 2500 rpm). Επίσης πραγματοποιήθηκε λείανση των επιφανειών με λειαντικά χαρτιά P320 και P600 διαδοχικά. (Εικόνα 4.5).

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σελίδα 56

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 4.4: Επεξεργασία δοκιμών σε τόρνο



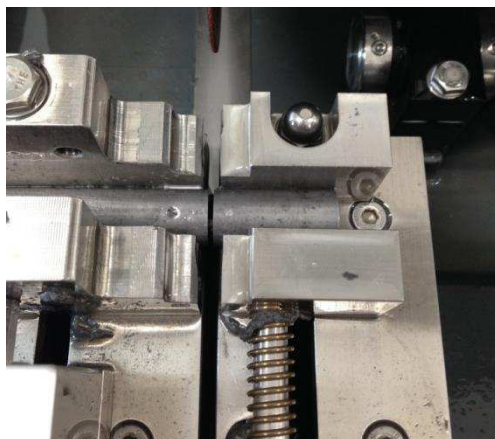
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: Ράβδοι θερμικών κατεργασιών

4.5.3 Τεμαχισμός και επιλογή δειγμάτων (3^ο Στάδιο)

Με το πέρας των θερμικών κατεργασιών, οι ράβδοι τεμαχίστηκαν στο κοπτικό μηχάνημα του εργαστηρίου τύπου 5326146 Lobotom-3 Struers , Type 05326146 και S.No.5321698.(Εικόνα 4.6).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 4.6: Κοπή των δοκιμίων σε κοπτικό Labotom-3

Από την άκρη αφαιρέθηκε ένα τεμάχιο μήκους 20 mm. 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.



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

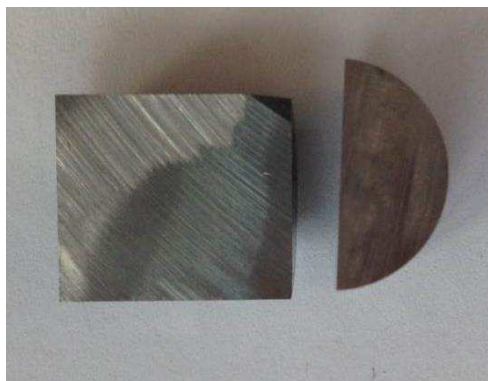
Από μια βέργα της τετράδας αφαιρέθηκε από την άκρη μια φέτα 40 mm και στη συνέχεια κόπηκε ένα δοκίμιο 20 mm (Εικόνα 4.8). Το δοκίμιο κόπηκε στο διαμήκη άξονα και λήφθηκαν δυο δείγματα (Εικόνα 4.9). Το ένα χρησιμοποιήθηκε για μεταλλογραφική ανάλυση δομής και στερεοσκόπιο και το δεύτερο για την μέτρηση σκληρότητας/μικροσκληρότητας.



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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 4.9: Τεμαχισμός των δοκιμών για την ανάλυση στην διαμήκη διατομή

4.5.4 Εγκιβωτισμός δειγμάτων (4^ο Στάδιο)

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



ΕΙΚΟΝΑ 4.10: Εγκιβωτισμένα δοκίμια.

Έπειτα έγινε επιλογή των δοκιμών 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 L.

4.5.5 Προετοιμασία δοκιμών για μεταλλογραφική ανάλυση (5^ο Στάδιο)

Μετά τον εγκιβωτισμό όλα τα δοκίμια προετοιμάστηκαν κατάλληλα για την μεταλλογραφική ανάλυση.

Πραγματοποιήθηκε λείανση χρησιμοποιώντας κατά σειρά λειαντικά χαρτιά (P80, P120, P180, P240, P320, P600, P800, P1000 και P1200) στα

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

μηχάνηματα του εργαστηρίου Struers (250 rpm), MecaPol (350 rpm) και Boehler (350 rpm). Στη συνέχεια ακολούθησε η στίλβωση. Πρώτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε μετάξι, στο μηχάνημα MecaPol, με 150 rpm και χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνας 6 μm . Δεύτερο πάσο πραγματοποιήθηκε σε βελούδο, στο μηχάνημα Struers, με 250 rpm χρησιμοποιώντας αιώρημα αλουμίνας 3 μm . Τρίτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε βελούδο, στο μηχάνημα Struers, με 250 rpm και χρησιμοποιήθηκε αιώρημα αλουμίνας 1 μm . Τέταρτο πάσο πραγματοποιήθηκε σε τσόχα, στο μηχάνημα Böhler, με 150 rpm χρησιμοποιώντας αιώρημα αλουμίνας 0,25 μm . Μετά από κάθε πάσο οι επιφάνειες ξεπλένονταν με jet αιθανόλης, σκουπίστηκαν με βαμβάκι και στεγνώθηκαν με σεσουάρ. Τέλος πραγματοποιήθηκε χημική προσβολή με Nital 3%.

4.5.6 Προετοιμασία δοκιμών για τον έλεγχο δυσθραυστότητας (6^ο Στάδιο)

Για την δοκιμή δυσθραυστότητας, προετοιμάστηκαν τυποποιημένα δοκίμια, τετραγωνικής 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

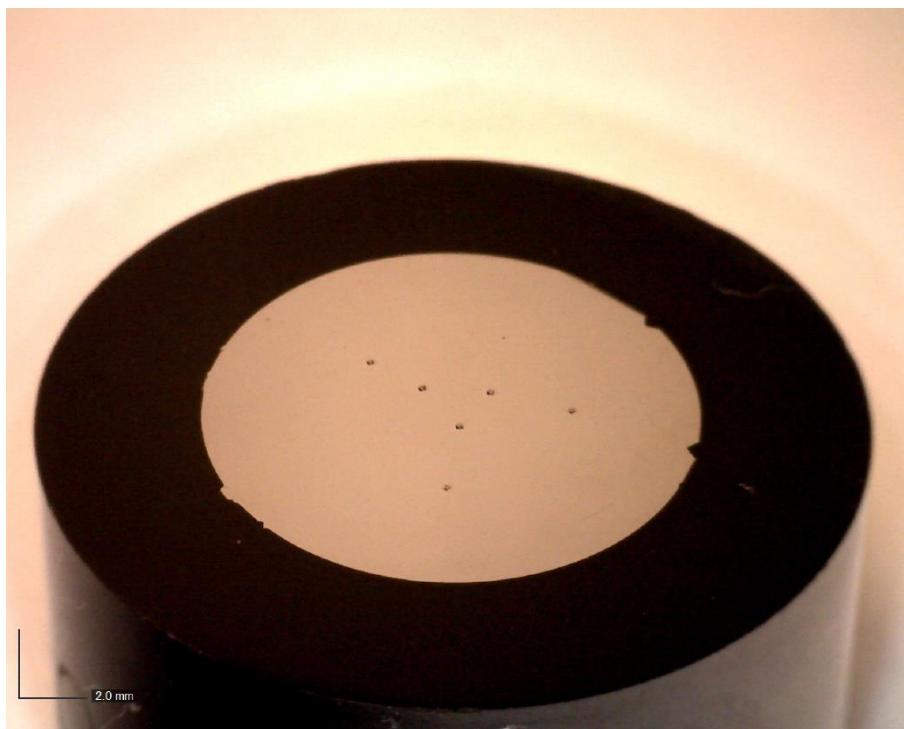
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Εξετάσθηκε η επιρροή του χρόνου ενανθράκωσης στην σκληρότητα του υλικού. Για την σκληρομέτρηση εφαρμόσθηκε η μέθοδος δοκιμής Vickers με φορτίο 30 kP, βάσει του προτύπου ASTM [29]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών (Π.Ε.Τ.Υλ.) του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. με τη χρήση σκληρόμετρου τύπου ALPHA DUROMATIC, model 25850, με αριθμό κατασκευής: 2026. Προηγήθηκε έλεγχος του οργάνου σύμφωνα με το πρότυπο.

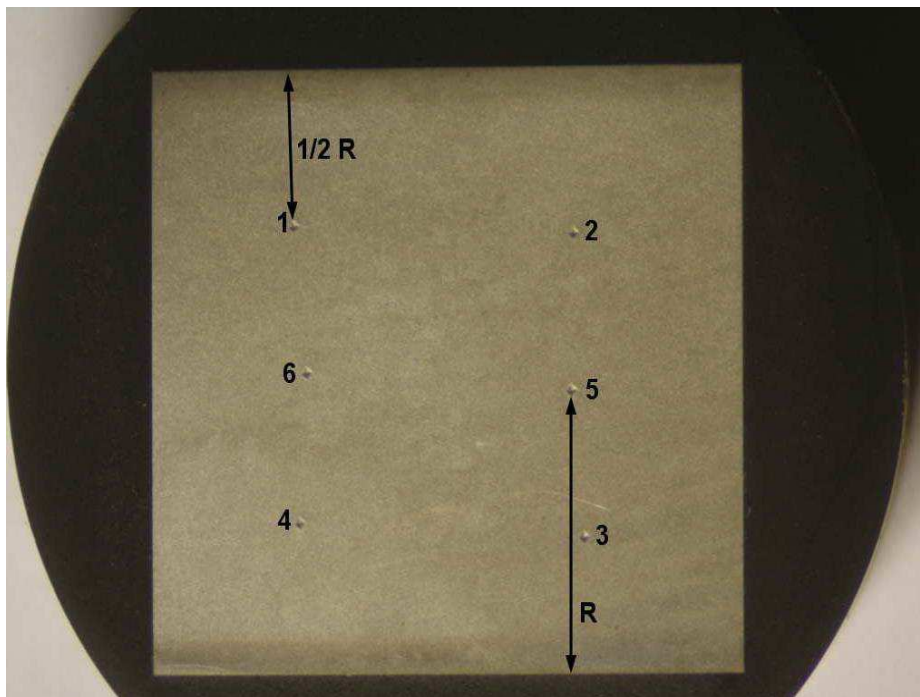
Τα αποτυπώματα εξετάσθηκαν στο οπτικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων φακών του εργαστηρίου Π.Ε.Τ.Υλ., τύπου Metalvert της Leica, στην μεγέθυνση x100. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι δοκιμίων από κάθε ομάδα θερμικής κατεργασίας. Στο ένα δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν σκληρομετρήσεις στη διατομή της ράβδου και στο άλλο δοκίμιο σε τομή κατά άξονα της ράβδου. Λήφθηκαν μετρήσεις στο $\frac{1}{2}$ της ακτίνας της διατομής και στο κέντρο της ανά 120°. Τα σημεία μέτρησης απεικονίζονται παρακάτω στις Εικόνες 5.1 και 5.2 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.



ΕΙΚΟΝΑ 5.1: Σημεία μέτρησης σκληρότητας στην εγκάρσια διατομή της ράβδου

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 5.2: Σημεία μέτρησης σκληρότητας στην διαμήκη διατομή της ράβδου

Για τη στατιστική εκτίμηση της σκληρότητας υπολογίζεται[30]:

- η μέση τιμή: $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$ (5.1)

- η τυπική απόκλιση: $S = \sqrt{S^2}$, όπου $S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$ (5.2)

- επί του 95% διάστημα εμπιστοσύνης: $t_{0,975,5} \frac{S}{\sqrt{n}}$, (5.3)
όπου t συντελεστής Student

- το πεδίο τιμών: $\delta = \bar{\mu} \pm t_{0,975,5} \frac{S}{\sqrt{n}}$ (5.4)

και οι τιμές αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: Τιμές σκληρότητας στην εγκάρσια διατομή της ράβδου

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (HV30)					
		1/2R			ΚΕΝΤΡΟ		
		1	2	3	4	5	6
ΑΝΟΠΤΗΣΗ	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
ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗ ΔΟΜΗΣ	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
1 ΩΡΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	2	454.1	441.4	441.4	441.4	429.3	441.4
	16	481.2	481.2	495.7	467.4	495.7	481.2
	36	481.2	495.7	481.2	467.4	495.7	481.2
	38	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	467.4
2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	19	454.1	454.1	454.1	429.3	429.3	429.3
	27	495.7	481.2	481.2	481.2	467.4	481.2
	46	429.3	429.3	429.3	417.6	429.3	406.4
	52	429.3	454.1	429.3	406.4	417.6	417.6
3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	5	481.2	481.2	481.2	385.3	467.4	467.4
	20	481.2	481.2	467.4	467.4	467.4	454.1
	41	429.3	441.4	429.3	429.3	406.4	429.3
	55	406.4	406.4	406.4	485.3	485.3	485.3
4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	6	481.2	495.7	481.2	454.1	454.1	454.1
	18	481.2	441.4	441.4	406.4	406.4	406.4
	31	481.2	510.9	495.4	454.1	454.1	454.1
	37	495.7	481.2	510.3	495.7	495.7	481.2

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2: Τιμές σκληρότητας στην διαμήκη διατομή της ράβδου

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ (HV30)					
		1/2R				ΚΕΝΤΡΟ	
		1	2	3	4	5	6
ΑΝΟΠΤΥΣΗ	43	222.5	222.5	222.5	231.7	218.1	227.0
1 ΩΡΑ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	38	495.7	510.9	495.7	495.7	481.2	481.2
2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	19	454.1	454.1	481.2	467.4	429.3	429.3
3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	5	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2	481.2
4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	31	481.2	481.2	495.7	454.1	454.4	454.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3: Εκτίμηση της μεταβολής σκληρότητας HV30 συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης σε διαφορετικά σημεία του μετάλλου βάσης[31]

ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ		ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (HV30)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΠΕΔΙΟ ΤΙΜΩΝ (ΔΙΑΣΤΗΜΑ ΕΜΠΙΣΤΟΣΥΝΗΣ 95%)
1 ΩΡΑ	1/2R	24	474,8	18,6	(463,0 - 486,5)
	ΚΕΝΤΡΟ	24	469,2	21,6	(455,6 - 482,8)
2 ΩΡΕΣ	1/2R	24	451,8	23,8	(436,8 - 466,7)
	ΚΕΝΤΡΟ	24	434,4	27,0	(417,4 - 451,3)
3 ΩΡΕΣ	1/2R	24	449,4	32,8	(428,8 - 470,0)
	ΚΕΝΤΡΟ	24	434,4	27,0	(417,4 - 451,3)
4 ΩΡΕΣ	1/2R	24	483,2	22,4	(469,3 - 497,2)
	ΚΕΝΤΡΟ	24	451,4	31,5	(431,5 - 471,2)

Κατόπιν υπολογισμού, δίδεται το εύρος της σκληρότητας του υλικού με αξιοπιστία 95%:

Για 1 ώρα ενανθράκωση

- ½ της ακτίνας από την επιφάνεια: $463,0 \leq H \leq 486,5$ HV30
- στο κέντρο του υλικού: $455,6 \leq H \leq 482,8$ HV30

Για 2 ώρες ενανθράκωση

- ½ της ακτίνας από την επιφάνεια: $436,8 \leq H \leq 466,7$ HV30

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- στο κέντρο του υλικού: $417,4 \leq H \leq 451,3$ HV30

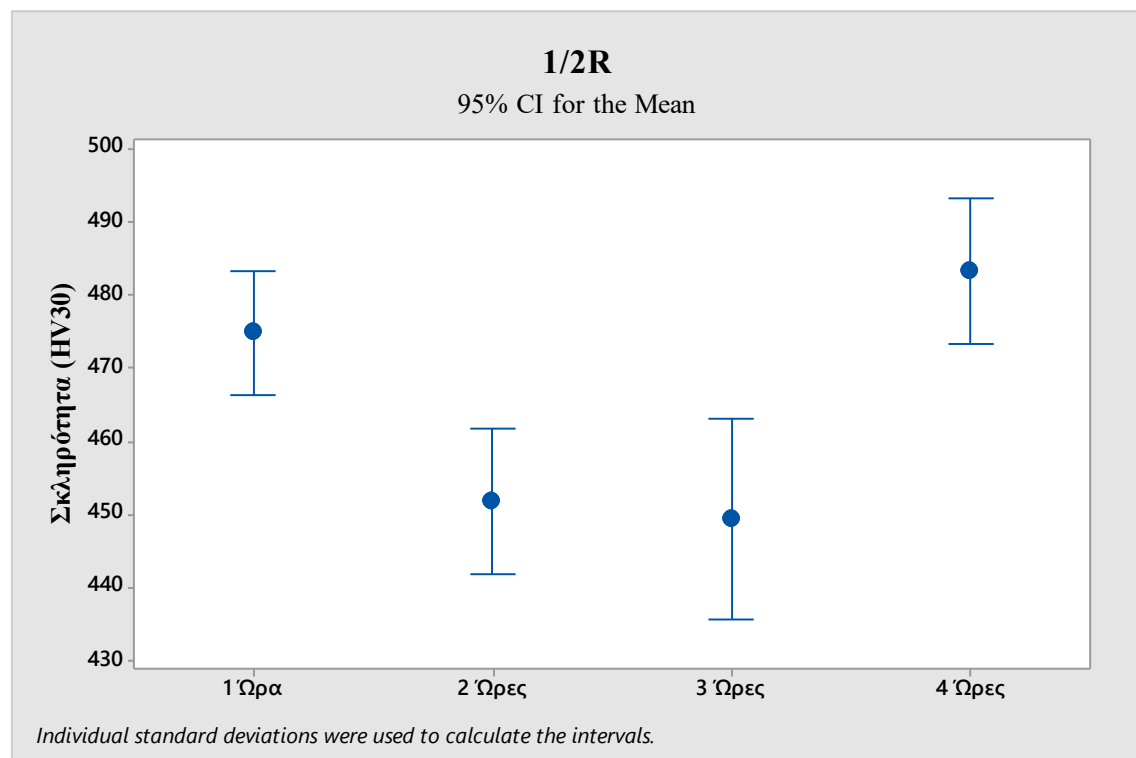
Για 3 ώρες ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $428,8 \leq H \leq 470,0$ HV30
- στο κέντρο του υλικού: $417,4 \leq H \leq 451,3$ HV30
-

Για 4 ώρες ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $469,1 \leq H \leq 497,2$ HV30
- στο κέντρο του υλικού: $431,5 \leq H \leq 471,2$ HV30

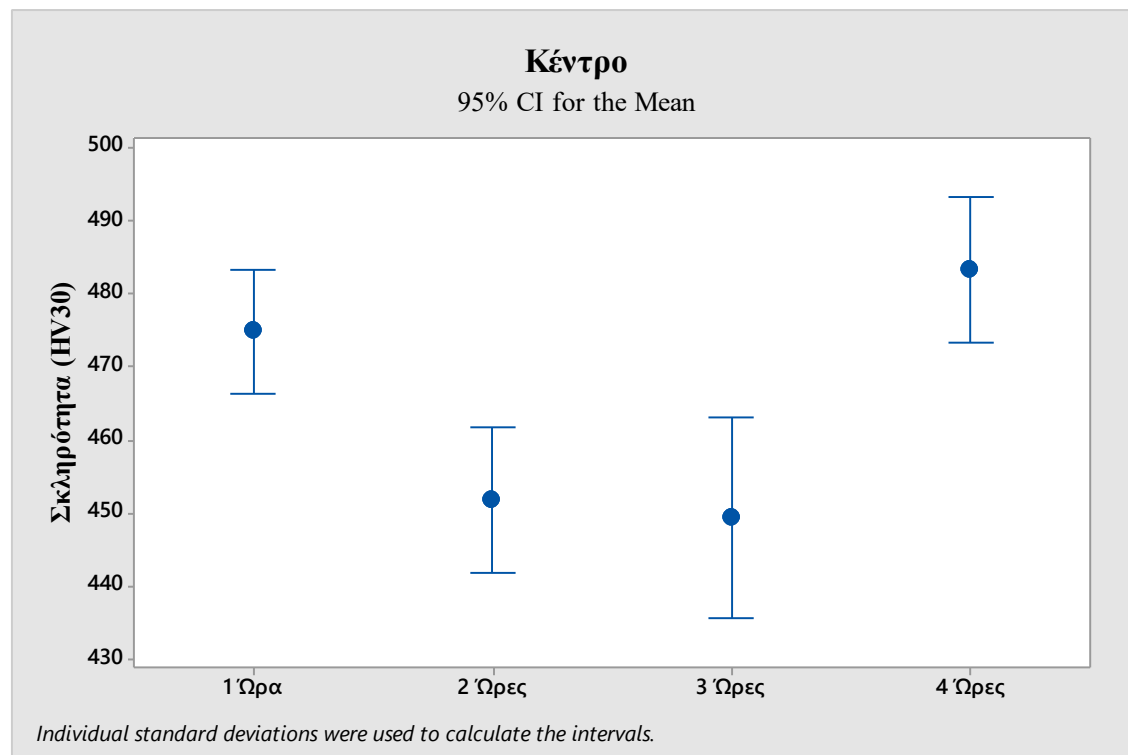
Με βάση το μέσο όρο σκληρότητας σε κάθε δοκίμιο σε σχέση με τον χρόνο ενανθράκωσης, το διάστημα εμπιστοσύνης που προέκυψε με αξιοπιστία 95%, εξετάστηκε η επιρροή του χρόνου ενανθράκωσης στην σκληρότητα του υλικού μακριά από την περιοχή της ενανθράκωσης (Εικόνες 5.3 – 5.4).



ΕΙΚΟΝΑ 5.3: Κατανομή σκληρότητας στο $\frac{1}{2}$ της ακτίνας του δοκιμίου, συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 5.4: Κατανομή σκληρότητας στο κέντρο του δοκιμίου, συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Από τα διαγράμματα των εικόνων 5.3 και 5.4 στο μισό της ακτίνας και στο κέντρο παρατηρείται:

- μείωση της σκληρότητας μέχρι παραμονής στη θερμοκρασία ενανθράκωσης για δύο ώρες (20 HV30) και σταθεροποίησή της μέχρι τις τρεις ώρες. Απεικονίζεται αύξηση της τιμής σκληρότητας κατά 30 HV30 για την περίπτωση ενανθράκωσης τεσσάρων ωρών.
- Δοθέντος του γεγονότος ότι οι μετρήσεις έχουν ληφθεί στο 1/2 της ακτίνας και στο κέντρο, δεν έχει λάβει χώρα η ενανθράκωση. Η διαφορά των 30HV (περίπου 3 HRC) αφορά κυρίως τη συμπεριφορά της μικροδομής του υλικού.
- Η θερμική ακολουθία την οποία υπόκειται ο προς μελέτη χάλυβας έχει ως συνέπεια την ύπαρξη τριών διαφορετικών φάσεων στη μικροδομή. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το τασικό πεδίο που δημιουργείται στα δοκίμια λόγω της δραστηκότητας του μέσου απόψυξης αυξάνει την πολυπλοκότητα του φαινομένου και μόνο η μεταβολή της σκληρότητας δεν είναι αρκετή ώστε να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα.
- η διασπορά των τιμών και στις τέσσερις περιπτώσεις κρίνεται ικανοποιητική σε σχέση με τον τρόπο παρασκευής του χάλυβα, την αναμενόμενη μικροδομή, το ληφθέν δείγμα και το ζητούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Συγκριτικά:

- η μεταβολή της σκληρότητας στο κέντρο της διατομής μεταβάλλεται κατά το ίδιο μοτίβο με την μέση της ακτίνας, 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 αναμένεται να ήταν μεγαλύτερη.
- και στις δύο περιπτώσεις, ήμισυ ακτίνας και κέντρο, οι μεταβολές της σκληρότητας λόγω χρόνου παραμονής στην θερμοκρασία ενανθράκωσης είναι ακριβώς οι ίδιες, ακόμη και στην τάξη μεγέθους, γεγονός που σημαίνει ότι ο ίδιος μηχανισμός λαμβάνει χώρα στη μεταβολή της σκληρότητας.
- το εύρος των τιμών σκληρότητας στο ήμισυ της ακτίνας καθώς και στο κέντρο, ανεξαρτήτως του χρόνου ενανθράκωσης, βρίσκονται στην περιοχή όπου τα κράματα χάλυβα διαθέτουν την μέγιστη ολκιμότητά τους. Έτσι ο συγκεκριμένος χάλυβας ανεξαρτήτως χρόνου ενανθράκωσης (μέχρι τέσσερις ώρες) διαθέτει την μέγιστη ικανότητα ελαστικής παραμόρφωσης στο εσωτερικό της διατομής του.
- Παρατηρείται βαθμιαία αύξηση του εύρους σκληρότητας μεταξύ χρόνου παραμονής μιας, δύο και τριών ωρών ενανθράκωσης αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη τάση είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της αύξησης της ανομοιογένειας του υλικού οφειλόμενη στην αύξηση του χρόνου παραμονής στη θερμοκρασία ενανθράκωσης.

Για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων σε βιομηχανικές εφαρμογές πραγματοποιήθηκε μετατροπή των τιμών από HV σε HRC βάσει προτύπου ASTM [32]. Η σκληρότητα του υλικού διαμορφώνεται ως:

Για 1 ώρα ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $46,4 \leq H \leq 48,2$ HRC
- στο κέντρο του υλικού: $45,8 \leq H \leq 47,9$ HRC

Για 2 ώρες ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $44,2 \leq H \leq 46,7$ HRC
- στο κέντρο του υλικού: $42,5 \leq H \leq 45,4$ HRC

Για 3 ώρες ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $43,5 \leq H \leq 46,9$ HRC
- στο κέντρο του υλικού: $42,5 \leq H \leq 45,4$ HRC

Για 4 ώρες ενανθράκωση

- $\frac{1}{2}$ της ακτίνας από την επιφάνεια: $46,9 \leq H \leq 48,9$ HRC
- στο κέντρο του υλικού: $43,8 \leq H \leq 47,0$ HRC

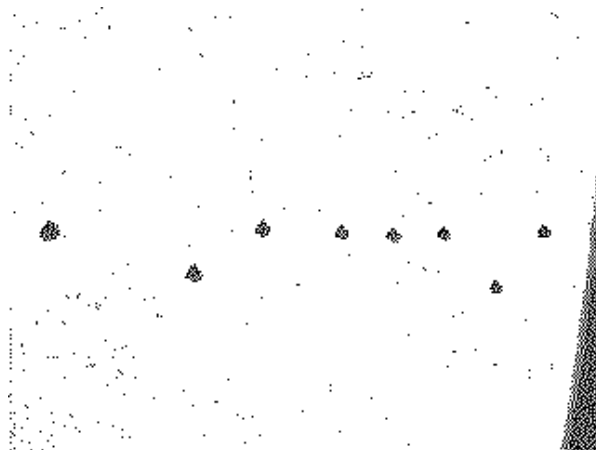
Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σελίδα 67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

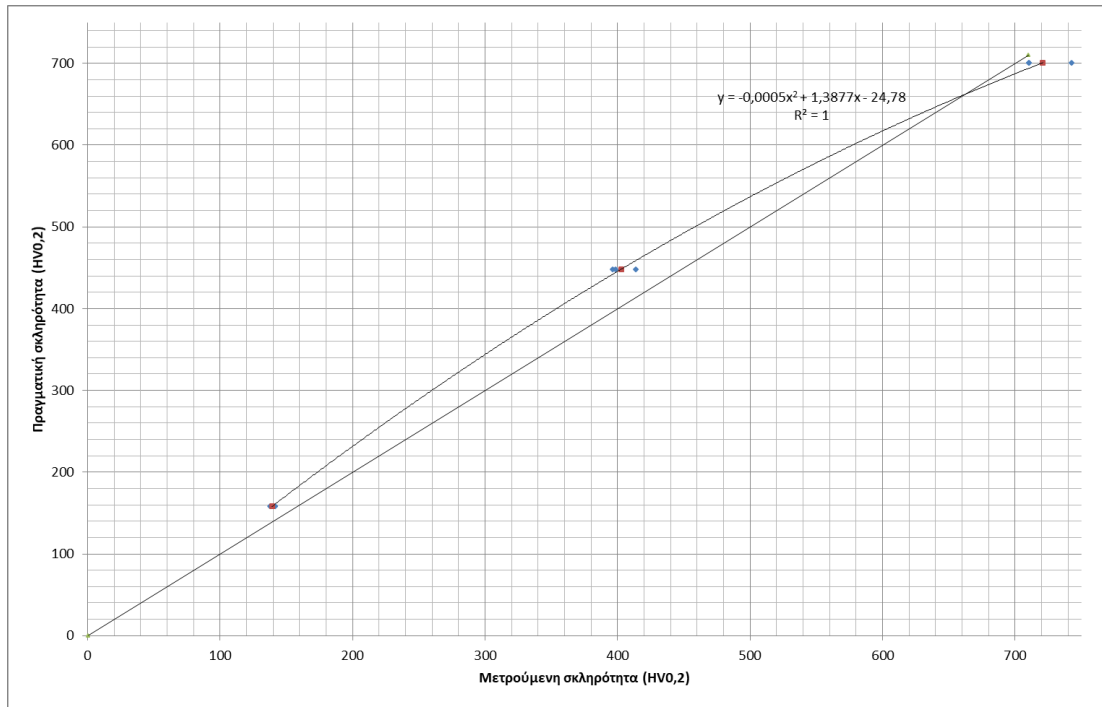
Για την διερεύνηση της επιφανειακής κατεργασίας σκλήρυνσης και της επιρροής του χρόνου ενανθράκωσης στο βάθος εμποτισμού σε άνθρακα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής στο μικροσκληρόμετρο Shimadzu, Type- M. (S/N 341-64278). Εφαρμόστηκε φορτίο 200gr για χρόνο 15 sec. Το αποτύπωμα εκτιμήθηκε σε συνολική μεγέθυνση x400. Η δοκιμή μικροσκληρότητας πραγματοποιήθηκε βάσει προτύπου ASTM E 384-11 [29]. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σε εγκάρσια διατομή από κάθε ράβδο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικά σημεία της διατομής, 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 σε βιομηχανικό επίπεδο. Ειδικότερα, τα δύο απαιτούμενα προφίλ μικροσκληρότητας λήφθηκαν αντιδιαμετρικά αντί εντός κυκλικού τόξου μήκους 1,5 mm. Επίσης, ο υπολογισμός του ενεργού βάθους έγινε ξεχωριστά σε κάθε προφίλ και όχι ως η μέση τιμή τους (διαφορά μικρότερη του 0,1mm) [33]. Επιπροσθέτως, για λόγους ομοιογένειας των αποτελεσμάτων, οι μετρήσεις μικροσκληρότητας έγιναν με το ίδιο βάρος φόρτισης ανεξαρτήτως βάθους ενανθράκωσης (βάθη ενανθράκωσης μικρότερα των 0,3mm μετρούνται με βάρος 1kp) Για την διευκόλυνση στη μελέτη των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μετατροπή των τιμών σε HRC [32,34]. Δημιουργήθηκε καμπύλη βαθμονόμησης του μικροσκληρομέτρου και έγινε διόρθωση των μετρήσεων (Εικόνα 6.2). 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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 6.2: Καμπύλη βαθμονόμησης μικροσκληρομέτρου

❖ 1 Ωρα ενανθράκωση

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	2	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	529,2	51,0
			100	0,100	490,0	48,3
			120	0,120	513,7	49,9
			200	0,200	484,2	47,8
			300	0,300	464,9	46,4
			400	0,400	438,8	44,3
			800	0,800	426,5	43,2
		ΔΕΞΙΑ	70	0,070	521,3	50,5
			150	0,150	497,2	48,8
			250	0,250	463,5	46,3
			350	0,350	460,8	46,1
			500	0,500	445,1	44,8
			1000	1,000	459,5	46,0
			1500	1,500	452,9	45,4
	16	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	545,2	52,0
			100	0,100	573,8	53,8
			120	0,120	529,2	51,0
200			0,200	512,1	49,8	
300			0,300	491,4	48,4	
400			0,400	498,7	48,9	
800			0,800	488,5	48,2	
1500			1,500	-	-	

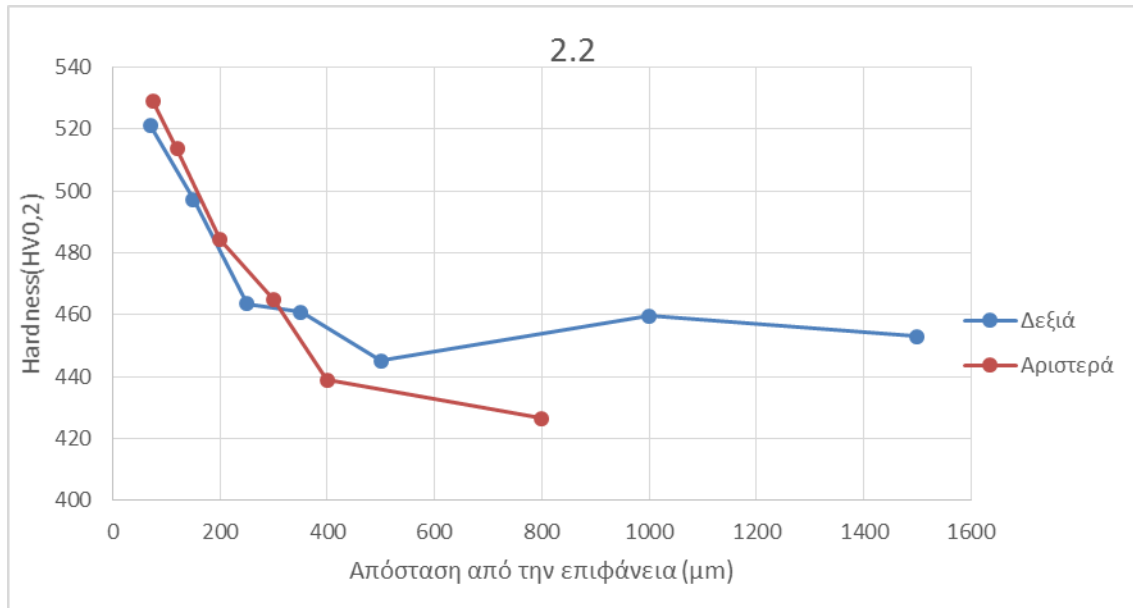
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

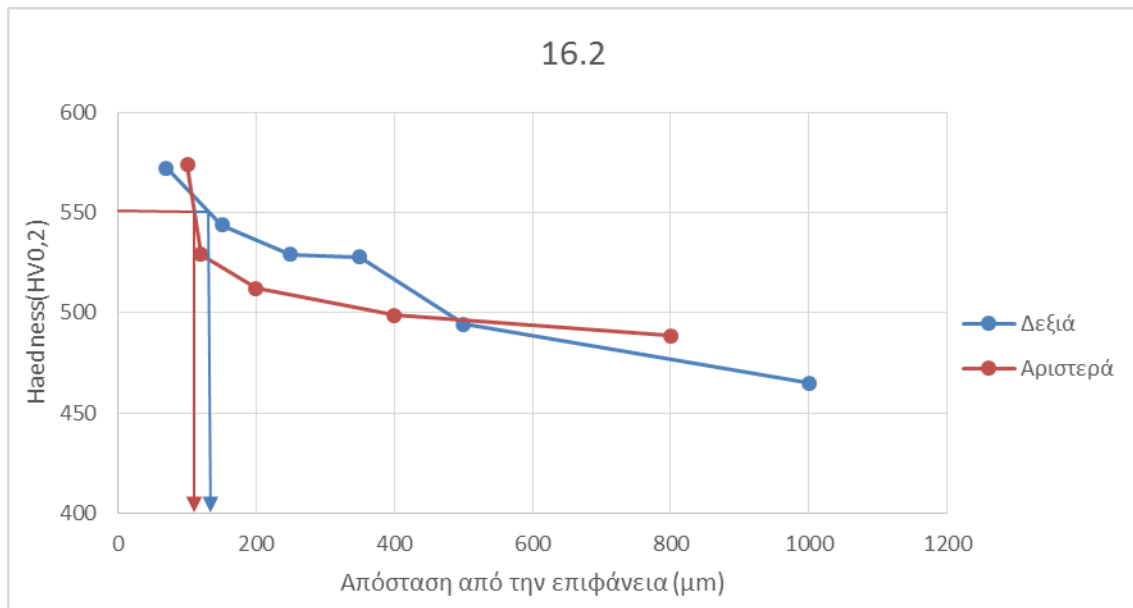
	ΔΕΞΙΑ	70	0,070	572,1	53,7	
		150	0,150	543,6	51,9	
		250	0,250	529,2	51,0	
		350	0,350	527,6	50,9	
		500	0,500	494,3	48,6	
		1000	1,000	464,9	46,4	
		1500	1,500	487,1	48,0	
	36	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	551,8	52,4
			100	0,100	551,8	52,4
			120	0,120	540,3	51,7
			200	0,200	513,7	49,9
			300	0,300	527,6	50,9
			400	0,400	504,6	49,3
			800	0,800	497,2	48,8
		1500	1,500	492,8	48,5	
		ΔΕΞΙΑ	70	0,070	561,8	53,1
			150	0,150	530,7	51,1
			250	0,250	530,7	51,1
			350	0,350	494,3	48,6
			500	0,500	494,3	48,6
			1000	1,000	481,4	47,6
	38		ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	580,8
		100		0,100	512,1	49,8
		120		0,120	580,8	54,2
		200		0,200	553,5	52,5
		300		0,300	526,0	50,8
		400		0,400	540,3	51,7
800		0,800		495,8	48,7	
1500		1,500	494,3	48,6		
ΔΕΞΙΑ		70	0,070	526,0	50,8	
		150	0,150	516,7	50,1	
		250	0,250	484,2	47,8	
		350	0,350	482,8	47,7	
		500	0,500	477,2	47,3	
		1000	1,000	470,3	46,8	

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



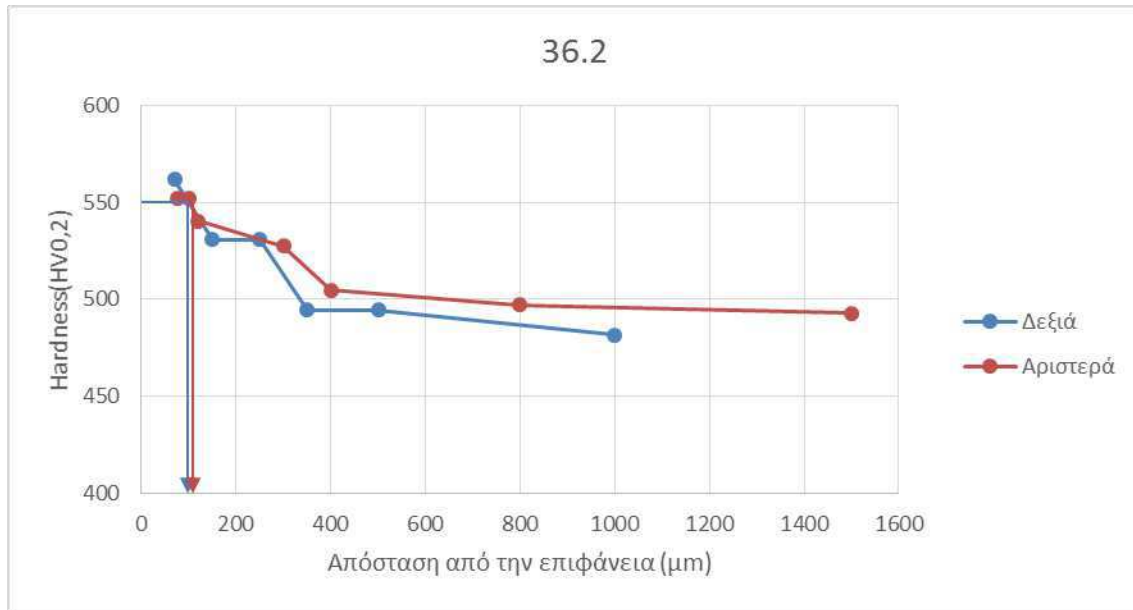
Εικόνα 6.3: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 2.2



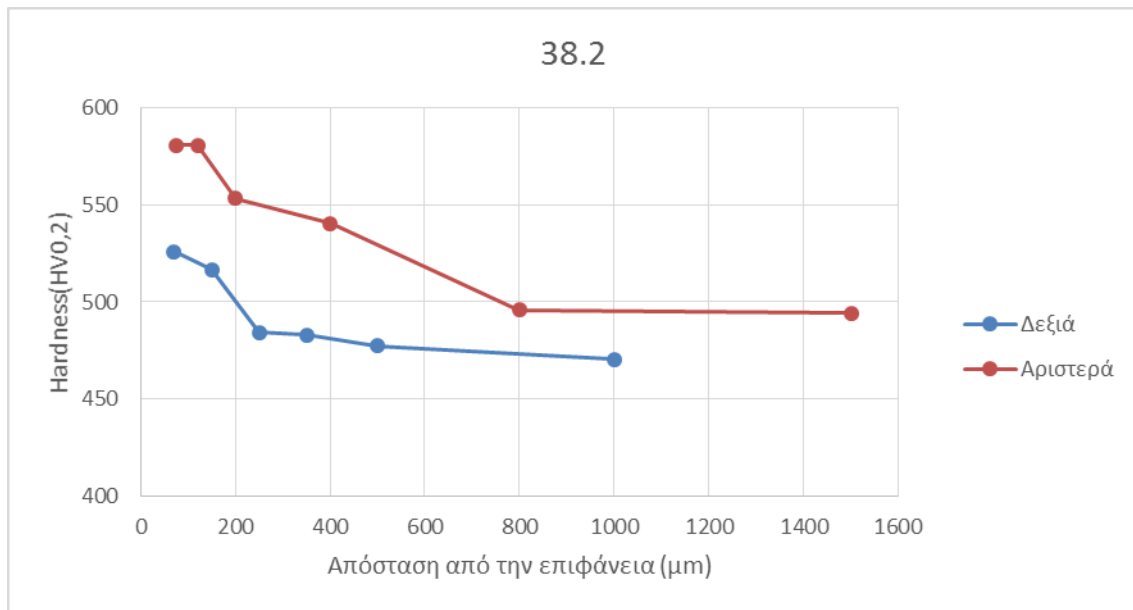
Εικόνα 6.4: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 16.2

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Εικόνα 6.5: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 36.2



Εικόνα 6.6: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 38.2

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	-	-

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Συμπεράσματα:

Μία ώρα ενανθράκωση:

- ο υπολογισμός του ενεργού βάθους δεν είναι δυνατός σε όλα τα δοκίμια λόγω του ανεπαρκή χρόνου ενανθράκωσης. Εκτιμάται, όπου αυτό είναι δυνατό, ίσο με 100-130μm
- σε βάθος 75-100μm από την επιφάνεια, παρατηρείται εύρος σκληρότητας το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 520-580HV_{0,2} (50,5 – 54,2 HRC), με κυρίαρχη τάση τα 540HV_{0,2} (52 HRC). Η απόκλιση σχετίζεται κυρίως με το γεγονός του μικρού χρόνου ενανθράκωσης. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,30% κατά προσέγγιση [35].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος περίπου 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι ομοιογενής και κυμαίνεται από 460-490HV_{0,2} (46-48 HRC).

❖ 2 Ώρες ενανθράκωσης

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

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV _{0,2}	HRC
2 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	19	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	605,9	55,6
			100	0,100	602,2	55,4
			120	0,120	600,4	55,3
			200	0,200	586,1	54,5
			300	0,300	548,5	52,2
			400	0,400	494,3	48,6
			500	0,500	501,6	49,1
		1000	1,000	440,1	44,4	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	560,2	53,0
			150	0,150	524,5	50,7
			250	0,250	507,6	49,5
			350	0,350	492,8	48,5
			450	0,450	478,6	47,4
			800	0,800	433,8	43,9
	27	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	628,3	56,8
			100	0,100	620,7	56,4
			120	0,120	624,5	56,6
200			0,200	579,0	54,1	
300			0,300	553,5	52,5	
400			0,400	516,7	50,1	
500			0,500	504,6	49,3	
1000			1,000	494,3	48,6	

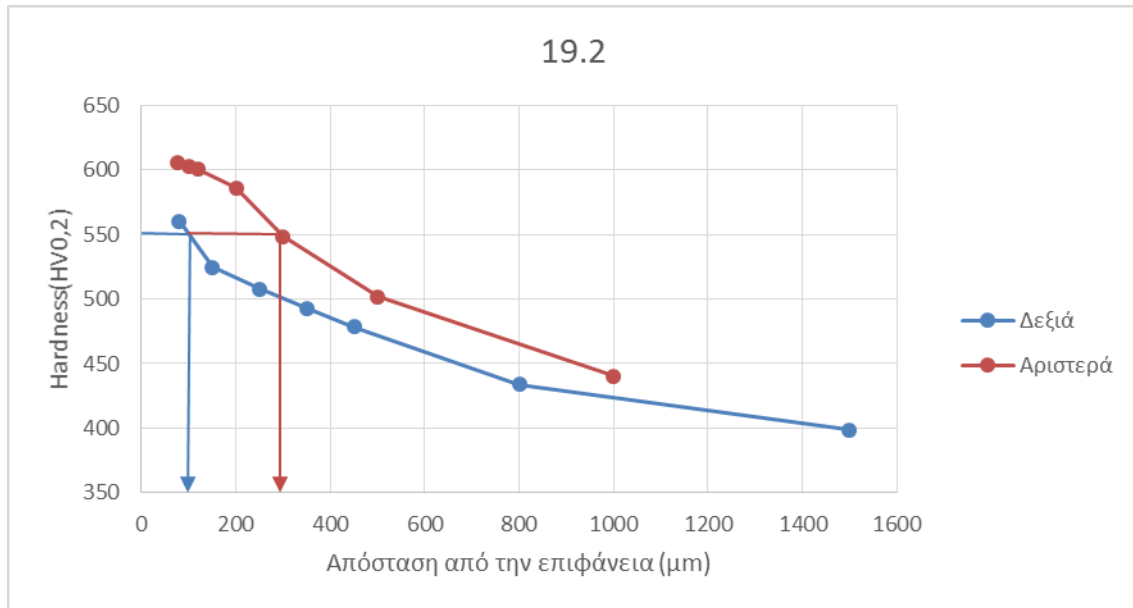
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

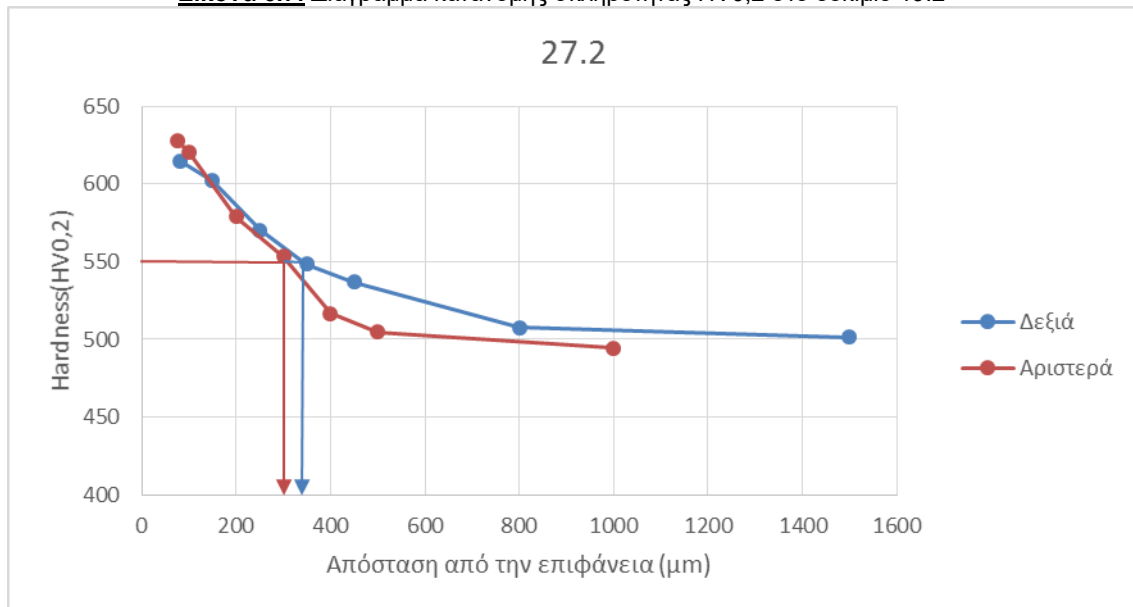
	ΔΕΞΙΑ	80	0,080	615,1	56,1	
		150	0,150	602,2	55,4	
		250	0,250	570,4	53,6	
		350	0,350	548,5	52,2	
		450	0,450	537,1	51,5	
		800	0,800	507,6	49,5	
		1500	1,500	501,6	49,1	
	46	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075		
			100	0,100	937,9	67,8
			150	0,150	914,5	67,3
			200	0,200	880,8	66,4
			260	0,260	518,3	50,2
			400	0,400	522,9	50,6
			500	0,500	492,8	48,5
		1000	1,000	456,8	45,7	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080		
			180	0,180	715,0	60,9
			200	0,200	573,8	53,8
			350	0,350	495,8	48,7
			450	0,450	474,4	47,1
			800	0,800	446,4	44,9
1500	1,500		466,2	46,5		
52	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	587,8	54,6	
		100	0,100	607,7	55,7	
		120	0,120	563,5	53,2	
		200	0,200	550,1	52,3	
		300	0,300	497,2	48,8	
		400	0,400	495,8	48,7	
		500	0,500	482,8	47,7	
	1000	1,000	421,7	42,8		
	ΔΕΞΙΑ	80	0,080	609,6	55,8	
		150	0,150	566,9	53,4	
		250	0,250	560,2	53,0	
		350	0,350	503,1	49,2	
		450	0,450	485,7	47,9	
		800	0,800	615,1	56,1	
1500		1,500	506,1	49,4		

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



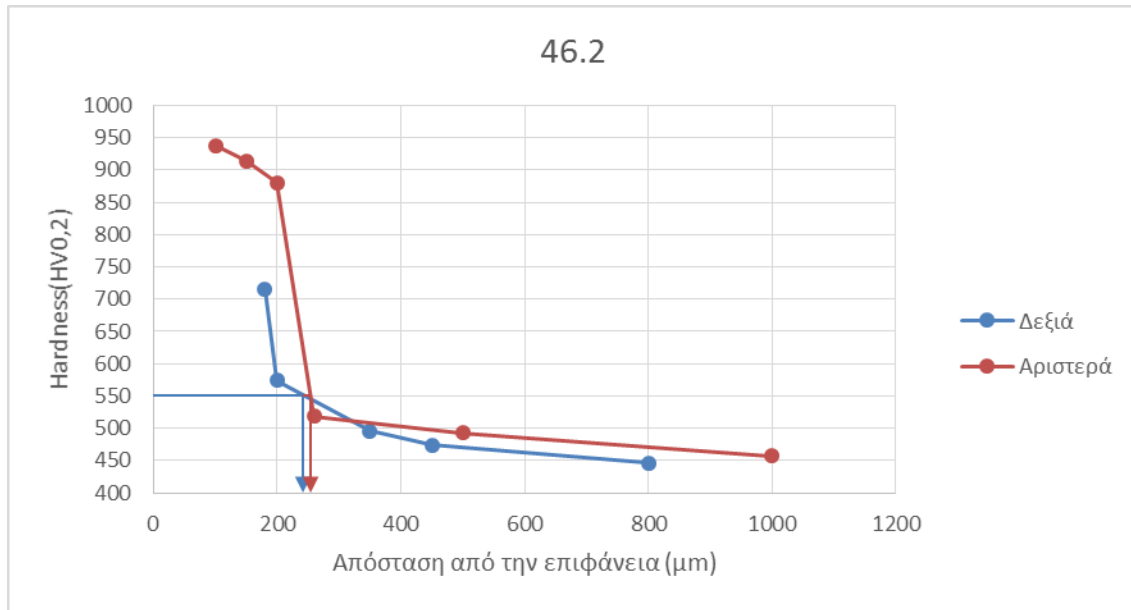
Εικόνα 6.7: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 19.2



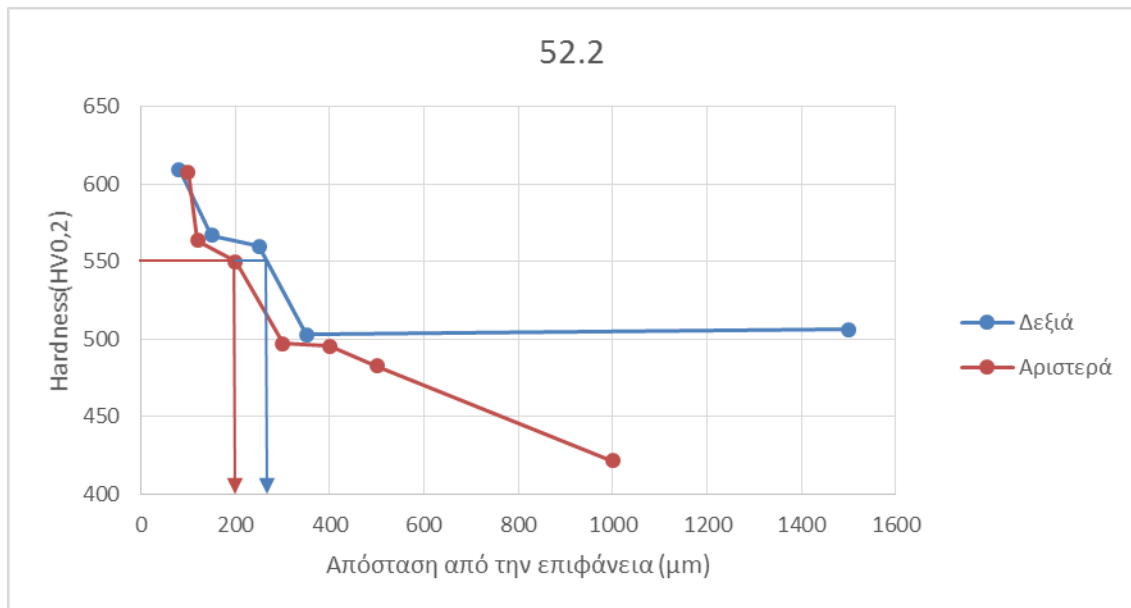
Εικόνα 6.8: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 27.2

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 46.2



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 52.2

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Δύο ώρες ενανθράκωσης:

- Το ενεργό βάθος υπολογίζεται από 260 έως 340μm.
- σε βάθος 75-100μm από την επιφάνεια, παρατηρείται ομοιογενές εύρος σκληρότητας το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 595-633HV_{0,2} (55 – 57 HRC), με κυρίαρχη τάση τα 595HV_{0,2} (55 HRC). Η σκληρότητα είναι κατά 50-70 HV_{0,2} μεγαλύτερη σε σχέση με την ενανθράκωση της μίας ώρας.
- Ο χρόνος των δύο ωρών δεν χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητικός για την εξασφάλιση ικανοποιητικού στρώματος ενανθράκωσης στους 900°C. Το ενεργό βάθος φτάνει περίπου τα 300μm. Έχει τριπλασιαστεί 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 0,40% κατά προσέγγιση [35].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου δεν είναι ομοιογενής και κυμαίνεται από 440-500HV_{0,2} (45-49 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).

❖ 3 Ωρες ενανθράκωσης

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

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV _{0,2}	HRC
3 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	5	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	681,7	59,4
			100	0,100	675,5	59,1
			120	0,120	681,7	59,4
			200	0,200	704,5	60,4
			300	0,300	732,1	61,6
			400	0,400	721,4	61,1
			500	0,500	689,9	59,8
			600	0,600	659,5	58,4
			800	0,800	538,7	51,6
		1500	1,500	481,4	47,6	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	715,0	60,9
			150	0,150	715,0	60,9
			250	0,250	694,0	60,0
			350	0,350	683,7	59,5
			450	0,450	659,5	58,4
			550	0,550	598,6	55,2
			700	0,700	533,9	51,3
			1000	1,000	500,2	49,0

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

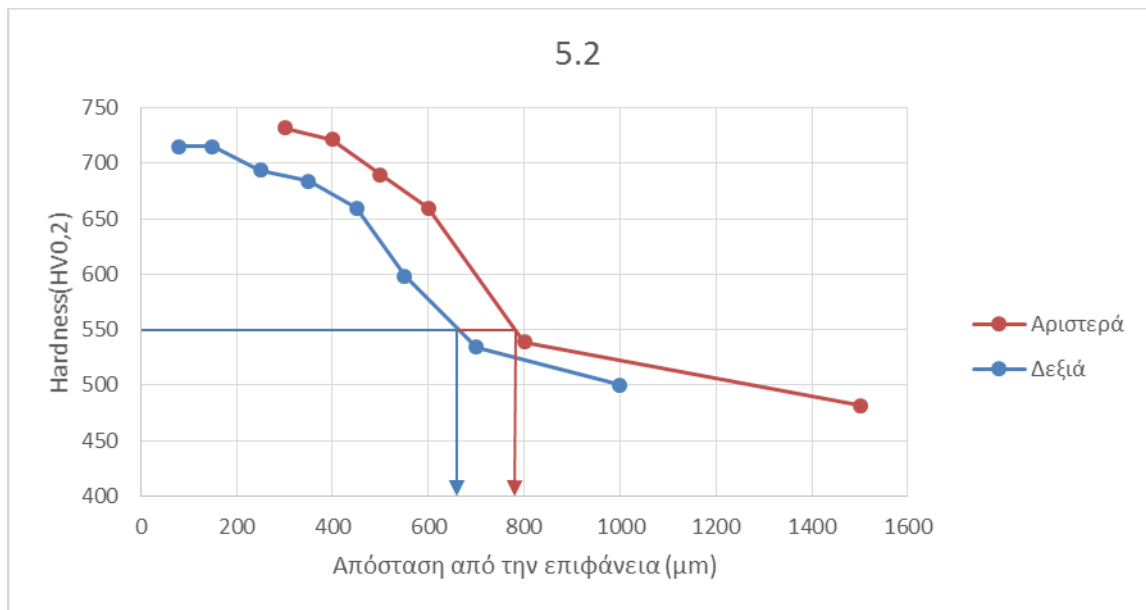
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

	20	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	685,8	59,6
			100	0,100	692,0	59,9
			120	0,120	657,5	58,3
			200	0,200	710,8	60,7
			300	0,300	734,2	61,7
			400	0,400	717,1	61,0
			500	0,500	683,7	59,5
			600	0,600	675,5	59,1
			800	0,800	560,2	53,0
			1500	1,500	498,7	48,9
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	698,2	60,2
			150	0,150	727,8	61,4
			250	0,250	729,9	61,5
			350	0,350	749,3	62,3
			450	0,450	723,5	61,2
	550		0,550	700,3	60,2	
	700		0,700	609,6	55,8	
	1000		1,000	537,1	51,5	
	41	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	655,5	58,2
			100	0,100	673,5	59,0
			120	0,120	657,5	58,3
			200	0,200	669,5	58,8
			300	0,300	692,0	59,9
			400	0,400	659,5	58,4
			500	0,500	622,6	56,5
			600	0,600	579,0	54,1
			800	0,800	481,4	47,6
			1500	1,500	384,5	39,4
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	679,6	59,3
			150	0,150	649,6	57,9
250			0,250	637,9	57,3	
350			0,350	628,3	56,8	
450			0,450	589,6	54,7	
550	0,550		540,3	51,7		
700	0,700		498,7	48,9		
1000	1,000		426,5	43,2		
55	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	677,6	59,2	
		100	0,100	669,5	58,8	
		120	0,120	653,5	58,1	
		200	0,200	700,3	60,2	
		300	0,300	706,6	60,5	
		400	0,400	702,4	60,3	
		500	0,500	700,3	60,2	
		600	0,600	620,7	56,4	

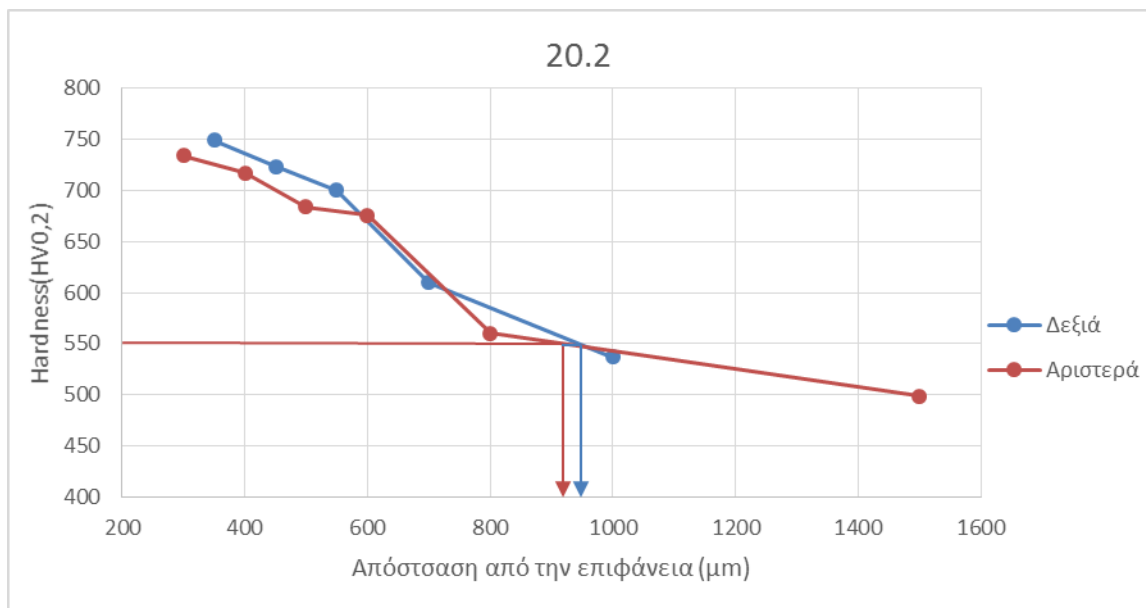
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΔΕΞΙΑ	800	0,800	533,9	51,3
	1500	1,500	431,4	43,6
	80	0,080	694,0	60,0
	150	0,150	692,0	59,9
	250	0,250	685,8	59,6
	350	0,350	647,6	57,8
	450	0,450	622,6	56,5
	550	0,550	598,6	55,2
	700	0,700	519,8	50,4
	1000	1,000	462,2	46,2



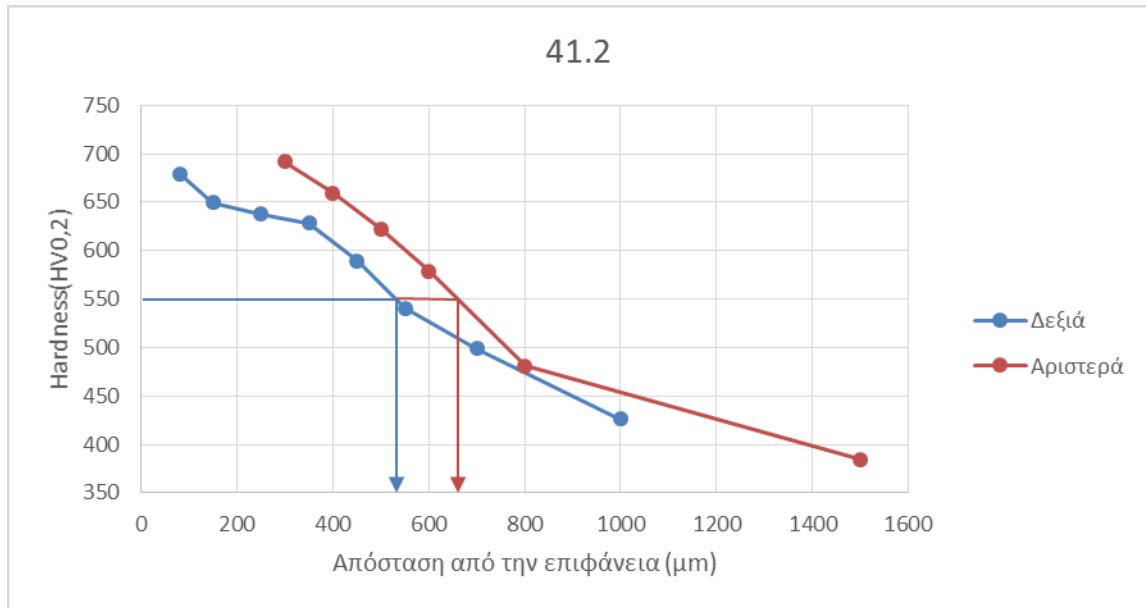
Εικόνα 6.11: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 5.2



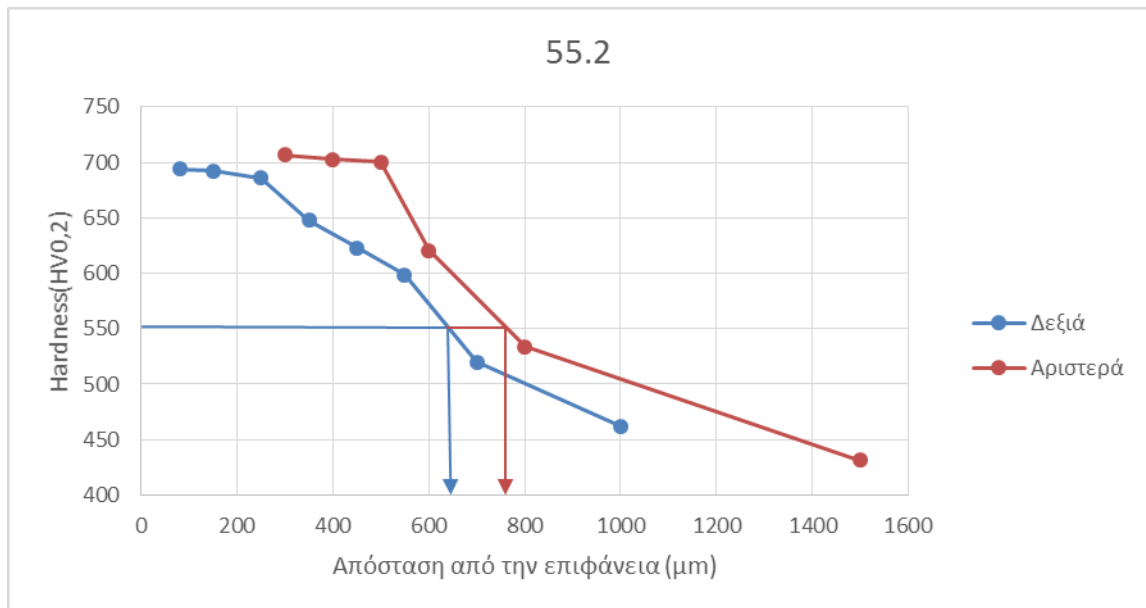
Εικόνα 6.12: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 20.2

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Εικόνα 6.13: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 41.2



Εικόνα 6.14: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 55.2

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Τρεις ώρες ενανθράκωση:

- Το ενεργό βάθος υπολογίστηκε από 650 έως 750μm. Οι τιμές αυτές αφορούν την κύρια τάση. Γενικά λήφθησαν τιμές από 530 έως 940μm γεγονός που αποτελεί παράγοντα ανομοιογένειας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάζεται η ομοιογένεια του στρώματος που δημιουργείται κατά την απόψυξη στο λάδι σε συνδυασμό με τη χρήση του συγκεκριμένου χάλυβα.
- σε βάθος 200-350μm από την επιφάνεια, παρατηρείται αύξηση της τιμής σκληρότητας το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 697-746HV_{0,2} (60 – 62 HRC), με κυρίαρχη τάση τα 708HV_{0,2} (60,5 HRC). Η σκληρότητα είναι κατά 170 HV_{0,2} μεγαλύτερη σε σχέση με την ενανθράκωση της μίας ώρας και 100 HV_{0,2} σε σχέση με αυτή των δύο ωρών. Η παρατηρούμενη διαφορά σκληρότητας οφείλεται εν μέρει σε μεγέθυνση κόκκων και εν μέρει στην εξανθράκωση.
- Ο χρόνος των τριών ωρών χαρακτηρίζεται ως επαρκής για την εξασφάλιση ικανοποιητικού στρώματος ενανθράκωσης στους 900°C. Το ενεργό βάθος φτάνει περίπου τα 700μm όταν η γενική απαίτηση είναι από 500μm έως 800μm. Έχει υπερδιπλασιαστεί σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για δύο ώρες, 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 0,60% κατά προσέγγιση [35].
- 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 420-500HV_{0,2} (43-49HRC). Έχει ενισχυθεί το άνω όριο σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για δύο ώρες με ευρεία διασπορά.
- 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).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

❖ **4 Ωρες ενανθράκωσης**

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

ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΠΕΡΙΟΧΗ	L(μm)	L(mm)	HV0,2	HRC
4 ΩΡΕΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ	6	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	717,1	61,0
			100	0,100	717,1	61,0
			120	0,120	719,2	61,0
			200	0,200	706,6	60,5
			300	0,300	696,1	60,1
			400	0,400	692,0	59,9
			500	0,500	649,6	57,9
			600	0,600	618,9	56,3
			700	0,700	591,4	54,8
			800	0,800	582,5	54,3
			1000	1,000	545,2	52,0
		1500	1,500	460,8	46,1	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	732,1	61,6
			150	0,150	717,1	61,0
			250	0,250	689,9	59,8
			350	0,350	692,0	59,9
			450	0,450	665,4	58,7
			550	0,550	639,8	57,4
	650		0,650	613,3	56,0	
	18	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	903,8	67,0
			100	0,100	-292,7	28,1
			120	0,120	832,0	65,1
			200	0,200	645,7	57,7
			300	0,300	609,6	55,8
			400	0,400	595,0	55,0
			500	0,500	545,2	52,0
			600	0,600	533,9	51,3
			700	0,700	488,5	48,2
800			0,800	488,5	48,2	
1000	1,000		451,6	45,3		
1500	1,500	435,1	44,0			
ΔΕΞΙΑ	80	0,080	909,5	67,2		
	150	0,150	934,9	67,7		

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

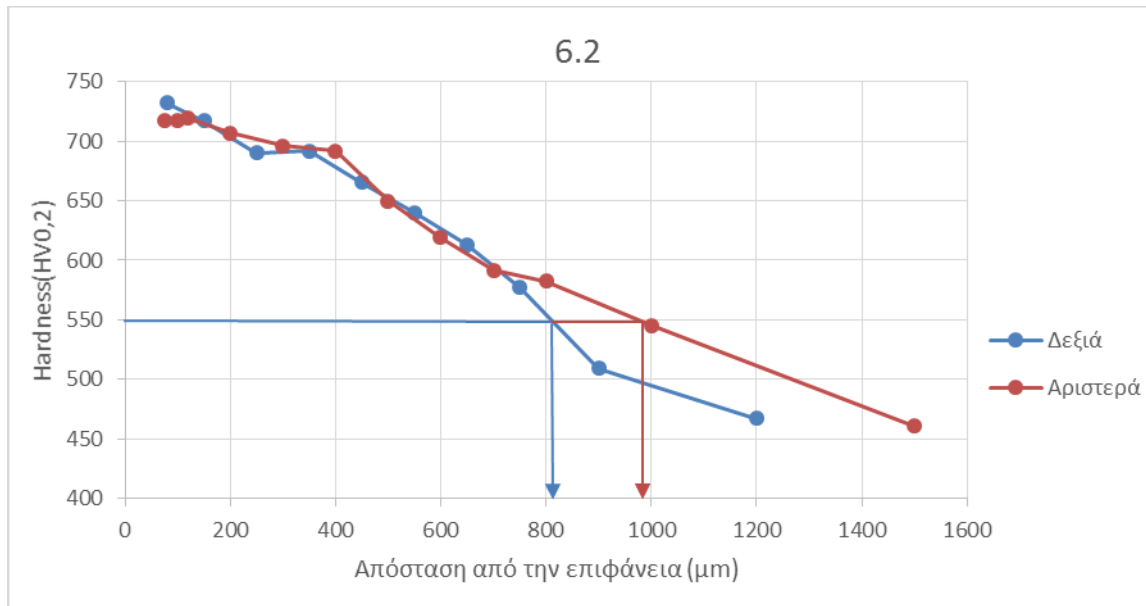
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

			250	0,250	736,4	61,7	
			350	0,350	602,2	55,4	
			450	0,450	591,4	54,8	
			550	0,550	579,0	54,1	
			650	0,650	529,2	51,0	
			750	0,750	480,0	47,5	
			900	0,900	485,7	47,9	
			1200	1,200	446,4	44,9	
	31	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	647,6	57,8	
			100	0,100	669,5	58,8	
			120	0,120	657,5	58,3	
			200	0,200	637,9	57,3	
			300	0,300	677,6	59,2	
			400	0,400	694,0	60,0	
			500	0,500	700,3	60,2	
			600	0,600	655,5	58,2	
			700	0,700	636,0	57,2	
			800	0,800	607,7	55,7	
			1000	1,000	513,7	49,9	
			1500	1,500	464,9	46,4	
		ΔΕΞΙΑ	80	0,080	647,6	57,8	
			150	0,150	630,2	56,9	
			250	0,250	628,3	56,8	
			350	0,350	659,5	58,4	
			450	0,450	661,4	58,5	
			550	0,550	651,5	58,0	
			650	0,650	645,7	57,7	
			750	0,750	613,3	56,0	
			900	0,900	551,8	52,4	
			1200	1,200	480,0	47,5	
			37	ΑΡΙΣΤΕΡΑ	75	0,075	696,1
100					0,100	712,9	60,8
120	0,120	696,1			60,1		
200	0,200	665,4			58,7		
300	0,300	671,5			58,9		
400	0,400	649,6			57,9		
500	0,500	628,3			56,8		
600	0,600	607,7			55,7		
700	0,700	579,0			54,1		
800	0,800	550,1			52,3		
1000	1,000	497,2			48,8		
1500	1,500	460,8			46,1		
ΔΕΞΙΑ	80	0,080		715,0	60,9		
	150	0,150		706,6	60,5		

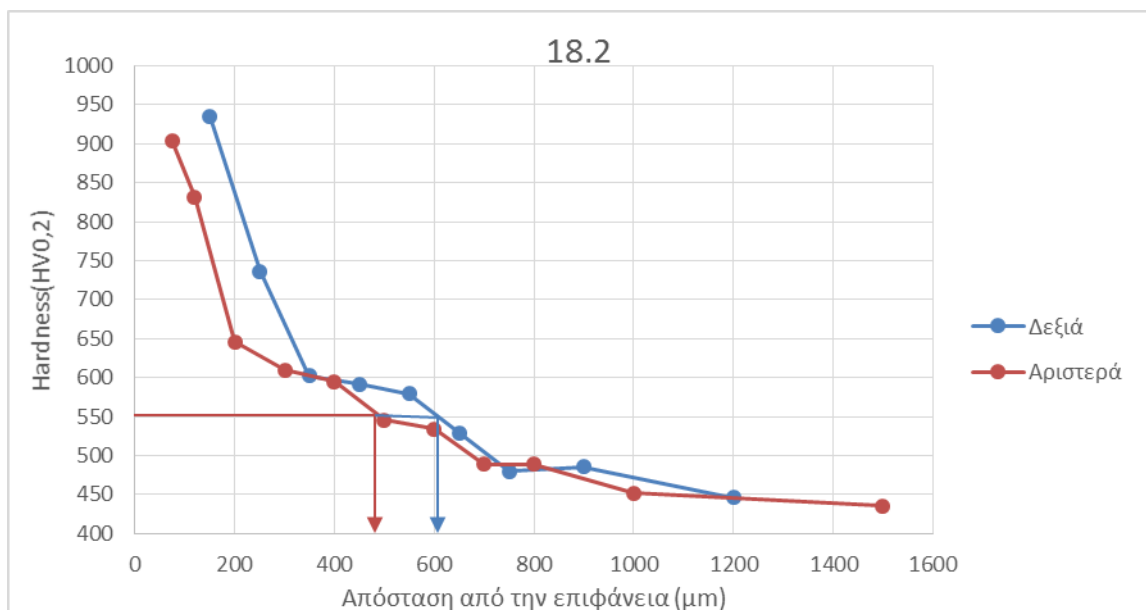
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

	250	0,250	704,5	60,4
	350	0,350	694,0	60,0
	450	0,450	681,7	59,4
	550	0,550	651,5	58,0
	650	0,650	611,4	55,9
	750	0,750	580,8	54,2
	900	0,900	516,7	50,1
	1200	1,200	475,8	47,2



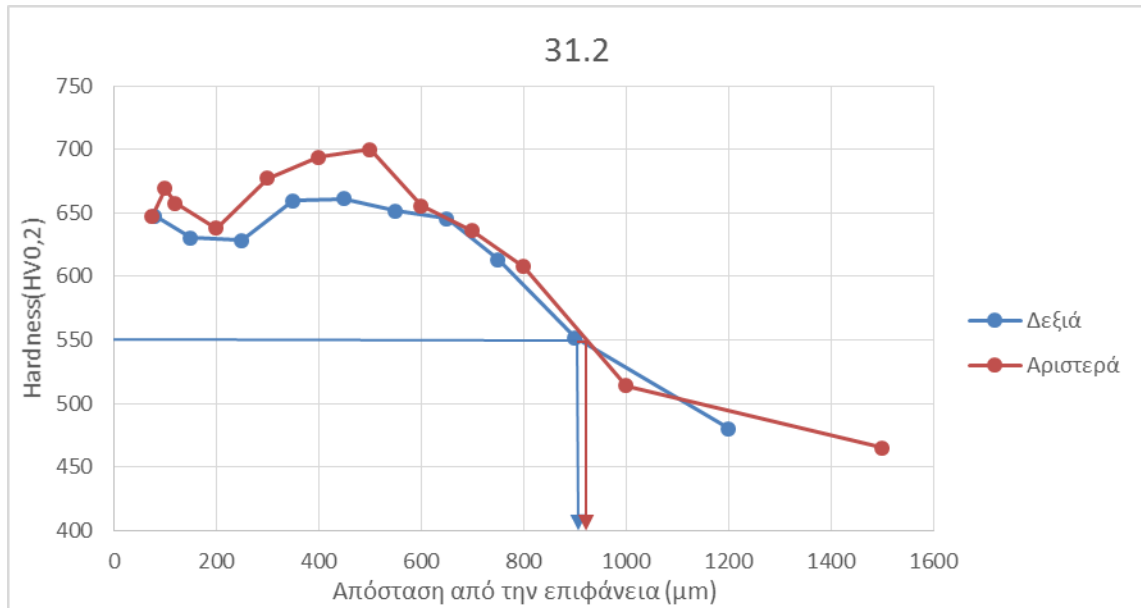
Εικόνα 6.14: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 6.2



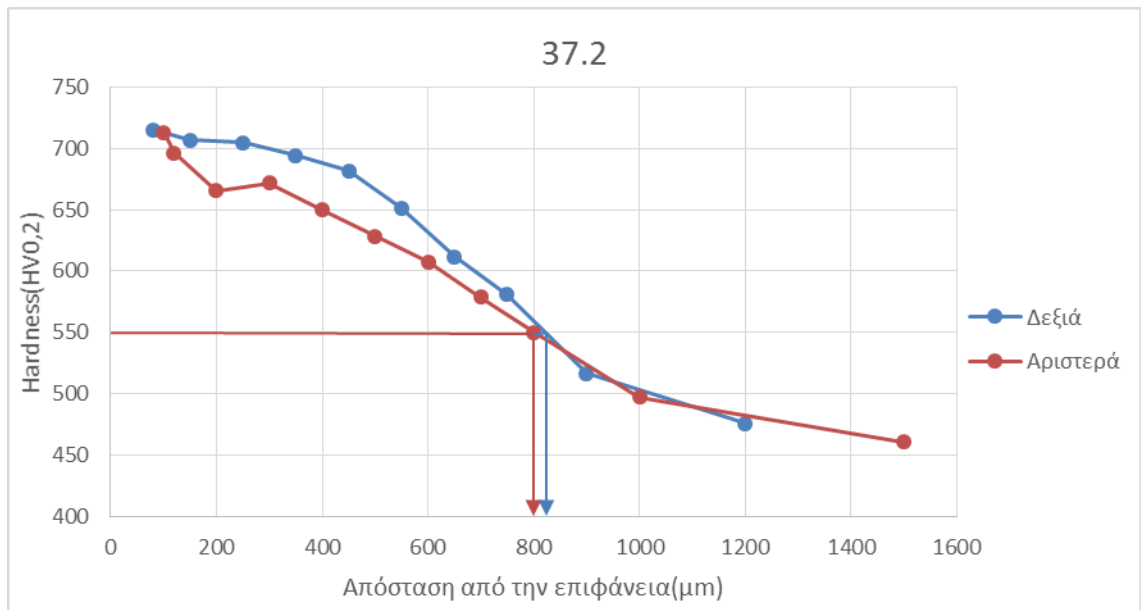
Εικόνα 6.15: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 18.2

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



Εικόνα 6.16: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 31.2



Εικόνα 6.17: Διάγραμμα κατανομής σκληρότητας HV0,2 στο δοκίμιο 37.2

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Τέσσερις ώρες ενανθράκωση:

- Το ενεργό βάθος υπολογίστηκε από 800 έως 920μm το οποίο κρίθηκε ομοιογενές.
- έως το βάθος των 350μm από την επιφάνεια, η σκληρότητα κυμαίνεται από 670-720HV_{0,2} (59 – 61 HRC) και σταδιακά έχει την τάση να μειώνεται. Το εύρος της σκληρότητας είναι παρόμοιο με αυτή των τριών ωρών ενανθράκωσης, αλλά παρατηρείται σταθεροποίησή της στη μέγιστη τιμή της σε μεγαλύτερο βάθος.
- Ο χρόνος των τεσσάρων ωρών χαρακτηρίζεται ως παρατεταμένος για την εξασφάλιση ικανοποιητικού στρώματος ενανθράκωσης στους 900°C. Το ενεργό βάθος φτάνει περίπου τα 900μm όταν η γενική απαίτηση είναι από 500μm έως 800μm. Έχει αυξηθεί κατά 200μm σε σχέση με την περίπτωση της ενανθράκωσης για τρεις ώρες, οφειλόμενη κυρίως στην αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα κατά το ενεργό βάθος. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα 0,60% κατά προσέγγιση [35].
- Η σκληρότητα του υποβάθρου (θεωρείται η σταθεροποιημένη τιμή σκληρότητας που προέκυψε κατά τη μικροσκληρομέτρηση σε μήκος 1 mm από την επιφάνεια του δοκιμίου) είναι ομοιογενέστερη από την περίπτωση των τριών ωρών και κυμαίνεται από 440-480HV_{0,2} (45-48HRC).
- Η χημική σύσταση του υλικού και το ποσοστό των κραματοποιητικών στοιχείων που διαθέτει, δικαιολογεί την σκλήρυνση σε αυτές τις τιμές ως ικανοποιητική (βρίσκεται στα συμβατικά όρια των δυνατοτήτων του υλικού).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΘΡΑΥΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

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

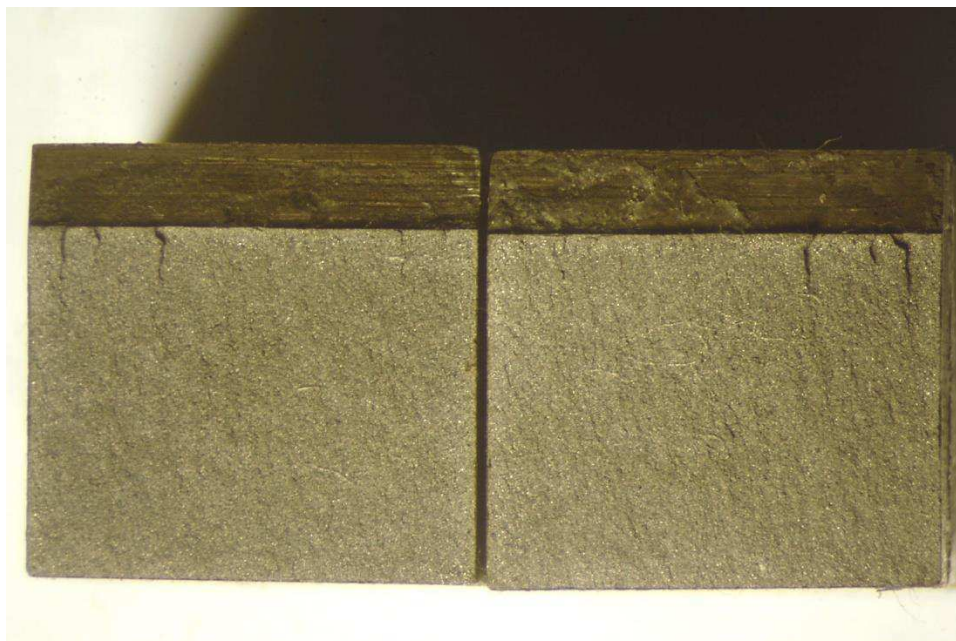
Χρησιμοποιήθηκαν οι επιφάνειες θραύσης επιλεγμένων δοκιμών που προέκυψαν από την δοκιμή Charpy - V. Για την εξέταση χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό στερεοσκόπιο τύπου Leica MZ6, S.N:30111350, στο εργαστήριο ελέγχου ποιότητας. Τα προς μελέτη δείγματα υπέστησαν καθαρισμό με μίγμα HCl, HNO₃ και νερό, βάσει προτύπων ASTM [36]. Ο καθαρισμός πραγματοποιήθηκε με χρήση οργάνου εκπομπής υπερήχων τύπου BANDELIN-SONOREX Electronics, model: RK255H, S/N: 316.00034246.009 (χρησιμοποιήθηκε μίγμα αιθανόλης, ισοπροπυλικής αλκοόλης και N-προπανόλης). Για την ανάλυση επιλέχθηκαν μεγεθύνσεις Mx20 και Mx40.

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

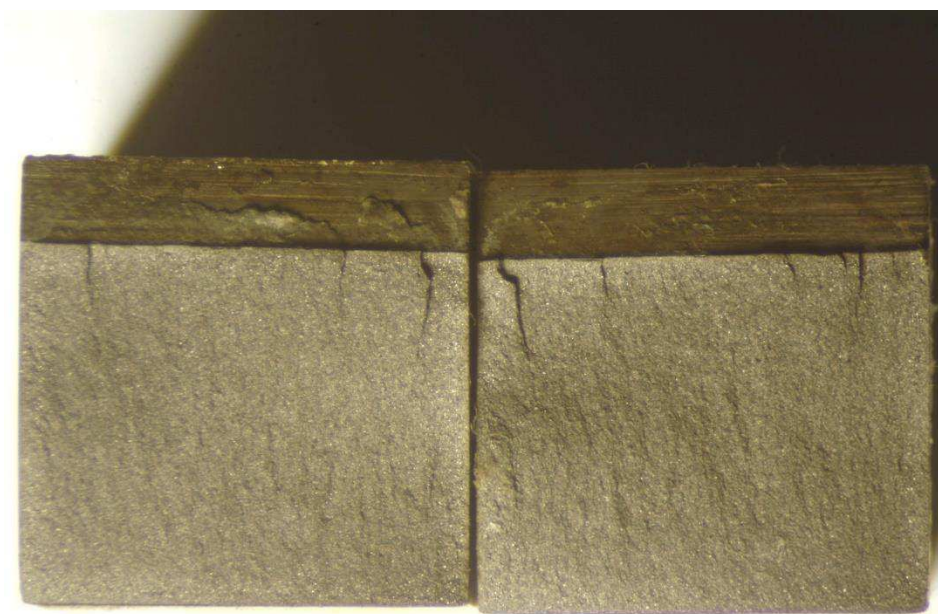
- η επιφάνεια αποτελείται από μια πλήρως ψαθυρή περιοχή, περιμετρικά, κατά την επιφάνεια ενανθράκωσης και από μια εσωτερική περιοχή στην οποία πριν την θραύση προηγείται πλαστική παραμόρφωση. Η πλαστική παραμόρφωση περιορίζεται με την αύξηση των ωρών ενανθράκωσης. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό από το μέγεθος και το πλήθος των περιοχών απόσχισης οι οποίες δεν είναι επίπεδες. Οι περιοχές στην περίμετρο του δοκιμίου είναι επίπεδες λόγω της ψαθυρότητας που παρουσιάζει το ενανθρακωμένο στρώμα. Το στρώμα αυτό αυξάνεται με την αύξηση της διάρκειας παραμονής των δοκιμών στη θερμοκρασία ενανθράκωσης. Γενικότερα, η επιφάνεια θραύσης τους, μετά τη θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ζώνης επηρεασμού.
- στις περιπτώσεις μετά από μία και δύο ώρες ενανθράκωσης, η επιφάνεια θραύσης είναι μορφολογικά ίδια. Στο εσωτερικό των δοκιμών, μετά από δύο ώρες ενανθράκωσης, παρατηρείται μεγαλύτερη πλαστική παραμόρφωση κατά τη θραύση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα σκληρότητας του υποβάθρου, που παρατίθενται παραπάνω, μετά από μία και δύο ώρες ενανθράκωσης αντίστοιχα.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 7.1: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου No27 (1ώρα ενανθράκωση)



ΕΙΚΟΝΑ 7.2: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου No28 (2 ώρες ενανθράκωση)

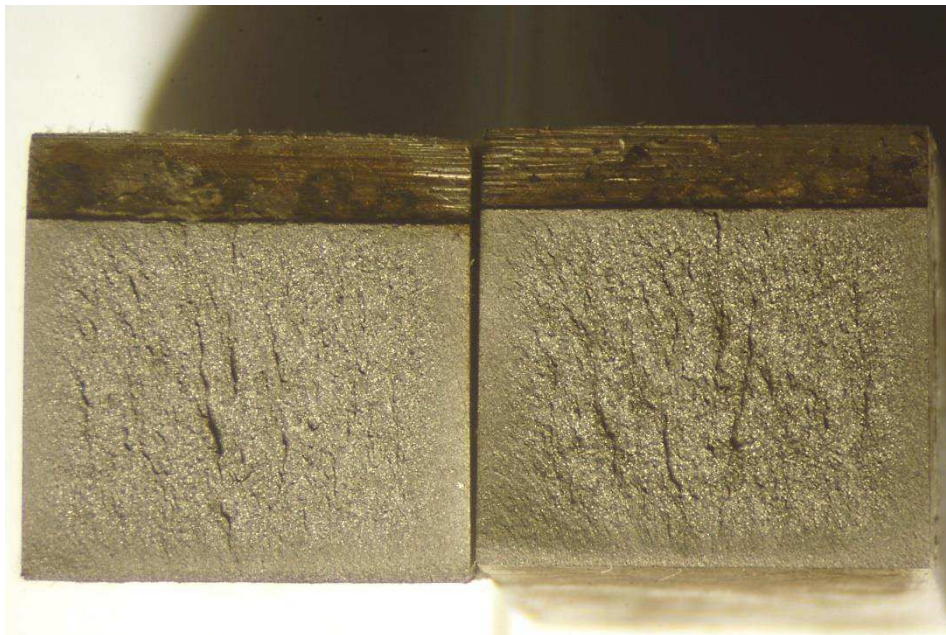
- στις περιπτώσεις μετά από τρεις και τέσσερις ώρες ενανθράκωσης, παρατηρείται εκτεταμένη περιοχή ψαθυρής θραύσης. Η επιφάνεια θραύσης είναι μορφολογικά ίδια. Στο εσωτερικό των δοκιμίων, μετά από τέσσερις ώρες ενανθράκωσης, παρατηρείται μικρότερη πλαστική παραμόρφωση κατά τη θραύση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα σκληρότητας του υποβάθρου, που παρατίθενται παραπάνω, μετά από τρεις και τέσσερις ώρες ενανθράκωσης αντίστοιχα.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



ΕΙΚΟΝΑ 7.3: Επιφάνειες θραύσης δοκιμίου Νο7 (3ώρες ενανθράκωση)



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

- Ο ψαθυρός χαρακτήρας των περιοχών της εξωτερικής περιμέτρου των δοκιμίων αλλά και του στρώματος που έχει επηρεαστεί συνολικά από την ενανθράκωση, παρουσιάζει εκτεταμένη λάμψη, ενδεικτικό ότι έχει συντελεστεί αποκόλληση διακρυσταλλικά.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΜΗΣ

8.1 Έλεγχος με μεταλλογραφικό μικροσκόπιο

Για την μελέτη της δομής του υλικού μικροσκοπικά, χρησιμοποιήθηκε μεταλλογραφικό μικροσκόπιο ανεστραμμένων αντικειμενικών φακών τύπου ZEISS AXIO, στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Υλικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής με S/N:38480011221. Για την μεταλλογραφική μελέτη επιλέχθηκαν δοκίμια από τη συμπληρωματική επιφάνεια αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μελέτη σκληρότητας και μικροσκληρότητας, με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη δυνατότητα συσχέτισης των αποτελεσμάτων μικροδομής και μηχανικών ιδιοτήτων.

Η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων έγινε σύμφωνα με πρότυπα ASTM [36,37]. Ο εγκιβωτισμός πραγματοποιήθηκε σε μηχανήμα Struers "Citopress-1" (S/N: 5770313) (Εικόνα 8.1) και χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός ρητινών Struers "DuroFast" και "Multifast".

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η λείανση των δοκιμίων με λειαντικά χαρτιά. Χρησιμοποιήθηκε λειαντικό μηχανήμα "Presi Mecapol P262" (S/N: 244). Πραγματοποιήθηκε στίλβωση με αιώρηματα αλουμίνας "AP-A Suspension" των 6μm, 3μm, 1μm και 0.3μm αντίστοιχα, στο ίδιο λειαντικό μηχανήμα, με χρήση πανιών από βελούδο. 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 βυθίσεις τμήματος του δοκιμίου στα δύο αντιδραστήρια, Picral και Nital, ώστε να προσβληθούν οι διάφορες φάσεις της μικροδομής.



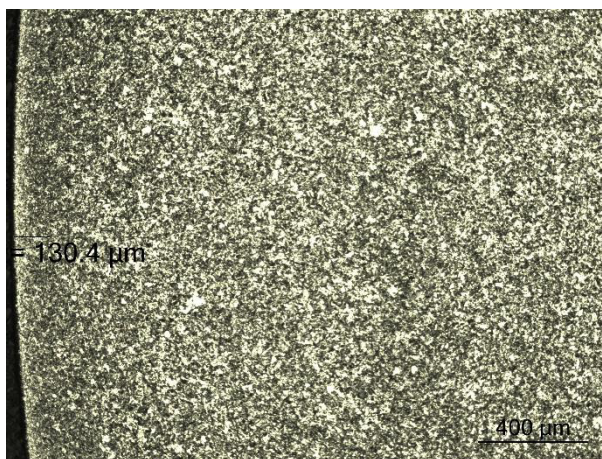
ΕΙΚΟΝΑ 8.1: Μηχάνημα εγκιβωτισμού Struers Citopress-1

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

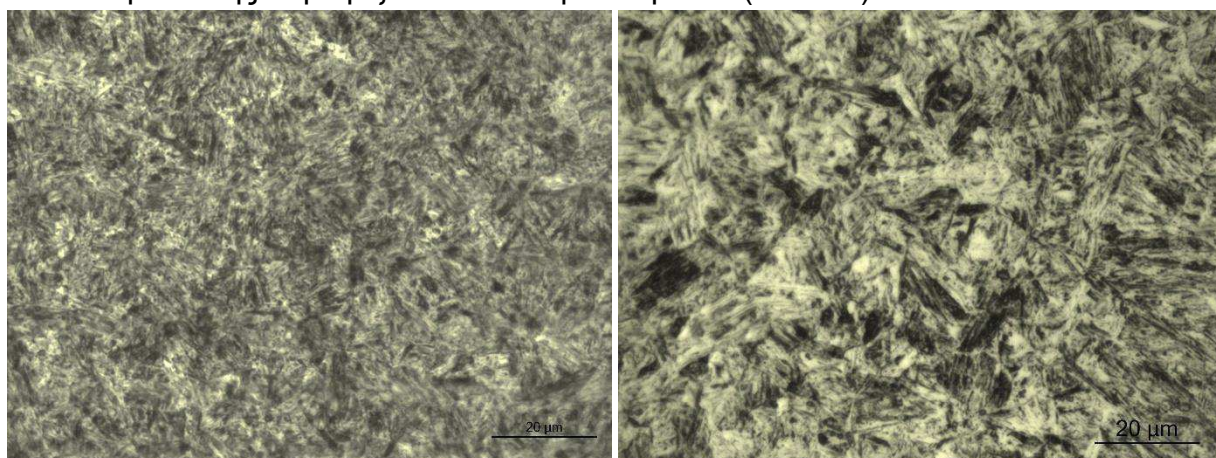
- Ο χάλυβας 1.5919, ως χάλυβας ενανθράκωσης, περιέχει μικρό ποσοστό άνθρακα, και περίπου 1,5% Cr και Ni. Ο συνδυασμός αυτών των στοιχείων οδηγεί κυρίως σε μείγμα φερρίτη, περλίτη, μπαινίτη, μαρτενσίτη μετά από απόψυξη σε συγκεκριμένα μέσα και σε σχέση με την ισοδύναμη διάμετρο σκλήρυνσης [37]. Ο επιφανειακός εμπότισμός 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 8.11 αποτυπώνεται, το επιφανειακό στρώμα συνολικά, η μικροδομή πολύ κοντά στην επιφάνεια και στο κέντρο της διατομής, συναρτήσει του χρόνου ενανθράκωσης.

Μία ώρα ενανθράκωσης στους 900°C, βαφή σε λάδι και επαναφορά:



ΕΙΚΟΝΑ 8.2: Μικροδομή του υλικού μετά από μία ώρα ενανθράκωσης: : Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Απεικονίζεται ανομοιόμορφα ανεπτυγμένο, δυσδιάκριτο στρώμα ενανθράκωσης το οποίο φτάνει τα 400μm περίπου. Η μικροδομή στο υπόβαθρο είναι λεπτόκοκκη, καλής ομοιομορφίας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης περιορίζεται στα 130μm περίπου (Εικ. 8.2).



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

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

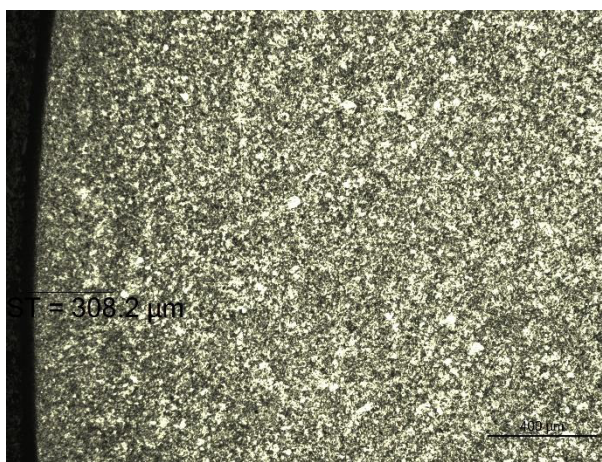
Σελίδα 91

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

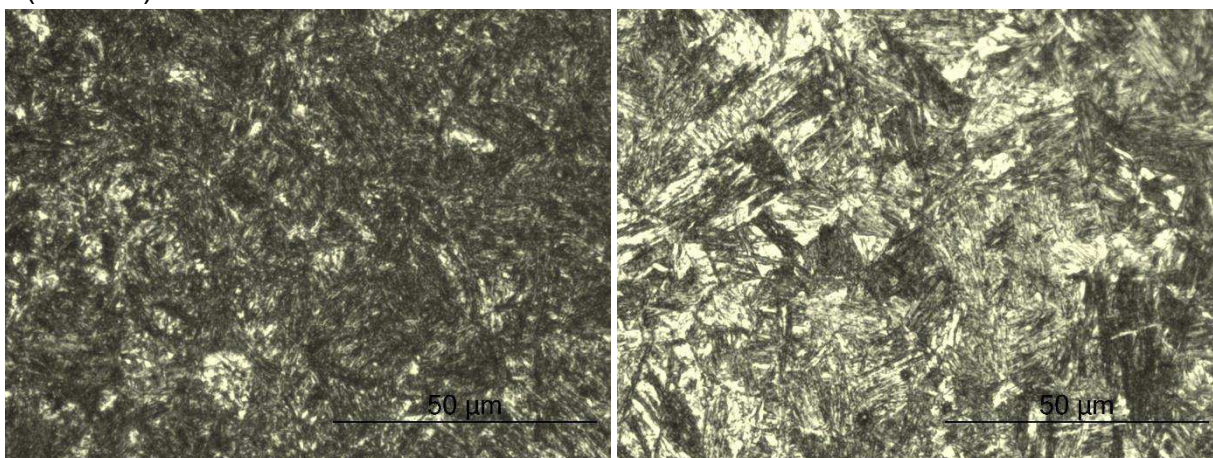
Η μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη, μη αξιολογήσιμο ποσοστό καρβιδίων, μικρό ποσοστό κατώτερου μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. Σκληρότητα 52 HRC (Εικ. 8.3α). Στο κέντρο της διατομής, απεικονίζονται σκοτεινές περιοχές οι οποίες είναι κατώτερος μπαινίτης καθώς και ποσοστά επαναφερμένου μαρτενσίτη χαμηλού άνθρακα (Εικ. 8.3β). Η σκληρότητα του υποβάθρου είναι 47 HRC. Η μικροδομή στον πυρήνα παρουσιάζεται πιο χονδρόκοκκη σε σχέση με τη δομή στη ζώνη ενανθράκωσης.

Δύο ώρες ενανθράκωση στους 900°C, βαφή σε λάδι και επαναφορά.



ΕΙΚΟΝΑ 8.4: Μικροδομή του υλικού μετά από δύο ώρες ενανθράκωση: : Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Παρατηρείται διάχυση σε μεγαλύτερο βάθος καλύτερης ομοιογένειας σε σχέση με τη μία ώρα ενανθράκωσης. Το στρώμα ενανθράκωσης φτάνει τα 600μm περίπου. Η μικροδομή στο υπόβαθρο είναι λεπτόκοκκη, καλής ομοιομορφίας. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης υπολογίζεται στα 300μm, κατά προσέγγιση (Εικ. 8.4).



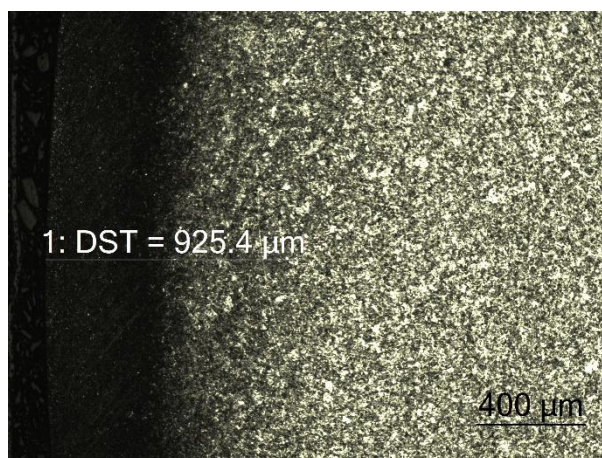
ΕΙΚΟΝΑ 8.5: Μικροδομή του υλικού μετά από δύο ώρες ενανθράκωσης: (α) (αριστερά) ζώνη ενανθράκωσης, (β) (δεξιά) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Η μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια, κατώτερο μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. Σκληρότητα 55 HRC (Εικ. 8.5α). Στο κέντρο της διατομής παρατηρείται, επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα, κατώτερος μπαινίτης, περλίτης και υπολειπόμενος ωστενίτης (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 900°C, βαφή σε λάδι και επαναφορά.

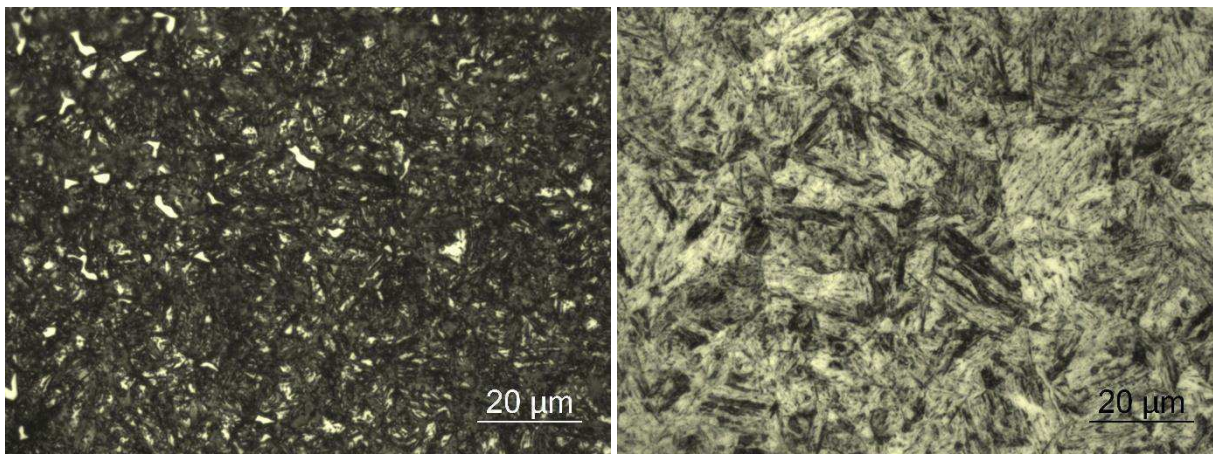


ΕΙΚΟΝΑ 8.6: Μικροδομή του υλικού μετά από τρεις ώρες ενανθράκωσης: Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Παρατηρείται διάχυση 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 1300μm 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).

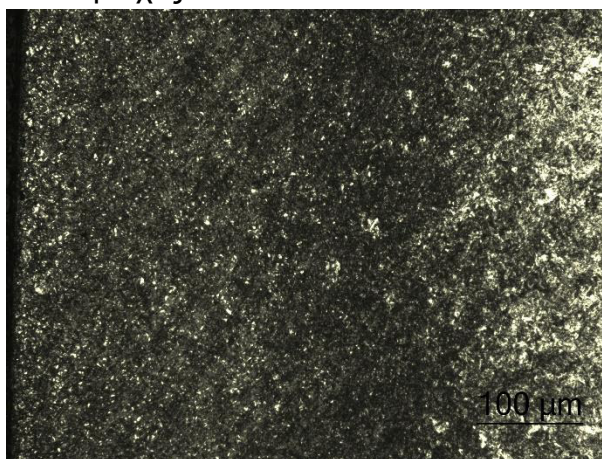
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος



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

Η μικροδομή στην εξωτερική ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια και συσσωματώματά τους, κατώτερο μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. Σκληρότητα 60,5 HRC (Εικ. 8.7α). Στο κέντρο της διατομής παρατηρείται, επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα, κατώτερος μπαινίτης, περλίτης και υπολειπόμενος ωστενίτης (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 περιοχές.



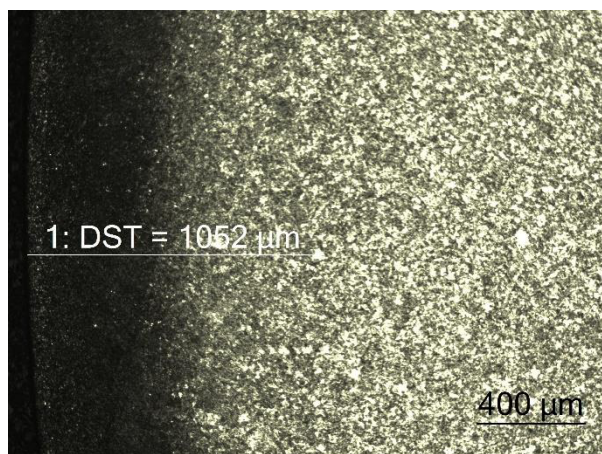
Εικόνα 8.8: Απεικόνιση της εξωτερικής ζώνης ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X200)

Η εξωτερική ζώνη του στρώματος ενανθράκωσης χαρακτηρίζεται από μεγάλο ποσοστό καρβιδίων, το οποίο είναι αισθητά μεγαλύτερο έως το βάθος των 50μm περίπου (Εικ. 8.8). Συμπερασματικά, το στρώμα της ενανθράκωσης συνολικά, μετά από τρεις ώρες παραμονή στην αντίστοιχη θερμοκρασία, αποτελείται από τρία διαφορετικά στρώματα ως προς το ποσοστό των περιεχόμενων σε αυτά καρβιδίων.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

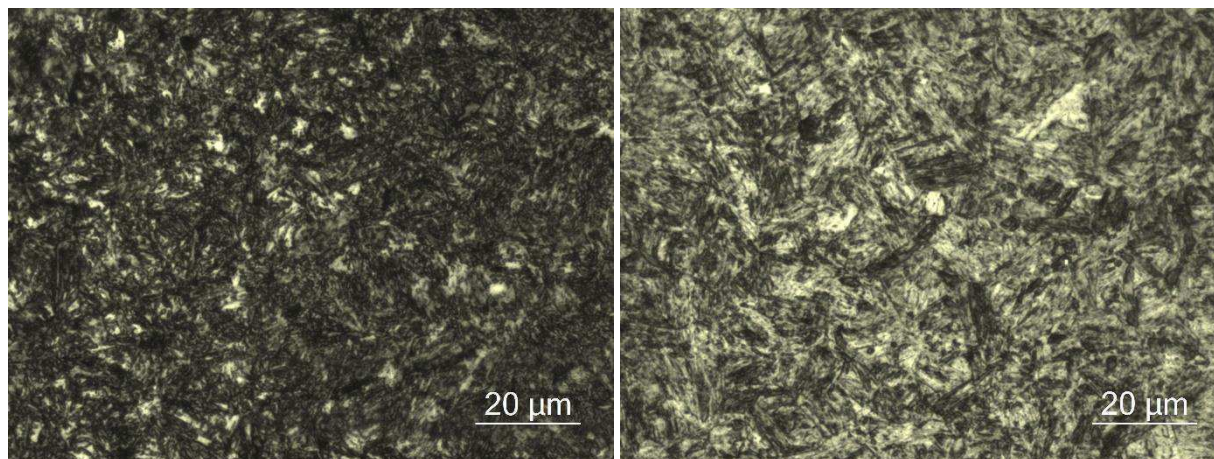
Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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



ΕΙΚΟΝΑ 8.9: Μικροδομή του υλικού μετά από τέσσερις ώρες ενανθράκωσης: Απεικόνιση της ζώνης ενανθράκωσης, αποτύπωση του ενεργού βάθους (Μεγέθυνση X50).

Παρατηρείται παρόμοια 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 1500μm 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 χονδροκόκκη σε σχέση με αυτή των τριών ωρών ενανθράκωσης. Το ενεργό βάθος ενανθράκωσης υπολογίζεται στα 1050μm, κατά προσέγγιση (Εικ.8.9).



ΕΙΚΟΝΑ 8.10: Μικροδομή του υλικού μετά από τέσσερις ώρες ενανθράκωσης: (α) (αριστερά) Μικροδομή στη ζώνη ενανθράκωσης. (β) (δεξιά) Μικροδομή στο κέντρο της διατομής (Μεγέθυνση X1000).

Η μικροδομή στην εξωτερική ζώνη ενανθράκωσης αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη, καρβίδια, κατώτερο μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη. 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.

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

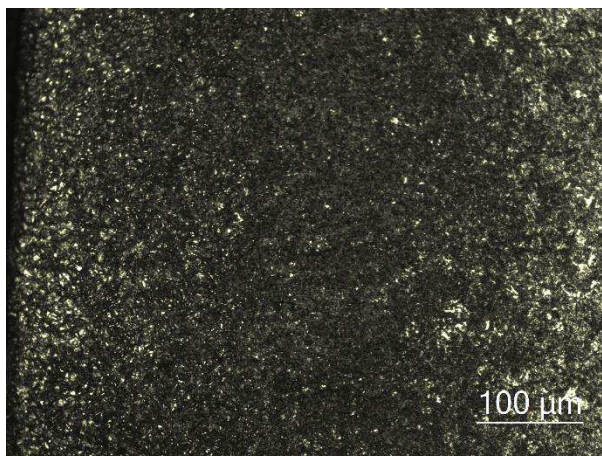
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Σελίδα 95

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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 8.11: Απεικόνιση της εξωτερικής ζώνης ενανθράκωσης (Μεγέθυνση X200)

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 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 μπαινίτη, υπολειπόμενο ωστενίτη καθώς και μεγαλύτερο ποσοστό καρβιδίων. Παρόμοια μικροδομή παρουσιάζει

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

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.

Για τον πυρήνα:

Στην περίπτωση της μιας ώρας ενανθράκωση 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 ενανθράκωσης, η δομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μπαινίτη.

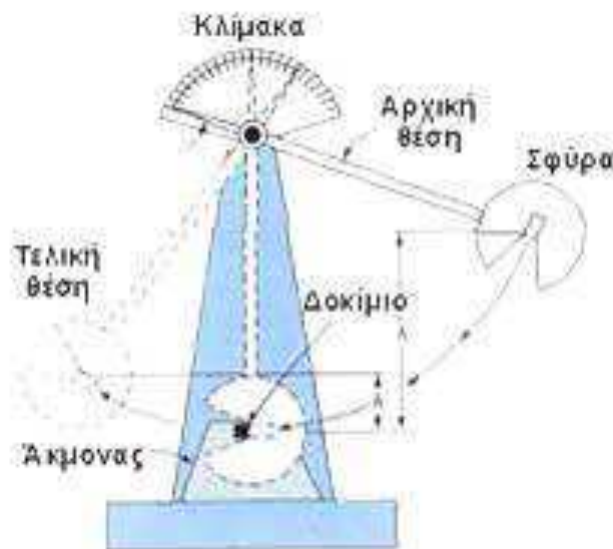
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΔΟΚΙΜΗ ΚΡΟΥΣΗΣ

9.1 Διαδικασία δοκιμής κρούσης

Η δοκιμή κρούσης πραγματοποιήθηκε στην εταιρία SPECTRUMLABS A.E. βάσει προτύπου [38]. Χρησιμοποιήθηκε μηχανή δοκιμών αντοχής σε κρούση της κατασκευάστριας εταιρίας Heckert με SerialNo. 423/75/6. Η μέγιστη ενέργειά της είναι $30 \text{ kJ} = 294,3 \text{ Joule}$ (Εικόνα 9.1).

Από το διαθέσιμο υλικό μορφοποιήθηκαν τυποποιημένα δοκίμια, μήκους 55 mm, πλάτους και ύψους 10 mm (Εικόνα 9.2)[28]. Βάσει προτύπου, τα δοκίμια έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Οι επιφάνειες είχαν τραχύτητα $Ra < 5 \mu\text{m}$, 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 είναι κάθετο στο διαμήκη άξονα του δοκιμαστικού κομματιού.



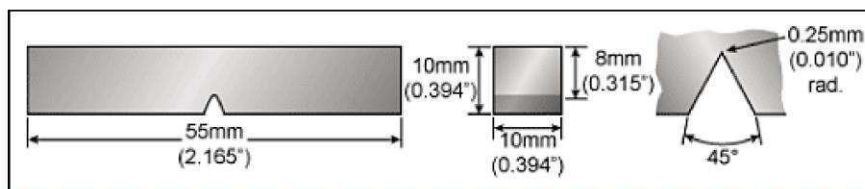
ΕΙΚΟΝΑ 9.1: Η μηχανή της δοκιμής κρούσης και τα βασικά χαρακτηριστικά της.

- Η εσωτερική γωνία της εγκοπής V είναι 45,σε βάθος 2 mm, και η ακτίνα της ρίζας 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.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- Τα δοκιμαστικά τεμάχια 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 9.2: Η γεωμετρία του δοκιμίου για την δοκιμή κρούσης

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.
- Τοποθετούμε τον δείκτη στο δυναμόμετρο του οργάνου στη θέση 30 kpm γυρίζοντάς 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.
- Συγκρατούμε το εκκρεμές με τα χέρια και το επαναφέρουμε στη θέση ασφάλισής 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 κρούσης

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στα 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 στη 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.

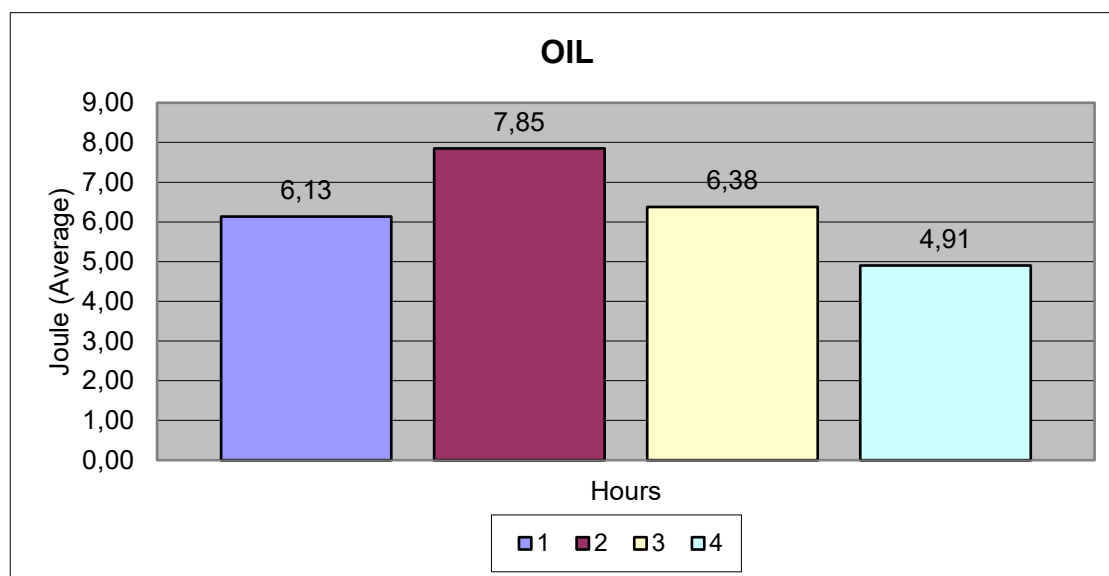
Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- Διαβάζουμε την ένδειξη στο δυναμόμετρο (σε kpm) και την καταγράφουμε στο Δελτίο Ελέγχου. Η ένδειξη σε kpm πολλαπλασιαζόμενη με $9,81 \text{ m/sec}^2$ δίνει το αποτέλεσμα της δοκιμής σε Joules. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 9.1 και παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 9.2.

Πίνακας 9.1: Η μηχανή της δοκιμής κρούσης και τα βασικά χαρακτηριστικά της

Χρονος ενανθράκωσης	(1)	(2)	(3)	(4)	M.O
	Δυσθραυστότητα (Joule/cm ²)				
1 h	5,89	4,91	5,89	7,85	6,13
2 h	7,85	5,89	8,83	8,83	7,85
3 h	4,91	6,87	5,89	7,85	6,38
4 h	5,89	5,89	3,92	3,92	4,91



ΕΙΚΟΝΑ 9.2: Διάγραμμα δυσθραυστότητας.

Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικ.9.2) παρατηρείται αύξηση δυσθραυστότητας για χρόνους παραμονής στη θερμοκρασία ενανθράκωσης δύο και τριών ωρών. Η μικρότερη αντοχή του υλικού στην κρούση παρατηρείται μετά από ενανθράκωση διάρκειας τεσσάρων ωρών. Δεν μπορεί να αξιολογηθεί η επίδραση της ζώνης ενανθράκωσης στη συνολική συμπεριφορά του υλικού, μεμονωμένα μόνο για τη δεδομένη διατομή. Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι να αποτελέσει μέτρο σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών χρόνων παραμονής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο: ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μία ώρα ενανθράκωσης:

- Κατά την ενανθράκωση για μία ώρα επιτυγχάνεται σκληρότητα αντίστοιχη του άνθρακα ο οποίος έχει διαχυθεί επιφανειακά. Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει μετατόπιση της καμπύλης του διαγράμματος CCT λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού άνθρακα προς τα δεξιά. Το μέσο απόψυξης είναι δραστικό και σε συνδυασμό με την υψηλή σχετικά θερμοκρασία M_f , δημιουργεί επαναφερμένο μαρτενσίτη με ελάχιστο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη, μικρότερο του 10% με σκληρότητα 52 HRC.
- Η υπό μελέτη διατομή επιτρέπει μικρές αποκλίσεις στο ρυθμό απόψυξης, μεταξύ του μισού της ακτίνας και του κέντρου των δοκιμίων, όπου οι τιμές των ληφθέντων σκληροτήτων είναι ελάχιστες. Η μικροδομή στο κέντρο του δοκιμίου απεικονίζεται κυρίως μαρτενσιτική. Η ληφθείσα σκληρότητα στο κέντρο μεταξύ των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν (HV30 και HV0,2) ταυτίζεται, ένδειξη της υψηλής ομοιογένειας της μικροδομής. Το εύρος 46-48 HRC σε συνδυασμό με τη μικροδομή επιβεβαιώνει το μίγμα των φάσεων επαναφερμένου μαρτενσίτη χαμηλού άνθρακα και κατώτερου μπαινίτη.

Δύο ώρες ενανθράκωσης:

- Επιφανειακά παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας σε σχέση με τη μία ώρα ενανθράκωσης, στα 55 HRC, η οποία ήταν αναμενόμενη λόγω της αύξησης του ποσοστού του υπό διάχυση άνθρακα. Η μικροδομή αποτελείται κατά κύριο λόγο από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μπαινίτη. Η αύξηση του ποσοστού άνθρακα στη ζώνη ενανθράκωσης προκάλεσε δημιουργία καρβιδίων και η συνεπαγόμενη μείωση του M_f προκάλεσε τη δημιουργία υπολειπόμενου ωστενίτη.
- Στον πυρήνα παρατηρείται ένα μίγμα τριών φάσεων (επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα, κατώτερος μπαινίτης και περλίτης), το οποίο αυξάνει την ανομοιογένεια του υλικού. Ως εκ τούτου, παρατηρείται απόκλιση των τιμών σκληρότητας μέσω των δύο μεθόδων (HV30 και HV0,2) της τάξεως των 2 HRC. Δεν ήταν εφικτό να αξιολογηθεί το μέγεθος κόκκου του πυρήνα.

Τρεις ώρες ενανθράκωσης:

- Στην επιφάνεια το στρώμα ενανθράκωσης είναι πλήρως ανεπτυγμένο, παρουσιάζοντας δύο ορατές ζώνες, μία διαβαθμισμένου ποσοστού

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

άνθρακα και μία διάχυσης. Συμπληρωματικά η δομή αποτελείται από επαναφερμένο μαρτενσίτη και κατώτερο μπαινίτη με σκληρότητα που φτάνει τα 60,5 HRC. Στην περίπτωση αυτή η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού του άνθρακα σε συνδυασμό με τον παρατεταμένο χρόνο ενανθράκωσης οδήγησε στη συσσωμάτωση καρβιδίων. Ταυτόχρονα η μετατόπιση της καμπύλης CCT, ενίσχυσε τον πληρέστερο μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη.

- Στον πυρήνα παρατηρείται όπως και στην περίπτωση των δύο ωρών μίγμα τριών φάσεων (επαναφερμένος μαρτενσίτης χαμηλού άνθρακα, κατώτερος μπαινίτης και περλίτης), η οποία οδηγεί σε ανομοιογένειά του. Το εύρος των τιμών σκληρότητας με τη μέθοδο HV30 ήταν 43-47 HRC, ενώ με τη μέθοδο HV0,2 ήταν 43-49 HRC. Δεν κατέσται δυνατή η αξιολόγηση του μεγέθους κόκκου.

Τέσσερις ώρες ενανθράκωσης:

- Επιφανειακά παρατηρείται πλήρως ανεπτυγμένο στρώμα ενανθράκωσης με δύο διακριτές ζώνες όπως στη περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης, με τη διαφορά ότι το επιφανειακό στρώμα είναι εκτενέστερο και η πυκνότητα καρβιδίων μεγαλύτερη. Η μικροδομή αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη με το ποσοστό του κατώτερου μπαινίτη να είναι συγκριτικά μικρότερο. Επίσης παρατηρήθηκε μειωμένο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη. Η σκληρότητα μετρήθηκε στα 61 HRC.
 - Στον πυρήνα η δομή παρουσιάζεται πιο ομοιογενής σε σχέση με αυτή των δύο και τριών ωρών και αποτελείται κυρίως από επαναφερμένο μαρτενσίτη χαμηλού άνθρακα κατώτερο μπαινίτη. Ενδεικτικό χειρότερης ομοιογένειας σε σχέση με την περίπτωση των τριών ωρών ενανθράκωσης, αποτελεί το μεγαλύτερο εύρος σκληρότητας (44-49 HRC) με τη μέθοδο HV30. Αντίστοιχα, παρουσιάζεται μικρότερο εύρος σκληρότητας με τη μέθοδο HV0,2 σε σχέση με αυτή σε παραμονή τριών ωρών. Τα παραπάνω αποτελούν ένδειξη ανομοιογένειας σε επίπεδο κόκκων η οποία δεν ήταν εφικτό να αποτυπωθεί μεταλλογραφικά.
- Σύμφωνα με τις μετρήσεις μικροσκληρότητας προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία σε σχέση με το ολικό και ενεργό βάθος ενανθράκωσης (Πίνακας 10.1). Παρατίθενται και τα αντίστοιχα ενεργά βάθη από τον κατασκευαστή των συστατικών του λουτρού ενανθράκωσης [39] :

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

Πίνακας 10.1: Πίνακας σύγκρισης βάθους ενανθράκωσης.

Ώρες ενανθράκωσης	Ενεργό βάθος κατασκευαστή (mm)	Ενεργό βάθος (mm)	Ολικό βάθος (mm)
1	0,2 - 0,5	0,1 - 0,14	0,4
2	0,4 - 0,6	0,26 - 0,34	0,6
3	0,5 - 0,7	0,65 - 0,75	1,3
4	0,7 - 0,9	0,8 - 0,92	1,5

- Η σχέση ολικού βάθους με το ενεργό βάθος μειώνεται με την αύξηση του χρόνου παραμονής στη θερμοκρασία ενανθράκωσης όπως αναμενόταν μέσω απλών σχέσεων διάχυσης και διαγραμμάτων [40].
 - Υπάρχει σταδιακή σύγκλιση των πειραματικών τιμών ενεργού βάθους και των αναμενόμενων σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή των αλάτων για τις περιπτώσεις των τριών και τεσσάρων ωρών. Συμπερασματικά δεν επιτυγχάνονται οι απαραίτητοι ρυθμοί διάχυσης κατά τις πρώτες δύο ώρες ενανθράκωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον χειριστή όσον αφορά την επίτευξη του ποσοστού ενεργού άνθρακα Cr κατά την διαδικασία.
- Τα αποτελέσματα των δοκιμών δυσθραυστότητας βρίσκονται σε πλήρη συσχέτιση με τα συνολικά αποτελέσματα σκληρότητας και μικροσκληρότητας για κάθε ώρα ενανθράκωσης. Το συγκεκριμένο εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για λόγους συσχέτισης. Υπάρχει διαφορετική επίπτωση στην απορροφώμενη ενέργεια κατά τη θραύση του δοκιμίου σε σχέση με το βάθος ενανθράκωσης, οφειλόμενο στις διαστάσεις του δοκιμίου.

Συμπέρασμα

Συμπερασματικά, η ενανθράκωση μεταξύ των τριών και τεσσάρων ωρών, με προοπτική την απόψυξη στο λάδι, αποτελεί την βέλτιστη λύση. Υπάρχει ισορροπία μεταξύ:

- Αποκτηθείσας μικροδομής
- Αναπτυσσόμενου στρώματος ενανθράκωσης
- Σκληρότητας επιφανειακού στρώματος και υποβάθρου

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] Α.Σ. Βατάλης, Επιστήμη και τεχνολογία υλικών, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2009).

[3] DIN EN 10027-1, Designation systems for steels, CEN, European Committee for Standardization, (2001).

[4] DIN EN 10027-2, Designation systems for steels, CEN, European Committee for Standardization, (1992).

[5] Σιδηρούχα

Κράματα: <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6>

[6] Τεχνικές Προδιαγραφές Χάλυβα SD: [http://www.sidenor.gr/Downloads.aspx? Menu_Txtid=54&lang=GR](http://www.sidenor.gr/Downloads.aspx?Menu_Txtid=54&lang=GR)

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

[7] DIN 17210, Case hardening steels Technical delivery conditions (1986).

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

[9] Μηχάνημα δοκιμής εφελκυσμού: <http://www.technologystudent.com/joints/matsind1.html>

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

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

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

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

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

- [14] Α. Γ. Μάμαλη: «Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών», Εκδ. Φοίβος, Αθήνα, 1996.
- [15] Γ.Κ. Τριανταφυλλίδης: «Μεταλλογνωσία», 2η Έκδοση, Εκδ.Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2014.
- [16] Π. Ψυλλάκη: «Αστοχία Υλικών και Κριτήρια Επιλογής τους για βιομηχανικές εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2006.
- [17] Μηχανική Συμπεριφορά των υλικών, Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.
- [18] ASTM E10-01, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
- [19] ASTM E92-82 (2003), Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.
- [20] ASTM E18-07, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.
- [21] Έλαση : <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26065/mathimata/08-Elasi.pdf>
- [22] Σφυρηλάτηση : <http://nptel.ac.in/courses/112107144/2>
- [23] Π. Γ. Πετρόπουλος, Μεταλλουργεία, Εκδόσεις Ευγενίδου Ίδρυμα, 1995.
- [24] Επιφανειακές κατεργασίες:
[http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Epifaniakes %20katergasies.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/Epifaniakes_%20katergasies.pdf)
- [25] www.bitros.gr, www.tsiotassteel.com
- [26] DIN 17210, Case hardening steels, September 1986
- [27] Φασματομετρία Ατομικής / Οπτικής Εκπομπής, Νοέμβριος 2014, Σχολή Χημικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [28] Inspection Certificate No. 2162656, Mechel Trading Ltd.
- [29] ASTM E 384 – 11 ε1, “Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials”.
- [30] Γ. Ταγάρας, Στατιστικός Έλεγχος, Εκδόσεις ΖΗΤΗ. Θεσσαλονίκη 2001.
- [31] Schneider J.-M., Bigerelle M., Iost A., Statistical analysis of the Vickers Hardness, Mat. Sci. Eng. A262 (1999), 256-263
- [32] ASTM E140 – 07, Standard Hardness Conversion Tables for Metals.

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος

[33] EN ISO 2639:2003, Steels- Determination and verification of the depth of carburized and hardened cases.

[34] ISO 4970:1979 Steel-Determination of total or effective thickness of thin surface- hardened layers

[35] H. Torste, Π. Olsson, E. Troell, "Steel and It's Treatment, a Handbook", Swerea IVF, Sweden, 2012, p.59,365,390.

[36] ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

[37] Metallographic Guide, Manual for metallographic structure preparation, Struers, M.I.Priniotakis A.E.B.E

[38] EN ISO 148 – 1: 2010, Metallic Materials – Charpy pendulum impact test.

[39] Durferrit- Carburizing baths, Technical data (1973)

[40] Steel and it's heat treatment, K-E. Thelning , σελ. 446-447 (1967)

Διερεύνηση και μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα 15CrNi6 κατά DIN μετά από βαφή σε λάδι και επαναφορά.

Πτυχιακή εργασία: μικροδομής Τσιρογιάννης Άγγελος