



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Θέμα: Μελέτη της αντοχής κρυογενικά
σκληρυμένου εργαλειοχάλυβα εν θερμώ
εφαρμογών**

Επιβλέπων: Δημήτριος Μανωλάκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αλουπογιάννης Μαρίνος
Αθήνα, 12/7/2023



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

School of Mechanical Engineering ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ
SECTOR OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

DIPLOMA THESIS

**Subject: Study of the toughness of
cryogenically hardened hot work tool
steel**

Supervisor: Dimitris Manolakos
NTUA Professor

Aloupogiannis Marinos
Athens, 12/7/2023

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αλουπογιάννης Μαρίνος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της απόκτησης Διπλώματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Δημήτρη Μανωλάκου και του κ. Δημήτρη Παπαγεωργίου. Κατ' αρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τους κ. Μανωλάκο και κ. Παπαγεωργίου για την επίβλεψη και την καθοδήγηση που προσέφεραν κατά τη διάρκεια της εργασίας, καθώς και για το άριστο περιβάλλον συνεργασίας που προσέφεραν. Οι ουσιαστικές συζητήσεις μαζί τους με βοήθησαν να κατανοήσω βαθύτερα το θεματικό πλαίσιο της εργασίας και να οργανώσω τις σκέψεις μου επάνω στο αντικείμενο. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ν. Μελισσά, Κ. Κερασιώτη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών για την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές τους, ειδικότερα κατά την κατεργασία των δοκιμίων. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Ι. Ραχούτη και κ. Μ. Κουκούλη για τη βοήθεια και καθοδήγηση κατά την διενέργεια μηχανικών δοκιμών. Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου, οι οποίοι με υποστήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών και κατά το χρονικό διάστημα εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Σύνοψη

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επίδραση της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας στη σκληρότητα και στη συμπεριφορά σε θραύση σε σχέση με κύκλους συμβατικής θερμικής κατεργασίας του εργαλειοχάλυβα «εν θερμώ» εφαρμογών AISI H13.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό. Στο πρώτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους χαλύβων με έμφαση στον εργαλειοχάλυβα H13. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφονται οι βασικές θερμικές κατεργασίες μάζας και επιφάνειας που εφαρμόζονται στους χάλυβες. Στο τρίτο κεφάλαιο που ασχολείται με τη κρυογενική κατεργασία, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή της κατεργασίας, αναλύονται οι παράγοντες της κατεργασίας και οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα και παρουσιάζονται αποτελέσματα της κατεργασίας στις ιδιότητες και τη μικροδομή των εργαλειοχάλυβων σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια. Στο τελευταίο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές δοκιμές κρούσης για τη μέτρηση δυσθραυστότητας, οι τεχνικές μέτρησης σκληρότητας και μικροσκληρότητας.

Στο πειραματικό μέρος γίνεται μελέτη της επίδρασης της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας με διάρκεια παραμονής για 1 ώρα, ως πρόσθετο στάδιο στο συμβατικό κύκλο της θερμικής κατεργασίας του εργαλειοχάλυβα H13, στην ενέργεια θραύσης και τη σκληρότητα. Ο κατεργασμένος χάλυβας θα υποστεί τριπλή επαναφορά μετά την κρυογενική κατεργασία για να αποκτήσει την τυπική σκληρότητα λειτουργίας σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές. Ως μέτρο σύγκρισης με την κρυογενική κατεργασία, χρησιμοποιούνται μία περίπτωση συμβατικής κατεργασίας με στόχο τη μεγιστοποίηση της κατακρήμνισης καρβιδίων και μία περίπτωση συμβατικής κατεργασίας με στόχο την αύξηση της δυσθραυστότητας. Όλα τα δοκίμια θα υποστούν ωστενιτοποίηση, βαφή και τριπλή επαναφορά σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Μέσω της μηχανικής δοκιμής Charpy V-notch και μέτρησης της σκληρότητας (HRC) προκύπτουν συμπεράσματα για την εξέλιξη των ιδιοτήτων του χάλυβα μετά το πέρας του εκάστοτε κύκλου θερμικής κατεργασίας. Ακόμη, γίνεται μακροσκοπική εξέταση της επιφάνειας θραύσης των δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο. Διαπιστώνεται, πως μετά την κρυογενική κατεργασία, σε σχέση με συμβατική κατεργασία, η δυσθραυστότητα του χάλυβα είναι ελαφρώς υψηλότερη εντός του ίδιου εύρους σκληρότητας. Επίσης, με βάση την επιφάνεια θραύσης, ο χάλυβας μετά από κρυογενική κατεργασία παρουσιάζει περισσότερο όγκιμη συμπεριφορά. Ακόμη, η κρυογενική κατεργασία συμβάλλει στην αύξηση της σκληρότητας μετά τη βαφή, αλλά και παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας κατά την κατακρήμνιση των δευτερογενών καρβιδίων κατά την επαναφορά.

Λέξεις κλειδιά: «εργαλειοχάλυβας AISI H13, βαθιά κρυογενική κατεργασία, ωστενιτοποίηση, βαφή, ενδιάμεση επαναφορά, δευτερογενής σκλήρυνση, δυσθραυστότητα, σκληρότητα. »

Abstract

The subject of this thesis is the effect of deep cryogenic treatment on the toughness, hardness and fracture behavior of AISI H13 hot work tool steel.

The paper is divided into two parts; a theoretical and an experimental part. In the first chapter of the theoretical part, the types of steel are presented, with emphasis on H13 tool steel. In the second chapter the basic heat treatments applied to steels are described. In the third chapter, which deals which focuses on cryogenic treatment, a brief history of the treatment is given, treatment parameters and mechanisms that function are analyzed and the effects of the treatment on the mechanical properties and microstructure of tool steels are presented according to research carried out in recent years. The last chapter of the theoretical part describes the basic impact test, hardness and microindentation hardness measuring methods.

In the experimental part, the effect of 1h deep cryogenic treatment is studied, as an additional stage of conventional H13 heat treatment cycle, on the fracture energy and hardness. The treated steel will be subjected to triple tempering after the cryogenic treatment to obtain normal working hardness. A conventional heat treatment cycle to facilitate carbide precipitation and a conventional heat treatment cycle to increase the toughness are used for comparison. All specimens will be subjected to austenitizing, quenching, and triple tempering at various temperatures. Through the Charpy V-notch impact test and hardness (HRC) measurement, conclusions are drawn about the steel properties after the completion of the heat treatment cycles. Furthermore, the fracture surface of the specimens is examined under an optical microscope. It can be seen that after cryogenic treatment the toughness is somewhat improved but with reduced hardness, compared to conventional heat treatment. Also, the steel cryogenic treatment has a less brittle behavior. Moreover, secondary hardening is observed during tempering and cryogenic contributes to the increase in hardness even before tempering.

Key words: «deep cryogenic treatment, austenitization, toughness, impact test, tool steel AISI H13, secondary hardening, tempering, hardness, snap tempering»

Περιεχόμενα

1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	4
1.1: Εισαγωγή	4
1.2: Χάλυβες	4
1.2.1: Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (plain carbon steels)	6
1.2.2: Κραματωμένοι χάλυβες (alloy steels)	7
1.2.3: Τυποποίηση χαλύβων.....	8
1.2.4: Εργαλειοχάλυβας H13	9
1.3: Θερμικές κατεργασίες	11
1.3.1: Θερμικές κατεργασίες μάζας.....	11
1.3.2: Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες.....	21
1.3.2.1: Θερμικές κατεργασίες τροποποίησης επιφάνειας χωρίς εναπόθεση υλικού	22
1.3.2.2: Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες (με απόθεση υλικού)	23
1.4: Κρυογενική κατεργασία.....	25
1.4.1: Εισαγωγή	25
1.4.2: Μηχανισμός κρυογενικής κατεργασίας.....	26
1.4.2.1: Μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη	30
1.4.2.2: Κατακρήμνιση καρβιδίων	31
1.4.3: Κρυογενική κατεργασία εργαλειοχαλύβων.....	33
1.4.6: Κρυογενική κατεργασία χάλυβα H13	40
1.5: Μηχανικές δοκιμές εργαλειοχαλύβων.....	47
1.5.1: Δοκιμές δυσθραυστότητας.....	47
1.5.2: Δοκιμές κρούσεως	48
1.5.3: Δοκιμές σκληρομέτρησης.....	52
1.5.4: Θερμικές κατεργασίες και δοκιμές δυσθραυστότητας	56
2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	63
2.1: Εισαγωγή	63
2.2: Προετοιμασία δοκιμών.....	64
2.3: Ωστενιτοποίηση	69
2.4: Βαφή	73
2.5: Snap tempering.....	74
2.6: Κρυογενική κατεργασία.....	74
2.7: Κατεργασίες επαναφορών.....	75
2.8: Μέτρηση σκληρότητας	78
2.9: Δοκιμή δυσθραυστότητας	79
2.10: Εξέταση επιφάνειας θραύσης	82
2.11: Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας	83
2.12: Αποτελέσματα δοκιμών Charpy	85
2.13: Αποτελέσματα εξέτασης επιφάνειας θραύσης	87
4: ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
5:ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ	95
6: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	98
7: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	99

1: Θεωρητικό μέρος

1.1: Εισαγωγή

Στα υλικά γίνονται διάφορες κατεργασίες που διαμορφώνουν κατάλληλα το υλικό ανάλογα την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Οι θερμικές κατεργασίες που γίνονται στα περισσότερα υλικά έχουν ενδιαφέρον, αλλά ιδιαίτερα οι θερμικές κατεργασίες στους χάλυβες μεταβάλλουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Γίνεται κατανοητό, πως είναι κρίσιμο να είναι γνωστό πώς επιδρούν οι κατεργασίες αυτές και πώς προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες μετά τις κατεργασίες. Η θερμική κατεργασία εργαλειοχαλύβων είναι ένα αντικείμενο που έχει μελετηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τουλάχιστον τα τελευταία 70 χρόνια, καθώς ο χάλυβας είναι ένα από τα βασικά στοιχεία της βιομηχανίας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια αρχίζει να αναπτύσσεται η κρυογενική κατεργασία χάλυβων και διερευνάται η επίδραση που μπορεί να έχει στις ιδιότητες του χάλυβα. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες που ασχολούνται με κύκλους θερμικής κατεργασίας που συνδυάζουν συμβατικές κατεργασίες με κρυογενική κατεργασία πάνω σε χάλυβες και εργαλειοχάλυβες. Σκοπός αυτής της έρευνας είναι η μελέτη της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στη σκληρότητα και στην αντοχή σε θραύση του υλικού σε σχέση με συμβατικό κύκλο κατεργασίας που διευκολύνει την κατακρήμνιση καρβιδίων, μεταβάλλοντας τις θερμοκρασίες επαναφορών.

Στο θεωρητικό μέρος αναλύονται ο χάλυβας και οι διάφοροι τύποι του, οι θερμικές κατεργασίες μάζας και επιφάνειες που μπορούν να γίνουν σε αυτούς και ορισμένες βασικές μηχανικές δοκιμές για τη μέτρηση της σκληρότητας και της δυσθραυστότητας. Ακόμα, γίνεται λεπτομερής ανάλυση της κρυογενικής κατεργασίας με έμφαση στον εργαλειοχάλυβα H13 και τους μηχανισμούς αυτής που τελικά επιδρούν τελικά στο υλικό σύμφωνα με διάφορες έρευνες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια.

1.2: Χάλυβες

Οι χάλυβες ανήκουν στην κατηγορία των βιομηχανικών κραμάτων και πιο συγκεκριμένα στα σιδηρούχα κράματα, με βασικά στοιχεία τον σίδηρο (Fe) και τον άνθρακα (C). Είναι το πιο διαδεδομένο υλικό στη βιομηχανία με εφαρμογή σε όλους τους τομείς αυτής και οι χαλυβουργίες στις οποίες κατασκευάζεται έχουν καθοριστικό ρόλο για την οικονομία μίας χώρας. Στους χάλυβες ο σίδηρος είναι το κυρίαρχο στοιχείο στο κράμα, ενώ η περιεκτικότητα του άνθρακα κυμαίνεται από 0,008% έως 2,11% κατά βάρος, ωστόσο το ποσοστό αυτό καθορίζει το είδος και τις ιδιότητες του χάλυβα. Χάλυβες ακόμα μπορούν να περιέχουν στοιχεία όπως το πυρίτιο (Si), το μαγγάνιο (Mn), ο χαλκός (Cu), το τιτάνιο (Ti), το μολυβδαίνιο (Mo), το χρώμιο (Cr) και το θείο (S) σε μικρές ποσότητες προσδίδοντας διαφορετικές ιδιότητες στο τελικό κράμα, καθώς αλλάζει η δομή του κρυσταλλικού πλέγματος των ατόμων, ανάλογα με την χρήση του. Διαφορετικές προσμίξεις έχουν διαφορετικό αποτέλεσμα στις ιδιότητες του χάλυβα, όπως η σκληρότητα, η κατεργασιμότητα, η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η αντοχή σε διάβρωση αλλά και στις μηχανικές ιδιότητες. Αυξημένη παρουσία άνθρακα κάνει τον χάλυβα σκληρότερο, αλλά πιο εύθραυστο. Ακόμα, οι χάλυβες είναι ανακυκλώσιμοι χωρίς να χάνουν τις ιδιότητές τους που σε συνδυασμό με την δυνατότητα παραγωγής χάλυβων συγκεκριμένων προδιαγραφών σε μικρό κόστος αιτιολογούν το ευρύ πεδίο εφαρμογών τους [1].

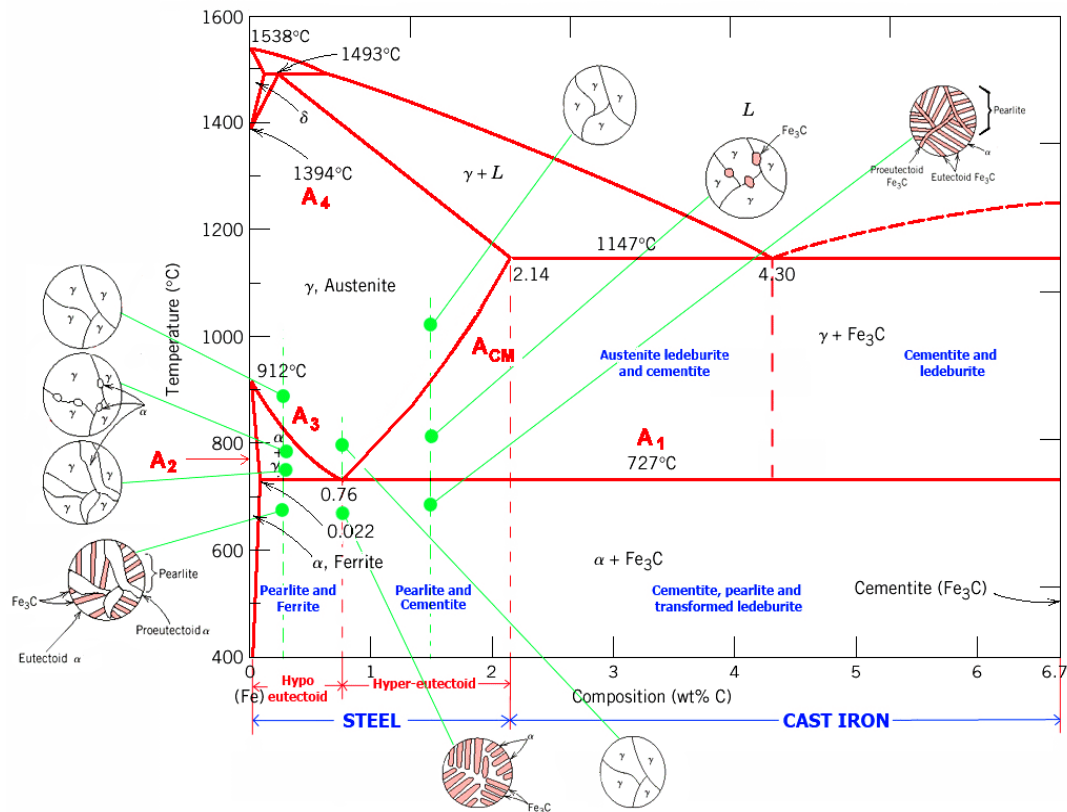
Λόγω των πολλών παραμέτρων των χάλυβων υπάρχουν διάφορες κατηγοριοποιήσεις με τις οποίες μπορούν να ταξινομηθούν.

1. Με βάση την χημική τους σύσταση χωρίζονται σε:

- κοινούς ή ανθρακούχους (plain carbon steels), περιέχουν μικρές ποσότητες μαγγανίου (<1%) και ακαθαρσίες θείου και φωσφόρου,
- Κραματωμένους χάλυβες (alloy steels) με περιεκτικότητα άνθρακα μικρότερη από 1% που με την σειρά τους χωρίζονται ανάλογα με το ποσοστό των κραματικών προσθηκών τους σε:
 - ελαφρά κραματωμένους, με ποσοστό κραμάτωσης έως 10%

- ισχυρά κραματωμένους, με ποσοστό κραμάτωσης μεγαλύτερο από 10%.
2. Με βάση τη χρήση τους χωρίζονται σε:
 - Χάλυβες κατασκευών. Οι χάλυβες αυτοί περιέχουν μικρά ποσότητα κραματικών στοιχείων χρωμίου (Cr) και μαγγανίου (Mn) και κυρίως χρησιμοποιούνται σε κατασκευές όπως λέβητες, μεταλλικοί σκελετοί και σε στοιχεία μηχανών.
 - Ανοξείδωτους χάλυβες. Χαρακτηριστικό τους είναι η περιεκτικότητα σε χρώμιο (>12%) και η αντοχή τους σε διάβρωση, χρησιμοποιούνται κυρίως στην ιατρική και σε σωλήνες.
 - Εργαλειοχάλυβες, περιέχουν σε μεγάλα ποσοστά στοιχεία όπως μολυβδαίνιο, βολφράμιο και χρώμιο, με αποτέλεσμα την αυξημένη σκληρότητα και αντοχή σε φθορά και τριβή ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων και εργαλείων διαμόρφωσης όπως μήτρες και καλούπια.
 - Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών, για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών.
 3. Με βάση τον προορισμό τους χωρίζονται σε:
 - Χάλυβες διαμόρφωσης, οι οποίοι μορφοποιούνται με κάποια κατεργασία διαμόρφωσης, όπως η έλαση και καταλήγουν σε κουλούρες.
 - Χυτοχάλυβες, οι οποίοι μορφοποιούνται με χύτευση υπό την μορφή χελωνών (πλινθωμάτων), στην συνέχεια περνούν ακόμα μία κατεργασία χύτευσης πριν τελικά κατεργαστούν μηχανικά για την δημιουργία του τελικού προϊόντος [1], [43].

Η δημιουργία χαλύβων με συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες στηρίζεται στην αλλαγή της μικροδομής και των μετασχηματισμών φάσεων που συμβαίνουν από τη θέρμανση του χάλυβα σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές, όπου μία φάση ή συνδυασμός φάσεων είναι σταθερές. Αυτή η συμπεριφορά των κραμάτων αποτυπώνεται στα διαγράμματα ισορροπίας Fe – C. Υπάρχουν δύο τέτοια διαγράμματα, το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-σεμενίτη (Fe-Fe₃C) που παίρνει το όνομά του από τον θερμοκρασιακά ασταθή σεμενίτη και το ευσταθές διάγραμμα Fe-C σιδήρου-γραφίτη. Το πιο διαδεδομένο διάγραμμα είναι το πρώτο λόγω της διευκόλυνσης που παρέχει στην παρακολούθηση των μετασχηματισμών του κράματος. Σε αυτό το διάγραμμα (**Εικόνα 1**), οριοθετούνται οι περιοχές των σταθερών φάσεων καθώς και τα όρια μεταξύ αυτών. Στο διάγραμμα διακρίνονται δύο περιοχές με βάση το ποσοστό σε άνθρακα. Οι χάλυβες (με 0.008%κ.β. < C < 2.11%κ.β.) και οι χυτοσίδηροι (με 2.11%κ.β. < C < 6.67%κ.β.), για ποσοστό άνθρακα κάτω από 0.008% είναι η περιοχή του καθαρού σιδήρου. Ο άνθρακας δεν βρίσκεται ελεύθερος στον χάλυβα αλλά σχηματίζει με τον σίδηρο τον σεμενίτη με περιεκτικότητα σε άνθρακα 6.67%. Τα δύο βασικά στερεά διαλύματα του σχήματος είναι ο ωστενίτης και ο φερρίτης. Ο ωστενίτης είναι διάλυμα παρεμβολής που σχηματίζεται όταν στο κρυσταλλικό πλέγμα του γ-σιδήρου διαλύεται άνθρακας, το διάλυμα έχει υψηλή αντοχή και σκληρότητα και μεγάλη δυσθραυστότητα αλλά μέτρια πλαστικότητα. Ο φερρίτης είναι στερεό διάλυμα παρεμβολής που σχηματίζεται όταν διαλύεται άνθρακας στο κρυσταλλικό πλέγμα α-σιδήρου και είναι αρκετά μαλακό με μικρή αντοχή αλλά μεγάλη πλαστικότητα [2].



Εικόνα 1: Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe₃C [32]

1.2.1: Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (plain carbon steels)

Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες είναι κράματα Fe-C, τα οποία έχουν μικρή περιεκτικότητα άνθρακα (έως 2%) και περιεκτικότητα έως 1% μαγγανίου (Mn), ακαθαρσίες θείου (S), φωσφόρου (P) έως 0,030% και πυριτίου (Si) με περιεκτικότητα έως 1%. Οι ιδιότητες αυτών των χαλύβων αλλάζουν με βάση το ποσοστό άνθρακα και τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν ελάχιστη επιρροή σε αυτές. Οι χάλυβες αυτοί ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα χωρίζονται σε:

1. Υποευτηκτοειδείς με περιεκτικότητα μικρότερη του 0.8% που υποδιαιρούνται σε
 - I. Μαλακούς χάλυβες (low carbon steel) με περιεκτικότητα άνθρακα μικρότερη από 0.3%, είναι από τους πιο διαδεδομένους τύπους χαλύβων με υψηλή κατεργασιμότητα και συγκολλησιμότητα.
 - II. Μετρίου ποσοστού C χάλυβες (medium carbon steel) με περιεκτικότητα από 0.3%-0.45%, λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας άνθρακα παρουσιάζουν αύξηση σκληρότητας, αντοχή σε εφελκυσμό και μείωση πλαστικότητας. Εξαιτίας της αύξησης της περιεκτικότητας η συγκόλληση και κατεργασιμότητά τους είναι πιο δύσκολη σε σχέση με τους μαλακούς χάλυβες
 - III. Υψηλού ποσοστού C χάλυβες (high carbon steel) περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό 0.45%-0.8%. Η κατεργασία τους είναι αρκετά απαιτητική και είναι απαραίτητη κάποιου είδους προθέρμανσή τους πριν την κατεργασία.
 - IV. Πολύ υψηλού ποσοστού C χάλυβες (ultra-high carbon steels), περιέχουν έως και 1.5% άνθρακα και χρειάζονται θέρμανση πριν, κατά και μετά την κατεργασία για να διατηρήσουν τις ιδιότητές τους. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μεταλλικών κοπτικών εργαλείων.
2. Ευτηκτοειδείς με περιεκτικότητα άνθρακα 0.8%
3. Υπερευτηκτοειδείς με περιεκτικότητα άνθρακα από 0.8% μέχρι 2%. Οι χάλυβες με περιεκτικότητα από 0.8%-1% καλούνται χάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα (high carbon steel), ενώ οι χάλυβες

με περιεκτικότητα από 1% μέχρι 2.14% ονομάζονται χάλυβες πολύ υψηλού ποσοστού άνθρακα (ultrahigh carbon steel).

4. Χυτοσίδηροι με ποσοστά άνθρακα από 2,14% έως 2,67%, χωρίζονται σε διάφορα είδη με βάση την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, μαγγανίου, πυριτίου, φωσφόρου και θείου σε λευκούς, γκριζούς, μαλακτούς, σε χυτοσίδηρους σφαιροειδούς γραφίτη και ισχυρά κραματομένους χυτοσιδήρους [1],[43].

1.2.2: Κραματομένοι χάλυβες (alloy steels)

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν χάλυβες που περιέχουν σκόπιμα ένα ή περισσότερα στοιχεία εκτός του άνθρακα για να πετύχουν κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Συνήθως τα στοιχεία αυτά είναι το μολυβδαίνιο, το χρώμιο, το νικέλιο και το πυρίτιο. Τα δύο πρώτα δημιουργούν καρβίδια στη δομή του χάλυβα, ενώ τα υπόλοιπα όχι. Στοιχεία που δεν δημιουργούν χημικές ενώσεις με σίδηρο και άνθρακα μπορούν να βρεθούν στην δομή του χάλυβα μόνο ως στερεά διαλύματα στο σίδηρο, ενώ στοιχεία που δημιουργούν καρβίδια μπορούν να βρεθούν σε χημικές ενώσεις με άνθρακα και σίδηρο. Οι χάλυβες αυτοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τους ελαφρά κραματομένους χάλυβες (low alloy steels) και του ισχυρά κραματομένους χάλυβες (high alloy steels). [3]

Ελαφρά κραματομένοι χάλυβες (Low alloy steels)

Στην κατηγορία αυτή το ποσοστό άνθρακα στο χάλυβα είναι μικρότερο από 0.25% και περιέχουν συνήθως μαγγάνιο, νικέλιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο και πυρίτιο και πιο σπάνια περιέχουν κοβάλτιο, τιτάνιο και ζirkόνιο, ωστόσο το ποσοστό κραματικών στοιχείων δεν ξεπερνάει το 2%. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή ενάντια στην διάβρωση και έχουν καλύτερες ιδιότητες από τους κοινούς χάλυβες αλλά πολύ υψηλό κόστος.

Υψηλά κραματομένοι χάλυβες (High alloy steels)

Οι χάλυβες οι οποίοι περιέχουν κραματικά στοιχεία σε ποσοστό μεγαλύτερο από 10% του συνολικού ανήκουν στους υψηλά κραματομένους χάλυβες. Αποτελούνται από τουλάχιστον δύο χημικά στοιχεία και οι ιδιότητες του χάλυβα εξαρτώνται από τα ποσοστά των στοιχείων αυτών, αν ένα από αυτά έχει μεγαλύτερο ποσοστό τότε οι ιδιότητες βασίζονται πάνω σε αυτό. Το συγκεκριμένο είδος εμφανίζει υψηλή αντοχή στην διάβρωση και χρησιμοποιούνται αρκετά σε πυρηνικούς σταθμούς στην βιομηχανία πετρελαίου σε εναλλάκτες θερμότητας, στην βιομηχανία άλατος κ.α.

Ανοξειδωτοι χάλυβες (Stainless steels)

Βασικό στοιχείο σε αυτή την κατηγορία είναι το χρώμιο με περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 10% με συνέπεια την μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Συνήθως περιέχουν και ακαθαρσίες θείου, φωσφόρου και πυριτίου με ποσοστά μικρότερα του 0.03%, 0.04% και 1% αντίστοιχα. Διακρίνονται στις επιμέρους κατηγορίες:

- Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες με τυπική σύσταση $\pi(C)=0.2\div 0.4\%$, $\pi(Cr)=12\div 17\%$. Επιδέχονται βαφή και επαναφορά, οπότε έχουν υψηλή σκληρότητα λόγω της δημιουργίας μαρτενσίτη. Βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή στροβίλων και χειρουργικών εργαλείων
- Φερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες, περιέχουν άνθρακα από 0.06% μέχρι 0.12 % και χρώμιο από 12% μέχρι 30%, έχουν μονοφασική δομή και σχετικά μικρή μηχανική αντοχή με αποτέλεσμα την περιορισμένη χρήση τους
- Ωστενιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες με ποσοστό άνθρακα 10% χρωμίου 12% μέχρι 30% και νικελίου 8% μέχρι 30%. Παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες, κατεργασιμότητα και αντοχή σε διάβρωση και οξείδωση, ωστόσο είναι ευαίσθητοι σε ενδροκρυσταλλική διάβρωση. Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγία, την βιομηχανία τροφίμων και οικιακών συσκευών.
- Ωστενιτοφερριτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες, που περιέχουν άνθρακα λιγότερο από 0.05%, χρώμιο σε ποσοστό από 18 μέχρι 28%, νικέλιο από 6 μέχρι 9% αλλά και σε μικρά ποσοστά μολυβδαίνιο

και μαγγάνιο. Οι χάλυβες αυτοί έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, υψηλή ευθραυστότητα και αυξημένη αντοχή σε διάβρωση και κόπωση [43].

Εργαλειοχάλυβες (Tool steels)

Οι εργαλειοχάλυβες χαρακτηρίζονται από υψηλές μηχανικές ιδιότητες και κάποιοι από αυτούς διατηρούν τη σκληρότητα και την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατασκευάζονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες για την επίτευξη αυξημένης ομοιογένειας, καθαρότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα εφαρμογών σε αντίξοες θερμικές συνθήκες και ισχυρές καταπονήσεις. Για παράδειγμα σε κοπτικά εργαλεία, τα στοιχεία μηχανών, τα ράουλα έλασης, τα ελατήρια υψηλών θερμοκρασιών, σε ειδικές μήτρες διαμόρφωσης οι οποίες δέχονται υψηλές θερμικές καταπονήσεις. Οι εργαλειοχάλυβες εμφανίστηκαν μετά τα μέσα του 19^{ου} αιώνα αρχικά σαν απλοί ανθρακούχοι χάλυβες και μέσα σε μισό αιώνα εφευρέθηκαν πιο σύνθετοι χάλυβες που περιείχαν κραματικά στοιχεία όπως πυρίτιο, μολυβδαίνιο, χρώμιο κ.α. Στους εργαλειοχάλυβες η περιεκτικότητα άνθρακα κυμαίνεται από 0.4% έως 2.1%, ενώ περιέχουν καρβιδιογόνα που αναφέρθηκαν παραπάνω σε κατάλληλες περιεκτικότητες που απαιτούνται για τη συγκεκριμένη χρήση του κράματος. Μπορούν να κατεργαστούν θερμικά, ενώ η ύπαρξη καρβιδίων σφαιρικού ή ακανόνιστου σχήματος σε αυτούς αυξάνει την αντοχή σε φθορά και δυσθραυστότητα. Επειδή, οι εργαλειοχάλυβες συνήθως χρησιμοποιούνται σε εν θερμώ εφαρμογές είναι σημαντικό να έχουν κατάλληλη αντοχή σε υψηλά θερμικά φορτία χωρίς να αστοχούν ή να παρουσιάζουν ρωγμές. Κατά την κατασκευή του εργαλείου ή καλουπιού αποφασίζεται η χημική σύστασή του για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες αντοχής σε φθορά και ανθεκτικότητα μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, καθώς είναι αδύνατη η δημιουργία χάλυβα που να έχει ταυτόχρονα πολύ καλές ιδιότητες σε όλους τους τομείς. Οι χάλυβες κατασκευάζονται κυρίως με σφυρηλάτηση, χύτευση ή κονιομεταλλουργία, ανεξάρτητα όμως από τον μηχανισμό παρασκευής τους, υπόκεινται θερμικές κατεργασίες για την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Λόγω του πλήθους των διαφορετικών ειδών εργαλειοχαλύβων για κάθε χρήση, έχουν τυποποιηθεί και κατηγοριοποιηθεί σε αρκετές ομάδες [4].

1.2.3: Τυποποίηση χαλύβων

Η τυποποίηση χαλύβων γίνεται από κάποιο γράμμα, νούμερο, σύμβολο, όνομα ή τον συνδυασμό αυτών και κυρίως με βάση τη χημική σύσταση των κραμάτων. Υπάρχουν οργανισμοί που δημιουργούν τις τυποποιήσεις αυτές, για την Αμερική είναι το American Iron and Steel Institute (AISI) και Society of Automotive Engineers (SAE), για την Γερμανία είναι το DIN standard και γενικότερα για τα κράματα είναι το πρότυπο Unified Numbering System (UNS) που δημιουργήθηκε από το ASTM (American Society for Testing and Materials) το SAE και από άλλα ινστιτούτα. Για τους χάλυβες το πιο διαδεδομένο πρότυπο είναι αυτό του AISI. Τα προϊόντα χαλύβων χαρακτηρίζονται από ένα γράμμα και έναν αριθμό με βάση το πρότυπο κατασκευής τους, για παράδειγμα το A (για σιδηρούχα υλικά) και έναν αριθμό ωστόσο για τον ακριβή προσδιορισμό χρειάζεται ο βαθμός (grade) και η κλάση (class) [5].

Το πρότυπο το οποίο ακολουθεί ο εργαλειοχάλυβας της έρευνας αυτής ως προς την χημική του σύσταση είναι το ASTM A681. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο οι εργαλειοχάλυβες χωρίζονται σε:

1. Τύπου H: Εργαλειοχάλυβες θερμών κατεργασιών (hot work tool steel). Χρησιμοποιούνται ως μήτρες, καλούπια, έμβολα σε θερμές κατεργασίες όπως σφυρηλάτηση και η χύτευση.
 - Οι τύποι H10 μέχρι H19 χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη χρωμίου μαζί με άλλα κραματικά στοιχεία και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή.
 - Οι τύποι H19 μέχρι H26, που περιέχουν βολφράμιο μαζί με άλλα στοιχεία
2. Τύπου A: Εργαλειοχάλυβες μέτριας κραματοποίησης και υψηλής εμβαπτότητας ψυχρών κατεργασιών (air hardening cold work alloy steel). Βάφονται στο αέρα και χρησιμοποιούνται σε εργαλεία υψηλής αντοχής σε φθορά.

3. Τύπου D: Εργαλειοχάλυβες υψηλού ποσοστού άνθρακα και χρωμίου (diffused hardening cold work alloy steel), οι οποίοι παρουσιάζουν αρκετά υψηλή αντοχή σε φθορά και χρησιμοποιούνται σε εργαλεία ψυχρής διαμόρφωσης.
4. Τύπου O: Εργαλειοχάλυβες ψυχρών εφαρμογών (oil hardening cold work alloy steel), βάζονται σε λάδι και βρίσκουν εφαρμογές σε εργαλεία ψυχρής διαμόρφωσης
5. Τύπου S: Εργαλειοχάλυβες αντοχής σε κρούση (shock resisting steels), με χαρακτηριστικό την αντοχή σε κρούση και φθορά, χρησιμοποιούνται κυρίως για εργαλεία που καταπονούνται από κρουστικά φορτία.
6. Τύπου L: Ειδικών εφαρμογών εργαλειοχάλυβες (special purpose tool steels), χρησιμοποιούνται για κατασκευαστικές εφαρμογές και για εργαλεία μικρής διάρκειας.
7. Τύπου F: Ειδικών εφαρμογών εργαλειοχάλυβες (special purpose tool steels), χρησιμοποιούνται για κοπτικά εργαλεία υψηλής ακρίβειας
8. Τύπου P: Χάλυβες καλουπιών χύτευσης πλαστικών (plastic mold tool steels), παρουσιάζουν μέτρια σκληρότητα και αντοχή σε φθορά.
9. Τύπου W: Εργαλειοχάλυβες χαμηλής εμβαπτότητας (water hardened plain carbon steel), βάζονται σε νερό. Χρησιμοποιούνται σε εργαλεία μορφοποίησης ξύλου.

Οι εργαλειοχάλυβες εν θερμώ εφαρμογών συμβολίζονται με το γράμμα H. Παρουσιάζουν πολύ καλή αντίσταση στην φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες και περιέχουν σχετικά μικρό ποσοστό άνθρακα από 0.3% μέχρι 0.4% [6].

1.2.4: Εργαλειοχάλυβας H13

Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί ο εργαλειοχάλυβας AISI H13, ο οποίος σύμφωνα με το ASTM A681 ανήκει στους εργαλειοχάλυβες εν θερμώ εφαρμογών τύπου H. Ο H13 ανήκει στην υποκατηγορία των χαλύβων H10-H19 λόγω της ύπαρξης του χρωμίου ως κύριο κραματικό στοιχείο και για αυτό καλούνται και χρωμιούχοι χάλυβες. Περιέχουν χαμηλό ποσοστό άνθρακα και μέτριο προς μεγάλο ποσοστό κραματικών στοιχείων. Η χημική σύστασή τους (**Εικόνα 2**) είναι πλούσια σε χρώμιο και σε άλλα κραματικά στοιχεία, όπως μολυβδαίνιο, πυρίτιο και βανάδιο. Άλλες ιδιότητες που έχουν οι εργαλειοχάλυβες της ομάδας H είναι αντοχή σε θερμική παραμόρφωση, αντοχή σε φθορά σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχή σε heat checking και υψηλή κατεργασιμότητα. Στην ακόλουθη φωτογραφία παρουσιάζονται με κίτρινο φόντο τα όρια της χημικής σύστασης του συγκεκριμένου τύπου. Η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους χάλυβες της ίδιας ομάδας είναι η αυξημένη περιεκτικότητα βαναδίου που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σκληρών καρβιδίων βαναδίου με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής σε φθορά. Ταυτόχρονα, αύξηση της περιεκτικότητας βολφραμίου και μολυβδαίνιου οδηγεί σε αύξηση της εν θερμώ αντοχής του υλικού συνοδευόμενη από μικρή μείωση της δυσθραυστότητας. Οι χάλυβες αυτοί είναι δυνατόν να σκληρύνουν μέσω αέρα αν έχουν διάμετρο έως 152mm. Οι εργαλειοχάλυβες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξαρτήματα μηχανών διέλασης, όπως σε συγκρατητές μήτρας και στελέχη. Ακόμα, χρησιμοποιούνται σε καλούπια έγχυσης σε χύτευση πλαστικών, σε εξαρτήματα μηχανών θερμής διάτμησης και σε εξαρτήματα που χρειάζονται υψηλή αντοχή στη φθορά. Επίσης, ο H13 συστήνεται για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή αντοχή και ολκιμότητα όπως σε μήτρες χύτευσης αλουμινίου και σφυρηλάτησης [7].

TABLE 1 Chemical Requirements, %^A

UNS Designation ^B	Type	Carbon		Manganese ^C		Phosphorus, max	Sulfur ^D , max	Silicon		Chromium		Vanadium		Tungsten		Molybdenum	
		min	max	min	max			min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
T20810	H10	0.35	0.45	0.20	0.70	0.030	0.030	0.80	1.25	3.00	3.75	0.25	0.75	...	...	2.00	3.00
T20811	H11	0.33	0.43	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50	0.30	0.60	...	...	1.10	1.60
T20812	H12	0.30	0.40	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50	0.20	0.50	1.00	1.70	1.25	1.75
T20813	H13	0.32	0.45	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50	0.80	1.20	...	...	1.10	1.75
T20814	H14	0.35	0.45	0.20	0.60	0.030	0.030	0.80	1.25	4.75	5.50	...	...	4.00	5.25	...	...
T20819	H19	0.32	0.45	0.20	0.50	0.030	0.030	0.15	0.50	4.00	4.75	1.75	2.20	3.75	4.50	0.30	0.55
T20821	H21	0.26	0.36	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.50	3.00	3.75	0.30	0.60	8.50	10.00	...	...
T20822	H22	0.30	0.40	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	1.75	3.75	0.25	0.50	10.00	11.75	...	...
T20823	H23	0.25	0.35	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.60	11.00	12.75	0.75	1.25	11.00	12.75	...	...
T20824	H24	0.42	0.53	0.15	0.40	0.030	0.030	0.15	0.40	2.50	3.50	0.40	0.60	14.00	16.00	...	...

Εικόνα 2: Χημική σύσταση χάλυβα H13 [6]

Στην επόμενη φωτογραφία (**Εικόνα 3**) φαίνεται η κατά Brinell σκληρότητα σε κατάσταση επαναφοράς και ψυχρής έλασης.

TABLE 2 Maximum Brinell Hardness in Annealed or Cold-Drawn Condition

Type	Annealed BHN	Cold Drawn BHN	Type	Annealed BHN	Cold Drawn BHN
H10	229	255	O1	212	241
H11	235	262	O2	217	241
H12	235	262	O6	229	241
H13	235	262	O7	241	255
H14	235	262			
H19	241	262	S1	229	255
H21	235	262	S2	217	241
H22	235	262	S4	229	255
H23	255	269	S5	229	255
H24	241	262	S6	229	255
H25	235	262	S7	229	255

Εικόνα 3: Κατά Brinell σκληρότητα H13 [6]

Τέλος, παρουσιάζονται διάφορες τιμές θερμοκρασίας που προέκυψαν από έρευνες για τη βελτιστοποίηση της θερμικής κατεργασίας των εργαλειοχαλύβων, σύμφωνα με το πρότυπο.

Type	Preheat Temperature, °F (°C)	Austenitizing Temperature, °F (°C)			Quench Medium	Tempering Temperature, °F (°C)	Minimum Hardness, RC
		Salt Bath	Controlled Atmosphere Furnaces	Austenitizing Time (minutes)			
H10	1450 (788)	1850 (1010)	1875 (1024)	5–15	Air	1025 (552)	55
H11	1450 (788)	1825 (996)	1850 (1010)	5–15	Air	1025 (552)	53
H12	1450 (788)	1825 (996)	1850 (1010)	5–15	Air	1025 (552)	53
H13	1450 (788)	1825 (996)	1850 (1010)	5–15	Air	1025 (552)	52
H14	1450 (788)	1900 (1038)	1925 (1052)	5–15	Air	1025 (552)	55
H19	1450 (788)	2150 (1177)	2175 (1191)	5–15	Air	1025 (552)	55
H21	1450 (788)	2150 (1177)	2175 (1191)	5–15	Air	1025 (552)	52
H22	1450 (788)	2150 (1177)	2175 (1191)	5–15	Air	1025 (552)	53
H23	1500 (816)	2275 (1246)	2300 (1260)	5–15	Oil	1200 (649)	42
H24	1450 (788)	2200 (1204)	2225 (1218)	5–15	Air	1025 (552)	55
H25	1450 (788)	2250 (1232)	2275 (1246)	5–15	Air	1025 (552)	44
H26	1550 (843)	2275 (1246)	2300 (1260)	5–15	Air	1025 (552)	58
H41	1450 (788)	2125 (1163)	2150 (1177)	5–15	Air	1025 (552)	60
H42	1450 (788)	2175 (1191)	2200 (1204)	5–15	Air	1025 (552)	60

Εικόνα 4: Παράμετροι κατεργασίας χάλυβων [6]

1.3: Θερμικές κατεργασίες

Τέτοιου είδους κατεργασίες ξεκίνησαν να γίνονται χιλιάδες χρόνια πριν, όπως στα σιδηρουργεία της αρχαίας Ελλάδας όπου φτιάχνονταν σπαθιά αφού περάσουν ένα είδος βαφής και επαναφοράς. Πλέον οι θερμικές κατεργασίες αποτελούν βασικό στάδιο παραγωγής στη βαριά βιομηχανία. Ο όρος θερμική κατεργασία αναφέρεται σε ένα σύνολο διεργασιών που περιλαμβάνει τη θέρμανση και ψύξη του μεταλλικού προϊόντος σε στέρεα κατάσταση με προκαθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες. Σκοπός της είναι η πρόσδοση στο υλικό δομικής και εντατικής κατάστασης τέτοιας που να οδηγεί στην εξασφάλιση συγκεκριμένων επιθυμητών ιδιοτήτων, ρυθμίζοντας ακόμη το μέγεθος των κόκκων και των μηχανικών ή άλλων ιδιοτήτων. Οι κατεργασίες αυτές δεν επενεργούν στην μορφή του τεμαχίου ή στην χημική του σύσταση, αλλά μόνο στο είδος της κρυσταλλικής του δομής. Οι κατεργασίες χωρίζονται ανάλογα με την τροποποίηση των ιδιοτήτων το υλικού σε προκαταρτικές (ή ενδιάμεσες) όταν μεταβάλλονται ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με την κατεργασιμότητα του και σε δευτερεύουσες (ή τελικές) όταν μεταβάλλονται λειτουργικές ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με τη χρηστικότητα του τελικού προϊόντος. Ανάλογα με την σταθερότητα της προσδιδόμενης δομής χωρίζονται σε κατεργασίες ανόπτησης με σταθερές δομές και κατεργασίες σκλήρυνσης με δομές εκτός ισορροπίας [8]. Στις θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης λαμβάνουν χώρα τα εξής στάδια:

- Θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με σκοπό την απόκτηση σταθερής δομής
- Ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή μία ενδιάμεση θερμοκρασία με βύθιση σε κάποιο λουτρό βαφής
- Επαναθέρμανση σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία για αρκετό χρονικό διάστημα

Παράμετροι των φάσεων (θέρμανση, παραμονή, ψύξη) μίας θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης αποτελούν:

- Παράμετροι θέρμανσης: η θερμοκρασία θέρμανσης (T_s), η διάρκεια θέρμανσης (t_s) και το μέσο θέρμανσης.
- Παράμετροι παραμονής: η διάρκεια και το μέσο παραμονής
- Παράμετροι ψύξης: η διάρκεια ψύξης (t_w), η ταχύτητα ψύξης (u_w) και το μέσο ψύξης.

Οι θερμικές κατεργασίες σκλήρυνσης με βάση την επίδρασή τους στο τεμάχιο χωρίζονται σε:

- Κατεργασίες μάζας
- Επιφανειακές κατεργασίες

Στη συνέχεια περιγράφονται οι διάφορες κατεργασίες μάζας και επιφάνειας που γίνονται στους χάλυβες.

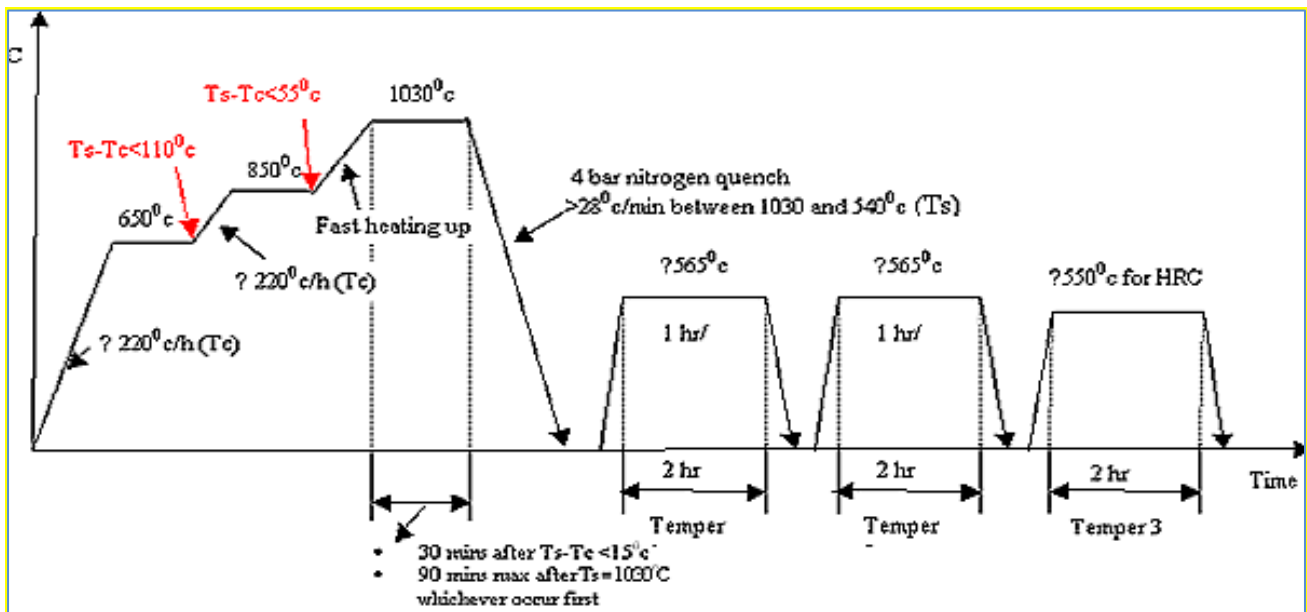
1.3.1: Θερμικές κατεργασίες μάζας

Οι θερμικές κατεργασίες μάζας επιδρούν συνολικά στο τεμάχιο και ο σκοπός τους είναι η μεταβολή των ιδιοτήτων του χάλυβα ανάλογα με τις απαιτήσεις για το υλικό και κυρίως ο έλεγχος της σκληρότητας, της δυσθραυστότητας και τη χαλάρωση των τάσεων. Συνήθως, η θερμική κατεργασία του χάλυβα περιλαμβάνει έναν κύκλο κατεργασιών που συνδυάζει αρκετές κατεργασίες μάζας αλλά και επιφάνειας. Όπως είναι κατανοητό δεν υπάρχει ένας συγκεκριμένος κύκλος κατεργασίας που να βελτιώνει ταυτόχρονα όλες τις ιδιότητες για όλους του χάλυβες, οπότε για κάθε εφαρμογή και χάλυβα πρέπει να γίνεται επιλογή του βέλτιστου κύκλου και των κατάλληλων παραμέτρων των επιμέρους κατεργασιών για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

Οι κατεργασίες μάζας θα αναπτυχθούν εκτενέστερα παρακάτω και χωρίζονται επιγραμματικά σε:

1. Ανοπήσεις, με στόχο τη μείωση των εσωτερικών τάσεων, αύξηση της πλαστικότητας, της κατεργασιμότητας και παράλληλα την ομοιογενοποίηση του τεμαχίου,
2. Βαφές, οι κατεργασίες αυτές έχουν σκοπό την σκλήρυνση του χάλυβα με σχετικά ταχεία απόψυξη,
3. Επαναφορές, αυτές οι κατεργασίες ακολουθούν τις κατεργασίες βαφής και αποσκοπούν στην αύξηση της δυσθραυστότητας του τεμαχίου με ταυτόχρονη, με μείωση ωστόσο της σκληρότητας [8].

Στην **Εικόνα 5** φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου ενός τυπικού κύκλου συμβατικής θερμικής κατεργασίας που συνδυάζει ανόπτηση, ωστενιτοποίηση και επαναφορά.



Εικόνα 5: Συμβατική θερμική κατεργασία εργαλειοχάλυβα H13 [9]

1.3.1.1: Ανόπτηση (annealing)

Ανόπτηση ονομάζεται η θερμική κατεργασία, κατά την οποία το τεμάχιο παραμένει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας μετασχηματισμού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια, ψύχεται με αργό ρυθμό. Χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της πλαστικότητας, της ολκιμότητας, της δυσθραυστότητας και της αποκατάστασης των τάσεων. Ακόμα, βελτιώνει την κατεργασιμότητα, διευκολύνει την εφαρμογή των εν ψυχρώ κατεργασιών στο τεμάχιο, ενώ επιδρά θετικά στις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες και βοηθά στη δημιουργία ομοιόμορφης μικροδομής. Για αυτό συνήθως η κατεργασία αυτή γίνεται από τον προμηθευτή του υλικού. Όσον αφορά τα σιδηρούχα κράματα, η ανόπτηση γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τους 500°C, αλλά, οι χρόνοι παραμονής και οι θερμοκρασίες διαφοροποιούνται με βάση την σύσταση του χάλυβα και τις επιθυμητές ιδιότητες [2]. Όταν χρησιμοποιείται απλά ο όρος ανόπτηση αναφέρεται στη πλήρη ανόπτηση, όμως υπάρχουν και άλλα είδη ανόπτησης όπως:

- Ανόπτηση εξομαλύνσεως
- Ανόπτηση σφαιροποίησης
- Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης
- Ανόπτηση κατεργασίας
- Αποτακτική ανόπτηση

Κατά την **ανόπτηση εξομάλυνσης** ο χάλυβας θερμαίνεται περίπου για 1 ώρα σε θερμοκρασία κατά 55-85°C πάνω από την A3 ή Ac_m (ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα) για ωστενιτοποίηση και μετά ψύχεται σχετικά γρήγορα στον αέρα, μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κατεργασία αυτή εφαρμόζεται σε υποευθηκτοειδείς χάλυβες για την δημιουργία ομοιόμορφης κυτταροειδούς και λεπτόκοκκης δομής φερρίτη-περλίτη. Ενώ, για τους υπερευθηκτοειδείς χάλυβες για την καλύτερη διασπορά του σεμενίτη. Έτσι παρατηρείται μείωση στις ανισοτροπίες του χάλυβα, ενώ βελτιώνονται οι μηχανικές του ιδιότητες, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων.

Πλήρης ανόπτηση. Περιλαμβάνει τη θέρμανση του χάλυβα για ορισμένο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία περίπου 50°C πάνω από την A3 για υποευτηκτοειδείς χάλυβες ή περίπου 50°C πάνω από την A1 για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες. Ακολουθεί, η παραμονή του τεμαχίου σε φούρνο για αρκετές ώρες, όπου αποψύχεται μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος με ταχύτητα ψύξης περίπου 20°C/h. Στόχος της είναι η αποκατάσταση της μικροδομής του χάλυβα και η βελτίωση της κατεργασιμότητάς του, ενώ αυξάνεται παράλληλα η ολκιμότητά του και το μέγεθος των ωστενιτικών κόκκων διευκολύνοντας τη μαρτενσιτική βαφή. Συνήθως εφαρμόζεται σε χάλυβες έως μέσης περιεκτικότητας σε άνθρακα, οι οποίοι θα υποστούν πλαστική παραμόρφωση σε επόμενες κατεργασίες.

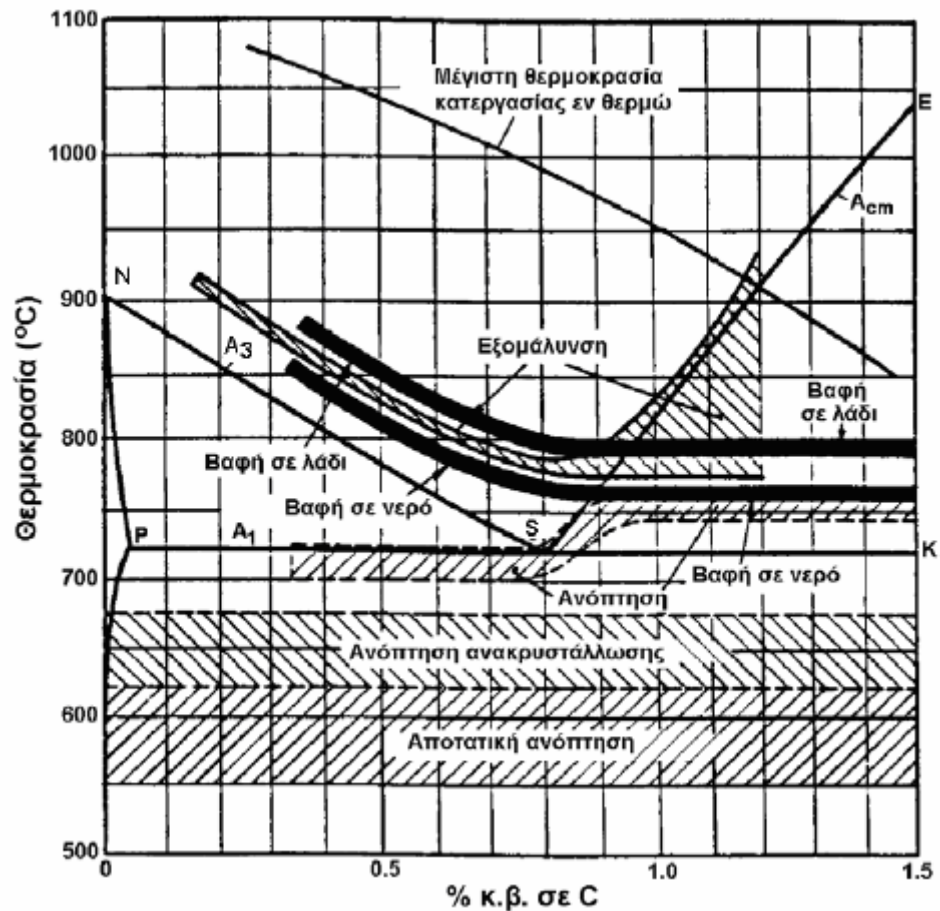
Ανόπτηση σφαιροποίησης χρησιμοποιείται σε χάλυβες μεγάλων διαστάσεων, ο πυρήνας των οποίων ψύχεται πιο αργά από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα στην επιφάνεια να υπάρχει πλακοειδής περλίτης και στο κέντρο περλίτης με σφαιροποιημένο σεμενίτη. Είναι επιθυμητή η σφαιροποίηση του σεμενίτη σε όλο το τεμάχιο, καθώς ο περλίτης δυσκολεύει την επεξεργασία του. Για την σφαιροποίηση του σεμενίτη ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία λίγο χαμηλότερη από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, περίπου στους 700°C και έπειτα ψύχεται αργά μέσα στον κλίβανο για χρόνο μεταξύ 18 και 25 ωρών. Το αποτέλεσμα της σφαιροποίησης είναι ένας πιο μαλακός και όλκιμος χάλυβας, συνεπώς βελτιώνεται η κατεργασιμότητα, χωρίς να υποστεί μετασχηματισμό φάσης ο σφαιροποιημένος σεμενίτης.

Ανόπτηση ανακρυστάλλωσης. Η κατεργασία αυτή περιλαμβάνει την θέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία υψηλότερης της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης, εντός της φερριτικής περιοχής (500-650°C). Ακολουθεί ελεγχόμενη αργή απόψυξη του τεμαχίου στον αέρα. Κυρίως, εφαρμόζεται στους παραμορφωμένους από εν ψυχρώ κατεργασίες, προκειμένου να εξαλειφθεί ο ιστός ενδοτράχυνσης και να βελτιωθεί η κατεργασιμότητα.

Η **ανόπτηση κατεργασίας** είναι η θέρμανση του χαλύβδινου τεμαχίου για ορισμένο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης (περίπου 550-600°C), με επακόλουθη βραδεία απόψυξη του τεμαχίου. Η κατεργασία αυτή έχει σκοπό να αναιρέσει τις επιπτώσεις της ψυχρής κατεργασίας στο υλικό, το οποίο έχει υποστεί σκλήρυνση με ενδοτράχυνση. Εφαρμόζεται για να είναι δυνατή η συνέχιση της πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού χωρίς τη θραύση του. Στην κατεργασία αυτή συμβαίνει ανακρυστάλλωση και αποκατάσταση.

Η **αποτακτική ανόπτηση** αποσκοπεί στην εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων που παραμένουν στο υλικό μετά από κατεργασίες, όπως χύτευση, φλογοκοπή ή από κατεργασίες παραγωγής χαλύβων. Το τεμάχιο θερμαίνεται εντός της φερριτικής περιοχής μεταξύ 550-650°C και κατόπιν αποψύχεται αργά. Λόγω της βραδείας θερμοκρασιακής μεταβολής τα άτομα αναδιατάσσονται και διαχέονται, με αποτέλεσμα την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων που υπήρχαν. Η κατεργασία αυτή δεν επηρεάζει τη μικρογραφική μορφή των χαλύβων [9], [43].

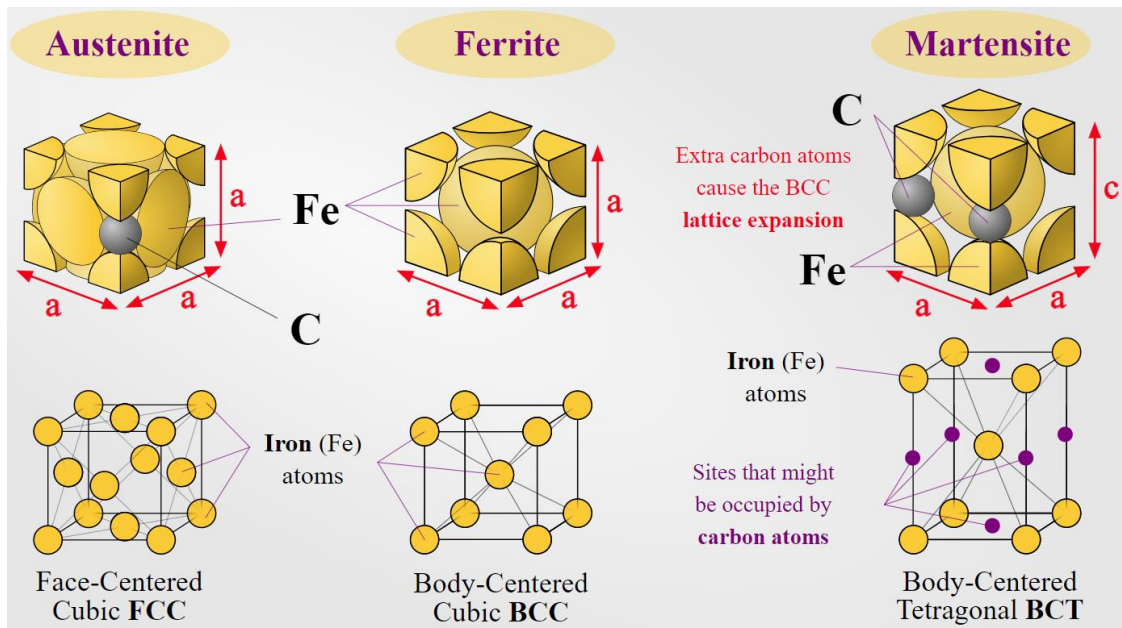
Στο διάγραμμα της **Εικόνας 6** απεικονίζονται οι θερμοκρασιακές περιοχές στις οποίες εφαρμόζονται οι διάφορες τεχνικές ανόπτησης πάνω στο διάγραμμα φάσεων.



Εικόνα 6: Περιοχές εφαρμογής των ειδών ανόπτησης στο διάγραμμα φάσεων [10]

1.3.1.2: Ωστενιτοποίηση (austenitizing)

Μία κρίσιμη κατεργασία που γίνεται στους χάλυβες κατά τη διαδικασία βελτίωσης των ιδιοτήτων τους είναι η ωστενιτοποίηση. Έχει αναφερθεί πως οι χάλυβες αλλάζουν φάσεις με την ανακατανομή των θέσεων των ατόμων στο ατομικό πλέγμα όταν θερμαίνονται πάνω από την A₃, όπως δείχνουν τα διαγράμματα φάσεων. Η ωστενιτοποίηση είναι η θέρμανση του χάλυβα έως τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κατά την οποία τα άτομα σιδήρου ανακατανέμονται στην κρυσταλλική δομή με αποτέλεσμα το μετασχηματισμό από φερρίτη σε ωστενίτη, δηλαδή από χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (BCC) σε εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (FCC), δημιουργώντας κενό που μπορεί να καλυφθεί από άτομα άνθρακα. Οι δομές φαίνονται στην **Εικόνα 7**, όπου παρατηρείται επίσης πως γίνεται διαστολή της κρυσταλλικής δομής του ωστενίτη και αυξάνεται ο όγκος.



Εικόνα 7: Κρυσταλλικές δομές φάσεων

Γενικά, ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50°C περίπου από την υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία A_{c3} , παραδείγματος χάριν για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες στους 830 – 900°C, στους 750 – 780°C για τους υπερευτηκτοειδείς και 1000 – 1100°C για συγκεκριμένες οικογένειες των υψηλά κραματωμένων χάλυβων. Καθοριστικός για την επιτυχία της διαδικασίας είναι ο έλεγχος του χρόνου παραμονής και της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, καθώς παρατεταμένη παραμονή σε αυτή οδηγεί σε ανεπιθύμητη αύξηση του μεγέθους των κόκκων ωστενίτη, η οποία ονομάζεται υπερθέρμανση και επιδρά αρνητικά στη μηχανική αντοχή. Επίσης, η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης επηρεάζει τη σκληρότητα του χάλυβα ακόμα και μετά την επαναφορά, όπου μικρότερες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης οδηγούν σε μικρότερη σκληρότητα. Κατά την ωστενιτοποίηση λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των κραματικών στοιχείων της μήτρας ωστενίτη από τα υπόλοιπα καρβίδια. Τα υπολειπόμενα καρβίδια στις μετέπειτα κατεργασίες επηρεάζουν θετικά την αντοχή στη φθορά και συμβάλλουν στον έλεγχο του μεγέθους των κόκκων του ωστενίτη. Για θερμοκρασία ωστενιτοποίησης αρκετά υψηλότερη από την κατάλληλη οι κόκκοι αυξάνονται σε βαθμό που βλάπτει τις ιδιότητες, επειδή αυξάνεται το μέγεθος των καρβιδίων ή αυτά διαλύονται εντός του ωστενίτη. Γενικώς, ισχύει πως όσο τα καρβίδια βρίσκονται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα και είναι πιο λεπτά, τόσο καλύτερα μπορεί να ελεγχθεί το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη [11]. Κατά την διάρκεια της θέρμανσης ο χάλυβας οξειδώνεται, με αποτέλεσμα την επιφανειακή απώλεια υλικού και τη μείωση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση κλίβανων ελεγχόμενης ατμόσφαιρας ή φούρνους κενού για την θέρμανση του τεμαχίου. Τέλος, στα τεμάχια μεγάλων διαστάσεων παρατηρείται θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφανείας και του εσωτερικού που μπορεί να οδηγήσει σε πλαστική παραμόρφωση, για το λόγο αυτό προτείνεται αργή θέρμανση του χάλυβα, ώστε η θερμοκρασία να είναι ομοιόμορφη στην επιφάνεια και στον πυρήνα. Ο ωστενίτης που υπάρχει στο τέλος της κατεργασίας επηρεάζει αρκετά τη σκληρότητα και το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη. Στην παρούσα έρευνα ο εργαλειοχάλυβας ανήκει στην κατηγορία των υποευτηκτοειδών λόγω της μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα (περίπου 0.30%), αλλά λόγω της πληθώρας κραματικών στοιχείων που περιλαμβάνει θεωρείται υψηλά κραματωμένος, με θερμοκρασία ωστενιτοποίησης είναι πάνω από 1000°C [10].

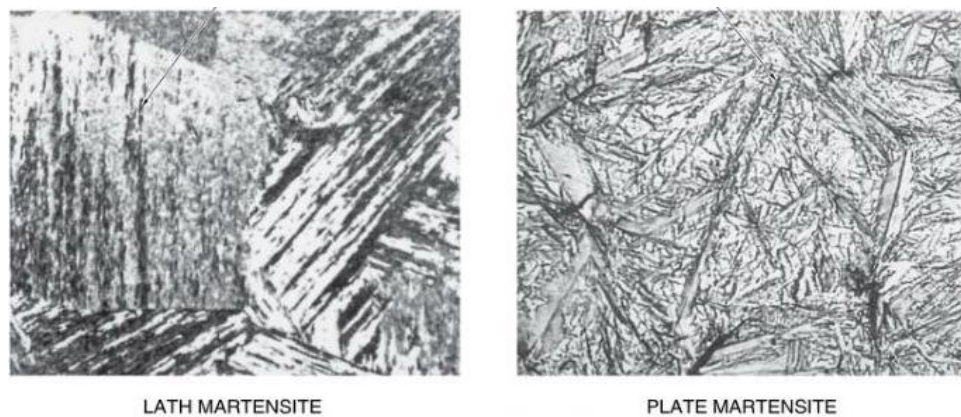
1.3.1.3: Βαφή (quenching)

Ο όρος βαφή χάλυβων αναφέρεται στη σχετικά απότομη απόψυξη ενός χάλυβα αφού υποστεί ωστενιτοποίηση, από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, η οποία οδηγεί στη λήψη φάσεων εκτός

θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η βαφή γίνεται με τη βοήθεια κάποιου μέσου βαφής όπως νερό, αέρας, λάδι, νερό που περιέχει άλατα, αδρανή αέρια (άζωτο, ήλιο) κ.α. Στους περισσότερους χάλυβες, το αποτέλεσμα της ψύξης είναι ο μετασχηματισμός της μικροδομής με την εμφάνιση μαρτενσίτη, ο οποίος προσδίδει στο χάλυβα μεγάλη σκληρότητα, υψηλότερη αντοχή, αλλά ο χάλυβας γίνεται πιο ψαθυρός. Πετυχημένη σκλήρυνση κατά τη βαφή είναι η επίτευξη της επιθυμητής μικροδομής, της σκληρότητας, της αντοχής ή δυσθραυστότητας, ενώ ελαχιστοποιούνται οι παραμένουσες τάσεις και η πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών. Για τη βαφή ενός χάλυβα πρέπει η περιεκτικότητα σε άνθρακα να είναι μεγαλύτερη από 0.2%. Χάλυβες με μικρότερη περιεκτικότητα δεν επιδέχονται βαφή παρά μόνο κάποιο είδος ανόπτησης [12]. Η ταχύτητα απόψυξης είναι πολύ σημαντική παράμετρος για το τελικό αποτέλεσμα και τις ιδιότητες του χάλυβα. Γενικώς, όσο πιο απότομη είναι η ψύξη τόσο πιο σκληρό είναι το υλικό αλλά με επακόλουθη μείωση της δυσθραυστότητας και τον κίνδυνο ρωγμών, λόγω της δημιουργίας εσωτερικών τάσεων. Ο ρυθμός απόψυξης επηρεάζεται από το μέσο ψύξης, π.χ. κατά την απόψυξη στο νερό γίνεται πιο άμεση απόψυξη από ότι στον αέρα. Ακόμη, η ανάδευση του μέσου ψύξης αυξάνει και άλλο την ταχύτητα απόψυξης. Ο μαρτενσίτης και ο μαινίτης - ο οποίος εμφανίζεται όταν εφαρμόζεται μέτρια ταχύτητα απόψυξης - είναι δομές εκτός ισορροπίας που δε φαίνονται σε διάγραμμα φάσεων Fe-C, αφού έχουν παράμετρο τον χρόνο. Αυτές οι δύο φάσεις σχεδιάζονται στα διαγράμματα Χρόνου-Θερμοκρασίας-Μετασχηματισμού (TTT: Time-Temperature-Transformation) και διάγραμμα Συνεχούς Μετασχηματισμού Απόψυξης (CCT: Cooling Continuous Transformation). Τέτοια διαγράμματα παρουσιάζουν το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε συνάρτηση με τον χρόνο. Κάθε χάλυβας έχει διαφορετικό διάγραμμα TTT [2].

Από έρευνες για την κινηματική του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού προκύπτει πως τα ο μαρτενσίτης που εμφανίζεται στα κράματα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση τη μορφολογία του σε δύο ομάδες (**Εικόνα 8**):

1. με μορφή πλάκας (plate), για χάλυβες με περιεκτικότητα σε άνθρακα $>1.3\%$, όπου ο σχηματισμός συνεχίζεται αδιάκοπα κατά την εμβάπτιση στο άζωτο και την αναθέρμανση. Σχηματίζεται μεταξύ των θερμοκρασιών -180°C και -160°C και είναι πιο επιθυμητή αργή αναθέρμανση γιατί έτσι υπάρχουν καλύτερες συνθήκες για σχηματισμό μαρτενσίτη.
2. με μορφή βελόνων (lath), για χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα $<0.5\%$, όπου ο μετασχηματισμός μπορεί να σταματήσει για γρήγορη ψύξη, αλλά λαμβάνει χώρα κατά την αργή ελεγχόμενη θέρμανση του δοκιμίου από τους -180°C στους -40°C [13].



Εικόνα 8: Απεικόνιση με μικροσκόπιο των δύο ειδών μαρτενσίτη

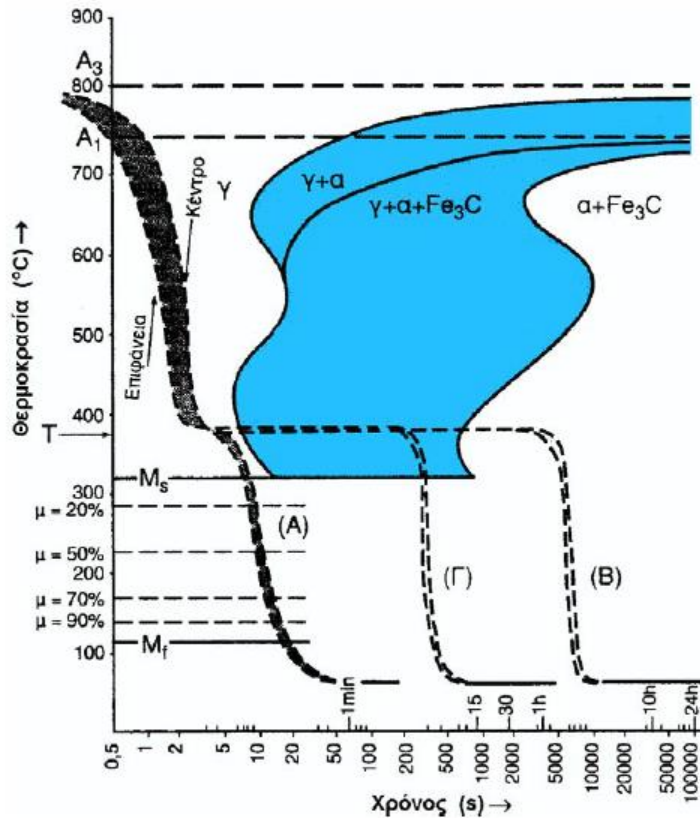
Ο μαρτενσίτης δημιουργείται επειδή τα άτομα άνθρακα λόγω της ταχύτητας απόψυξης δεν προλαβαίνουν να αναδιαταχθούν, οπότε ουσιαστικά πρόκειται για ένα στέρεο διάλυμα άνθρακα-φερρίτη. Τα άτομα άνθρακα παραμένουν στις θέσεις τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροτάσεων που συμβάλλουν στην αύξηση της σκληρότητας του μαρτενσίτη σε σχέση με τον ωστενίτη. Παρ' όλα αυτά, ο ωστενίτης δεν μετασχηματίζεται κατά τη βαφή εξ' ολοκλήρου σε μαρτενσίτη, αλλά παραμένει μικρή ποσότητα, η οποία καλείται υπολειπόμενος ωστενίτης και εξαρτάται από τις παραμέτρους της

ωστενιτοποίησης και της βαφής αλλά και της περιεκτικότητας σε κραματικά στοιχεία. Ο ωστενίτης είναι σε ασταθή φάση μετά από τη βαφή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα το τεμάχιο να είναι αρκετά εύθραυστο, κάτι που αντιμετωπίζεται με την κατεργασία επαναφοράς [14]. Η ποσότητα του ωστενίτη που παραμένει αυξάνεται, όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα κραματικών στοιχείων, όταν η βαφή γίνεται με πιο γρήγορο ρυθμό, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης ή ο χρόνος παραμονής σε αυτή. Μετά το τέλος της βαφής στη δομή του χάλυβα συνυπάρχουν μαρτενσίτης, καρβίδια και υπολειπόμενος ωστενίτης. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές βαφής όπως:

- Συνεχής βαφή (direct quenching), στην οποία το τεμάχιο ψύχεται άμεσα από θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Σταδιακή (time quenching), όπου ο ρυθμός ψύξης του υλικού αλλάζει δραστικά κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αυτό γίνεται συνήθως με βαφή του χάλυβα σε περισσότερα από ένα λουτρά. Κυρίως χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων και αποφυγή της εμφάνισης ρωγμών.
- Επιλεκτική βαφή (selective quenching), όταν στόχος είναι να μην επηρεαστεί όλο το τεμάχιο από το μέσο ψύξης.
- Βαφή με ψεκασμό (spray quenching) υγρών με υψηλή πίεση για την αύξηση του ρυθμού ψύξης σε συγκεκριμένα σημεία.
- Διακοπτόμενη βαφή (interrupted quenching), κατά την οποία γίνεται ψύξη μέχρι μία θερμοκρασία πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού, παραμονή σε αυτή για ορισμένο διάστημα και μετά ακολουθεί απόψυξη στον αέρα [15].

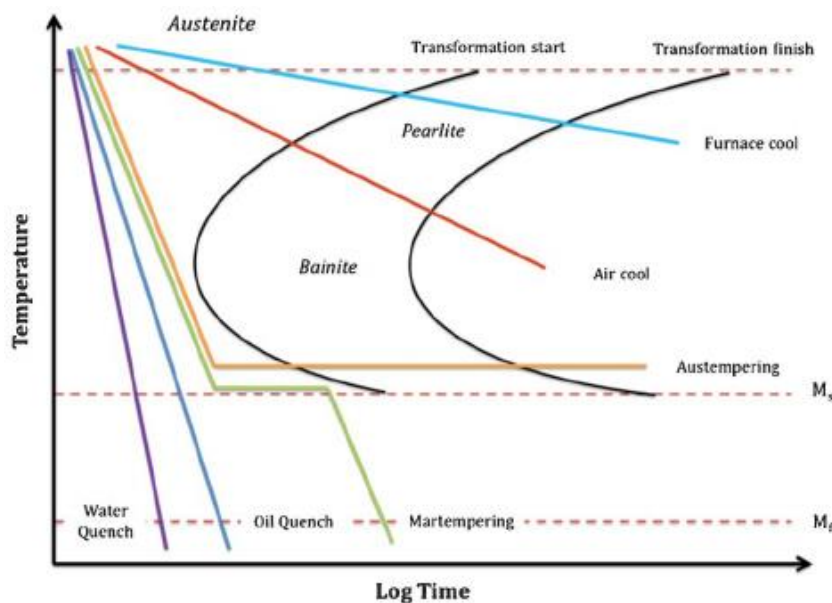
Έχει αναφερθεί παραπάνω πως οι παραμένουσες τάσεις αποτελούν κίνδυνο για το αποτέλεσμα της θερμικής κατεργασίας, έτσι για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στη συνεχή βαφή χρησιμοποιείται το κατάλληλο λουτρό βαφής και όχι δραστικότερο, γιατί τότε υπάρχουν μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές επιφάνειας – πυρήνα με αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων. Επίσης επιλέγεται κλιμακωτή βαφή, που σημαίνει πως η απόψυξη δεν είναι συνεχής αλλά διακοπτόμενη και περιλαμβάνει την παραμονή σε μία ενδιάμεση θερμοκρασία, μεταξύ της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και της θερμοκρασίας έναρξης, συνήθως μέσα σε κάποιο λουτρό τηγμένου άλατος. Τα είδη της κλιμακωτής βαφής είναι η μαρτενσιτική βαφή, η μπαινιτομαρτενσιτική βαφή και η μπαινιτική βαφή. Στην **Εικόνα 9** απεικονίζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας-χρόνου των κατεργασιών.

1. Κλιμακωτή μαρτενσιτική βαφή. Το τεμάχιο αποψύχεται απότομα σε λουτρό θερμοκρασίας πάνω από την θερμοκρασία έναρξης μετασχηματισμού του Α σε Μ (Ms) και παραμένει σε αυτή για μερικά δευτερόλεπτα για να μην προλάβει να αρχίσει ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη και να αποκτήσει όλο το τεμάχιο την ίδια θερμοκρασία. Μετά το τεμάχιο αφαιρείται από το λουτρό και αφήνεται να αποψυχθεί και να μετασχηματισθεί πλήρως σε μαρτενσίτη. Με το είδος αυτό το τεμάχιο αποκτά σε κατάσταση ωστενίτη ομοιόμορφη θερμοκρασία και έτσι ο πυρήνας με την επιφάνεια μετασχηματίζονται ταυτόχρονα.
2. Κλιμακωτή μπαινιτική βαφή. Η κατεργασία αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη, με τη διαφορά στον χρόνο παραμονής του τεμαχίου στην ενδιάμεση θερμοκρασία. Στη μπαινιτική βαφή, το τεμάχιο παραμένει σε ενδιάμεση θερμοκρασία για μερικές ώρες έως ότου ο ωστενίτης μετασχηματιστεί πλήρως σε μπαινίτη και ακολουθεί αργή απόψυξη σε αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κλιμακωτή μπαινιτική βαφή προσδίδει στο χάλυβα παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές που προκύπτουν μετά από βαφή και επαναφορά. Εφαρμόζεται σε τεμάχια με περίπλοκη γεωμετρία που μπορεί να αποκτήσουν ρωγμές κατά τη συνηθισμένη βαφή.
3. Κλιμακωτή μπαινιτομαρτενσιτική βαφή, όπου η παραμονή στο ενδιάμεσο στάδιο διαρκεί μερικά λεπτά, ώστε ένα μέρος του ωστενίτη να μετατραπεί σε μπαινίτη. Ακολουθεί απότομη ψύξη και τελικά η δομή αποτελείται από μείγμα μπαινίτη – μαρτενσίτη. Τέτοια βαφή ενδείκνυται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή σκληρότητα και δυσθραυστότητα [10].



Εικόνα 9: Είδη κλιμακωτών βαφών: Α – μαρτενσιτική βαφή, Β – μπαινιτική βαφή, Γ – μπαινιτομαρτενσιτική βαφή

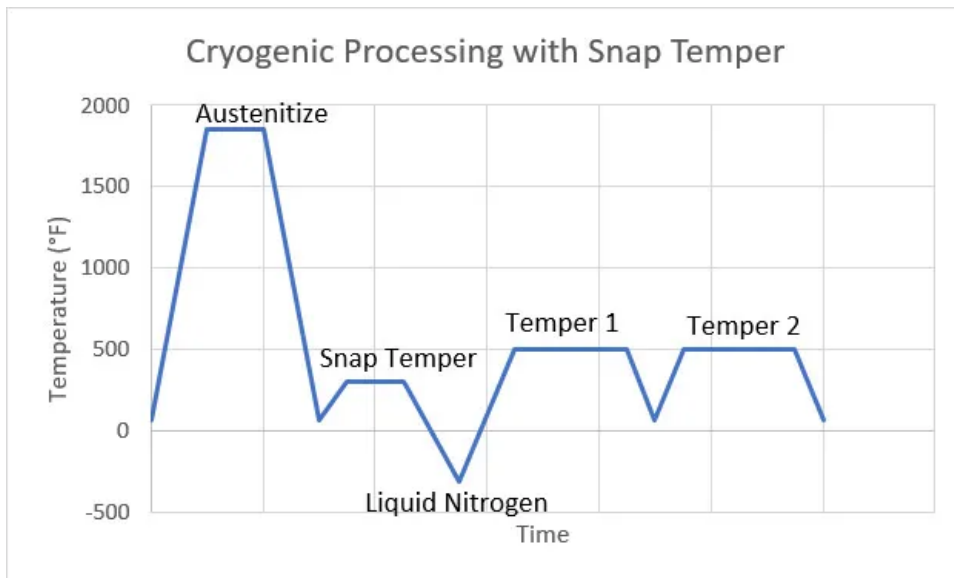
Ο σχηματισμός του μαρτενσίτη, όπως αναφέρθηκε είναι ο βασικός σκοπός της βαφής. Αυτός συμβαίνει κατά τη ψύξη, όταν η θερμοκρασία του δοκιμίου φτάσει τη θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s) και για να συνεχιστεί απαιτείται να μειωθεί η θερμοκρασία, μέχρι ο μετασχηματισμός να ολοκληρωθεί αφού φτάσει την θερμοκρασία τέλους του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_f). Στο διάγραμμα της **Εικόνας 10** φαίνεται η σχέση των διαφόρων τύπων και μέσων βαφής με την θερμοκρασία και τον χρόνο [8].



Εικόνα 10: Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου-μετασχηματισμού βαφής εργαλειοχάλυβα τύπου M

Ενδιάμεση επαναφορά (Snap tempering)

Αφού ολοκληρωθεί η βαφή, στο χάλυβα παραμένει ένα ποσοστό του ωστενίτη έχει μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Η μαρτενσιτική δομή παρουσιάζει αυξημένη σκληρότητα, ωστόσο επειδή ο μαρτενσίτης είναι πιο ψαθυρός και η δομή είναι ακόμα ασταθής αν η κανονική επαναφορά καθυστερήσει αρκετές ώρες μπορεί να εμφανιστούν ρωγμές που μπορεί να οδηγήσουν εύκολα σε θραύση. Για αυτό γίνεται μία ήπια επαναφορά που ονομάζεται snap tempering μετά τη βαφή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου της κρυογενικής κατεργασίας στην **Εικόνα 11**. Ως snap tempering ορίζεται μία προληπτική ενδιάμεση κατεργασία για τη χαλάρωση των τάσεων που εφαρμόζεται σε χάλυβες υψηλής σκληρότητας αμέσως μετά τη βαφή για την πρόληψη της δημιουργίας ρωγμών λόγω καθυστέρησης της έναρξης των κατεργασιών επαναφοράς στην προβλεπόμενη θερμοκρασία [59]. Αυτή η ενδιάμεση επαναφορά μπορεί να γίνει και σε συμβατικό κύκλο κατεργασίας αλλά πιο συχνά χρησιμοποιείται πριν την κρυογενική κατεργασία για τη χαλάρωση των τάσεων [11]. Η θερμοκρασία και η διάρκεια αυτής της κατεργασίας είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες για μία κανονική επαναφορά χάλυβα, δηλαδή η θερμοκρασία είναι συνήθως μέχρι τους 194°C και ο χρόνος 1 ώρα και εφαρμόζεται πιο συχνά σε μαχαίρια που θα υποστούν κρυογενική κατεργασία [60].

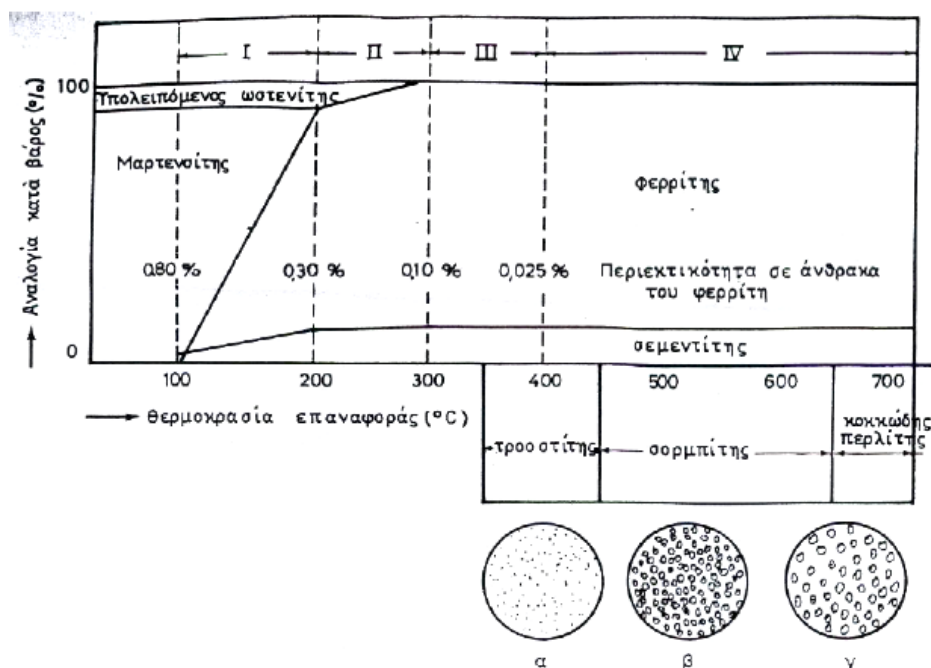


Εικόνα 11: Τυπικός κύκλος κρυογενική κατεργασίας με snap tempering

1.3.1.4: Επαναφορά (tempering)

Η επαναφορά είναι αναγκαία κατεργασία που εφαρμόζεται σε βαμμένους χάλυβες για την εξάλειψη δυσάρεστων συνεπειών από τη δημιουργία μαρτενσίτη και είναι συνήθως η τελική κατεργασία στην αλληλουχία κατεργασιών σκλήρυνσης του χάλυβα. Καθώς όπως έχει αναφερθεί, μετά τη βαφή η κρυσταλλική δομή αποτελείται από μαρτενσίτη, καρβίδια και τον υπολειπόμενο ωστενίτη και μπορεί ο χάλυβας να είναι ιδιαίτερα σκληρός, αλλά έχει πολύ χαμηλή δυσθραυστότητα και υψηλές παραμένουσες τάσεις. Το τεμάχιο θερμαίνεται σε μία θερμοκρασία κάτω από την κρίσιμη A1 (723°C) αλλά, πάνω από την Ms για ορισμένο χρόνο για να αποκτήσει ομοιόμορφη θερμοκρασία (συνήθως 2 ώρες), έως ότου ο μαρτενσίτης φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας και ακολουθεί ήρεμη ψύξη. Η νέα δομή αποτελείται από μαρτενσίτη από επαναφορά, ακόμα μικρότερη ποσότητα υπολειπόμενου ωστενίτη και καρβίδια, ενώ παρουσιάζεται αύξηση ολκιμότητας με ταυτόχρονη αύξηση της δυσθραυστότητας και αυξάνεται το μέγεθος των κόκκων του κρυσταλλικού πλέγματος [8]. Ανάλογα με τη θερμοκρασία κυρίως αλλά και το χρόνο παραμονής λαμβάνονται διαφορετικές μικροδομές, οπότε οι συνθήκες επαναφοράς καθορίζονται από τις τελικές απαιτήσεις για το χάλυβα, δηλαδή την τελική σκληρότητα και ορίζεται από το διάγραμμα επαναφοράς του εκάστοτε χάλυβα. Συνήθως, επειδή ένα μικρό ποσοστό ωστενίτη παραμένει ακόμα μετά την επαναφορά γίνεται μία δεύτερη επαναφορά για την εξάλειψη αυτού, ενώ τρίτη επαναφορά είναι ευεργετική σε χάλυβες

υψηλών διαστασιακών απαιτήσεων ή μεγάλων διατομών. Γενικώς, οι επαναφορές μετά την πρώτη επηρεάζουν το μαρτενσίτη της πρώτης και μειώνουν περαιτέρω τον υπολειπόμενο ωστενίτη [10],[16].



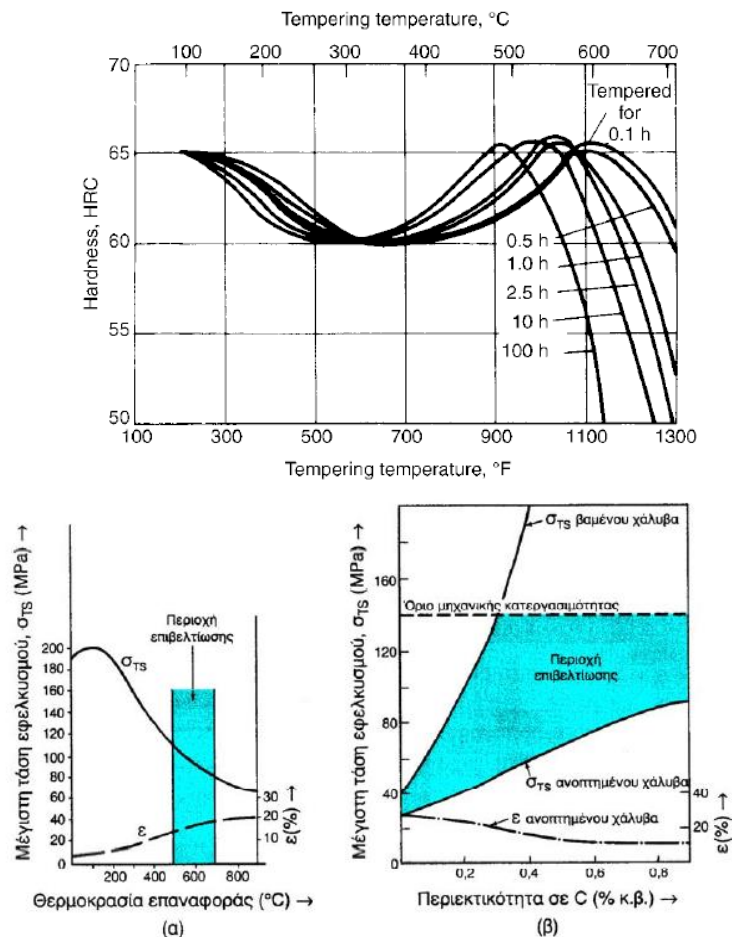
Εικόνα 12: Μετασχηματισμός κρυσταλλικής δομής βαμμένου χάλυβα κατά την επαναφορά

Κατά την αναθέρμανση του χάλυβα παρατηρούνται τα παρακάτω [10], [2] όπως φαίνονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 11**:

- I. Αναθέρμανση έως 200°C.
Σχηματίζονται υπομικροσκοπικά καρβίδια από τα άτομα άνθρακα που εξέρχονται από το πλέγμα μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα το πλέγμα από χωροκεντρωμένο τετραγωνικό, τείνει να πάρει χωροκεντρωμένη κυβική μορφή όπως το πλέγμα φερρίτη. Τα καρβίδια περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα άνθρακα από το σεμενίτη που δημιουργείται αργότερα. Συγκεκριμένα στους εργαλειοχάλυβες λόγω του αυξημένου ποσοστού κραματικών στοιχείων που διαθέτουν η σταθεροποίηση των καρβιδίων είναι πιο εύκολη. Στους 200°C κυριαρχεί ο φερρίτης σε ποσοστό 0.3% και ο υπολειπόμενος ωστενίτης, όσον αφορά τον μαρτενσίτη δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή. Πλέον το τεμάχιο έχει απαλλαχθεί σε μεγάλο βαθμό από τις παραμένουσες τάσεις.
- II. Αναθέρμανση από 200°C έως 300°C.
Εδώ λαμβάνει χώρα η διάσπαση του υπολειπόμενου ωστενίτη σε φερρίτη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και καρβίδια (δηλαδή 0.1% αντί για 0.025%).
- III. Αναθέρμανση από 300°C έως 400°C.
Τα καρβίδια σχηματίζουν εντατικά σεμενίτη, ο οποίος ήδη είχε αρχίσει να εμφανίζεται, αλλά σε αυτό το στάδιο αυξάνεται το μέγεθος των κόκκων του. Στην θερμοκρασία των 400 βαθμών ο φερρίτης αποκτά το κανονικό του κρυσταλλικό πλέγμα.
- IV. Αναθέρμανση από 400°C έως 732°C.
Παρατηρείται η συσσωμάτωση του σεμενίτη και η περαιτέρω αύξηση του μεγέθους των κόκκων, στους 500°C γίνονται ορατά από μικροσκόπιο. Στους 450°C η δομή του χάλυβα καλείται σορμπίτης ενώ στους 700°C ο χάλυβας αποκτά περλιτική κρυσταλλική δομή.

Με την επαναφορά του χάλυβα μειώνονται οι μηχανικές ιδιότητές του, πιο συγκεκριμένα η σκληρότητα και η αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ αυξάνονται η πλαστικότητα και η δυσθραυστότητα. Γενικά, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς ή ο χρόνος παραμονής σε αυτή, τόσο πιο

εύθραυστος, μαλακός και λιγότερο σκληρός είναι ο μαρτενσίτης από επαναφορά. Αυτό συμβαίνει επειδή θα υπάρχουν λιγότερα καρβίδια Fe_3C μεγάλου μεγέθους. Στα παρακάτω σχήματα (Εικόνα 13, μεταβολή της σκληρότητας του εργαλειοχάλυβα M2 κατά την επαναφορά) φαίνεται η μεταβολή των ιδιοτήτων σε συνάρτηση με τους παράγοντες επαναφοράς. Η μέγιστη τιμή σκληρότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την επαναφορά είναι για θερμοκρασία επαναφοράς γύρω στους $550^{\circ}C$ για 2.5h [10].



Εικόνα 13: Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία επαναφοράς

Τα διάφορα κραματικά στοιχεία χωρίζονται σε αυτά που μπορούν να σχηματίζουν καρβίδια και σε αυτά που δεν σχηματίζουν καρβίδια. Στοιχεία όπως το νικέλιο, το πυρίτιο και το μαγγάνιο που δεν έχουν τάση να εμφανίζονται σε καρβίδια, κατά την επαναφορά ουσιαστικά παραμένουν σε διάλυμα στο φερρίτη και έχουν ελάχιστη συνεισφορά στην σκληρότητα. Από την άλλη κραματικά στοιχεία, όπως το χρώμιο, το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο και το βανάδιο μέσω του σχηματισμού λεπτών καρβιδίων καθυστερούν τη διαδικασία αποσκλήρυνσης του υλικού, δηλαδή η σκληρότητα μειώνεται πιο αργά με τη θερμοκρασία της επαναφοράς. Έτσι, προκειμένου να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη σκληρότητα σε συγκεκριμένο χρόνο οι χάλυβες με κραματικά στοιχεία χρειάζεται να παραμείνουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες επαναφοράς από ότι οι ανθρακούχοι χάλυβες. Ακόμα τα καρβίδια αυτά βελτιώνουν τη σκληρότητα με αποτέλεσμα να γίνεται η δευτερογενής σκλήρυνση του χάλυβα, η οποία γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες επαναφοράς, γιατί τα καρβίδια σχηματίζονται από τη διάχυση καρβιδιογόνων στοιχείων και είναι πιο αργή από τη διάχυση του άνθρακα και σιδήρου [7].

1.3.2: Επιφανειακές θερμικές κατεργασίες

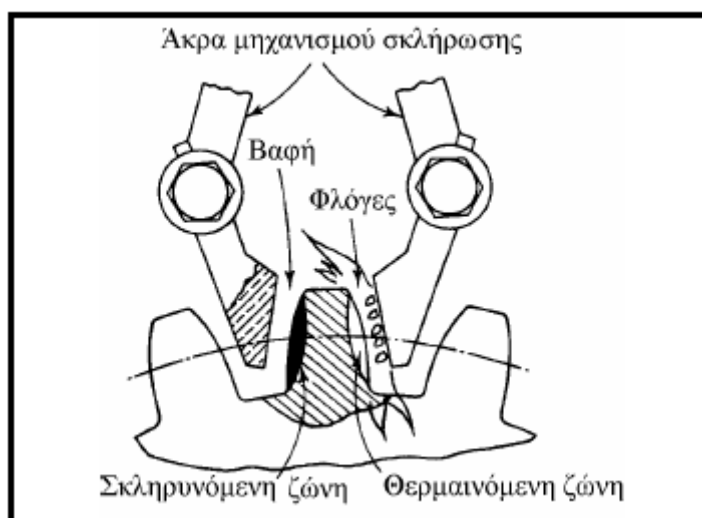
Οι επιφανειακές κατεργασίες σκλήρυνσης έχουν σκοπό να αυξήσουν τη σκληρότητα της επιφάνειας έως κάποιο βάθος με διατήρηση των ιδιοτήτων στο εσωτερικό του τεμαχίου. Επίσης, προστατεύουν το τεμάχιο ενάντια στην φθορά από την επαφή της επιφάνειας με άλλες επιφάνειες,

ενάντια στη διάβρωση λόγω της παρουσίας σε υγρό περιβάλλον, εναντίον της οξειδωσης και της κόπωσης λόγω της θερμικής ή μηχανικής φόρτισης. Χρησιμοποιούνται αρκετά σε εργαλεία και καλούπια διαμόρφωσης, σε οδοντωτούς τροχούς και σε εξαρτήματα αυτοκινήτων και γενικώς σε εφαρμογές όπου, απαιτείται η επιφάνεια να έχει αντοχή σε φθορά αλλά και υψηλή δυσθραυστότητα. Υπάρχουν οι επιφανειακές κατεργασίες στις οποίες η αλλαγή στην κρυσταλλική δομή της επιφάνειας γίνεται χωρίς την εναπόθεση υλικού, αλλά και κατεργασίες με εναπόθεση υλικού όπου τοποθετείται κάποια επίστρωση στο τεμάχιο [2].

1.3.2.1: Θερμικές κατεργασίες τροποποίησης επιφάνειας χωρίς εναπόθεση υλικού

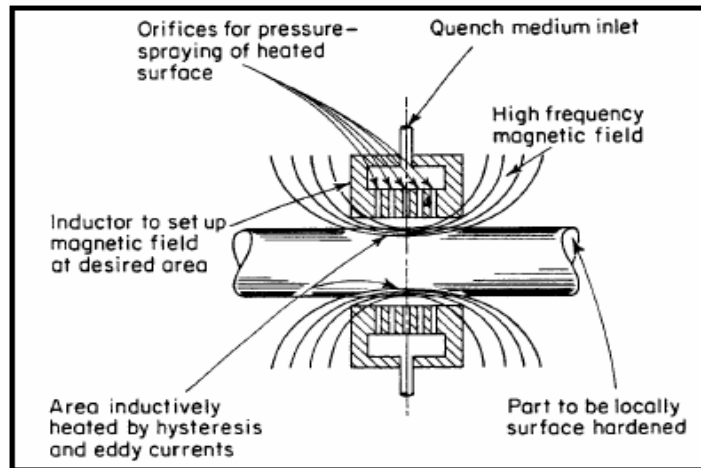
Οι κύριες κατεργασίες τροποποίησης επιφάνειας είναι η φλογοβαφή, η επαγωγική σκλήρυνση και ο βομβαρδισμός με υψηλής πυκνότητας δέσμες ενέργειας [10], [2].

Φλογοβαφή: Κατά τη φλογοβαφή επιτυγχάνεται η σκλήρυνση της επιφάνειας με τη βοήθεια φλόγας που προκύπτει από καύση ενός μείγματος καυσίμου-οξυγόνου (συνήθως προπάνιου, μεθάνιου ή ασετιλίνης). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλή φλόγα υψηλής ισχύος ή πολλαπλές φλόγες για πιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα (**Εικόνα 14**). Η επιφάνεια κατά την διάρκεια της κατεργασίας ψύχεται ταυτόχρονα με ψεκάσμο κάποιου ψυκτικού (ταυτόχρονη μέθοδος) και η ταχύτητα που κινούνται το σύστημα ψεκάσμου και φλόγας είναι από 0.1 μέχρι 0.4m/min. Μετά την ολοκλήρωση της φλογοβολής, το τεμάχιο εμβαπτίζεται σε λάδι ή νερό (σταδιακή μέθοδος). Μετά την κατεργασία πιθανόν να χρειαστεί επαναφορά σε θερμοκρασία 180°-200°C. Συνήθως εφαρμόζεται σε εξαρτήματα περίπλοκης γεωμετρίας και μικρής παραγωγής.



Εικόνα 14: Μηχανισμός φλογοβαφής γραναζιού

Η **επαγωγική επιφανειακή σκλήρυνση** χρησιμοποιείται κυρίως στην επιφανειακή σκλήρυνση τεμαχίων μικρών διαστάσεων, απλής γεωμετρίας και σχετικά μεγάλης παραγωγής. Το τεμάχιο τοποθετείται ως πυρήνας στο εσωτερικό ενός επαγωγικού πηνίου που διαρρέεται από υψίσυχο ρεύμα (**Εικόνα 15**). Το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται επάγει το τεμάχιο, δημιουργούνται δινορρέυματα και έτσι θερμαίνεται η επιφάνειά του με αποτέλεσμα την ωστενιτοποίησή της. Κατόπιν, με βαφή του τεμαχίου αυξάνεται τελικά η σκληρότητα του επιφανειακού στρώματος. Όσο αυξάνει η συχνότητα του ρεύματος μειώνεται το βάθος διείσδυσης των ρευμάτων αυτών.



Εικόνα 15: Βασικές αρχές επαγωγικής σκλήρυνσης

Βομβαρδισμός με υψηλής πυκνότητας δέσμες ενέργειας: Είναι μια κατεργασία που αναπτύχθηκε τα τελευταία 20 χρόνια με την αυξημένη χρήση των ακτινών Laser. Στο τεμάχιο προς κατεργασία σε μικρή επιφάνεια περίπου $100\mu\text{m}^2$ εστιάζεται υψηλής ενεργειακής πυκνότητας δέσμη ($10^3\text{--}10^7\text{ W/cm}^2$). Το βάθος της επηρεασμένης επιφάνειας φτάνει έως 0.3mm . Στη συνέχεια, το τεμάχιο ψύχεται στον αέρα (αυτοβαφή επιφάνειας). Πριν την κατεργασία επιβάλλεται αμμοβολή ή επικάλυψη της επιφάνειας για την αύξηση της απορροφητικής της ικανότητας.

1.3.2.2: Θερμοχημικές επιφανειακές κατεργασίες (με απόθεση υλικού)

Στις κατεργασίες με εναπόθεση υλικού, στην επιφάνεια του τεμαχίου τοποθετείται συγκεκριμένη επίστρωση για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες. Τα φαινόμενα που πραγματοποιούνται σε αυτές είναι η διάλυση του στοιχείου εμπλουτισμού, η προσρόφηση και η διάχυση. Για καλύτερη προσρόφηση και διάχυση των χημικών στοιχείων είναι χρήσιμο να προηγηθεί της κατεργασίας πολύ καλός καθαρισμός της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Οι κατεργασίες αυτές χωρίζονται με βάση το στοιχείο εμπλουτισμού και οι κυριότερες είναι η ενανθράκωση και η εναζώτωση. Υπάρχουν αρκετές ακόμα παρόμοιες κατεργασίες, οι οποίες είναι πιο σπάνιες, όπως η ενδοκυάνωση, η εναργιλίωση, η εγχρωμίαση και η ενβορίωση.

Ενανθράκωση ονομάζεται ο εμπλουτισμός της επιφάνειας χάλυβα με χαμηλό ποσοστό άνθρακα ($0.1\text{--}0.25\%$) με θέρμανσή του πάνω από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης (περίπου 900°C) παρουσία ενανθρακωτικού μέσου. Το μέσο αυτό μπορεί να είναι στερεό (π.χ. μείγμα ξυλάνθρακα και BaCO_3 , λουτρά τηγμάτων ανθρακούχων ενώσεων $\text{Ba}(\text{CN})_2$ ή αέρια μίγματα CO , CO_2 , CH_4). Το μέσο όταν διασπάται απελευθερώνει τον άνθρακα, ο οποίος διαχέεται στην επιφάνεια κατεργασίας μέχρι ένα βάθος αυξάνοντας έτσι την περιεκτικότητα σε άνθρακα της περιοχής. Στη συνέχεια το τεμάχιο αποψύχεται αργά και αργότερα θερμαίνεται ξανά σε θερμοκρασία 880°C και παραμένει για ένα χρονικό διάστημα όπου η χονδρόκοκη δομή φερριτική-περλίτη μετασχηματίζεται σε λεπτόκοκκο ωστενίτη. Μετά, το τεμάχιο βάφεται σε νερό και ο πυρήνας αποκτά λεπτόκοκκη μαρτενσιτική δομή, ωστόσο η επιφάνεια εξακολουθεί να είναι χονδρόκοκη. Ακολουθεί νέα θέρμανση στους 760°C και παραμονή σε αυτή μέχρι η χονδρόκοκη δομή της επιφάνειας να μετασχηματιστεί σε λεπτόκοκκο ωστενίτη. Τέλος, το τεμάχιο βάφεται εκ νέου σε λάδι όμως αυτή την φορά με αποτέλεσμα την εμφάνιση λεπτόκοκκου μαρτενσίτη στην επιφάνεια ενώ ο μαρτενσίτης του πυρήνα υφίσταται επαναφορά. Η κατεργασία αυτή χρησιμοποιείται αρκετά για την επιφανειακή σκλήρυνση γραναζιών.

Η **εναζώτωση** περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό της επιφάνειας του χάλυβα με άτομα αζώτου, οι χάλυβες που υπόκεινται σε αυτή την κατεργασία χρειάζεται να έχουν ειδική σύνθεση γιατί η σκλήρυνση επιτυγχάνεται με τον σχηματισμό ισχυρών ενώσεων αζώτου με στοιχεία όπως το χρώμιο

και το βανάδιο. Το τεμάχιο παραμένει σε θερμοκρασία από 500°C έως 540°C για αρκετές ώρες σε αεροστεγή θάλαμο, όπου διοχετεύεται αμμωνία σε αέρια μορφή. Η αμμωνία διασπάται και το άζωτο διαχέεται στο πλέγμα φερρίτη, έτσι δημιουργούνται σιδηρονιτρίδια ($Fe_{2,4}N$) αλλά και ενώσεις του αζώτου με χρώμιο και βανάδιο που περιέχονται στο χάλυβα τα οποία επιτυγχάνουν την επιθυμητή επιφανειακή σκληρότητα. Δεν χρειάζεται θερμική κατεργασία μετά από την εναζώτωση αλλά χρειάζεται πριν τη θερμική κατεργασία να πραγματοποιηθούν ανόπτηση, βαφή και επαναφορά για την εξάλειψη των τάσεων και την απαίτηση κατάλληλης σκληρότητας του πυρήνα. Τελικά η κατεργασία αυτή βελτιώνει επίσης την αντοχή σε φθορά λόγω του χαμηλού συντελεστή τριβής των νιτριδίων. Χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε μικρά πολύμορφα αντικείμενα υψηλής ακρίβειας όπως καλύμματα κυλίνδρων μηχανών Diesel, ρουλεμάν, γρανάζια, μηχανές λείανσης κ.α. [15].

1.4: Κρυογενική κατεργασία

1.4.1: Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν οι βασικές συμβατικές θερμικές κατεργασίες, μία ακόμα θερμική κατεργασία είναι η κρυογενική κατεργασία μετάλλων. Ο όρος κρυογενική σχετίζεται με τις θερμικές κατεργασίες σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (από -80°C έως -196°C). Η σύγχρονη βιομηχανία απαιτεί την κατασκευή εξαρτημάτων με ολοένα και μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Οπότε, αντίστοιχες απαιτήσεις υπάρχουν και όσον αφορά τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και διαμόρφωση, δηλαδή στην ποιότητα και την απόδοση των κοπτικών εργαλείων. Οι κατεργασίες σε υπομηδενικές θερμοκρασίες έχουν δείξει πως είναι δυνατόν να βελτιώσουν τη διάρκεια ζωής των κοπτικών εργαλείων [17], [18]. Τέτοιες κατεργασίες, αν χρησιμοποιηθούν σωστά για την κάθε περίπτωση, σε συνδυασμό με συμβατικές θερμικές κατεργασίες μπορούν να επιφέρουν βελτίωση στις ιδιότητες του υλικού που κατεργάζεται και κατ' επέκταση οικονομικά οφέλη. Εφαρμόζονται σε πολλά διάφορα είδη χάλυβων, όπως ταχυχάλυβες και εργαλειοχάλυβες και σε διάφορα εργαλεία, όπως σε φρένα, ρουλεμάν, γρανάζια, άξονες γραναζιών, καλούπια χύτευσης και πολλά κοπτικά εργαλεία [1], [17]. Όσον αφορά τους χάλυβες και τις θερμικές κατεργασίες τους που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα, η συμβατική κατεργασία σκλήρυνσης μετάλλων που περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη μέσω της βαφής, ο οποίος γίνεται μεταξύ δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών έναρξης (M_s) και λήξης (M_f). Η κρυογενική κατεργασία βοηθά στην εξάλειψη του μεγαλύτερου μέρους του υπολειπόμενου ωστενίτη. Άρχισε να αναπτύσσεται τα τελευταία 100 χρόνια περίπου και είναι πολύ πρόσφατη σε σχέση με τις συμβατικές θερμικές κατεργασίες που χρησιμοποιούνται χιλιάδες χρόνια τώρα. Κάποιους αιώνες πριν, Ελβετοί ωρολογοποιοί πραγματοποιούσαν μια υποτυπώδη κρυογενική κατεργασία κατά την οποία άφηναν εξαρτήματα για αρκετούς μήνες στις Άλπεις για να βελτιώσουν την αντοχή τους σε φθορά [19]. Κάποιες γερμανικές εταιρείες πειραματίστηκαν από το 1930 με κατεργασίες σε χαμηλές ή υπομηδενικές θερμοκρασίες [20]. Το 1925, ο J.A. Mathews [44] παρατήρησε πως στο μέταλλο μετά από συμβατική κατεργασία παραμένει ωστενίτης και του έδωσε την ονομασία παραμένων (ή υπολειπόμενος) ωστενίτης (retained austenite), οπότε η σκλήρυνση ήταν ημιτελής αφού η παρουσία του είναι προβληματική για αρκετές διεργασίες. Η πρόταση του Mathews για τον πλήρη μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη ήταν η εμβάπτιση του μετάλλου σε υγροποιημένο αέρα θερμοκρασίας -183°C μετά από την αρχική κατεργασία, ωστόσο το αποτέλεσμα δεν έδειξε κάποια μεγάλη διαφορά στον υπολειπόμενο ωστενίτη. Μετά από μία δεκαετία πειράματα του Gulyaev [17] στη Ρωσία το 1937 και του Cohen στην Αμερική το 1942 έδειξαν πως ο μετασχηματισμός του ωστενίτη συνεχίζεται κατά την ψύξη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το μηδέν (περίπου στους -100°C), ενώ η ψύξη κάτω από τους -150°C δε φέρνει κάποιο αποτέλεσμα. Από μελέτες φαίνεται πως ο μετασχηματισμός δεν εξελίσσεται ισόθερμα εάν σταματήσει η ψύξη, αλλά και δε συνεχίζει κατά αναθέρμανση του τεμαχίου σε θερμοκρασία δωματίου. Ακόμα, παρατηρήθηκε πως η αποθήκευση του χάλυβα σε θερμοκρασία δωματίου πριν από τη κρυογενική κατεργασία προλαμβάνει το μετασχηματισμό κατά τη ψύξη, φαινόμενο που ονομάστηκε σταθεροποίηση του υπολειπόμενου ωστενίτη [45]. Μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του 1960, πειράματα κρυογενικής κατεργασίας σε χάλυβες δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα, διότι δεν ήταν γνωστό πως για την ελαχιστοποίηση του υπολειπόμενου ωστενίτη η κρυογενική κατεργασία είναι προτιμότερο να γίνει κατευθείαν μετά από τη βαφή χωρίς να προηγηθεί ενδιάμεση θέρμανση σε θερμοκρασία επαναφοράς. Οι ερευνητές στις Η.Π.Α. θεωρούσαν πως ήταν καλύτερο να γίνει σκλήρυνση του χάλυβα μέσω επαναφοράς, προκειμένου να εξαλειφθούν οι παραμένουσες τάσεις πριν γίνει η κρυογενική κατεργασία [13]. Ακόμη, μία παράμετρος που οδηγούσε σε εσφαλμένα συμπεράσματα για τη χρησιμότητα της κρυογενικής κατεργασίας ήταν η αδυναμία ελέγχου του ρυθμού ψύξης, καθώς η κατεργασία γινόταν με άμεση επαφή του αζώτου με το δοκίμιο με αποτέλεσμα την δημιουργία των ρωγμών και ατελειών λόγω θερμικού σοκ στο δοκίμιο. Ωστόσο, ο Ed Busch [46] το 1969 ανέπτυξε ένα σύστημα κρυογενικής κατεργασίας με έλεγχο της θερμοκρασίας, του ρυθμού θέρμανσης και ψύξης πετυχαίνοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το 1974 ο R.F. Barron προσπάθησε να μάθει περισσότερα για την επίδραση διάφορων παραμέτρων την

κρυογενικής κατεργασίας στις ιδιότητες των ταχυχαλύβων. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που τον απασχόλησαν ήταν:

- a) Χρόνος αποθήκευσης σε θερμοκρασία δωματίου,
- b) Ρυθμός ψύξης κατά την κατεργασία,
- c) Κρυογενική θερμοκρασία
- d) Χρόνος παραμονής σε αυτή.

Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική βελτίωση στην αντοχή στη φθορά και στη διάρκεια ζωής των τεμαχίων. Μεγαλύτερη βελτίωση των ιδιοτήτων παρατηρήθηκε κατά τη μείωση του ρυθμού ψύξης, τη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά τη ψύξη και την αύξηση του χρόνου παραμονής σε αυτή. Το αποτέλεσμα ήταν η μείωση του υπολειπόμενου ωστενίτη και έτσι ο Barron προσπάθησε να γενικεύσει το συμπέρασμα του για όλους τους χάλυβες. Ωστόσο, πίστευε πως η κρυογενική κατεργασία ευνοούσε το σχηματισμό λεπτών καρβιδίων σιδήρου και πως κυρίως η κατακρήμνιση τέτοιων καρβιδίων μαζί με την εξαφάνιση του υπολειπόμενου ωστενίτη ήταν ο βασικός λόγος για την αυξημένη αντοχή στη φθορά των τεμαχίων [13], [47].

Έρευνες δείχνουν πως με τη κρυογενική κατεργασία βελτιώνονται ακόμα, η σκληρότητα, η δυσθραυστότητα, η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού. Επειδή, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν τέτοιες χαμηλές θερμοκρασίες με ψύξη του αέρα γίνεται χρήση θαλάμων που πληρώνονται με κάποιο αέριο σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία και απομακρύνουν ταυτόχρονα τον υπόλοιπο αέρα. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατεργασία αυτή είναι το ήλιο, το νέο, το άζωτο και το οξυγόνο. Όμως, σήμερα έχει επικρατήσει το υγρό άζωτο λόγω της διαθεσιμότητάς του στον ατμοσφαιρικό αέρα καθώς ο αέρας έχει 78.03% περιεκτικότητα σε άζωτο, ακόμη το υγρό άζωτο έχει σημείο βρασμού στους -196°C και τήξης στους -210°C . Επίσης, το υγρό άζωτο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών. Για την εφαρμογή κρυογενικής κατεργασίας με υγρό άζωτο χρησιμοποιούνται οι εξής δύο βασικές τεχνικές:

- Με εναλλάκτη θερμότητας: όπου χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας για τη ψύξη του αέρα εντός του θαλάμου, ο οποίος προσπίπτει μετά στο δοκίμιο με τη βοήθεια ανεμιστήρων
- Με άμεσο ψεκασμό: όπου στο θάλαμο ψεκάζεται υγρό άζωτο και το αέριο κυκλοφορεί εντός του. Σε αυτή την περίπτωση, το άζωτο δεν μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί σε άλλη κατεργασία αυξάνοντας έτσι το κόστος.

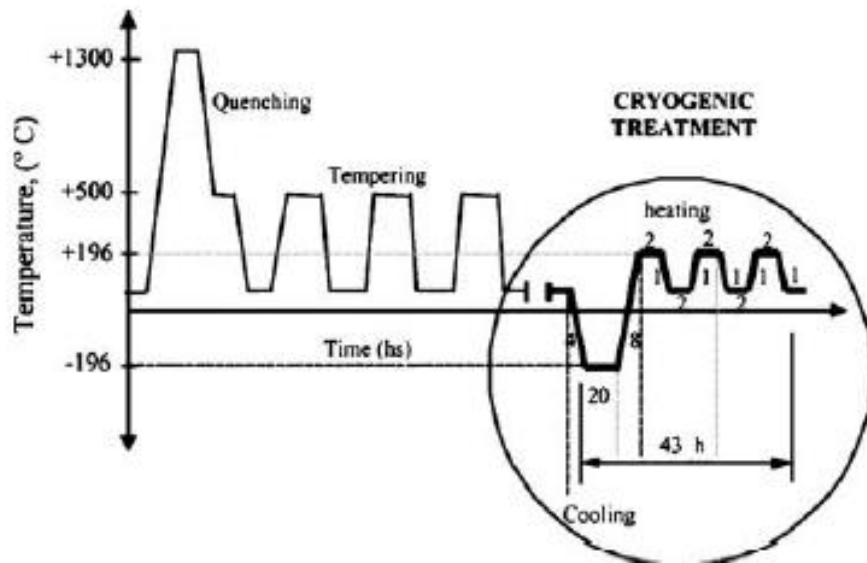
1.4.2: Μηχανισμός κρυογενικής κατεργασίας

Η κρυογενική κατεργασία δεν αποτελεί μία εναλλακτική μορφή θερμικής κατεργασίας, αλλά είναι μία επέκταση των συμβατικών θερμικών κατεργασιών που γίνεται πριν την επαναφορά για να έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Εφαρμόζεται μία φορά ή διαδοχικά και ανήκει στις θερμικές κατεργασίες μάζας, δηλαδή επηρεάζει συνολικά τις ιδιότητες του τεμαχίου [17]. Οι κρυογενικές κατεργασίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

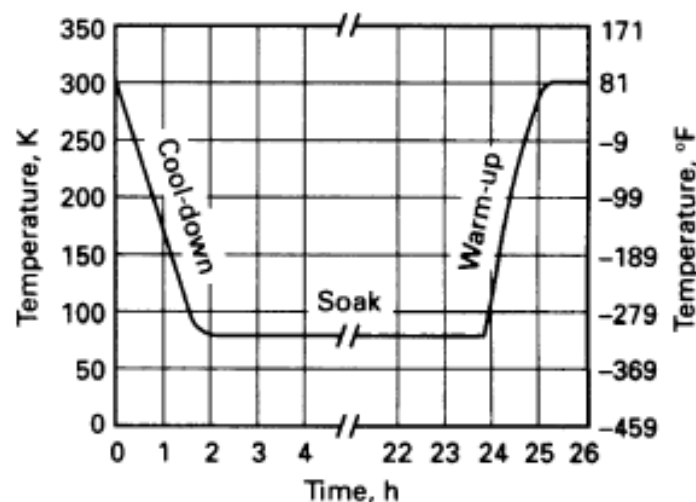
- SCT (Shallow Cryogenic Treatment) ή Ψυχρή κατεργασία (Cold treatment): Όπου ο χάλυβας ψύχεται σε θερμοκρασία περίπου -80°C ,
- DCT (Deep Cryogenic Treatment): Το τεμάχιο ψύχεται με αργό ρυθμό περίπου $1.25-2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ σε θερμοκρασία -196°C . [12], [21]

Η κρυογενική κατεργασία αμέσως μετά την βαφή βοηθά στον σχεδόν ολοκληρωτικό μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης μικρορωγμών. Ωστόσο, για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει να ελεγχθεί ότι ο τύπος χάλυβα είναι κατάλληλος για άμεση κρυογενική κατεργασία. Ορισμένοι χάλυβες είναι καλύτερο πριν την εισαγωγή στο θάλαμο κρυογενικής να υποστούν στιγμιαία επαναφορά (snap tempering) για μικρό σχετικά διάστημα σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη από 184°C σε φούρνο για να χαλαρώσουν οι τάσεις. Μόλις ο θάλαμος με το δοκίμιο φτάσει σε θερμοκρασία -196°C , το δοκίμιο παραμένει σε αυτό για όσο χρονικό διάστημα

κριθεί απαραίτητο (συνήθως από 1-24 ώρες). Αφού περάσει το χρονικό διάστημα ο χάλυβας αφαιρείται από τον θάλαμο και αφήνεται να φτάσει την θερμοκρασία δωματίου στον αέρα. Η χρήση αζώτου βοηθά στον έλεγχο της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κατεργασίας και την αποφυγή ενός θερμικού σοκ, σε περίπτωση πολύ υψηλού ρυθμού ψύξης. Κατά τη διάρκεια παραμονής καταγράφονται από αισθητήρες διάφοροι παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, πίεση και χρόνος και αποθηκεύονται αφού ολοκληρωθεί. Μετά τη κρυογενική συνήθως ακολουθεί τουλάχιστον μία επαναφορά για την σταθεροποίηση και τη χαλάρωση των τάσεων του μαρτενσίτη και τις περισσότερες φορές μετά τη κρυογενική ακολουθούν 3 επαναφορές [12]. Στον παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου παρουσιάζεται η θερμοκρασία του χάλυβα σε συνάρτηση με το χρόνο κατά την διάρκεια ενός τυπικού θερμικού κύκλου που περιλαμβάνει κρυογενική κατεργασία [20].



Εικόνα 16: Διάγραμμα διαδικασίας κρυογενικής κατεργασίας [49]

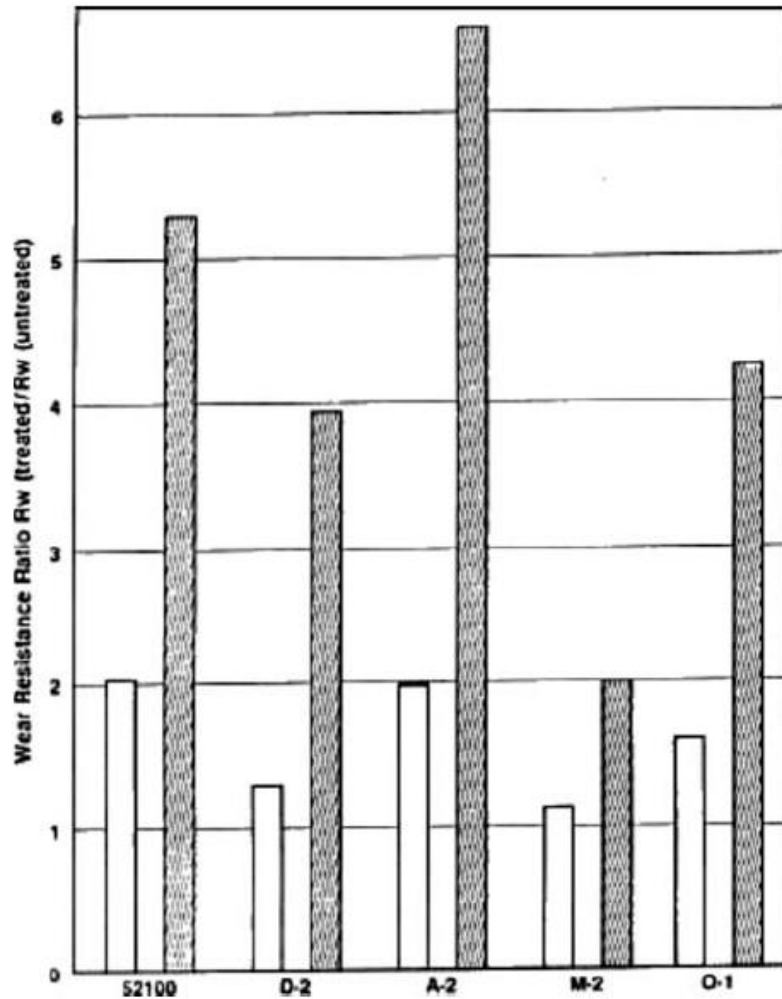


Εικόνα 17: Συνάρτηση θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο κατά την κρυογενική κατεργασία [50]

Στην **Εικόνα 16** φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου για μία τυπική κρυογενική κατεργασία. Για κάθε χάλυβα χρειάζεται ξεχωριστή προσέγγιση ως προς τις παραμέτρους της κρυογενικής κατεργασίας για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη διερευνηθούν οι συνθήκες της κρυογενικής κατεργασίας, ώστε τα επιθυμητά αποτελέσματα της κρυογενικής κατεργασίας να είναι εφικτό να επιτευχθούν συστηματικά. Ο Darwin [48], [49] θέτει τις βασικές παραμέτρους της κρυογενικής κατεργασίας:

- Το ρυθμό ψύξης: είναι ο ρυθμός ψύξης που ψύχεται το δοκίμιο μέχρι την θερμοκρασία εμβάπτισης. Υπάρχουν δύο επιλογές σχετικά με τον ρυθμό αυτό, υψηλός ή χαμηλός ρυθμός ψύξης. Με υψηλό ρυθμό η επιθυμητή θερμοκρασία επιτυγχάνεται γρήγορα αλλά με προσοχή για την αποφυγή θερμικού σοκ και της εμφάνισης ρωγμών. Με αργό ρυθμό ψύξης το υλικό φτάνει τη θερμοκρασία εμβάπτισης μετά από κάποιες ώρες. Ο ρυθμός αυτός δεν πρέπει να ξεπερνά τους 20°C/h [22], γιατί ελλοχεύει κίνδυνος αστοχίας λόγω δημιουργίας τάσεων.
- Θερμοκρασία εμβάπτισης: Στις πρώτες προσπάθειες κρυογενικών κατεργασιών οι θερμοκρασίες κυμαίνονταν από -80°C μέχρι -100°C, ενώ αργότερα γύρω στους -196°C. Η εξέταση των τεμαχίων έδειξε πως για τους -175°C ο χρόνος ζωής του εργαλείου είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτή ενός τεμαχίου με θερμοκρασία εμβάπτισης -96°C [48].
- Χρόνος εμβάπτισης: Ο χρόνος παραμονής σε θερμοκρασία εμβάπτισης. Έρευνες για δοκίμια με ίδια θερμοκρασία παραμονής αλλά διαφορετικούς χρόνους παραμονής έχουν δείξει πως, ο μηχανισμός της κατεργασίας είναι ισοθερμικός. Επίσης άλλες έρευνες έδειξαν πως η διάρκεια εμβάπτισης είναι πιο σημαντική από την μείωση της θερμοκρασίας. Ο Molinari για τον εργαλειοχάλυβα H13, πρότεινε πως η διάρκεια εμβάπτισης δεν πρέπει να ξεπερνά τις 35 ώρες, διότι παραπάνω χρόνος δεν επηρεάζει σημαντικά το δοκίμιο, ωστόσο για κάθε τύπο χάλυβα χρειάζεται λίγο διαφορετική χρονική διάρκεια εμβάπτισης.
- Ρυθμός θέρμανσης: ο ρυθμός με τον οποίο επαναφέρεται σε θερμοκρασία δωματίου το τεμάχιο
- Θερμοκρασία επαναφοράς
- Διάρκεια επαναφοράς

Οι παράμετροι αυτοί ευθύνονται για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και σύμφωνα με τον Darwin έχουν μεγάλη επιρροή σε αυτές, κυρίως η θερμοκρασία παραμονής και μετά ο χρόνος εμβάπτισης [49], [51], [47]. Αντίθετα, οι παράμετροι επαναφοράς δεν έχουν τόση σημασία στην κατάληξη της κρυογενικής κατεργασίας όσο οι παράμετροι εμβάπτισης οπότε δεν θα γίνει περαιτέρω ανάλυση. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σύγκριση της αντοχής στην φθορά διαφόρων χάλυβων που υπέστησαν κρυογενική κατεργασία με θερμοκρασία εμβάπτισης -84°C και -190°C αντίστοιχα. Όπως φαίνεται γενικώς ισχύει πως για χαμηλότερη θερμοκρασία προκύπτει υψηλότερη αντοχή [20].



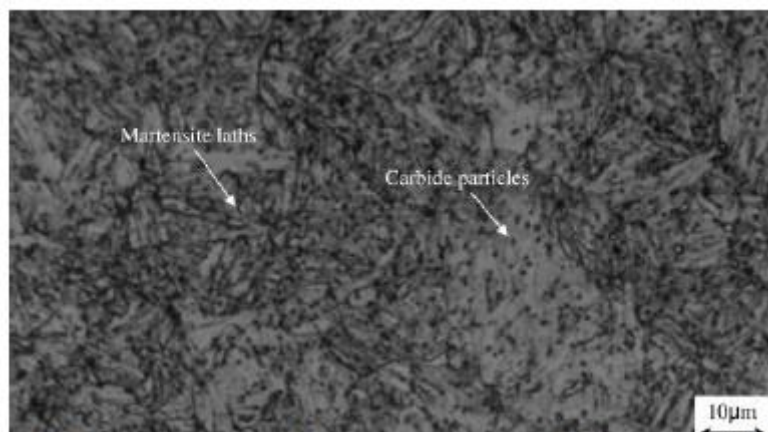
Εικόνα 18: Σύγκριση των λόγων αντίστασης στη φθορά δοκιμών με κρυογενική κατεργασία στους -84°C και -196°C [51]

Η κρυογενική κατεργασία βελτιώνει αρκετά τις ιδιότητες του χάλυβα σε σχέση με τον συμβατικό κύκλο θερμικής κατεργασίας. Βασικό στοιχείο της κρυογενικής κατεργασίας είναι ο μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη κάτι που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε απόλυτο βαθμό στην πράξη, ενώ παρατεταμένη παραμονή σε τέτοιες θερμοκρασίες επίσης, δεν βελτιώνει περαιτέρω δυσθραυστότητα και την αντοχή στη φθορά. Γίνεται λοιπόν, κατανοητό πως οι παράγοντες κατεργασίας έχουν καίριο ρόλο στις τελικές ιδιότητες και είναι σημαντικό να είναι γνωστό πως επιδρούν οι παράγοντες για να υπολογίζονται οι επιθυμητές τιμές που πρέπει να πάρουν ανάλογα με την περίπτωση. Η πρόταση του Collins [53] ήταν πως για την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας ευθύνονταν δύο μηχανισμοί: α) ο μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη, β) η προεπεξεργασία του μαρτενσίτη (conditioning of martensite). Η προεπεξεργασία του μαρτενσίτη σχετίζεται με μία ισοθερμοκρασιακή διαδικασία που συμβαίνει μεταξύ των θερμοκρασιών -100°C και -196°C και ενοεί το σχηματισμό λεπτών καρβιδίων σιδήρου κατά την επαναφορά μέσω του σχηματισμού επιπλέον θέσεων πυρήνωσης (κρυσταλλικών ατελειών ή συστάδες C) σε κρυογενικές θερμοκρασίες (Εικόνα 19) [13].

Οι κύριες θεωρίες που προσπαθούν να εξηγήσουν τους μηχανισμούς που δρουν κατά την κρυογενική κατεργασία, όπως:

- Μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη
- Κατακρήμνιση των καρβιδίων
 - a. Σχηματισμός η-καρβιδίων κατά την επαναφορά

- b. Δημιουργία συστάδων (clusters)
- c. Κάλυψη μικροκενών



Εικόνα 19: Μικροδομή χάλυβα μετά από κρυογενική κατεργασία [15]

1.4.2.1: Μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη

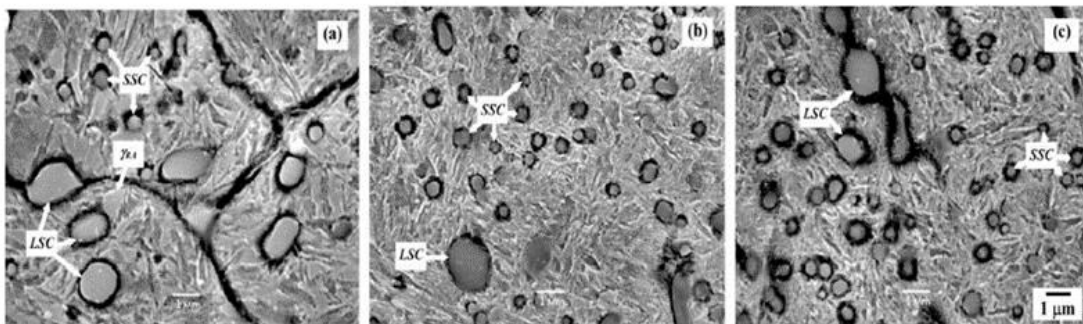
Σύμφωνα με αυτή την θεωρία σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα της κρυογενικής κατεργασίας έχει ο μετασχηματισμός του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη, αυτό μπορεί να παρατηρηθεί μέσω περίθλασης με ακτίνες-X ή με εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο [23]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τις συμβατικές κατεργασίες η ψύξη γίνεται μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου με αποτέλεσμα την παραμονή ενός ποσοστού ωστενίτη στο χάλυβα, αφού η τελική θερμοκρασία μετασχηματισμού μαρτενσίτη του ευθηκτοειδούς χάλυβα είναι -50°C . Για αυτό τον λόγο ο χάλυβας πρέπει να ψυχθεί περαιτέρω για να ολοκληρωθεί ο μετασχηματισμός. Το ποσοστό ωστενίτη μετά από κρυογενική κατεργασία μπορεί να φτάσει το 2-4%, ενώ μετά από συμβατική κατεργασία κυμαίνεται στο 10-20% [21]. Ο μαρτενσίτης όταν σχηματιστεί είναι αρκετά ψαθυρός και μπορούν να εμφανιστούν ρωγμές, οπότε πρέπει να υποστεί επαναφορά για να αποκτήσει πιο σταθερή μικροδομή. Επίσης, ο μετασχηματισμός του ωστενίτη οδηγεί σε αύξηση του όγκου του δοκιμίου περίπου κατά 4% προκαλώντας παραμόρφωση και εσωτερικές τάσεις. Το ποσοστό του ωστενίτη που παραμένει τελικά μετά την κρυογενική είναι τόσο μικρό που δεν θεωρείται ότι ενδέχεται να μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη κατά τη διάρκεια ζωής του υλικού. Από έρευνες, ο Bensley [21] παρατήρησε αύξηση της αντοχής σε φθορά του κρυογενικά κατεργασμένου ενανθρακωμένου χάλυβα En 353 λόγω του μετασχηματισμού αυτού, αφού για τον ίδιο χάλυβα μετά από συμβατική κατεργασία παρατήρησε πως παραμένει αρκετά μεγάλο ποσοστό ωστενίτη. Ακόμη, παρατήρησε πως για το χάλυβα αυτό ο μετασχηματισμός του ωστενίτη συνέβη πιο αποτελεσματικά για βαθιά κρυογενική κατεργασία (DCT) σε σχέση με την ήπια κρυογενική κατεργασία (SCT) με μείωσή του κατά 14% και 6% αντίστοιχα. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Collins και Dormer για τον εργαλειοχάλυβα D2 με μικρότερη ποσοστιαία διαφορά. Σχετικά με τον χάλυβα M2 πειράματα διαφόρων μηχανικών, όπως ο Silva, ο Das και ο Collins [20], έδειξαν μεγάλη μείωση του ποσοστού του ωστενίτη από 42.6% σε 0,9%. Ο μαρτενσιτικός σχηματισμός των σιδηρούχων κραμάτων σύμφωνα με τον Zhao και τον Notis σταματά κατά την απόψυξη εφόσον εφαρμόζεται υψηλός ρυθμός ψύξης, ωστόσο μπορεί να ξαναεμφανιστεί κατά την αναθέρμανση. Στην πράξη όμως, φαίνεται πως είναι πολύ δύσκολο να σταματήσει ο σχηματισμός του μαρτενσίτη, ενώ με έρευνες του Molinari για δύο δοκίμια με παρόμοιο ποσοστό υπολειπόμενου ωστενίτη περίπου 2%, αλλά με το ένα να έχει υποστεί κρυογενική κατεργασία και το άλλο συμβατική, τα αποτελέσματα έδειξαν αυξημένη σκληρότητα και αντοχή στη φθορά του δοκιμίου που έχει υποστεί κρυογενική κατεργασία. Οπότε, σε αυτή την περίπτωση ο μετασχηματισμός του ωστενίτη δεν αρκεί για να εξηγήσει την βελτίωση των ιδιοτήτων του δοκιμίου.

1.4.2.2: Κατακρήμιση καρβιδίων

Μία θεωρία που προσπαθεί να εξηγήσει το φαινόμενο της κρυογενικής κατεργασίας στηρίζεται στην ιδέα πως η κρυογενική κατεργασία ευνοεί την κατακρήμιση καρβιδίων κατά την επαναφορά, κάτι που βελτιώνει την αντοχή στη φθορά και τη σκληρότητα. Η κατακρήμιση των καρβιδίων είναι ο βασικός μηχανισμός που δρα κατά: α) τον σχηματισμό των η-καρβιδίων, β) την δημιουργία συστάδων και γ) την κάλυψη των μικροκενών. Οπότε, λόγω των ομοιοτήτων που έχουν οι θεωρίες αυτές παρουσιάζονται στο ίδιο κεφάλαιο.

Από την έρευνα του Huang σε χάλυβα M2 τόσο κατά τη κρυογενική όσο και κατά τη συμβατική κατεργασία παρατηρήθηκε κατακρήμιση καρβιδίων Fe_4M_2 (όπου $M = W, Mo, Cr, V$) με μέγεθος των σωματιδίων μεταξύ 0.3 και 2 μm . Ωστόσο, το κλάσμα όγκου των καρβιδίων στο κρυογενικά κατεργασμένο χάλυβα ήταν 11%, ενώ στο συμβατικά κατεργασμένο μόλις 5%. Θεωρήθηκε λοιπόν, πως ο κύριος λόγος της κατακρήμισης των λεπτών καρβιδίων είναι ο υπερκορεσμός του μαρτενσίτη. Κατά τη κρυογενική κατεργασία, η μείωση της θερμοκρασίας οδηγεί σε παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος και ο μαρτενσίτης βρίσκεται σε θερμοδυναμική αστάθεια. Έτσι, τα άτομα άνθρακα αλλά και τα κραματικά στοιχεία μετακινούνται προς τις ατέλειες και διαχωρίζονται, με αποτέλεσμα το σχηματισμό των πολύ λεπτών καρβιδίων κατά την επαναφορά. Τα καρβίδια αυτά μειώνουν τις εσωτερικές τάσεις του μαρτενσίτη και την τάση εμφάνισης μικρορωγμών, ενώ τα πολύ λεπτά καρβίδια ήταν πιο ομοιογενώς κατανεμημένα βελτιώνοντας την αντοχή στη φθορά [54].

Τα καρβίδια κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον Das (2007) [24] σε 3 ομάδες: τα πρωτεύοντα καρβίδια (Primary Carbides), τα μεγάλα δευτερεύοντα καρβίδια (Large Secondary Carbides) και μικρά δευτερεύοντα καρβίδια (Small Secondary Carbides). Από τη σύγκριση των καρβιδίων αυτών (Εικόνα 20) για συμβατικό και κρυογενικό κύκλο κατεργασίας προέκυψε πως για το κρυογενικό κύκλο ανιχνεύθηκε αρκετά μικρότερη ποσότητα καρβιδίων LSC, ενώ τα καρβίδια SSC ήταν πιο ομοιογενώς κατανεμημένα. Ακόμα, μέσα από φασματοσκοπία παρατηρήθηκε, πως τα δευτερεύοντα καρβίδια μετά από κρυογενική κατεργασία είναι πιο πλούσια σε κραματικά στοιχεία σε σχέση με τα αντίστοιχα του συμβατικού κύκλου. Όσον αφορά τη χημική σύσταση των καρβιδίων, δεν διακρίνονται ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των καρβιδίων από κρυογενική κατεργασία, ωστόσο τα LSC καρβίδια περιείχαν περισσότερα κραματικά στοιχεία σε σχέση με τα SSC κατά τον συμβατικό κύκλο θερμικής κατεργασίας. Από την άλλη, ο αριθμός, το μέγεθος και η κατανομή των πρωτευόντων καρβιδίων είναι πανομοιότυπα ανεξάρτητα από τη εφαρμογή κρυογενικής κατεργασίας ή συμβατικού κύκλου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως τα χαρακτηριστικά των καρβιδίων αυτών εξαρτούνται από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και το χρόνο παραμονής σε αυτή [12]. Ο μηχανισμός της κατακρήμισης των καρβιδίων, όπως αναφέρθηκε για να επιδράσει στο χάλυβα πρέπει να γίνει επαναφορά μετά τη κρυογενική κατεργασία, οπότε δεν είναι ικανός να εξηγήσει τη βελτίωση των ιδιοτήτων σε κρυογενικά κατεργασμένους χάλυβες χωρίς επαναφορά, κάτι που τόνισε ο Molinari στην δική του έρευνα. [22]

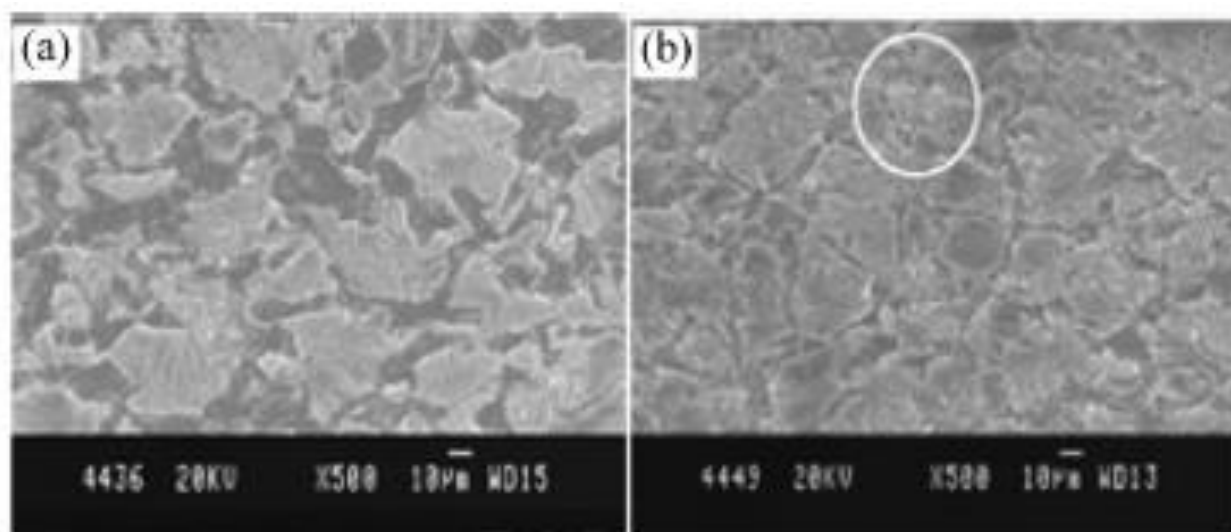


Εικόνα 20: Μικροδομή χάλυβα μετά από α) βαφή και επαναφορά, β) βαφή, DCT36 και επαναφορά, γ) βαφή, DCT84 και επαναφορά.

Σχηματισμός η-καρβιδίων κατά την επαναφορά

Τα η-καρβίδια αποτελούνται από διάφορα καρβίδια που περιλαμβάνουν βολφράμιο και τουλάχιστον ένα συνδετικό μέταλλο. Τα καρβίδια αυτά είναι συνήθως συνδεδεμένα με κοβάλτιο, όπως τα

$((CoW_3)C)$ και $((Co_6W_3)C)$ [25]. Ακόμη μία θεωρία υποστηρίζει, πως η κρυογενική κατεργασία συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής μέσω των η-καρβιδίων. Σύμφωνα με την έρευνα [55], καρβίδια με τυχαία διάταξη εξευγενίζονται σε μία πιο επιθυμητή μορφή που ονομάζονται η-καρβίδια, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της αντοχής στη φθορά και τη σκληρότητα, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά δυσθραυστότητα για κάποια υλικά. Τα καρβίδια αυτά έχουν μέγεθος περίπου 10nm και γεμίζουν τα μικροκενά, οδηγώντας σε πιο ομοιόμορφη και πυκνή διάταξη της δομής του χάλυβα. Αυτό φαίνεται και από την **Εικόνα 21** που απεικονίζει την καταγραφή με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο του χάλυβα En8 πριν και μετά από κρυογενική κατεργασία, όπως προκύπτει από μικροσκόπιο SEM. Η κατακρήμνιση των η-καρβιδίων συμβαίνει όπως και για τα υπόλοιπα καρβίδια κατά την επαναφορά που ακολουθεί τη κρυογενική κατεργασία και ο αριθμός των καρβιδίων εξαρτάται από τις παραμέτρους της επαναφοράς, οι οποίοι μπορεί να είναι διαφορετικοί από τις παραμέτρους της συμβατικής επαναφοράς [26], [56].



Εικόνα 21: SEM καταγραφή χάλυβα En8 πριν και μετά από CT

Σύμφωνα με την έρευνα του Meng σε εργαλειοχάλυβα Fe-12Cr-Mo-V-1.4C [27] μετά από συμβατική, ψυχρή και βαθιά κρυογενική κατεργασία, η μικροδομή του χάλυβα μετά από την κρυογενική ήταν αρκετά βελτιωμένη. Διαπίστωσε πως τα λεπτά καρβίδια αναπτύχθηκαν στα όρια των διδύμων ή σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα διάχυσης, ενώ παρατηρήθηκαν καρβίδια παράλληλα μεταξύ τους σε ραβδοειδή μορφή με εύρος διαμέτρου 5-10nm και μήκους 20-40nm. Τα καρβίδια αυτά έχουν την δομή των η-καρβιδίων παρόλο που μοιάζουν αρκετά με τα ε-καρβίδια και δημιουργούνται επειδή, τα άτομα σιδήρου ή κραματικών στοιχείων επεκτείνονται και τα άτομα άνθρακα περιστρέφονται ελαφρώς λόγω της παραμόρφωσης του πλέγματος κατά τη κρυογενική κατεργασία.

Δημιουργία συστάδων (Clusters)

Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη και η παραμονή του μαρτενσίτη σε κρυογενική θερμοκρασία ευνοεί την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και κατ' επέκταση κρυσταλλικών ατελειών, όπως εξαρθρώσεις και διδυμίες. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σύμφωνα με την έρευνα του Huang [54], ο υπερ-κορεσμός του μαρτενσίτη και η παραμόρφωση του πλέγματος έχει ως αποτέλεσμα τα κραματικά στοιχεία και τα άτομα άνθρακα να διαχωρίζονται και να μετακινούνται προς τις κρυσταλλικές ατέλειες. Τα άτομα αυτά δημιουργούν συστάδες, οι οποίες αργότερα δρουν ως πυρήνες για τον σχηματισμό πολύ λεπτών καρβιδίων κατά την επαναφορά των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων. Κατά την επαναφορά, η μήτρα μαρτενσίτη απορρίπτει άτομα άνθρακα και κραματικά στοιχεία σε φάση λεπτών καρβιδίων προκαλώντας ανακατανομή των καρβιδίων.

Κάλυψη μικροκενών

Ο μετασχηματισμός του μαρτενσίτη και ο σχηματισμός των καρβιδίων ως αποτέλεσμα της κρυογενικής κατεργασίας, πέρα από αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω συμβάλλουν και στην ομοιογένεια της μικροδομής του χάλυβα. Μέσα από μελέτες της μικροδομής του χάλυβα μετά από συμβατική και κρυογενική κατεργασία προκύπτει, πως η μικροδομή του κρυογενικά κατεργασμένου χάλυβα είναι πιο πυκνή και ομογενής σε σχέση με το συμβατικά κατεργασμένο χάλυβα. Επίσης, τα καρβίδια που σχηματίζονται έχουν διαστάσεις κοντά στο 1μm και καλύπτουν τα μικροκενά που βρίσκονται διασκορπισμένα στο χάλυβα αυξάνοντας την πυκνότητα, ενώ κατά την επαναφορά η κατακρήμνιση των λεπτών καρβιδίων είναι γνωστό πως βελτιώνει τη δυσθραυστότητα και τη αντοχή σε φθορά [57].

1.4.3: Κρυογενική κατεργασία εργαλειοχαλύβων

Η κρυογενική κατεργασία εργαλειοχαλύβων τα τελευταία χρόνια φαίνεται πως μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες του υλικού και βρίσκει εφαρμογές σε κοπτικά εργαλεία, καλούπια και αφορά πολλές βιομηχανίες [17], [20]. Οι εργαλειοχάλυβες συγκεκριμένα όπως, έχουν δείξει έρευνες, μετά από τέτοιες κατεργασίες σκλήρυνσης, βελτιώνουν τις ιδιότητες τους όπως η αντοχή σε φθορά και την δυσθραυστότητα, τη σκληρότητα, τη διάρκεια ζωής και διαστασιακή σταθερότητα [20]. Τέτοιοι χάλυβες χρησιμοποιούνται αρκετά για την κατασκευή κοπτικών εργαλείων, καλουπιών χύτευσης, οπότε είναι κρίσιμες οι ιδιότητες της αντοχής σε φθορά, της σκληρότητας και αντοχής στην πτώση σκληρότητας κατά την επαναφορά. Μέσω των συμβατικών θερμικών κατεργασιών, οι εργαλειοχάλυβες αποκτούν αυξημένη σκληρότητα, ενώ με την κρυογενική κατεργασία αυξάνεται και η διάρκεια ζωής τους. Έχουν γίνει αρκετές έρευνες με αντικείμενο τη κρυογενική κατεργασία υψηλά κραματωμένων χαλύβων και εργαλειοχαλύβων αποδεικνύοντας τη βελτίωση των ιδιοτήτων, ωστόσο για κάθε χάλυβα τα αποτελέσματα διαφέρουν, για παράδειγμα διάφορες μήτρες διαμόρφωσης, μαχαίρια, τρίμερ, ρολοκοπτικά, και κοπτικά εργαλεία μετά από κρυογενική κατεργασία έχουν αυξήσει ουσιαστικά τη διάρκεια ζωής τους. Ένας δείκτης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση της διάρκειας ζωής μεταξύ τεμαχίων είναι ο λόγος φθοράς. Ο λόγος φθοράς προκύπτει από το λόγο της ζωής του υλικού μετά από κρυογενική κατεργασία προς τη διάρκεια ζωής τεμαχίου από συμβατική θερμική κατεργασία. Συγκεκριμένα για το χάλυβα D2, ο λόγος αυτός έχει τιμή περίπου 8 σύμφωνα με τον Barron, δηλαδή η διάρκεια ζωής του κρυογενικά κατεργασμένου χάλυβα είναι 8 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συμβατικά κατεργασμένου (**Πίνακας 1**). Αντίστοιχα, παρατηρήθηκε αύξηση περίπου 50-100% στη διάρκεια ζωής εργαλείων M2, T1 και D3 που έχουν υποστεί κρυογενική κατεργασία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αύξηση της αντοχής σε φθορά λόγω βαθιάς και ήπιας κρυογενικής κατεργασίας (DCT & SCT) σε σχέση με συμβατικά κατεργασμένους χάλυβες. Από τα αποτελέσματα γίνεται σαφές πως η βαθιά κρυογενική κατεργασία βοηθά περισσότερο την αντοχή του χάλυβα στην αντοχή στη φθορά. Ακόμα, στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κρυογενικής κατεργασίας σε εργαλεία διάφορων ειδών που χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές [21], [28].

Πίνακας 1: Λόγος αντοχής στη φθορά R_w/R_{wo}

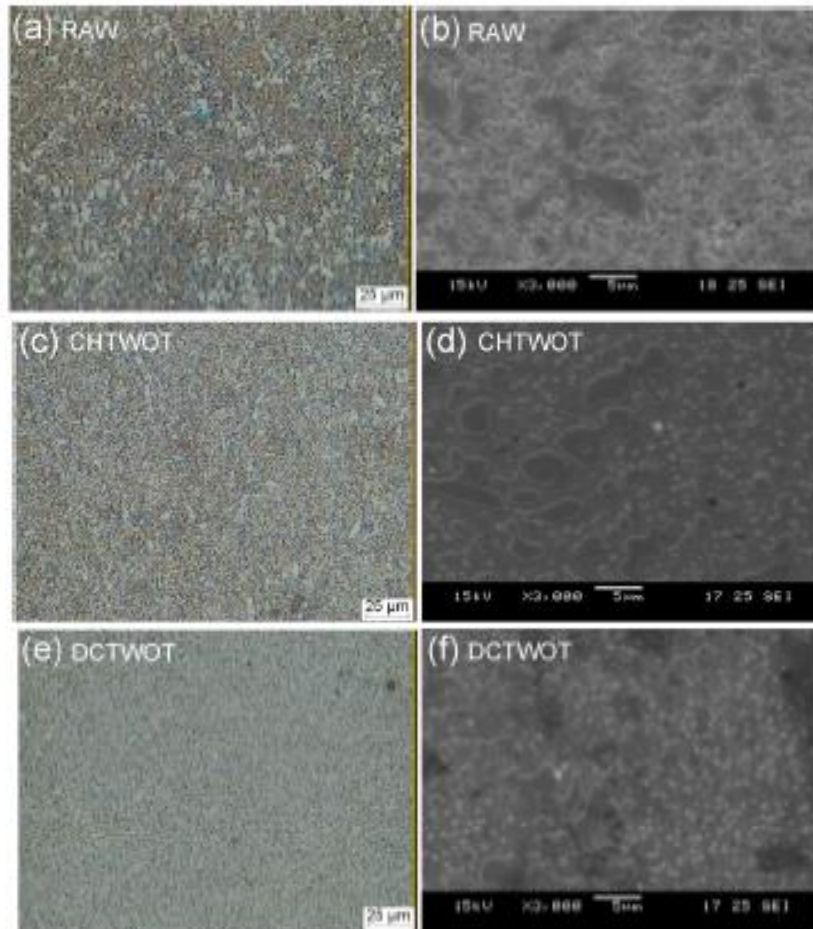
Τύπος χάλυβα (AISI)	Στους -80°C	Στους -190°C
O1	2.216	2.721
S7	2.41	5.03
M1	1.455	2.253
D2	3.16	8.17
A10	2.30	2.64
H13	1.64	2.09

Πίνακας 2: Αντοχή σε φθορά για διάφορους χάλυβες [57]

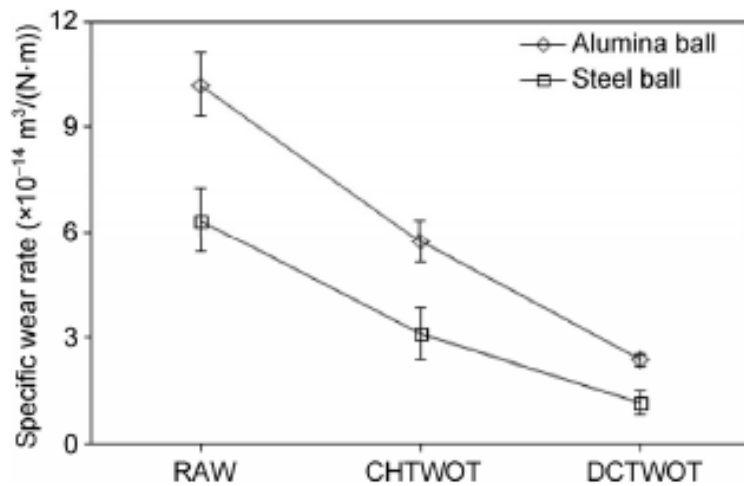
AISI	DIN	Material descriptions	Wear resistance	
		Materials that showed improvement	At -79°C [%]	At -190°C [%]
D2		High carbon/chromium steel	316	817
S7		Silicon tool steel	241	503
52100		Bearing steel	195	420
O1		Oil hardening cold work die steel	221	418
A10		Graphite tool steel	230	264
M1		Molybdenum high speed steel	145	225
H13		Hot work tool steel	164	209
M2		Tungsten/molybdenum high speed steel	117	203
T1		Tungsten high speed steel	141	176

Οι χάλυβες σειράς D ψυχρών εφαρμογών με υψηλό ποσοστό άνθρακα και κατάλληλο ποσοστό κραματικών στοιχείων είναι σχετικά φθηνοί και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργαλεία πρέσας. Συγκεκριμένα για χάλυβα D2 που κατεργάζεται κρυογενικά στους -150°C μεταξύ της βαφής και επαναφοράς, παρατηρείται πως αυξάνεται η μέγιστη σκληρότητα η οποία επιτυγχάνεται σε υψηλότερη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης σε σχέση με την συμβατική κατεργασία. Ακόμα, βελτιώνεται η δυσθραυστότητα και η σκληρότητα λόγω των αλλαγών στη μικροδομή και την κατακρήμνιση των πολύ μικρών καρβιδίων. Από την εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρατηρείται η ομοιογενής κατανομή των καρβιδίων, η οποία ευνοείται από τον σχηματισμό μικρών και μεγάλων δευτερευόντων καρβιδίων (SSC & LSC) [29].

Παρακάτω παρουσιάζεται μία έρευνα πάνω στο χάλυβα D3 [30], ο οποίος χρησιμοποιείται εργαλεία πρέσας, κύλινδροι μορφοποίησης (forming rolls) και μήτρες ολκής. Πειράματα έγιναν για 3 σενάρια: α) χωρίς θερμική κατεργασία (as-received), β) με συμβατικό κύκλο θερμικής κατεργασίας χωρίς επαναφορά και γ) με κρυογενική κατεργασία χωρίς επαναφορά. Από τη σύγκριση SEM φωτογραφιών δοκιμίων μετά από συμβατική και κρυογενική κατεργασία (**Εικόνα 22**) φαίνεται πως αυτό της κρυογενικής κατεργασίας παρουσιάζει μικρότερο μέγεθος και πιο ομοιογενή κατανομή καρβιδίων, ενώ και οι δύο περιπτώσεις έχουν πολύ καλύτερη μικροδομή σε σχέση με το τεμάχιο που δεν υπέστη θερμική κατεργασία. Η σκληρότητα επίσης για την κρυογενική κατεργασία είναι μεγαλύτερη από τη συμβατική, πράγμα που οφείλεται στον μετασχηματισμό του ωστενίτη και στον σχηματισμό των λεπτών καρβιδίων. Ακόμα, προσδιορίστηκαν οι ρυθμοί φθοράς στις ίδιες συνθήκες με το δοκίμιο DCTWOT να παρουσιάζει σημαντικά μικρότερο ρυθμό φθοράς σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (**Εικόνα 23**). Από τα παραπάνω φαίνεται, πως η κρυογενική κατεργασία στο χάλυβα D3 μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά τη σκληρότητα και την αντοχή στη φθορά του τεμαχίου.



Εικόνα 22: Μικροδομή από οπτικό μικροσκόπιο και εικόνα SEM για χάλυβα D3 για τα τρία σενάρια κατεργασίας



Εικόνα 23: Ρυθμοί φθοράς δοκιμών D3 των διαφόρων σεναρίων

Μία έρευνα με αντικείμενο τη μελέτη των ψυχρών κατεργασιών του χάλυβα κατηγορίας D6 έγινε από τον Akhbarizadeh [31]. Σε αυτήν εξετάστηκαν αρκετά σενάρια κατεργασιών που περιλάμβαναν ψυχρή κατεργασία στους -63°C για διάφορα χρονικά διαστήματα αλλά και συνδυασμό ψυχρής κατεργασίας με βαθιά κρυογενική κατεργασία, τα σενάρια φαίνονται παρακάτω.

Nomenclature	Heat treatment	Sample no.
CHT	Conventional heat-treatment	1
SCT20	Shallow cryogenically treated at -63 °C for 20 h	2
SSCT20	Stabilized for 1 week in room temperature and shallow cryogenically treated at -63 °C for 20 h	3
SCT40	Shallow cryogenically treated at -63 °C for 40 h	4
SSCT40	Stabilized for 1 week in room temperature and shallow cryogenically treated at -63 °C for 40 h	5
DCT	Cryogenically treated in -63 °C for 20 h and deep cryogenically treated with quench in liquid nitrogen for 10 h	6
SDCT	Stabilized for 1 week in room temperature, then cryogenically treated in -63 °C for 20 h and deep cryogenically treated with quench in liquid nitrogen for 10 h	7

Εικόνα 24: Κωδικοποίηση των διαφορετικών σεναρίων

Μετά την ολοκλήρωση των θερμικών κατεργασιών ακολούθησε σκληρομέτρηση Rockwell των δοκιμίων, μέτρηση του υπολειπόμενου ωστενίτη και προσδιορισμός του ρυθμού φθοράς. Αρχικά, για τις δύο περιπτώσεις που συνδυάζουν κρυογενική κατεργασία δεν μπορεί να ανιχνευθεί υπολειπόμενος ωστενίτης σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σεναρία, οπότε η ποσότητα που παραμένει είναι ασήμαντη. Αντίστοιχα, οι μετρήσεις σκληρότητας έδειξαν πως το υλικό έχει μεγαλύτερη σκληρότητα πάλι για τις περιπτώσεις που περιέχουν κύκλο βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες ομάδες δοκιμίων και η διαφορά είναι περίπου 2 μονάδες της κλίμακας Rockwell. Οι μετρήσεις φαίνονται στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 24 και 25).

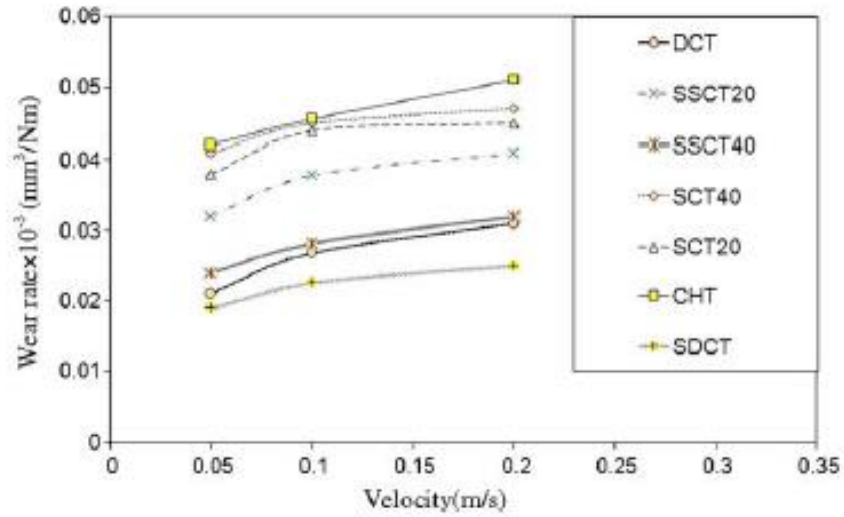
Sample	Retain austenite percent (%)
SHT	12.4
SCT20	8
SSCT20	5.3
SCT40	6.5
SSCT40	4.7
DCT	Was not seen
SDCT	Was not seen

Εικόνα 25: Υπολειπόμενος ωστενίτης μετά το πέρας των κατεργασιών

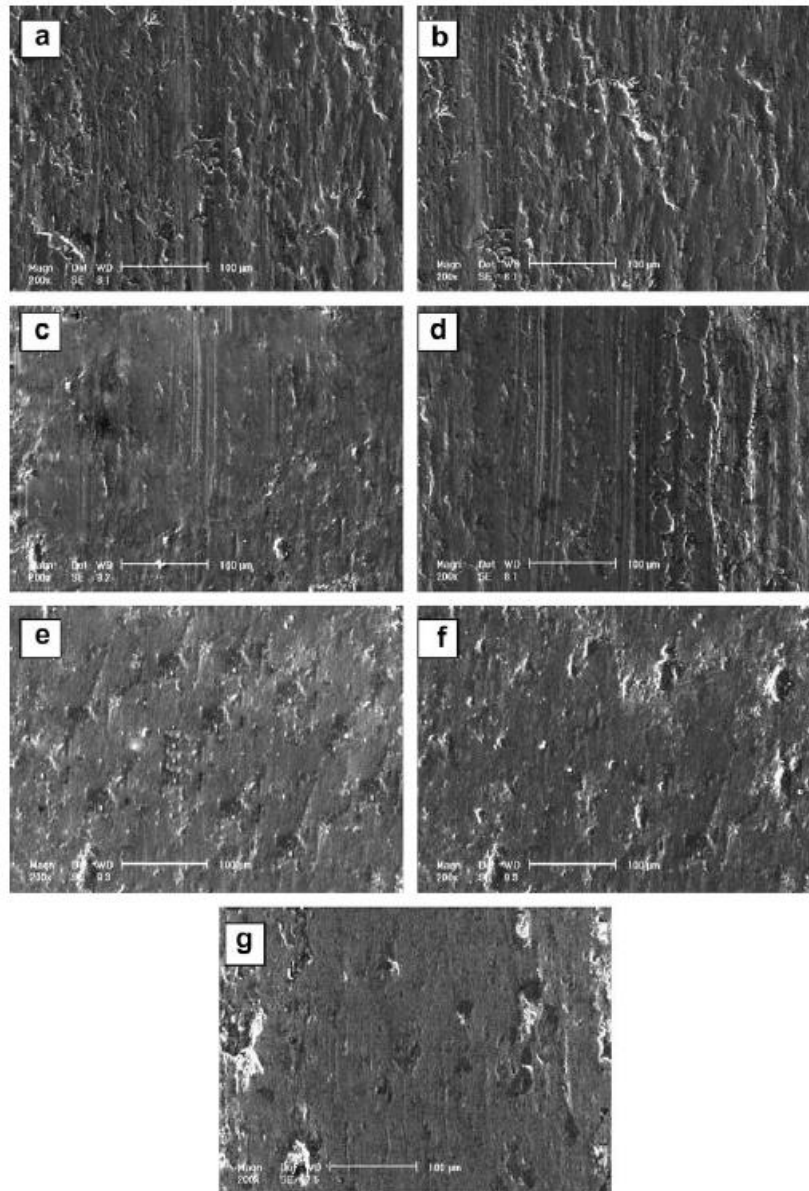
Sample	After temper	Before temper
SHT	62 ± 0.5	64 ± 0.7
SCT20	62.5 ± 0.6	65 ± 0.5
SSCT20	63.3 ± 0.4	65.5 ± 0.4
SCT40	63 ± 0.5	65.5 ± 0.3
SSCT40	63.5 ± 0.6	66 ± 0.5
DCT	64 ± 0.4	66.7 ± 0.4
SDCT	64.2 ± 0.3	67 ± 0.5

Εικόνα 26: Μετρήσεις σκληρότητας HRC του χάλυβα D6 πριν και μετά την επαναφορά

Όσον αφορά, την αντοχή στη φθορά μετά τη κρυογενική κατεργασία ήταν βελτιωμένη κατά 39-68% σε σχέση με τη συμβατική κατεργασία, με τη βελτίωση να είναι αρκετά πιο ήπια για τη ψυχρή κατεργασία (Εικόνα 27). Αυτό γίνεται και ποιοτικά κατανοητό με την παρατήρηση των φθαρμένων επιφανειών με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Εικόνα 28). Είναι προφανές πως η επιφάνεια είναι πιο ομοιόμορφη και παρουσιάζει μεγαλύτερη αντίσταση στη φθορά σε σχέση με τη ψυχρή κατεργασία και ακόμη περισσότερο σε σχέση με τη συμβατική κατεργασία. Οπότε, συμπεραίνεται πως η σκληρότητα και η αντοχή στη φθορά του D6 επωφελούνται από τη κρυογενική κατεργασία λόγω της μετατροπής του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, την ομοιόμορφη κατανομή καρβιδίων και την αύξηση του πλήθους χρωμιούχων καρβιδίων, επιβεβαιώνοντας τις θεωρίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 27: Ρυθμός φθοράς του D6 συνάρτηση της ταχύτητας



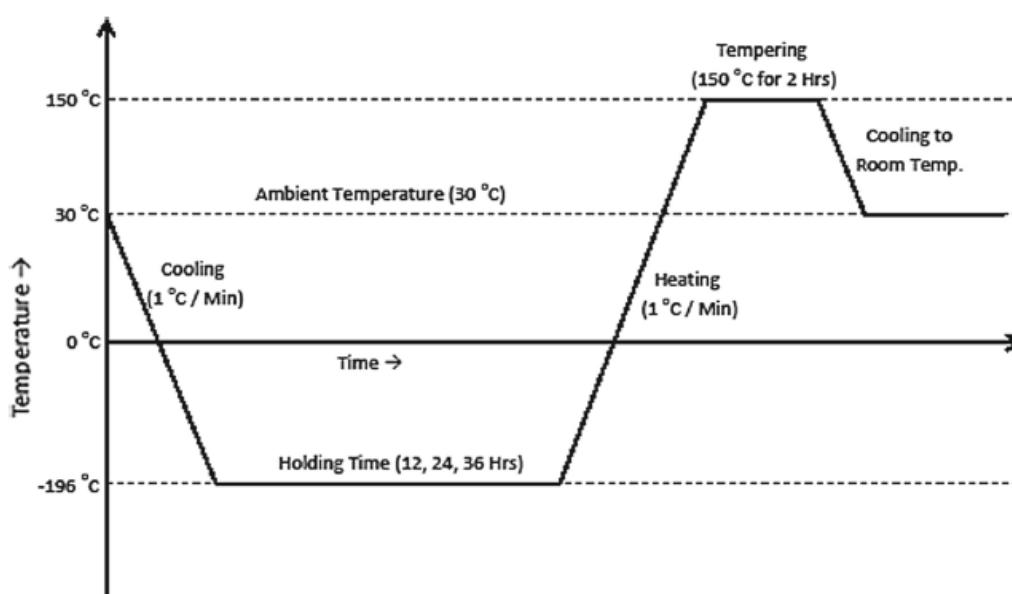
Εικόνα 28: SEM εικόνες των επιφανειών φθοράς: a) CHT, b) SCT20, c) SSCT20, d) SCT40, SSCT40, e) SSCT40, f) DCT, g) SDCT.

Ο ταχυχάλυβας M2 (η σύστασή του φαίνεται στην **Εικόνα 29**) χρησιμοποιείται σε αρκετά εργαλεία, όπως μαχαίρια, τρυπάνια και κοπτικά εργαλεία φρέζας, οπότε έχει ενδιαφέρον αν επηρεάζεται θετικά από την κρυογενική κατεργασία. Τέτοιοι χάλυβες προτιμώνται για εν ψυχρώ εργασίες διάτρησης και για καλούπια, αλλά επειδή έχουν ήδη καλά χαρακτηριστικά για αυτές τις εργασίες δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες για τη βελτίωση των ιδιοτήτων, όπως η αντοχή σε φθορά μέσω της κρυογενικής κατεργασίας.

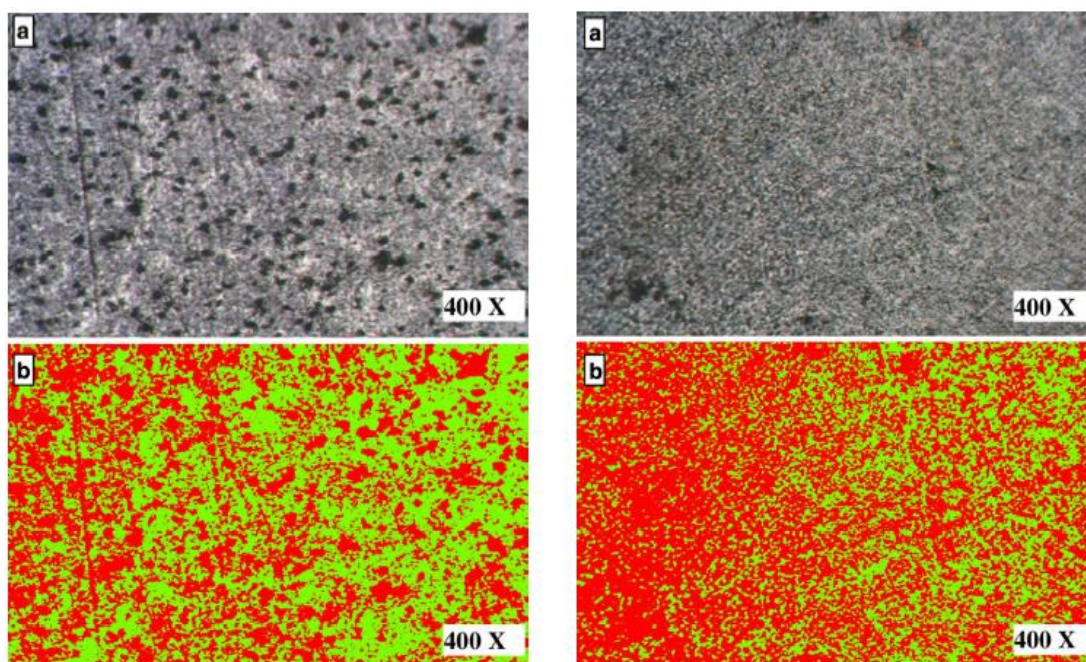
Sl. No.	Content	Per cent (wt%)	Specifications AISI M2 (wt%)
1	W	6.404	5.50–6.75
2	V	1.912	1.60–2.20
3	Mo	4.549	4.50–5.50
4	Cr	4.190	3.75–4.50
5	S	0.022	0.025 Max
6	P	0.028	0.025 Max
7	Mn	0.241	0.15–0.40
8	Si	0.262	0.20–0.45
9	C	0.864	0.85–1.05

Εικόνα 29: Χημική σύσταση του εργαλειοχάλυβα M2

Για βαθιά κρυογενική κατεργασία στη θερμοκρασία -195°C με ρυθμό ψύξης $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ και χρόνοι παραμονής 12, 24 και 36h για τα διάφορα σενάρια. Μετά την κρυογενική γίνονται επαναφορές στους 150°C για 2 ώρες. Σκοπός της μελέτης είναι η εξέταση της μικροδομής και η σύγκριση του ρυθμού φθοράς. Κατά την εξέταση της μικροδομής παρατηρείται, πως όντως ο ωστενίτης μειώνεται και μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη όσο παραμένει σε αυτή τη θερμοκρασία, αλλά και αρκετά μικροκενά που υπάρχουν στον ακατέργαστο χάλυβα έχουν εξαφανιστεί μετά την κρυογενική κατεργασία λόγω των καρβιδίων, με αποτέλεσμα την πιο ομοιόμορφη κατανομή, κάτι που γίνεται κατανοητό από τις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 31**) της μικροδομής των δοκιμίων. Επιπρόσθετα, για η αντοχή σε φθορά είναι αυξημένη κατά 56% κατά την DCT24 σε σχέση με την DCT12, αλλά μειώνεται για χρόνο παραμονής μεγαλύτερο από αυτό [32].



Εικόνα 30: Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κατεργασία



Εικόνα 31: Οπτική μικρογραφία της δομής του χάλυβα για χρόνο παραμονής 12 και 24 ώρες αντίστοιχα

Έρευνα στον ταχυχάλυβα M2 πραγματοποίησε και ο Molinari [22]. Πειράματα έγιναν για τέσσερις κύκλους θερμικών κατεργασιών: A) συμβατική κατεργασία ωστενιτοποίησης στους 1220°C και 2 κύκλοι επαναφοράς 2 ωρών στους 550°C, B) κρυογενική κατεργασία μετά τις επαναφορές, C) κρυογενική κατεργασία μετά τη βαφή, αλλά γίνεται μία επαναφορά και D) κρυογενική κατεργασία μετά τη βαφή αλλά γίνονται δύο επαναφορές. Αφού ολοκληρώθηκαν οι κατεργασίες έγιναν δοκιμές τριβής για να προσδιοριστεί ο ρυθμός φθοράς ανά περίπτωση και μετρήθηκε η σκληρότητα Vickers των δοκιμίων, τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται, ο ρυθμός φθοράς μειώνεται ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η σκληρότητα κατά τη κρυογενική θερμοκρασία (Πίνακας 3). Τα δύο φαινόμενα σχετίζονται, καθώς αυξάνεται η σκληρότητα αυξάνεται και η δυνατότητα του υλικού να υποστηρίξει τα επιφανειακά στρώματα που θερμαίνονται κατά τη τριβή. Από την άλλη, το σενάριο με τις πιο βελτιωμένες ιδιότητες είναι για την περίπτωση B που οι επαναφορές γίνονται πριν την κρυογενική κατεργασία, το οποίο είναι αντίθετο με τη θεωρία και τις περισσότερες έρευνες.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμών τριβής

Specimen	Wear rate (g/m × 10 ⁻⁶)	HV30
A	3.7	826
B	1.8	894
C	2.2	888
D	2.4	874

Εργαλειοχάλυβες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μητρών για συμπύεση σκονών απαιτούν υψηλή αντοχή σε φθορά για τη λειτουργία τους και λόγω της κρυογενικής κατεργασίας η απόδοσή τους τριπλασιάζεται σε σχέση με συμβατικές κατεργασίες. Ακόμα, εξαρτήματα μηχανών έλασης από χάλυβες H11, H12 και H13 όπως μήτρες, κύλινδροι ή πλάκες στήριξης μπορούν να κατεργαστούν κρυογενικά και βελτιώνουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους σε ορισμένες περιπτώσεις [26].

Συμπερασματικά παρατηρείται, πως οι εργαλειοχάλυβες μπορούν μέσω της κρυογενικής κατεργασίας να βελτιώσουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής τους και τη σκληρότητά τους και υπάρχουν έρευνες που επιβεβαιώνουν τη δράση των μηχανισμών που αναφέρθηκαν. Φαίνεται επίσης, πως η βαθιά κρυογενική κατεργασία έχει καλύτερα αποτελέσματα και πως στις περισσότερες περιπτώσεις ο

βέλτιστος χρόνος παραμονής είναι 24 ώρες και για μεγαλύτερους χρόνους δεν παρατηρείται περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων, μάλιστα συμβαίνει το αντίθετο.

1.4.6: Κρυογενική κατεργασία χάλυβα H13

Πιο πάνω αναφέρθηκαν μελέτες πάνω στην κρυογενική κατεργασία εργαλειοχαλύβων. Σε αυτό κεφάλαιο η έρευνα θα επικεντρωθεί στην επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στον εργαλειοχάλυβα H13, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος. Ο χάλυβας H13, είναι ένας εργαλειοχάλυβας “εν θερμώ” εφαρμογών με κύρια κραματική προσθήκη το χρώμιο (Cr) που λόγω της υψηλής δυσθραυστότητας και αντοχής σε θερμική κόπωση, χρησιμοποιείται περισσότερο από τους υπόλοιπους χάλυβες σε εν θερμώ αλλά και εν ψυχρώ εφαρμογές εργαλείων. Συνήθως, ο H13 χρησιμοποιείται σε καλούπια ακριβείας για χύτευση, όπου πιθανή αστοχία του καλουπιού έχει κομβικό ρόλο για τη συνέχιση της παραγωγής αλλά και στο κόστος, οπότε τα καλούπια πρέπει να έχουν όσο το δυνατόν υψηλότερη αντοχή για να είναι επαρκής η διάρκεια ζωής τους, η οποία μπορεί να βελτιωθεί μέσω της κρυογενικής κατεργασίας [19].

Ο Molinary μαζί με την έρευνα για τον εργαλειοχάλυβα M2 έκανε πειράματα και στο χάλυβα H13 [22]. Σε αυτή συγκρίθηκαν 4 ομάδες δοκιμίων με διαφορετικές θερμικές κατεργασίες. Τα δοκίμια αρχικά θερμάνθηκαν στους 1020°C και ακολούθησε ωστενιτοποίηση «εν κενώ». Για την πρώτη ομάδα δοκιμίων (A) έγινε διπλή επαναφορά στους 570°C για 3 ώρες. Τα δοκίμια της ομάδας (B) μετά την επαναφορά υπέστησαν βαθιά κρυογενική κατεργασία σε θάλαμο θερμοκρασίας -196°C για 35 ώρες. Όσον αφορά την ομάδα (C) μετά τη βαφή πραγματοποιείται κρυογενική κατεργασία και αργότερα γίνεται μία επαναφορά του χάλυβα. Τέλος, για την ομάδα (D) γίνεται η ίδια διαδικασία με την (C), όμως με δύο επαναφορές μετά τη κρυογενική κατεργασία με θερμοκρασία επαναφοράς 570°C και χρόνο παραμονής 3h. Για να αποφευχθεί τυχόν θερμικό σοκ τα δοκίμια ψύχθηκαν με ρυθμό περίπου 20°C/h. Στους παρακάτω πίνακες (**Πίνακας 4** & **Πίνακας 5**) φαίνεται η διαδικασία κατεργασίας για κάθε ομάδα και οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων μετά το πέρας του πειράματος. Έγιναν σκληρομετρήσεις Rockwell, δοκιμές κρούσης και θραύσης (impact & fracture test) σε δοκίμια Charpy V-notch για τον προσδιορισμό της ενέργειας κρούσης και της δυσθραυστότητας (K_{IC}). Παρατηρείται, πως η σκληρότητα παρουσιάζει αύξηση όταν η κρυογενική κατεργασία γίνεται μετά τη βαφή και πριν από την επαναφορά, και σχεδόν μηδενική αύξηση όταν γίνεται κρυογενική μετά την επαναφορά. Κατά τη κρυογενική κατεργασία μετά από τη συμβατική κατεργασία υπάρχει αύξηση της δυσθραυστότητας χωρίς μείωση της σκληρότητας. Επίσης, η αύξηση της δυσθραυστότητας είναι μικρότερη αν η κρυογενική γίνει αμέσως μετά τη βαφή, αλλά σε αυτή την περίπτωση (C) δεν αρκεί μόνο ένας κύκλος επαναφοράς γιατί το υλικό είναι αρκετά ψαθυρό. Η ενέργεια θραύσης ήταν μέγιστη για την περίπτωση B χωρίς να επηρεαστεί η σκληρότητα σε σχέση με τη συμβατική κατεργασία. Όσον αφορά τον ρυθμό φθοράς παρατηρείται αισθητή μείωση για την ομάδα B σε σχέση με την A. Οπότε, μέσω της κρυογενικής κατεργασίας, το H13 αυξάνει τη δυσθραυστότητά του με μικρή αύξηση της σκληρότητας. Βέβαια, η ενέργεια κρούσης και κατ' επέκταση η δυσθραυστότητα είναι μικρότερη για την ομάδα (D) σε σχέση με την (B), κάτι που δεν συμβαδίζει με τη θεωρία που υποστηρίζει πως η κρυογενική είναι προτιμότερο να γίνεται μετά την βαφή και πριν την επαναφορά.

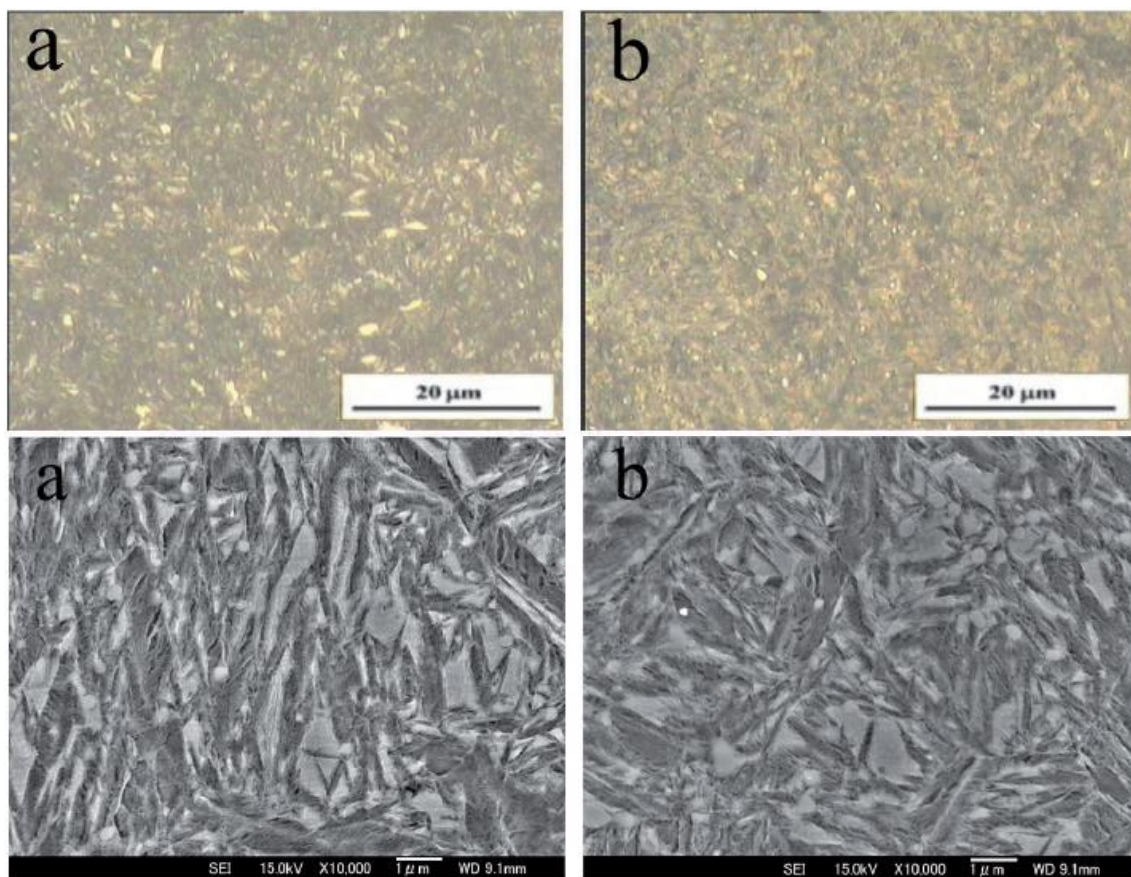
Πίνακας 4: Κατεργασίες των δοκιμίων H13

Code	Treatment
A	Q+T+T
B	Q+T+T+C
C	Q+C+T
D	Q+C+T+T

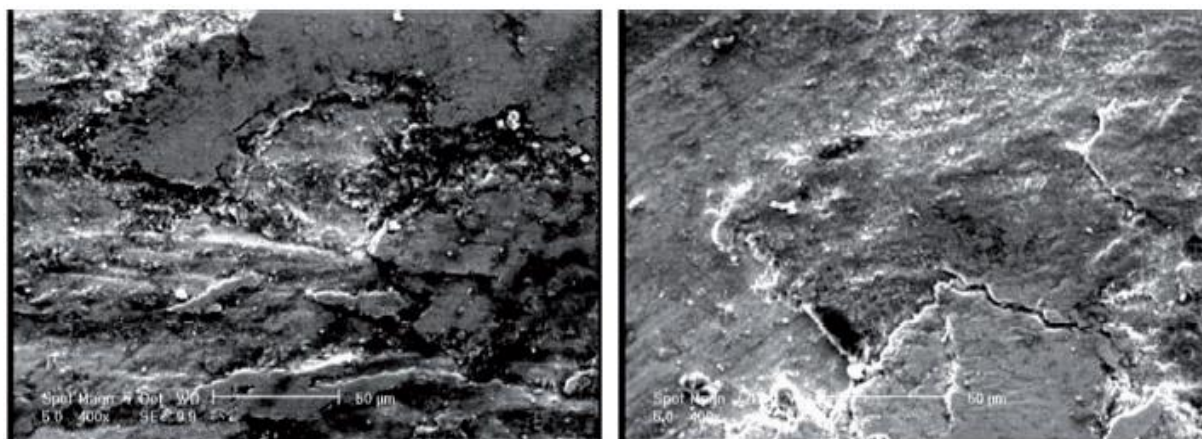
Πίνακας 5: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών μετά το πέρας της κατεργασίας

Specimen	HRC	E (J)	K _{IC} (N/mm ^{3/2})
A	46.5	17.9	42.8
B	46.7	18.1	49.1
C	49.7	13.6	45.4
D	47.9	16.9	45.0

Έρευνα στο χάλυβα H13 πραγματοποίησε και ο Amini [33] πάνω σε δισκία τα οποία προθερμάθηκαν στους 650°C και για την ωστενιτοποίηση θερμάνθηκαν στους 1030°C για 20 λεπτά, για να ακολουθήσει βαφή σε λάδι. Τα δοκίμια συμβατικής κατεργασίας (QT) πέρασαν κατεργασία επαναφοράς στους 550°C για 50 λεπτά, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια (DCT24) πριν την επαναφορά κατεργάστηκαν κρυογενικά στους -196°C για 24 ώρες. Κατά τη μέτρηση σκληρότητας παρατηρείται αύξηση περίπου 5.7% στη σκληρότητα του DCT24 δοκιμίου. Ακόμη, από την περίθλαση ακτίνων-X (**Εικόνα 32**) προέκυψε πως ο ωστενίτης έχει σχεδόν εξαλειφθεί πλήρως και η κατανομή των καρβιδίων είναι πιο ομοιόμορφη για τα δοκίμια με κρυογενική κατεργασία και είναι η βασική αιτία που εξηγεί την αύξηση της σκληρότητας. Τα λεπτά καρβίδια δημιουργούνται λόγω των μικροσκοπικών εσωτερικών τάσεων που προκαλούνται από τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής συστολής των διαφόρων φάσεων, το μετασχηματισμό του ωστενίτη και τις κρυσταλλικές ατέλειες όπως οι διδυμίες και η εξάρμωση (discolation). Επιπρόσθετα, η αντοχή στην φθορά βελτιώνεται κατά 30% με τη κρυογενική κατεργασία, πιθανότατα λόγω του σχηματισμού μαρτενσίτη και την κατακρήμνιση των καρβιδίων. Τέλος, έγινε δοκιμή τριβής στα δοκίμια, με ταχύτητα 0.15m/s και φορτίο 60N, μετά ζυγίστηκαν και εξετάστηκε η δομή τους με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Το κρυογενικά κατεργασμένο δοκίμιο είχε μικρότερη απώλεια μάζας και όπως φαίνεται η επιφάνεια τριβής είναι πιο ομοιόμορφη και πιο ανθεκτική για το δοκίμιο που έχει υποστεί συμβατική κατεργασία, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 33**. Το φαινόμενο αυτό δείχνει την αυξημένη αντοχή σε φθορά και το μειωμένο συντελεστή τριβής του δοκιμίου DCT24 [33].



Εικόνα 32: Επάνω: Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο για a) DCT24, b) QT, Κάτω: SEI μικρογραφία των καρβιδίων για a) CHT και b) DCT24

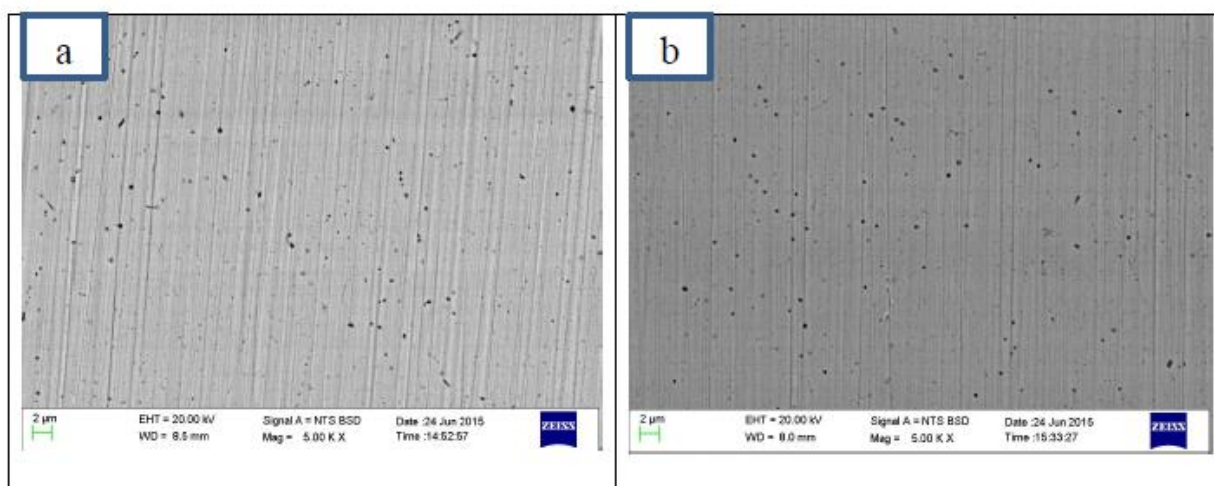


Εικόνα 33: Εικόνα SEM της επιφάνειας τριβής H13 για QT και DCT24 αντίστοιχα

Για τη διενέργεια κρυογενικής κατεργασίας είναι κρίσιμο να είναι γνωστή η επίδραση που έχει ο χρόνος παραμονής σε χαμηλές θερμοκρασίες στη μικροδομή και τις ιδιότητες του H13. Μία τέτοια έρευνα έγινε από τον Bhavar και την ομάδα του [34]. Όλα τα δοκίμια θερμάνθηκαν στους 1030°C για μία ώρα με ακόλουθη βαφή σε αναδευόμενο λουτρό λαδιού. Μετά τη σκλήρυνση, ακολούθησε στάδιο επαναφοράς στους 560°C/2h με τα τεμάχια να ψύχονται στον αέρα έως τη θερμοκρασία δωματίου. Τα τεμάχια που κατεργάστηκαν κρυογενικά ψύχθηκαν στους -185°C με ρυθμό ψύξης 3°C/min για την αποφυγή θερμικού σοκ. Η παραμονή τους στο θάλαμο ήταν για 16, 32, και 48 ώρες αντίστοιχα (Πίνακας 6) ενώ ακολούθησε θέρμανση στους 110°C για δύο ώρες πριν ψυχθούν ξανά σε θερμοκρασία δωματίου.

Πίνακας 6:Κωδικοποίηση των σεναρίων

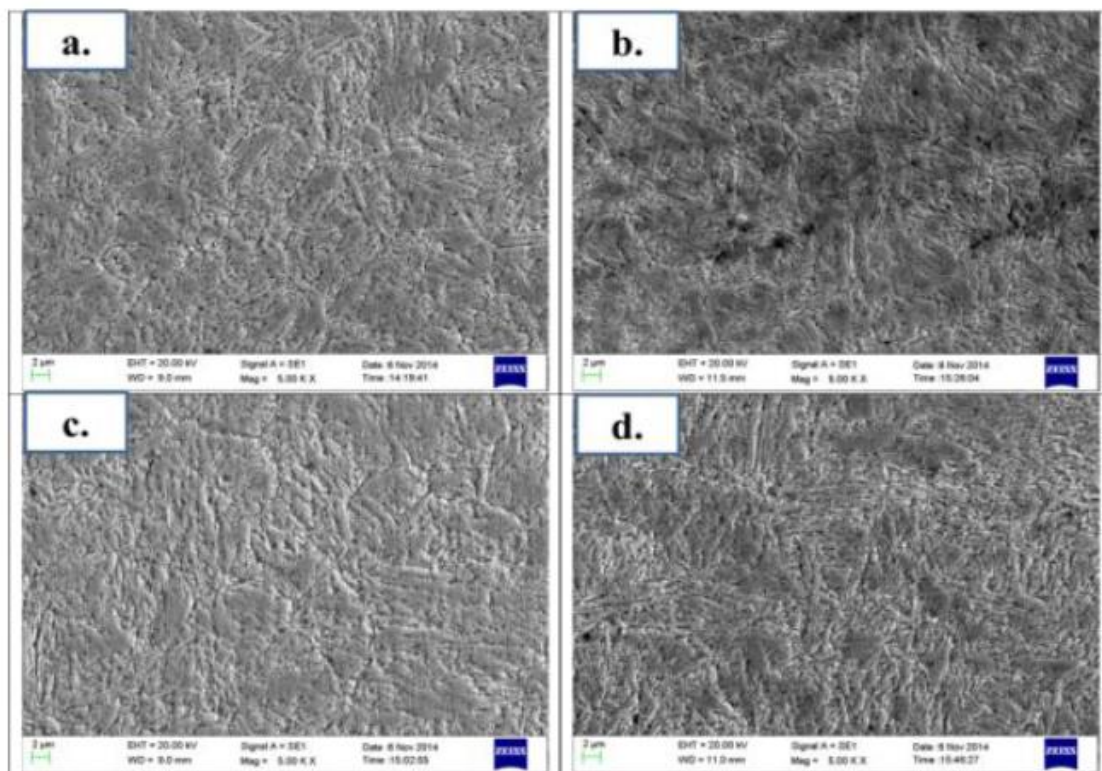
Sr.no.	Sample treatment	Nomenclature
1	Hardening and tempering (conventional)	HT
2	DCT with 16 hours soaking time	DCT16
3	DCT with 32 hours soaking time	DCT32
4	DCT with 48 hours soaking time	DCT48



Εικόνα 34:SEM εικόνες των καρβιδίων συμβατικά και κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων

Η ανάλυση της μικροδομής (Εικόνα 34 & 35) έδειξε πως συμβατικά κατεργασμένος χάλυβας μετά την επαναφορά περιέχει μαρτενσίτη σε μορφή βελόνων και διάφορα καρβίδια χρωμίου και μολυβδαινίου. Για τα δοκίμια που κατεργάστηκαν κρυογενικά η μορφή του μαρτενσίτη είναι πιο εκλεπτυσμένη και όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής οι βελόνες λεπταίνουν και ακολουθούν πιο ομοιόμορφη κατανομή. Κατά τη συμβατική κατεργασία υπάρχουν κυρίως πρωτεύοντα και δευτερεύοντα καρβίδια, ενώ κατά τη κρυογενική κατεργασία συνυπάρχουν μαζί με αυτά και πολύ λεπτά καρβίδια που αυξάνουν την πυκνότητα των καρβιδίων. Η πυκνότητα καρβιδίων αυξήθηκε κατά 5.7% κατά τη κρυογενική κατεργασία, σύμφωνα με μέτρηση που έγινε χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης εικόνας.

Σε όλα τα δοκίμια με εξέταση XRD (X-Ray Diffraction) φαίνεται να μην υπάρχει υπολειπόμενος οστενίτης αν και κάτι τέτοιο θεωρητικά δεν συμβαίνει στο δοκίμιο συμβατικής κατεργασίας, αλλά επειδή ο οστενίτης που παραμένει είναι ελάχιστος (<4%) πιθανότατα δεν μπορεί να ανιχνευθεί. Αντιθέτως, μικρή αύξηση παρατηρείται στη σκληρότητα και την ενέργεια κρούσης των δοκιμίων που έχουν υποστεί κρυογενική κατεργασία (Πίνακας 7), λόγω της αυξημένης πυκνότητας σε καρβίδια και του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Η αύξηση γίνεται μέγιστη για χρόνο παραμονής 32 ωρών και μετά μειώνεται, οπότε η κρυογενική κατεργασία πάνω από 30-35 ώρες δεν έχει νόημα για τη βελτίωση της σκληρότητας κάτι που επιβεβαιώνει και η θεωρία στο **Κεφάλαιο 1.4.2**.



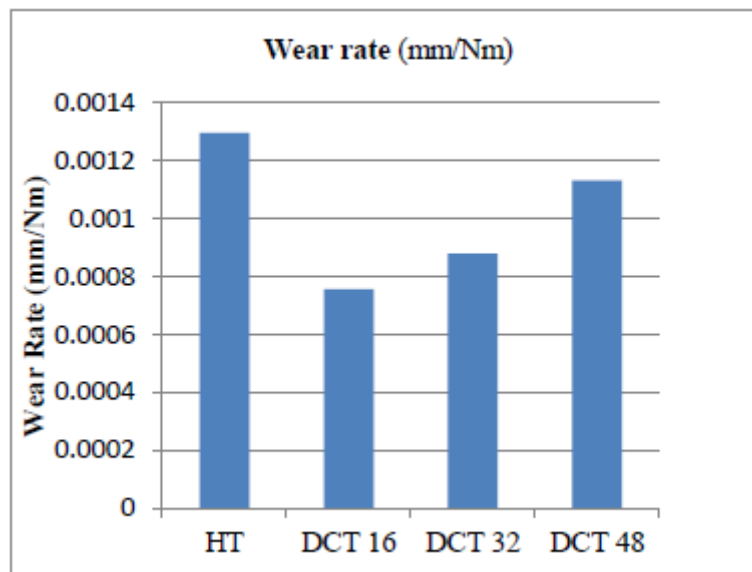
Εικόνα 35: SEM εικόνες της μαρτενσιτικής δομής μετά την επαναφορά, a) HT, b) DCT16, c) DCT32, d) DCT48

Πίνακας 7: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων

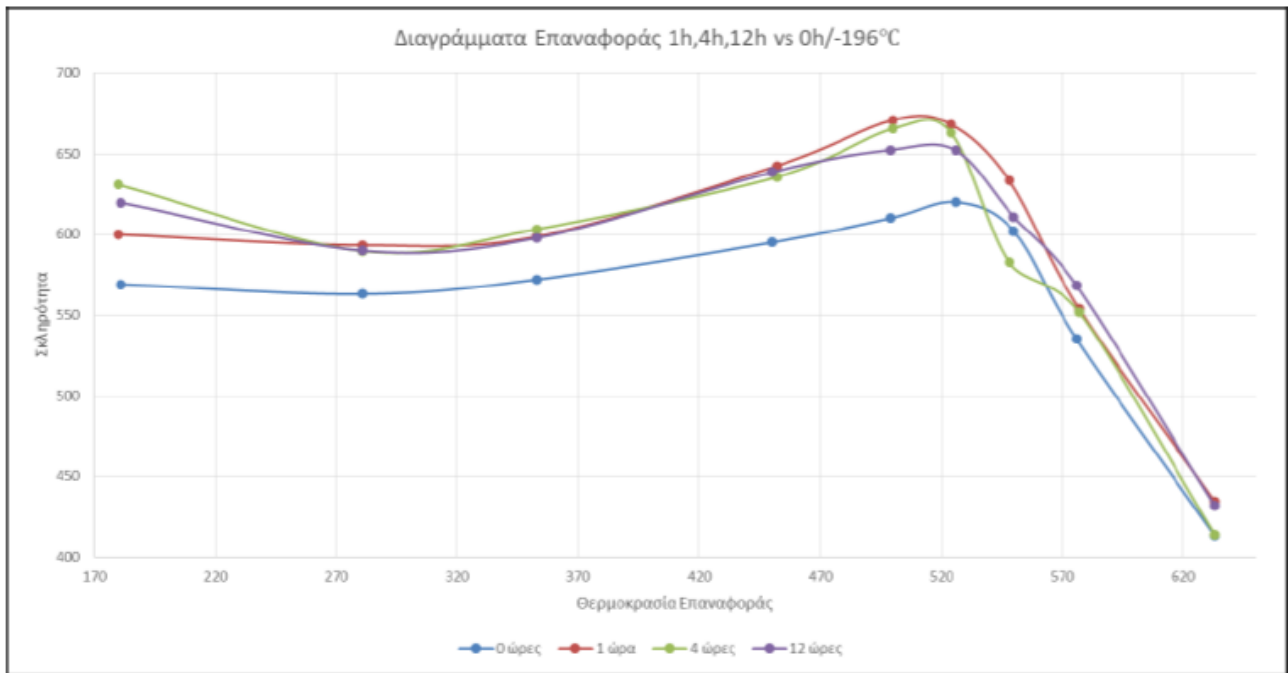
Sample treatment condition	Hardness (HRC)	Impact toughness (J)
HT	50.1	16.2
DCT16	52.1	16.7
DCT32	52.3	19.1
DCT48	51.8	17.5

Στο χάλυβα H13 έχει μεγάλη σημασία η αντοχή στη φθορά και κομβικό ρόλο σε αυτή παίζουν εκτός από τη σκληρότητα, η μικροδομή και ο συντελεστής τριβής του υλικού. Ο ρυθμός φθοράς που προκύπτει (Πίνακας 8) είναι αρκετά υψηλότερος για το δοκίμιο με συμβατική κατεργασία και μειώνεται για τα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια. Ο ρυθμός φθοράς σε σχέση με τη συμβατική κατεργασία είναι μειωμένος κατά 41% και 32% αντίστοιχα για τις περιπτώσεις DCT16 & DCT32. Παρατηρείται πως για τη σκληρότητα, την ενέργεια κρούσης και τον ρυθμό φθοράς, ο χρόνος παραμονής σε υπομηδενικές θερμοκρασίες πάνω από 32 ώρες δεν συνεχίζεται η βελτίωση των ιδιοτήτων και τελικά ο βέλτιστος χρόνος παραμονής των τεμαχίων σε υπομηδενική θερμοκρασία είναι 32 ώρες.

Πίνακας 8: Μέγιστη τάση παραμόρφωσης για των δοκιμίων



Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η κρυογενική κατεργασία είναι η τελευταία κατεργασία πριν την επαναφορά και επηρεάζει τις συνθήκες που μπορούν να επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα στις ιδιότητες του υλικού. Μία τέτοια έρευνα που ασχολείται με τη σχέση σκληρότητας με τη θερμοκρασία παραμονής σε θερμοκρασία -196°C και του χρόνου επαναφοράς δοκιμίων εργαλειοχάλυβα H13 παρουσιάζεται σε αυτή την παράγραφο [11]. Τα δοκίμια χάλυβα ακολουθούν τον κανονικό κύκλο θερμικής κατεργασίας σκλήρυνσης, όπως ορίζουν τα αντίστοιχα πρότυπα. Στη συνέχεια, το υλικό κατεργάζεται κρυογενικά με διάφορους χρόνους παραμονής και ζεύγη δοκιμίων επαναφέρονται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες μεταξύ 180°C και 630°C για 2h. Κατά τη διάρκεια των κατεργασιών γίνονται μετρήσεις σκληρότητας για το σχεδιασμό του διαγράμματος σκληρότητας - θερμοκρασίας επαναφοράς (Εικόνα 36), ενώ τα αποτελέσματα συγκρίνονται με ομάδα δοκιμίων που δεν έχει υποστεί κρυογενική κατεργασία παρά μόνο συμβατική. Από το διάγραμμα προκύπτει, πως σε όλες τις περιπτώσεις συμβαίνει δευτερογενής σκλήρυνση κάτι που είναι λογικό στο συγκεκριμένο τύπο εργαλειοχάλυβα, ωστόσο η δευτερογενής σκλήρυνση δε συμβαίνει πάντα στην ίδια θερμοκρασία, αλλά για τα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια η σκληρότητα παρουσιάζει μέγιστο σε μικρότερη θερμοκρασία από την θερμοκρασία επαναφοράς κατά τη συμβατική κατεργασία. Αυτή η συμπεριφορά είναι σημαντικό να είναι γνωστή γιατί λειτουργεί σαν ‘‘οδηγός’’ κατά την επιλογή κατάλληλων συνθηκών για την επίτευξη της επιθυμητής σκληρότητας μετά από κρυογενική κατεργασία. Η διαφορά στη θερμοκρασία δευτερογενούς σκλήρυνσης οφείλεται στην παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος και της θερμοδυναμικής αστάθειας που παρουσιάζει το δοκίμιο κατά τη κρυογενική κατεργασία. Έτσι, το υλικό αποκτά χαμηλότερη εσωτερική ενέργεια και οι διάφοροι μετασχηματισμοί, όπως η κατακρήμνιση, ενεργοποιούνται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, οπότε χρειάζεται λιγότερη θερμότητα προκειμένου να ολοκληρωθεί η κατακρήμνιση των καρβιδίων που επιδρούν στη σκληρότητα του χάλυβα.



Εικόνα 36: Διάγραμμα Σκληρότητας-Επαναφοράς

Συνοψίζοντας, οι έρευνες που παρουσιάστηκαν παραπάνω συμφωνούν πως η δομή και οι ιδιότητες του εργαλειοχάλυβα επηρεάζονται σημαντικά από την κρυογενική του κατεργασία. Οι βασικές αλλαγές που κυριαρχούν είναι:

1. η μετατροπή του υπολειπόμενου ωστενίτη σε μαρτενσίτη σε βαθμό που ο ωστενίτης μετά τη κρυογενική είναι σχεδόν μη ανιχνεύσιμος,
2. η κατακρήμνιση δευτερογενών καρβιδίων τα οποία μειώνουν την διάμετρό τους, η αύξηση του πλήθους τους και η κάλυψη των μικροκενών που δημιουργούνται,
3. την ομοιογενοποίηση της μικροδομής
4. η μορφή του μαρτενσίτη που συμβάλλει στην αύξηση της μάκρο- και μικρο- σκληρότητας και η ομοιογενοποίηση της μικροδομής.

Η ακολουθία των θερμικών κατεργασιών επηρεάζει τις τελικές ιδιότητες και προκύπτει πως η κρυογενική είναι πιο ωφέλιμη όταν γίνεται μετά τη βαφή και πριν από τις επαναφορές. Η θερμοκρασία παραμονής που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και περιθώρια βελτίωσης είναι -196°C και ο χρόνος παραμονής μπορεί να έχει πολλές τιμές, αλλά παραμονή στο θάλαμο για περισσότερο από 34-36 ώρες δεν βελτιώνει περισσότερο τις ιδιότητες του υλικού. Ο εργαλειοχάλυβας H13 μετά από κρυογενική κατεργασία, μπορεί να αποκτήσει αυξημένη σκληρότητα, αντοχή στη φθορά, χρόνο ζωής και πιο ομοιογενή μικροδομή.

1.5: Μηχανικές δοκιμές εργαλειοχαλύβων

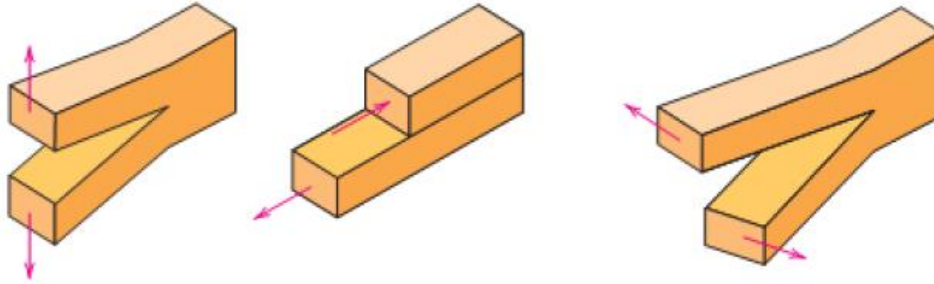
Στα προηγούμενα κεφάλαια έχει αναφερθεί, πως είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι ιδιότητες των υλικών και των τεμαχίων που παράγονται να ικανοποιούν τις ανάγκες του κατασκευαστή. Αρά δημιουργείται η ανάγκη να μπορούν να προσδιοριστούν οι ιδιότητες με ακριβή και συγκριμένο τρόπο για την ποσοτικοποίηση και τη σύγκριση αποτελεσμάτων. Πραγματοποιούνται λοιπόν μηχανικές δοκιμές, οι οποίες ακολουθούν κάποια από τις πολλές τυποποιημένες μεθόδους δοκιμών για το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων των υλικών με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια και αξιοπιστία [35]. Υπάρχουν πολλά είδη μηχανικών δοκιμών που προσδιορίζουν τις διάφορες ιδιότητες και τη συμπεριφορά του υλικού σε συγκεκριμένες καταπονήσεις, όπως η σκληρομέτρηση, η δοκιμή δυσθραυστότητας, η δοκιμή αντοχής σε τριβή και η δοκιμή σε κόπωση. Τέτοιες δοκιμές μετρούν την αντίσταση του δοκιμίου σε εξωτερικές φορτίσεις και γίνονται σε όλα τα υλικά, αλλά παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον κυρίως στα μέταλλα. Συγκεκριμένα, για τους εργαλειοχάλυβες, λόγω των διαφορετικών θερμικών κατεργασιών που θα υποστούν, αλλάζουν οι μηχανικές τους ιδιότητες. Έτσι, διενεργώντας μηχανικές δοκιμές πάνω σε αυτές μπορεί να συγκριθούν οι επιδράσεις κάθε κατεργασίας στο υλικό και να προβλεφθεί η συμπεριφορά του. Οι μηχανικές δοκιμές χωρίζονται σε καταστρεπτικές αν το δοκίμιο μετά τη δοκιμή δεν μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί και σε μη καταστρεπτικές αν δεν υπάρχει θραύση ή αλλοίωση του δοκιμίου. Όσον αφορά, τους εργαλειοχάλυβες, παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι καταστρεπτικές δοκιμές που γίνονται σε αυτούς, όπως δοκιμές κρούσης και προσδιορισμού σκληρότητας, αφού είναι γνωστό πως η θερμικές κατεργασίες όπως η βαφή, η επαναφορά και η κρυογενική κατεργασία μεταβάλλουν τη σκληρότητα, την ολκιμότητα και την αντοχή σε φθορά του χάλυβα. Καταστροφικές δοκιμές, όπως η εξέταση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) είναι χρήσιμες για τη μελέτη της μικροδομής του υλικού [1]. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι μηχανικές δοκιμές δυσθραυστότητας και μέτρησης σκληρότητας, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος.

1.5.1: Δοκιμές δυσθραυστότητας

Η δυσθραυστότητα (toughness) σύμφωνα με το ASM Metals Handbook [7] είναι μία ένδειξη της ικανότητας ενός χάλυβα να απορροφά ενέργεια και εξαρτάται από την αντοχή και την ολκιμότητα. Η ανθεκτικότητα σε εγκοπή είναι μία ένδειξη της ικανότητας ενός χάλυβα να απορροφά ενέργεια όταν υπάρχει εγκοπή. Για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση της δυσθραυστότητας του χάλυβα γίνονται διάφορες δοκιμές κρούσης με εγκοπή. Ο συντελεστής έντασης τάσεων K , δείχνει την κατανομή των τάσεων σε μία ατέλεια και υπολογίζεται ως:

$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$, όπου Y είναι αδιάστατη διορθωτική παράμετρος που σχετίζεται με τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ατέλειας και a το μέγεθος της ατέλειας.

Σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης με εφαρμογή φορτίου τύπου I (**Εικόνα 37**), η κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων ονομάζεται δυσθραυστότητα σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης K_{Ic} . Αυτό συμβαίνει όταν η εφαρμοσμένη τάση ή η ρωγή φτάσουν μία κρίσιμη τιμή ($\sigma = \sigma_{crit}$, $a = a_{crit}$). Η K_{Ic} εξαρτάται από τη θερμοκρασία και ειδικότερα μειώνεται όταν μειώνεται η θερμοκρασία, ενώ είναι μικρότερη στα ψαθυρά υλικά από αυτή των ολκιμων υλικών. Γενικότερα οι χάλυβες με την αλλαγή θερμοκρασίας παρουσιάζουν ολκιμη ή ψαθυρή συμπεριφορά. Η K_{Ic} προσδιορίζεται με την μέτρηση του ανοίγματος της τυποποιημένης εγκοπής κατά την κάμψη 3-σημείων ή τον εφελκυσμό του δοκιμίου [36], [37].



Εικόνα 37: Τύποι εφαρμογής φορτίου: Τύπος I ανοικτός, Τύπος II ολίσθησης και Τύπος III αποσχιστικός

Κρουστικές δοκιμές περιλαμβάνουν τη ξαφνική κρουστική φόρτιση του δοκιμίου σε μία περιοχή που έχει σχηματιστεί από πριν μία εγκοπή συγκεκριμένης γεωμετρίας με σκοπό τη θραύση του στο συγκεκριμένο σημείο, ενώ παράλληλα μετριέται η συνολική ενέργεια που χρειάστηκε για τη θραύση αυτή. Εκτός από την ενέργεια, παρατηρείται η συμπεριφορά σε θραύση του υλικού και η τοπική πλαστική παραμόρφωσή του. Η ευθραυστότητα ενός υλικού σχετίζεται από εξωτερικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και για αυτό δοκιμές δυσθραυστότητας δίνουν τη πληροφορία αν το υλικό είναι αρκετά ανθεκτικό [18]. Σημαντικός παράγοντας στα αποτελέσματα τέτοιων δοκιμών, είναι οι διαστάσεις του δοκιμίου καθώς για διαφορετικά δοκίμια προκύπτουν διαφορετικές τιμές, για την αποφυγή λανθασμένων συγκρίσεων υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα που καθορίζουν για κάθε περίπτωση τις διαστάσεις που πρέπει να έχει το δοκίμιο, τέτοια πρότυπα είναι το ASTM A370, το ISO 148, το MPIF Standard 40 και το ASTM D256. Υπάρχουν δύο βασικές τυποποιημένες δοκιμές κρούσης η δοκιμή Charpy και η δοκιμή Izod.

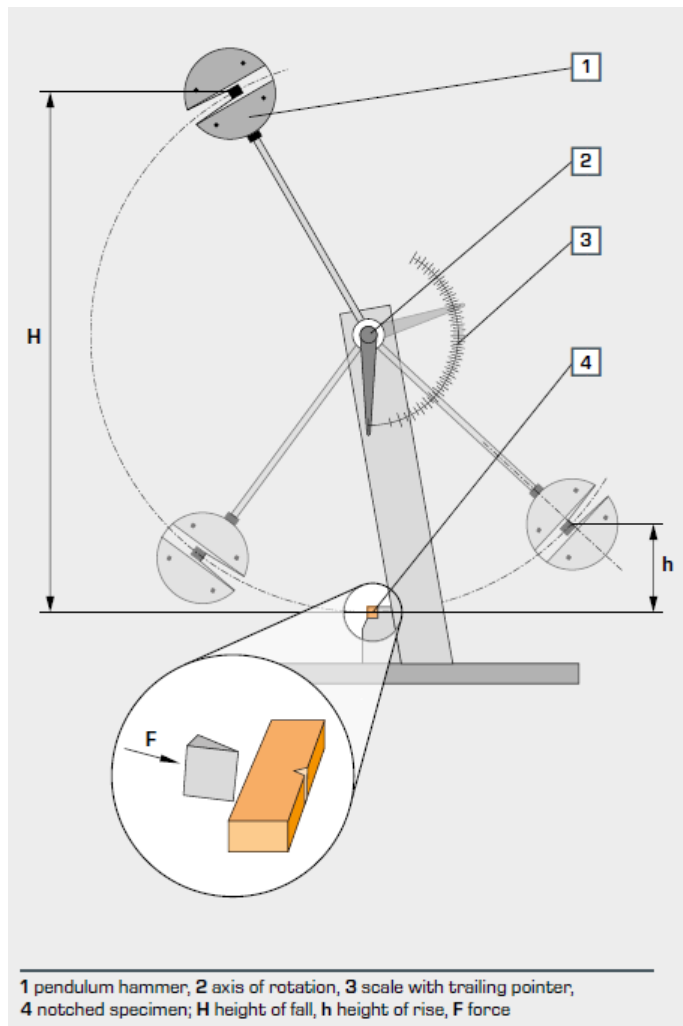
1.5.2: Δοκιμές κρούσεως

Το 1901 ο Γάλλος επιστήμονας G. Charpy ανέπτυξε μία δοκιμή κρούσης για μεταλλικά δοκίμια με εγκοπή που μετρούσε την ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο κατά την κρούση, θεωρώντας πως είναι ενδεικτική της αντοχής σε θραύση. Κατά τη δοκιμή αυτή, μία σφύρα συγκεκριμένης μάζας προσαρμοσμένη σε εκκρεμές αφήνεται από προκαθορισμένο ύψος και στην κατακόρυφό του χτυπά το δοκίμιο στο μέσο, αλλά στην αντίθετη πλευρά από αυτήν της εγκοπής. Το δοκίμιο είναι τοποθετημένο κατάλληλα στη βάση της μηχανής δοκιμασίας (Εικόνα 38).

Η ενέργεια που απορροφάται για τη θραύση του δοκιμίου επιβραδύνει τη σφύρα, η οποία συνεχίζει την κίνησή της μέχρι το νέο μέγιστο ύψος. Από το ύψος που φτάνει η σφύρα μετά κρούση, υπολογίζεται η ενέργεια που χρειάστηκε για την θραύση μέσω μίας κλίμακας, δίνοντας πληροφορίες για τη δυσθραυστότητα του δοκιμίου [15]. Η δυσθραυστότητα υπολογίζεται από το πηλίκο του απαιτούμενου έργου για τη θραύση προς τη διατομή του δοκιμίου δηλαδή:

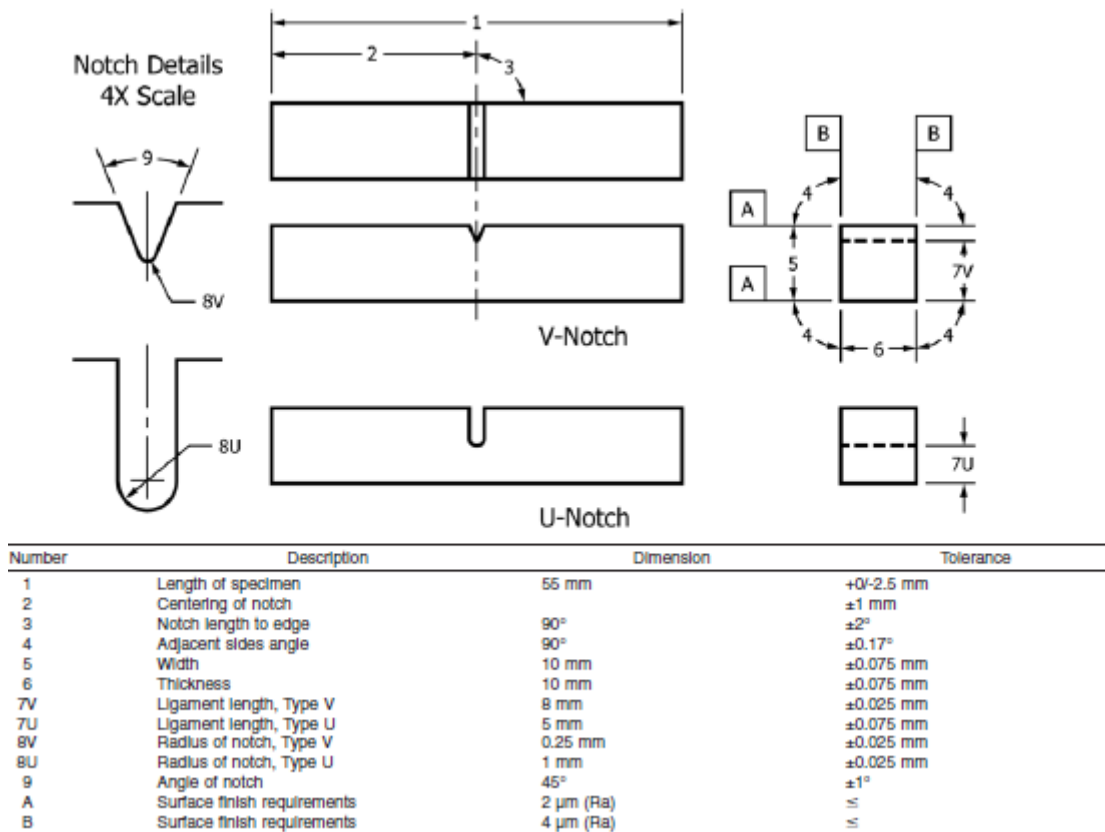
$$\rho = \frac{E}{F_0} (Nm/cm^2)$$

Όπου, E το έργο για τη θραύση του δοκιμίου σε Nm και F_0 η διατομή του δοκιμίου σε cm^2



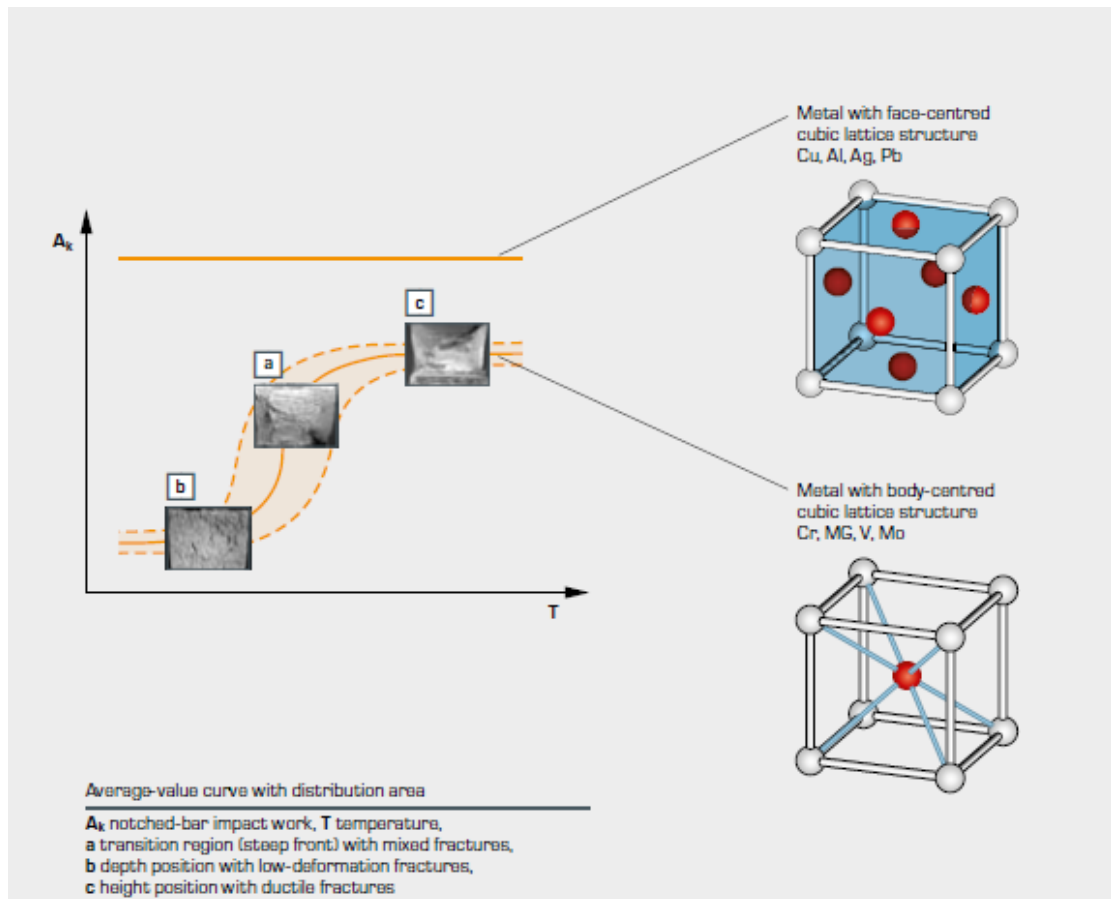
Εικόνα 38: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Charpy [35]

Η δοκιμή αυτή απαιτεί τη δημιουργία μίας εγκοπής σχήματος V σε δοκίμια με σχήμα ράβδου τετραγωνικής διατομής. Η εγκοπή και οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι καθορισμένες από όποιο πρότυπο χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, για παράδειγμα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM A370-2021 και το ASTM E23-2023 οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι 55x10x10mm. Στην **Εικόνα 39** φαίνεται το σχέδιο του δοκιμίου με τις διαστάσεις και τις ανοχές. Οι μηχανισμοί Charpy για τους χάλυβες έχουν εύρος ενέργειας έως 400J και η ταχύτητα την στιγμή της κρούσης κυμαίνεται από 4.9 έως 5.8 m/s, ενώ σημαντικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία, καθώς η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε αρκετά δοκίμια με ξεχωριστή θερμοκρασία [38]. Ο ρόλος της εγκοπής είναι να συγκεντρώσει τις τάσεις και να καθοδηγήσει τη ρωγή κατά το κρουστικό χτύπημα.



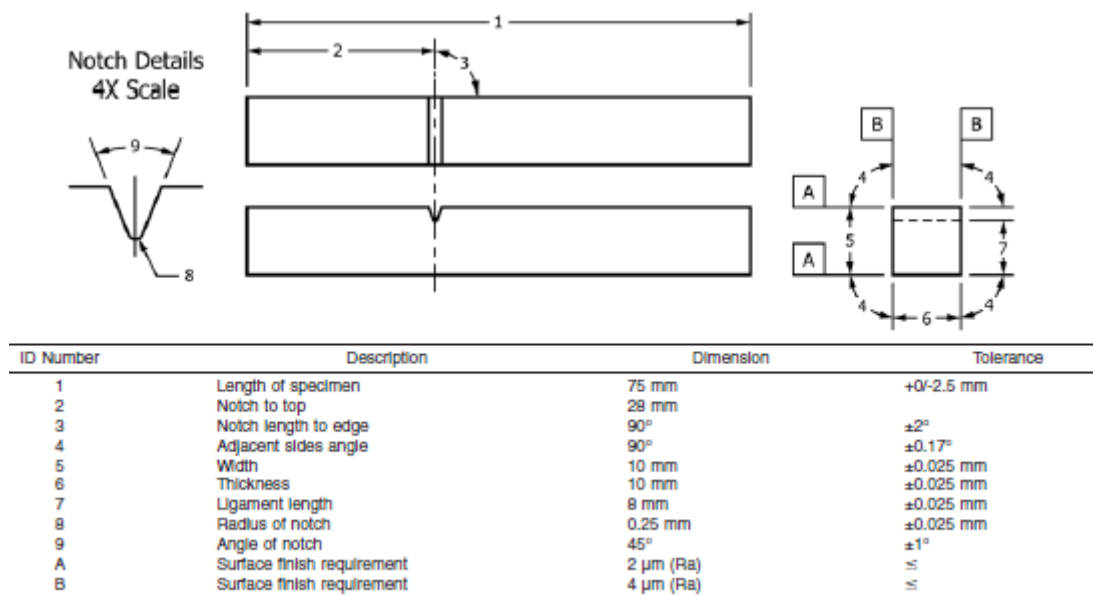
Εικόνα 39: Προδιαγραφές δοκιμίου για Charpy V-notch test [39]

Μέσα από τέτοιες δοκιμές προκύπτουν συμπεράσματα για τη μετάβαση του υλικού από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά με την αλλαγή της θερμοκρασίας, αλλά και το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες παρατηρείται. Από το διάγραμμα ενέργειας κρούσης-θερμοκρασίας (Εικόνα 40) για διάφορα υλικά φαίνεται, πως για τα μέταλλα με BCC δομή με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η ενέργεια κρούσης και παρουσιάζουν πιο όλκιμη συμπεριφορά κατά τη κρούση, κάτι που δεν συμβαίνει, για παράδειγμα στα μέταλλα με FCC δομή καθώς δεν παρατηρείται τέτοια αλλαγή [35]. Η θερμοκρασία όπου συμβαίνει η αιφνίδια μείωση στη ενέργεια που απορροφάται ονομάζεται θερμοκρασία μετάβασης. Η ψαθυρή περιοχή που αντιστοιχεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, η θραύση είναι περικρυσταλλική και στην επιφάνειά της δεν εμφανίζεται παραμόρφωση, ενώ στην όλκιμη περιοχή η επιφάνεια της θραύσης έχει ινώδη μορφή και παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση. Στη μετάβαση από τη μία περιοχή στην άλλη, συνυπάρχουν χαρακτηριστικά όλκιμης και ψαθυρής θραύσης. Για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης υλικών που παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά, συνίσταται να χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία μετάβασης [30].

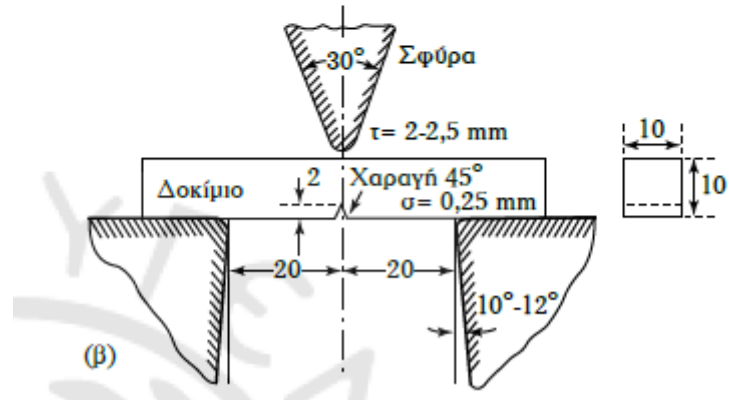
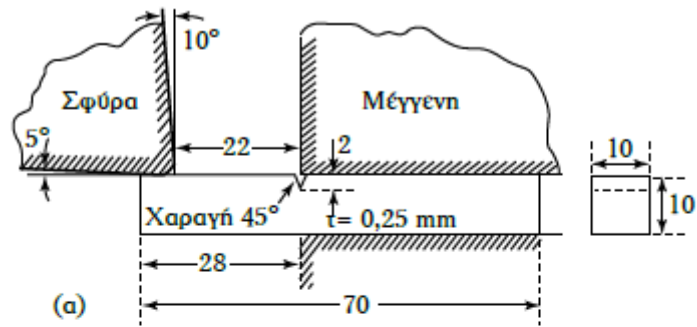


Εικόνα 40: Διάγραμμα ενέργειας κρούσης – θερμοκρασίας για διαφορετική κρυσταλλική δομή [35]

Η δοκιμή Izod ακολουθεί την ίδια διαδικασία με την Charpy, αλλά με ορισμένες βασικές διαφορές. Σε σχέση με τα δοκίμια για Charpy V-notch τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται σε δοκιμή Izod έχουν μεγαλύτερο μήκος και η εγκοπή δεν βρίσκεται στο μέσο του δοκιμίου. Ωστόσο, το πλάτος το μήκος και η γεωμετρία της εγκοπής έχουν τις ίδιες απαιτήσεις (Εικόνα 41). Κατά τη δοκιμή Izod το δοκίμιο συγκρατείται κατακόρυφα από τη μία άκρη και η κρούση γίνεται στο ελεύθερο άκρο στη πλευρά της εγκοπής, στην Εικόνα 42 φαίνονται σχηματικά οι δύο μέθοδοι [15].



Εικόνα 41: Προδιαγραφές δοκιμίου για Izod V-notch test [39]



Εικόνα 42: Σχηματική απεικόνιση μεθόδου α) Izod, β) Charpy

1.5.3: Δοκιμές σκληρομέτρησης

Έχει αναφερθεί πολλαπλές φορές παραπάνω η σκληρότητα του χάλυβα ως μία ιδιότητα πολύ σημαντική για το τελικό προϊόν, σε βαθμό που χρησιμοποιείται σαν χαρακτηριστικό επιβεβαίωσης του χάλυβα και ως προς τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται. Καθώς είναι από τις χαρακτηριστικές του ιδιότητες, η σκληρότητα πρέπει να προσδιορίζεται με σαφήνεια και υψηλή ακρίβεια. Για την επαναληψιμότητα και σαφή σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής, οι συνθήκες και τα μηχανήματα που συμβάλλουν στην ολοκλήρωση πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένους κανόνες. Ο οργανισμός ASTM στο πρότυπο A370 [38] θέτει αυτούς τους κανόνες και ορίζει ως δοκιμή σκληρομέτρησης τη μέθοδο προσδιορισμού της αντίστασης σε διείδυση, που διενεργείται συνήθως για μία γρήγορη εκτίμηση της αντοχής εφελκυσμού. Υπάρχουν τρία είδη τέτοιων δοκιμών που βασίζονται στην ίδια λογική, αλλά έχουν διαφορές στον μηχανισμό μέτρησης. Οι βασικές δοκιμές είναι η Brinell, η Rockwell και η Vickers. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφόρων δοκιμών υπάρχουν πίνακες μετατροπής της τιμής σκληρομέτρησης από τη μία κλίμακα στην άλλη, π.χ. από κλίμακα Rockwell σε Brinell. Οι τιμές μετατροπής έχουν προκύψει από υπολογιστικά ανεπτυγμένες καμπύλες για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης ακρίβειας μετατροπής. Η σχέση μεταξύ των κλιμάκων όμως, δεν είναι γραμμική δηλαδή αύξηση δύο μονάδων στην κλίμακα Rockwell δεν αντιστοιχεί σε αύξηση δύο μονάδων στην κλίμακα Vickers και η αύξηση αυτή δεν είναι σταθερή. Ακόμα, οι μετατροπές τιμών σκληρότητας είναι προσεγγίσεις και στρογγυλοποιούνται στο μεγαλύτερο επόμενο φυσικό αριθμό. Οι τιμές που μετατρέπονται γράφονται με συγκεκριμένη μορφή που περιλαμβάνει την τιμή σκληρότητας και κλίμακας μετά την μετατροπή και σε παρένθεση αρχική τιμή και κλίμακα σκληρότητας για παράδειγμα, 285 HBW (65 HRC).

Δοκιμή Brinell

Στη δοκιμή αυτή εφαρμόζεται συγκεκριμένο φορτίο σε επίπεδη επιφάνεια του δοκιμίου προς εξέταση μέσω σφαίρας βολφραμίου προκαθορισμένης διαμέτρου. Η μέση διάμετρος της εσοχής που δημιουργείται είναι η βάση για τον υπολογισμό της σκληρότητας. Η σκληρότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$HBW = P / [(\pi D / 2) * (D - \sqrt{D^2 - d^2})]$$

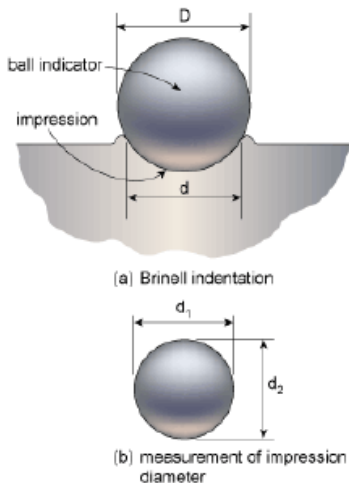
Όπου: HBW = η σκληρότητα Brinell

P = το φορτίο σε kgf

D = Η διάμετρος της σφαίρας

d = Η μέση διάμετρος της εσοχής

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε σφαίρα διαμέτρου 10mm και φορτίο 3000kgf. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε φορτίο 1500 ή 500kgf, ενώ πλέον χρησιμοποιείται βάρος 187.5 kgf. Το εύρος της σκληρότητας προσδιορίζεται μόνο για χάλυβες που έχουν περάσει κατεργασίες βαφής και επαναφοράς ή εξομάλυνσης και επαναφοράς. Για χάλυβα από ανόπτηση καταγράφεται μόνο η μέγιστη σκληρότητα. Η επιφάνεια της μέτρησης πρέπει να είναι καθαρισμένη και να μην υπάρχουν απανθρακωμένες ή άλλες περιοχές που να επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα και το δοκίμιο να έχει αρκετό πάχος ώστε να μην εμφανίζεται προεξοχή στην απέναντι πλευρά. Ακόμα, η απόσταση της σφαίρας από τις άκρες του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κρατήρα που σχηματίζεται. Κατά τη δοκιμή (**Εικόνα 43**) το φορτίο εφαρμόζεται για 10 με 15 δευτερόλεπτα για να προλάβει να αναπτυχθεί η πλαστική παραμόρφωση. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται οι βασικές συνθήκες δηλαδή φορτίο 3000kgf, για 10-15s με σφαίρα 10mm πρέπει να αναφέρονται μαζί με το αποτέλεσμα της σκληρομέτρησης. Για παράδειγμα 80HB 10.3000/15 αναφέρεται σε 80 σκληρότητα κατά Brinell με κανονικές συνθήκες. Σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές που θα παρουσιαστούν παρακάτω η Brinell δημιουργεί την πιο μεγάλη εσοχή, έτσι μπορεί να λαμβάνει υπόψιν με μεγαλύτερη ακρίβεια δομές πολλαπλών κόκκων και την ανομοιομορφία του υλικού, οπότε χρησιμοποιείται κυρίως για την σκληρότητα υλικών με ετερογενή δομή [38], [40].



$$BHN = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

Where:

P is the test load [kg]

D is the diameter of the ball [mm]

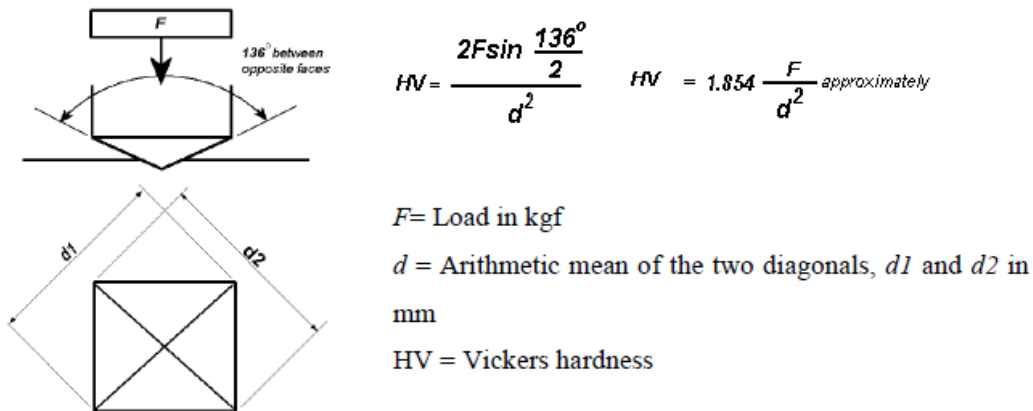
d is the average impression diameter of indentation [mm]

Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Brinell

Δοκιμή Vickers

Την ίδια αρχή λειτουργίας της δοκιμής Brinell ακολουθεί η δοκιμή Vickers. Ειδοποιός διαφορά των δύο δοκιμών είναι η χρήση μύτης τύπου τετραγωνικής πυραμίδας με γωνία 136° από διαμάντι αντί σφαίρας βολφραμίου. Αφού γίνει διείδυση του εργαλείου και παραμείνει κάποια δευτερόλεπτα μετρίεται η διαγώνιος αποτύπωσης ως ο μέσος όρος των δύο διαγώνιων. Το φορτίο κυμαίνεται από 1 έως 150kgf, με εφαρμογή για 10–15s. Στην **Εικόνα 44** φαίνονται τόσο η γεωμετρία και οι διαστάσεις

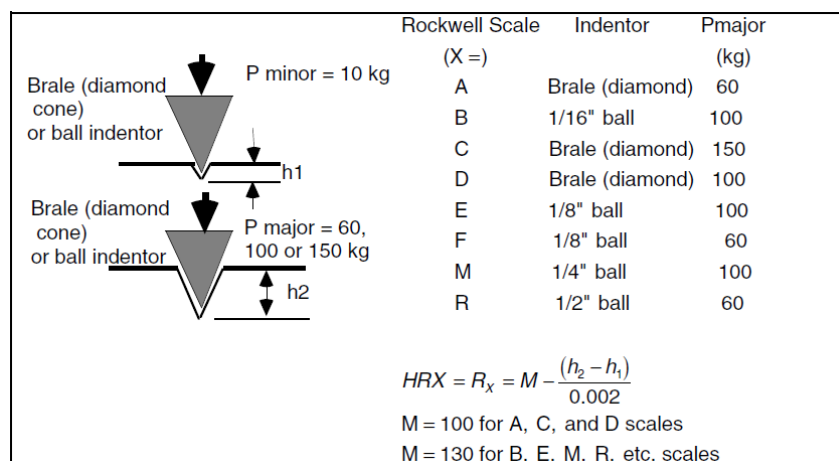
της μύτης όσο και οι μαθηματικοί τύποι υπολογισμού της σκληρότητας. Τα θετικά της μεθόδου αυτής είναι στην υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων με χρήση ενός είδους κεφαλής για όλα τα υλικά και επιφάνειες, ωστόσο η μηχανή δοκιμών είναι αρκετά ακριβή σε σχέση με τις υπόλοιπες λόγω του μεγέθους της. [40]



Εικόνα 44: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Vickers

Δοκιμή Rockwell

Η δοκιμή αυτή στηρίζεται στη μέτρηση του βάθους διείσδυσης μύτης κωνικού σχήματος από διαμάντι ή σφαίρας βολφραμίου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης. Η διαδικασία έχει ως εξής, αρχικά εφαρμόζεται φορτίο F_0 ίσο με 10kgf για την έναρξη της δημιουργίας της εγκοπής και την τοποθέτηση του εργαλείου. Μετά, ανάλογα με την κλίμακα που χρησιμοποιείται αυξάνεται το φορτίο μεγαλώνοντας παράλληλα το βάθος της εγκοπής και τελικά επιστρέφει στην αρχική φόρτιση και υπολογίζεται η σκληρότητα κατά Rockwell από τη διαφορά μεταξύ του τελικού βάθους κύριας και δευτερεύουσας φόρτισης F_0 . Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός που προκύπτει τόσο σκληρότερο είναι το δοκίμιο. Τα κύρια φορτία είναι 100 και 150kgf για βολφράμιο και διαμάντι αντίστοιχα, αλλά χρησιμοποιούνται και άλλα φορτία και πρέπει να δηλώνεται στο τελικό αποτέλεσμα σε ποια κλίμακα ανήκουν. Οι βασικές απαιτήσεις για την ακριβή μέτρηση είναι η καθαριότητα και καλή τοποθέτηση της κεφαλής και της βάσης, η καθαρή επιφάνεια του δοκιμίου το οποίο να μην έχει απανθρακωμένες περιοχές και η επιφάνεια προς μέτρηση να είναι επίπεδη και κάθετη στην κεφαλή. Ακόμα, το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο από το βάθος της κεφαλής. Στην **Εικόνα 45** παρουσιάζεται πως υπολογίζεται η σκληρότητα κατά Rockwell και παρουσιάζονται οι διάφορες κλίμακες με τις διαστάσεις των αντίστοιχων κεφαλών και των βαρών [38].



Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Rockwell

Δοκιμές μικροσκληρότητας

Δοκιμή μικροσκληρότητας ή πιο σωστά δοκιμή σκληρότητας μικροεσοχής ερευνά τις μικρές εκούσιες ή ακούσιες αλλαγές στη σκληρότητα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επιφάνειας μετά από θερμικές κατεργασίες ή την ανίχνευση περιοχών απανθράκωσης. Ακόμα, παρέχει πληροφορίες για την ομοιογένεια και την αναγνώριση των φάσεων. Οι δοκιμές μικροσκληρότητας περιγράφονται πλήρως από το πρότυπο ASTM E384 [41] που ορίζει τις δύο βασικές δοκιμές Vickers και Knoop. Στις δοκιμές αυτές πιέζεται η κεφαλή από διαμάντι στο τεμάχιο με σχετικά μικρή δύναμη 1–1000gf δημιουργώντας μικρή εγκοπή, η οποία μετριέται από μικροσκόπιο εξοπλισμένο με νηματόμετρο (filar type eyepiece) ή άλλη μετρητική συσκευή. Η σκληρότητα κατά Vickers υπολογίζεται από τη δύναμη δια την επιφάνεια της εγκοπής, ενώ η σκληρότητα κατά Knoop από την δύναμη διαιρεμένη με την επιφάνεια προβολής (projected area).

Η δοκιμή **Vickers** αναπτύχθηκε το 1925 για τη μέτρηση μετάλλων που ήταν πολύ σκληρά για να γίνει προσδιορισμός σκληρότητας με τεστ Brinell. Κατά τον σχεδιασμό της μεθόδου αποφασίστηκε, πως η γεωμετρία του εργαλείου διείσδυσης (**Εικόνα 46**) είναι προτιμότερο να δίνει αποτελέσματα κοντά σε αυτά των δοκιμών Brinell, έτσι ώστε η μέθοδος να αφομοιωθεί πιο γρήγορα. Ακόμα, επιλέχθηκε η κεφαλή να είναι από διαμάντι για να μην χρειαστούν πολλαπλές κλίμακες, όπως στη δοκιμή Rockwell. Όπως και στη δοκιμή σκληρότητας Vickers που αναφέρθηκε παραπάνω εφαρμόζεται φορτίο με αργό ρυθμό χωρίς κρούση για 10 ή 15 δευτερόλεπτα, μετά μετριοούνται με νηματόμετρο (filar micrometer) ακρίβειας 0.1μm οι διαγώνιοι αποτύπωσης και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους. Η τιμή σκληρότητας υπολογίζεται από την εξίσωση:

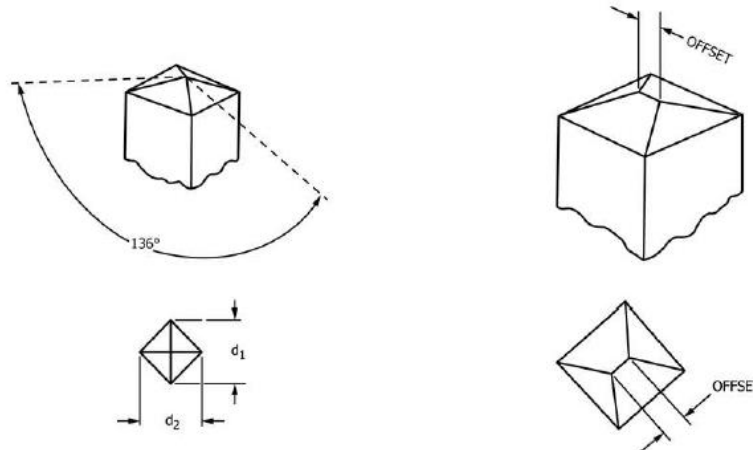
$$HV = (1.854.4F)/d^2$$

Όπου,

L είναι το φορτίο σε kgf

d είναι η μέση διαγώνιος σε μm

Οι μονάδες είναι σε $gf/\mu m^2$ αλλά είναι καλύτερα είναι προτιμότερο να μετατραπούν σε kgf/mm^2



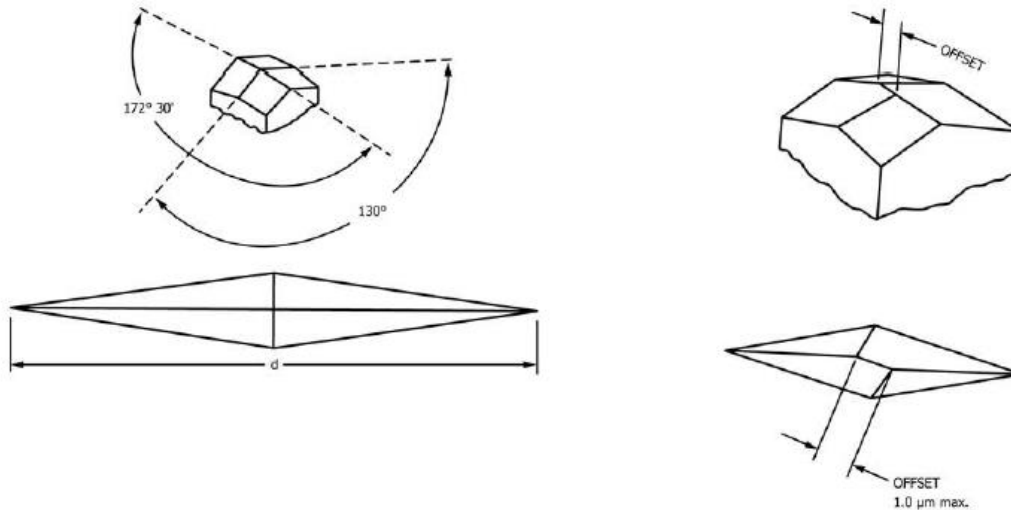
Εικόνα 46: Γεωμετρία κεφαλής Vickers

Επειδή το σχήμα της εγκοπής κατά Vickers είναι γεωμετρικά όμοιο για τα διάφορα φορτία, η τιμή είναι εντός της στατιστικής ακρίβειας για ένα μεγάλο εύρος φορτίων αρκεί το δοκίμιο να είναι ομοιογενές. Από την άλλη τα αποτελέσματα δεν είναι σταθερά σε χαμηλά φορτία κάτι που μπορεί να οφείλεται στα χαρακτηριστικά του υλικού. Όπως στις υπόλοιπες, δοκιμές πρέπει να φαίνεται το φορτίο που εφαρμόστηκε, για παράδειγμα η σκληρότητα 380 με φορτίο εφαρμογής 200gf γράφεται ως HV_{200} [41].

Η δοκιμή **Knoop** παρουσιάστηκε ως εναλλακτική της δοκιμής Vickers, με σκοπό βασικά τη μέτρηση μικροσκληρότητας λεπτών φύλλων. Η κεφαλή (**Εικόνα 47**) που χρησιμοποιείται είναι από διαμάντι σε σχήμα ρόμβου με τη μεγάλη διαγώνιο να είναι 7.114 επί τη μικρή. Το σχήμα αυτό ελαχιστοποιεί την ελαστική επαναφορά η οποία συμβαίνει ως ένα βαθμό. Ορισμένοι ερευνητές υποστηρίζουν πως

δεν συμβαίνει ελαστική επαναφορά, ωστόσο ο λόγος διαμέτρων συχνά δεν είναι 7.114 και αντικρούεται η παραπάνω άποψη. Η δοκιμή γίνεται με τις ίδιες συνθήκες όπως στην Vickers με τη διαφορά πως μετριέται μόνο η μεγάλη διαγώνιος, με την τελική τιμή να υπολογίζεται από τον τύπο:
 $HK = (14.229L)/d^2$

Όπου, L το φορτίο σε kgf και d η διάμετρος της μεγάλης διαγώνιου σε μm. Αντίστοιχα με τη μέθοδο Vickers προστίθεται και η τιμή φόρτισης στον τελικό συμβολισμό. Η δοκιμή αυτή πέρα από την πιο σύντομη διάρκεια μέτρησης επειδή χρειάζεται μόνο μία διαγώνιος, έχει την δυνατότητα δοκιμής λεπτών φύλλων. Για επιφάνειες με μεταβαλλόμενη σκληρότητα οι εγχοπές μπορούν να γίνουν πιο κοντά η μία στην άλλη δηλαδή, με τη δοκιμή Knoop μία βαθμίδα σκληρότητας περιγράφεται με λιγότερες δοκιμές από ότι με Vickers.



Εικόνα 47: Γεωμετρία κεφαλής Knoop

Συγκρίνοντας τις δύο δοκιμές προκύπτει πως:

- Η δοκιμή Vickers διεισδύει δύο φορές βαθύτερα από την Knoop
- Η διαγώνιος της Vickers είναι το 1/3 της βασικής διαγώνιου της Knoop
- Η δοκιμή Vickers είναι λιγότερο ευαίσθητη σε λάθη επιφάνειας αλλά πιο ευαίσθητη σε λάθη μετρήσεων
- Η Vickers είναι καλύτερη για μικρές στρογγυλές επιφάνειες ενώ η Knoop για μακριές και για πολύ λεπτές [41].

1.5.4: Θερμικές κατεργασίες και δοκιμές δυσθραυστότητας

Εργαλειοχάλυβες μεταξύ άλλων χρησιμοποιούνται συχνά σε κατασκευές κοπτικών εργαλείων που εξ ορισμού περιλαμβάνει την ύπαρξη κοφτερών άκρων και την ανάγκη λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, οπότε η αντοχή του τεμαχίου σε θραύση και την διάδοση ρωγμών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την απόδοση του εργαλείου. Κατά καιρούς έχουν γίνει αρκετές μελέτες πάνω στην επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας χαλύβων στις μηχανικές ιδιότητες που εξετάζουν κυρίως την επίδραση στη σκληρότητα του δοκιμίου. Το κεφάλαιο αυτό ωστόσο θα ασχοληθεί με τις συνέπειες της κρυογενικής κατεργασίας στην δυσθραυστότητα των εργαλειοχαλύβων, όπως αυτές προκύπτουν από μελέτες που έχουν γίνει.

Αρχικά, ο Mollinari και η ομάδα του [22] πραγματοποίησε δοκιμές πάνω σε ταχυχάλυβα M2 και στον εργαλειοχάλυβα H13 για να προσδιορίσει την επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας. Η έρευνα αυτή παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια (**Κεφ 1.4.6**), οπότε εδώ περιγράφονται επιγραμματικά τα συμπεράσματα. Οι συνδυασμοί κατεργασιών φαίνονται στον **Πίνακα 9**.

Πίνακας 9: Συνδυασμοί κατεργασιών

Κωδικός	Κατεργασίες
A	Q+T+T
B	Q+T+T+C
C	Q+C+T
D	Q+C+T+T

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν δοκιμή κρούσης Charpy, σκληρομέτρηση και δοκιμή τριβής. Υπολογίστηκε λοιπόν, η ενέργεια κρούσης, η αντοχή σε θραύση και η σκληρότητα, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Αρχικά, παρατηρείται πως όταν η κρυογενική κατεργασία έπεται της συμβατικής δεν υπάρχει αισθητή βελτίωση της σκληρότητας ή της ενέργειας θραύσης, παρόλα αυτά υπάρχει βελτίωση της αντοχής σε θραύση. Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται για τις άλλες δύο περιπτώσεις με την κρυογενική να γίνεται μεταξύ της βαφής και των επαναφορών έστω σε μικρότερο βαθμό. Ωστόσο, η αύξηση συνδυάζεται με μείωση της ενέργειας κρούσης ταυτόχρονα με αύξηση της σκληρότητας. Για τη συμβατική κατεργασία πρέπει να γίνουν τουλάχιστον δύο επαναφορές λόγω της ψαθυρής συμπεριφοράς του χάλυβα μετά από μία επαναφορά. Όσον αφορά τη δοκιμή τριβής παρατηρείται μείωση του ρυθμού φθοράς κατά 20% περίπου μεταξύ των δύο πρώτων περιπτώσεων. Ο Mollinari επισημαίνει πως η αύξηση αντοχής στη φθορά του εργαλειοχάλυβα H13 σχετίζεται με την αυξημένη δυσθραυστότητα και πως η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας μετά τη βαφή και πριν από κύκλο επαναφορών είναι αμελητέα, κάτι που είναι αντίθετο με τις περισσότερες θεωρίες και δημιουργεί προβληματισμό.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμών

Κατεργασία	E(J)	Kic (N/mm ^{3/2})	HRC
Q+T+T	17.9	42.8	46.5
Q+T+T+C	18.1	49.1	46.7
Q+C+T	13.6	45.4	49.7
Q+C+T+T	16.9	45.0	47.9

Δοκιμές Charpy και κάμψης που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν, πως όταν προηγείται η κρυογενική κατεργασία της επαναφοράς η δυσθραυστότητα (Kic) είναι μεγαλύτερη, χωρίς να επηρεάζει την ουσιαστικά ενέργεια κρούσης και την σκληρότητα. Η δυσθραυστότητα για τα δοκίμια A και B είναι μεγαλύτερη από τα C και D. Σε σχέση με τις περιπτώσεις C και D, αύξηση δυσθραυστότητας παρατηρήθηκε κατά την περίπτωση D με την ενέργεια κρούσης να είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενέργεια της κρυογενικής κατεργασίας C με μία επαναφορά. Οπότε, συμπεραίνεται πως οι κύκλοι επαναφοράς δεν συμφέρει να μειωθούν από δύο γιατί μετά από μία επαναφορά ο χάλυβας είναι αρκετά ψαθυρός. Η αύξηση της δυσθραυστότητας είναι σημαντική ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που ο χάλυβας χρησιμοποιείται σε εφαρμογές διέλασης και θερμής διαμόρφωσης.

Εφόσον, η κρυογενική κατεργασία βελτιώνει τη δυσθραυστότητα, έχει ενδιαφέρον η μελέτη με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου παραμονής σε θερμοκρασία της τάξεως -196°C. Τέτοιες δοκιμές έγιναν από τον Bhavar [34] σε δοκίμια H13. Σε αυτή τη μελέτη όλα τα δοκίμια πέρασαν από συμβατικό κύκλο θερμικής κατεργασίας που περιλάμβανε ωστενιτοποίηση, βαφή και επαναφορά. Η κρυογενική κατεργασία εκτελείται μετά την συμβατική και έγινε για διαφορετικούς χρόνους παραμονής από 16 έως 48 ώρες, ενώ σε όλες τις περιπτώσεις ακολουθεί μία επαναφορά (soft

tempering) σε θερμοκρασία 110°C για 2h. Τα αποτελέσματα της δοκιμής Charpy (**Πίνακας 11**) έδειξαν πως υπάρχει σχετικά μικρή αύξηση της ενέργειας κρούσης που αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη τιμή και μετά μειώνεται όσο αυξάνεται ο χρόνος παραμονής. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται για χρόνο παραμονής 32 ώρες. Αντίστοιχα υπάρχει αύξηση της σκληρότητας έως δυο μονάδες της κλίμακας Rockwell με τη μέγιστη αύξηση να συμβαίνει για 32 ώρες παραμονής.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα σκληρότητας και δοκιμών δυσθραυστότητας

Κατεργασία	Hardness (HRC)	Impact Energy (J)
Q+T	50.1	16.2
Q+DC16+T	52.1	16.7
Q+DC32+T	52.3	19.1
Q+DC48+T	51.8	17.5

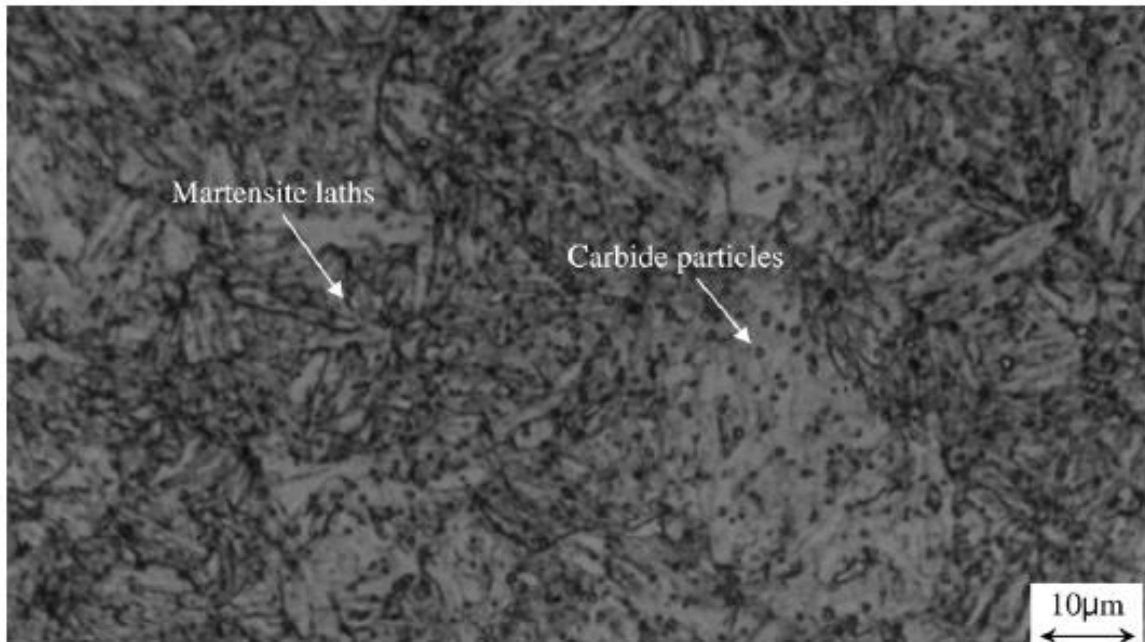
Ακόμη μία έρευνα πάνω στη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα H13 μετά από κρυογενική κατεργασία πραγματοποιήθηκε από τον Koneshlou [19]. Δοκίμια με μορφή ράβδου διαμέτρου 20mm πέρασαν από 4 διαφορετικές διαδικασίες θερμικής κατεργασίας. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη ομάδα περιλάμβανε κύκλο συμβατικής κατεργασίας ωστενιτοποίησης στους 1040°C για 30min με ακόλουθη βαφή σε αέρα και επαναφορά στους 560°C για 2 ώρες. Η δεύτερη, συμβατική κατεργασία και ήπια κρυογενική κατεργασία στους -72°C για 8 ώρες, η τρίτη συμβατική κατεργασία και έπειτα βαθιά κρυογενική κατεργασία στους -196°C για 8 ώρες, ενώ η τέταρτη περιλάμβανε μία επιπλέον επαναφορά αντίστοιχη με αυτή της συμβατικής κατεργασίας μετά από την κρυογενική. Ο ρυθμός ψύξης κατά την κατεργασία αυτή ήταν 0.5°C/min για λόγους προστασίας έναντι θερμικού σοκ. Για κάθε πείραμα μετρήθηκε η σκληρότητα κατά Rockwell, συγκεκριμένα έγιναν τρεις μετρήσεις από τις οποίες υπολογίζεται ο μέσος όρος. Η δυσθραυστότητα των δοκιμίων προσδιορίστηκε από δοκιμή Charpy, όπως ορίζει το πρότυπο ASTM-A370. Η ενέργεια κρούσης (**Πίνακας 12**) παρουσιάζει μικρή αύξηση για την περίπτωση ήπιας κρυογενικής κατεργασίας, ενώ μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται κατά τη βαθιά κρυογενική κατεργασία ιδιαίτερα στην περίπτωση που ακολουθεί μετά από αυτήν επαναφορά.

Πίνακας 12: Ενέργεια κρούσης και σκληρότητα των δοκιμών

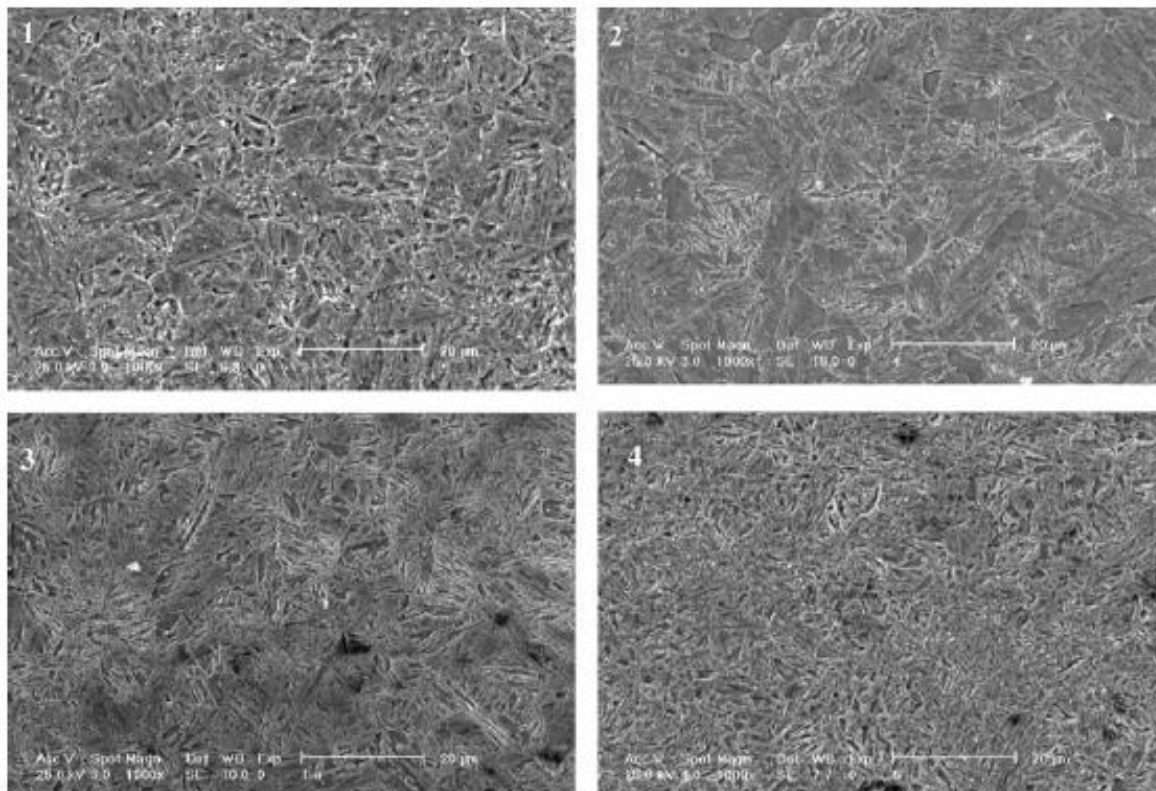
Κατεργασία	E(J)	Σκληρότητα (HRC)	Υπολειπόμενος ωστενίτης
1) Q+T	15.4	49	8.1
2) Q+T+SCT	16.1	51	7.4
3) Q+T+DCT	17.3	55	4.5
4) Q+T+DCT+T	18.2	59	3.8

Τα δοκίμια εξετάστηκαν σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM για τη μελέτη της μικροδομής και πραγματοποιήθηκε δοκιμή τριβής εντός θαλάμου με άμμο πυριτίου. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε, πως μετά τη συμβατική κατεργασία υπάρχει υπολειπόμενος ωστενίτης, μαρτενσίτης τύπου βελόνας και καρβίδια (**Εικόνα 48**). Είναι γνωστό πως, η παρουσία του ωστενίτη επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες του χάλυβα όπως τη διαστατική ακρίβεια που είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις μήτρες και τα κοπτικά εργαλεία. Ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετατρέπεται σε όλο και περισσότερο μαρτενσίτη όσο μειώνεται η θερμοκρασία κατά τη κρυογενική θερμοκρασία. Πέρα από το μετασχηματισμό του ωστενίτη, οι πλάκες του μαρτενσίτη είναι πιο συμπαγείς και πιο ομοιόμορφα κατανομημένες (**Εικόνα 49**). Η αύξηση ενέργειας που απαιτείται για να σπάσει το δοκίμιο κατά τη

δοκιμή Charpy στις περιπτώσεις της κρυογενικής οφείλεται στην βελτίωση της αντοχής σε φθορά του χάλυβα. Μετρήθηκε επίσης, το ποσοστό των καρβιδίων με το μικροσκόπιο SEM και παρατηρήθηκε μικρή αύξηση από 5.8% σε 6.9% για τη συμβατική κατεργασία και το 4^ο πείραμα αντίστοιχα. Από τη σκληρομέτρηση προκύπτει πως η κρυογενική κατεργασία επιδρά θετικά στην σκληρότητα του εργαλειοχάλυβα, ειδικά όταν γίνεται βαθιά κρυογενική κατεργασία.



Εικόνα 48: Απεικόνιση δοκιμίου συμβατικής κατεργασίας



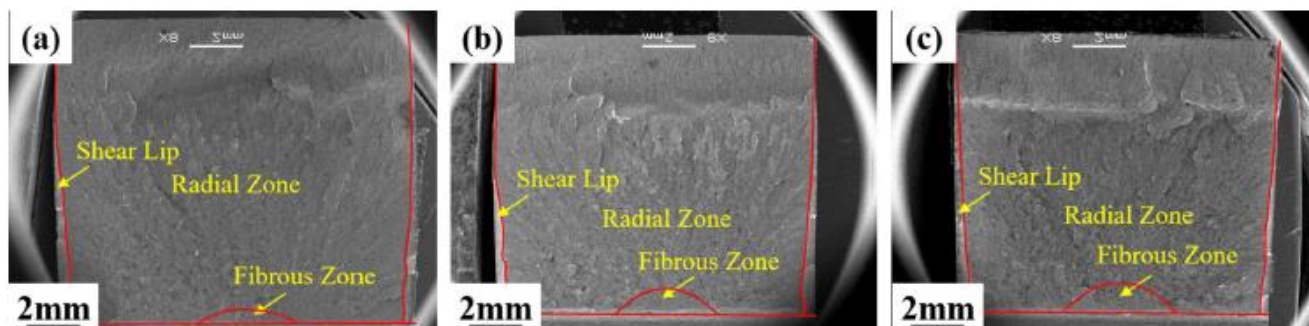
Εικόνα 49: SEM εικόνα της μικροδομής των δοκιμίων 1-4

Μέχρι τώρα έχουν παρουσιαστεί έρευνες που ασχολούνται με τις ιδιότητες του χάλυβα H13 μετά από συμβατική κατεργασία. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί η κρυογενική κατεργασία είναι μια πρόσθετη κατεργασία στον κύκλο κατεργασιών, οπότε το ίδιο κρίσιμη είναι η επιλογή των παραγόντων των υπόλοιπων κατεργασιών και κυρίως της ωστενιτοποίησης και της επαναφοράς. Με την επίδραση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης και επαναφοράς ασχολείται η έρευνα του Wang [42] πάνω στον χάλυβα H13. Οι θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης που μελετήθηκαν είναι 1020°C, 1040°C και 1060°C για 30min με επακόλουθη βαφή σε λάδι. Ενώ, μετά τη βαφή γίνεται επαναφορά 2 ωρών στους 570°C, 590°C και 610°C και ψύξη σε αέρα. Μετά τη βαφή και την επαναφορά γίνεται εξέταση της μικροδομής του χάλυβα με οπτικό μικροσκόπιο και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM), γίνεται δοκιμή Charpy V-notch και μετριέται η σκληρότητα Rockwell. Παρατηρείται πως, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης μειώνεται το πλάτος των βελόνων μαρτενσίτη (martensite laths), αλλά κατά την επαναφορά το πλάτος ως ένα βαθμό επανέρχεται. Επίσης, κατά την ωστενιτοποίηση το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη αυξάνεται και συνεχίζει να αυξάνεται όσο εφαρμόζεται υψηλότερη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Η σκληρότητα και η ενέργεια θραύσης των δοκιμών μετά από ωστενιτοποίηση βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13: Μηχανικές ιδιότητες μετά από τη βαφή και επαναφορά, για διάφορες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης

Θ _{ωστενιτοποίησης} (°C)	Σκληρότητα (HRC)	Ενέργεια (J)
1020	51,8	28
1040	53,4	22
1060	52,4	14,3

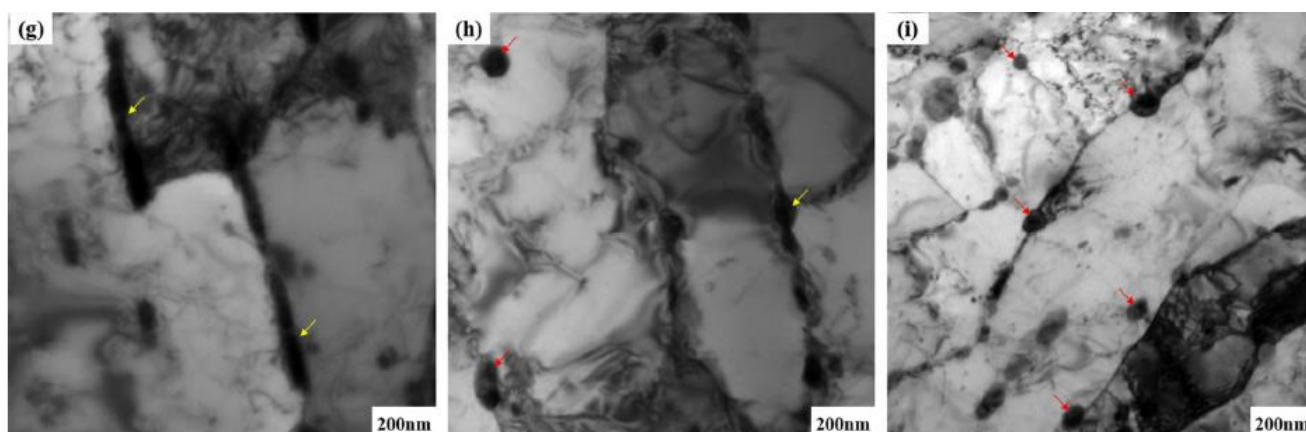
Από τον Πίνακα 13 φαίνεται, πως με την αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης αυξάνεται η σκληρότητα με τη μέγιστη να εμφανίζεται στους 1040°C. Το αντίθετο, συμβαίνει για τη δυσθραυστότητα, που μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη που αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Από μακροσκοπική ανάλυση της επιφάνειας θραύσης (Εικόνα 50) συναντώνται τα τυπικά χαρακτηριστικά ψαθυρής θραύσης, όπως ανεπτυγμένα χείλη διάτμησης, περιοχή ασταθούς θραύσης και ινώδης περιοχή. Η περιοχή ασταθούς θραύσης είναι μεγαλύτερη για θερμοκρασία 1020°C και μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, όπως είναι αναμενόμενο με βάση τις ενέργειες θραύσης που προέκυψαν. Ακόμα, αυξάνεται η ινώδης περιοχή με την αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης.



Εικόνα 50: Επιφάνειες θραύσης του H13 μετά από βαφή και επαναφορά με θερμοκρασία ωστενιτοποίησης: a)1020°C, b)1040°C, c) 1060°C

Εξετάζοντας τη μικροδομή του χάλυβα για διάφορες θερμοκρασίες επαναφοράς, φαίνεται πως η κατακρήμνιση των καρβιδίων συμβαίνει κατά μήκος των βελόνων μαρτενσίτη κυρίως μετά την

επαναφορά στους 570°C. Τα καρβίδια έχουν μορφή κλωστής με μήκος περίπου 400nm και πάχος 50nm (Cr_7C_3) και καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς η μορφή τους αλλάζει από λεπτή γραμμή σε πιο στρογγυλό κοκκώδες σχήμα με διάμετρο 100-150nm ($Cr_{23}C_6$), τα παραπάνω φαίνονται στην **Εικόνα 49** με κίτρινα και κόκκινα βέλη αντίστοιχα. Όταν, η θερμοκρασία επαναφοράς φτάσει τους 610°C τα καρβίδια διασπώνται στη μήτρα. Η νέα δομή έχει μικρότερη σκληρότητα, αλλά βελτιωμένη δυσθραυστότητα. Τα καρβίδια που υπάρχουν στον H13 μετά την επαναφορά είναι πλούσια σε χρώμιο περιλαμβάνοντας τα $M_{23}C_6(Cr_{23}C_6)$, $M_7C_3(Cr_7C_3)$ και MC(VC). Με την αύξηση της θερμοκρασίας επαναφοράς μειώνεται το πλήθος των VC, ενώ αυξάνεται το πλήθος των $Cr_{23}C_6$.



Εικόνα 51: SEM φωτογραφία της μικροδομής του χάλυβα για επαναφορά στους 570°C, 590°C και 610°C αντίστοιχα

Οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται αρκετά και από τη θερμοκρασία επαναφοράς. Σύμφωνα με τον Wang η σκληρότητα στους 610°C είναι κατά 6% μικρότερη από τη σκληρότητα στους 590°C, κάτι που συμβαίνει επειδή όταν αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς αυξάνεται η περιεκτικότητα των $Cr_{23}C_6$, τα οποία έχουν μεγαλύτερη τραχύτητα και μειώνουν τη σκληρότητα. Από την άλλη, η δυσθραυστότητα βελτιώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας επαναφοράς, λόγω της μείωσης της πυκνότητας διαταραχών. Έτσι η μέγιστη ενέργεια θραύσης παρατηρείται για θερμοκρασία επαναφοράς στους 610°C και η ελάχιστη για θερμοκρασία 570°C. Στον παρακάτω **Πίνακα 14** φαίνονται τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών.

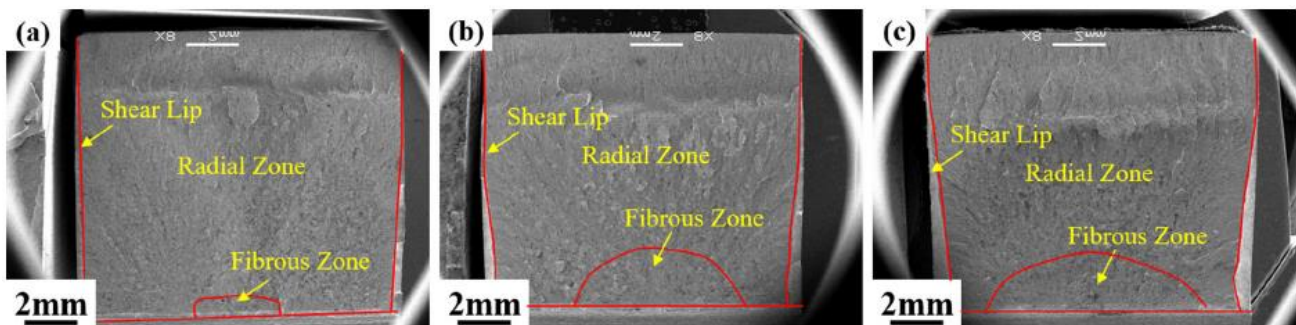
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών για διάφορες θερμοκρασίες επαναφορών

Θ επαναφοράς (°C)	Σκληρότητα (HRC)	Ενέργεια (J)
570	57	17
590	53,2	22
610	49	28

Στην **Εικόνα 52** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες της επιφάνειας θραύσης των δοκιμίων μετά από τη δοκιμή Charpy. Όπως φαίνεται από τις κόκκινες γραμμές, όταν η θερμοκρασία επαναφοράς είναι 570°C, η περιοχή ασταθούς θραύσης είναι μέγιστη, ενώ η ινώδης περιοχή είναι η μικρότερη από τις τρεις περιπτώσεις, υποδεικνύοντας ψαθυρή θραύση. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, μεγαλώνουν τα χείλη διάτμησης (shear lips) και κατ' επέκταση μειώνεται η περιοχή ασταθούς θραύσης και αυξάνεται η ινώδης περιοχή, δηλαδή η θραύση σταδιακά γίνεται από ψαθυρή πιο όλκιμη. Η αύξηση της δυσθραυστότητας σχετίζεται με την αλλαγή της μορφής των καρβιδίων σε πιο στρογγυλό σχήμα, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς. Ταυτόχρονα, τα καρβίδια είναι τυχαία διασκορπισμένα

σε σχέση με τη χαμηλότερη θερμοκρασία επαναφοράς, όπου τα καρβίδια βρίσκονται κατά μήκος των βελόνων μαρτενσίτη. Επίσης, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται το μέγεθος των καρβιδίων με αποτέλεσμα την χαλάρωση των τάσεων και λόγω της μη συνεχούς κατανομής των καρβιδίων αυξάνεται η ενέργεια διάδοσης ρωγμών.

Συνοψίζοντας, θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στους 1040°C προσδίδει στο χάλυβα γενικά καλές ιδιότητες, ενώ η θερμοκρασία επαναφοράς όσο αυξάνεται κάνει το υλικό λιγότερο σκληρό, αλλά αυξάνεται η αντοχή σε θραύση. Σύμφωνα με την έρευνα, συνήθως, η θερμοκρασία επαναφοράς κυμαίνεται μεταξύ 570-650°C [42].



Εικόνα 52: Επιφάνειες θραύσης μετά από βαφή και επαναφορά στους: a) 570oC, b) 590oC, c) 610oC

Με τα στοιχεία που προκύπτουν από τις παραπάνω μελέτες μπορεί να οργανωθεί μία βέλτιστη διαδικασία θερμικής κατεργασίας που να συνδυάζει βαφή, κρυογενική κατεργασία και επαναφορά για την επίτευξη επιθυμητών ιδιοτήτων αντοχής σε θραύση και σκληρότητας. Η πρώτη παρατήρηση έχει να κάνει με την ανάγκη ύπαρξης τουλάχιστον μίας επαναφοράς μετά την κρυογενική κατεργασία. Με βάση την ενέργεια κρούσης, όπως υπολογίζεται από τη δοκιμή Charpy, αποδεικνύεται πως είναι ωφέλιμη η επαναφορά κάτι που φαίνεται στις έρευνες του Bhavar και του Koneshlou. Από την άλλη κάτι τέτοιο δεν ισχύει στις έρευνες του Mollinari, όπου δεν υπάρχει σοβαρή επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας στην ενέργεια κρούσης. Είναι σημαντικό να βρεθούν οι κατάλληλοι παράγοντες του θερμικού κύκλου που προσδίδει στο υλικό τις επιθυμητές ιδιότητες, ιδιαίτερα σκληρότητας και δυσθραυστότητας για κάθε περίπτωση. Σύμφωνα με τις έρευνες φαίνεται πως η κρυογενική κατεργασία έχει καλύτερα αποτελέσματα όταν γίνεται πριν την επαναφορά στους -196°C και για χρόνο παραμονής έως 32 ώρες. Ωστόσο, τόσο ο αριθμός όσο και η θερμοκρασία της εκάστοτε επαναφοράς επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού μετά από τη κρυογενική θερμοκρασία ή τη συμβατική κατεργασία. Μία τέτοια πειραματική μελέτη θα γίνει στο πειραματικό μέρος που ακολουθεί.

2: Πειραματικό μέρος

2.1: Εισαγωγή

Στο θεωρητικό μέρος αναπτύχθηκαν οι κατηγορίες χαλύβων και οι θερμικές κατεργασίες που γίνονται σε αυτούς για να μεταβάλλουν τις ιδιότητές τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις, με έμφαση στη κρυογενική κατεργασία. Ακόμα, παρουσιάστηκαν οι μηχανισμοί που σύμφωνα με έρευνες φαίνεται πως επιδρούν στη βελτίωση των ιδιοτήτων του χάλυβα μετά από κρυογενική κατεργασία και οι μηχανικές δοκιμές που γίνονται για να συγκριθούν οι αλλαγές στις ιδιότητες των κραμάτων. Το δεύτερο μέρος της εργασίας ασχολείται με την προετοιμασία, τη θερμική κατεργασία και διενέργεια μηχανικών δοκιμών και μετρήσεων με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία και τις βασικές αρχές που ακολουθεί η κρυογενική κατεργασία εργαλειοχάλυβα H13. Βασικό στοιχείο της μελέτης αυτής είναι η επίδραση της κρυογενικής κατεργασίας και των επαναφορών στη δυσθραυστότητα και τη σκληρότητα του χάλυβα. Τα δοκίμια, αφού πρώτα κατεργαστούν μηχανικά για να αποκτήσουν κατάλληλες διαστάσεις, θα κατεργαστούν θερμικά και ακολούθως θα γίνουν δοκιμές για την εξακρίβωση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων του εργαλειοχάλυβα H13. Όσον αφορά τις θερμικές κατεργασίες, η ακολουθία θερμικών κατεργασιών που εξετάζεται προκύπτει από τη βιβλιογραφία με σκοπό την επιλογή κύκλου με βάση προηγούμενες έρευνες. Η βασική ακολουθία κατεργασιών είναι ίδια για την περίπτωση της κρυογενικής και συμβατικής κατεργασίας απλά στη δεύτερη δεν περιλαμβάνεται το στάδιο της κρυογενικής κατεργασίας και αλλάζουν ορισμένες παράμετροι της κατεργασίας. Η κρυογενική ακολουθία παρατίθεται παρακάτω:

- Ωστενιτοποίηση
- Βαφή
- Ενδιάμεση επαναφορά (snap tempering)
- Κρυογενική κατεργασία
- 3 Επαναφορές

Οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων θα εξεταστούν με σκληρομετρήσεις και δοκιμή δυσθραυστότητας Charpy-V notch. Στα κεφάλαια που έπονται παρουσιάζονται οι κατεργασίες των δοκιμίων, οι ακολουθίες των θερμικών κατεργασιών, η διενέργεια των δοκιμών, τα αποτελέσματα αυτών και η σύγκριση-παρατηρήσεις των αποτελεσμάτων. Για τα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν 21 δοκίμια χωρισμένα σε 3 ομάδες των 7 δοκιμίων. Οι 2 κύκλοι περιλαμβάνουν συμβατική θερμική κατεργασία σκλήρυνσης και ένας βαθεία κρυογενική θερμική κατεργασία. Οι μετρήσεις σκληρότητας γίνονται μεταξύ των κατεργασιών για την εξέταση της μεταβολής της ως αποτέλεσμα της κάθε κατεργασίας, ενώ η δοκιμή Charpy-V που είναι καταστρεπτική δοκιμή πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση του εκάστοτε θερμικού κύκλου. Θα γίνουν δοκιμές για τρία σενάρια τα οποία για λόγους συντομίας θα αναφέρονται επιγραμματικά σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

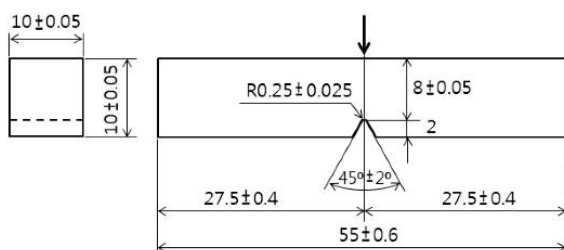
Πίνακας 15: Περιγραφή κύκλων κατεργασίας

Συντομογραφία	Θερμική κατεργασία
CH1 (Συμβατική κατεργασία 1)	Q+ST+TTT
CH2 (Συμβατική κατεργασία 2)	Q+ST+TTT
DCT (Κρυογενική κατεργασία)	Q+ST+DCT+TTT

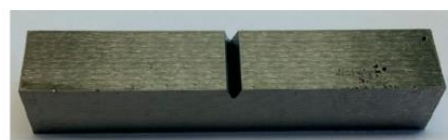
Όπου, Q: Ωστενιτοποίηση και βαφή, ST: Snap Tempering, TTT: Τριπλή επαναφορά και CT: Κρυογενική κατεργασία.

2.2: Προετοιμασία δοκιμίων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι ενέργειες που έγιναν από την παραλαβή του χάλυβα μέχρι το δοκίμιο να λάβει την τελική του μορφή σύμφωνα με τις επιθυμητές διαστάσεις μέσω κατεργασιών διαμόρφωσης. Ο χάλυβας παραλήφθηκε σε κυλινδρική μορφή ακτίνας περίπου 10mm και ύψους 140mm, έχοντας υποστεί πριν την παράδοση κατεργασία ανόπτησης. Τα δοκίμια πρέπει να ικανοποιούν τις προδιαγραφές δοκιμής δυσθραυστότητας Charpy, που ορίζει το πρότυπο ASTM E-23, οι οποίες φαίνονται στην **Εικόνα 53**. Καθώς αυτή είναι μία καταστρεπτική δοκιμή και η δοκιμή σκληρομέτρησης δεν έχει ιδιαίτερες διαστασιακές απαιτήσεις, όλα τα δοκίμια θα ακολουθούν τη μορφή δοκιμίου για δοκιμή Charpy-V. Οι διαστασιακές ανοχές για τη δοκιμή Charpy-V είναι αρκετά αυστηρές και απαιτούν υψηλή ακρίβεια κατά την κατεργασία, διότι απόκλιση από τις διαστάσεις επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της δοκιμής και ιδιαίτερα οι ανοχές που σχετίζονται με την εγκοπή V.



(a) Geometry of Charpy specimen



(b) Charpy impact specimen

Εικόνα 53: Διαστάσεις δοκιμίου Charpy

Αρχικά, ο χαλύβδινος κύλινδρος κόπηκε σε εξωτερικό μηχανουργείο με κοπή ηλεκτροδιάβρωσης σε 13 ορθογωνικές πλάκες μήκους 125mm περίπου, πλάτους 55mm και πάχους 10.2mm. Στη συνέχεια, οι πλάκες υπέστησαν κατεργασίες αφαίρεσης υλικού για την κάθετη κοπή σε δοκίμια, τη χάραξη της εγκοπής και τελικώς το φινιρίσμα για τις διαστασιακές ανοχές. Η διαφορετική αλληλουχία των ενεργειών προέκυψε λόγω διαθεσιμότητας των υλικών, οικονομικών πόρων ή μηχανημάτων και χρόνου.

Μετά την ηλεκτροδιάβρωση, στις πλάκες με αριθμό 2, 3, 7, 8, 9, η χάραξη της εγκοπής V, έγινε με φρεζάρισμα από ειδικό κοπτικό εργαλείο γωνίας 45° και βάθους 2mm στο κέντρο τους δηλαδή στα 27.5mm από τις άκρες (**Εικόνα 54**). Τα φρεζαρίσματα έγιναν σε φρέζα στο υπόγειο του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών (κτήριο Ξ) από τον υπεύθυνο του μηχανουργείου κ. Νίκο Μελισσά. Έπειτα, οι πλάκες κόπηκαν εγκάρσια σε σταθερό δισκοτόμο Struers Discotom-2 (**Εικόνα 55**) για να αποκτήσουν διατομή 10 x 10mm περίπου. Κάθε πλάκα μπορεί να κοπεί σε 12 περίπου δοκίμια, αλλά λόγω της ακρίβειας κοπής του δίσκου σε ευθεία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα κατευθείαν και χρειάζεται περαιτέρω κατεργασία αποβολής υλικού. Μετά την κοπή, γίνεται αποπεράτωση για την συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του προτύπου. Η αποπεράτωση στις πλάκες 2, 3, και 7 έγινε με τροχό χειρός με προσαρμοσμένο λειαντικό δίσκο P120 και ορισμένα δοκίμια από αυτές τις πλάκες χρησιμοποιήθηκαν στη συμβατική κατεργασία και την κρουγενική. Οι πλάκες 8 και 9 υπέστησαν λείανση φινιρίσματος σε μηχανήμα ρεκτιφιέ του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Α.Δ.Α. στις πλευρές που ήταν εκτός των ανοχών.

SHANGDING®

Carbide double
Angle milling cutter

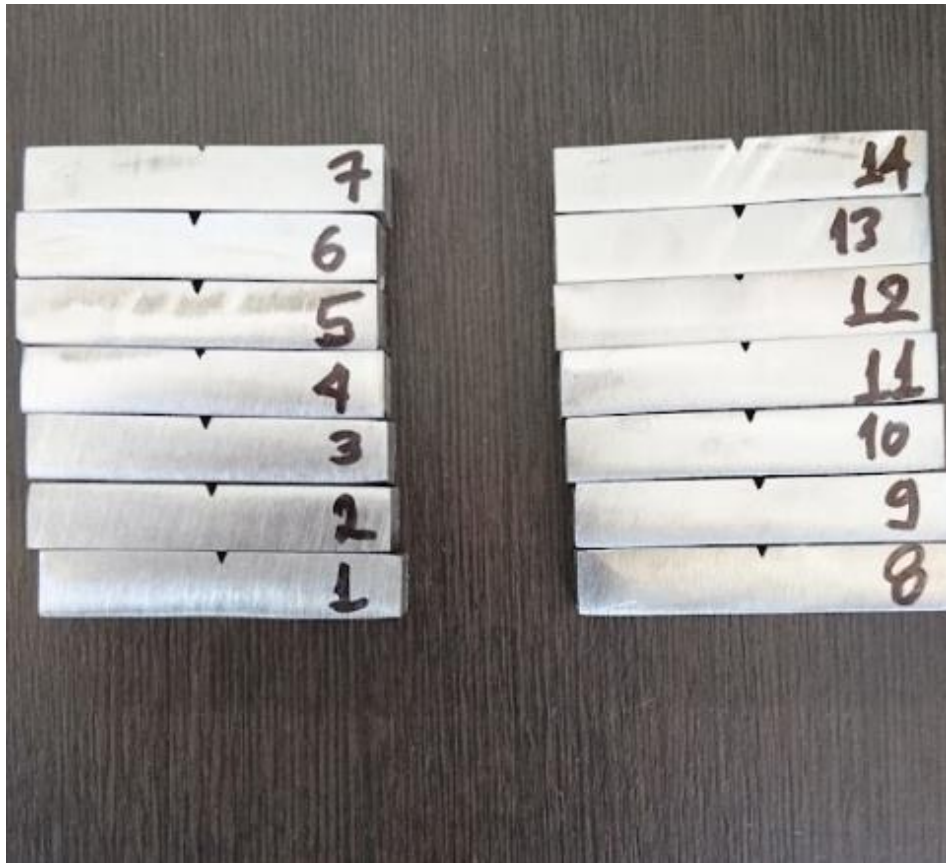


Εικόνα 54: Κοπτικό εργαλείο φρέζας όμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε

Οι πλάκες 4, 5, 6, 11, κόπηκαν πρώτα σε τετράγωνες ράβδους με τον δίσκο τύπου Discotom-2, στη συνέχεια κόπηκαν σε αυτές με οι εγχοπές V, με φρεζάρισμα και τέλος λειάνθηκαν με ρεκτιφιέ. Το πρότυπο ASTM-E23 αναφέρει, πως το φινίρισμα των εγχοπών για θερμικά κατεργασμένα δοκίμια πρέπει να γίνεται μετά την τελευταία θερμική κατεργασία. Επίσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω οι κρίσιμες διαστάσεις του δοκιμίου είναι αυτές της γωνίας και της ακτίνας καμπυλότητας στη βάση της εγχοπής [39], γι' αυτό τα δοκίμια χρειάστηκε να κατεργαστούν με εργαλείο τύπου Dremel με ειδική κεφαλή για την εγκοπή μετά την τελική θερμική κατεργασία επαναφοράς. Στα δοκίμια χαραχτήκαν αριθμοί στα άκρα κάθε πλάκας για να είναι δυνατή η ιχνηλασιμότητά τους και καταχωρήθηκαν σε πίνακες που έχουν καταγεγραμμένες πληροφορίες σχετικά με την αλληλουχία μηχανουργικών κατεργασιών που υπέστησαν, τις διαστάσεις τους πριν και μετά από τις κατεργασίες αυτές και την ομάδα που θα ανήκουν στα σενάρια των θερμικών κατεργασιών. Στην **Εικόνα 56** αποτυπώνονται οι ομάδες που κατεργάστηκαν με συμβατική κατεργασία (CH1) και αυτή που κατεργάστηκε με κρυογενική κατεργασία (DCT).



Εικόνα 55: Ο δισκοτόμος που χρησιμοποιήθηκε



Εικόνα 56: Τα δοκίμια 1-14 πριν την κατεργασία ωστενιτοποίησης

Η τρίτη ομάδα δοκιμίων (CH2) αποτελείται από ορισμένα δοκίμια των ομάδων 6, 5 και 4 που μετά τις κατεργασίες αποβολής υλικού βρίσκονται εντός των επιθυμητών ανοχών και θα κατεργαστούν με συμβατικό κύκλο αντίστοιχης διαδικασίας με αυτά της ομάδας 1, αλλά με βασική διαφορά στις θερμοκρασίες επαναφοράς. Για λόγους ιχνηλασιμότητας, στον **Πίνακα 16** παρουσιάζεται για κάθε σενάριο, η αρίθμηση και η αντιστοίχιση των δοκιμίων με την πλάκα προέλευσής τους.

Πίνακας 16: Στοιχεία δοκιμίων CH1, DCT και CH2

CH1		DCT		CH2	
Στοιχεία πλάκας	Αριθμός δοκιμίου	Στοιχεία πλάκας	Αριθμός δοκιμίου	Στοιχεία πλάκας	Αριθμός δοκιμίου
2-1	1	3-6	8	6-2	15
2-2	2	3-7	9	6-5	16
2-4	3	3-10	10	6-6	17
2-9	4	7-2	11	6-7	18
3-1	5	7-3	12	5-3	19
3-4	6	7-5	13	4-10	20
3-5	7	7-6	14	4-2	21

Εφόσον είναι σημαντικό τα δοκίμια να ικανοποιούν τις διαστασιακές ανοχές που θέτει το πρότυπο, σε πολλά στάδια κατά την προετοιμασία των δοκιμών χρειάζεται να μετρούνται οι διαστάσεις τους. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις αποτελείται από:

- ψηφιακό παχύμετρο Insize, για τη μέτρηση των πλευρών κατά την κοπή στον δισκοτόμο,
- φορητό στερεοσκόπιο Dino Lite Pro 2 της σειράς AM4000 (Εικόνα 57) που συνδέεται μέσω usb θύρας σε υπολογιστή και χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των πλευρών και κυρίως των χαρακτηριστικών της εγκοπής (γωνία, βάθος και ράδιο)
- αναλογικό μικρόμετρο της εταιρείας Standard Gage (Εικόνα 57) με ακρίβεια 0,001 mm προσαρμοσμένο σε σταθερή βάση για τη μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμών που μπορεί να χρειαστούν μηχανουργική κατεργασία αποπεράτωσης και για τον έλεγχο των ανοχών.



Εικόνα 57: Μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των διαστάσεων

Πίνακας 17: Παράμετροι θερμικών κατεργασιών

Κατεργασία	CH1	DCT	CHT2
Ωστενιτοποίηση (°C)	1040 (41min)	1040 (41min)	1040 (41min)
Snap-tempering (°C)	100 (1h)	100 (1h)	100 (1h)
Cryogenic (°C)	-	-196 (1h)	-
1η Επαναφορά (°C)	525 (2h)	515 (2h)	525 (2h)
2η Επαναφορά (°C)	565 (2h)	605 (2h)	620 (2h)
3η Επαναφορά (°C)	610 (2h)	620 (2h)	570 (2h)

Στον **Πίνακα 17** φαίνονται οι θερμοκρασίες και ο χρόνος παραμονής στους φούρνους για τα διάφορα σενάρια θερμικών κύκλων.

Ο σκοπός της συμβατικής κατεργασίας 1 (CH1) είναι η επίτευξη της μέγιστης δυνατής κατακρήμνισης καρβιδίων μέσω συμβατικού θερμικού κύκλου κατεργασίας. Οι δύο πρώτες επαναφορές γίνονται στην περιοχή της δευτερογενούς σκλήρυνσης, σύμφωνα με το διάγραμμα της **Εικόνας 36** [11], ενώ η 3^η επαναφορά γίνεται για τον έλεγχο σκληρότητας προκειμένου αυτή να μειωθεί στην επιθυμητή περιοχή των 48-50 HRC.

Όσον αφορά, την περίπτωση του θερμικού κύκλου που συνδυάζει κρυογενική κατεργασία (DCT) στους -196°C για 1h, η πρώτη επαναφορά γίνεται στους 515°C λίγο χαμηλότερα δηλαδή από τις συμβατικές κατεργασίες, γιατί σύμφωνα πάλι με την **Εικόνα 36** η δευτερογενής σκλήρυνση για τον κρυογενικά κατεργασμένο χάλυβα H13 συμβαίνει σε μικρότερη θερμοκρασία ως αποτέλεσμα της κρυογενικής. Οι υπόλοιπες δύο επαναφορές γίνονται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες για τη ρύθμιση της σκληρότητας στην περιοχή 48-51 HRC και τη χαλάρωση των τάσεων.

Από την άλλη ο δεύτερος συμβατικός κύκλος θερμικής κατεργασίας έχει σκοπό να αποκτήσει ο χάλυβας τη μέγιστη δυνατή δυθραυστότητά του σε σκληρότητα 41 HRC, για να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο αναφοράς. Οι δύο πρώτες επαναφορές γίνονται περίξ της θερμοκρασίας κατακρήμνιση των καρβιδίων, η 2^η γίνεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία μετά την περιοχή δευτερογενούς σκλήρυνσης, γίνεται για την μείωση της σκληρότητας και η 3^η για τη χαλάρωση των τάσεων.

2.3: Ωστενιτοποίηση

Το υλικό παραλήφθηκε σε ανοπτημένη κατάσταση από τον προμηθευτή. Η πρώτη κατεργασία που γίνεται και στις 3 ομάδες δοκιμίων είναι η ωστενιτοποίηση. Η κατεργασία αυτή έγινε ταυτόχρονα για τις ομάδες 1 και 2 (CH1 και DCT). Τα δοκίμια θερμαίνονται σε θερμοκρασία ωστενιτοποίησης στους 1040°C περίπου, σε φούρνο θερμικών κατεργασιών Thermawatt (**Εικόνα 58**) που βρίσκεται στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Η ρύθμιση της θερμοκρασίας και του ρυθμού θέρμανσης του φούρνου γίνεται με αυτοματισμό, ενώ υπάρχουν διακόπτες διακοπής λειτουργίας καθώς και θερμοστοιχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του φούρνου. Ο χρόνος παραμονής των δοκιμίων στο φούρνο είναι 41min και αυτό το χρονικό διάστημα είναι ικανό για να συμβούν τα παρακάτω:

1. Τα πρώτα 10 λεπτά το εσωτερικό του φούρνου θερμαίνεται έως ότου φτάσει στη ρυθμισμένη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, καθώς κατά το άνοιγμα της θύρας για την εισαγωγή των δοκιμίων η θερμοκρασία μειώνεται.
2. Τα επόμενα 12 λεπτά περίπου είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να αποκτήσουν θερμοκρασιακή ισορροπία τα δοκίμια, άρα να αποκτήσουν τόσο το κουτί όσο και τα δοκίμια τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, δηλαδή την επιθυμητή θερμοκρασία, σε όλη τους την επιφάνεια και το εσωτερικό για να ξεκινήσει η διαδικασία ωστενιτοποίησης
3. Κατά το υπόλοιπο διάστημα της ωστενιτοποίησης λαμβάνει χώρα ο μετασχηματισμός της κρυσταλλικής δομής, δηλαδή από φερρίτη σε ωστενίτη. Ο χρόνος αυτός είναι περίπου 20 λεπτά καθώς εκτεταμένη παραμονή στο φούρνο έχει αρνητικά αποτελέσματα στη μικροδομή και το υλικό.



Εικόνα 58: Φούρνος ωστενιτοποίησης

Η ωστενιτοποίηση της CH1 και DCT, δηλαδή των δοκιμίων 1 έως 14 έγινε ταυτόχρονα στο ίδιο κουτί. Ο φούρνος λειτουργεί με θερμοστάτη που κλείνει και ανοίγει κάθε φορά που πετυχαίνει τη θερμοκρασία ρύθμισης και όταν βρίσκεται αρκετά μακριά από αυτή αντίστοιχα. Δημιουργείται έτσι ένας κύκλος θέρμανσης (**Πίνακας 18**), όπου η θερμοκρασία του φούρνου από μία μέγιστη θερμοκρασία κοντά στην επιθυμητή πέφτει σε μία ελάχιστη, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του θερμοστάτη και κατ' επέκταση των αντιστάσεων του για την άνοδο της θερμοκρασίας στη μέγιστη

τιμή. Ο κύκλος αυτός μετρήθηκε για να είναι γνωστή η διακύμανση της θερμοκρασίας εντός του φούρνου για τη τιμή ρύθμισης. Παρατηρώντας πως, ο φούρνος για θερμοκρασία ρύθμισης 1030°C έχει διακύμανση από τη τιμή αυτή μέχρι 7 βαθμούς χαμηλότερα, ο φούρνος ρυθμίζεται η επιθυμητή τιμή στους 1040°C, δηλαδή 10 °C πάνω, με σκοπό η θερμοκρασία στο θάλαμο να είναι πάντοτε πάνω από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο κύκλος φούρνου για τη τιμή των 1040°C και οι θερμοκρασίες αυτές είναι η ελάχιστη και μέγιστη κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης. Φαίνεται πως η θερμοκρασία του φούρνου αυξομειώνεται μεταξύ 1040°C και 1033°C, αυτός είναι και ο λόγος που ο φούρνος είναι ρυθμισμένος στους 1040°C και όχι στους 1030°C, καθώς τότε η θερμοκρασία θα ήταν προσεγγιστικά μεταξύ 1024 – 1030°C με αρνητικά αποτελέσματα ίσως για την εξέλιξη της ωστενιτοποίησης.

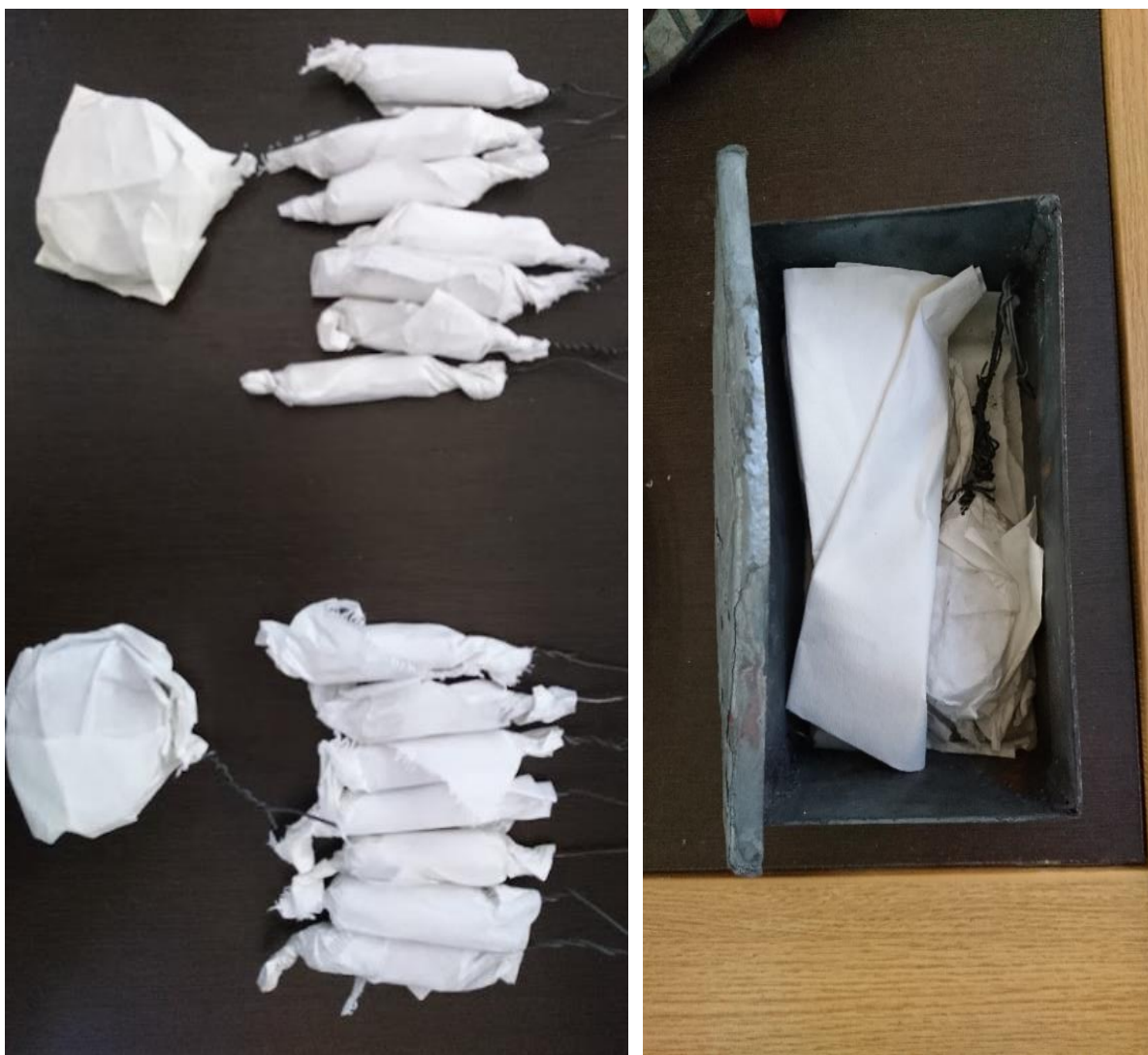
Πίνακας 18: Κύκλος φούρνου με $T_{set} = 1040\text{oC}$

Χρόνος (sec)	T(°C)	Θερμοστάτης
0	1040	OFF
30	1033	ON
50	1036	OFF
60	1040	OFF

Με το φούρνο έτοιμο σε κατάλληλη θερμοκρασία ακολουθεί η προετοιμασία των δοκιμίων για τη θερμική κατεργασία. Αρχικά, τα δοκίμια περιτυλίγονται και συγκρατούνται στιβαρά με σύρμα σε 2 ομάδες και καλύπτονται με διηθητικό χαρτί (**Εικόνα 59**). Τα δοκίμια τοποθετούνται σε μεταλλικό κουτί και τοποθετούνται στο φούρνο για να ξεκινήσει η ωστενιτοποίηση. Τα δοκίμια παραμένουν στο φούρνο περίπου για 43 λεπτά για να ολοκληρωθεί η ωστενιτοποίηση και στο χρόνο αυτό συμβαίνουν τα φαινόμενα που αναφέρονται στον παρακάτω **Πίνακα 19**.

Πίνακας 19: Χρόνοι ωστενιτοποίησης

Χρονική στιγμή (min:sec)	T(°C)	Περιγραφή
0	1040	εισαγωγή κουτιού
10'15"	1040	η θερμοκρασία φτάνει την επιθυμητή μετά από την πτώση
23'15"	1040	τα δοκίμια αποκτούν παντού την ίδια θερμοκρασία
43'15"	1040	πέρας ωστενιτοποίησης



Εικόνα 59: Δοκίμια τυλιγμένα με διηθητικό χαρτί και στο κουτί πριν την είσοδο στο φούρνο

Η κατεργασία της ωστενιτοποίησης της 2^{ης} ομάδας συμβατικής κατεργασίας (CH2) πραγματοποιήθηκε, όπως και οι προηγούμενες κατεργασίες στον ίδιο φούρνο Thermawatt που βρίσκεται στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών (κτήριο Ξ), αλλά σε διαφορετική ημέρα. Γι' αυτό λαμβάνεται νέος κύκλος φούρνου και μετριούνται ξανά τους παράγοντες της κατεργασίας, διότι ενδέχεται να υπάρχει διαφοροποίηση σε σχέση με τις δύο πρώτες περιπτώσεις για διάφορους λόγους. Έτσι ο νέος κύκλος φούρνου με θερμοκρασία ρύθμισης 1040°C φαίνεται στον **Πίνακα 20**, και την **Εικόνα 60**. Για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας εντός του φούρνου, η θερμοκρασία ρύθμισης ορίστηκε 1005°C με πραγματική θερμοκρασία θαλάμου 1041°C και έγινε η εισαγωγή των δοκιμίων στο θάλαμο **Εικόνα 61**. Τα δοκίμια πριν την εισαγωγή τους δέθηκαν κατάλληλα με σύρμα και τοποθετήθηκαν εντός μεταλλικού κουτιού, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 61**. Η διάρκεια της θέρμανσης ήταν 36min 46sec κατά την οποία η ρύθμιση της θερμοκρασίας κυμάνθηκε από 998-1005°C και η πραγματική θερμοκρασία εντός του θαλάμου από 1030-1044°C.

Πίνακας 20: Κύκλος φούρνου με Τροθμ=1040οC

Χρόνος (sec)	T(οC)	Θερμοστάτης
0	1038	OFF
12	1032	ON
26	1037	OFF
33	1040	OFF



Εικόνα 60: Θερμοστοιχείο μέτρησης



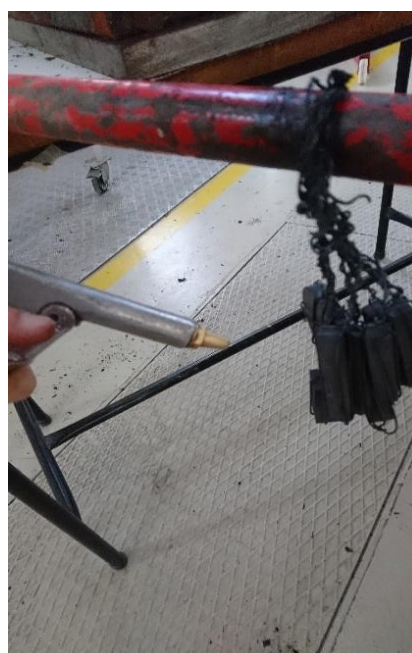
Εικόνα 61: Τα δοκίμια 15-21 τυλιγμένα με διηθητικό χαρτί στο κουτί που θα εισέλθει στο θάλαμο ωστενιτοποίησης

2.4: Βαφή

Όταν ολοκληρώθηκε η ωστενιτοποίηση, τα δοκίμια εξήχθησαν προσεκτικά από τον φούρνο χρησιμοποιώντας κατάλληλα γάντια και εργαλεία. Στη συνέχεια, κρέμονται σε ράβδο για να ξεκινήσει η βαφή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η βαφή είναι μια διαδικασία ταχείας απόψυξης που ακολουθεί μία κατεργασία θέρμανσης με σκοπό το μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη που παρουσιάζει μεγαλύτερη σκληρότητα, αλλά είναι πιο εύθραυστος. Το μέσο βαφής για τους εργαλειοχάλυβες προτιμάται να είναι αέρας αντί για νερό προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ανεπιθύμητων καταστάσεων, όπως παραμόρφωση λόγω υψηλής διαφοράς θερμοκρασίας στο εσωτερικό και εξωτερικό του τεμαχίου. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται πεπιεσμένος αέρας με παροχή από αεροσυμπιεστή που βρίσκεται πλησίον του φούρνου ωστενιτοποίησης. Από τη στιγμή που θα κρεμαστούν τα δοκίμια φυσούνται με αέρα σε όλη την επιφάνειά τους μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (**Εικόνα 62** και **63**). Το διάστημα αυτό μετρήθηκε περίπου 22min για όλες τις ομάδες δοκιμίων, ενώ ο χρόνος μέχρι να φτάσουν σε θερμοκρασία 60-70°C ήταν περίπου 6min. Η βαφή των CH1 και DCT, δηλαδή των δοκιμίων 1-14 έγινε ταυτόχρονα, όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες, ενώ για τα δοκίμια 15-21 έγινε ξεχωριστά.



Εικόνα 62: Δοκίμια 1-14 πριν και μετά την βαφή αντίστοιχα.



Εικόνα 63: Δοκίμια 15-21 κατά τη βαφή

2.5: Ενδιάμεση επαναφορά (*snap tempering*)

Αφού ολοκληρωθεί η βαφή, γίνεται προληπτικά μία σύντομη επαναφορά σε χαμηλή σχετικά θερμοκρασία με σκοπό την απόταση του μαρτενσίτη, τη σταθεροποίηση του ωστενίτη, ειδικά για την περίπτωση που καθυστερήσει να επακολουθήσει το επόμενο στάδιο του θερμικού κύκλου (είτε κρυογενική κατεργασία, είτε επαναφορά). Η επαναφορά αυτή που ονομάζεται *snap tempering*, όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος και γίνεται στους 100°C για 60min. Η στιγμιαία επαναφορά λόγω των χαμηλών θερμοκρασιακών απαιτήσεων έγινε εντός διαφορετικού φούρνου που έχει τοποθετηθεί κοντά στον κλίβανο ωστενιτοποίησης. Ο φούρνος είχε προθερμαθεί κατά τη διάρκεια της ωστενιτοποίησης και της βαφής και η θερμοκρασία του έχει μετρηθεί με θερμοστοιχείο, ώστε εντός του φούρνου η θερμοκρασία να είναι περίπου 100°C. Τα δοκίμια τοποθετούνται χωρίς κάποια ιδιαίτερη παρέμβαση στο φούρνο και μετά το πέρας της μιας ώρας εξάγονται από το φούρνο και αφήνονται μέχρι να αποψυχθούν σε θερμοκρασία δωματίου. Τα δοκίμια 1-14 τοποθετήθηκαν μαζί στον φούρνο, ενώ τα δοκίμια 15-21 σε δεύτερο χρόνο.

2.6: Κρυογενική κατεργασία

Στη συνέχεια, για τη μία ομάδα ακολουθεί βαθιά κρυογενική κατεργασία (DCT) που έγινε στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (κτήριο Λ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Η κατεργασία έγινε σε κρυογενικό θάλαμο με μέσο ψύξης υγρό άζωτο σε θερμοκρασία -196°C. Το άζωτο μεταφέρεται σε μικρή δεξαμενή χωρητικότητας 160L (**Εικόνα 64**), που γεμίζεται από την μεγάλη δεξαμενή τοποθετημένη εξωτερικά του κτηρίου και χωρητικότητας περίπου 1200L. Η διαδικασία αυτή διαρκεί περίπου μιάμιση ώρα, καθώς πρώτα πρέπει να μεταγγιστεί μικρή ποσότητα αζώτου με σκοπό η δεξαμενή να αποκτήσει κατάλληλη θερμοκρασία με αργό ρυθμό για την αποφυγή θερμικού σοκ και αργότερα να γίνει η προσθήκη του υγρού αζώτου με υψηλότερο ρυθμό. Το γέμισμα της δεξαμενής λόγω των κινδύνων που μπορεί να παρουσιαστούν πραγματοποιήθηκε από τον καθηγητή κ. Μάριο Αναγνωστάκη. Αφού ολοκληρωθεί το γέμισμα, η δεξαμενή που περιέχει το άζωτο υπό πίεση για την κατεργασία, μεταφέρεται στο χώρο που βρίσκεται ο θάλαμος κρυογενικής και συνδέεται με αυτόν (**Εικόνα 64**). Η κρυογενική θερμοκρασία επιλέγεται -196°C, διότι από παρόμοιες μελέτες φαίνεται πως προσδίδει στο υλικό τις καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με κατεργασία στους -80°C και γιατί το σημείο βρασμού του αζώτου είναι σε αυτή τη θερμοκρασία, οπότε στο θάλαμο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση με αποτέλεσμα η μεταβολή της θερμοκρασίας να είναι πιο ομοιόμορφη.



Εικόνα 64: Δεξαμενή αζώτου κατά το γέμισμα και μετά τη σύνδεση με τον κρυογενικό θάλαμο

Έχει αναφερθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο της κρυογενικής κατεργασίας του θεωρητικού μέρους, πως οι παράγοντες κατεργασίας είναι η θερμοκρασία παραμονής, ο χρόνος παραμονής και ο ρυθμός απόψυξης. Στον ηλεκτρονικό πίνακα του θαλάμου επιλέγονται οι παράμετροι της κατεργασίας, δηλαδή η επιθυμητή θερμοκρασία και ο ρυθμός μείωσής της. Έτσι, ορίζονται η θερμοκρασία εντός του θαλάμου στους -196°C , ο ρυθμός απόψυξης $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ και ο χρόνος παραμονής είναι 1 ώρα. Εφόσον έχουν καθοριστεί οι παράγοντες στον πίνακα ελέγχου του θαλάμου η κατεργασία μπορεί να ξεκινήσει με την τοποθέτηση των δοκιμίων.

Τα δοκίμια που θα υποστούν κρυογενική κατεργασία είναι τα 8-14 και πριν εισέλθουν στο θάλαμο δένονται με παρόμοιο τρόπο όπως κατά την ωστενιτοποίηση, γιατί δεν υπάρχει κίνδυνος οξειδωσης. Κατόπιν, τοποθετούνται τα δοκίμια, ασφαρίζεται ο θάλαμος και κλείνουν οι ασφαλιστικές βαλβίδες για να ξεκινήσει η πλήρωση του θαλάμου με υγρό άζωτο. Μετά το πέρας της κατεργασίας τα δοκίμια κρεμιούνται και αφήνονται να επανέλθουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

2.7: Κατεργασίες επαναφορών

Αφού τελειώσει η κρυογενική κατεργασία και τα δοκίμια επανέλθουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, θα υποστούν επαναφορές με σκοπό το μετασχηματισμό της δομής του μαρτενσίτη που εμφανίστηκε κατά τη βαφή σε μαρτενσίτη μετά από επαναφορά που παρουσιάζει αυξημένη δυσθραυστότητα, αλλά με ταυτόχρονη μείωση της σκληρότητας. Οι επαναφορές έγιναν σε φούρνους θερμικών κατεργασιών που βρίσκονται στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας & Τεχνολογίας Υλικών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Τα δοκίμια από τις συμβατικές κατεργασίες σκλήρυνσης θα συγκριθούν με αυτά της κρυογενικής κατεργασίας ως προς τις αλλαγές στη σκληρότητα, τη δυσθραυστότητα αλλά και τη μορφή της επιφάνειας θραύσης. Όλες οι ομάδες θα υποστούν τρεις επαναφορές, ωστόσο η θερμοκρασία επαναφοράς των κρυογενικών

δοκιμίων είναι μικρότερη από αυτή της επαναφοράς των συμβατικά κατεργασμένων, καθώς σύμφωνα με την βιβλιογραφία από άλλες μελέτες που έχουν γίνει στους εργαλειοχάλυβες [11] η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται η δευτερογενής σκλήρυνση είναι λίγο μικρότερη για κρυσταλλικά κατεργασμένους χάλυβες. Η αιτιολόγηση του φαινομένου αυτού, στηρίζεται στη μικρότερη αναγκαία ενέργεια πρόσληψης (μέσω θέρμανσης στην περίπτωση μας) που είναι αρκετή για τη δευτερογενή κατακρήμνιση καρβιδίων. Οι επαναφορές γίνονται σε λουτρό τηγμένου άλατος.

1^η Επαναφορά

Η θερμοκρασία 1^{ης} επαναφοράς ορίζεται στους 512°C για τον κρυσταλλικά κατεργασμένο χάλυβα (DCT) και στους 525°C για το συμβατικά κατεργασμένο (CH1) με βάση τη βιβλιογραφία, ενώ θεωρείται πως απόκλιση της θερμοκρασίας έως 5°C είναι αποδεκτή. Η διάρκεια παραμονής των δοκιμίων είναι 2 ώρες. Για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του άλατος γίνεται τακτικά μέτρηση της θερμοκρασίας του δοχείου και ανάλογα με την τιμή αυτή αυξομειώνεται η θερμοκρασία ρύθμισης του φούρνου. Επειδή, τόσο τα άλατα όσο και οι φούρνοι είναι διαφορετικοί, οι κύκλοι των φούρνων δεν είναι ίδιοι και η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό. Η επαναφορά των δοκιμίων 1 έως 14 μπορεί να γίνεται σε διαφορετικούς φούρνους, με διαφορετικά άλατα, αλλά γίνεται την ίδια χρονική στιγμή. Μετά το πέρας των δύο ωρών, τα δοκίμια αφέθηκαν να αποψυχθούν μόνα τους στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (**Εικόνα 65**).

Η 1^η επαναφορά της τρίτης ομάδας δοκιμίων 15-21 (CH2) έγινε σε διαφορετική ημέρα από τις άλλες και με διαφορετική ρύθμιση του φούρνου. Πιο συγκεκριμένα, το άλας με θερμοκρασία 610°C τοποθετήθηκε εντός φούρνου με αρχική ρύθμιση 510°C και η πραγματική θερμοκρασία άλατος μετά από κάποιο διάστημα μετρήθηκε 484°C, δηλαδή αρκετά μικρότερη από την επιθυμητή που είναι 525°C. Για αυτό ρυθμίζεται εκ νέου στους 515°C με πραγματική 492°C και μετά στους 530°C με θερμοκρασία άλατος στους 541°C, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερη από την επιθυμητή για αυτό ρυθμίστηκε μια τελευταία φορά ο φούρνος στους 510°C. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με βύθιση του ηλεκτρονικού θερμοστοιχείου στο άλας με ανοιχτή την θύρα του φούρνου. Τα δοκίμια αφού ολοκληρωθούν οι κατεργασίες επαναφοράς αφήνονται να ψυχθούν ήρεμα στον αέρα μέχρι φτάσουν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει στο τέλος της εκάστοτε επαναφοράς για όλους τους κύκλους επαναφορών των 21 δοκιμίων.



Εικόνα 65: Δοκίμια 8-14 μετά την επαναφορά

2^η Επαναφορά

Σε αρκετούς χάλυβες αρκεί μία επαναφορά, ωστόσο δεύτερη αλλά και τρίτη επαναφορά γίνονται για την εξάλειψη του υπολειπόμενου ωστενίτη, ρύθμισης της σκληρότητας και χαλάρωσης των τάσεων. Όλες οι κατεργασίες επαναφορών έγιναν στους φούρνους στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, με την ίδια τεχνική δηλαδή παραμονή για δύο ώρες εντός του φούρνου σε λουτρό άλατος. Η δεύτερη επαναφορά των δοκιμίων 1-7 (CH1) έγινε με θερμοκρασία αλατιού στους 565°C και χρόνο παραμονής 2 ώρες.

Για τα κρυογενικά κατεργασμένα δοκίμια 8-14 η επιθυμητή θερμοκρασία άλατος είναι 600°C. Η θερμοκρασία άλατος ήταν στους 623°C για θερμοκρασία φούρνου στους 555°C, οπότε έγιναν διαδοχικές ρυθμίσεις της θερμοκρασίας και αντίστοιχες μετρήσεις της θερμοκρασίας του άλατος με το θερμοστοιχείο. Τελικά, η θερμοκρασία του άλατος μετρήθηκε στους 605°C με ρυθμισμένη θερμοκρασία στους 520°C και έγινε η εισαγωγή των δοκιμίων και παραμονή τους στο φούρνο για 2 ώρες.

Όσον αφορά τα δοκίμια της δεύτερης συμβατικής θερμικής κατεργασίας 15-21 (CH2), αυτή έγινε σε διαφορετικό χρόνο αλλά στους ίδιους φούρνους με θερμοκρασία επαναφοράς 620°C και χρόνο παραμονής 2 ώρες.

3^η Επαναφορά

Η τρίτη επαναφορά για τα σενάρια CH1 και DCT, όπως και παραπάνω έγινε στον ίδιο χρόνο, αλλά σε διαφορετικά άλατα και φούρνους. Η θερμοκρασία επαναφοράς των δοκιμίων συμβατικής κατεργασίας 1 (CH1) ήταν 610°C, ενώ των δοκιμίων κρυογενικής κατεργασίας (DCT) 620°C. Η τελευταία επαναφορά των δοκιμίων του δεύτερου σεναρίου συμβατικής κατεργασίας (CH2) που έγινε σε δεύτερο χρόνο ήταν με θερμοκρασία επαναφοράς στους 570°C. Ο χρόνος παραμονής όλων των δοκιμίων στους φούρνους ήταν 2h και μετά από την κατεργασία αφέθηκαν έως ότου φτάσουν στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

2.8: Μέτρηση σκληρότητας

Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι κύκλοι θερμικών κατεργασιών ξεκινά η προετοιμασία των δοκιμίων για τις μηχανικές δοκιμές. Πραγματοποιούνται δύο είδη δοκιμών σκληρομέτρηση τύπου Rockwell και δοκιμή δυσθραυστότητας τύπου Charpy-V, ενώ μετά τη θραύση των δοκιμίων ακολουθεί εξέταση της επιφάνειας θραύσης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρέχουν πληροφορίες για την επίδραση του κάθε κύκλου κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα H13.

Η σκληρομέτρηση κατά Rockwell τύπου C, σε αντίθεση με τη δοκιμή Charpy-V, γίνεται ενδιάμεσα από την ολοκλήρωση κάθε σταδίου επαναφοράς σε ένα δοκίμιο της κάθε ομάδας, καθώς δεν είναι καταστρεπτική και δίνει πληροφορίες για τη μεταβολή της σκληρότητας του χάλυβα κατά τη διάρκεια του κύκλου θερμικού κατεργασιών. Η σκληρομέτρηση κατά Rockwell τύπου C γίνεται σε αναλογική μηχανή δοκιμών της εταιρείας Innoatest της σειράς 600A (Εικόνα 66) που βρίσκεται στο εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών στο ΠΑ.Δ.Α. Η διαδικασία της σκληρομέτρησης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Πραγματοποιείται λείανση με λειαντικό τροχό της απαυθρακωμένης επιφάνειας που πρόκειται να μετρηθεί. Γίνεται χρήση τροχού χειρός και κατάλληλων λειαντικών φύλλων για την λείανση του επιφανειακού σε μικρό βάθος,
- Τοποθετείται το δοκίμιο πάνω στην ειδική βάση,
- Γυρνάει ο κοχλίας μέχρι να έρθει σε επαφή το άκρο του μετρητή με την επιφάνεια του δοκιμίου,
- Γυρνάει ο μοχλός πίεσης, ο οποίος ασκεί συγκεκριμένο φορτίο στο δοκίμιο δημιουργώντας έναν μικρό κρατήρα. Ο μοχλός αφήνεται στη θέση φόρτισης για μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η παραμόρφωση που δημιουργεί ο κρατήρας να είναι πλαστική και όχι ελαστική,
- Αφήνεται ο μοχλός, παύει να ασκείται πίεση στο δοκίμιο και η ένδειξη της βελόνας δίνει τη σκληρότητα του δοκιμίου.

Σκληρομετρήσεις στα δοκίμια γίνονται σε διάφορα σημεία στην επιφάνειά τους. Για την περίπτωση CH1 είναι το δοκίμιο 1, για τη περίπτωση DCT το δοκίμιο 12 και για τη περίπτωση CH2 ένα βοηθητικό πρόσθετο δοκίμιο. Για λόγους επαλήθευσης και ακρίβειας στα δοκίμια γίνονται κάθε φορά 5 σκληρομετρήσεις, ώστε να φανεί αν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των μετρήσεων στο ίδιο δοκίμιο.



Εικόνα 66: Μηχανή σκληρομέτρησης Rockwell

2.9: Δοκιμή δυσθραυστότητας

Η δοκιμή δυσθραυστότητας Charpy-V όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος, είναι μια καταστρεπτική δοκιμή κατά την οποία μία σφύρα σε διάταξη απλού εκκρεμούς χτυπά και σπάει το δοκίμιο μετρώντας το έργο που καταναλώθηκε. Από το μέγιστο ύψος που φτάνει η σφύρα αφού χτυπήσει το δοκίμιο και συνεχίσει την ταλάντωση, μπορεί να υπολογιστεί η ενέργεια που καταναλώθηκε κατά την θραύση. Η δοκιμή αυτή γίνεται σε όλα τα δοκίμια της κάθε ομάδας μια φορά μετά το πέρας των θερμικών κατεργασιών. Η δοκιμή έγινε σε μηχανήμα δοκιμών τύπου Charpy της εταιρείας Spectrum Labs στον Πειραιά με την βοήθεια του κ. Ιωάννη Ραχούτη και της κ. Μαριάννας Κουκούλη. Ο κατασκευαστής του μηχανήματος δοκιμών Charpy-V είναι η MWM Heckert (**Εικόνα 67**). Το όργανο βρίσκεται σε λειτουργία για αρκετά χρόνια, αλλά είναι διακριβωμένο και παρέχει ακριβή αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως είναι λογικό για την ηλικία του μηχανήματος η ένδειξη είναι αναλογική και προκύπτει από την κίνηση της βελόνας.



Εικόνα 67: Μηχανή δοκιμής Charpy



Εικόνα 68: Κλίμακα ένδειξης ενέργειας και δοκίμιο τοποθετημένο στη βάση της μηχανής

Το αποτέλεσμα της ενέργειας που δαπανήθηκε εμφανίζεται στην κλίμακα (Εικόνα 68) με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου, οπότε σε ορισμένες μετρήσεις χρειάζεται να γίνει στρογγυλοποίηση της

ένδειξης. Ακόμη, το αποτέλεσμα υπολογίζεται σε kilopond x meter (kpm) και για να μετατραπεί σε Joule πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την επιτάχυνση της βαρύτητας, δηλαδή με 9.80665 m/s². Η μάζα της σφύρας που προσπίπτει στο δοκίμιο είναι 18.75kg και η ροπή της είναι 30 kpm. Σε ορισμένες περιπτώσεις τέτοιων δοκιμών είναι χρήσιμο να ανεξαρτητοποιηθεί η τιμή της ενέργειας θραύσης από τις διαστάσεις του δοκιμίου για να είναι δυνατή η σύγκριση με δοκίμια που έχουν άλλες διαστάσεις ή αν οι διαστάσεις έχουν μικρή διαφορά από τις επιθυμητές. Έτσι, η ενέργεια διαιρείται με το εμβαδόν της ορθογωνικής διατομής θραύσης, δηλαδή την περιοχή από το κάτω μέρος του δοκιμίου έως και τη βάση της εγκοπής και προκύπτει η ενέργεια ανηγμένη ως προς τη διατομή σε J/mm².

Στην εισαγωγή του πειραματικού μέρους έχει αναφερθεί πως για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό τα χαρακτηριστικά της εγκοπής-V να βρίσκονται εντός ορίου ανοχών και πως το φινίρισμα της εγκοπής πρέπει να γίνει αφού ολοκληρωθούν οι θερμικές κατεργασίες. Οπότε, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν κατεργάζονται ελαφρώς με εργαλείο τύπου Dremmel με προσαρμοσμένη ειδική κεφαλή κατάλληλη για χάλυβα. Σκοπός είναι να εξαλειφθούν ατέλειες στην εγκοπή λόγω γρεζιών που έχουν μείνει και γενικότερα να γίνει καθαρισμός της εγκοπής. Επίσης, πρέπει το δοκίμιο να είναι σωστά τοποθετημένο πάνω στη βάση, έτσι ώστε η εγκοπή και η αιχμή της σφύρα να είναι ευθυγραμμισμένες. Κακή ευθυγράμμιση ενδέχεται να έχει αντίκτυπο στη τελική ενέργεια. Για αυτό τον λόγο έχει κατασκευαστεί από τους μηχανικούς ειδικός οδηγός που καθοδηγεί το δοκίμιο και βοηθά την τοποθέτησή της εγκοπής του δοκιμίου στην κατάλληλη θέση. Ακόμη, υπάρχει όργανο που ελέγχει τις διαστάσεις της εγκοπής του δοκιμίου, αν ικανοποιούν τις ανοχές του προτύπου, τα εξαρτήματα αυτά φαίνονται στην **Εικόνα 69**.



Εικόνα 69: Ο οδηγός της εγκοπής και το μετρητικό όργανο ποιοτικού ελέγχου

Η σειρά με την οποία έγιναν οι δοκιμές δυσθραυστότητας είναι:

- 1^η ομάδα Συμβατικής θερμικής κατεργασίας 2, δηλαδή δοκίμια 15-21
- 2^η ομάδα Κρυογενικής θερμικής κατεργασίας, δηλαδή δοκίμια 8-14

- 3^η ομάδα Συμβατικής θερμικής κατεργασίας 1, δηλαδή δοκίμια 1-7

Το πρώτο μέρος της δοκιμής έγινε για τα δοκίμια 15-21, δηλαδή του δεύτερου σεναρίου συμβατικού κύκλου θερμικής κατεργασίας. Στη συνέχεια έγινε δοκιμή των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων 8-14 και τέλος δοκιμή των δοκιμίων συμβατικού κύκλου θερμικής κατεργασίας 1 (CH1).

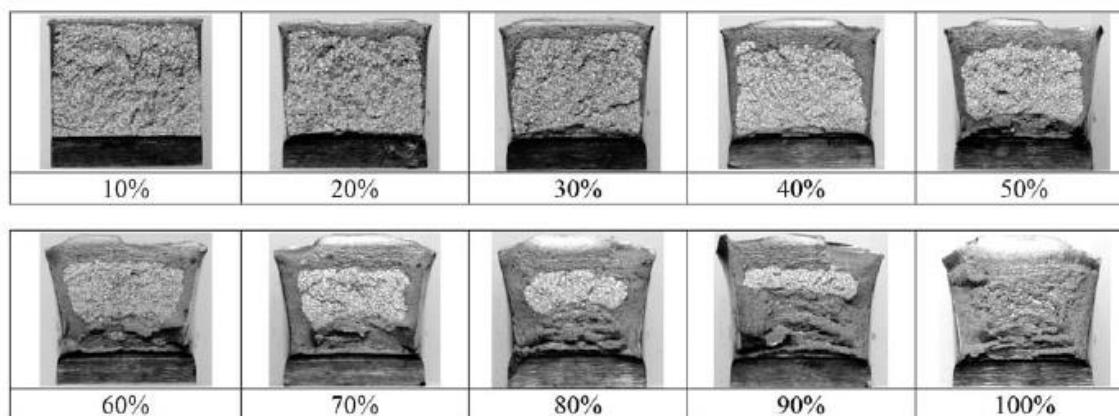
2.10: Εξέταση επιφάνειας θραύσης

Πέρα από τις μετρήσεις των ιδιοτήτων παρουσιάζει ενδιαφέρον και η επιφάνεια θραύσης των δοκιμίων μετά τη δοκιμή Charpy-V και τα συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν από τη μελέτη αυτής. Το πρότυπο ASTM E23 [39] ορίζει το ποσοστό παραμόρφωσης κατά τη διατμητική θραύση (shear fracture percent). Οι μέθοδοι μελέτης επιφάνειας θραύσης βασίζονται στη θεωρία πως 100% διατμητική θραύση συμβαίνει πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης και η ασταθείς ψαθυρή θραύση συμβαίνει κάτω από αυτή τη θερμοκρασία. Οι μέθοδοι αυτοί αναπτύχθηκαν για τους ανθρακούχους χάλυβες που έχουν διακριτή μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή συμπεριφορά, ενώ η ερμηνεία της επιφάνειας θραύσης είναι πιο περίπλοκη σε υλικά που παρουσιάζουν πολλούς μηχανισμούς θραύσης κατά τη διάρκεια της ασταθούς διάδοσης των ρωγμών. Τέτοιοι μέθοδοι υπολογίζουν το ποσοστό παραμόρφωσης μέσω της σύγκρισης της επιφάνειας θραύσης με πρότυπες φωτογραφίες ή μετρώντας το πλάτος και μήκος της περιοχής ασταθούς θραύσης και συγκρίνοντάς το με ειδικούς πίνακες. Γενικώς υπάρχουν τρία είδη θραύσης (**Εικόνα 70**):

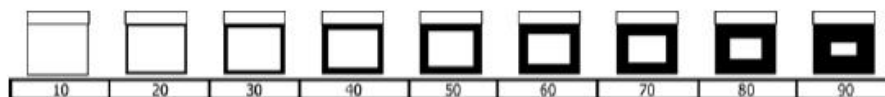
- Θραύση μικρής παραμόρφωσης: Συμβαίνει σε ψαθυρά υλικά και γίνεται δια-κρυσταλλική με αποτέλεσμα γυαλιστερή επιφάνεια θραύσης χωρίς παραμόρφωση,
- Μεικτή θραύση: Περιμετρικά παρατηρείται όλκιμη θραύση, ενώ στο κέντρο παρατηρείται θραύση μικρής παραμόρφωσης,
- Όλκιμη θραύση: Όλκιμη παραμόρφωση, πορώδης επιφάνεια με μεγάλη παραμόρφωση.



Εικόνα 70: Επιφάνειες θραύσης: α) θραύση μικρής παραμόρφωσης, β) μεικτή θραύση, γ) όλκιμη θραύση [35]



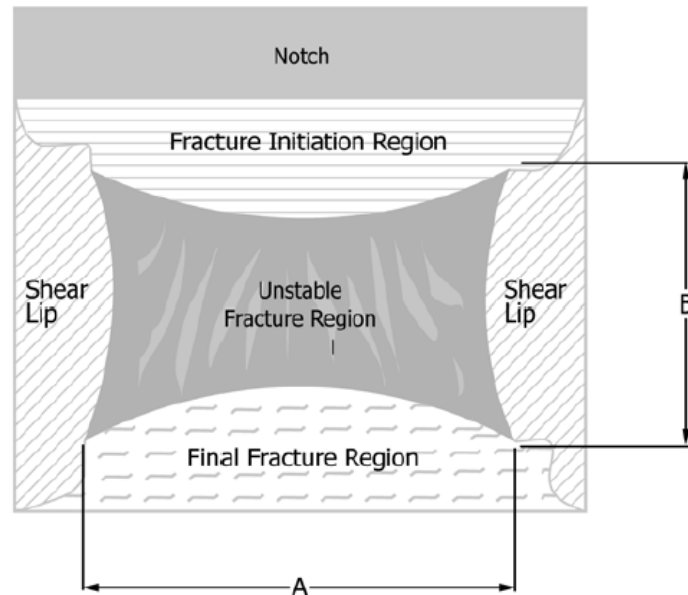
(a) Fracture Appearance Charts and Percent Shear Fracture Comparator



(b) Guide for Estimating Fracture Appearance

Εικόνα 71: Διάφορες επιφάνειες θραύσης [39]

Η εξέταση των επιφανειών θραύσης έγινε με τη χρήση του στερεοσκοπίου Dino Lite που χρησιμοποιήθηκε και κατά τη μέτρηση των διαστάσεων των εγκοπών. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία εκτελέστηκαν δύο μέθοδοι προσδιορισμού, μία ποιοτική συγκρίνοντας την επιφάνεια θραύσης με την **Εικόνα 71** και μία υπολογιστική μετρώντας τις διαστάσεις της περιοχής ασταθούς θραύσης.



Εικόνα 72: Σχηματική απεικόνιση της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου Charpy V-notch

Πίνακας 21: Πίνακας προσδιορισμού ποσοστού διάτμησης, όπου *A* το μήκος και *B* το πλάτος της ασταθούς περιοχής [39]

Note: 1—100 % shear is to be reported when either *A* or *B* is zero.

Dimension <i>B</i> , mm	Dimension <i>A</i> , mm																		
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10
1.0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1.5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2.0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2.5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3.0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3.5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4.0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4.5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5.0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5.5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6.0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6.5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7.0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7.5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

Αρχικά, ρυθμίζεται ο φακός και η μεγέθυνση του στερεοσκοπίου, ώστε η μέτρηση να μπορεί να γίνει με την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια. Έπειτα, το δοκίμιο τοποθετείται σταθερά στην κατακόρυφο του φακού και μέσω του λογισμικού φωτογραφίζεται η επιφάνεια θραύσης. Η περιοχή ασταθούς θραύσης της φωτογραφίας συγκρίνεται ποιοτικά με την **Εικόνα 71** για να γίνει εκτίμηση της μορφή της επιφάνειας θραύσης. Με τη βοήθεια του λογισμικού μετρώνται οι διαστάσεις της περιοχής ασταθούς θραύσης, σύμφωνα με την **Εικόνα 72** και προσδιορίζεται το ποσοστό μέσω του **Πίνακα 21**.

2.11: Αποτελέσματα μετρήσεων σκληρότητας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σκληρότητας και δοκιμών δυσθραυστότητας, προκειμένου να γίνει η σύγκριση των ιδιοτήτων μεταξύ των πειραμάτων. Στους παρακάτω πίνακες (**22**, **23** και **24**) παρουσιάζονται οι τιμές σκληρότητας κατά Rockwell των δοκιμών που προέκυψαν ακολουθώντας την διαδικασία μέτρησης που αναπτύχθηκε στο **Κεφάλαιο 2.8**. Στο

διάγραμμα της **Εικόνας 73** σχεδιάζεται η μεταβολή της σκληρότητας μετά από κάθε επαναφορά για τις τρεις περιπτώσεις.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης HRC του δοκιμίου της CH1

α/Α	1 ^η – επαναφορά (525°C)	2 ^η – επαναφορά (565°C)	3 ^η – επαναφορά (610°C)
1	55	58	51
2	55	59	51
3	55	60	51
4	55	59	51
5	55	59	51

Πίνακας 23: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης του δοκιμίου της DCT

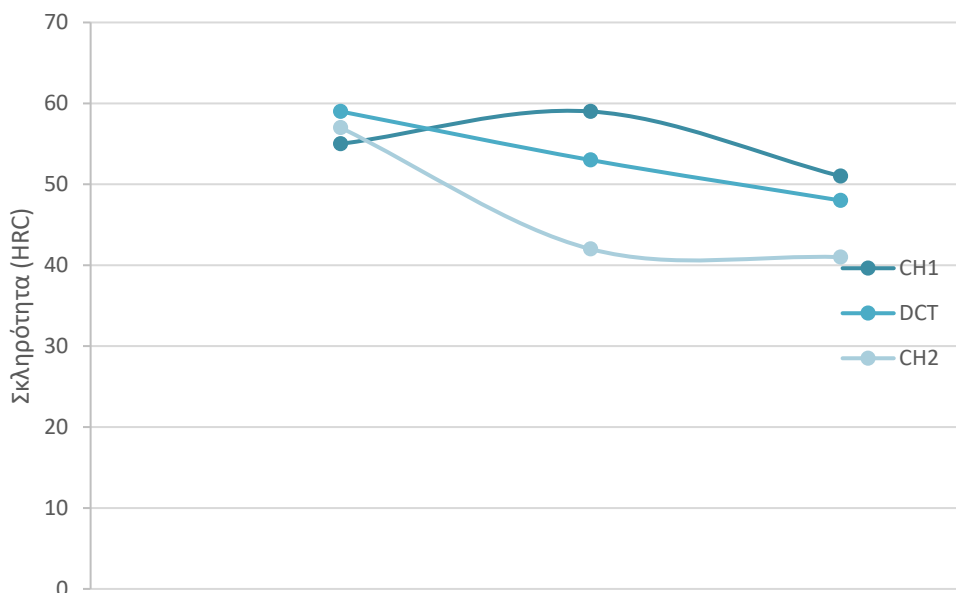
α/Α	Cryogenic	1 ^η – επαναφορά (515°C)	2 ^η – επαναφορά (605°C)	3 ^η – επαναφορά (620°C)
1	58	59	53	48
2	58	59	53	48
3	59	59	52	48
4	58	58	53	48
5	59	59	52	48

Πίνακας 24: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης του δοκιμίου της CH2

α/Α	1 ^η – επαναφορά (525°C)	2 ^η – επαναφορά (620°C)	3 ^η – επαναφορά (570°C)
1	57	41	41
2	57	42	42
3	57	41	41
4	57	41	41
5	57	42	42

Από τις μετρήσεις σκληρότητας φαίνεται πως, ήδη μετά το τέλος της κρυογενικής και της 1^{ης} επαναφοράς στην περίπτωση DCT παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα και μετά σταδιακά ήπια μειώνεται η σκληρότητα μέχρι να αποκτήσει κατάλληλη τιμή. Αυτό ίσως συμβαίνει λόγω της επίδρασης της κρυογενικής κατεργασίας στην κατακρήμνιση των καρβιδίων και το σχηματισμό του μαρτενσίτη. Οι επαναφορές που έπονται της 1^{ης} απλώς μειώνουν τη σκληρότητα εκτός από την

περίπτωση CH1 που η 1^η επαναφορά γίνεται στην περιοχή της δευτερογενούς σκλήρυνσης και η 2^η λίγο μετά από αυτή, καθώς είναι επιθυμητή η αύξηση των καρβιδίων. Η σκληρότητα μετά τις επαναφορές της περίπτωσης CH1 και μετά τη δεύτερη επαναφορά της DCT είναι λίγο μεγαλύτερες από το αναμενόμενο, χωρίς ωστόσο ουσιαστική διαφορά.



Εικόνα 73: Τιμές σκληρότητας μετά από κάθε επαναφορά

2.12: Αποτελέσματα δοκιμών Charpy-V

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται η ενέργεια σε kpm και σε Joule που απορροφά κάθε δοκίμιο μέχρι τελικά να σπάσει, όπως αποτυπώθηκε στη κλίμακα της μηχανής Charpy-V και μετά τη μετατροπή των τιμών σε Joule. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των δοκιμών του συμβατικού κύκλου θερμικής κατεργασίας (CH1). Οι ενέργειες που προέκυψαν, παρουσιάζουν διακύμανση, οπότε απορρίπτονται συμμετρικά ακραίες τιμές, οι οποίες δεν είναι αντιπροσωπευτικές του αποτελέσματος της κατεργασίας. Μετά από παρατήρηση των επιφανειών θραύσης, αυτή η διακύμανση οφείλεται στη διαδικασία ευθυγράμμισης των δοκιμών. Η θερμοκρασία των δοκιμών κατά τη δοκιμή ήταν κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλ. στους 25°C.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου CH1

Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (kpm)	Ενέργεια (J)
1	1,2	11,76
2	1,1	11,79
3	0,2	1,96
4	1,8	17,65
5	0,7	6,86
6	0,3	2,94
7	1,7	16,67

Στην περίπτωση CH1 (Πίνακας 25) τα δοκίμια 3, 5 και 6 έχουν αρκετά μικρότερη δυσθραυστότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια της ομάδας. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται και σε πιθανές ατέλειες στην εγκόπη. Τελικά, τα δοκίμια 3, 5 και 6 απορρίπτονται από τον υπολογισμό της ενέργειας θραύσης.

Οπότε ο μέσος όρος ενέργειας των υπόλοιπων δοκιμών είναι 14,46J και το εύρος τιμών ενέργειας 5,89J.

Όσον αφορά τα δοκίμια που υπέστησαν κρυογενική κατεργασία (DCT), το δοκίμιο 8 έχει υποστεί μόνο δύο επαναφορές σε σχέση με τα υπόλοιπα που υπέστησαν και τις τρεις επαναφορές. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής Charpy στα δοκίμια 8-14. Σε αυτή την περίπτωση το εύρος της ενέργειας που απορροφήθηκε είναι 5,89J και ο μέσος όρος 14,37J. Το δοκίμιο 8 παρά τη διαφορετική αλληλουχία κατεργασιών που πέρασε, δεν απορροφά αρκετά διαφορετική ενέργεια από τα υπόλοιπα δοκίμια της, ωστόσο λόγω αυτού απορρίπτεται. Επίσης απορρίπτεται το δοκίμιο 9, καθώς η ενέργεια που απορροφά είναι ακραία σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια τις παρούσας ομάδας.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου DCT

Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (kpm)	Ενέργεια (J)
8	1,3	12,74
9	1,1	10,78
10	1,2	11,76
11	1,8	17,65
12	1,6	15,69
13	1,7	16,67
14	1,4	13,72

Στον **Πίνακα 27** αναγράφονται τα αποτελέσματα δοκιμής Charpy για την περίπτωση CH2. Η ενέργεια που απορροφούν τα δοκίμια μέχρι να σπάσουν παρουσιάζει διακύμανση μεταξύ 18,63J και 24,51J, δηλαδή το εύρος είναι 5,88J. Το δοκίμιο 15 από σφάλμα παρέμεινε στο λουτρό άλατος της 3^{ης} επαναφοράς για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχει ενέργεια 10,78J η οποία είναι ακραία και απορρίπτεται. Ακόμη, απορρίπτεται το δοκίμιο 17 που έχει πολύ υψηλή ενέργεια θραύσης. Οπότε, τα δύο δοκίμια δεν υπολογίζονται στο μέσο όρο της ενέργειας που απορρόφησαν τα δοκίμια, ο οποίος τελικά είναι 21,57J.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου CH2

Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (kpm)	Ενέργεια (J)
15	1,1	10,78
16	2,1	20,59
17	2,6	25,49
18	2,3	22,55
19	1,9	18,63
20	2,2	21,57
21	2,5	24,51

Από το συγκεντρωτικό **Πίνακα 28** των μέσων όρων και του εύρους για τα τρία σεναρία κατεργασιών, προκύπτει πως η διακύμανση είναι σχεδόν ίδια για τις τρεις περιπτώσεις, χαρακτηριστικό της αβεβαιότητας της δοκιμής. Αυτό είναι σημαντικό, διότι σημαίνει πως οι ενέργειες των δοκιμών ακολουθούν παρόμοιες κατανομές, άρα είναι ασφαλές να συγκριθούν οι μέσοι όροι, δηλαδή η διακύμανση στις μετρήσεις είναι παρόμοια για όλες τις ομάδες δοκιμών. Επίσης, παρά τις μικρές διαφορές στις διαστάσεις που έχουν τα δοκίμια δεν επηρεάζεται ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα της δυσθραυστότητας. Ωστόσο, για το συμβατικό κύκλο θερμικής κατεργασίας 1 λόγω της απόρριψης των τριών δοκιμών, η αβεβαιότητα του μέσου όρου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη λόγω του μικρότερου δείγματος.

Πίνακας 28: Τιμές του μέσου όρου και εύρους των ενεργειών για κάθε σενάριο

Ομάδα δοκιμίων	Μέσος όρος ενέργειας (J)	Εύρος (J)
CH1	14,46	5,89
DCT	15,10	5.89
CH2	21,57	5.88

Από τη σύγκριση των μέσων όρων ενέργειας που απορροφήθηκε για κάθε σενάριο κατεργασίας, φαίνεται πως τα δοκίμια μετά από CH2 μέχρι να σπάσουν απορροφούν αρκετά μεγαλύτερη ενέργεια από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο σκοπός της CH2 είναι η επίτευξη της βέλτιστης δυσθραυστότητας ως μέτρο αναφοράς, αλλά με μειωμένη σκληρότητα. Από την άλλη, η βαθεία κρυογενική κατεργασία παραμονής για 1h φαίνεται πως επηρέασε σε μικρό βαθμό τη δυσθραυστότητα σε σχέση με την αντίστοιχη δυσθραυστότητα του δοκιμίου CH1.

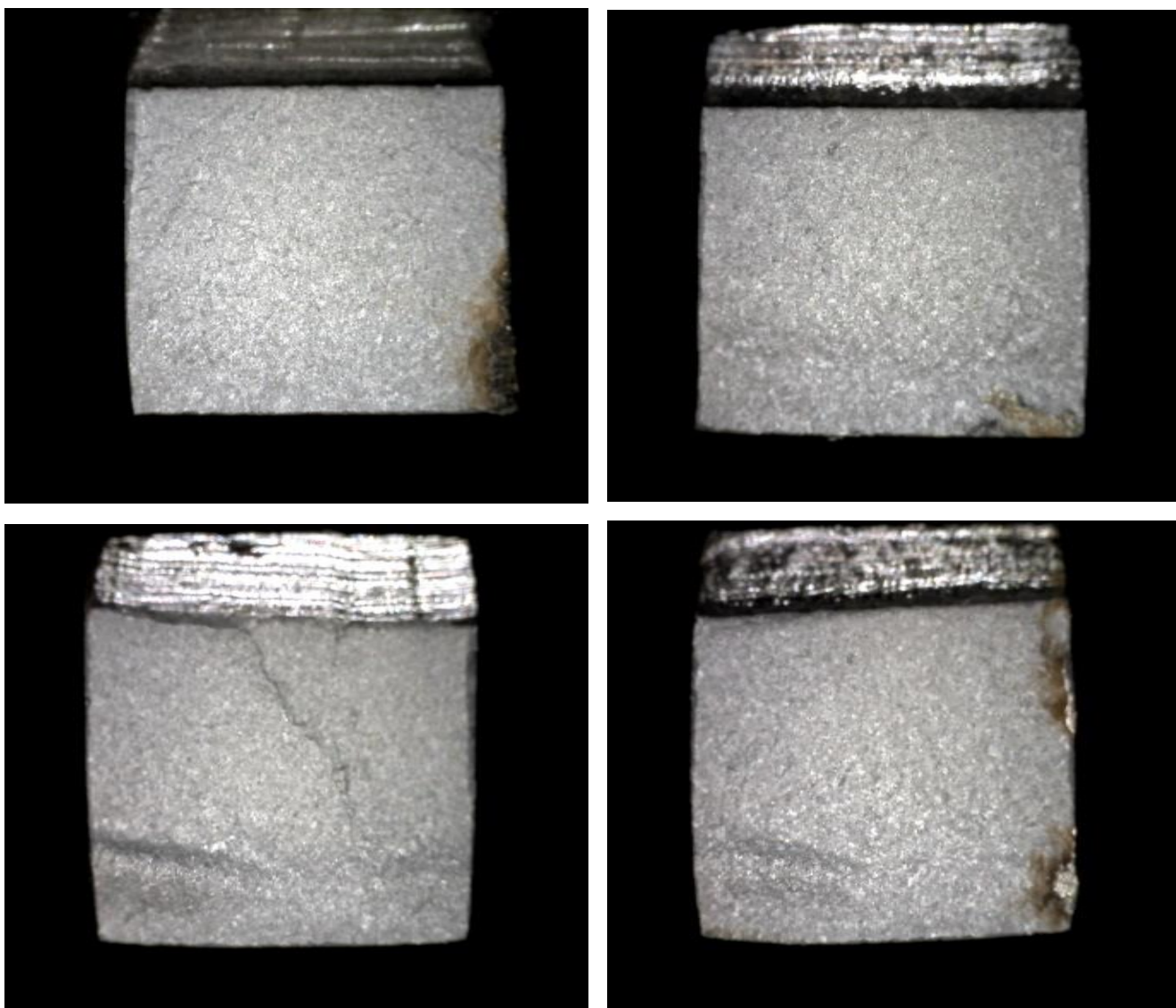
Πίνακας 29: Ενέργεια θραύσης και τελική σκληρότητα

Ομάδα δοκιμίων	Μέσος όρος ενέργειας (J)	Ανηγγμένη ενέργεια (J/mm ²)	Σκληρότητα (HRC)
CH1	14,46	0,181	51
DCT	15,10	0,187	48
CH2	21,57	0,274	41

Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις σκληρότητας και το μέσο όρο ενέργειας θραύσης για τις τρεις περιπτώσεις (Πίνακας 29) γίνεται αντιληπτό πως αρκετά υψηλότερη δυσθραυστότητα, αλλά με σημαντικά μικρότερη σκληρότητα, μπορεί να επιτευχθεί με συμβατική κατεργασία με υψηλή θερμοκρασία 2ης επαναφοράς και τη διενέργεια 3ης επαναφοράς με σκοπό την απόταση του υλικού (CH2). Από την άλλη, με κρυογενική κατεργασία 1h υπάρχει αύξηση της δυσθραυστότητας περίπου κατά 4,3%, αλλά με μικρότερη αποκτηθείσα σκληρότητα σε σχέση με την περίπτωση της CH1. Άρα, η βαθεία κρυογενική κατεργασία παραμονής 1 ώρας δεν παρουσιάζει αισθητή βελτίωση στη δυσθραυστότητα σε σχέση με τη δυσθραυστότητα συμβατικής κατεργασίας με σκοπό την κατακρήμνιση καρβιδίων, ωστόσο η μικρή βελτίωση ίσως αποτελεί ένδειξη ότι μπορεί με μεγαλύτερο χρόνο παραμονής να υπάρχει περαιτέρω αύξηση.

2.13: Αποτελέσματα εξέτασης επιφάνειας θραύσης

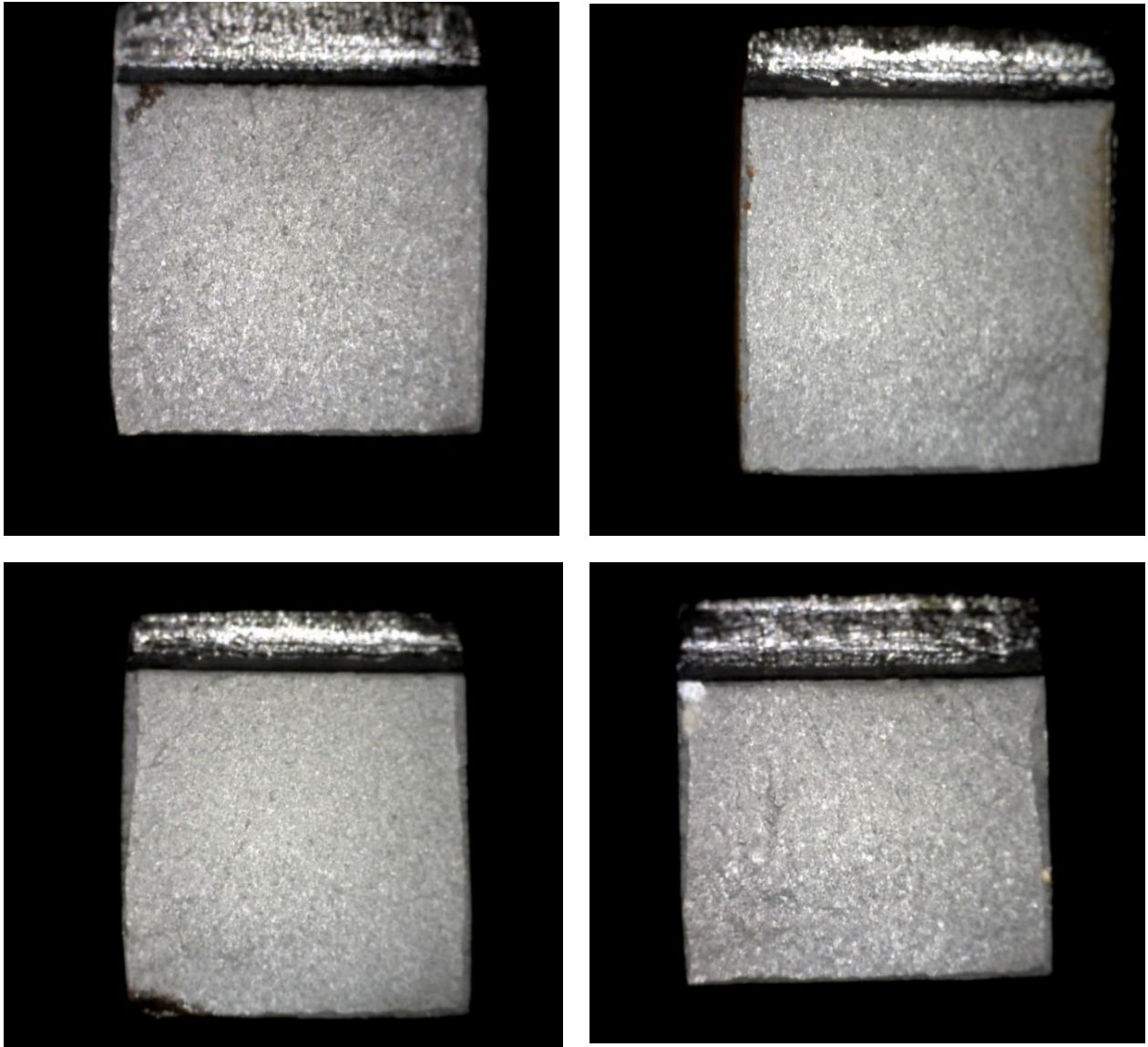
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εξέταση της επιφάνειας θραύσης είναι εξίσου σημαντικά με τις μετρήσεις ενέργειας θραύσης και σκληρότητας, καθώς εξάγονται πληροφορίες για την συμπεριφορά του υλικού σε θραύση και μπορεί να επαληθεύσει εν μέρει τις μετρήσεις. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι που περιγράφονται στο **Κεφάλαιο 2.10**. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εξέτασης των επιφανειών θραύσης με στερεοσκόπιο.



Εικόνα 74:Επιφάνειες θραύσης δοκιμίων CHI: α)1, β) 2, γ)4, δ)7

Πίνακας 30: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμίων CHI

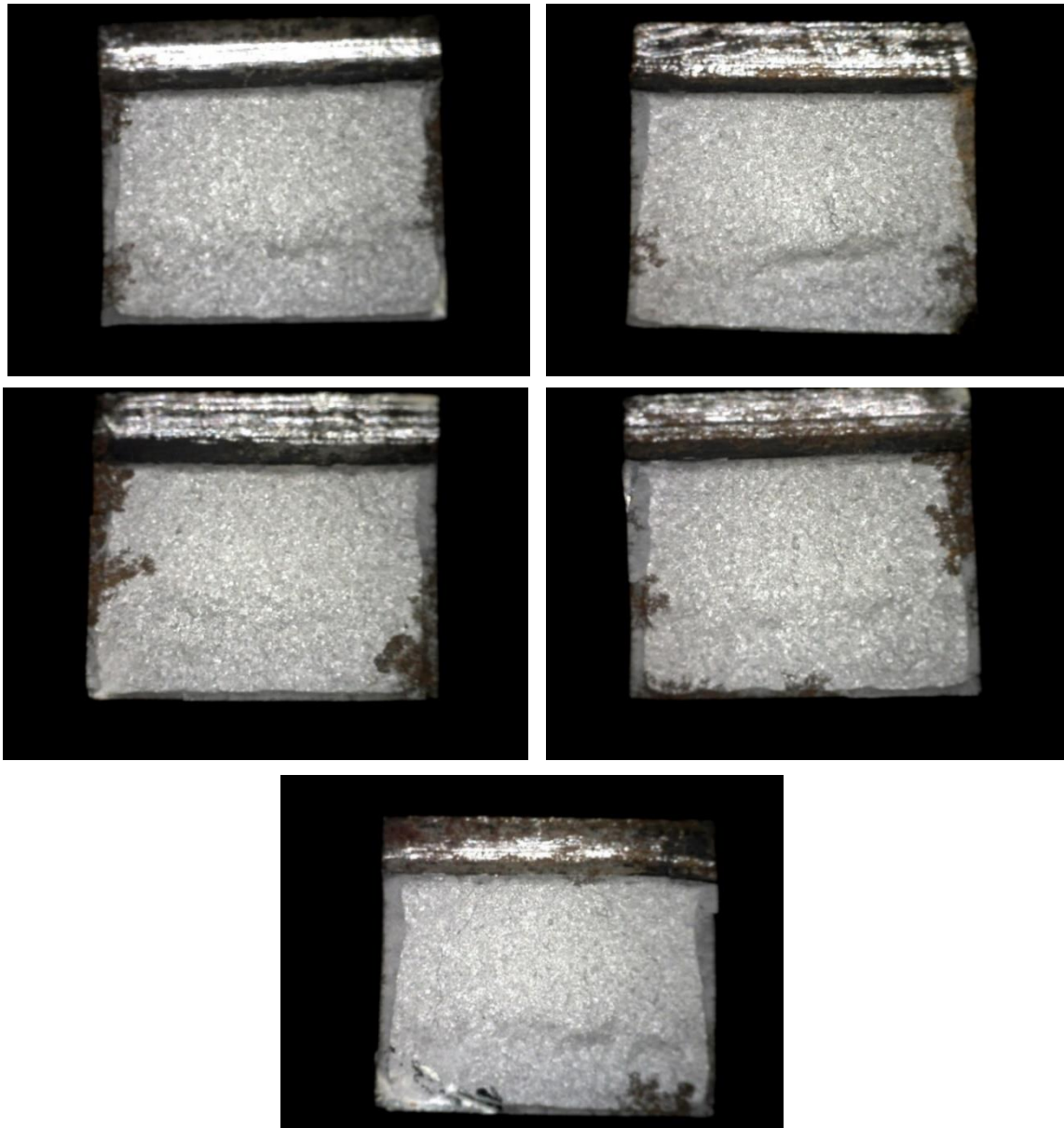
Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (J)	Μήκος A (mm)	Πλάτος B (mm)	Ποσοστό διάτμησης
1	11,76	8,67	6,95	26%
2	11,79	8,88	7,01	21%
4	17,65	8,65	7,07	26%
7	16,67	8,87	7,12	21%



Εικόνα 75:Επιφάνειες θραύσης δοκιμίων DCT: a) 10, b) 11, c)12, d)14

Πίνακας 31: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμίων DCT

Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (J)	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ποσοστό διάτμησης
10	11,76	8.90	6.84	21%
11	17,65	8.69	7.24	26%
12	15,69	8.03	7.40	25%
13	16,67	8.17	6.78	30%
14	13,72	8.47	6.49	31%



Εικόνα 76:Επιφάνειες θραύσης δοκιμών CH2: a)16, b)18, c)19, d)20, e)21

Πίνακας 32: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμών CH2

Αριθμός δοκιμίου	Ενέργεια (J)	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Ποσοστό διάτμησης
16	20,59	8.11	6.26	40%
18	22,55	8.82	6.47	27%
19	18,63	8.03	6.30	35%
20	21,57	8.09	6.40	35%
21	24,51	8.30	6.74	31%

Οι φωτογραφίες των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων της CH1 (**Εικόνα 74**) από οπτική σύγκριση με την **Εικόνα 71** φαίνεται πως το ποσοστό παραμόρφωσης κυμαίνεται στην περιοχή 10% έως 20%. Ωστόσο, από τη μέτρηση των διαστάσεων της ασταθούς περιοχής (**Πίνακας 30**) και αφού συγκριθούν με τον **Πίνακα 22** προκύπτει, πως το ποσοστό διάτμησης είναι κατά μέσο όρο 23,5% με μέγιστο 26% και ελάχιστο 21%. Αυτό σημαίνει πως η θραύση των δοκιμίων αυτών είναι ψαθυρή σε πολύ μεγάλο βαθμό και είναι θραύση μικρής παραμόρφωσης. Από τις φωτογραφίες η επιφάνεια θραύσης είναι πιο κοντά στο 10% παρά στο 20%, αλλά το αποτέλεσμα των μετρήσεων μπορεί να οφείλεται και στις διαστάσεις των δοκιμίων.

Από την άλλη τα δοκίμια της DCT έχουν λίγο υψηλότερο μέσο όρο ενέργειας θραύσης σε σχέση με τα δοκίμια CH1, κάτι που γίνεται αντιληπτό και από οπτικό έλεγχο των επιφανειών θραύσης. Στις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν μέσω του λογισμικού είναι πιο εμφανές το χείλος διάτμησης (shear lip) στα άκρα δεξιά και αριστερά των δοκιμίων σε αντίθεση με τα δοκίμια CH1. Συγκρίνοντας τις φωτογραφίες (**Εικόνα 75**) με τις επιφάνειες θραύσης της **Εικόνας 71** το ποσοστό παραμόρφωσης είναι μεταξύ 20% και 30%, ενώ με την υπολογιστική μέθοδο (**Πίνακας 31**) ο μέσος όρος που προκύπτει είναι 26,5% με μέγιστο 30% και ελάχιστο 21%. Επιβεβαιώνεται λοιπόν, μέσω της οπτικής και υπολογιστικής μεθόδου, η βελτίωση της δυσθραυστότητας των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων. Αν και η αύξηση της μέσης ενέργειας θραύσης είναι μικρή, φαίνεται πως ίσως η κρυογενική βοήθησε τελικά στη βελτίωση της συμπεριφοράς σε σχέση με τη ψαθυρή θραύση των δοκιμίων CH1.

Τέλος, τα δοκίμια της CH2 (**Εικόνα 76**) είναι κατεργασμένα με σκοπό τη μέγιστη δυσθραυστότητα, κάτι που φαίνεται με τη σύγκριση με τις φωτογραφίες της **Εικόνας 71**, όπου το ποσοστό παραμόρφωσης κυμαίνεται στην περιοχή 30 – 40%. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μεθόδου (**Πίνακας 32**), το μέσο ποσοστό παραμόρφωσης που προκύπτει είναι 33,6%. Ακόμη μία ένδειξη που δείχνει την όλκιμη συμπεριφορά είναι η ινώδης περιοχή στο μέσω και προς τα κάτω των δοκιμίων της CH2.

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα στον **Πίνακα 33**, είναι ξεκάθαρο πως η επιφάνεια θραύσης των δοκιμίων CH2 είναι πιο κοντά στην περιοχή μεικτής θραύσης και λιγότερο ψαθυρή, ωστόσο για μέση ενέργεια θραύσης περίπου 7J μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των υπόλοιπων περιπτώσεων η αύξηση του ποσοστού παραμόρφωσης δεν είναι τόσο μεγάλη. Επίσης, είναι ακόμη πιο ξεκάθαρες οι ακμές της περιοχής ασταθούς θραύσης σε σχέση με τις CH1 και DCT, με τη μορφή της επιφάνειας θραύσης των δοκιμίων μετά από κρυογενική να είναι πιο κοντά στη μορφή των δοκιμίων CH2, από ότι τα δοκίμια της CH1.

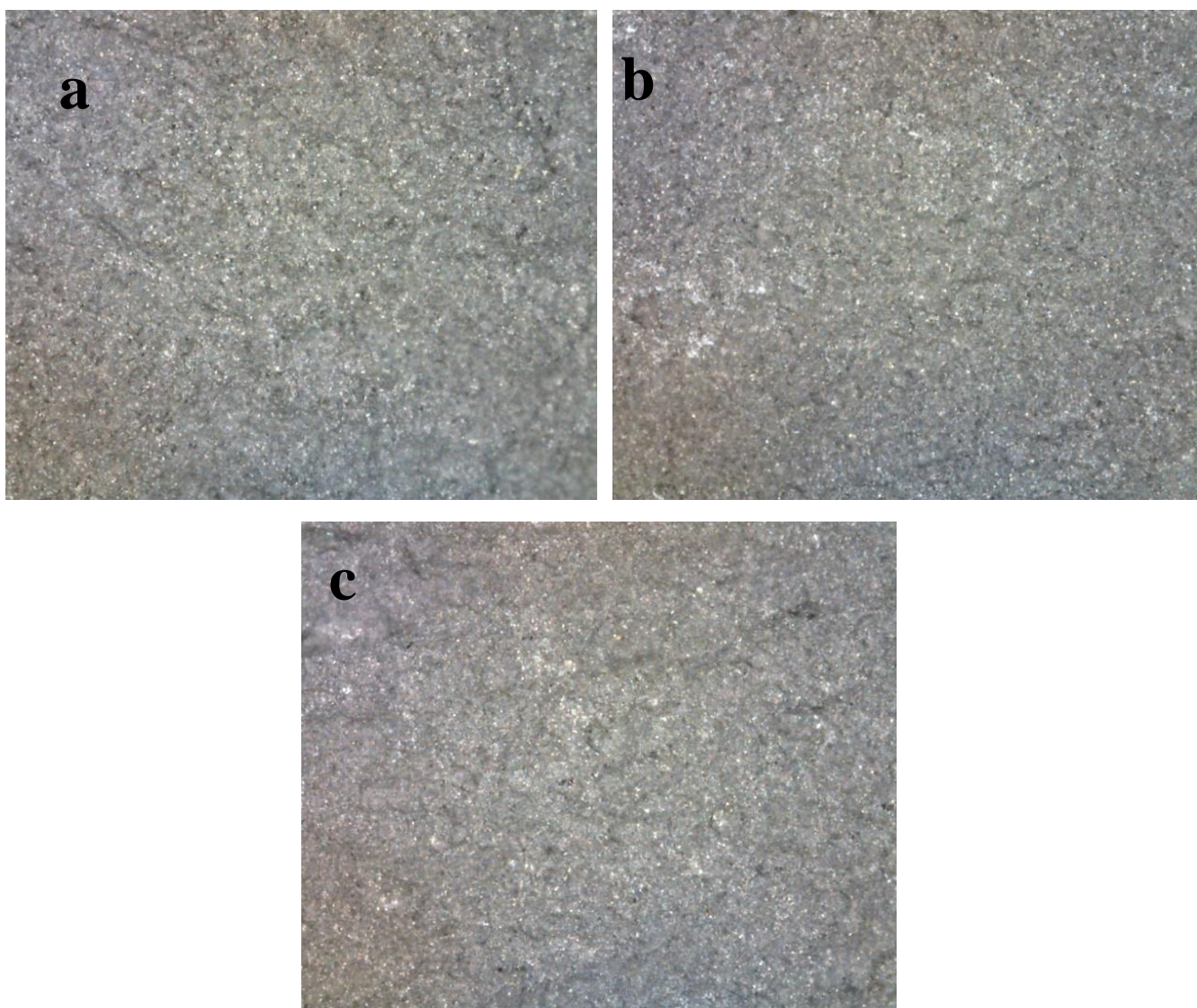
Ένα δοκίμιο από κάθε ομάδα με τιμή ενέργειας κοντά στο μέσο όρο της ομάδας επιλέχθηκε και εξετάστηκε με το μικροσκόπιο με μεγαλύτερη μεγέθυνση, για να μελετηθεί περαιτέρω η επιφάνεια θραύσης και οι πιθανές διαφορές. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τα δοκίμια 7, 12 και 19 από τις CH1, DCT και CH2 αντίστοιχα και παρουσιάζονται στην **Εικόνα 77**. Η επιφάνεια στις εικόνες a και b που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις CH1 και DCT είναι αρκετά λεία, κάτι που δείχνει ότι η θραύση είναι ψαθυρή. Δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δύο φωτογραφιών, αλλά φαίνεται πως η θραύση των δοκιμίων CH1 είναι λιγότερο ψαθυρή, γιατί υπάρχουν περισσότερες περιοχές με παραμόρφωση, σε αντίθεση με όσα προέκυψαν από την εξέταση παραπάνω. Ωστόσο, η διαφορά είναι πολύ μικρή και δεν λαμβάνεται υπόψη. Η επιφάνεια στην περίπτωση CH2 έχει περισσότερες περιοχές με παραμόρφωση και δεν είναι τόσο λεία, επαληθεύοντας τα παραπάνω συμπεράσματα πως τα δοκίμια CH2 έχουν πιο όλκιμη συμπεριφορά.

Τα παραπάνω συμπεράσματα που αφορούν τη δυσθραυστότητα και την επιφάνεια θραύσης και συμφωνούν με την έρευνα του Wang [42] που παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 1.5.4** σχετικά με την επίδραση τη θερμοκρασίας επαναφοράς. Πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία επαναφοράς, η θραύση παρουσιάζει πιο όλκιμη συμπεριφορά και υψηλότερη αντοχή σε θραύση, αλλά μικρότερη σκληρότητα. Όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 33** η διαφορά στην αντοχή στη θραύση των δοκιμίων γίνεται κατανοητή και μέσω του ποσοστού παραμόρφωσης κατά τη διατμητική θραύση. Το

εύρος του ποσοστού παραμόρφωσης της επιφάνειας θραύσης μεταξύ των 3 περιπτώσεων είναι από 21% έως 40%.

Πίνακας 33: Αποτελέσματα εξέτασης μορφής θραύσης

	Μέσος όρος ενέργειας (J)	Ποσοστό παραμόρφωσης (%)
CH1	14,46	23,5
DCT	15,10	26,5
CH2	21,57	33,6



Εικόνα 77: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων α)CH1, b) DCT, c)CH2

4: Συζήτηση-Συμπεράσματα

Ο βασικός σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν η έρευνα της επίδρασης της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας σε σχέση με δύο συμβατικούς κύκλους θερμικής κατεργασίας, στη δυσθραυστότητα και σκληρότητα του εργαλειοχάλυβα H13 σε μακροσκοπικό επίπεδο. Η κρυογενική κατεργασία σύμφωνα με προγενέστερες έρευνες συμβάλλει στο υλικό μέσω:

- της εξάλειψης του υπολειπόμενου ωστενίτη
- του σχηματισμού η-καρβιδίων
- την κατακρήμνιση και δημιουργία συστάδων πολύ λεπτών δευτερευόντων καρβιδίων
- της ομοιογενοποίησης της μικροδομής

Λόγω των παραπάνω, το υλικό μετά από κρυογενική κατεργασία εμφανίζει αυξημένη σκληρότητα και αντοχή σε φθορά. Ωστόσο, η αλλαγή των ιδιοτήτων λόγω κρυογενικής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που κατεργάζεται και τις βασικές παραμέτρους κατεργασίας, όπως η θερμοκρασία παραμονής, ο χρόνος παραμονής, το μέσο ψύξης και ο ρυθμός ψύξης. Ακόμη, είναι σημαντική η επιλογή των παραμέτρων κατεργασίας των επαναφορών, ανεξάρτητα αν συμπεριλαμβάνεται στο κύκλο θερμικής κατεργασίας στάδιο κρυογενικής ή όχι.

Το πειραματικό μέρος βασίζεται στην κατεργασία και διενέργεια μηχανικών δοκιμών σε ένα κύκλο συμβατικής κατεργασίας με αυξημένη κατακρήμνιση καρβιδίων και τυπική σκληρότητα για τις εφαρμογές του χάλυβα (CH1), ένα κύκλο συμβατικής κατεργασίας με αυξημένη δυσθραυστότητα και χαμηλή σκληρότητα (CH2) και ένα κύκλο που περιλαμβάνει κρυογενική κατεργασία (DCT) 1h σε θερμοκρασία -196°C με τελική σκληρότητα μεταξύ 48-50HRC. Στα δοκίμια έγινε μέτρηση σκληρότητας ενδιάμεσα των επαναφορών και τελικά δοκιμή κρούσης Charpy V-notch. Στα δοκίμια της CH1 και της DCT παρατηρήθηκε δευτερογενής σκλήρυνση τουλάχιστον μετά την 1^η επαναφορά, ενώ οι υπόλοιπες επαναφορές λειτουργούν για τη ρύθμιση της σκληρότητας και τη χαλάρωση των τάσεων. Τα δοκίμια μετά από κρυογενική κατεργασία είχαν τη μεγαλύτερη σκληρότητα πριν τις επαναφορές και μετά την ολοκλήρωση της 1^{ης} επαναφοράς δεν άλλαξε ουσιαστικά, κάτι που δείχνει πως η σκληρότητα αυξάνεται αρκετά ακόμα και για κρυογενική κατεργασία 1h. Η ενέργεια θραύσης των δοκιμίων της DCT μπορεί να είναι αυξημένη κατά 4.38% από αυτή των δοκιμίων της CH1, ωστόσο τα δοκίμια είχαν μικρότερη σκληρότητα και η σκληρότητα των δοκιμίων CH1 προέκυψε εκτός του εύρους 48-50HRC. Οι έρευνες που παρουσιάστηκαν στο **Κεφάλαιο 1.5.4** μελετούσαν την επίδραση της βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας σχετικά υψηλού χρόνου παραμονής (16-48h) και συγκρίνονταν με κλασσικές συμβατικές θερμικές κατεργασίες, χωρίς ωστόσο δίνουν βάση στη σημασία του αριθμού και θερμοκρασίας των επαναφορών. Στις μελέτες αυτές στις περιπτώσεις που προέκυψε σκληρότητα μεταξύ 48-51HRC η ενέργεια θραύσης ήταν μεταξύ 13-16.9J κάτι που ισχύει και στην παρούσα εργασία. Σύμφωνα ακόμη με τις συγκεκριμένες έρευνες, η κρυογενική κατεργασία σε σχέση με συμβατική κατεργασία βελτιώνει ταυτόχρονα την ενέργεια που απορροφούν τα δοκίμια μέχρι τη θραύση και τη σκληρότητα. Αυτό δεν φαίνεται να συμβαίνει εδώ, αλλά σε αντίθεση με τις έρευνες οι επαναφορές της συμβατικής κατεργασίας είναι σχεδιασμένες, έτσι ώστε να αυξηθεί το πλήθος των κατακρημνισμένων καρβιδίων και να αποκτήσει μια τυπική σκληρότητα που απαιτείται στις εφαρμογές του χάλυβα, προσομοιώνοντας κατά κάποιο τρόπο τη κρυογενική κατεργασία με κατάλληλες επαναφορές συμβατικού θερμικού κύκλου. Εφόσον για 1h βαθιάς κρυογενικής κατεργασίας δεν προκύπτει ουσιαστική διαφορά σε σχέση με συμβατική κατεργασία σχεδιασμένη για υψηλή κατακρήμνιση, δημιουργείται το ερώτημα αν υπάρχει ικανοποιητική αύξηση της δυσθραυστότητας για χρόνο παραμονής μεταξύ 4h και 34h στους -196°C , που είναι τυπικοί χρόνοι παραμονής σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο.

Όσον αφορά, τη σκληρότητα των δοκιμίων της DCT έπρεπε να είναι σχεδόν ίση με τη σκληρότητα των δοκιμίων της CH1 για να συγκριθούν μόνο οι ενέργειες θραύσης, αλλά τελικά η σκληρότητα των κρυογενικά κατεργασμένων δοκιμίων ήταν 3HRC λιγότερη. Αυτό ίσως να οφείλεται στη θερμοκρασία

της 3^{ης} επαναφοράς στους 620°C των δοκιμίων DCT, αφού η σκληρότητα του μετρούμενου δοκιμίου ήταν 53 και 48 πριν και μετά την κατεργασία αντίστοιχα. Οπότε, ίσως έπρεπε να επιλεγθεί λίγο χαμηλότερη θερμοκρασία της 3^{ης} επαναφοράς για να μην προλάβει να μειωθεί τόσο η σκληρότητα. Η δεύτερη συμβατική κατεργασία που πραγματοποιήθηκε (CH2) χρησιμοποιείται ως αναφορά για τη δυσθραυστότητα και την επιφάνεια θραύσης και δεν έχει νόημα η σύγκρισή της με τις τιμές των CH1 και DCT καθώς η σκληρότητα είναι αρκετά χαμηλότερη. Από την άλλη, βοηθά στη σύγκριση των επιφανειών θραύσης, αφού λόγω της υψηλής ενέργειας η επιφάνεια θραύσης έχει μορφή μεικτής θραύσης σε σχέση με την εξαιρετικά ψαθυρή θραύση των δοκιμίων CH1 και τη λιγότερο ψαθυρή θραύση των δοκιμίων της DCT.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία εμβαθύνει στην κατανόηση της κρυογενικής κατεργασίας και διάφορων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτή. Πειραματικά, φαίνεται πως υπάρχει μικρή αύξηση της ενέργειας θραύσης του εργαλειοχάλυβα H13 για κρυογενική κατεργασία 1h σε σχέση με συμβατική θερμική κατεργασία που αποσκοπεί σε υψηλή κατακρήμνιση καρβιδίων και βελτιώνεται η επιφάνεια θραύσης, η οποία είναι λιγότερο ψαθυρή όπως φαίνεται με εξέταση της επιφάνειας θραύσης. Εφόσον, κατάλληλη συμβατική κατεργασία με υψηλή κατακρήμνιση των καρβιδίων μπορεί να πετύχει ανάλογο αποτέλεσμα στη δυσθραυστότητα του H13, όπως η βαθιά κρυογενική κατεργασία 1 ώρας. Είναι χρήσιμο μελλοντικά να γίνει διερεύνηση της μικροδομής με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για τον προσδιορισμό του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη και κυρίως της κατανομής των καρβιδίων στις δύο περιπτώσεις. Παράλληλα θέτονται οι βάσεις για μελέτη της επίδρασης μεγαλύτερης διάρκειας παραμονής σε κρυογενική θερμοκρασία στη δυσθραυστότητα.

5:Κατάλογος Αναφορών

- [1] Β. Μπελιμπασάκης, “« Ανάλυση αστοχίας εξαρτημάτων κοπής για τον τεμαχισμό στύλων ηλεκτροδότησης από οπλισμένο σκυρόδεμα »,» *ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.*, 2019.
- [2] Ι. ΚΑΖΑΔΕΛΗΣ, “ΒΑΣΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ,» 2007.
- [3] IMTISAL-E-NOOR, “CLASSIFICATION OF STEEL,» no. 2010, pp. 1–11, 2011, [Online]. Available: https://www.academia.edu/5560166/classification_of_steel.
- [4] E. Elhachmi, “Tool steels,» *Steel Heat Treat. Metall. Technol.*, pp. 651–694, 2006, doi: 10.1081/e-eisa-120053056.
- [5] D. H. Stamatis, “TQM Engineering Handbook,» *TQM Eng. Handb.*, 1997, doi: 10.1201/9781482269826.
- [6] L. Meth-, O. Iron, W. Iron, and S. Products, “Standard Specification for Tool Steels Alloy 1,» pp. 1–14, 2010.
- [7] A. S. M. International and H. Committee, “Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys.”
- [8] J. L. Dosset and H. E. Boyer, “Fundamentals of the Heat Treating of Steel,» *Pract. Heat Treat. Second Ed.*, pp. 9–25, 2019, doi: 10.31399/asm.tb.pht2.t51440009.
- [9] Δ. Κ. Μέντρεα, “Ανάπτυξη και κατεργασίες κραμάτων ειδικών εφαρμογών.”
- [10] Σ. ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΟΥ, “Μεταλλογνωσία και θερμικές κατεργασίες μεταλλών,» 2008.
- [11] Θ. Λάγκος, “ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ «Κρυογενική Κατεργασία Εργαλειοχάλυβα Uddeholm Ovar 2M»,» 2019.
- [12] A. Tsaroucha, “Cryogenic Treatment of Uddeholm Orvar 2M tool steel,» no. June, 2018.
- [13] M. Villa and M. A. J. Somers, “Cryogenic Treatment of Steel : From Concept to Metallurgical Understanding,» *Proc. 24th Int. Feration Heat Treat. Surf. Eng. Congr.*, no. June, 2017.
- [14] Ε. ΧΑΤΖΟΥΛΗ, “ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΡΥΟΓΕΝΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ,» 2009.
- [15] Σ. ΠΑΠΑΕΥΘΥΜΙΟΥ, *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ*. 2017.
- [16] A. Uddeholms, “Heat Treatment of Tool Steel,» vol. 8, pp. 1–20, 2012.
- [17] N. S. Kalsi, R. Sehgal, and V. S. Sharma, “Cryogenic treatment of tool materials: A review,» *Mater. Manuf. Process.*, vol. 25, no. 10, pp. 1077–1100, 2010, doi: 10.1080/10426911003720862.
- [18] T. Mamodia, “Cryogenic Treatment of Tool Steel,» no. September, 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3925.8082.
- [19] M. Koneshlu, K. Meshinchi Asl, and F. Khomamizadeh, “Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel,» *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 51, no. 1, pp. 55–61, 2011, doi: 10.1016/j.cryogenics.2010.11.001.
- [20] S. S. Gill, H. Singh, R. Singh, and J. Singh, “Cryoprocessing of cutting tool materials - A review,» *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 48, no. 1–4, pp. 175–192, 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2263-9.
- [21] A. Shokrani, V. Dhokia, P. Muñoz-Escalona, and S. T. Newman, “State-of-the-art cryogenic machining and processing,» *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 7, pp. 616–648, 2013, doi: 10.1080/0951192X.2012.749531.
- [22] A. Molinari and M. Pellizzari, “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels,» *Int. J. Mater. Eng. Innov.*, 2001.
- [23] F. J. da Silva, S. D. Franco, Á. R. Machado, E. O. Ezugwu, and A. M. Souza, “Performance of cryogenically treated HSS tools,» *Wear*, vol. 261, no. 5–6, pp. 674–685, 2006, doi: 10.1016/j.wear.2006.01.017.

- [24] D. Das, A. K. Dutta, V. Toppo, and K. K. Ray, "Effect of deep cryogenic treatment on the carbide precipitation and tribological behavior of D2 steel," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 22, no. 4, pp. 474–480, 2007, doi: 10.1080/10426910701235934.
- [25] K. Amini and A. Akhbarizadeh, "Cryogenic Heat Treatment - a Review," *Metall. Mater. Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–10, 2017.
- [26] T. Yugandhar, P. K. Krishnan, C. V. B. Rao, and R. Kalidas, "Cryogenic Treatment and It'S Effect on Tool Steel," *6th Int. Tool. Conf.*, vol. 24, pp. 671–684, 2002.
- [27] F. Meng, H. Sohma, K. Tagashira, and R. Azuma, "Role of Eta-carbide Precipitations in the Wear Resistance Improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C Tool Steel by Cryogenic Treatment," *ISIJ Int.*, vol. 34, no. 2, pp. 205–210, 1994, doi: 10.2355/isijinternational.34.205.
- [28] S. Zhirafar, A. Rezaeian, and M. Pugh, "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 186, no. 1–3, pp. 298–303, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.046.
- [29] N. Pillai, R. Karthikeyan, and J. Paulo Davim, "A review on effects of cryogenic treatment of AISI 'D' series cold working tool steels," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 2, pp. 149–159, 2017.
- [30] N. W. Khun, E. Liu, A. W. Y. Tan, D. Senthilkumar, B. Albert, and D. Mohan Lal, "Effects of deep cryogenic treatment on mechanical and tribological properties of AISI D3 tool steel," *Friction*, vol. 3, no. 3, pp. 234–242, 2015, doi: 10.1007/s40544-015-0089-z.
- [31] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei, and M. A. Golozar, "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 8, pp. 3259–3264, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.11.016.
- [32] S. Kumar, M. Nagraj, A. Bongale, and N. Khedkar, "Deep Cryogenic Treatment of AISI M2 Tool Steel and Optimisation of Its Wear Characteristics Using Taguchi's Approach," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 9, pp. 4917–4929, 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3242-y.
- [33] K. Amini, M. Negahbani, and H. Ghayour, "The effect of deep cryogenic treatment on hardness and wear behavior of the H13 tool steel," *Metall. Ital.*, vol. 107, no. 3, pp. 53–58, 2015.
- [34] V. Bhavar, S. Khot, P. Kattire, M. Mehta, and R. K. P. Singh, "Effect of deep cryogenic treatment (DCT) on AISI H13 tool steel," *ASM Int. - 28th Heat Treat. Soc. Conf. HEAT Treat. 2015*, no. October, pp. 377–383, 2015.
- [35] T. Groeneveld and A. Elsea, "Mechanical Testing Methods," *Hydrog. Embrittlement Test.*, pp. 11-11–9, 2009, doi: 10.1520/stp38925s.
- [36] A. K. Sheikh and S. Z. Qamar, "Determination of Fracture Toughness of Tool Steels," pp. 1–16, 2001.
- [37] Astm, "I, A.S. of T.M., 2013. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of of Metallic Materials 399-12," *Astm*, vol. 399, pp. 1–33, 2013, doi: 10.1520/E0399-12E02.2.
- [38] S. T. Methods, "Technical Literature : ASTM A370 / ASME SA-370 Company Website : www.metalspiping.com Your Reliable Supplier of ferrous & nonferrous piping materials ! Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products 1," *Stand. Test Methods Defini. Mech. Test. Steel Prod. This*, 2016, doi: 10.1520/A0370-16.2.
- [39] ASTM E 23-12c, "Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials," *Standards*, vol. i, pp. 1–25, 2012, doi: 10.1520/E0023-16B.2.
- [40] "Hardness test," pp. 1–8, [Online]. Available: [https://www.aybu.edu.tr/bolumroot/contents/muhendislik_makina/files/HARDNESS TEST\(1\).pdf](https://www.aybu.edu.tr/bolumroot/contents/muhendislik_makina/files/HARDNESS TEST(1).pdf).
- [41] A. International, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," *Am. Soc. Test. Mater. Handb.*, pp. 281–293, 2017, doi: 10.1520/E0384-17.
- [42] J. Wang, Z. Xu, and X. Lu, "Effect of the Quenching and Tempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of H13 Steel," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 29, no.

3, pp. 1849–1859, 2020, doi: 10.1007/s11665-020-04686-0.

- [43] Δημήτρης Ι. Παντελής, Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, 1996, ISBN: 9607510399
- [44] J.A. Mathews, Austenite and Austenitic Steels, *Trans. AIME* 71 (1925) 568-596
- [45] Nishiyama martensitic transformations academic press
- [46] Busch, W. S. 1969. Introduction to cryogenics. *ASTME Technical Paper*, CM69-252.
- [47] R.F. Barron, Effect of cryogenic treatment on lathe tool wear, *Prog. Refrig. Sci. Technol.* 1 (1973) 529-533.
- [48] Darwin JD, Mohan Lal D, Nagarajan G (2007) Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of Chrome Silicon spring steel by Taguchi method. *Int J Mat Sci* 2(1):17–28
- [49] Darwin JD, Mohan Lal D, Nagarajan G (2008) Optimization of cryogenic treatment to maximize the wear resistance of 18% Cr martensitic stainless steel by Taguchi method. *J Mater Process Technol* 195(1–3):241–247
- [50] Carlson EA (1990) Cold Treating and Cryogenic Treatment of Steel in *ASM Handbook*, vol. 4 Heat Treating, ASM International, 10th Ed., Metals Park, OH, pp 203–206
- [51] Mohan Lal D, Renganarayanan S, Kalanidhi A (2001) Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels. *Cryogenics* 41(3):149–155
- [52] Barron RF (1974) Do treatment at temperature below -120°F help increase the wear resistance of tool steels?
- [53] Collins DN (1996) Deep cryogenic treatment of tool steels—a review
- [54] Huang, J.Y.; Zhu, Y.T.; Liao, X.Z.; Beyerlein, I.J.; Bourke, M.A.; Mitchell, T.E. Microstructure of Cryogenic treated M2 tool steel. *Materials Science Engineering*
- [55] Vadivel, K.; Rudramoorthy, R. Performance analysis of cryogenically treated coated carbide inserts. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* 2009
- [56] Sogalad, I.; Udupa, N.G. S. Influence of cryogenic treatment on load bearing ability of interference fitted assemblies. *Materials and Design* 2010,
- [57] Alexandru, G.; Ailincăi, G.; Băciu, C. Influence of cryogenic treatments on life of alloyed high-speed steels. *Mem*
- [58] Paulin P (1993) Frozen gears. *Gear Technol* 10:26–29
- [59] <https://www.rodovens.com/heat-treating-steel-definitions/>
- [60] <https://www.bladeforums.com/threads/nap-temper-compromise-in-quality.1583323/>

6: Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Λόγος αντοχής στη φθορά R_w/R_{wo}	33
Πίνακας 2: Αντοχή σε φθορά για διάφορους χάλυβες [57]	34
Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμών τριβής	39
Πίνακας 4: Κατεργασίες των δοκιμών H13	40
Πίνακας 5: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών μετά το πέρας της κατεργασίας	41
Πίνακας 6: Κωδικοποίηση των σεναρίων	43
Πίνακας 7: Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών	44
Πίνακας 8: Μέγιστη τάση παραμόρφωσης για των δοκιμών	45
Πίνακας 9: Συνδυασμοί κατεργασιών	57
Πίνακας 10: Αποτελέσματα δοκιμών	57
Πίνακας 11: Αποτελέσματα σκληρότητας και δοκιμών δυσθραυστότητας	58
Πίνακας 12: Ενέργεια κρούσης και σκληρότητα των δοκιμών	58
Πίνακας 13: Μηχανικές ιδιότητες μετά από τη βαφή και επαναφορά, για διάφορες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης	60
Πίνακας 14: Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών για διάφορες θερμοκρασίες επαναφορών	61
Πίνακας 15: Περιγραφή κύκλων κατεργασίας	63
Πίνακας 16: Στοιχεία δοκιμών CH1, DCT και CH2	66
Πίνακας 17: Παράμετροι θερμικών κατεργασιών	68
Πίνακας 18: Κύκλος φούρνου με $T_{set} = 1040^{\circ}C$	70
Πίνακας 19: Χρόνοι ωστενιτοποίησης	70
Πίνακας 20: Κύκλος φούρνου με $T_{ρυθμ} = 1040^{\circ}C$	72
Πίνακας 21: Πίνακας προσδιορισμού ποσοστού διάτμησης, όπου A το μήκος και B το πλάτος της ασταθούς περιοχής [39]	83
Πίνακας 22: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης HRC του δοκιμίου της CH1	84
Πίνακας 23: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης του δοκιμίου της DCT	84
Πίνακας 24: Αποτελέσματα σκληρομέτρησης του δοκιμίου της CH2	84
Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου CH1	85
Πίνακας 26: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου DCT	86
Πίνακας 27: Αποτελέσματα δοκιμής Charpy σεναρίου CH2	86
Πίνακας 28: Τιμές του μέσου όρου και εύρους των ενεργειών για κάθε σενάριο	87
Πίνακας 29: Ενέργεια θραύσης και τελική σκληρότητα	87
Πίνακας 30: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμίων CH1	88
Πίνακας 31: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμίων DCT	89
Πίνακας 32: Προσδιορισμός ποσοστού διάτμησης δοκιμίων CH2	90
Πίνακας 33: Αποτελέσματα εξέτασης μορφής θραύσης	92

7: Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1:Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe ₃ C [32]	6
Εικόνα 2: Χημική σύσταση χάλυβα H13 [6]	10
Εικόνα 3: Κατά Brinell σκληρότητα H13 [6]	10
Εικόνα 4: Παράμετροι κατεργασίας χαλύβων [6]	10
Εικόνα 5: Συμβατική θερμική κατεργασία εργαλειοχάλυβα H13 [9]	12
Εικόνα 6:Περιοχές εφαρμογής των ειδών ανόπτησης στο διάγραμμα φάσεων	14
Εικόνα 7: Κρυσταλλικές δομές φάσεων	15
Εικόνα 8: Απεικόνιση με μικροσκόπιο των δύο ειδών μαρτενσίτη.....	16
Εικόνα 9:Είδη κλιμακωτών βαφών: Α – μαρτενσιτική βαφή, Β – μπαινιτική βαφή, Γ – μπαινιτομαρτενσιτική βαφή	18
Εικόνα 10: Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου-μετασηματισμού βαφής εργαλειοχάλυβα τύπου M.18	
Εικόνα 11: Τυπικός κύκλος κρυσταλλικής κατεργασίας με snap tempering	19
Εικόνα 12:Μετασηματισμός κρυσταλλικής δομής βαμμένου χάλυβα κατά την επαναφορά.....	20
Εικόνα 13:Μεταβολή μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία επαναφοράς.....	21
Εικόνα 14:Μηχανισμός φλογοβαφής γκραναζιού	22
Εικόνα 15:Βασικές αρχές επαγωγικής σκλήρυνσης	23
Εικόνα 16: Διάγραμμα διαδικασίας κρυσταλλικής κατεργασίας [49]	27
Εικόνα 17:Συνάρτηση θερμοκρασίας ως προς τον χρόνο κατά την κρυσταλλική κατεργασία [50]	27
Εικόνα 18: Σύγκριση των λόγων αντίστασης στη φθορά δοκιμίων με κρυσταλλική κατεργασία στους -84°C και -196°C [51]	29
Εικόνα 19:Μικροδομή χάλυβα μετά από κρυσταλλική κατεργασία [15].....	30
Εικόνα 20:Μικροδομή χάλυβα μετά από α) βαφή και επαναφορά, β) βαφή, DCT36 και επαναφορά, γ) βαφή, DCT84 και επαναφορά.....	31
Εικόνα 21:SEM καταγραφή χάλυβα En8 πριν και μετά από CT	32
Εικόνα 22: Μικροδομή από οπτικό μικροσκόπιο και εικόνα SEM για χάλυβα D3 για τα τρία σενάρια κατεργασίας	35
Εικόνα 23: Ρυθμοί φθοράς δοκιμίων D3 των διαφόρων σεναρίων	35
Εικόνα 24: Κωδικοποίηση των διαφορετικών σεναρίων.....	36
Εικόνα 25: Υπολειπόμενος ωστενίτης μετά το πέρας των κατεργασιών	36
Εικόνα 26: Μετρήσεις σκληρότητας HRC του χάλυβα D6 πριν και μετά την επαναφορά	36
Εικόνα 27: Ρυθμός φθοράς του D6 συναρτήση της ταχύτητας.....	37
Εικόνα 28: SEM εικόνες των επιφανειών φθοράς: α) CHT, β) SCT20, γ) SSCT20, δ) SCT40, SSCT40, ε) SSCT40, ς) DCT, ζ) SDCT.....	37
Εικόνα 29:Χημική σύσταση του εργαλειοχάλυβα M2	38
Εικόνα 30: Διάγραμμα θερμοκρασίας-χρόνου κατά την κατεργασία	38
Εικόνα 31: Οπτική μικρογραφία της δομής του χάλυβα για χρόνο παραμονής 12 και 24 ώρες αντίστοιχα	39
Εικόνα 32: Επάνω: Εικόνες από οπτικό μικροσκόπιο για α) DCT24, β) QT, Κάτω: SEI μικρογραφία των καρβιδίων για α) CHT και β) DCT24.....	42
Εικόνα 33:Εικόνα SEM της επιφάνειας τριβής H13 για QT και DCT24 αντίστοιχα.....	42
Εικόνα 34:SEM εικόνες των καρβιδίων συμβατικά και κρυσταλλικά κατεργασμένων δοκιμίων	43
Εικόνα 35:SEM εικόνες της μαρτενσιτικής δομής μετά την επαναφορά, α) HT, β) DCT16, γ) DCT32, δ) DCT48	44
Εικόνα 36: Διάγραμμα Σκληρότητας-Επαναφοράς.....	46
Εικόνα 37:Τύποι εφαρμογής φορτίου: Τύπος I ανοικτός, Τύπος II ολίσθησης και Τύπος III αποσχιστικός.....	48

Εικόνα 38:Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Charpy [35]	49
Εικόνα 39:Προδιαγραφές δοκιμίου για Charpy V-notch test [39]	50
Εικόνα 40: Διάγραμμα ενέργειας κρούσης – θερμοκρασίας για διαφορετική κρυσταλλική δομή [35]	51
Εικόνα 41: Προδιαγραφές δοκιμίου για Izod V-notch test [39]	51
Εικόνα 42:Σχηματική απεικόνιση μεθόδου α) Izod, β) Charpy	52
Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Brinell.....	53
Εικόνα 44:Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Vickers	54
Εικόνα 45: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής Rockwell.....	54
Εικόνα 46: Γεωμετρία κεφαλής Vickers.....	55
Εικόνα 47: Γεωμετρία κεφαλής Knoop	56
Εικόνα 48: Απεικόνιση δοκιμίου συμβατικής κατεργασίας	59
Εικόνα 49: SEM εικόνα της μικροδομής των δοκιμίων 1-4.....	59
Εικόνα 50: Επιφάνειες θραύσης του H13 μετά από βαφή και επαναφορά με θερμοκρασία ωστενιτοποίησης: α)1020°C, β)1040°C, γ) 1060°C.....	60
Εικόνα 51: SEM φωτογραφία της μικροδομής του χάλυβα για επαναφορά στους 570°C, 590°C και 610°C αντίστοιχα	61
Εικόνα 52: Επιφάνειες θραύσης μετά από βαφή και επαναφορά στους: α) 570°C, β) 590°C, γ) 610°C	62
Εικόνα 53: Διαστάσεις δοκιμίου Charpy	64
Εικόνα 54: Κοπτικό εργαλείο φρέζας όμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε	65
Εικόνα 55: Ο δισκοτόμος που χρησιμοποιήθηκε	65
Εικόνα 56:Τα δοκίμια 1-14 πριν την κατεργασία ωστενιτοποίησης	66
Εικόνα 57: Μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των διαστάσεων	67
Εικόνα 58: Φούρνος ωστενιτοποίησης.....	69
Εικόνα 59:Δοκίμια τυλιγμένα με διηθητικό χαρτί και στο κουτί πριν την είσοδο στο φούρνο	71
Εικόνα 60: Θερμοστοιχείο μέτρησης.....	72
Εικόνα 61:Τα δοκίμια 15-21 τυλιγμένα με διηθητικό χαρτί στο κουτί που θα εισέλθει στο θάλαμο ωστενιτοποίησης.....	72
Εικόνα 62: Δοκίμια 1-14 πριν και μετά την βαφή αντίστοιχα.....	73
Εικόνα 63: Δοκίμια 15-21 κατά τη βαφή.....	73
Εικόνα 64: Δεξαμενή αζώτου κατά το γέμισμα και μετά τη σύνδεση με τον κρυογενικό θάλαμο.....	75
Εικόνα 65: Δοκίμια 8-14 μετά την επαναφορά	77
Εικόνα 66: Μηχανή σκληρομέτρησης Rockwell.....	79
Εικόνα 67: Μηχανή δοκιμής Charpy	80
Εικόνα 68: Κλίμακα ένδειξης ενέργειας και δοκίμιο τοποθετημένο στη βάση της μηχανής.....	80
Εικόνα 69: Ο οδηγός της εγκοπής και το μετρητικό όργανο ποιοτικού ελέγχου	81
Εικόνα 70:Επιφάνειες θραύσης: α) θραύση μικρής παραμόρφωσης, β) μεικτή θραύση, γ) όλκιμη θραύση [35].....	82
Εικόνα 71:Διάφορες επιφάνειες θραύσης [39]	82
Εικόνα 72: Σχηματική απεικόνιση της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου Charpy V-notch	83
Εικόνα 73: Τιμές σκληρότητας μετά από κάθε επαναφορά	85
Εικόνα 74:Επιφάνειες θραύσης δοκιμίων CH1: α)1, β) 2, γ)4, δ)7	88
Εικόνα 75:Επιφάνειες θραύσης δοκιμίων DCT: α) 10, β) 11, γ)12, δ)14.....	89
Εικόνα 76:Επιφάνειες θραύσης δοκιμίων CH2: α)16, β)18, γ)19, δ)20, ε)21	90
Εικόνα 77: Επιφάνεια θραύσης δοκιμίων α)CH1, β) DCT, γ)CH2.....	92