



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΡΩΜΙΟΒΑΝΑΔΙΟΥΧΟΥ ΧΑΛΥΒΑ
HEAT TREATMENT OF CHROMIUM VANADIUM STEEL

Συγγραφέας:

ΚΑΜΙΤΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M.: 51117058

Επιβλέπων: ΙΣΙΔΩΡΟΣ ΙΑΚΩΒΙΔΗΣ

Αιγάλεω, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος: ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΧΡΩΜΙΟΒΑΝΑΔΙΟΥΧΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Συγγραφέας

ΚΑΜΙΤΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (Α.Μ.: 17058)

Επιβλέπων

ΙΣΙΔΩΡΟΣ ΙΑΚΩΒΙΔΗΣ

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

15/1/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Ιακωβίδης Ισίδωρος,

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Χιονόπουλος Σταύρος,

Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Θεοχάρη Σταματίνα,

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

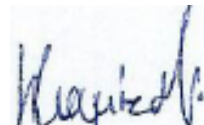
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΑΜΙΤΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ του ΝΙΚΗΤΑ, με αριθμό μητρώου 51117058 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών



ΚΑΜΙΤΣΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Ευχαριστίες

Με την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου είχαν πολύ σημαντικό ρόλο οι καθηγητές μου σε όλα τα μαθήματα, τους οποίους και οφείλω να ευχαριστήσω για τη συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου. Πιο συγκεκριμένα θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου και επιβλέποντα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, κ. Ισίδωρο Ιακωβίδη, για όλη την βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε στο πειραματικό αλλά και στο θεωρητικό μέρος της εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αναστάσιο Κωνσταντινίδη ο οποίος και βοήθησε με την κοπή του χάλυβα στα τεμάχια που χρησιμοποιήθηκαν για το πειραματικό μέρος, καθώς και τον κύριο Σταύρο Χιονόπουλο για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τελικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένειά μου, για τη συμπαράστασή τους.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως σκοπό την περιγραφή θερμικών κατεργασιών σε χάλυβα 110CrV. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στους χάλυβες, τη χρησιμότητά τους και την εξέλιξή τους στο χρόνο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ταξινόμηση των διαφόρων ειδών χάλυβα σε κατηγορίες ανάλογα με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, οι διαφορετικές χρήσεις που έχουν και τα διαφορετικά κραματικά στοιχεία που περιέχουν. Ακολουθεί μία σύντομη επισκόπηση των θεμελιωδών φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα, καθώς και σύντομη περιγραφή της επίδρασης που έχουν τα διάφορα κραματικά στοιχεία στις ιδιότητες του χάλυβα. Η παρούσα εργασία αφορά τις διάφορες θερμικές κατεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του χάλυβα. Έτσι, εξετάζονται θερμικές κατεργασίες όπως είναι η ανόπτηση, η βαφή και η επαναφορά, η διαδικασία που ακολουθείται και η επίδραση τους στη μικροδομή και σε καθορισμένες ιδιότητες του μετάλλου, όπως η σκληρότητα και η αντοχή σε κρούση. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας γίνεται αναλυτική περιγραφή των θερμικών κατεργασιών που διεξήχθησαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, των διαδικασιών που ακολουθήθηκαν και του πειραματικού προσδιορισμού συγκεκριμένων ιδιοτήτων των δοκιμίων χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

Λέξεις κλειδιά: θερμικές κατεργασίες, χάλυβας 110CrV, μηχανικές ιδιότητες χάλυβα

Abstract

The aim of this thesis is to describe the heat treatments applied to 110CrV steel. Firstly, an introduction to steels is presented which includes their usage and historical significance. Next steels are categorized into various classes based on their different characteristics, such as carbon content, diverse uses, and the various alloying elements they contain. Following that, we provide a brief overview of the fundamental physical and mechanical properties of various types of steel, as well as a brief overview of the influence of different alloying elements on the properties. The thesis is based mostly around the various heat treatment techniques used to enhance the properties of steel. Thus, we examine different processes such as annealing, quenching, and tempering, the procedures followed, and their results in terms of microstructure and various alloy properties, such as hardness and fracture toughness. The experimental section offers a detailed description of the experiments conducted within this thesis, the processes employed, and the necessary conclusions drawn from the results of our experiments.

Key words: heat treatment, 110CrV steel, mechanical properties of steel

Περιεχόμενα

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	1
1.2	Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΠΟΧΗ.....	4
2.1	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ.....	5
2.2	ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ.....	8
2.3	ΜΙΚΡΟΔΟΜΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	10
2.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	10
3.	ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ.....	14
4.	ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ.....	17
4.1	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΦΑΣΕΩΝ Fe –Fe ₃ C.....	18
4.2	ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	19
4.2.1	ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	20
4.2.2	ΠΛΗΡΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	20
4.2.3	ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	21
4.2.4	ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ.....	22
4.2.5	ΑΠΟΤΑΤΙΚΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	22
4.3	ΒΑΦΗ.....	22
4.3.1	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΑΦΗ.....	24
4.4	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ (ΤΤΤ).....	27
4.5	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΠΟΨΥΞΗΣ (CCT).....	29
4.6	ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ.....	30
5	ΧΡΩΜΙΟΒΑΝΑΔΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ.....	32
6.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	37
6.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	37
6.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	39
6.2.1	ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ.....	39
6.2.2	ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	41

6.2.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ	47
6.2.4	ΔΟΚΙΜΑΣΙΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ.....	48
6.2.5	ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ	52
6.2.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	56
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	59
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ο σίδηρος ως μέταλλο, χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για χιλιετίες σε πολλές περιπτώσεις όπως για να κατασκευάζονται όπλα, εργαλεία και διακοσμητικά αντικείμενα. Ωστόσο, η διαδικασία για τη δημιουργία του χάλυβα (κοινώς ατσάλι) όπως το γνωρίζουμε σήμερα δεν ήταν εφικτή μέχρι τον 19^ο αιώνα.

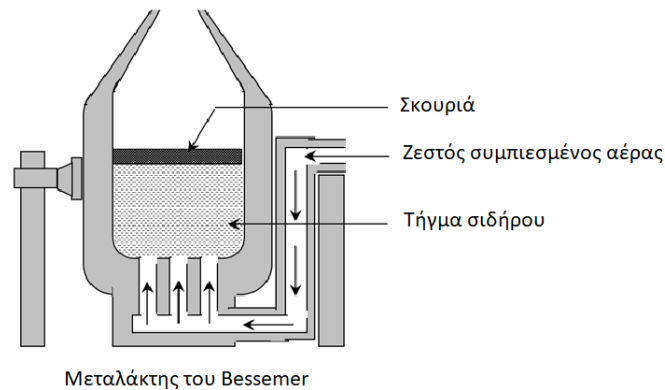
Η παραγωγή σιδήρου ξεκίνησε στην Ανατολία περίπου το 2000 π.Χ., με την εποχή του σιδήρου να ξεκινά περίπου το 1000 π.Χ. Τα επόμενα χρόνια η τεχνολογία αυτή της παραγωγής σιδήρου εξαπλώθηκε ευρέως έχοντας φτάσει το 500 π.Χ. στα δυτικά όρια της Ευρώπης και στην Κίνα. Τεμάχια σιδήρου παράγονταν, σε μικρούς φούρνους, ως συμπαγείς σβώλοι, οι οποίοι στη συνέχεια σφυρηλατούνταν εν θερμώ ώστε να διαμορφωθούν σε ράβδους. Αυτός ο σφυρήλατος σίδηρος (*wrought iron*) είναι ένα εύπλαστο υλικό που περιέχει κομμάτια σκουριάς και ξυλάνθρακα. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα αυτών των πρώιμων μορφών σιδήρου κυμαινόταν από πολύ χαμηλή (0.07 % κ.β.) έως υψηλή (0.8 % κ.β.). Ακόμα υπάρχουν στοιχεία τα οποία δείχνουν ότι από το 900 π.Χ οι Αιγύπτιοι γνώριζαν τη θερμική κατεργασία βαφής του σιδήρου, την οποία και χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή διαφόρων όπλων.

Αργότερα οι Κινέζοι έκαναν μια γρήγορη μετάβαση από την παραγωγή σιδήρου χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, σε χυτοσίδηρο υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ενώ υπάρχουν ενδείξεις ότι μπορούσαν να παράγουν θερμικά επεξεργασμένο χάλυβα κατά τη διάρκεια της πρώιμης δυναστείας Χαν (206 π.Χ.–25 μ.Χ.).

Οι Ρωμαίοι, που δεν θεωρήθηκαν ποτέ ως καινοτόμοι, βοήθησαν στη διάδοση της γνώσης της μεταλλουργίας του σιδήρου, με αποτέλεσμα η παραγωγή επεξεργασμένου σιδήρου στον ρωμαϊκό κόσμο να αυξηθεί σημαντικά. Με την πτώση της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, η κατασκευή σιδήρου συνεχίστηκε στην Ευρώπη όπως γινόταν και πριν, χωρίς καμία ιδιαίτερη αλλαγή για πολλούς αιώνες (E. F. Wente, 1999).

Ο χάλυβας (κοινώς ατσάλι), δηλαδή το κράμα σιδήρου και άνθρακα (με περιεκτικότητα σε άνθρακα < 2.0 % κ.β.) καθώς και άλλων κραματικών στοιχείων, όπως Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Al, Ti, V, Nb, W, Co, ξεκίνησε να παράγεται το 1740.

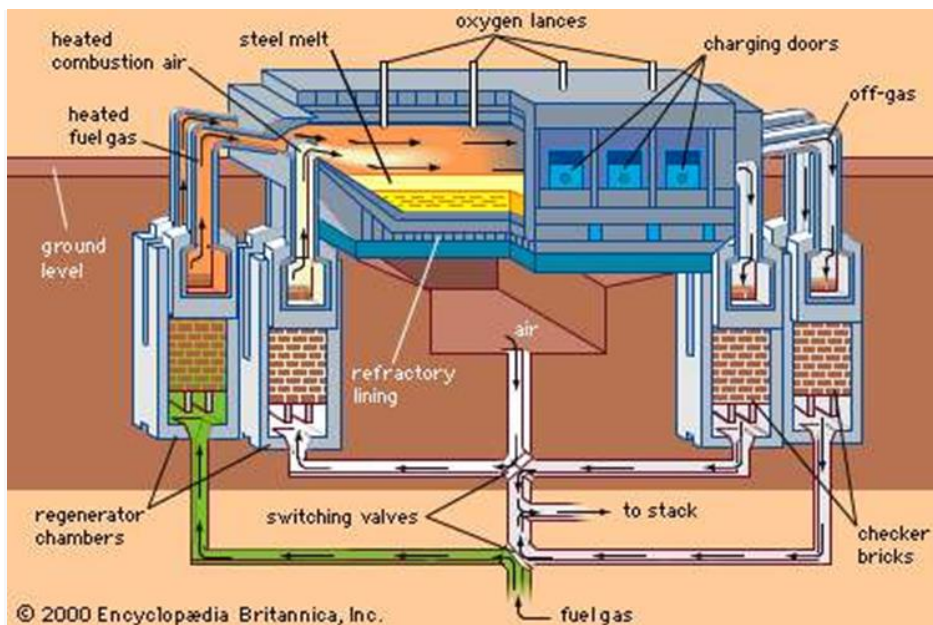
Κατά τη περίοδο της Βιομηχανικής Επανάστασης, υπήρχε μεγάλη ζήτηση για ατσάλι η οποία όλο και μεγάλωνε, για αυτό τον λόγο και αναπτύχθηκε από τον *Henri Bessemer* η ομώνυμη διαδικασία, η οποία επέτρεπε τη μαζική παραγωγή ατσαλιού με χαμηλότερο κόστος. Ο *Bessemer* πέτυχε την μετατροπή του τηγμένου χυτοσιδήρου σε χάλυβα με την εμφύσηση οξυγόνου σε έναν κάδο («μεταλλάκτη») ο οποίος είχε επένδυση από πυρίμαχα τούβλα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.



Εικόνα 1. Μεταλλάκτης του Bessemer

(πηγή: <https://faculty.uobasrah.edu.iq/uploads/teaching/1610780046.pdf>)

Ακόμα, την ίδια χρονική περίοδο ανακαλύφθηκε η μέθοδος καμίνου ανοιχτής εστίας (*Open Hearth Process* ή μέθοδος *Siemens-Martin*) για την παραγωγή χάλυβα από τηγμένο χυτοσίδηρο. Η παραγωγή χάλυβα με τη μέθοδο αυτή φαίνεται στην εικόνα 2.

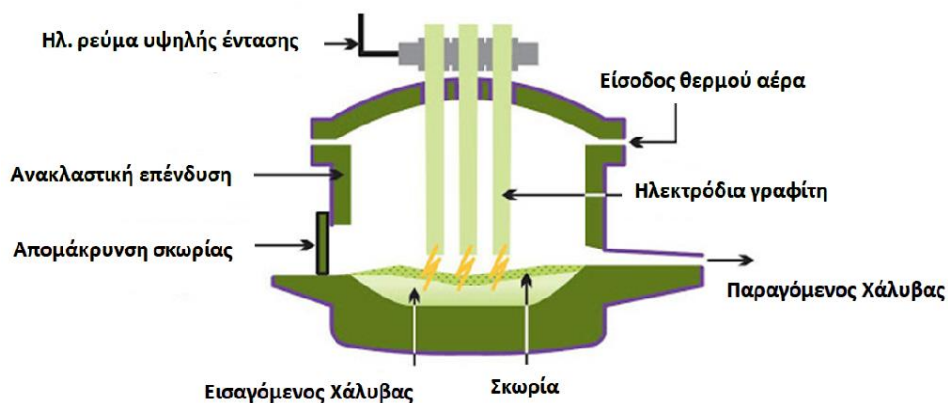


Εικόνα 2. Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου ανοιχτής εστίας (*Siemens-Martin*) για την παραγωγή χάλυβα
(πηγή: <https://www.britannica.com/technology/open-hearth-process>)

Ωστόσο σήμερα και οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν εγκαταλειφθεί σχεδόν ολοκληρωτικά ως ενεργοβόρες και μη φιλικές για το περιβάλλον.

Η χρήση του ατσαλιού συνέχισε να διευρύνεται στον 20^ο αιώνα, καθώς οι μέθοδοι παραγωγής αναπτύσσονταν, με αποτέλεσμα τη σημερινή εποχή να επικρατούν δύο βασικές μέθοδοι. Αυτές είναι η μέθοδος ηλεκτρικού τόξου (*Electric Arc Furnace*) και η μέθοδος *BF-BOF* (*Blast furnace – Basic oxygen furnace*).

Κατά την πρωτογενή παραγωγή χάλυβα, σιδηρούχο μέταλλευμα περιεκτικότητας 50–70 % κ.β. σε οξειδία του σιδήρου (FeO , Fe_2O_3 ή Fe_3O_4) θερμαίνεται σε υψικάμινο (*blast furnace*), παρουσία οπτάνθρακα (*coke*) και οξυγόνου. Ο οπτάνθρακας ανάγει το οξείδιο του σιδήρου, προς ακατέργαστο σίδηρο (*wrought iron*) σε κατάσταση τήγματος και με υψηλή περιεκτικότητα άλλων στοιχείων. Το προϊόν αυτό αποτελεί μια μορφή ακατέργαστου σιδήρου που ονομάζεται αργός σίδηρος (*pig iron*). Περίπου στους 1600 °C το τήγμα αυτό περιέχει 95% κ.β. σίδηρο, 4% άνθρακα, 0.3–0.9% πυρίτιο, 0.5% μαγγάνιο και 0.025-0.05% θείο, φώσφορο και τιτάνιο. Ως παραπροϊόν της διεργασίας τήξης στην υψικάμινο παράγεται «σκωρία» (*slug*), η οποία περιέχει πυριτικές ενώσεις και άλλες προσμίξεις, που επιπλέον στο τήγμα του μετάλλου. Ο αργός χυτοσίδηρος μεταφέρεται σε μεταλλάκτη εμφύσησης οξυγόνου, βασικής επένδυσης (*basic oxygen furnace, BOF*), όπου η περίσσεια άνθρακα οξειδώνεται από το ρεύμα του οξυγόνου και απομακρύνεται, οδηγώντας στην παραγωγή τήγματος χάλυβα. Κατά τη δευτερογενή παραγωγή χάλυβα, κομμάτια άχρηστου μετάλλου (*scrap*) τήκονται, συχνά σε κάμινο ηλεκτρικού τόξου (*electric arc furnace*) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3. Μέθοδος ηλεκτρικού τόξου
(πηγή: <https://www.irjet.net/archives/V7/i7/IRJET-V7I7436.pdf>)

Πολλά είδη χάλυβα, όπως για παράδειγμα οι ανοξείδωτοι χάλυβες, παράγονται με τήξη σε ηλεκτρική κάμινο, ενώ συχνά υποβάλλονται και σε περαιτέρω επεξεργασία, με στόχο την απομάκρυνση ποσοτήτων των περιεχομένων ακαθαρσιών, όπως ο φώσφορος και το θείο, και την παραγωγή κράματος με την απαιτούμενη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Στη συνέχεια ακολουθεί η χύτευση του τήγματος για την παραγωγή είτε τελικών προϊόντων δεδομένου σχήματος, είτε ενδιάμεσων προϊόντων, τα οποία σε επόμενο στάδιο μορφοποιούνται με κατεργασίες διαμόρφωσης όπως η έλαση και η σφυρηλάτηση (Askeland, 2018).

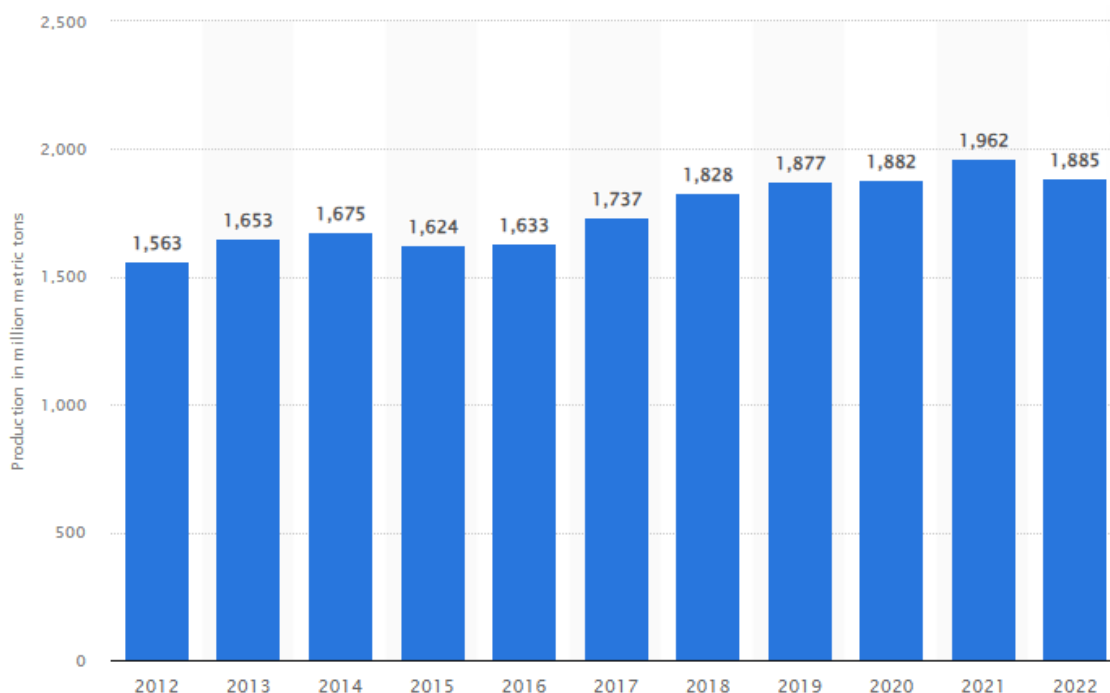
2. Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΠΟΧΗ

Ο χάλυβας είναι ένα υλικό υψηλού ενδιαφέροντος σε πολλές πτυχές της σύγχρονης βιομηχανίας. Μερικοί από τους κύριους λόγους για αυτό είναι εξαιρετική του αντοχή και ανθεκτικότητα. Ο χάλυβας μπορεί να αντέχει σε μεγάλες πιέσεις και τάσεις, ενώ συγκεντρώνει πλήθος χαρακτηριστικών που τον καθιστούν το καταλληλότερο υλικό επιλογής για την κατασκευή κτιρίων, γεφυρών και άλλων μηχανικών κατασκευών. Επίσης, ο χάλυβας είναι ένα υλικό που μπορεί να προσαρμοστεί και να πάρει πολλές μορφές και σχήματα για να ικανοποιήσει διάφορες, κατά περίπτωση, ανάγκες. Οι χρήσεις του χάλυβα καλύπτουν 7 βασικούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας (Bell, 2020; World steel association, 2023):

- Κτίρια και υποδομές (51%)
- Μηχανολογικός εξοπλισμός (15%)
- Αυτοκινητοβιομηχανία (12%)
- Μεταλλικά προϊόντα καθημερινής χρήσης (11%)
- Ναυπηγική, Αεροναυπηγική, Βιομηχανία κατασκευής οχημάτων (5%)
- Οικιακές συσκευές (3%)
- Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός (3%)

Σε σύγκριση με άλλα υλικά, ο χάλυβας έχει σχετικά μικρό κόστος παραγωγής. Ενώ ο χάλυβας απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή του, οι εξελίξεις στην

τεχνολογία παραγωγής του έχουν μειώσει αυτό το κόστος με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον είναι ένα υλικό με μεγάλη διάρκεια στον χρόνο που δεν δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στο περιβάλλον καθώς είναι ανακυκλώσιμο. Συνεπώς, ένα σημαντικό ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής χάλυβα στη σημερινή εποχή προέρχεται από ανακύκλωση. Η ανακύκλωση του χάλυβα συντηρεί φυσικούς πόρους, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και ελαχιστοποιεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η ετήσια παραγωγή χάλυβα παγκοσμίως, κατά την τελευταία δεκαετία ανέρχεται, κατά μέσο όρο, σε 1756 (± 127) εκατομμύρια μετρικούς τόνους, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4. Παγκόσμια παραγωγή χάλυβα από το 2012 έως το 2022
(πηγή: <https://www.statista.com/statistics/267264/world-crude-steel-production/>)

2.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Γενικά υπάρχουν πάρα πολλά είδη χάλυβα τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικά κριτήρια. Τα βασικά κριτήρια περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα τους σε άνθρακα, τις χρήσεις, τα κραματικά στοιχεία τα οποία περιέχουν ή κάποια άλλα χαρακτηριστικά (TotalMateria, 2001).

1) Οι κύριες κατηγορίες χάλυβα ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι:

- Χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (*low carbon steel ή mild steel*). Περιέχουν μικρό ποσοστό άνθρακα δηλαδή περίπου 0.05-0.25% και αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο χάλυβα. Αυτός ο τύπος χάλυβα έχει αρκετές εφαρμογές, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή σωλήνων, στην κατασκευή δοχείων αποθήκευσης και σε άλλες συναφείς εφαρμογές.
- Χάλυβες μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα (*medium carbon steel*): Περιέχουν ποσοστό άνθρακα 0.3%–0.45%. Η αυξημένη ποσότητα άνθρακα συνεπάγεται μεγαλύτερη σκληρότητα, αντοχή στον εφελκυσμό και υψηλή αντοχή στη διάβρωση σε σχέση με τους χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Ωστόσο οι χάλυβες αυτής της κατηγορίας εμφανίζουν μεγαλύτερη δυσκολία στην κατεργασία τους. Βρίσκουν διάφορες εφαρμογές, όπως στην κατασκευή εξαρτημάτων μηχανών.
- Χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (*high carbon steel*): Περιέχουν υψηλό ποσοστό άνθρακα δηλαδή από 0.6% έως και 1% και είναι αρκετά πιο σκληροί και ανθεκτικοί σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους χάλυβα, για αυτό και χρησιμοποιούνται για ελατήρια και καλώδια μεγάλης αντοχής.
- Χάλυβες υπερυψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (*ultrahigh-carbon steels*): Περιέχουν πολύ υψηλό ποσοστό άνθρακα 1.25–2%. Είναι χάλυβες στους οποίους η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα προσδίδει έναν μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, που δεν συναντώνται σε άλλα υλικά, όπως η πολύ υψηλή αντοχή και σκληρότητα σε συνδυασμό με καλή ολκιμότητα.

2) Οι χάλυβες μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις χρήσεις τους. Ορισμένες κοινές κατηγορίες είναι:

- Κατασκευαστικοί Χάλυβες: Αυτός ο τύπος χάλυβα χρησιμοποιείται στην κατασκευή κτιρίων, γεφυρών και άλλων κατασκευών όπως τμήματα μηχανών. Έχει σχετικά μικρό ποσοστό κραματικών στοιχείων, ενώ έχει υψηλή αντοχή.

- Εργαλειοχάλυβες: Είναι ένα είδος χάλυβα το οποίο συνήθως έχει μεγάλα ποσοστά από κραματικά στοιχεία ώστε να είναι ανθεκτικός στη φθορά, την τριβή και την παραμόρφωση. Εξαιτίας των ιδιοτήτων του χρησιμοποιείται για την κατασκευή εργαλείων όπως τρυπάνια, κοπτικά και καλούπια.
- Κατασκευαστικοί χάλυβες για την βιομηχανία οχημάτων: Αυτός ο τύπος χάλυβα χρησιμοποιείται στην κατασκευή αυτοκινήτων, συμπεριλαμβανομένων των σωμάτων, των σκελετών και των εξαρτημάτων των κινητήρων. Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα πρέπει να είναι ικανοποιητικής αντοχής και ανθεκτικός στη διάβρωση.
- Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών: Αυτό το είδος χάλυβα χρησιμοποιείται στην κατασκευή των μετασχηματιστών, γεννητριών και άλλων εξαρτημάτων ηλεκτρικού εξοπλισμού. Έχει υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση.
- Ναυπηγικοί Χάλυβες: Αποτελούν το είδος χάλυβα που χρησιμοποιείται εκτενώς στην κατασκευή πλοίων και άλλων θαλάσσιων κατασκευών. Πρέπει να έχει καλή αντοχή και να είναι ανθεκτικός στην διάβρωση στο θαλάσσιο περιβάλλον.

3) Ανάλογα με τη χημική σύστασή τους οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες. Αυτό το είδος χάλυβα είναι το πιο κοινό και διαδεδομένο. Αποτελείται κυρίως από σίδηρο με μικρή ποσότητα άνθρακα. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα οι χάλυβες αυτοί χωρίζονται στις 4 κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.
- Ανοξειδωτοί Χάλυβες: Αυτός ο τύπος χάλυβα περιέχει μεγάλο ποσοστό χρωμίου, το οποίο ενισχύει την αντοχή στη διάβρωση. Για αυτό και χρησιμοποιείται συνήθως για κατασκευές που έρχονται σε επαφή με διαβρωτικά υγρά όπως είναι οι σωληνώσεις, εναλλάκτες θερμότητας, αλλά και για οικιακές συσκευές.
- Κραματωμένοι χάλυβες.

- Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Αυτοί οι χάλυβες περιέχουν κραματικά στοιχεία που αποτελούν λιγότερο από το 8% του συνολικού τους βάρους. Αυτά τα στοιχεία προστίθενται για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Οι χάλυβες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της κατασκευής και της βιομηχανίας.

- Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες. Οι χάλυβες αυτοί διακρίνονται για την υψηλή τους περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία, η οποία και υπερβαίνει το 8%. Η κατασκευή αυτών των χάλυβων μπορεί να είναι αρκετά ακριβή και δύσκολη διαδικασία. Ωστόσο, αυτά τα είδη χάλυβα, λόγω της σκληρότητάς τους, της αντοχής τους στη διάβρωση και της ανθεκτικότητάς τους, είναι ιδανικά για την κατασκευή οχημάτων, για κατασκευαστικά εξαρτήματα και εξαρτήματα μηχανών.

2.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ

Οι σπουδαιότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες για διάφορες κατηγορίες χάλυβα φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες του χάλυβα (πηγή: <https://www.ispatguru.com/properties-of-steels/>)

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ	ΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ	ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ	ΕΡΓΑΛΕΙΟΧΑΛΥΒΕΣ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (t/m^3)	7.85	7.85	7.75-8.1	7.72-8.0
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)	190-210	190-210	190-210	190-210
ΛΟΓΟΣ POISSON	0.27-0.3	0.27-0.3	0.27-0.3	0.27-0.3
ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ($10^{-5}/K$)	11-16.6	9.0-15	9.0-20.7	9.4-15.1
ΣΗΜΕΙΟ ΤΗΞΗΣ ($^{\circ}C$)	1371-1540	1371-1540	1371-1540	1371-1540
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ($W/m\cdot K$)	24.3-65.2	26-48.6	11.2-36.7	19.9-48.3
ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ($J/kg\cdot K$)	450-2081	452-1499	420-500	
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ($10^{-9}W\cdot m$)	130-1250	200-1251	75.7-1020	

Η πυκνότητα του χάλυβα κυμαίνεται από 7.85 έως 8.05 τόνους ανά κυβικό μέτρο και αναφέρεται στη μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου.

Ο συντελεστής *Young* αποτελεί μία σημαντική μηχανική ιδιότητα του δομικού χάλυβα. Ο συντελεστής αποτελεί ένα μέτρο της ελαστικότητας ή της ικανότητας του χάλυβα να επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα μετά από κάποια ελαστική παραμόρφωση. Μεγαλύτερος συντελεστής συσχετίζεται με καλύτερη αντοχή του χάλυβα στις καταπονήσεις χωρίς να παραμορφώνεται μόνιμα. Ο συντελεστής *Young* του χάλυβα κυμαίνεται από 190 έως 210 GPa.

Η αντοχή σε εφελκυσμό ενός υλικού είναι ένα μέτρο της ικανότητάς του να αντέχει τις εφελκυστικές δυνάμεις που του ασκούνται. Η αντοχή σε εφελκυσμό του δομικού χάλυβα κυμαίνεται από 400 έως 2000 MPa.

Η αντοχή διαρροής ενός υλικού είναι ένα μέτρο της ικανότητάς του να ανθίσταται σε πλαστικές παραμορφώσεις. Είναι δηλαδή η κρίσιμη τιμή εφαρμοζόμενης τάσης σε ένα στερεό σώμα πέρα από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλέον πλαστική. Η αντοχή διαρροής του δομικού χάλυβα κυμαίνεται από 250 έως 1500 MPa.

Η θερμική αγωγιμότητα ενός υλικού είναι ένα μέτρο που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού αυτού. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμική αγωγιμότητα, τόσο καλύτερα το υλικό θα μονωθεί έναντι της μεταφοράς θερμότητας ενώ όσο αυξάνεται τόσο πιο εύκολα διαδίδεται η θερμότητα μέσα σε αυτό. Η θερμική αγωγιμότητα του δομικού χάλυβα κυμαίνεται από 25 έως 100 W/m·K.

Η σκληρότητα είναι η αντίσταση ενός υλικού στην τοπική πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, σημαίνει επίσης αντίσταση στη φθορά. Εκφράζει την αντίσταση του υλικού στη διείδυση ενός αιχμηρού αντικειμένου. Η σκληρότητα είναι σημαντική για εφαρμογές όπου το μέταλλο θα υποστεί φθορά, όπως εργαλεία.

Δυσθραυστότητα: Με αυτό τον όρο αναφερόμαστε στην ικανότητα του χάλυβα να απορροφά ενέργεια χωρίς να σπάσει. Η δυσθραυστότητα είναι σημαντική για όλες τις εφαρμογές κατά τις οποίες ο χάλυβας θα υποστεί κρούση ή κάποια απότομη φόρτιση, όπως είναι τα μηχανικά εξαρτήματα.

Αντοχή στην κόπωση: Αυτή είναι η ικανότητα ενός μετάλλου να αντιστέκεται στην αστοχία μετά από μεγάλες περιόδους επαναλαμβανόμενων κυκλικών φορτίσεων ή παραμορφώσεων. Η αντοχή στην κόπωση είναι σημαντική για εφαρμογές όπως είναι οι γέφυρες, τα αεροσκάφη και τα εξαρτήματα κινητήρων.

2.3 ΜΙΚΡΟΔΟΜΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Στους χάλυβες συναντώνται κυρίως η εδροκεντρωμένη κυβική δομή (*FCC*) και η χωροκεντρωμένη κυβική (*BCC*) (Callister, 2015). Οι φερριτικοί χάλυβες αποτελούνται από κρυστάλλους φερρίτη οι οποίες έχουν μικροδομή *BCC*, δηλαδή ένα άτομο Fe είναι τοποθετημένο σε καθεμιά από τις οκτώ κορυφές ενός κύβου και ένα επιπλέον άτομο τοποθετείται στο κέντρο του κύβου. Οι ωστενιτικοί χάλυβες, περιέχουν ως κύρια φάση τον ωστενίτη και έχουν κρυσταλλική δομή *FCC*, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα άτομο σιδήρου σε κάθε κορυφή ενός κύβου και ένα στο κέντρο καθεμιάς από τις έξι έδρες. Ο μαρτενσίτης παρουσιάζει μία διαφορετική δομή την τετραγωνική χωροκεντρωμένη (*BCT*). Είναι μία δομή παρόμοια με τη δομή *BCC*, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα άτομο σε καθεμιά από τις οκτώ κορυφές ενός ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και ένα στο κέντρο του.

Στην μικροδομή οποιουδήποτε μετάλλου εμφανίζονται πάντα διάφορες ατέλειες. Κραματικά στοιχεία όπως ο άνθρακας καταλαμβάνουν κενά στη δομή δημιουργώντας διάλυμα παρεμβολής ενώ τα υπόλοιπα κραματικά στοιχεία δημιουργούν στερεό διάλυμα αντικατάστασης. Γενικά τα κραματικά στοιχεία ευνοούν το καθένα την απόκτηση διαφορετικών δομών. Για παράδειγμα το νικέλιο και ο χαλκός ευνοούν τη δομή *FCC* ενώ στοιχεία όπως το χρώμιο, το μολυβδαίνιο και το βανάδιο ευνοούν τη δομή *BCC*.

2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Ο άνθρακας, ο οποίος αποτελεί το κύριο κραματικό στοιχείο στους χάλυβες, αυξάνει τη σκληρότητα και την αντοχή του κράματος. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα του χάλυβα ποικίλει από 0.2% έως 2.1% κ.β. θεωρητικά, αλλά οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές συνήθως περιέχουν έως και 1.5 % άνθρακα. Το ποσοστό του άνθρακα που περιέχει καθορίζει τις ιδιότητες του κάθε τύπου χάλυβα.

Έτσι, ορισμένα στοιχεία όπως είναι το χρώμιο, το νικέλιο και το μολυβδαίνιο προστίθενται συνήθως στον χάλυβα για τη βελτίωση της αντοχής του στη διάβρωση και τη φθορά. Αυτά τα στοιχεία σχηματίζουν οξειδία που δημιουργούν ένα προστατευτικό στρώμα στην

επιφάνεια του χάλυβα, εμποδίζοντάς τον να αντιδράσει με διαβρωτικούς παράγοντες από το περιβάλλον του. Η παρουσία θείου και φωσφόρου στον χάλυβα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις ιδιότητές του, καθώς αυτά τα στοιχεία κάνουν τον χάλυβα εύθραυστο και επιρρεπή σε ρωγμές, ειδικά κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Επομένως, η ποσότητα θείου και φωσφόρου στον χάλυβα ελέγχεται προσεκτικά κατά την παραγωγή του. Οι ιδιότητες του χάλυβα καθορίζονται από ποικίλους παράγοντες, καθώς εξαρτώνται από τη σύνθεση, τη δομή και τις επεξεργασίες που έχει υποστεί. Η προσθήκη κάθε στοιχείου προσδίδει στο κράμα ξεχωριστές ιδιότητες (Globalmetals, 2011).

Άνθρακας (C)

Ο άνθρακας αποτελεί το απαραίτητο και το πιο σημαντικό κραματικό στοιχείο στον χάλυβα. Είναι απαραίτητος για τη δημιουργία των καρβιδίων, ενώ επηρεάζει και τη μικροδομή που θα διαμορφωθεί. Γενικά η σκληρότητα του χάλυβα αυξάνεται με την προσθήκη άνθρακα, μέχρι περίπου το 0.65 % κ.β. Από την άλλη η αντοχή στη φθορά μπορεί να αυξηθεί σε ποσότητες έως περίπου 1.5 % κ.β. Εάν αυξηθεί παραπάνω η περιεκτικότητα σε άνθρακα τότε παρατηρείται μείωση της σκληρότητας και αύξηση της ευθραυστότητας.

Μαγγάνιο (Mn)

Το μαγγάνιο σήμερα βρίσκεται στους περισσότερους εμπορικούς χάλυβες. Αυξάνει την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες εξαλείφοντας το σχηματισμό σουλφιδίων του σιδήρου. Ακόμα το μαγγάνιο βελτιώνει τη σκληρότητα, την ολκιμότητα και την αντοχή του κράματος στη φθορά. Οι χάλυβες συχνά περιέχουν 0.30% κ.β. μαγγάνιο, με ορισμένους ανθρακούχους χάλυβες να περιλαμβάνουν έως και 1.5% κ.β.

Χρώμιο (Cr)

Όπως και το μαγγάνιο, το χρώμιο μπορεί επίσης να αυξήσει τη σκληρότητα του χάλυβα, και την αντοχή στη φθορά. Μια από τις πιο γνωστές επιδράσεις του χρωμίου στο χάλυβα είναι η αύξηση της αντοχής στη διάβρωση. Οι χάλυβες με περιεκτικότητα 10.5% κ.β. ή περισσότερο σε χρώμιο χαρακτηρίζονται ως ανοξειδωτοί χάλυβες. Οι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο

έχουν επίσης υψηλότερες κρίσιμες θερμοκρασίες στις θερμικές κατεργασίες, ενώ εξαιτίας του χρωμίου το ευτηκτικό σημείο μετατοπίζεται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις άνθρακα. Το χρώμιο ακόμα αντιδρά με τον άνθρακα σχηματίζοντας καρβίδια τύπου Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ τα οποία είναι πολύ ανθεκτικά στη φθορά και προσδίδουν στη δομή μεγάλη σκληρότητα και ανθεκτικότητα (Todić, 2017).

Πυρίτιο (Si)

Επειδή το πυρίτιο χρησιμοποιείται ως αντιοξειδωτικός παράγοντας στην παραγωγή χάλυβα, βρίσκεται σχεδόν πάντα σε κάποιο ποσοστό σε όλους τους χάλυβες. Αυξάνει ελαφρώς την αντοχή του φερρίτη, και όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα κραματικά στοιχεία μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα, ενώ βελτιώνει την αντοχή, την ελαστικότητα και την αντίσταση στα οξέα.

Βανάδιο (V)

Ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται το βανάδιο στους χάλυβες είναι το γεγονός ότι συνεισφέρει στον περιορισμό του μεγέθους των κόκκων του χάλυβα κατά τη διαδικασία της θερμικής κατεργασία και συνεπώς συνεισφέρει στην αντοχή σε φθορά και στην αύξηση της σκληρότητας του. Αυτή η αύξηση της σκληρότητας ισχύει για περιεκτικότητες μέχρι 0.05% κ.β, ενώ όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα πάνω από αυτή τη τιμή, παρατηρείται σημαντική μείωση της σκληρότητας. Έρευνες έχουν δείξει (Pant, 2020) ότι η χρήση του βαναδίου ως κραματικό στοιχείο σε περιεκτικότητα έως και 3% κ.β αυξάνει την αντοχή σε κρούση, ενώ μεγαλύτερες περιεκτικότητες δεν έχουν κάποια θετική επίδραση στις ιδιότητες του χάλυβα. Γενικά, η επίδραση αυτού του κραματικού στοιχείου στη δομή και τις ιδιότητες του χάλυβα είναι σημαντική μόνο σε χαμηλές περιεκτικότητες (μικρότερες από 3% κ.β).

Χαλκός (Cu)

Η προσθήκη χαλκού σε ποσότητες από 0.2 έως 0.5 % κ.β στους χάλυβες βελτιώνει κυρίως την αντοχή στην ατμοσφαιρική διάβρωση. Ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε μεγάλες

περιεκτικότητες ο χαλκός έχει επιζήμια επίδραση στην ποιότητα της επιφάνειας, ενώ έχει και αρνητικές επιπτώσεις στην εν θερμώ κατεργασιμότητα του χάλυβα.

Μολυβδαίνιο (Mo)

Το μολυβδαίνιο βρίσκεται γενικά σε μικρές ποσότητες στους ανοξείδωτους χάλυβες και αυξάνει τη σκληρότητα και την αντοχή τους, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακόμα χρησιμοποιείται συχνά σε ωστενιτικούς χρωμιονικελιούχους χάλυβες, καθώς προστατεύει από τη διάβρωση που προκαλείται από χλωρίδια και θειούχες ενώσεις.

Νικέλιο (Ni)

Ένα άλλο κραματικό στοιχείο που είναι αρκετά σημαντικό για τους ανοξείδωτους χάλυβες, είναι το νικέλιο. Προστίθεται σε ποσότητες μεγαλύτερες από 8% κ.β. σε ανοξείδωτους χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε χρώμιο. Σε συνδυασμό με το χρώμιο, το νικέλιο προσδίδει στους χάλυβες αυξημένη σκληρότητα και αντοχή σε κρούση και κόπωση, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση. Το νικέλιο ακόμα επιτρέπει τη μείωση των παραμορφώσεων και των ρωγμών κατά τη θερμική κατεργασία της βαφής.

Τιτάνιο (Ti)

Βελτιώνει τόσο τη μηχανική αντοχή όσο και την αντοχή στη διάβρωση, ενώ περιορίζει το μέγεθος των κόκκων ωστενίτη. Για περιεκτικότητα σε τιτάνιο 0.25–0.60% κ.β, ο άνθρακας συνδυάζεται με το τιτάνιο και σχηματίζει καρβίδια, επιτρέποντας στο χρώμιο να παραμείνει στα όρια των κόκκων και να αυξάνει την αντοχή στην οξείδωση (Bell, 2014).

3. ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Στο χώρο της ναυπηγικής, η επιλογή του χάλυβα είναι πολύ σημαντική για την κατασκευή πλοίων που να μπορούν να αντέξουν στο πολύ απαιτητικό περιβάλλον της ανοιχτής θάλασσας. Για αυτό χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι χάλυβα, καθένας από τους οποίους διαθέτει μοναδικά χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα σε συγκεκριμένες απαιτήσεις.

Σύμφωνα με τα πρότυπα του *IACS* και του *ASTM* (πρότυπο A131) οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Κοινούς χάλυβες, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις ποιότητες (*grades*) A, B, D, και E
- Χάλυβες υψηλής αντοχής, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις ποιότητες AH, DH, και EH

Τα όρια ελάχιστης αντοχής σε διαρροή και σε εφελκυσμό για τους ναυπηγικούς χάλυβες φαίνονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Ελάχιστα όρια αντοχής σε διαρροή και σε εφελκυσμό των ναυπηγικών χαλύβων (πηγή: <https://gangsteel.net/uploads/soft/150729/ASTM-A131.pdf>)

Ποιότητα χάλυβα για ελάσματα πάχους $\leq 100\text{mm}$	Ελάχιστη αντοχή σε διαρροή, σγ (MPa)	Ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό, UTS (MPa)
A-B-D-E	235	400-520
AH32-DH32-EH32-FH32	315	440-570
AH36-DH36-EH36-FH36	355	490-630
AH40-DH40-EH40-FH40	390	510-660

Η χημική σύσταση καθώς και οι αποδεκτοί βαθμοί αποξείδωσης των κοινών ναυπηγικών χαλύβων δίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Χημική σύσταση και βαθμοί αποξείδωσης των κοινών ναυπηγικών χαλύβων
(πηγή: <https://gangsteel.net/uploads/soft/150729/ASTM-A131.pdf>)

Grade	A	B	D	E	CS
Deoxidation	Killed or Semi-Killed ^A t ≤ 2.0 in. [50 mm] Killed t > 2.0 in. [50 mm]	Killed or Semi-Killed t ≤ 2.0 in. [50 mm] Killed t > 2.0 in. [50 mm]	Killed t ≤ 1.0 in. [25 mm] Killed and Fine Grain t > 1.0 in. [25 mm] ^B	Killed and Fine Grain ^B	Killed and Fine Grain ^B
Chemical composition (ladle analysis), % max, unless specified otherwise ^C					
C	0.21 ^D	0.21	0.21	0.18	0.16
Mn _{min}	2.5 × C	0.80 ^E	0.60	0.70	1.00
Si	0.50	0.35	0.10–0.35 ^F	0.10–0.35 ^F	0.10–0.35 ^F
P	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
S	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Ni	G	G	G	G	G
Cr	G	G	G	G	G
Mo	G	G	G	G	G
Cu	G	G	G	G	G
C + Mn/6	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

^A Για την ποιότητα A, είναι αποδεκτά μορφοσίδηρα και ράβδοι από χάλυβα πάχους έως και 12.5 mm.

^B Ο χάλυβας της ποιότητας D άνω των 25 mm πάχους, ο χάλυβας της ποιότητας E και ο χάλυβας της ποιότητας CS πρέπει να περιέχουν τουλάχιστον ένα στοιχείο που να δημιουργεί λεπτόκοκκη δομή (*grain refining element*) σε επαρκή ποσότητα ώστε να πληρούνται οι συνήθεις απαιτήσεις μεγέθους των κόκκων.

^C Επιπρόσθετα στοιχεία πρέπει να προσδιορίζονται και να αναφέρονται.

^D Μέγιστη περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.23 % κ.β. είναι αποδεκτή για μορφοσίδηρα και ράβδους χάλυβα ποιότητας A.

^E Για χάλυβα ποιότητας B, ψυχρής έλασης ή εφησυχασμένου, το κατώτερο όριο μαγγανίου είναι 0.60 %.

^F Όταν η περιεκτικότητα σε αλουμίνιο δεν είναι μικρότερη από 0.015 % κ.β., δεν ισχύει η ελάχιστη απαιτούμενη περιεκτικότητα σε πυρίτιο.

^G Οι περιεκτικότητες σε νικέλιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο και χαλκό πρέπει να προσδιορίζονται και να αναφέρονται. Όταν η περιεκτικότητα δεν υπερβαίνει το 0.02 % κ.β., αυτά τα στοιχεία μπορεί να αναφέρονται και ως ≤ 0.02 %.

Η χημική σύσταση καθώς και οι αποδεκτοί βαθμοί αποξείδωσης των ναυπηγικών χαλύβων υψηλής αντοχής δίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Χημική σύσταση και βαθμοί αποξείδωσης χαλύβων υψηλής αντοχής
(πηγή: <https://gangsteel.net/uploads/soft/150729/ASTM-A131.pdf>)

Grades	AH/DH/EH 32, AH/DH/EH 36 and AH/DH/EH 40	FH 32/36/40
Deoxidation	Killed, Fine Grain Practice ^A	Killed, Fine Grain Practice ^A
Chemical composition ^B (ladle analysis), % max, unless specified in range		
C	0.18	0.16
Mn	0.90–1.60 ^C	0.90–1.60
Si	0.10–0.50 ^D	0.10–0.50 ^D
P	0.035	0.025
S	0.035	0.025
Al (acid soluble), min ^{E,F}	0.015	0.015
Nb ^{F,G}	0.02–0.05	0.02–0.05
V ^{F,G}	0.05–0.10	0.05–0.10
Ti	0.02	0.02
Cu ^H	0.35	0.35
Cr ^H	0.20	0.20
Ni ^H	0.40	0.40
Mo ^H	0.08	0.08
N	...	0.009
		0.012 (if Al present)

^A Ο χάλυβας πρέπει να περιέχει τουλάχιστον ένα στοιχείο που να δημιουργεί λεπτόκοκκη δομή (*grain refining element*) σε επαρκή ποσότητα ώστε να πληρούνται οι συνήθεις απαιτήσεις μεγέθους των κόκκων.

^B Επιπρόσθετα στοιχεία πρέπει να προσδιορίζονται και να αναφέρονται.

^C Χάλυβας ποιότητας AH πάχους 12.5 mm ή μικρότερο, πρέπει να έχει ελάχιστη περιεκτικότητα σε μαγγάνιο 0.70 %.

^D Όταν η περιεκτικότητα σε αλουμίνιο δεν είναι μικρότερη από 0.015 % κ.β., δεν ισχύει η ελάχιστη απαιτούμενη περιεκτικότητα σε πυρίτιο.

^E Η συνολική περιεκτικότητα σε αλουμίνιο μπορεί να χρησιμοποιείται αντί της συνολικής περιεκτικότητας κραματικών συστατικών που είναι διαλυτά σε οξεία.

^F Η υποδεικνυόμενη ποσότητα αλουμινίου, νιοβίου και βαναδίου ισχύει όταν οποιοδήποτε από αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιείται μεμονωμένα.

^G Αυτά τα στοιχεία δεν χρειάζεται να αναφέρονται στο τεχνικό φυλλάδιο προδιαγραφών (*mill sheet*) εκτός εάν προστεθούν σκόπιμα.

^H Αυτά τα στοιχεία μπορούν να αναφέρονται και ως ≤ 0.02 % όταν η περιεκτικότητα δεν υπερβαίνει το 0.02 % κ.β.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χάλυβων φαίνονται στον πίνακα 5. Όπως φαίνεται από τις τιμές του πίνακα 5, οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν πολύ καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τους απλούς. Γι' αυτό προτιμώνται σε σχέση με τους κοινούς καθώς λόγω της υψηλής αντοχής τους χρειάζονται αρκετά μικρότερες διατομές στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους της κατασκευής, και συνεπώς μεγαλύτερη ταχύτητα και ευελιξία του πλοίου (ASTM, 2004).

Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χάλυβων
(πηγή: <https://gangsteel.net/uploads/soft/150729/ASTM-A131.pdf>)

Grade	Tensile Strength, ksi [MPa]	Yield Point, min, ksi [MPa]	Elongation, min, %, ^{A,B} in 8 in. [200 mm]	Elongation, min, %, ^{B,C} in 2 in. [50 mm]
Ordinary strength:				
A, B, D, E, CS	58 to 75 [400 to 520] ^D	34 [235]	21	24
Rivet steel and steel for cold flanging	55 to 65 [380 to 450]	30 [205]	23	26
Higher strength:				
AH32, DH32, EH32, FH32	64 to 85 [440 to 590]	46 [315]	19	22
AH36, DH36, EH36, FH36	71 to 90 [490 to 620]	51 [355]	19	22
AH40, DH40, EH40, FH40	74 to 94 [510 to 650]	57 [390]	19	22

^A Για πάχος ή διάμετρο κάτω των 8 mm, πρέπει να αφαιρεθούν από το καθορισμένο ποσοστό επιμήκυνσης 200 mm.

^B Δεν απαιτείται επιμήκυνση για τα *floor plates*.

^C Για πάχος ή διάμετρο άνω των 90 mm, πρέπει να αφαιρεθούν από το καθορισμένο ποσοστό επιμήκυνσης 50 mm.

^D Για μορφοσίδηρα και ράβδους ποιότητας A, το ανώτερο όριο αντοχής σε εφελκυσμό πρέπει να είναι 550 MPa.

4. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΣΤΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ

Τη σημερινή εποχή οι θερμικές κατεργασίες των μετάλλων είναι ένα από τα κυριότερα στάδια παραγωγής της βιομηχανίας κατασκευής των σύγχρονων κραμάτων. Ως θερμική κατεργασία ορίζουμε μία κατεργασία, κατά τη διάρκεια της οποίας ένα επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα θερμικό κύκλο ο οποίος αποτελείται σε γενικές γραμμές, από τα εξής στάδια :

- 1) Θέρμανση μέχρι την καθορισμένη επιθυμητή θερμοκρασία.
- 2) Παραμονή στην επιθυμητή θερμοκρασία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- 3) Ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι θερμικές κατεργασίες διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με τις μεταβολές στις ακόλουθες κύριες παραμέτρους:

- Θερμοκρασία
- Χρόνος παραμονής στην καθορισμένη θερμοκρασία
- Ρυθμός απόψυξης

Ακόμα το περιβάλλον θέρμανσης καθώς και το μέσο απόψυξης αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της θερμικής κατεργασίας.

Οι πιο σημαντικές κατηγορίες θερμικών κατεργασιών για τους χάλυβες είναι οι παρακάτω :

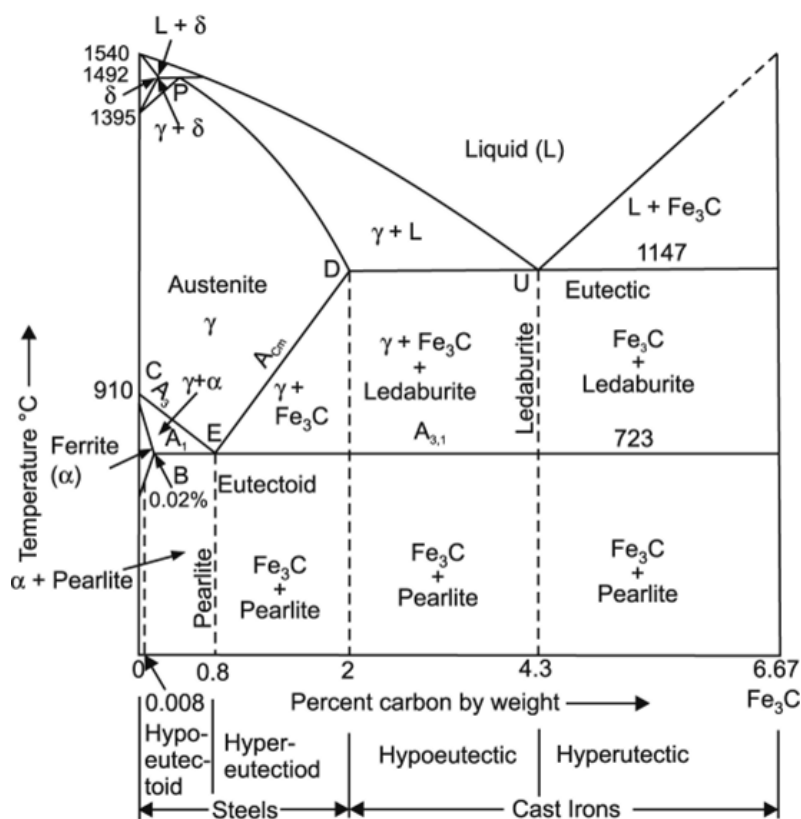
- Ανόπτηση
- Βαφή
- Επαναφορά

Γενικά, σκοπός της ανόπτησης, που γίνεται στους χάλυβες, είναι: (1) η εξάλειψη εσωτερικών τάσεων, (2) η αύξηση της ολκιμότητας και της δυσθραυστότητας, (3) η παραγωγή κάποιας καθορισμένης επιθυμητής μικροδομής.

Η βαφή εφαρμόζεται σε χαλύβδινα στοιχεία, ως θερμική κατεργασία που αποσκοπεί στην σκλήρυνσή του στοιχείου, ενώ η επαναφορά που ακολουθεί τη βαφή αποσκοπεί στην αύξηση της δυσθραυστότητας με ταυτόχρονη μικρή μείωση της σκληρότητας (Digges, 1960).

4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΦΑΣΕΩΝ Fe –Fe₃C

Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C δίνεται στην εικόνα 5 και περιγράφει το σύστημα κραμάτων σιδήρου-άνθρακα που περιέχουν έως και 6.67% κ.β. άνθρακα. Η περιεκτικότητα αυτή (6.67% κ.β. C) αντιστοιχεί στη διαμεταλλική ένωση που ονομάζεται σεμεντίτης και έχει χημικό τύπο Fe₃C. Για αυτό τον λόγο αρκετά συχνά το συγκεκριμένο διάγραμμα φάσεων χαρακτηρίζεται και ως διάγραμμα σιδήρου-σεμεντίτη (Fe-Fe₃C). Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει κυρίως το τμήμα του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε ποσοστό άνθρακα μέχρι 2.1%, καθώς αυτό αφορά τα διάφορα είδη χάλυβα.



Εικόνα 5. Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe –Fe₃C
(πηγή: https://ebrary.net/184614/engineering/iron_carbon_diagram)

Το διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C χωρίζεται σε 4 περιοχές κραμάτων μεγάλου βιομηχανικού ενδιαφέροντος :

- Τύποι σιδήρου, με ποσοστό άνθρακα από 0 έως 0.02% κ.β.

- Υποευτηκτοειδείς χάλυβες, με περιεκτικότητα σε άνθρακα $<0.77\%$ κ.β.
- Υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, με περιεκτικότητα σε άνθρακα $>0.77\%$ κ.β.
- Χυτοσίδηροι, με ποσοστό άνθρακα από 2 έως 6.67% κ.β.

Στο διάγραμμα φάσεων φαίνονται 4 βασικές στερεές φάσεις:

- Φερρίτης (α) : Στερεό διάλυμα C σε α -Fe
- Ωστενίτης (γ) : Στερεό διάλυμα C σε γ -Fe
- Σεμεντίτης (Fe_3C) : Διαμεταλλική ένωση σιδήρου-άνθρακα. Έχει ορθορομβικό κρυσταλλικό πλέγμα και περιεκτικότητα σε C ίση με 6.67% κ.β. Είναι ένα πολύ σκληρό και εύθραυστο υλικό.
- δ -Φερρίτης : Στερεό διάλυμα παρεμβολής του C σε δ -Fe

Τέλος οι κρίσιμες θερμοκρασίες που φαίνονται στο διάγραμμα είναι οι εξής:

- Άνω κρίσιμη θερμοκρασία A_3 . Είναι η θερμοκρασία κάτω της οποίας ξεκινάει ο σχηματισμός του φερρίτη από τον ωστενίτη στους υποευτηκτοειδείς χάλυβες.
- Άνω κρίσιμη θερμοκρασία A_{cm} είναι η θερμοκρασία κάτω της οποίας ξεκινάει ο σχηματισμός του σεμεντίτη από τον ωστενίτη στους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες.
- Κάτω κρίσιμη θερμοκρασία A_1 είναι η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται ο ευτηκτοειδής μετασχηματισμός και έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο φάσεων, του φερρίτη και του σεμεντίτη σε συγκεκριμένη αναλογία (Callister, Rethwisch, 2015).

4.2 ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Η ανόπτηση είναι μία θερμική κατεργασία με σχετικά μικρή ταχύτητα απόψυξης, σε σύγκριση με τη βαφή κατά την οποία η απόψυξη του υλικού γίνεται πολύ γρήγορα. Υπάρχουν πολλά είδη ανόπτησης του χάλυβα. Τα πιο σημαντικά είναι τα παρακάτω:

- (1) Ανόπτηση κατεργασίας
- (2) Πλήρης ανόπτηση

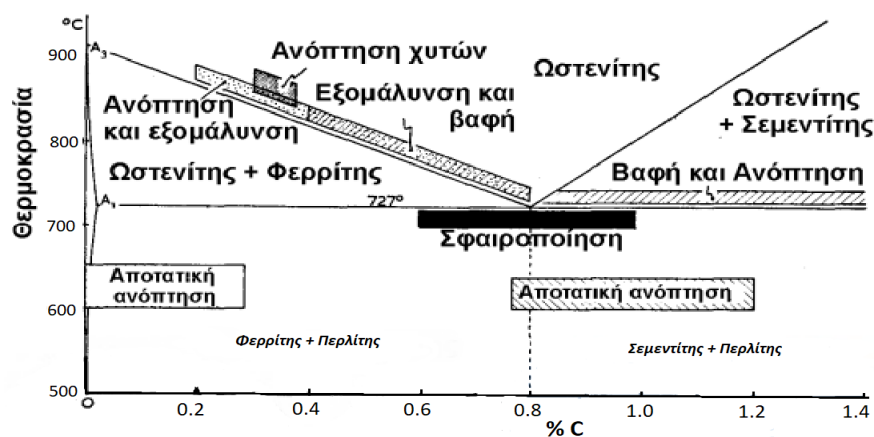
- (3) Ανόπτηση σφαιροποίησης
- (4) Ανόπτηση εξομάλυνσης
- (5) Αποτακική ανόπτηση

4.2.1 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η ανόπτηση κατεργασίας, είναι ένας κύκλος θερμικής κατεργασίας ο οποίος αποτελείται από τη θέρμανση του χάλυβα για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης δηλαδή στην περιοχή 550–650°C. Μετά τη θέρμανση ακολουθεί αργή απόψυξη του υλικού έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Είναι μία διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με κύριο στόχο την αύξηση της ολκιμότητας και της κατεργασιμότητας.

4.2.2 ΠΛΗΡΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Στην εικόνα 6 φαίνονται οι θερμοκρασίες στις οποίες πραγματοποιούνται οι διάφορες θερμικές κατεργασίες σε σχέση με το διάγραμμα φάσεων Fe-C.



Εικόνα 6. Περιοχές πραγματοποίησης των θερμικών κατεργασιών στο διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Fe-C

Κατά τη διαδικασία της πλήρους ανόπτησης ο χάλυβας θερμαίνεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε θερμοκρασία 40–50°C υψηλότερη από την ισοθερμοκρασιακή καμπύλη A₃ (βλέπε εικόνα 7) για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες (περιεκτικότητα C <0.77%) ή 40–50°C πάνω από την καμπύλη A₁ (727°C) για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες (περιεκτικότητα C >0.77%). Μετά τη θέρμανση, ακολουθεί αργή ψύξη του κράματος, η οποία και πραγματοποιείται συνήθως μέσα στο φούρνο. Ο σκοπός της πλήρους ανόπτησης είναι η αποκατάσταση της μικροδομής του χάλυβα, κάτω από συνθήκες ισορροπίας φάσεων, καθώς και η βελτίωση της κατεργασιμότητάς του. Χρειάζεται γενικά προσοχή κατά τη διαδικασία της πλήρους ανόπτησης καθώς, σε περίπτωση που θερμανθεί το υλικό για μεγάλο χρονικό διάστημα ή σε πολύ υψηλή θερμοκρασία υπάρχει περίπτωση να μην επιτευχθεί το προσδοκώμενο αποτέλεσμα και ο χάλυβας να γίνει ακατάλληλος για χρήση.

4.2.3 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΣΦΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η ανόπτηση σφαιροποίησης πραγματοποιείται σε ευτηκτοειδείς και σε υπερευτηκτοειδείς χάλυβες. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία θερμαίνεται ο χάλυβας σε θερμοκρασία περίπου 50 °C κάτω από την A₁ (650–700° C), για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα που μπορεί να φτάσει έως και τις 25 ώρες. Κύριος σκοπός της ανόπτησης αυτής είναι τροποποίηση της μορφολογίας του σεμεντίτη έτσι ώστε το υλικό να αποκτήσει καλύτερη κατεργασιμότητα σε κατεργασίες όπως είναι η τόννευση, η λείανση, το φρεζάρισμα κλπ. Κατά την κατεργασία αυτή η μορφολογία της φάσης του σεμεντίτη (Fe₃C) μεταβάλλεται από πλακοειδής σε σφαιρική μεγάλου μεγέθους, προκειμένου να μειωθεί η διεπιφάνεια μεταξύ των διαφορετικών φάσεων. Η δομή που διαμορφώνεται, η οποία λέγεται σφαιροποιημένη, περιβάλλεται από μια συνεχή μήτρα μαλακού και κατεργάσιμου φερρίτη.

4.2.4 ΑΝΟΠΤΗΣΗ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ

Η εξομάλυνση είναι μία κατεργασία που μοιάζει αρκετά με την πλήρη ανόπτηση. Κατά την κατεργασία αυτή ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασία 50 °C μεγαλύτερη από την A_3 , για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η θέρμανση ακολουθείται από σχετικά γρήγορη ψύξη του κράματος στον αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο κυριότερος σκοπός της εξομάλυνσης είναι η αύξηση της δυσθραυστότητας και της μηχανικής αντοχής του χάλυβα, κάτι που πραγματοποιείται εξαιτίας της μείωσης του μεγέθους των κόκκων και των στρώσεων φερρίτη και σεμεντίτη μέσα στον περλίτη. Ακόμα η διαδικασία της εξομάλυνσης μπορεί να βοηθήσει στην:

- Εξάλειψη του διαφορισμού σε χυτά τεμάχια (όπου διαφορισμός είναι η συγκέντρωση των προσμείξεων στα όρια των κόκκων κατά τη διαδικασία της χύτευσης).
- Εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων του τεμαχίου.
- Βελτίωση της κατεργασιμότητας του τεμαχίου.

4.2.5 ΑΠΟΤΑΤΙΚΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Η αποτατική ανόπτηση είναι μια θερμική κατεργασία κατά την οποία ο χάλυβας θερμαίνεται σε θερμοκρασίες γύρω στους 600 °C, έτσι ώστε να αποφευχθεί η ωστενιτοποίηση. Μετά την αρχική θέρμανση διατηρείται σε αυτή τη θερμοκρασία για διάστημα μεγαλύτερο από 1 ώρα και στη συνέχεια ακολουθεί αργή ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η κατεργασία αυτή έχει ως κύριο στόχο την εξάλειψη των εσωτερικών τάσεων οι οποίες προκαλούνται στο υλικό κατά τη χύτευση, τη συγκόλληση και την εν ψυχρώ μορφοποίηση του.

4.3 ΒΑΦΗ

Βαφή ονομάζεται η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης, η οποία αποτελείται από μία φάση κατά την οποία ο χάλυβας θερμαίνεται και παραμένει σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50

°C από την A₃ για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες και σε θερμοκρασία υψηλότερη κατά 50 °C από την A₁ για τους υπερευτηκτοειδείς χάλυβες, κατά τη διαδικασία της ωστενιτοποίησης. Το στάδιο της ψύξης είναι αυτό στο οποίο διαφέρει η βαφή από άλλες θερμικές κατεργασίες, καθώς γίνεται εμβάπτιση του χάλυβα μέσα σε κατάλληλο μέσο ψύξης, του οποίου η δραστηριότητα ως προς το αποτέλεσμα της βαφής, αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά: Αέρας < Λάδι < Νερό < Αλατόνερο.

Με τη βαφή βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιοτήτων του χάλυβα όπως είναι η σκληρότητα και η αντοχή. Για παράδειγμα ένας χάλυβας ο οποίος έχει σκληρότητα 150-250 HV μπορεί μετά τη βαφή να αποκτήσει σκληρότητα μέχρι και 750-800 HV.

Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης διαφέρει ανάλογα την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα και σε διάφορα άλλα κραματικά στοιχεία. Έτσι, για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες είναι μεταξύ 830 και 900 °C ενώ στους υπερευτηκτοειδείς η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται από 750 μέχρι 780 °C. Τέλος για χάλυβες μεγάλης περιεκτικότητας διάφορων στοιχείων κραματοποίησης όπως τα Cr, Mn, Ni, η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης μπορεί να ξεπεράσει τους 1000–1050° C. Ανάλογα με τη σύσταση του χάλυβα και τις διαστάσεις του τεμαχίου, ο χρόνος που θα πρέπει να παραμείνει το κράμα σε αυτή τη θερμοκρασία μπορεί να φτάσει από μερικά λεπτά μέχρι και κάποιες ώρες. Πολύ σημαντική για τα αποτελέσματα της βαφής είναι και η ταχύτητα απόψυξης του τεμαχίου καθώς επηρεάζει το βαθμό σκλήρυνσης, ενώ εξαιτίας της πολύ απότομης απόψυξης μπορεί να δημιουργηθούν ρωγμές στο υλικό εξαιτίας της απότομης ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Έτσι όσο αυξάνεται η ταχύτητα απόψυξης του υλικού, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του σε αντίθεση με την δυσθραυστότητα, η οποία μειώνεται σημαντικά, αλλά αυξάνεται και η πιθανότητα δημιουργίας ρωγμής. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από τη δραστηριότητα του μέσου απόψυξης και είναι σύμφωνη με την ακόλουθη σειρά: Αέρας < Λάδι < Νερό < Αλατόνερο. Αξίζει να σημειωθεί ότι για περιπτώσεις πολύ ισχυρά κραματωμένων χαλύβων, προκειμένου να είναι αποτελεσματική η βαφή, πρέπει το υλικό να αποψυχθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ακόμα και σε θερμοκρασίες υπό του μηδενός με μέσα απόψυξης όπως είναι ο ξηρός πάγος.

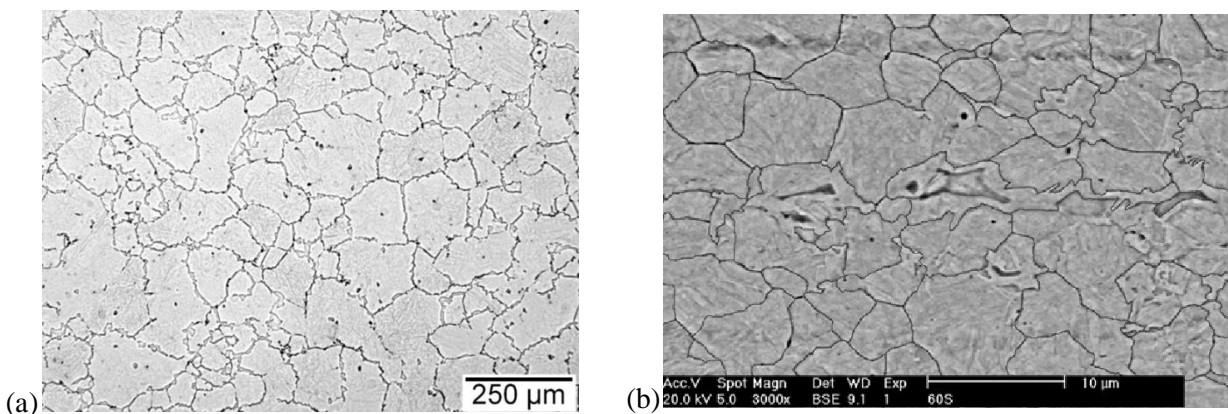
4.3.1 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΑΦΗ

Το πρώτο στάδιο στη θερμική κατεργασία της βαφής είναι η ωστενιτοποίηση, κατά την οποία:

(1) Για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες έχουμε αλλαγή της αρχικής δομής σε ωστενίτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 10, καθώς το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία $T > A_3$.

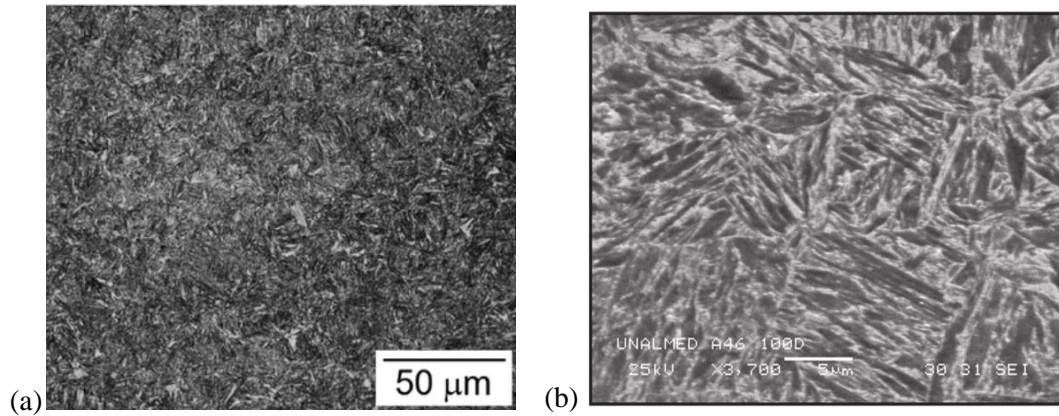
(2) Για τους υπereυτηκτοειδείς χάλυβες έχουμε μόνο μετασχηματισμό του περλίτη σε ωστενίτη, ενώ ο σεμεντίτης που βρίσκεται στα όρια των κόκκων παραμένει καθώς το υλικό θερμαίνεται σε θερμοκρασία $A_1 < T < A_3$.

Η μικροδομή που διαμορφώνεται κατά την ωστενιτοποίηση φαίνεται στην εικόνα 7. Στο επόμενο στάδιο της απόψυξης παρατηρείται ο μετασχηματισμός φάσης του ωστενίτη. Κατά τη διαδικασία της γρήγορης απόψυξης (βαφή) έχουμε τη μετατροπή του ωστενίτη σε μία αρκετά σκληρή, αλλά και σχετικά εύθραυστη μετασταθή φάση, τον μαρτενσίτη, κατά τη διάρκεια ενός μετασχηματισμού που πραγματοποιείται σε συνθήκες μη-ισορροπίας και είναι γνωστός ως μαρτενσιτικός.



Εικόνα 7. Μικροφωτογραφίες ωστενίτη (a) από οπτικό μικροσκόπιο (Optical Image) και (b) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) (πηγές: <https://thermalprocessing.com/determining-austenite-grain-size/> και https://www.researchgate.net/figure/SEM-micrograph-showing-the-austenite-grain-size-determined-at-the-intercritical_fig3_327273341)

Αυτή η ανάπτυξη του μαρτενσίτη μέσα στους κόκκους του ωστενίτη είναι σχεδόν ακαριαία και η νέα φάση που δημιουργείται παρατηρείται με τη μορφή πλακών ή βελονών, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.

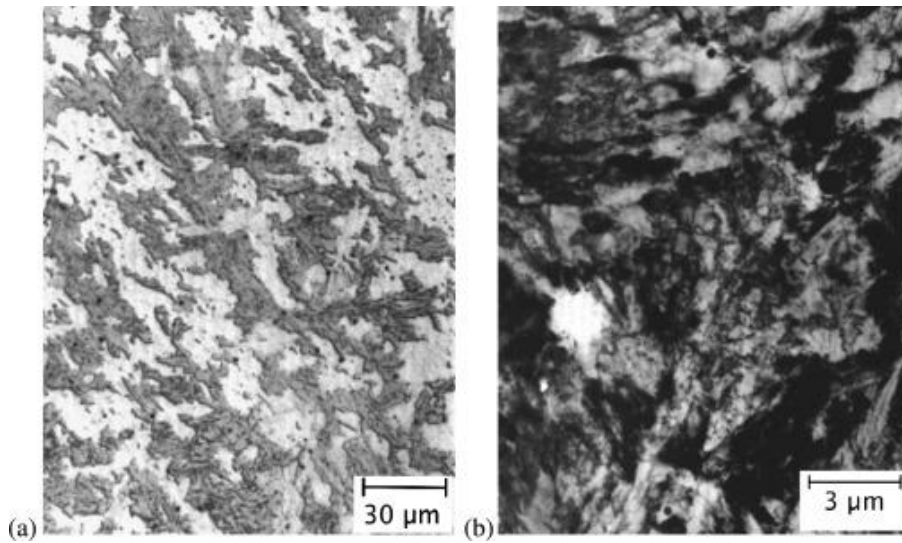


Εικόνα 8. Μικροφωτογραφίες μαρτενσίτη (a) από οπτικό μικροσκόπιο (Optical Image) και (b) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(πηγές: https://www.researchgate.net/figure/Optical-microscopy-images-of-steel-showing-a-lath-martensite-structure-and-b_fig1_347756202 και https://www.researchgate.net/figure/Martensitic-microstructure-of-MIL-A46100-steel-SEM-micrograph-3700X-nital-5-3_fig2_281039374)

Ο μαρτενσίτης έχει πολύ μεγάλη σκληρότητα, η οποία οφείλεται στην ανάπτυξη εντόνων εσωτερικών τάσεων κατά τη διαδικασία της απόψυξης καθώς και στον κορεσμό της κρυσταλλικής δομής του σε άνθρακα. Η μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους δεν είναι αποτελεσματική η βαφή για σκλήρυνση σε χάλυβες που περιέχουν λιγότερο από 0.2% C.

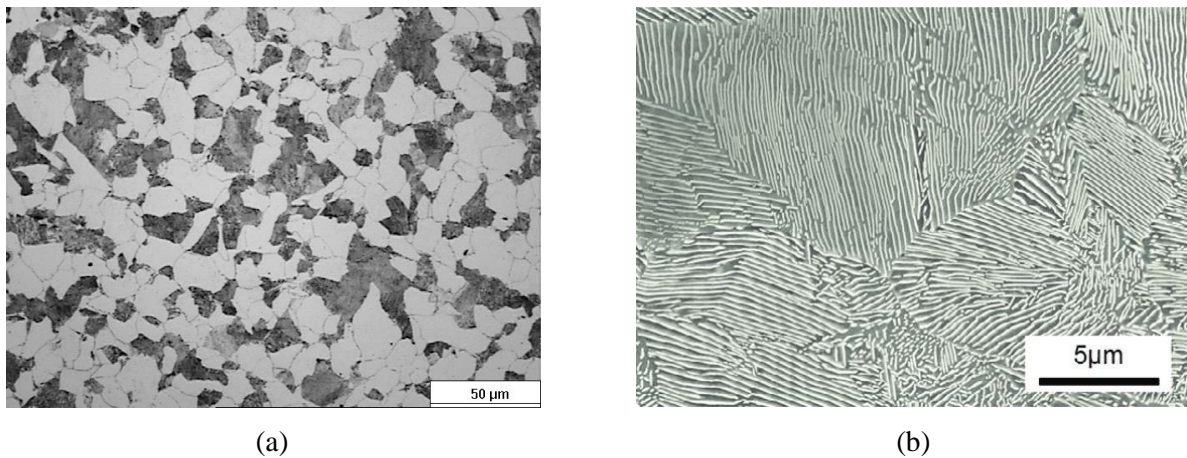
Η διαδικασία σχηματισμού του μαρτενσίτη ξεκινά όταν η θερμοκρασία του υλικού πέσει κάτω από μια καθορισμένη θερμοκρασία έναρξης M_s ενώ για να ολοκληρωθεί η μετατροπή πρέπει να συνεχιστεί η ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία τέλους του μετασχηματισμού M_f ($M_s > M_f$), καθώς αν δεν γίνει αυτό η δομή που θα προκύψει θα αποτελείται από μαρτενσίτη και ωστενίτη. Οι θερμοκρασίες M_s και M_f καθορίζονται από τη χημική σύσταση του χάλυβα και έτσι σε περιπτώσεις χαλύβων μεγάλης περιεκτικότητας σε άνθρακα ή και ισχυρά κραματωμένων χαλύβων μπορεί να έχουμε ακόμα και $M_f < 0$.

Αν η ψύξη κατά τη βαφή γίνεται με μέτρια ταχύτητα απόψυξης, καταλήγουμε σε μια δομή η οποία ονομάζεται μπαινίτης και φαίνεται στην εικόνα 9. Ο μπαινίτης έχει αρκετά χαμηλότερη σκληρότητα από το μαρτενσίτη αλλά είναι και πιο όλκιμος.



Εικόνα 9. Μικροφωτογραφίες μπαινίτη (a) από οπτικό μικροσκόπιο (Optical Image) και (b) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/bainite>)

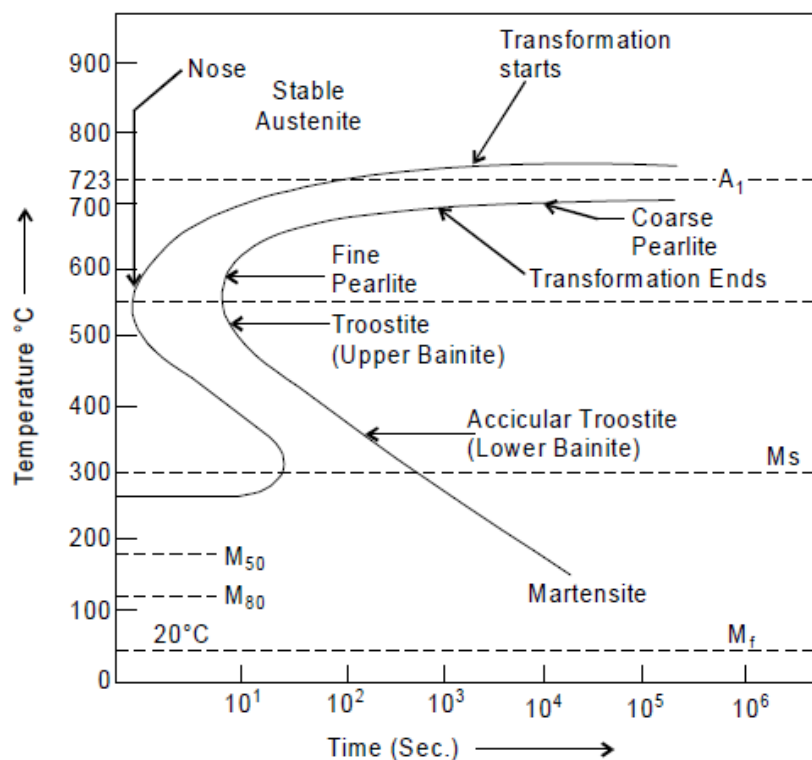
Τέλος, σε αργές ταχύτητες απόψυξης ο ωστενίτης μετατρέπεται σε περλίτη όπως φαίνεται στην εικόνα 10 (Askeland, 2018).



Εικόνα 10. Μικροφωτογραφίες περλίτη (a) από οπτικό μικροσκόπιο (Optical Image) και (b) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(πηγές: <https://www.researchgate.net/publication/286889962> *The effects of initial microstructure and heat treatment on the core mechanical properties of carburized automotive steels* και <https://www.researchgate.net/publication/241123983> *Fatigue limit evaluation considering crack initiation in lamellar pearlitic steel*)

4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΙΣΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ (TTT)

Τα διαγράμματα ισοθερμοκρασιακού μετασχηματισμού ή αλλιώς διαγράμματα TTT (Μετασχηματισμού-Χρόνου-Θερμοκρασίας) είναι γραφικές παραστάσεις που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των μετασχηματισμών φάσεων που συμβαίνουν σε ένα κράμα το οποίο αποψύχεται σε σταθερή θερμοκρασία με την πάροδο του χρόνου. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 11 για υποευτηκτοειδή χάλυβα.



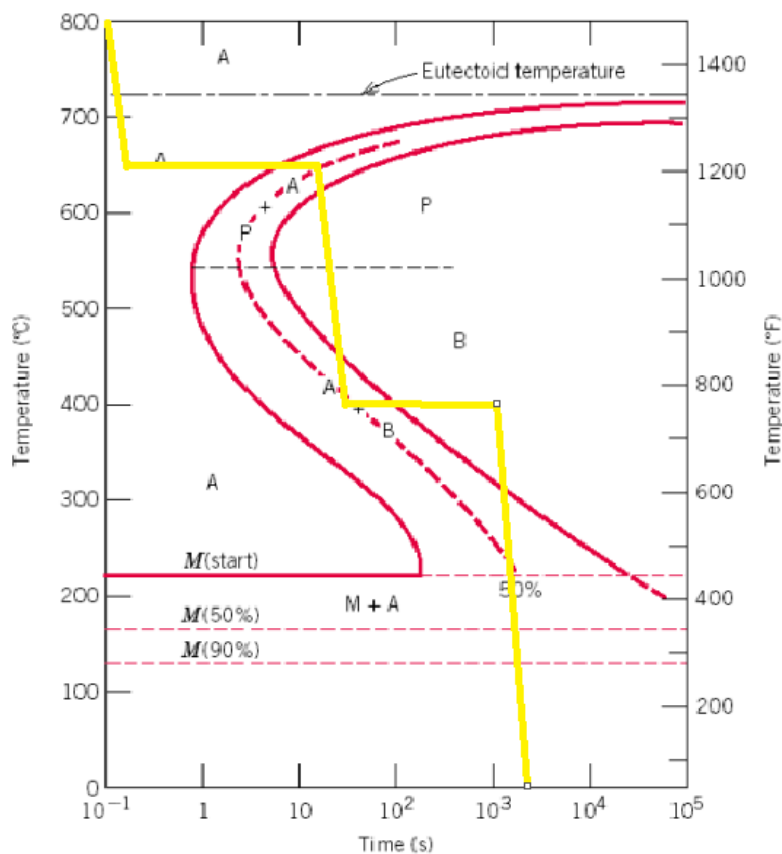
Εικόνα 11. Διάγραμμα TTT υποευτηκτοειδούς χάλυβα
(πηγή: <https://mechtechguru.com/2020/08/ttt-curve/>)

Το διάγραμμα TTT κατασκευάζεται με την εκτέλεση πειραμάτων ελεγχόμενης ψύξης σε ένα δείγμα του κράματος. Η ψύξη γίνεται σε μια συγκεκριμένη σταθερή θερμοκρασία και η πρόοδος του μετασχηματισμού καταγράφεται συναρτήσει του λογαρίθμου του χρόνου. Το διάγραμμα TTT υποδεικνύει την έναρξη και την ολοκλήρωση ενός συγκεκριμένου μετασχηματισμού. Δείχνει επίσης ποιο ποσοστό του ωστενίτη μετασχηματίζεται και σε ποια νέα φάση, για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Για παράδειγμα, δίνεται η ακόλουθη θερμική κατεργασία για ευτηκτοειδή χάλυβα:

- 1) Ταχεία ψύξη μέχρι τους 650 °C
- 2) Διατήρηση στους 650 °C για 20 δευτερόλεπτα
- 3) Ταχεία ψύξη στους 400 °C
- 4) Διατήρηση στους 400 °C για 1000 δευτερόλεπτα
- 5) Ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου

Στην εικόνα 12 φαίνεται και η διαγραμματική αναπαράσταση (διάγραμμα TTT) της παραπάνω διαδικασίας.

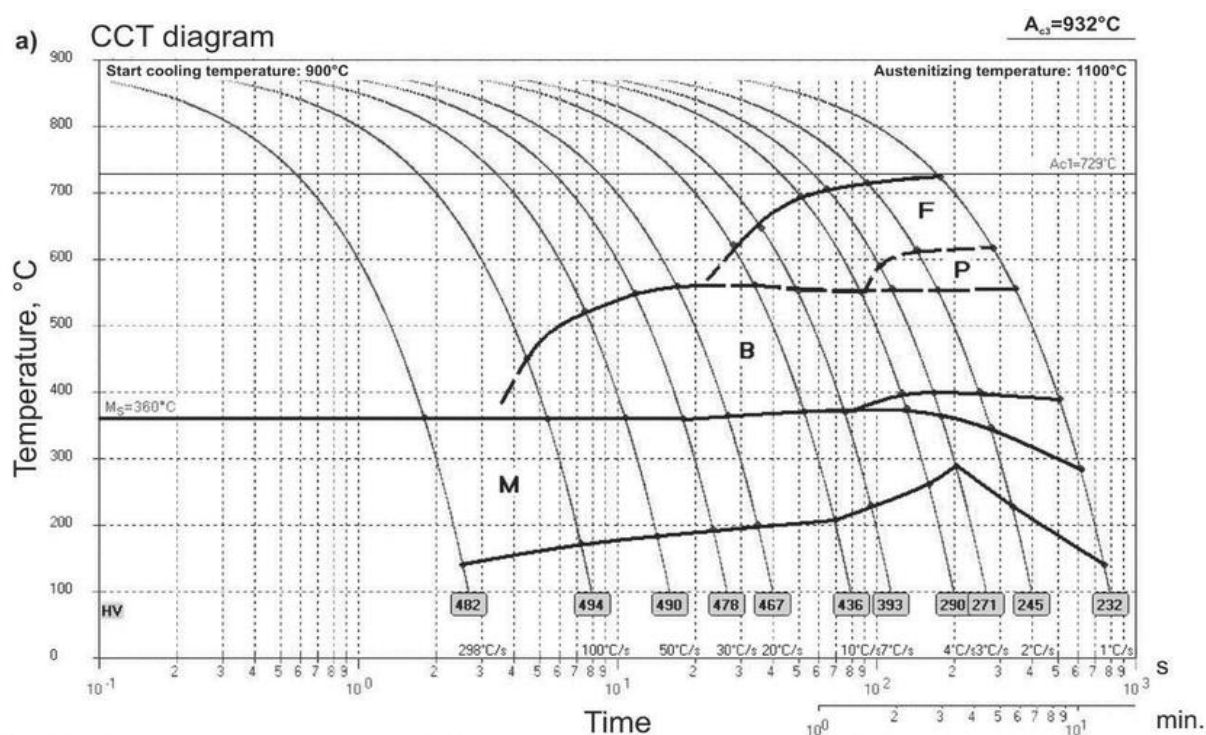


Εικόνα 12. Παράδειγμα χρήσης διαγράμματος TTT για ευτηκτοειδή χάλυβα

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι αρχικά έχουμε μετασχηματισμό ωστενίτη σε 50% περλίτη + 50% ωστενίτη, στο στάδιο 2 και κατά τη δεύτερη φάση ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετατρέπεται σε μαινίτη. Οπότε τελικά προκύπτει χάλυβας του οποίου η μικροδομή αποτελείται από 50% μαινίτη και 50% περλίτη.

4.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΠΟΨΥΞΗΣ (CCT)

Τα διαγράμματα CCT (εικόνα 13) είναι ιδιαίτερα χρήσιμα καθώς μας βοηθούν να επιλέξουμε την κατάλληλη ταχύτητα απόψυξης μίας θερμική κατεργασίας, προσδίδοντας στο δοκίμιο μας την επιθυμητή δομή και ιδιότητες. Τα διαγράμματα αυτά είναι γραφικές αναπαραστάσεις που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των μετασχηματισμών φάσης που συμβαίνουν σε ένα κράμα καθώς υφίσταται συνεχή ψύξη με ποικίλους ρυθμούς και οι οποίοι καταγράφονται βάσει μετρήσεων μεταβολής των διαστάσεων του δοκιμίου λόγω διαστολής ή συστολής. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα ακόμα φαίνεται η έναρξη και η ολοκλήρωση κάθε μετασχηματισμού, καθώς και το ποσοστό του ωστενίτη που έχει μετασχηματιστεί κατά τη θερμική κατεργασία σε χάλυβες. Τα διαγράμματα TTT με τα CCT διαφέρουν καθώς τα πρώτα δείχνουν το μετασχηματισμό ενός υλικού σε σταθερή θερμοκρασία ενώ ψύχεται με διαφορετικούς ρυθμούς, ενώ τα διαγράμματα CCT δείχνουν το μετασχηματισμό σε διαφορετικές θερμοκρασίες ενώ ψύχεται με σταθερό ρυθμό (Askeland, 2018).



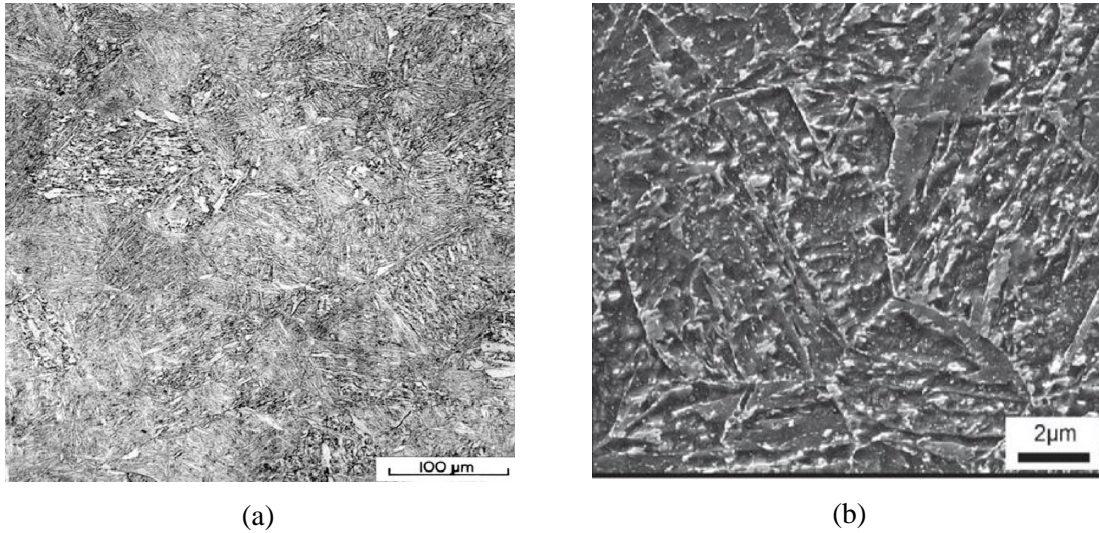
Εικόνα 13. Διαγράμματα CCT χάλυβα
(πηγή: https://www.researchgate.net/figure/The-CCT-diagram-of-the-steel-a-and-the-structures-obtained-after-cooling-the-specimens_fig4_268220718)

4.6 ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ

Η επαναφορά είναι μία θερμική κατεργασία που αποσκοπεί στην αύξηση της αντοχής του κράματος, βελτιώνοντας τη δυσθραυστότητά του και κάνοντάς το λιγότερο ψαθυρό. Η επαναφορά η οποία, ως κατεργασία συνήθως ακολουθεί τη βαφή, είναι η επαναθέρμανση του χάλυβα σε θερμοκρασία μικρότερη της A_1 (συνήθως χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες 250–650 °C) για ένα διάστημα μερικών ωρών και έπειτα γίνεται ομαλή ψύξη του κράματος σε λάδι, αέρα ή ακόμα και μέσα στο φούρνο. Κατά την επαναθέρμανση του υλικού πραγματοποιούνται οι παρακάτω μεταβολές:

- (1) Σε θερμοκρασίες μικρότερες των 250 °C τα εγκλωβισμένα άτομα του άνθρακα που βρίσκονται μέσα στον μαρτενσίτη, διαχέονται έξω από αυτόν και εφόσον ενωθούν με τον σίδηρο σχηματίζουν καρβίδια. Αυτό οδηγεί στη μείωση της περιεκτικότητας του μαρτενσίτη σε άνθρακα. Ακόμα παρατηρείται μείωση των εσωτερικών τάσεων και της σκληρότητας του υλικού, που συνοδεύεται από αύξηση της δυσθραυστότητας.
- (2) Για θερμοκρασίες από 250 έως 350 °C ο υπολειπόμενος ωστενίτης μετατρέπεται σε μπαινίτη ή μαρτενσίτη.
- (3) Αν αυξηθεί ο χρόνος επαναφοράς και έχουμε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 350 °C, τότε υπάρχει αύξηση του μεγέθους των καρβιδίων και σχηματισμός σεμεντίτη, που οδηγεί σε περαιτέρω μείωση της σκληρότητας του χάλυβα. Μετά την επαναφορά, το κράμα θα αποτελείται από μαρτενσίτη χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και από καρβίδια. Μια τέτοια δομή ονομάζεται “μαρτενσίτης από επαναφορά” και η μικροδομή του φαίνεται στην εικόνα 14.
- (4) Τέλος για τους ισχυρά κραματωμένους χάλυβες παρατηρείται αύξηση της σκληρότητας για θερμοκρασίες επαναφοράς γύρω στους 550 °C. Κάτι τέτοιο οφείλεται στα καρβίδια που σχηματίζουν τα κραματικά στοιχεία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται δευτερογενής σκλήρυνση. Από την άλλη, για θερμοκρασίες από 250–400 °C παρατηρείται σημαντική μείωση της δυσθραυστότητας του κράματος, λόγω της δημιουργίας ψαθυρών

σωματιδίων στα όρια των κόκκων του υλικού. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “ψαθυροποίηση κατά την επαναφορά” (Askeland, 2018).



Εικόνα 14. Μικροφωτογραφίες Μαρτενσίτη από επαναφορά (Tempered martensite)(a) από οπτικό μικροσκόπιο (Optical Image) και (b) από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)(πηγές: <https://www.researchgate.net/publication/310474962> *Welding metallurgy of martensitic advanced high strength steels during resistance spot welding* και <https://www.researchgate.net/publication/222267667> *Ferritic steels for next-generation reactors*)

5 ΧΡΩΜΙΟΒΑΝΑΔΙΟΥΧΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Οι χρωμιοβαναδιούχοι χάλυβες χαρακτηρίζονται από την παρουσία χρωμίου και βαναδίου ως βασικών κραματικών στοιχείων, τα οποία προσδίδουν τέτοιες ιδιότητες ώστε να είναι κατάλληλοι για μια ποικιλία απαιτητικών εφαρμογών. Κραματικά στοιχεία όπως το νικέλιο, το μολυβδαίνιο και ο χαλκός αυξάνουν τη σκληρότητα αυτών των χαλύβων ενώ ταυτόχρονα μειώνουν σημαντικά την ολκιμότητα. Η παρουσία των στοιχείων που προαναφέρθηκαν επηρεάζει και το αποτέλεσμα της θερμικής κατεργασίας. Είναι γνωστό ότι χρώμιο σχηματίζει καρβίδια στους χάλυβες και αυξάνει το όριο ελαστικότητας, την αντοχή σε εφελκυσμό και τη σκληρότητα του χάλυβα ενώ ελαττώνει την ολκιμότητα του (Davis, 1998). Ακόμα το χρώμιο σταθεροποιεί τη δομή μαρτενσίτη και αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση του χάλυβα, αν και για να γίνει αυτό απαιτείται η περιεκτικότητα του χάλυβα σε χρώμιο να υπερβαίνει το 12% κ.β. Το βανάδιο, ακόμη και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις, αυξάνει την αντοχή στην κρούση, την αντοχή στην κόπωση καθώς και την αντοχή στην τριβή. Σε χάλυβες Cr-Mo-V έχει βρεθεί ότι το βανάδιο ως κραματικό στοιχείο ευνοεί σημαντικά το σχηματισμό καρβιδίων (Huang, 2022). Η ποσότητα και το μέγεθος των κόκκων των καρβιδίων αυξάνεται αναλογικά με την περιεκτικότητα του χάλυβα σε βανάδιο, για περιεκτικότητες που φτάνουν μέχρι και 1.25% κ.β. Αυξημένες ποσότητες καρβιδίων οδηγούν σε υψηλότερη αντοχή του χάλυβα, άλλα και σε χαμηλότερη επιμήκυνση θραύσης καθώς αυξάνεται το ποσοστό του βαναδίου. Ακόμα το όριο θραύσης και η αντοχή σε εφελκυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε V.

Σύμφωνα με την *SAE-AISI (Society of Automotive Engineers-American Iron and Steel Institute)* οι χάλυβες κατηγοριοποιούνται σε διάφορους τύπους με βάση έναν τετραψήφιο κωδικό (Azo materials, 2012). Το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει τα κύρια κραματικά στοιχεία και προσδιορίζει τη σειρά του χάλυβα. Στην περίπτωση των χαλύβων χρωμίου-βαναδίου, ο κωδικός *SAE-AISI* είναι 6XXX (σειρά 6 χιλιάδες), όπου τα 3 επόμενα X υποδεικνύουν την ακριβή σύνθεση και τη θερμική κατεργασία που έχει υποστεί ο χάλυβας.

Οι χρωμιοβαναδιούχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται για ελατήρια διαφόρων τύπων, γρανάζια, άξονες, κοχλίες και βίδες, εξαρτήματα μηχανημάτων καθώς και ράγες γερανών (Khurmi, Gupta, 2005). Η χημική τους σύσταση φαίνεται στον πίνακα 6.

Πίνακας 6. Χημική σύσταση χρωμοβαναδιούχων χαλύβων

ΚΡΑΜΑΤΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	WT.%
ΑΝΘΡΑΚΑΣ, C	0.15-0.54 %
ΧΡΩΜΙΟ, Cr	0.4-1.2 %
ΣΙΔΗΡΟΣ, Fe	96.9-98.8 %
ΜΑΓΓΑΝΙΟ, Mn	0.4-1.0 %
ΦΩΣΦΟΡΟΣ, P	0.035 %
ΠΥΡΙΤΙΟ, Si	0.15-0.3 %
ΘΕΙΟ, S	0.04 %
ΒΑΝΑΔΙΟ, V	0.1-0.15 %

Οι ιδιότητες των χαλύβων χρωμίου-βαναδίου μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τη συγκεκριμένη σύσταση του κράματος, τη θερμική κατεργασία και την επεξεργασία που έχει υποστεί. Ορισμένες τιμές για τις κυριότερες ιδιότητες των χρωμοβαναδιούχων χαλύβων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7. Κυριότερες ιδιότητες χρωμοβαναδιούχων χαλύβων

(πηγή : <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=449aa27cc2bb4fee94767c3ee0ad0cc6>)

ΦΥΣΙΚΕΣ / ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	ΤΙΜΗ
Πυκνότητα, g/cm ³	7.85 - 7.86
Σκληρότητα Brinell	170 - 363
Σκληρότητα Rockwell C	13.0 - 40.0
Σκληρότητα Vickers	207 - 384
Όριο θραύσης, MPa	670 - 1240
Όριο διαρροής, MPa	415 - 1230
Επιμήκυνση στο όριο θραύσης, %	14.5 - 23.0
Μέτρο ελαστικότητας, GPa	205 - 207
Συμπίεστικότητα, GPa	160
Λόγος Poisson	0.290
Κατεργασιμότητα, %	55.0 - 60.0
Συντελεστής διάτμησης, Gpa	80.0
Αντοχή σε κρούση, J	27.0 - 35.0
Ειδική αντίσταση, ohm-cm	0.0000234
Ειδική θερμοχωρητικότητα, J/g-°C	0.475
Θερμική αγωγιμότητα, W/m-K	46.6

Το βασικό μειονέκτημα αυτών των χαλύβων είναι η μικρή τους αντοχή σε κρούση η οποία ωστόσο μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη βαναδίου, αλλά και με κατάλληλη θερμική κατεργασία από την οποία θα προκύψει και η επιθυμητή μικροδομή. Έτσι, εφαρμόζοντας τον βέλτιστο ρυθμό ψύξης κατά την θερμική κατεργασία, είναι δυνατόν να αποφευχθεί ο περλιτικός και ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός (Pant, 2020). Επιπροσθέτως, ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει σημαντικά τις τιμές της σκληρότητας. Με την αύξηση του ρυθμού ψύξης αυξάνεται σταδιακά και η σκληρότητα. Ειδικά για το ρυθμό ψύξης στον οποίο πραγματοποιείται ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, παρατηρείται μεγάλη αύξηση της σκληρότητας για τους χρωμιοβαναδιούχους χάλυβες. Πέρα από το ρυθμό ψύξης, η σκληρότητα αυξάνεται και εξαιτίας του χρωμίου και του βαναδίου. Το βανάδιο έχει μεγαλύτερη επίδραση στη σκληρότητα του περλίτη, ενώ το χρώμιο αυξάνει τη σκληρότητα του μαρτενσίτη. Η σκληρότητα τους εξαρτάται έντονα και από την μετασχηματισμένη μικροδομή. Έτσι για λεπτόκοκκες δομές με μεγάλα ποσοστά μαρτενσίτη η σκληρότητα είναι μεγαλύτερη (Niu, 2016).

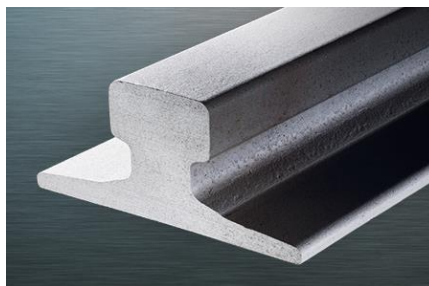
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε χάλυβας τύπου 110CrV με την ακόλουθη χημική σύσταση:

- Άνθρακας (C) = 0.50% - 0.85% (κ.β.)
- Πυρίτιο (Si) = 0.15% - 0.50% (κ.β.)
- Μαγγάνιο (Mn) = 0.9% - 1.30% (κ.β.)
- Χρώμιο (Cr) = 0.40% - 0.60% (κ.β.)
- Βανάδιο (V) = 0.06% - 0.20% (κ.β.)
- Φώσφορος (P) = 0.04% (κ.β.)
- Θείο (S) = 0.03% (κ.β.)

Ο συγκεκριμένος χάλυβας αποτελεί ένα κράμα που επιλέγεται για μηχανικές κατασκευές που δέχονται υψηλές καταπόνησης. Η αυξημένη περιεκτικότητά του σε άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη σκληρότητα και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, καθιστώντας το ιδανική επιλογή για εξαρτήματα που υπόκεινται σε σημαντική καταπόνηση και φθορά. Επιπλέον, η παρουσία χρωμίου και βαναδίου τον καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές στις οποίες το υλικό πρέπει να αντέχει σε ξαφνικούς κραδασμούς.

Ο χάλυβας 110CrV χρησιμοποιείται σε αρκετές εφαρμογές, καθώς η σύνθεσή του τον καθιστά κατάλληλο για μια σειρά χρήσεων, όπως είναι η κατασκευή βαρέων μηχανημάτων,

βιομηχανικού εξοπλισμού και εξειδικευμένων εργαλείων. Ακόμα τα τελευταία χρόνια, και συγκεκριμένα από το 2020, έχει παρατηρηθεί μία όλο και αυξανόμενη τάση στη χρήση χάλυβα 110CrV για την κατασκευή ραγών για γερανούς σε λιμάνια, ναυπηγεία αλλά και σε πλοία. Έχει παρατηρηθεί μια αυξανόμενη τάση για χρήση χάλυβα 110CrV στην Άπω Ανατολή, συμπεριλαμβανομένων των διεθνών λιμένων στο *Kowloon*, τη Σιγκαπούρη και τη Σαγκάη. Η ζήτηση ωστόσο είναι ευρέως διαδεδομένη και στην Ευρώπη και συγκεκριμένα έχουν αναφερθεί χρήσεις αυτού σε λιμάνια στο Μπέλφαστ, τη Βαρκελώνη και το Λονδίνο. Η ράγα γερανού η οποία φαίνεται στην εικόνα 15 και είναι κατασκευασμένη από χάλυβα 110CrV, διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις τυπικές ράγες, εξαιτίας της προσθήκης χρωμίου και βαναδίου. Έτσι ο χρόνος μεταξύ των αντικαταστάσεων σιδηροτροχιών παρατείνεται. Ακόμα, η αντοχή και η ανθεκτικότητα του συγκεκριμένου χάλυβα επιτρέπουν τη μεταφορά πολύ βαριών φορτίων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς οι ράγες αυτές τοποθετούνται στο έδαφος και επιτρέπουν σε τεράστιους γερανούς να κινούνται δίπλα σε πλοία, ώστε να μπορούν να ξεφορτώνουν εμπορευματοκιβώτια (*containers*) στην αποβάθρα. Οι ίδιοι οι γερανοί έχουν λόγω κατασκευής μεγάλο βάρος και όταν μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια, οι ράγες εκτίθενται συνεχώς σε εξαιρετικά βαριά φορτία. Εξαιτίας των πλεονεκτημάτων του συγκεκριμένου χάλυβα και της αυξανόμενης ζήτησης της αγοράς αναμένεται η χρησιμοποίησή του στο μέλλον, σε όλο και περισσότερες εφαρμογές (British Steel, 2023).



Εικόνα 15. Ράγα γερανού κατασκευασμένη από χάλυβα 110CrV.
(πηγή: <https://britishsteel.co.uk/what-we-do/special-profiles/crane-rail/>)

Το ισοδύναμο άνθρακα είναι ένας δείκτης ο οποίος χρησιμοποιείται για να εκφράζει το σύνολο των ιδιοτήτων του χάλυβα (αντοχή, σκληρότητα, δυσθραυστότητα, συγκολλητότητα) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση 1.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%) \quad (1)$$

$$\text{Έτσι για τον χάλυβα 110CrV έχουμε } C_{eq} = 0.75 + \frac{1.1}{6} + \frac{0.5+0.13}{5} = \mathbf{1.059}$$

Ο δείκτης P_{cm} δίνει πληροφορίες σχετικά με την επιδεκτικότητα του χάλυβα σε ψυχρή θραύση και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση 2.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \text{ (\%)} \quad (2)$$

Έτσι για τον χάλυβα 110CrV έχουμε:

$$P_{cm} = 0.75 + \frac{0.325}{30} + \frac{1.1}{20} + \frac{0.5}{20} + \frac{0.13}{10} = \mathbf{0.854}$$

Οι τιμές αυτών των δεικτών δείχνουν ότι ο χάλυβας 110CrV εμφανίζει πολύ διαφορετικές ιδιότητες και μηχανική συμπεριφορά από τους κατασκευαστικούς ναυπηγικούς χάλυβες. Οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές του C_{eq} για ναυπηγικούς χάλυβες υψηλής αντοχής δίνονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8. Ισοδύναμο άνθρακα για ναυπηγικούς χάλυβες υψηλής αντοχής πάχους έως 100 mm
(πηγή: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/216-NR_2023-07.pdf)

Steel grade	Carbon equivalent C_{EQ} max. (%) (1)	
	$t \leq 50$	$50 < t \leq 100$
AH32, DH32, EH32, FH32	0,36	0,38
AH36, DH36, EH36, FH36	0,38	0,40
AH40, DH40, EH40, FH40	0,40	0,42
t = thickness (mm)		

Παρατηρείται λοιπόν ότι η τιμή της ισοδύναμης περιεκτικότητας σε άνθρακα για το χάλυβα 110CrV είναι αρκετά υψηλότερη από τις τιμές που εμφανίζουν οι κατασκευαστικοί ναυπηγικοί χάλυβες. Για αυτό το λόγο, ο συγκεκριμένος χάλυβας χαρακτηρίζεται ως χάλυβας ειδικών απαιτήσεων και είναι κατάλληλος για μηχανολογικές κατασκευές στις οποίες το κύριο ζητούμενο είναι η αντοχή στη φθορά και η αντοχή σε υψηλά φορτία και όχι η ελαστικότητα και η ολκιμότητα.

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε εμπορικά διαθέσιμος χάλυβας 110CrV. Δοκίμια ορθογωνικού σχήματος και διαστάσεων 550 x 20 x 5 (mm) προέκυψαν από την κοπή του χάλυβα σε πριονοκορδέλα.

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο τεχνολογίας υλικών του ΠΑΔΑ. Για τις θερμικές κατεργασίες χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός φούρνος Thermolyne. Για τη καταγραφή της θερμοκρασίας των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε θερμοζεύγος χρωμονικελίνης, συνδεδεμένο με κοινό ψηφιακό πολύμετρο. Οι μετρήσεις ανάλυσης XRF έγιναν στην πειραματική συσκευή του εργαστηρίου φυσικής του ΠΑΔΑ, ενώ η ανάλυση EDS έγινε σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο JEOL JSM-6510 LV εφοδιασμένο με κατάλληλο λογισμικό της *Oxford Instruments*. Η σκληρομέτρηση έγινε σε σκληρόμετρο τύπου Zwick. Η δοκιμασία κρούσης κατά *Izod*, έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 23 °C με κρουσίμετρο τύπου *Avery-Denison* εφοδιασμένο με σφύρα μάζας 2.5 Kg. Η ταχύτητα πρόσκρουσης κατά τη δοκιμασία αντοχής σε κρούση ήταν 3.46 m/s. Οι μικροφωτογραφίες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (*SEM*) ελήφθησαν με μικροσκόπιο JEOL JSM-6510 LV. Για τη λήψη μικροφωτογραφιών μεταλλογραφίας χρησιμοποιήθηκε οπτικό μικροσκόπιο τύπου *Labor-Lux MI5* εφοδιασμένο με ψηφιακή κάμερα *Moticam S1*. Η λείανση των δοκιμών έγινε σε τροχό λείανσης *Struers* χρησιμοποιώντας λειαντικούς δίσκους No180, No1000 και No4000. Η στίλβωση έγινε με υδατικό εναιώρημα αλουμίνιας μεγέθους κόκκων 6 μm. Μετά τη στίλβωση έγινε έκπλυση της επιφάνειας των δοκιμών με απιονισμένο νερό και με αιθανόλη. Ακολούθησε στέγνωμα σε ρεύμα αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η χημική προσβολή των δοκιμών έγινε με αλκοολούχο διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) περιεκτικότητας 0.8 % κ.ο (*Nital*).

Το πρώτο στάδιο της πειραματικής διαδικασίας είναι η θερμική κατεργασία των δοκιμών. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν ανά δύο μέσα στο φούρνο για κάθε θερμική κατεργασία που πραγματοποιήθηκε. Το ένα από τα δύο ίδια δοκίμια σε κάθε περίπτωση θερμικής κατεργασίας, ήταν συνδεδεμένο με κατάλληλο θερμοζεύγος, το οποίο με τη σειρά του ήταν συνδεδεμένο με ένα πολύμετρο, έτσι ώστε να μετράται η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική τάση, από την οποία στη συνέχεια, με τη χρήση καμπύλης αναφοράς, προκύπτει η θερμοκρασία

του δοκιμίου. Στην εικόνα 16 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ήταν συνδεδεμένο το θερμοζεύγος με το δοκίμιο. Λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κολλητική ταινία οπότε το θερμοζεύγος και το τεμάχιο συγκρατούνταν σε επαφή το ένα με το άλλο με τη βοήθεια δύο μικρών μεταλλικών πλακών οι οποίες και στερεώνονται με δύο μικρές βίδες από ανοξείδωτο χάλυβα.



Εικόνα 16. Τρόπος σύνδεσης θερμοζεύγους και δοκιμίου.

Μετά την τοποθέτηση του ζεύγους των δοκιμίων στον φούρνο ξεκινά η θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τα δοκίμια να αποκτήσουν την προκαθορισμένη τελική θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας καταγράφεται ο χρόνος και η ένδειξη της ηλεκτρικής τάσης από το πολύμετρο. Η πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια της κατεργασίας φαίνεται στην εικόνα 17.

Οι θερμικές κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- I. Θέρμανση μέχρι τους 600 °C. Παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για 1 ώρα. Εξαγωγή από το φούρνο και ψύξη στον αέρα μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- II. Θέρμανση μέχρι τους 600 °C. Παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για 1 ώρα. Αργή ψύξη μέσα σε κλειστό φούρνο.
- III. Θέρμανση μέχρι τους 600 °C. Παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για 1 ώρα. Αργή ψύξη μέσα σε ανοιχτό φούρνο.
- IV. Θέρμανση μέχρι τους 1000 °C. Παραμονή στη θερμοκρασία αυτή για μισή ώρα. Αργή ψύξη μέσα σε κλειστό φούρνο.
- V. Θέρμανση μέχρι τους 1000 °C. Απότομη ψύξη με εμβάπτιση σε λάδι.

Στη συνέχεια σύμφωνα με τα δεδομένα των μετρήσεων σχεδιάζονται οι καμπύλες θέρμανσης (*heating*), παραμονής (*standing*) και ψύξης (*cooling*), καθώς και η καμπύλη του ρυθμού απόψυξης για κάθε θερμική κατεργασία που πραγματοποιήθηκε.

Μετά το πέρας της κάθε θερμικής κατεργασίας έγινε λείανση του δοκιμίου ώστε να καθαρίσει και να εξομαλυνθεί η επιφάνεια από τα προϊόντα που σχηματίζονταν στην επιφάνεια του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει λεία και καθαρή επιφάνεια για την εξέταση των ιδιοτήτων του δοκιμίου (σκληρομέτρηση, μεταλλογραφία και δοκιμασία αντοχής σε κρούση).



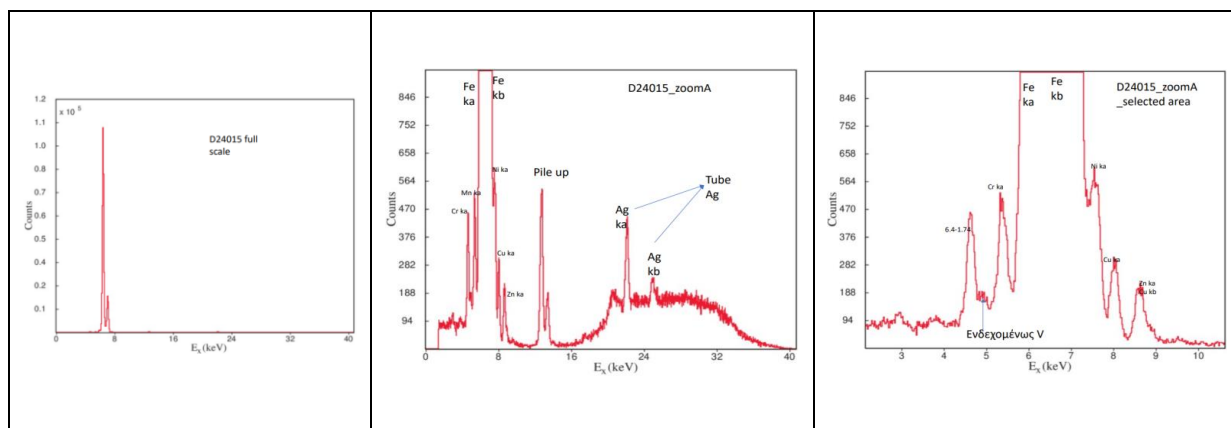
Εικόνα 17. Πειραματική διάταξη κατά την διάρκεια της θερμικής κατεργασίας

6.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.2.1 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ

Η εξέταση της χημικής σύστασης των δοκιμίων έγινε με τις μεθόδους XRF και EDS. Η ανάλυση XRF δοκιμίων του υπό μελέτη χάλυβα έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα ποιοτικής δοκιμίου χάλυβα 110CrV μέσω ανάλυσης XRF.



Η ανάλυση φθορισμού ακτίνων X (XRF) χρησιμοποιείται κυρίως για ποιοτικό και όχι ποσοτικό προσδιορισμό των στοιχείων του χάλυβα. Έτσι φαίνονται, όπως είναι αναμενόμενο, υψηλή περιεκτικότητα σιδήρου (Fe), και ποσότητες των κραματικών στοιχείων νικέλιο (Ni) και χρώμιο (Cr), ενώ δεν εντοπίζεται με βεβαιότητα το βανάδιο (V). Τα επιπλέον στοιχεία που εμφανίζονται στα αποτελέσματα, δηλαδή ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) και ο άργυρος (Ag) προέρχονται από την πειραματική διάταξη καθώς και την πηγή ακτίνων διέγερσης και δεν αποτελούν συστατικά του κράματος.

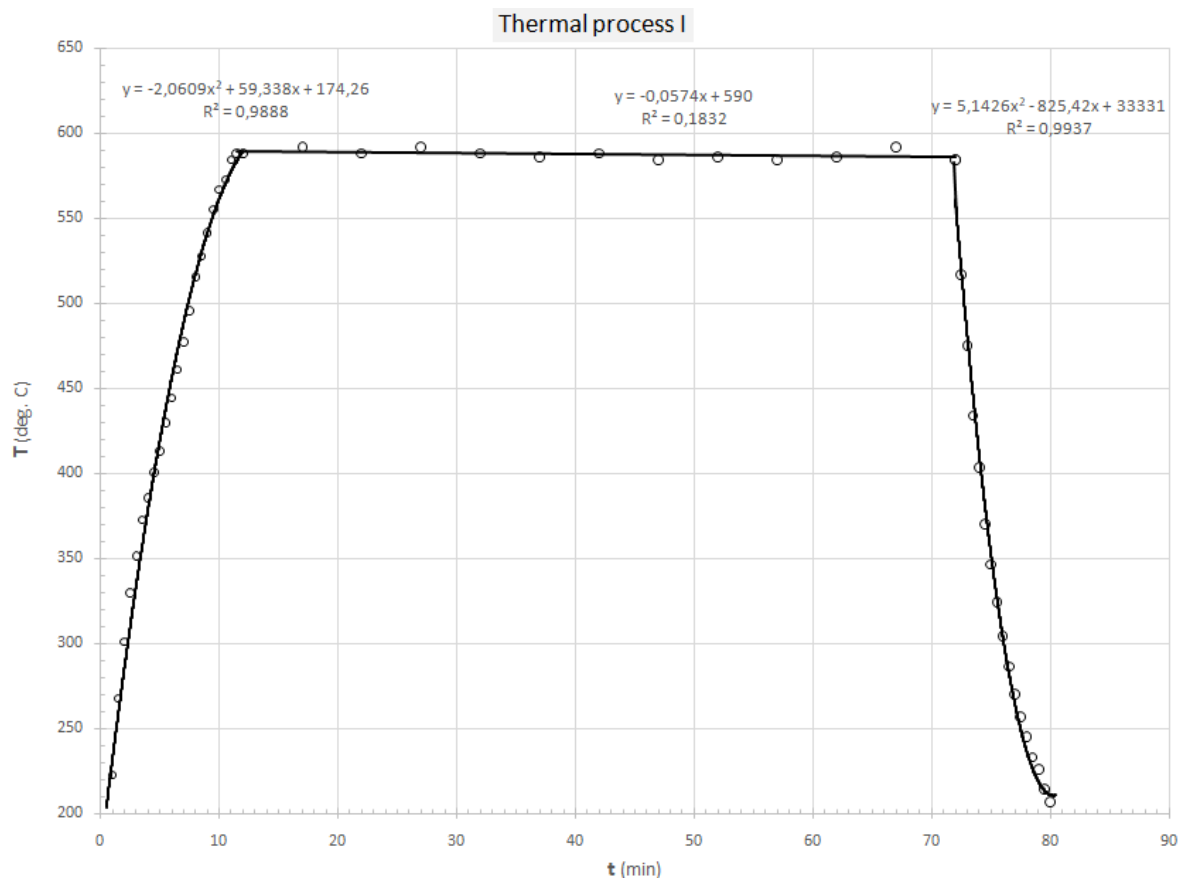
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο EDS δίνονται στον πίνακα 10.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα ανάλυσης EDS.

ΦΑΣΜΑΤΑ EDS	Δοκίμιο 0	Δοκίμιο κατεργασίας I																												
ΣΤΟΙΧΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>0.51</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.11</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.29</td> </tr> <tr> <td>Mn</td> <td>1.12</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>97.97</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Weight %	C	0.51	V	0.11	Cr	0.29	Mn	1.12	Fe	97.97	Total	100	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Weight %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>0.53</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>0.16</td> </tr> <tr> <td>Cr</td> <td>0.29</td> </tr> <tr> <td>Mn</td> <td>1.14</td> </tr> <tr> <td>Fe</td> <td>97.88</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>	Element	Weight %	C	0.53	V	0.16	Cr	0.29	Mn	1.14	Fe	97.88	Total	100
Element	Weight %																													
C	0.51																													
V	0.11																													
Cr	0.29																													
Mn	1.12																													
Fe	97.97																													
Total	100																													
Element	Weight %																													
C	0.53																													
V	0.16																													
Cr	0.29																													
Mn	1.14																													
Fe	97.88																													
Total	100																													

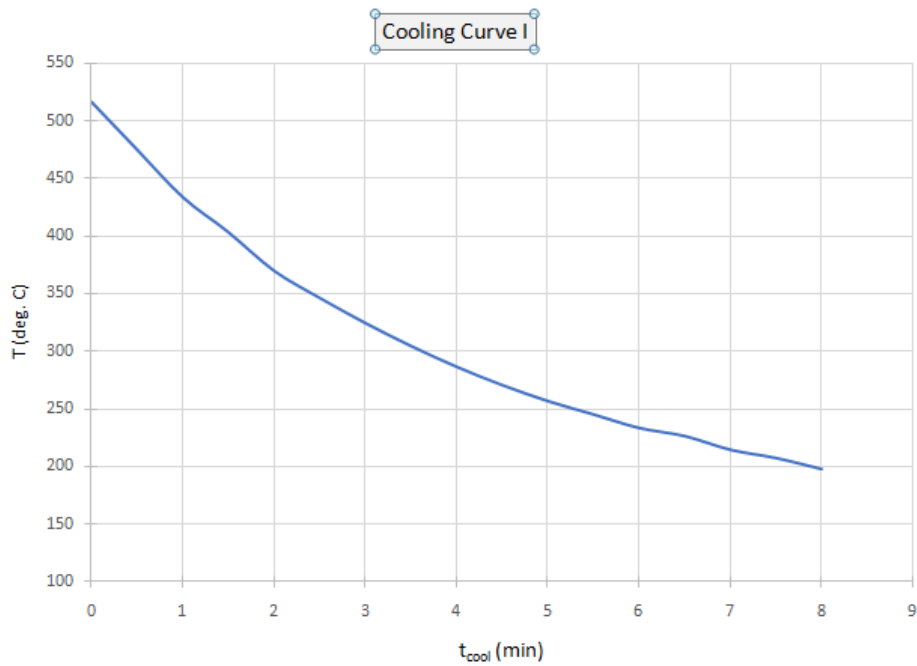
6.2.2 ΠΡΟΦΙΛ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

- Για το δοκίμιο I στο οποίο έγινε θέρμανση μέχρι τους 600 °C και στη συνέχεια ψύξη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έχουμε σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν το προφίλ θερμικής κατεργασίας της εικόνας 18.



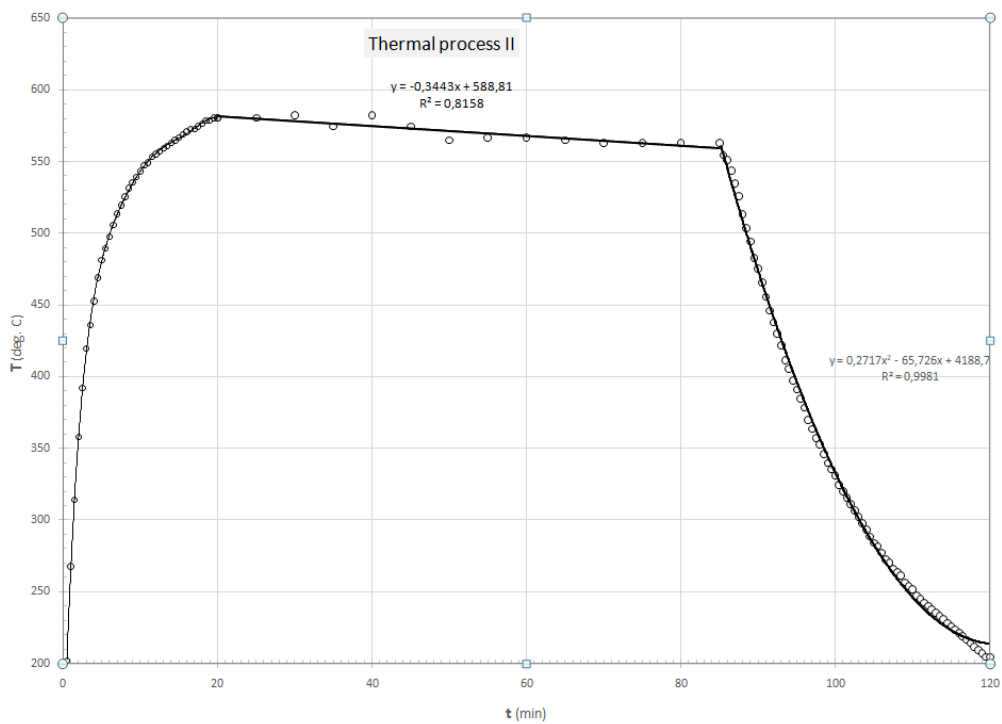
Εικόνα 18. Προφίλ θερμικής κατεργασίας I

Κατά τη θερμική κατεργασία I χρειάστηκαν 11 λεπτά για να φτάσει το δοκίμιο στην επιθυμητή θερμοκρασία, στην οποία και παρέμεινε για 1 ώρα. Η ψύξη έγινε με μέσο ρυθμό ψύξης 39.9 °C/min και δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή της κλίσης των καμπυλών και συνεπώς μετασχηματισμός φάσης. Η καμπύλη ψύξης κατά τη θερμική κατεργασία I φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 19.



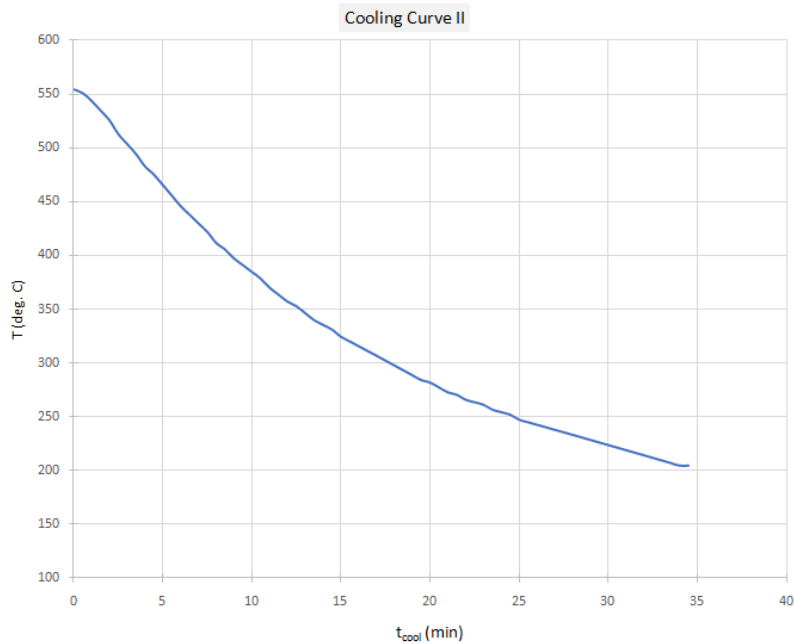
Εικόνα 19. Καμπύλη ψύξης δοκιμίου I.

- Για τα δοκίμια Πα και Πβ στα οποίο έγινε θέρμανση μέχρι τους 600 °C και στη συνέχεια ψύξη μέσα σε κλειστό φούρνο έχουμε το προφίλ θερμικής κατεργασίας της εικόνας 20.



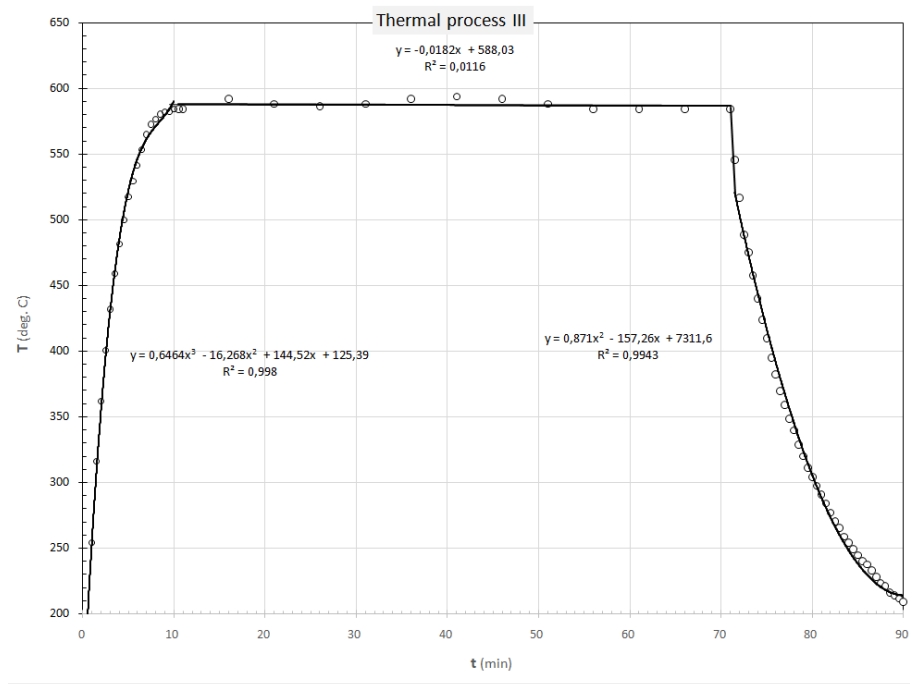
Εικόνα 20. Προφίλ θερμικής κατεργασίας II.

Κατά την θερμική κατεργασία II χρειάστηκαν 20 λεπτά για να φτάσει το δοκίμιο στην επιθυμητή θερμοκρασία, στην οποία και παρέμεινε για 65 λεπτά. Η ψύξη έγινε με μέσο ρυθμό ψύξης 10.1 °C/min, χωρίς πάλι να παρατηρείται κάποιος μετασχηματισμός φάσης. Η καμπύλη ψύξης φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 21.



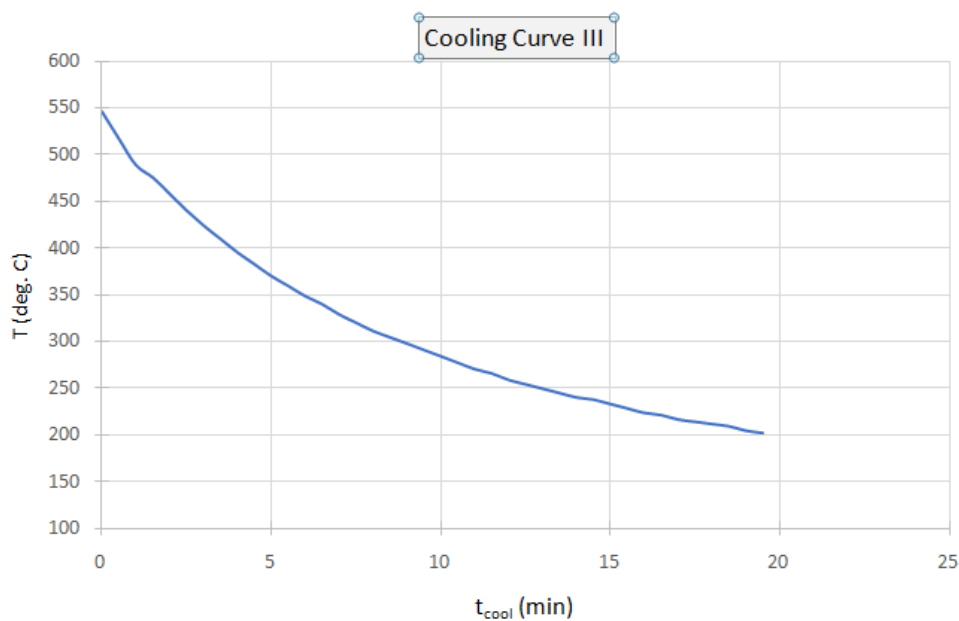
Εικόνα 21. Καμπύλη ψύξης δοκιμίων IIa και IIb.

- Για τα δοκίμια IIIa και IIIb στα οποία έγινε θέρμανση μέχρι τους 600 °C και στη συνέχεια ψύξη μέσα σε ανοιχτό φούρνο έχουμε το παρακάτω προφίλ θερμικής κατεργασίας της εικόνας 22.



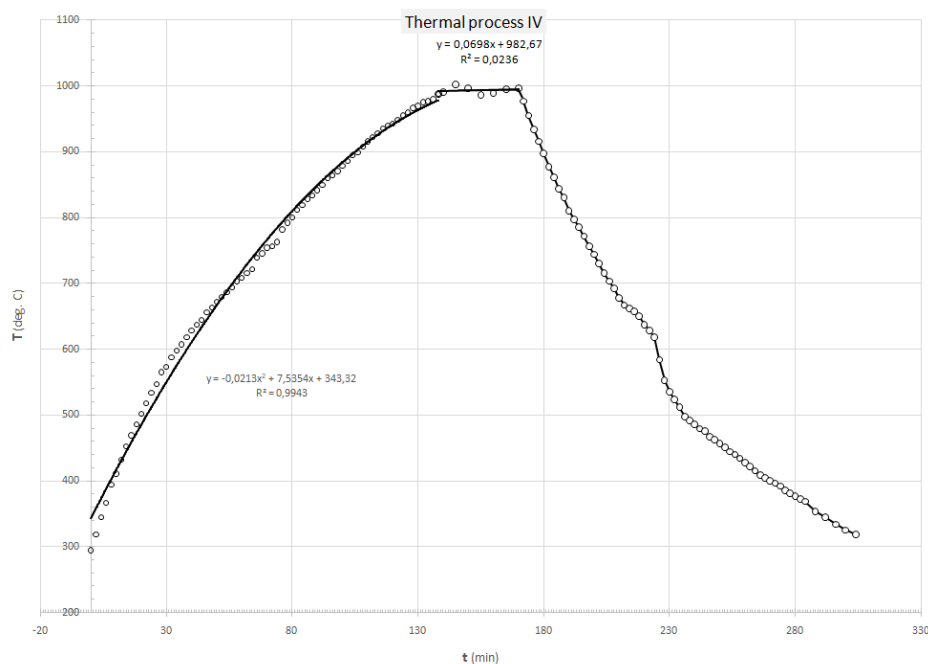
Εικόνα 22. Προφίλ θερμικής κατεργασίας III.

Κατά την θερμική κατεργασία III χρειάστηκαν 10 λεπτά για να φτάσει το δοκίμιο στην επιθυμητή θερμοκρασία, στην οποία και παρέμεινε για 1 ώρα. Η ψύξη έγινε με μέσο ρυθμό ψύξης 17.6 °C/min χωρίς να παρουσιάζει η καμπύλη κάποια αλλαγή κλίσης. Η καμπύλη ψύξης για τα δύο αυτά δοκίμια φαίνεται στην εικόνα 23.



Εικόνα 23. Καμπύλη ψύξης δοκιμίων IIIa και IIIb

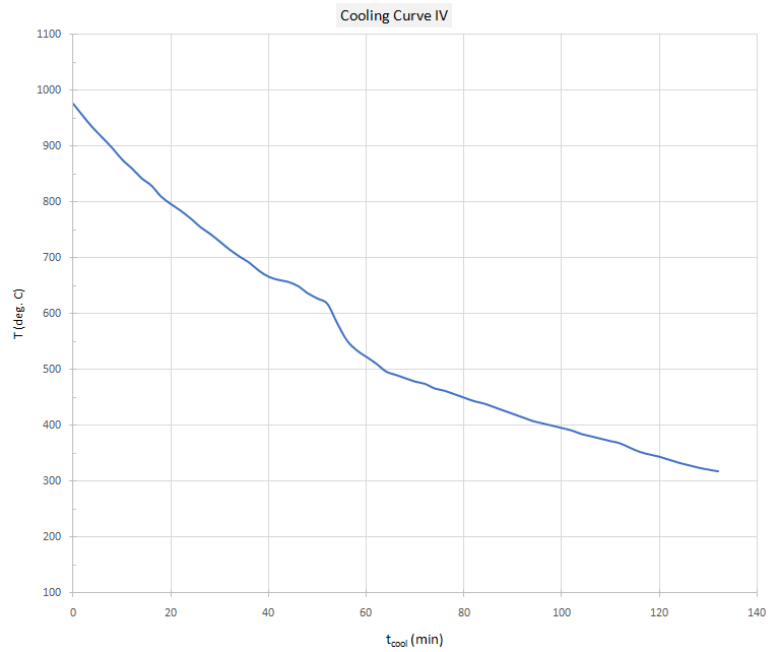
- Για τα δοκίμια IVa και IVb στα οποία έγινε θέρμανση μέχρι τους 1000 °C και στη συνέχεια αργή ψύξη μέσα σε κλειστό φούρνο έχουμε το παρακάτω προφίλ θερμικής κατεργασίας της εικόνας 24.



Εικόνα 24. Προφίλ θερμικής κατεργασίας IV.

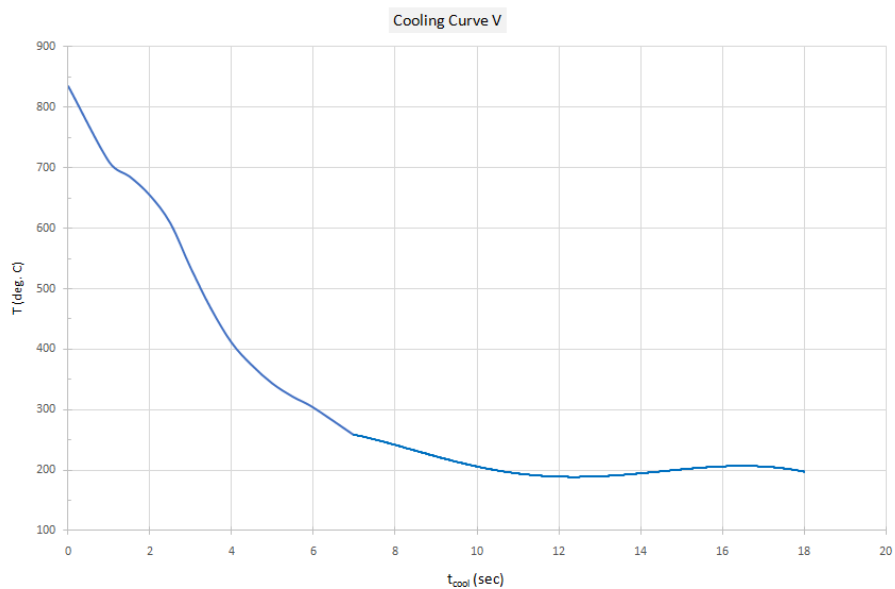
Κατά την θερμική κατεργασία IV χρειάστηκαν 140 λεπτά για να φτάσει το δοκίμιο στην επιθυμητή θερμοκρασία, στην οποία και παρέμεινε για μισή ώρα. Η ψύξη ήταν αρκετά αργή με μέσο ρυθμό ψύξης 5.0 °C/min και παρατηρείται περίπου στους 630 °C μία αλλαγή της κλίσης της καμπύλης η οποία και υποδηλώνει μετασηματισμό φάσης.

Η καμπύλη ψύξης για τα δοκίμια αυτά φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 25.



Εικόνα 25. Καμπύλη ψύξης δοκιμίων IVa και IVb

- Τέλος για τα δοκίμια Va και Vb στα οποία μετά από θέρμανση μέχρι τους 1000 °C έγινε βαφή μέσα σε λάδι έχουμε την καμπύλη ψύξης της εικόνας 26.



Εικόνα 26. Καμπύλη ψύξης δοκιμίων Va και Vb

Κατά την θερμική κατεργασία V είχαμε πολύ γρήγορη ψύξη του δοκιμίου με μέσο ρυθμό ψύξης 58.3 °C/s. Στους 700 °C παρατηρείται μία αλλαγή της κλίσης της καμπύλης η οποία αντιστοιχεί σε μετασχηματισμό φάσης.

6.2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

Για τη μέτρηση της σκληρότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Brinell. Κατά τη μέθοδο αυτή, μικρή σφαίρα διαστάσεων 2.5, 5 ή 10 mm, πιέζεται με σταθερό φορτίο για καθορισμένο χρόνο πάνω στο δοκίμιο. Μετά το πέρας του πειράματος, και με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου, μετρώνται οι διαστάσεις του αποτυπώματος και η σκληρότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση 3:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3)$$

στην οποία:

- F = το φορτίο που ασκείται στη σφαίρα
- D = διάμετρος της σφαίρας
- d = διάμετρος του αποτυπώματος

Για την περίπτωση μας το φορτίο ήταν ίσο με 187.5 Kg ενώ η διάμετρος της σφαίρας ήταν 2.5 mm.

Τα αποτελέσματα σκληρομέτρησης των δοκιμίων φαίνονται στο πίνακα 11. Η σκληρομέτρηση έγινε με τη μέθοδο *Brinell* ωστόσο σύμφωνα με το *ISO 18265* μπορεί να γίνει η μετατροπή της σκληρότητας από *Brinell* σε *Vickers* καθώς και να βρεθεί και η εκτιμώμενη αντοχή του δοκιμίου σύμφωνα με το *ISO 18265* στον πίνακα 12 (ISO, 2013).

Πίνακας 11. Μετρήσεις σκληρότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Δοκίμιο	d(mm)	HB S/187.5/2.5 (Kg ⁺ /mm ²)	HV-10 (Kg ⁺ /mm ²)
0	0.83	337	354
I	0.84	329	346
IIa	0.83	337	354
IIb	0.86	313	329
IIIa	0.84	329	346
IIIb	0.83	337	354
IVa	0.89	292	307
IVb	0.90	285	300
Va	0.65	555	583
Vb	0.68	507	533

Πίνακας 12. Εκτιμώμενη αντοχή των δοκιμίων

Δοκίμιο	HV-10 (Kg*/mm ²)	Εκτιμώμενη αντοχή σ(UTS) (Mpa)
0	354	1137
I	346	1110
II	341,5	1097
III	350	1124
IV	303,5	975
V	558	1792

6.2.4 ΔΟΚΙΜΑΣΙΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ

Μετά τη σκληρομέτρηση έγινε ο προσδιορισμός της δυσθραυστότητας του κάθε τεμαχίου στο κρουσίμετρο. Για να γίνει η δοκιμή πρέπει αρχικά να γίνει εγκοπή στο κάθε τεμάχιο ώστε να εφαρμόζει στην υποδοχή του κρουσίμετρου. Το πάχος της περιοχής στην οποία θα γινόταν η εγκοπή δεν θα έπρεπε να υπερβαίνει τα 2 με 2.5 mm καθώς υπήρχε κίνδυνος να μην σπάσει το τεμάχιο και να αχρηστευτεί. Μετά τη δημιουργία της εγκοπής, το δοκίμιο στερεώνεται στην υποδοχή της μηχανής κρούσης και αφήνεται το εκκρεμές από την πάνω θέση να πέσει και να σπάσει το τεμάχιο, ενώ καταγράφεται η ενέργεια που απορροφήθηκε για να σπάσει το τεμάχιο (σε Joule). Από την ενέργεια που απορροφήθηκε και το εμβαδόν διατομής του δοκιμίου, υπολογίζεται η δυσθραυστότητα (σε Joule/cm²). Για να βρεθεί η επιφάνεια θραύσης μετράται το μήκος και το πάχος (σε mm) στη περιοχή θραύσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 27, οπότε το εμβαδόν διατομής υπολογίζεται ως το γινόμενο μήκους επί πάχος (σε cm²). Τέλος διαιρείται η ενέργεια κρούσης με την επιφάνεια διατομής και υπολογίζεται η δυσθραυστότητα σε J/cm².



Εικόνα 27. Μετρήσεις επιφάνειας διατομής για υπολογισμό δυσθραυστότητας

- Για το αρχικό ακατέργαστο δοκίμιο 0 η ενέργεια θραύσης ήταν 8.4 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.215\text{cm} \cdot 2.7\text{cm} = 0.58\text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα που είναι το πηλίκο της ενέργειας θραύσης με την επιφάνεια θραύσης θα είναι:

$$\frac{8.4\text{ J}}{0.58\text{ cm}^2} = 14.47\text{ J/cm}^2$$

- Για το δοκίμιο I η ενέργεια θραύσης ήταν 4.18 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.2\text{cm} \cdot 2.416\text{ cm} = 0.48\text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα θα είναι:

$$\frac{4.18\text{ J}}{0.48\text{ cm}^2} = 8.65\text{ J/cm}^2$$

- Για το δοκίμιο II η ενέργεια θραύσης ήταν 3.8 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.185\text{ cm} \cdot 2.41\text{ cm} = 0.45\text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα θα είναι:

$$\frac{3.8\text{ J}}{0.45\text{ cm}^2} = 8.52\text{ J/cm}^2$$

- Για το δοκίμιο III η ενέργεια θραύσης ήταν 4.9 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.235\text{ cm} \cdot 2.43\text{ cm} = 0.57\text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα θα είναι:

$$\frac{4.9\text{ J}}{0.57\text{ cm}^2} = 8.58\text{ J/cm}^2$$

- Για το δοκίμιο IV η ενέργεια θραύσης ήταν 5.8 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.245 \text{ cm} \cdot 2.35 \text{ cm} = 0.58 \text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα θα είναι:

$$\frac{5.8 \text{ J}}{0.58 \text{ cm}^2} = 10.07 \text{ J/cm}^2$$

- Τέλος για το δοκίμιο V η ενέργεια θραύσης ήταν 6.95 J ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν $0.44 \text{ cm} \cdot 2.39 \text{ cm} = 1.05 \text{ cm}^2$. Έτσι η δυσθραυστότητα θα είναι:

$$\frac{6.95 \text{ J}}{1.05 \text{ cm}^2} = 6.61 \text{ J/cm}^2$$


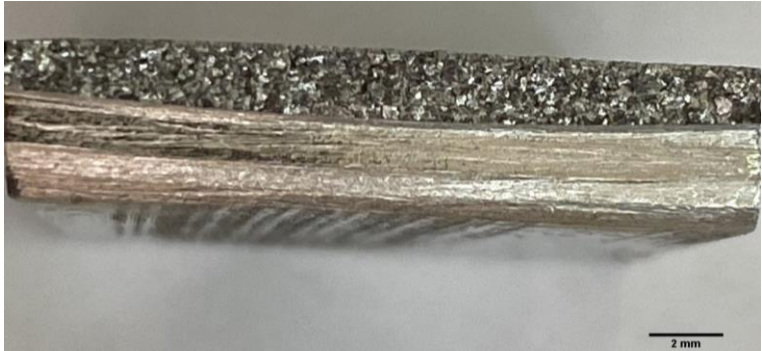
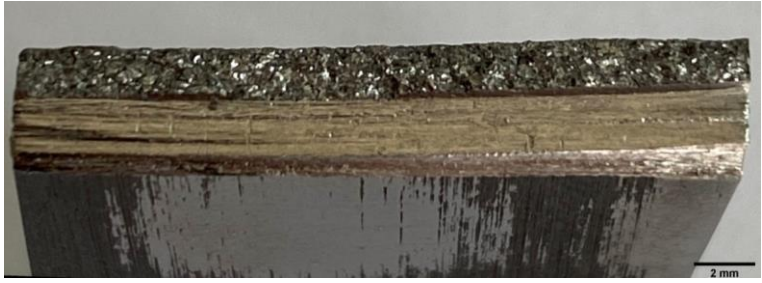
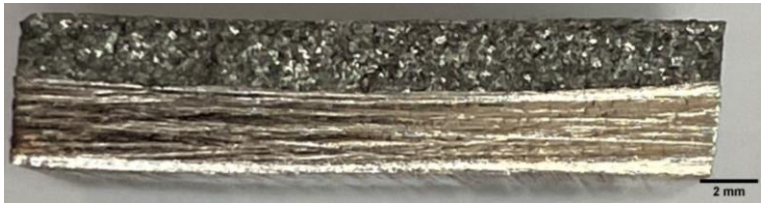


Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών συνοψίζονται στον πίνακα 13.

Πίνακας 13. Αποτελέσματα δοκιμής κρούσης

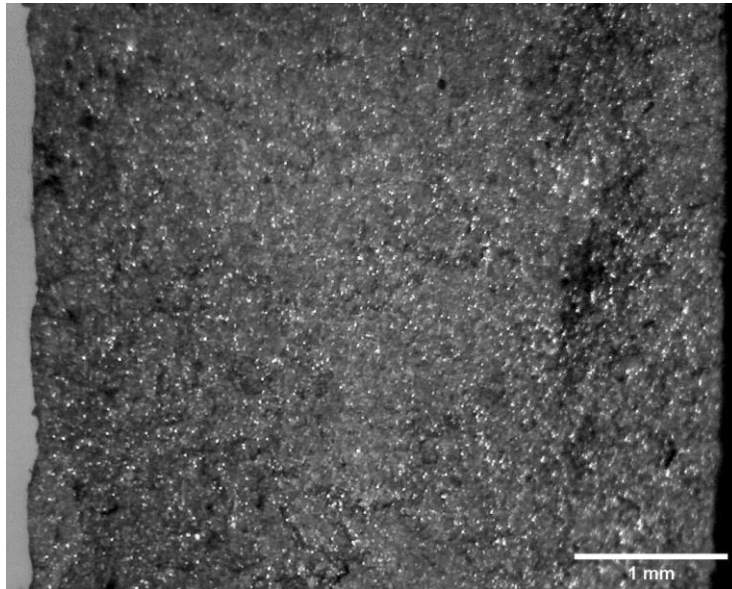
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ (J)	ΠΑΧΟΣ (cm)	ΜΗΚΟΣ (cm)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ (cm ²)	ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ (J/cm ²)
0	8.40	0.21	2.70	0.58	14.47
I	4.18	0.20	2.42	0.48	8.65
II	3.80	0.18	2.41	0.45	8.52
III	4.90	0.23	2.43	0.57	8.58
IV	5.80	0.24	2.35	0.58	10.07
V	6.95	0.44	2.39	1.05	6.61

Η επιφάνεια θραύσης του κάθε δοκιμίου φαίνεται στον πίνακα 14.

Πίνακας 14. Επιφάνεια θραύσης δοκιμών μετά τη δοκιμασία κρούσης

ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ
0	 2 mm
I	 2 mm
II	 2 mm
III	 2 mm
IV	 2 mm
V	 2 mm

Η θερμική κατεργασία V είχε ως αποτέλεσμα το δοκίμιο να γίνει πολύ πιο ψαθυρό. Στην εικόνα 28 φαίνεται λεπτομέρεια της επιφάνειας θραύσης με χαρακτηριστικά ψαθυρής θραύσης και μικροκρυσταλλική δομή (μικρού μεγέθους κόκκων).



Εικόνα 28. Λεπτομέρεια επιφάνειας θραύσης δοκιμίου V

6.2.5 ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική εξέταση των δοκιμίων σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Το οπτικό μικροσκόπιο είναι ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιείται για την παρατήρηση διαφόρων αντικειμένων σε μεγέθυνση, με τη βοήθεια μεγεθυντικών φακών. Η παρατήρηση γίνεται είτε μέσω του διερχόμενου είτε μέσω του ανακλώμενου φωτός από την επιφάνεια του δοκιμίου. Το οπτικό μικροσκόπιο αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

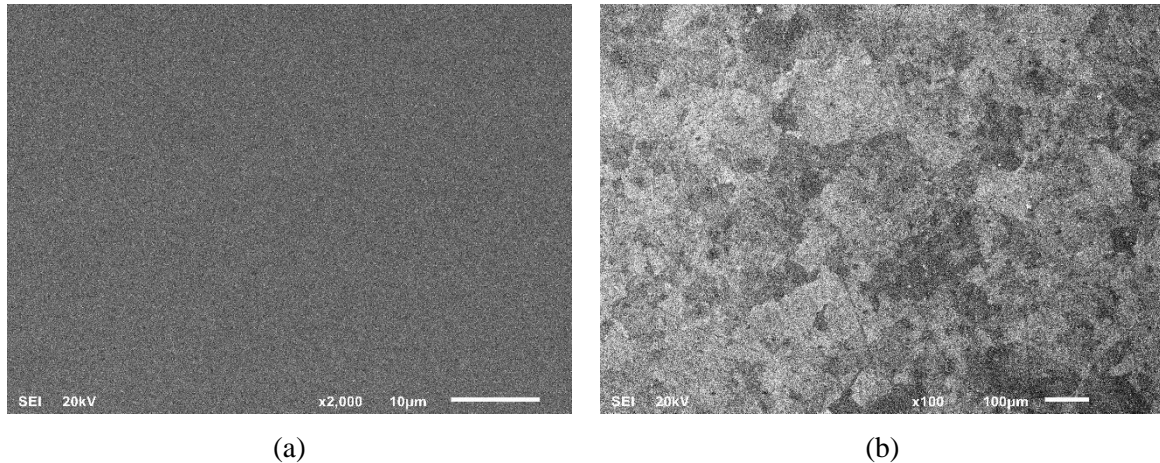
- (α) μία πηγή φωτός
- (β) ένα συγκεντρωτικό φακό
- (γ) έναν αντικειμενικό φακό
- (δ) έναν ή δύο προσοφθάλμιους φακούς

Το αντικείμενο προς παρατήρηση τοποθετείται κοντά σε ένα συγκλίνοντα φακό (τον αντικειμενικό) ο οποίος και είναι πολύ μικρής εστιακής απόστασης. Ο φακός αυτός σχηματίζει το πραγματικό είδωλο του αντικειμένου το οποίο στην συνέχεια μεγεθύνεται από έναν άλλο συγκλίνοντα φακό (τον προσοφθάλμιο φακό). Έτσι σχηματίζεται ένα φανταστικό είδωλο το οποίο και παρατηρούμε. Η εστίαση γίνεται με μετακίνηση του όλου οπτικού συστήματος ως προς το παρατηρούμενο αντικείμενο, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ευκρίνεια.

Από την άλλη έχουμε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο το οποίο είναι αρκετά πιο ισχυρό και αποτελεσματικό για τη μελέτη της μικροδομής των υλικών σε σχέση με το οπτικό. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο επιτρέπει την απεικόνιση της επιφάνειας ενός αντικειμένου, σε υψηλή μεγέθυνση, με διακριτική ικανότητα τάξεως των nm , μέσω της αλληλεπίδρασής του με μία δέσμη ηλεκτρονίων. Ο χειρισμός της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δείγμα, όσο και εκείνων που σκεδάζονται από αυτό, γίνεται με τη βοήθεια μαγνητικών φακών. Υπάρχουν διαφόρων ειδών ηλεκτρονικά μικροσκόπια, τα οποία, ανάλογα με το βασικό μηχανισμό αλληλεπίδρασης είναι γνωστά ως: (α) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (*Transmission Electron Microscope*) (β) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Ανάκλασης (*Reflection Electron Microscope*) (γ) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Εκπομπής (*Emission Electron Microscope*) (δ) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (*Scanning Electron Microscope*) (ε) Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Υψηλής Τάσης (*High Voltage Electron Microscope*) κ.α. (Κυριακίδης, 2014)

Στην παρούσα εργασία η μεταλλογραφική εξέταση έγινε με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία. Πριν από την παρατήρηση στο μικροσκόπιο, απαιτείται κατάλληλη προεργασία. Έτσι προκειμένου να φαίνονται οι κόκκοι στο μικροσκόπιο πρέπει να γίνει πολύ καλή λείανση του δοκιμίου. Για αυτό το δοκίμιο λειανείται στον τροχό με 3 λειαντικούς δίσκους διαφορετικού τύπου. Αρχικά με λειαντικό χαρτί No180 (περιέχει 180 κόκκους ανά τετραγωνικό χιλιοστό) και στη συνέχεια με No1000 και No4000, ώστε να επιτευχθεί όσο καθαρότερη επιφάνεια γίνεται. Έπειτα ακολουθεί η στίλβωση του μετάλλου με κατάλληλο εναιώρημα αλουμίνιας. Τέλος γίνεται χημική προσβολή του δοκιμίου, με αλκοολούχο διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) περιεκτικότητας 0.8 % κ.ο (*Nital*), έτσι ώστε να είναι όσο πιο ευδιάκριτη γίνεται η μικροδομή του. Εφόσον πραγματοποιηθεί και η χημική προσβολή το δοκίμιο τοποθετείται στην αντικειμενοφόρο τράπεζα του μικροσκοπίου και λαμβάνονται κατάλληλες μικροφωτογραφίες με τη χρήση κάμερας Moticam S1 η οποία είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ηλεκτρονική μικροσκοπία έγινε πριν από τις θερμικές κατεργασίες (δοκίμιο 0). Οι μικροφωτογραφίες που ελήφθησαν μέσω της δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (*secondary emission*) πριν και μετά τη χημική προσβολή του χάλυβα φαίνονται στην εικόνα 29.

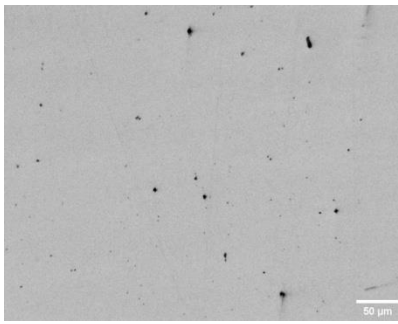


Εικόνα 29. Μικροφωτογραφίες SEM της επιφάνειας του δοκιμίου 0 (a) μετά από λείανση και στίλβωση και (b) μετά από χημική προσβολή της στίλβωμένης επιφάνειας με Nitral 0.8%.

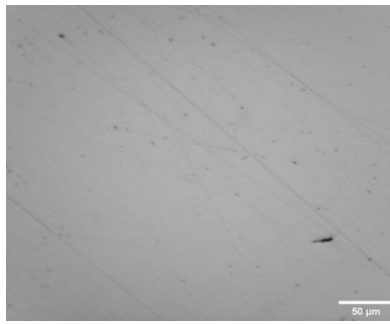
Μικροφωτογραφίες οπτικής μικροσκοπίας, που ελήφθησαν για όλα τα δοκίμια, παρουσιάζονται στους πίνακες 15 και 16. Στον πίνακα 15 φαίνονται οι φωτογραφίες της στίλβωμένης επιφάνειας ενώ στον πίνακα 16 οι φωτογραφίες μετά τη χημική προσβολή με αλκοολούχο διάλυμα νιτρικού οξέος (HNO_3) περιεκτικότητας 0.8 % κ.ο (*Nital*) του δοκιμίου. Στον πίνακα 15 παρατηρούνται ορισμένες σκούρες περιοχές οι οποίες είναι υπολείμματα της κατεργασίας λείανσης του δοκιμίου. Στις εικόνες του πίνακα 16 παρατηρείται ότι τα δοκίμια 1,2 και 3 έχουν σχεδόν ίδια μικροδομή με το δοκίμιο 0 καθώς η θερμοκρασία θέρμανσης δεν ήταν αρκετά υψηλή ώστε να υπάρχει κάποια μετατροπή φάσης. Ακόμα το μέγεθος των κόκκων μοιάζει να παραμένει το ίδιο.

Η μικροδομή δεν είναι ομοιόμορφη και μοιάζει κυρίως με μπαινιτικό χάλυβα στον οποίο επιπλέον παρατηρούνται και ορισμένες περιοχές μαρτενσιτικής δομής (Wang, 2020). Για τα δοκίμια IV και V ωστόσο παρατηρείται αρκετά διαφορετική μικροδομή.

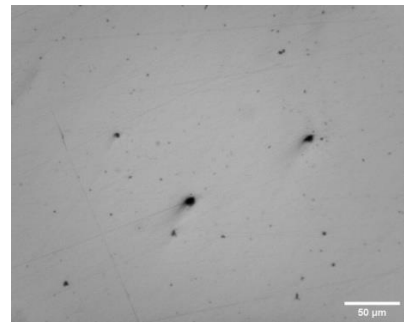
Πίνακας 15. Μικροφωτογραφίες στιλβωμένης επιφάνειας που ελήφθησαν μέσω οπτικής μικροσκοπίας



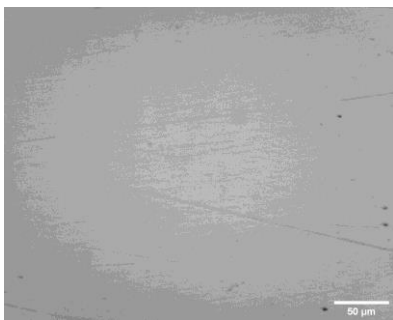
Δοκίμιο 0



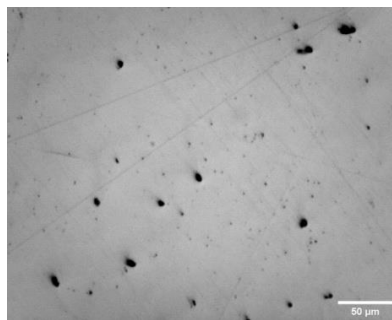
Δοκίμιο κατεργασίας I



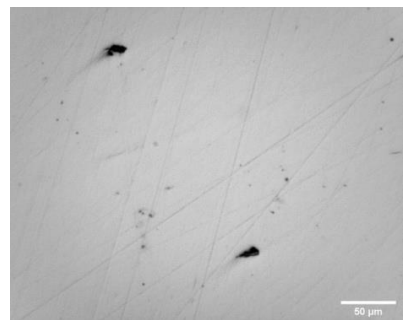
Δοκίμιο κατεργασίας II



Δοκίμιο κατεργασίας III



Δοκίμιο κατεργασίας IV

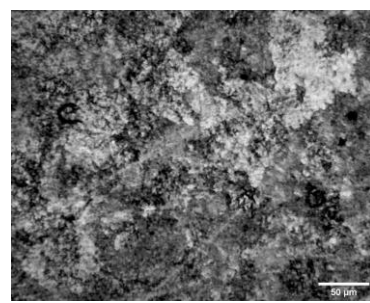


Δοκίμιο κατεργασίας V

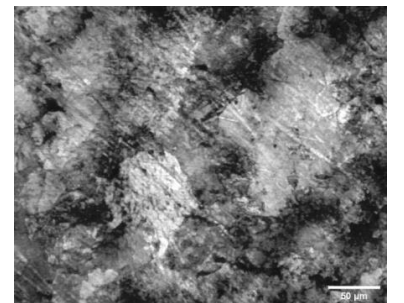
Πίνακας 16. Μικροφωτογραφίες μετά την χημική προσβολή που ελήφθησαν μέσω οπτικής μικροσκοπίας



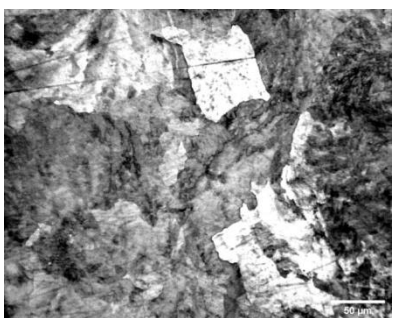
Δοκίμιο 0



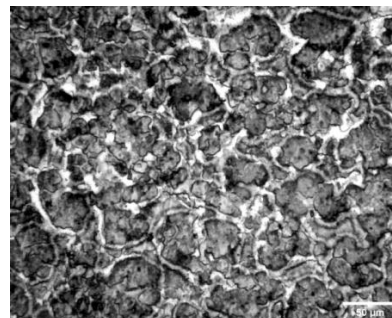
Δοκίμιο κατεργασίας I



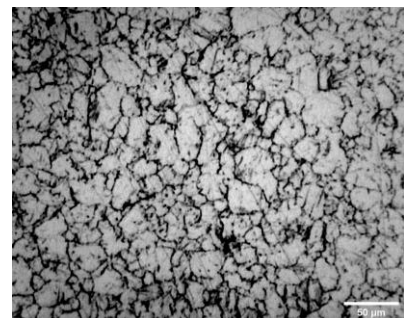
Δοκίμιο κατεργασίας II



Δοκίμιο κατεργασίας III



Δοκίμιο κατεργασίας IV



Δοκίμιο κατεργασίας V

Το μέγεθος των κόκκων εμφανίζεται να είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα 6 δοκίμια, αυτή η αλλαγή είναι και ο λόγος που αυξάνεται η σκληρότητα και μειώνεται η δυσθραυστότητα των δύο αυτών δοκιμίων.

Στα όρια των κόκκων ακόμα παρατηρούνται ορισμένες μαύρες περιοχές οι οποίες πιθανότατα οφείλονται στα καρβίδια βαναδίου (VC) καθώς και καρβίδια χρωμίου με τύπο Cr₇C₃. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Jiang, 2022) καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε βανάδιο, αυξάνεται και η ποσότητα των καρβιδίων VC, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η ποσότητα των καρβιδίων M₇C₃. Τα καρβίδια αυτά λόγω της πολύς υψηλής σκληρότητάς τους προσδίδουν στο χάλυβα πολύ καλή αντοχή στη φθορά.

6.2.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων συνοψίζονται στον πίνακα 17.

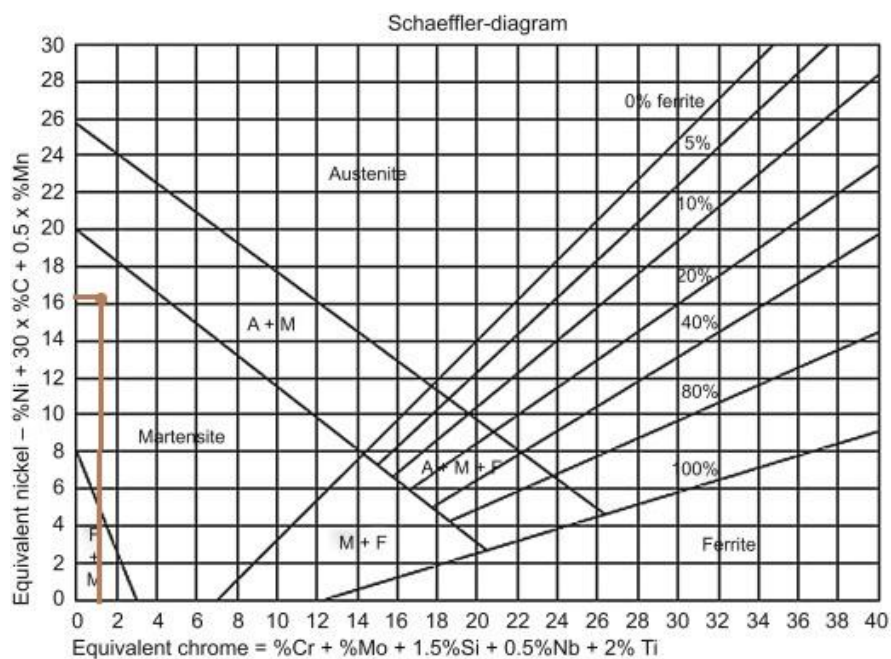
Πίνακας 17. Αποτελέσματα των μετρήσεων του πειραματικού μέρους

Ιδιότητα	Αρχικό δοκίμιο	Δοκίμιο κατεργασίας I	Δοκίμιο κατεργασίας II	Δοκίμιο κατεργασίας III	Δοκίμιο κατεργασίας IV	Δοκίμιο κατεργασίας V
Σκληρότητα HB S/187.5/2.5 (Kg*/mm ²)	337	329	325	333	288.5	531
Δυσθραυστότητα (J/cm ²)	14.47	8.65	8.52	8.58	10.07	6.61
Εκτιμώμενη αντοχή σ(UTS) (MPa)	1137	1110	1097	1124	975	1792

Συνολικά από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας βρέθηκε ότι:

- Ο χάλυβας 110CrV έχει αρκετά υψηλή σκληρότητα η οποία κατά τις θερμικές κατεργασίες I, II και III παρουσίασε μια πολύ μικρή μείωση στην τιμή της. Κατά την θερμική κατεργασία IV παρατηρήθηκε μία μείωση της σκληρότητας της τάξης του 15%, ενώ κατά την θερμική κατεργασία V παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της σκληρότητας κατά περίπου 57%.

- Η τιμή της δυσθραυστότητας του χάλυβα παρουσίασε μείωση μετά από κάθε θερμική κατεργασία που έγινε. Η δυσθραυστότητα των δοκιμίων μετά την κάθε κατεργασία μειώνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά: IV > I > III > II > V. Η θραύση των δοκιμίων 0, I, II, III και IV είναι σε μεγάλο βαθμό ψαθυρού τύπου, ενώ σε κάποιο βαθμό εμφανίζονται στοιχεία ολκιμότητας, όπως φαίνεται στις εικόνες του πίνακα 10. Η επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου V εμφανίζει από την άλλη χαρακτηριστικά μόνο ψαθυρής θραύσης.
- Κατά την μεταλλογραφία των δοκιμίων παρατηρήθηκε σχετικά παρόμοια μικροδομή για τα δοκίμια 0, I, II και III χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές του μεγέθους των κόκκων. Η μικροδομή δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά παρουσιάζει στοιχεία δομής μπαινιτικού χάλυβα. Στις μικροφωτογραφίες εντοπίζεται επίσης η δομή μαρτενσίτη. Για τα δοκίμια IV και V παρατηρούνται αρκετές διαφορές στη μικροδομή. Η δομή φαίνεται να είναι αρκετά ομοιόμορφη και οι κόκκοι αρκετά μικρότερου μεγέθους σε σχέση με αυτούς των προηγούμενων δοκιμίων.
- Για την εκτίμηση της δομής που αναμένεται να έχει ο χάλυβας χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα *Schaeffler* της εικόνας 30. Υπολογίστηκε η ισοδύναμη περιεκτικότητα σε Cr (το οποίο ευνοεί φερριτική δομή) και η ισοδύναμη περιεκτικότητα σε Ni (ευνοεί ωστενιτική δομή). Σύμφωνα με αυτές προκύπτει το σημείο που σημειώνεται με καφέ χρώμα στο διάγραμμα της εικόνας 30.



Εικόνα 30. Διάγραμμα Schaeffler

(πηγή: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/schaeffler-diagram>)

Έτσι έχουμε:

$$Eq_{(Ni)} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0.5 \cdot \%Mn \rightarrow Eq_{(Ni)} = 30 \cdot 0.52 + 0.5 \cdot 1.13 = \mathbf{16.2}$$

$$Eq_{(Cr)} = \%Cr + \%Mo + 1.5\%Si + 0.5\%Nb + 2\%Ti = 0.29 + 1.5 \cdot 0.54 = \mathbf{1.1}$$

Από τα διαγράμματα *Shaeffler* προκύπτει ότι η αναμενόμενη μικροδομή του κράματος είναι αυτή του μαρτενσίτη. Ωστόσο, σε ορισμένες φωτογραφίες παρατηρούνται δομές φερρίτη και σεμεντίτη καθώς και μικρές γραμμώσεις στα εσωτερικά των κόκκων οι οποίες αποδίδονται σε μαρτενσίτη.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο χάλυβας 110CrV που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία αποτελεί ένα κράμα το οποίο παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον λόγω των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του. Εξαιτίας των ιδιοτήτων αυτών, βρίσκει διάφορες εφαρμογές σε κατασκευές εξαρτημάτων μηχανών, εργαλείων χειρός και σε ράγες γερανών στις οποίες και απαιτείται υψηλή ανθεκτικότητα και αντοχή στη φθορά. Οι ιδιότητες αυτές μπορούν βέβαια να τροποποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής με τη βοήθεια διαφόρων θερμικών κατεργασιών. Έτσι, ο χάλυβας υποβλήθηκε σε 5 επιλεγμένες διαφορετικές θερμικές κατεργασίες προκειμένου να μελετηθούν οι μεταβολές στη μικροδομή και στις ιδιότητες αυτού, και συγκεκριμένα οι αλλαγές στη σκληρότητα και στην αντοχή σε κρούση, καθώς και το πώς μεταβάλλεται η μικροδομή του.

Από τις μετρήσεις σκληρότητας των δοκιμίων του χάλυβα 110CrV προκύπτει ότι πρόκειται για ένα κράμα το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή σκληρότητα, η οποία και είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με άλλα είδη χάλυβα όπως προκύπτει και από τον πίνακα 18.

Κατά την ανόπτηση στους 600 °C παρατηρήθηκε μικρή μείωση της σκληρότητας, χωρίς να παίζει κάποιο ιδιαίτερο ρόλο ο ρυθμό ψύξης των δοκιμίων. Από την άλλη, κατά την ανόπτηση στους 1000 °C η μείωση της σκληρότητας ήταν σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την ανόπτηση στους 600 °C. Αντίθετα αποτελέσματα είχε η θερμική κατεργασία της βαφής κατά την οποία και παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη αύξηση της σκληρότητας με την τιμή της να φτάνει περίπου 1.5 φορές της αρχικής. Η κατεργασία αυτή εκτιμάται ότι προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της αντοχής και μείωση της δυσθραυστότητας του χάλυβα αυτού.

Παρατηρήθηκαν σχετικά χαμηλές τιμές για τη δυσθραυστότητα του χάλυβα, η οποία και μειώνεται μετά τη θερμική του κατεργασία. Μεγαλύτερη μείωση της δυσθραυστότητας παρατηρείται μετά από τη θερμική κατεργασία της βαφής. Από της σχετικές εικόνες του πίνακα 10 φαίνεται ότι ο χάλυβας 110CrV πριν υποστεί θερμική κατεργασία είναι ένα μετρίως όλκιμο υλικό και το οποίο μετά την ανόπτηση και κυρίως την βαφή γίνεται περισσότερο εύθραυστο και ψαθυρό. Αυτή η πολύ χαμηλή τιμή της δυσθραυστότητας μετά τη βαφή οφείλεται μερικώς και στο γεγονός ότι δεν έγινε επαναφορά των δοκιμίων η οποία θα βελτιώνε την δυσθραυστότητα τους και θα τα έκανε λιγότερο ψαθυρά. Πειράματα σε παρόμοιο είδος χάλυβα (Mazuro, 2021) έχουν δείξει ότι με βαφή και στη συνέχεια

επαναφορά των δοκιμίων είναι δυνατή η ταυτόχρονη αύξηση της σκληρότητας και της αντοχής σε κρούση με χαμηλή θερμοκρασία επαναφοράς γύρω στους 200 °C. Από την άλλη, με υψηλότερη θερμοκρασία, γύρω στους 600 °C επιτυγχάνεται μεγάλη αύξηση της αντοχής σε κρούση η οποία όμως συνοδεύεται από μικρή μείωση της σκληρότητας. Ο χάλυβας 110CrV έχει αξιοσημείωτες ιδιότητες, οι οποίες με τη βοήθεια της κατάλληλης θερμικής κατεργασίας μπορούν να τροποποιηθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, για αυτό και αναμένεται, στο μέλλον, η χρησιμοποίησή του σε ποικίλες εφαρμογές, για τις οποίες η σκληρότητα, η αντοχή στην επιβολή υψηλών φορτίων και στη τριβή συνιστούν τα κύρια απαιτούμενα χαρακτηριστικά.

Πίνακας 18. Τιμές σκληρότητας διαφορετικών ειδών χάλυβα.
(πηγή: <https://www.engineersedge.com/materials/carbon-steel-properties1.htm>)

AISI REFERENCE	MANUFACTURED	HARDNESS, BHN
3140	NORMALIZED	262
	ANNEALED	197
4130	NORMALIZED	197
	ANNEALED	156
4140	NORMALIZED	302
	ANNEALED	197
4150	NORMALIZED	321
	ANNEALED	197
4320	NORMALIZED	235
	ANNEALED	163
4340	NORMALIZED	363
	ANNEALED	217
4620	NORMALIZED	174
	ANNEALED	149
4820	NORMALIZED	229
	ANNEALED	197
5140	NORMALIZED	229
	ANNEALED	167
5150	NORMALIZED	255
	ANNEALED	197
5160	NORMALIZED	269
	ANNEALED	197
6150	NORMALIZED	269
	ANNEALED	197
8620	NORMALIZED	183
	ANNEALED	149
8630	NORMALIZED	187
	ANNEALED	156
8650	NORMALIZED	302
	ANNEALED	212
8740	NORMALIZED	269
	ANNEALED	201
9255	NORMALIZED	269
	ANNEALED	229
9310	NORMALIZED	269
	ANNEALED	241

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Askeland D, Wright W; (2018) Υλικά: δομή, ιδιότητες & τεχνολογικές εφαρμογές,1(7)

ASTM; (2004) Standard specification for structural steel for ships,
[Online] available at: <https://gangsteel.net/uploads/soft/150729/ASTM-A131.pdf>

Azo materials; (2012) SAE/AISI Carbon Steel Naming Conventions,
[Online] available at: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6151>

Bell T; (2014) Alloying elements in steel, [Online] available at:
<https://www.akronsteeltreating.com/upload/documents/alloying-elements-in-steel-by-t-bell.pdf>

Bell T; (2020) The Major Applications of Steel, ThoughtCo,
[Online] available at: <https://www.thoughtco.com/steel-applications-2340171>

British Steel; (2023) Our strongest ever crane rails are helping support global port operations,
[Online] available at: <https://britishsteel.co.uk/news/our-strongest-ever-crane-rails-are-helping-support-global-port-operations/>

Callister W, Rethwisch D; (2015) Επιστημη και τεχνολογια των υλικων, 1(9)

Davis J; (1998) Metals handbook. Asm international,1(10) p.822

Digges TG, Rosenberg SJ; (1960) Heat treatment and properties of iron and steel,p.8-9

GlobalMetals; (2011) Effects of alloying elements in steel, [Online] available at:
<https://www.globalmetals.com.au>

Huang S, Wu R, Li W, Min N, Li X; (2022) Fluctuations of properties of Cr-Mo-V hot work die steels by artificial increment of vanadium, Materials Today Communications 33 105024
[Online] available at: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105024>

ISO; (2013) [Online] available at: <https://www.iso.org/standard/53810.html>

Jiang T, Wei S, Xu L, Zhang C, Wang X, Xiong M, Mao F and Chen C; (2022) The Effect of Vanadium Content Coupling with Heat Treatment Process on the Properties of Low-

Vanadium Wear-Resistant Alloy, *Materials* 15(1) 285

[Online] available at: <https://doi.org/10.3390/ma15010285>

Khurmi R, Gupta J; (2005) A textbook of machine design, Edition 14 p.33.

Mazuro P, Pienkowska J, Rostek E; (2021) Influence of Various Heat Treatments on Hardness and Impact Strength of Uddeholm Balder: Cr-Mo-V-Ni Novel Steel Used for Engine Construction, *Materials* 14(17) 4943

[Online] available at: <https://doi.org/10.3390/ma14174943>

Niu G, Chen Y, Wu H, Wang X, Zuo M, Xu Z; (2016) Effects of Chromium, Vanadium and Austenite Deformation on Transformation Behaviors of High-strength Spring Steels,

Journal of Iron and Steel Research, International, 23(12) 1323-1332

[Online] available at: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30195-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30195-9)

Pant G, Singh AP, Sharma HK; (2020) Cooling rate characteristics of vanadium based micro alloyed steel, *Materials Today: Proceedings* 26(2)1087-1090

[Online] available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.215>

Statista; (2023) World crude steel production from 2012 to 2022

[Online] available at: <https://www.statista.com/statistics/267264/world-crude-steel-production/>

Todić A, Čikara D, Todić D, Pejović B, Čamagić I, Vukojević V; (2017) The Influence of the Vanadium Content on the Toughness and Hardness of Wear resistant High-alloyed Cr-Mo Steel, *FME Transaction* 45(1) 130-134

[Online] available at:

https://www.researchgate.net/publication/313718425_The_influence_of_the_vanadium_content_on_the_toughness_and_hardness_of_wear_resistant_high-alloyed_Cr-Mo_steel

TotalMateria; (2001) Classification of Carbon and Low-Alloy Steels, [Online] available at: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=62>

Wang Z, Hui W, Chen Z, Zhang Y, Zhao X; (2020) Effect of vanadium on microstructure and mechanical properties of bainitic forging steel, *Materials Science and Engineering: A* 770(1) [Online] available at: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138653>

Wente EF, Nutting J, Wondris EF; (2023) History of Steel [Online] available at: <https://www.britannica.com/technology/steel/History>

Worldsteel association; (2023) [Online] available at: <https://worldsteel.org/about-steel/steel-facts/>

Κυριακίδης Γ, Μπίνας Β; (2014) Ηλεκτρονική Μικροσκοπία , [Online] available at: https://opencourses.uoc.gr/courses/pluginfile.php/16127/mod_resource/content/1/00.%20Electron_Microscopy_Notes_VBinas2.pdf