

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

ΔΟΚΙΜΗ ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑΣ JOMINY

υπό

ΟΡΕΣΤΗ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΙΔΗ

Επιβλέπων

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

2015

© 2015 Ορέστης Τριανταφυλλίδης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος
Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής

Δρ. Αλέξης Κερμανίδης
Επίκουρος Καθηγητής Μηχανικής Συμπεριφοράς των Υλικών,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής

Δρ. Νικόλαος Χασιώτης
Δρ. Μεταλλουργός Μηχανικός,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του, αλλά κυρίως για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη και Δρ. Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και τις πολύτιμες υποδείξεις τους κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Βέργο για τη βοήθειά του στην κατασκευή της συσκευής εμβαπτότητας, και τη Δρ. Ελένη Καμούτση για τη βοήθειά της στη μεταλλογραφική ανάλυση των χαλύβων. Τέλος ευχαριστώ των κ. Ε. Κεχαγιά από την ΣΚΛΕΡΟ Α.Ε. για την ευγενική προσφορά των χαλύβων που μελετήθηκαν στην εργασία.

Δοκιμή Εμβαπτότητας Jominy

Ορέστης Τριανταφυλλίδης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος

Καθηγητής Φυσικής Μεταλλουργίας

Περίληψη

Η εμβαπτότητα είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες των χαλύβων βαφής και επαναφοράς, αφού προσδιορίζει την δυνατότητα σχηματισμού μαρτενσίτη σε συνάρτηση με την ταχύτητα ψύξης. Ταυτόχρονα η εμβαπτότητα επηρεάζει και την συγκολλησιμότητα των χαλύβων, αφού προσδιορίζει την δυνατότητα σχηματισμού μαρτενσίτη στη θερμοεπηρεασμένη ζώνη. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την κατασκευή μιας συσκευής για την μέτρηση της εμβαπτότητας με την μέθοδο Jominy. Η συσκευή εμβαπτότητας χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της εμβαπτότητας χαλύβων με διαφορετικά επίπεδα κραμάτωσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εμβαπτότητα είναι ευθέως ανάλογη της περιεκτικότητας του χάλυβα σε κραματικά στοιχεία αντικαταστάσεως. Οι χάλυβες που εξετάστηκαν ταξινομήθηκαν ανάλογα με την εμβαπτότητά τους. Εκτός από την μελέτη των συγκεκριμένων χαλύβων, η συσκευή εμβαπτότητας χρησιμοποιήθηκε και στα πλαίσια των εργαστηριακών ασκήσεων του μαθήματος Φυσική Μεταλλουργία για την άσκηση των φοιτητών. Η συσκευή εμβαπτότητας πρόκειται να αξιοποιηθεί στο μέλλον για την μέτρηση της εμβαπτότητας και την συσχέτισή της με την σύσταση και την μικροδομή των χαλύβων, αποτελώντας μια χρήσιμη προσθήκη στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Υλικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	1
1. Θεωρία	3
1.1 Η μικροδομή του χάλυβα.....	3
1.2 Μαρτενσίτης-Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός.....	4
1.3 Μετασχηματισμός Φάσεων – Διάγραμμα CCT.....	5
1.4 Εμβαπτότητα	7
2. Κατασκευή Συσκευής Εμβαπτότητας	13
2.1 Σχεδιασμός	13
2.2 Τα Τμήματα της Συσκευής.....	14
3. Η Δοκιμή Jominy	19
3.1 Οι χάλυβες.....	19
3.2 Η Τυποποιημένη Διαδικασία	20
3.3 Προετοιμασία.....	21
3.4 Το Πείραμα.....	24
3.5 Σκληρομετρήσεις.....	27
3.6 Μεταλλογραφική Ανάλυση και Μέτρηση Μεγέθους Κόκκου	30
4. Αποτελέσματα	33
4.1 Σκληρομετρήσεις.....	33
4.2 Μεταλλογραφίες.....	42
5. Συμπεράσματα	44
5.1 Συσκευή Βαφής.....	44
5.2 Σκληρομετρήσεις – Χημική Σύσταση.....	44
5.3 Μικροδομή.....	47
5.4 Γενικά Συμπεράσματα.....	47
Σύνοψη	49
Βιβλιογραφία	50
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	52
Παράρτημα Α	53
Παράρτημα Β	62

Εισαγωγή

Ο χάλυβας μπορεί να χαρακτηριστεί, χωρίς υπερβολή, ως ένα από τα βασικά υλικά που έδωσαν στον σύγχρονο κόσμο τη σημερινή του μορφή. Υλικό που οφείλει τη έντονη χρήση του στο μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων που διαθέτει, χρησιμοποιήθηκε από τα αρχαία χρόνια τόσο δημιουργικά (εργαλεία, κατασκευές) όσο και καταστροφικά (όπλα). Το αποκορύφωμα στην επιστημονική μελέτη του χάλυβα, αλλά και στην παραγωγή του ήρθε στον 20^ο αιώνα, όπου και συνεχίστηκε αυτή η διττή χρήση του, αφού αποτέλεσε τον πυλώνα τόσο της ειρηνικής όσο και της πολεμικής βιομηχανίας. Ο καίριος ρόλος του στην παγκόσμια ιστορία επιβεβαιώθηκε όταν μαζί με την άλλη κινητήρια δύναμη του βιομηχανικού κόσμου, τα καύσιμα, έγιναν ο λόγος που σχηματίστηκε η πρώτη ένωση ευρωπαϊκών χωρών, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα.

Αναπόσπαστο κομμάτι στην παραγωγή του χάλυβα αποτελούν οι θερμικές κατεργασίες στις οποίες υπόκειται. Ως *θερμική κατεργασία (heat treatment)* εννοείται η ελεγχόμενη θέρμανση και ψύξη του χάλυβα για τη μεταβολή της μικροδομής του με σκοπό τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων του^[1]. Όλα σχεδόν τα μηχανολογικά στοιχεία (π.χ. γρανάζια, άξονες κ.λπ.) υπόκεινται σε κάποια θερμική κατεργασία κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους. Η παλαιότερη και συνηθέστερη θερμική κατεργασία είναι η βαφή (θέρμανση και απότομη ψύξη) του χάλυβα με σκοπό τη σκλήρυνσή του. Η διαδικασία αυτή, παρά την απλότητα που δείχνει να έχει με την πρώτη ματιά, είναι εξαιρετικά σύνθετη, αφού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι οι βαθμοί που θα πρέπει να θερμανθεί ο χάλυβας, ο ρυθμός και το μέσο ψύξης του, η γεωμετρία του κομματιού που θα βαφεί, η χημική σύστασή του και η επίδρασή της στην όλη διαδικασία. Παραμέληση των παραπάνω παραγόντων μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως η στρέβλωση του χάλυβα ή η δημιουργία ρηγματώσεων.

Όλα τα παραπάνω αναδεικνύουν ερωτήματα όπως «Όλοι οι χάλυβες συμπεριφέρονται το ίδιο όταν βαφτούν;» ή «Τι κάνει ένα χάλυβα να σκληραίνει όταν βάφεται;». Οι απαντήσεις σε τέτοιες ερωτήσεις έρχονται από τη μελέτη μιας ιδιότητας των χαλύβων, της *εμβαπτότητας*, που θα οριστεί αργότερα και καθορίζει το πόσο και το πώς θα σκληρύνει ένας χάλυβας όταν βαφεί.

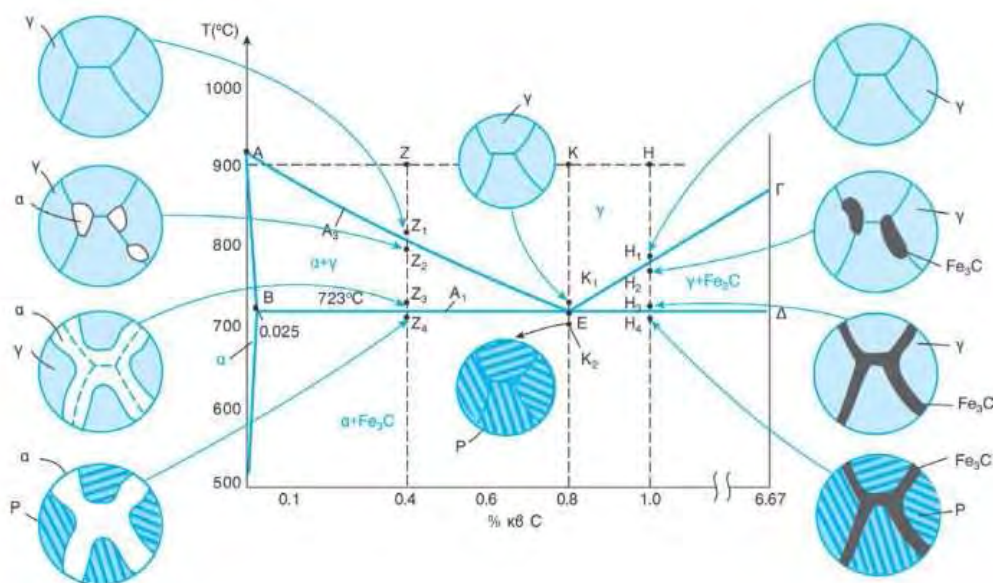
Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνει στη μελέτη της εμβαπτότητας και της μέτρησής της μέσω μιας δοκιμής, της δοκιμής Jominy. Το πρώτο κεφάλαιο περιλαμβάνει βασικές αρχές της φυσικής μεταλλουργίας των χαλύβων, όπως παρουσιάστηκαν στα συγγράμματα των Χαϊδεμενόπουλου^[2], H.K.D.H. Bhadeshia^[3] και R.W.K. Honeycombe^[4]. Στο δεύτερο περιγράφεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή της συσκευής βαφής των χαλύβων. Στο τρίτο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία της δοκιμής Jominy, καθώς και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα κεφάλαια 2 και 3 είναι βασισμένα στην προδιαγραφή για μέτρηση της εμβαπτότητας από την ASTM International (American Society for

Testing and Materials). Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τέλος στο πέμπτο τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακολουθεί μια σύνοψη της εργασίας και το Παράρτημα, όπου βρίσκονται πίνακες αναλυτικών αποτελεσμάτων, κάποια επιπρόσθετα γραφήματα και μέρος της προδιαγραφής για τη μέτρηση τη εμβαπτότητας.

1. Θεωρία

1.1 Η μικροδομή του χάλυβα

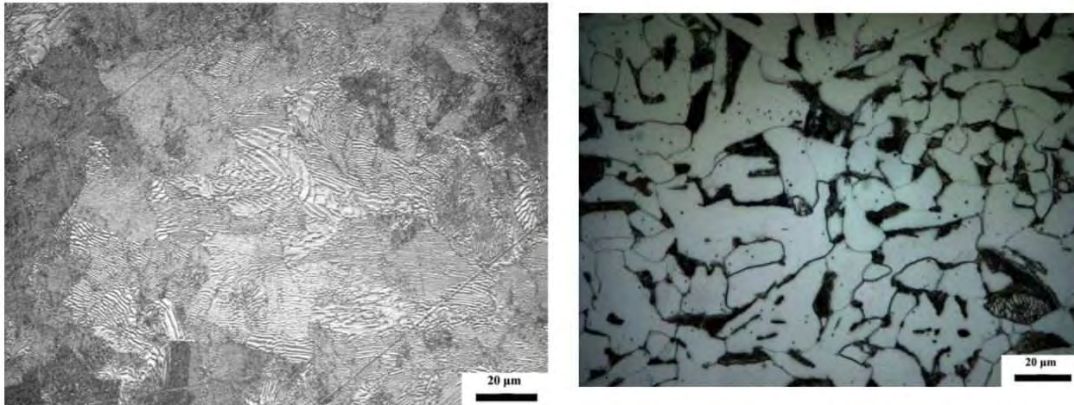
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή εφαρμόζονται θερμικές κατεργασίες στους χάλυβες με σκοπό τη διαμόρφωση των ιδιοτήτων τους, μέσω της μεταβολής της μικροδομής τους. Ως μικροδομή εννοούνται οι διάφορες φάσεις από τις οποίες αποτελείται ο χάλυβας. Κύρια φάση αποτελεί το στερεό διάλυμα παρεμβολής του γ -Fe (σίδηρος με έδροκεντρομένη κρυσταλλική δομή - FCC) με τον άνθρακα C, ο ωστενίτης, ο οποίος κυριαρχεί στις θερμοκρασίες μεταξύ 910-1400°C. Οι υπόλοιπες φάσεις προκύπτουν από την ψύξη του ωστενίτη και ο σχηματισμός του εξαρτάται από το ρυθμό ψύξης και την περιεκτικότητα σε C και κραματικά στοιχεία. Οι φάσεις αυτές είναι το στερεό διάλυμα παρεμβολής του α -Fe (σίδηρος με χώροκεντρομένη κρυσταλλική δομή - BCC) με τον άνθρακα, ο φερρίτης, που σχηματίζεται με όταν ένας χάλυβας είναι υποευτηκτοειδής ($C < 0.8\%$), το καρβίδιο του σιδήρου με τον άνθρακα με σύσταση Fe_3C , ο σεμεντίτης, ο περλίτης (P) που είναι ένα μίγμα των φάσεων του φερρίτη και του σεμεντίτη και σχηματίζεται μέσω της ευτηκτοειδούς αντίδρασης, όταν η θερμοκρασία κατά την ψύξη πέσει κάτω από το όριο 723°C (ευτηκτοειδής καμπύλη).



Εικόνα 1 Τμήμα διαγράμματος φάσεων Fe-C με αντίστοιχες μικροδομές κατά την ψύξη ευτηκτοειδών, υποευτηκτοειδών και υπereυτηκτοειδών χαλύβων. Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

Οι άλλες δύο φάσεις είναι ο μπαινίτης, που προκύπτει από το μετασχηματισμό του ωστενίτη στη θερμοκρασιακή περιοχή ανάμεσα στους 550°C και τη θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού M_s ($M_s < T < 550$) και τέλος ο μαρτενσίτης, που σχηματίζεται όταν ο ωστενίτης ψυχθεί απότομα και αφού η

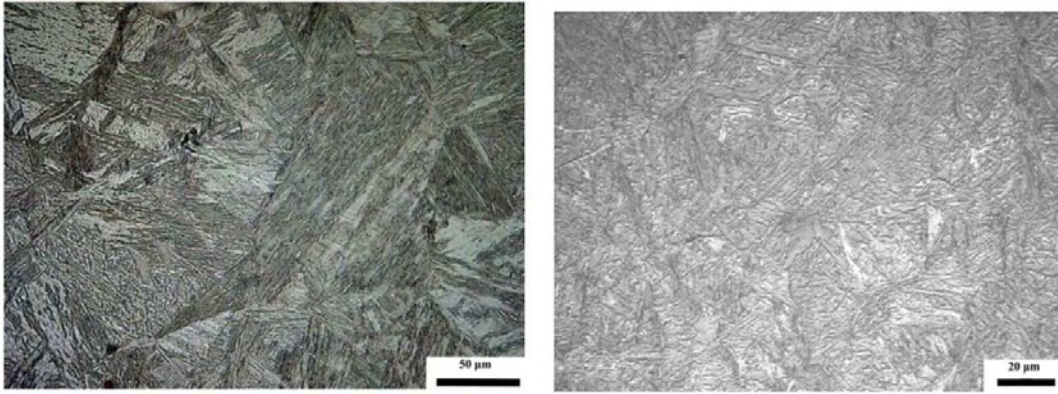
Θερμοκρασία πέσει κάτω από την M_s . Στο σχηματισμό του μαρτενσίτη θα σταθούμε περισσότερο, διότι σχετίζεται άμεσα με την ιδιότητα της εμβαιπτότητας.



Εικόνα 2 Αριστερά: Μικροδομή περλίτη, Δεξιά: Φερριτοπερλιτική δομή. Με λευκό χρώμα ο φερρίτης και μαύρο ο περλίτης. Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

1.2 Μαρτενσίτης-Μαρτενσιτικός Μετασχηματισμός

Όταν ένας χάλυβας θερμανθεί μέχρι τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησής του (δηλαδή σχηματιστεί ωστενίτης) και ψυχθεί απότομα (βαφεί), προκαλείται ο *μαρτενσιτικός μετασχηματισμός*. Τα άτομα του άνθρακα δεν προλαβαίνουν να διαχυθούν από τις οκταεδρικές θέσεις του ωστενιτικού πλέγματος (FCC). Αφού παρεμποδίζεται ο μετασχηματισμός FCC→BCC, το πλέγμα μετατρέπεται σε τετραγωνικό χωροκεντρωμένο (BCT). Η νέα αυτή φάση είναι ο μαρτενσίτης. Στο κέντρο του νέου πλέγματος βρίσκεται ο άνθρακας, που ως άτομο παρεμβολής του προκαλεί μια ασύμμετρη παραμόρφωση. Το μη συμμετρικό πεδίο που αναπτύσσεται αλληλεπιδρά με τα τασικά πεδία των αταξιών, εμποδίζοντας την κίνησή τους, δίνοντας έτσι στον μαρτενσίτη τη μεγάλη σκληρότητά του. Ο μαρτενσίτης παίρνει τη μορφή βελόνων (για χάλυβα με περιεκτικότητα $C < 0.4\%$), πλακιδίων ($C > 0.6\%$) ή και μικτή ($0.4\% < C < 0.6\%$). Τα πολλά νέα όρια που δημιουργούνται εμποδίζουν και αυτά την κίνηση των αταξιών συμβάλλοντας στην περαιτέρω αύξηση της σκληρότητας. Η μορφολογία του μαρτενσίτη είναι τόσο ξεκάθαρη στην περίπτωση ενός απλού ανθρακοχάλυβα. Όταν εξετάζεται ένας χάλυβας με κραματικά στοιχεία (άτομα αντικαταστάσεως) η παρατήρηση της γίνεται ιδιαίτερα δύσκολη.

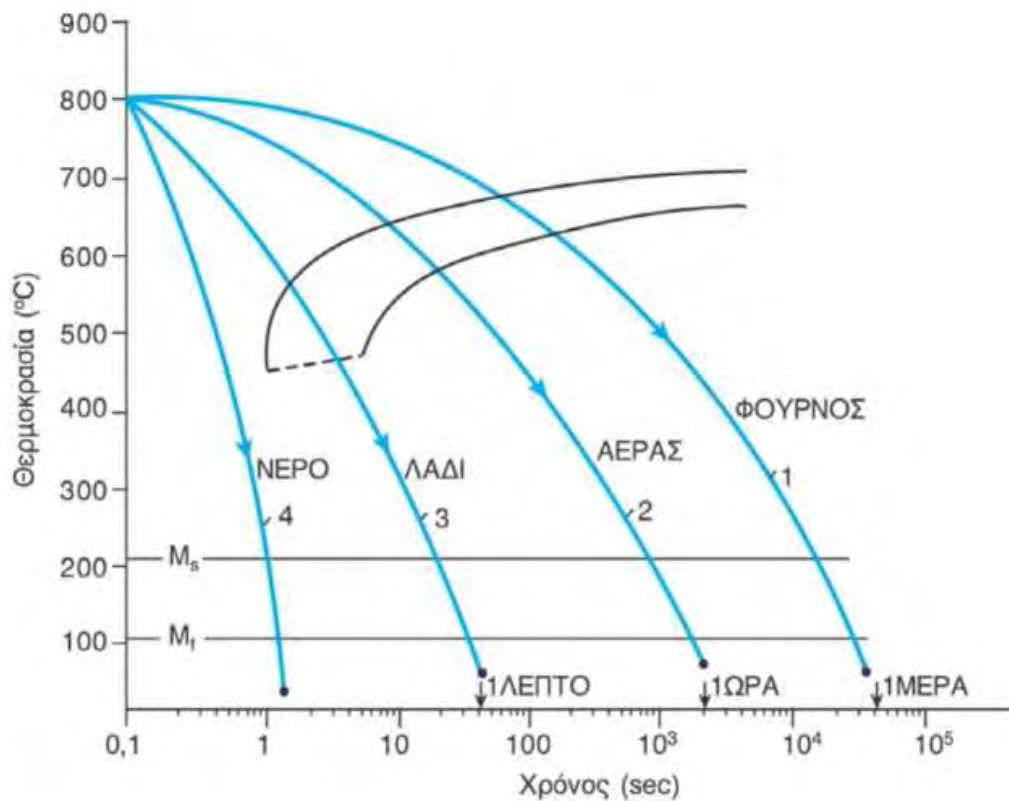


Εικόνα 3 Αριστερά: Βελονοειδής μαρτενσίτης (lath martensite), Δεξιά: Πλακίδια μαρτενσίτη (plate martensite). Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

1.3 Μετασχηματισμός Φάσεων – Διάγραμμα CCT

Οι φάσεις του χάλυβα που αναφέρθηκαν πρωτίτερα (συμπεριλαμβανομένου και του μαρτενσίτη) προκύπτουν από μετασχηματισμούς του ωστενίτη, οι οποίοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τους ισόθερμους μετασχηματισμούς (Isothermal Transformations - IT), στους οποίους ο χάλυβας φέρεται σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία (όπου σχηματίζεται κάποια φάση) και παραμένει εκεί μέχρι να πραγματοποιηθεί η μετατροπή του ωστενίτη, και τους μετασχηματισμούς συνεχούς ψύξεως (Continuous Cooling Transformations - CCT), στους οποίους η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς με σταθερό ρυθμό και ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε άλλες φάσεις γίνεται κατά τη διάρκεια της ψύξης. Μέσω ισόθερμων μετασχηματισμών ο ωστενίτης μετατρέπεται σε χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο περλίτη και μπαινίτη, ενώ μέσω μετασχηματισμών συνεχούς ψύξεως σε χονδρόκοκκο και λεπτόκοκκο περλίτη, σε μίγμα περλίτη και μαρτενσίτη, καθώς και σε καθαρό μαρτενσίτη. Οι μετασχηματισμοί αυτοί απεικονίζονται αντίστοιχα με τα διαγράμματα IT και CCT. Στα τελευταία θα δοθεί και μεγαλύτερη προσοχή, αφού σε αυτή την κατηγορία ανήκει και ο μαρτενσίτης.

Η έμφαση στον μαρτενσίτη δίνεται γιατί αυτό ακριβώς είναι που μετρά η εμβαπτότητα. Σύμφωνα με τους H.K.D.H. Bhadeshia και R.W.K. Honeycombe, *εμβαπτότητα* είναι η ικανότητα ενός χάλυβα να σχηματίσει μαρτενσίτη κατά τη βαφή^[5]. Μέσω των διαγραμμάτων CCT μπορεί κανείς να διακρίνει το αν και το πόσο εύκολα θα σχηματιστεί μαρτενσίτης.



Εικόνα 4 Διάγραμμα CCT ευτηκτοειδούς χάλυβα με τέσσερα δοκίμια που ψύχονται σε διαφορετικά μέσα βαφής. Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα CCT με τις καμπύλες μαύρου χρώματος. Οι καμπύλες αυτές σηματοδοτούν την έναρξη και τη λήξη του περλιτικού μετασχηματισμού. Οι καμπύλες μπλε χρώματος αποτελούν τους διαφορετικούς ρυθμούς ψύξεως κάθε δοκιμίου που αντιστοιχούν σε διαφορετικό μέσο βαφής, ενώ με ευθείες γραμμές εμφανίζονται οι θερμοκρασίες έναρξης και λήξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s και M_f). Όταν η καμπύλη ρυθμού ψύξεως ενός δοκιμίου τμήσει τις καμπύλες έναρξης και λήξης του περλιτικού μετασχηματισμού, σημαίνει πως ο άνθρακας προλαβαίνει να διαχυθεί και όλος ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί σε περλίτη (καμπύλες 1,2 – φούρνος, αέρας). Ο χάλυβας που ψύχεται στο φούρνο σχηματίζει περλίτη σε υψηλές θερμοκρασίες, άρα θα είναι χονδρόκοκκος, ενώ ο περλίτης του χάλυβα που ψύχεται στον αέρα σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και έτσι είναι λεπτόκοκκος. Στην περίπτωση που το δοκίμιο βάφεται σε λάδι, η καμπύλη 3 τέμνει την αντίστοιχη έναρξης του περλιτικού μετασχηματισμού, αλλά όχι αυτή της λήξης οπότε ένα μέρος του ωστενίτη γίνεται περλίτης και ένα μέρος μαρτενσίτης. Τέλος όταν η βαφή γίνεται σε νερό η καμπύλη του ρυθμού ψύξεως (καμπύλη 4) περνάει αριστερά από τις καμπύλες του περλιτικού μετασχηματισμού και ο ωστενίτης μετατρέπεται 100% σε μαρτενσίτη. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πόσο σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του μαρτενσίτη παίζει ο ρυθμός ψύξεως του χάλυβα (άρα και το μέσο βαφής), αλλά και η θέση του

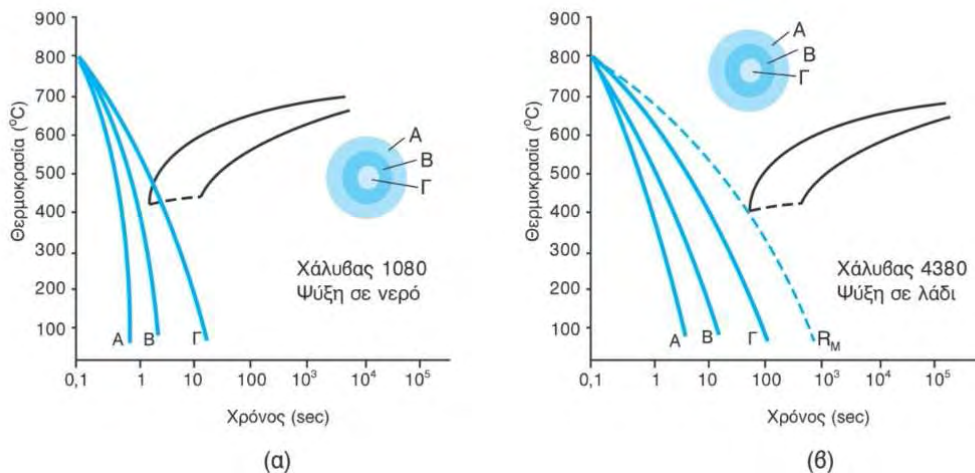
διαγράμματος CCT (των καμπύλων του περλιτικού μετασχηματισμού), η οποία εξαρτάται από τη χημική σύσταση του χάλυβα.

1.4 Εμβαπτότητα

Στην ενότητα 1.3 η εμβαπτότητα ορίστηκε ως η ικανότητα ενός χάλυβα να σχηματίζει μαρτενσίτη κατά τη βαφή. Ένας πιο ειδικός ορισμός είναι ότι η εμβαπτότητα αποτελεί την *ευκολία* με την οποία μπορεί να σχηματίσει ένας χάλυβας μαρτενσίτη κατά τη βαφή. Ο δεύτερος ορισμός παραπέμπει αμέσως στα διαγράμματα CCT. Αν ένας χάλυβας A με ένα ρυθμό ψύξεως Ψ σχηματίζει μαρτενσίτη (δηλαδή η καμπύλη του δεν τέμνει τις καμπύλες CCT), ενώ ένας χάλυβας B με τον ίδιο ρυθμό ψύξεως Ψ , σχηματίζει περλίτη ή μίγμα περλίτη-μαρτενσίτη, τότε ο A έχει μεγαλύτερη εμβαπτότητα από τον B.

Η εμβαπτότητα μπορεί να μετρηθεί με δύο μεθόδους, οι οποίες περιλαμβάνουν τη θέρμανση κυλινδρικού δοκιμίου χάλυβα στην ωστενιτική περιοχή και στη συνέχεια τη βαφή του. Στην πρώτη μέθοδο η προσοχή στρέφεται στο μέγεθος της διαμέτρου του δοκιμίου και στο βάθος που θα φτάσει να σχηματιστεί ο μαρτενσίτης. Αντίστοιχα στη δεύτερη μέθοδο μετριέται η απόσταση από το άκρο του δοκιμίου (κατά το μήκος του) που θα σχηματιστεί μαρτενσίτης. Αυτή είναι και η μέθοδος που εφαρμόζεται στη δοκιμή Jominy.

Οι δυο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία της βαφής είναι η γεωμετρία του δοκιμίου και η χημική σύσταση του χάλυβα^[6]. Αντίστοιχα η εμβαπτότητα επηρεάζεται από το μέγεθος του ωστενιτικού κόκκου και τη χημική σύσταση^[7]. Είναι φανερό ότι ο κοινός τόπος είναι η σύσταση του χάλυβα και σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην επιρροή που έχει.



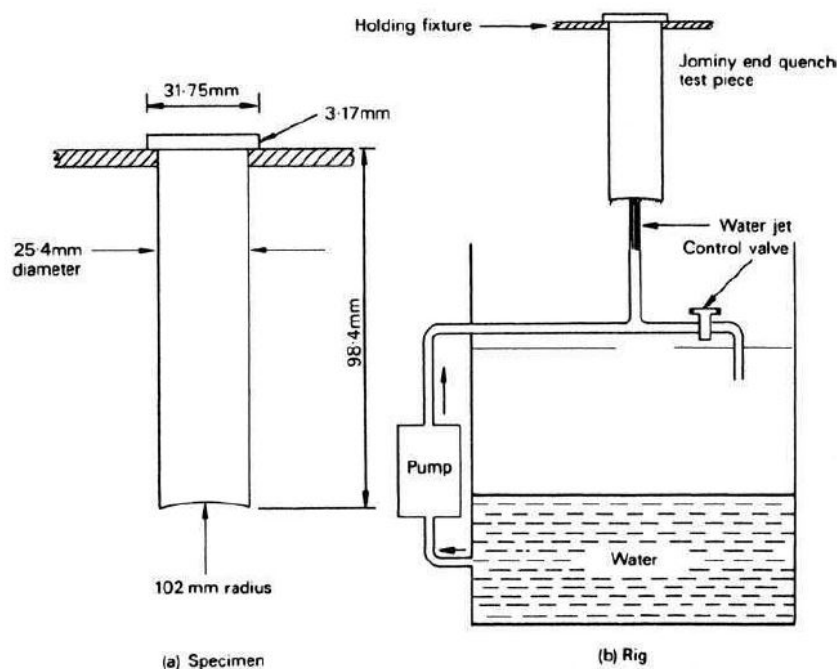
Εικόνα 5 Διαγράμματα CCT και καμπύλες ψύξεως για τους χάλυβες (α) 1080 με βαφή σε νερό, (β) 4380 με βαφή σε λάδι. Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

Έστω οι χάλυβες 1080 και 4380 της Εικόνας 5. Τα δοκίμια των δύο χαλύβων έχουν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θερμαίνονται στην ωστενιτική περιοχή και βάφονται. Ο 1080 βάφεται σε νερό, ενώ ο 4380 βάφεται σε λάδι. Παρ' ότι ο 4380 βάφτηκε σε ένα πιο ήπιο μέσο από το νερό, το λάδι, που δίνει χαμηλότερο ρυθμό ψύξεως σχηματίζει μαρτενσίτη μέχρι και στο κέντρο του δοκιμίου (περιοχή Γ). Αντίθετα ο 1080 σχηματίζει μαρτενσίτη μόνο στις περιοχές Α και Β, ενώ στην περιοχή Γ σχηματίζει μίγμα περλίτη-μαρτενσίτη. Η αιτία αυτής της συμπεριφοράς είναι η μετακίνηση των καμπύλων CCT πιο δεξιά στο διάγραμμα (β), τοποθετώντας έτσι όλες τις καμπύλες ρυθμού ψύξεως του 4380 κάτω από την κρίσιμη καμπύλη R_M που σχηματίζεται πρώτη φορά 100% μαρτενσίτης. Η μετατόπιση των καμπύλων οφείλεται στη χημική σύσταση του χάλυβα 4380. Ενώ οι δύο χάλυβες έχουν ίδια περιεκτικότητα σε C (0.8%), ο 4380 περιέχει και κραματικά στοιχεία, όπως Cr, Mn και Ni. Όλα τα παραπάνω αποτελούν στοιχεία αντικατάστασης. Για να πραγματοποιηθεί ο περλιτικός μετασχηματισμός πρέπει να διαχυθούν, εκτός από τον C που είναι άτομο παρεμβολής και τα άτομα αντικατάστασης, τα οποία διαχέονται πολύ πιο αργά από τα αντίστοιχα παρεμβολής. Έτσι καθυστερείται η διαδικασία του περλιτικού μετασχηματισμού και οι καμπύλες του στο διάγραμμα CCT μετατοπίζονται στα δεξιά (σε μεγαλύτερους χρόνους), καθιστώντας πιο εύκολο το σχηματισμό μαρτενσίτη (δηλαδή με πιο ήπια μέσα βαφής και χαμηλότερους ρυθμούς ψύξεως). Βάσει του ορισμού που δόθηκε ευκολότερος σχηματισμός μαρτενσίτη σημαίνει και αύξηση της εμβαπτότητας.

Από αυτό το παράδειγμα φαίνεται ότι όποιο στοιχείο καθυστερεί τον περλιτικό μετασχηματισμό αυξάνει την εμβαπτότητα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του C τόσο περισσότερο χρόνος θα χρειαστεί για να διαχυθεί και να σχηματιστεί ο περλίτης. Άρα υψηλή περιεκτικότητα σε Cr, Mn, Mo και Ni (άτομα αντικαταστάσεως), αλλά και C οδηγούν σε αύξηση της εμβαπτότητας.

Ο άλλος σημαντικός παράγοντας της εμβαπτότητας είναι το μέγεθος του ωστενιτικού κόκκου. Ο ωστενίτης σχηματίζεται μέσω πυρήνωσης και ανάπτυξης και το μέγεθος του κόκκου του εξαρτάται από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και το χρόνο που θα παραμείνει σε αυτή τη θερμοκρασία ο χάλυβας. Η επίδρασή του στην εμβαπτότητα βασίζεται στο γεγονός ότι τα σύνορα των κόκκων του λειτουργούν ως θέσεις ετερογενούς πυρήνωσης για τον περλίτη. Συνεπώς όσο πιο λεπτόκοκκος είναι ο ωστενίτης, τόσο περισσότερα είναι τα σύνορα στα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η πυρήνωση του περλίτη. Έτσι αυξάνεται η ταχύτητα του περλιτικού μετασχηματισμού, οι καμπύλες του διαγράμματος CCT μετατοπίζονται στα αριστερά, δυσκολεύοντας το σχηματισμό μαρτενσίτη και μειώνοντας τελικά την εμβαπτότητα. Για αυτό το λόγο το μεγάλο μέγεθος ωστενιτικού κόκκου οδηγεί σε αύξηση της εμβαπτότητας.

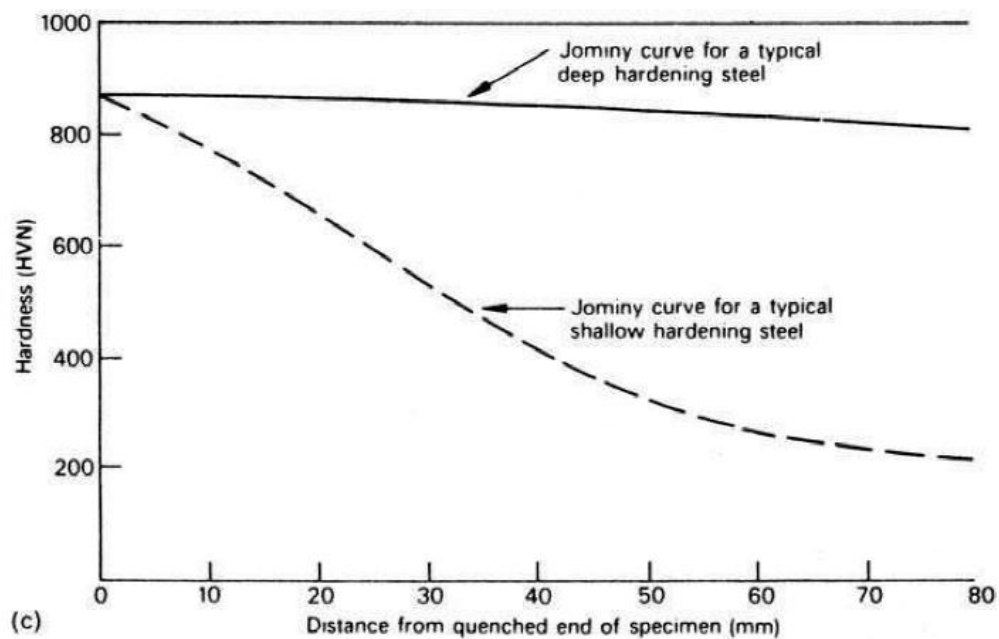
Η πιο συνηθισμένη μέθοδος προσδιορισμού της εμβαπτότητας είναι μέσω της δοκιμής Jominy. Από τον χάλυβα που ζητείται να προσδιοριστεί η εμβαπτότητα δημιουργείται ένα κυλινδρικό δοκίμιο συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών και αφού θερμανθεί στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησής του, ψύχεται με τον ψεκάσμο ενός πίδακα νερού στο κάτω άκρο του για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται σε μια συσκευή βαφής. Η κατασκευή της συσκευής και το πείραμα περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα η εμβαπτότητα στη δοκιμή Jominy μετρείται μέσω της μεθόδου, όπου μετρείται η απόσταση που σχηματίστηκε μαρτενσίτης από το άκρο βαφής του δοκιμίου.



Εικόνα 6 Διαστασιολόγηση του δοκιμίου και διάταξη της συσκευής εμβαπτότητας.

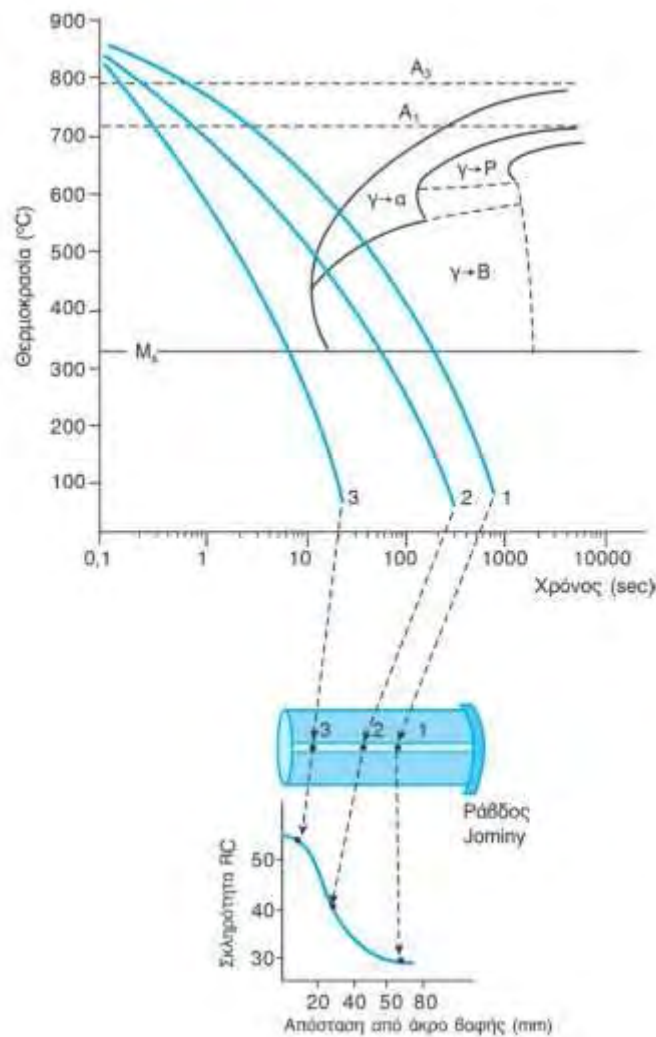
Πηγή: H.K.D.H. Bhadeshia and R.W.K. Honeycombe, "Steels – Microstructure and Properties", Elsevier Ltd, (2006).

Στη συνέχεια μετά από κατάλληλη προετοιμασία, γίνονται σκληρομετρήσεις στην επιφάνεια των δοκιμίων (κατά το μήκος τους). Οι τιμές της σκληρότητας συγκεντρώνονται σε γραφήματα Σκληρότητας-Απόστασης από το άκρο βαφής, σχηματίζοντας την καμπύλη εμβαπτότητας (ή καμπύλη Jominy) του χάλυβα. Στο άκρο βαφής η σκληρότητα έχει πάντα μέγιστη τιμή (και σχηματίζεται μαρτενσίτης), αφού είναι το σημείο που έρχεται αμέσως σε επαφή με το νερό. Αν η σκληρότητα διατηρηθεί κοντά σε αυτή τη μέγιστη τιμή καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου σημαίνει πως σχηματίστηκε παντού μαρτενσίτης και η εμβαπτότητα είναι υψηλή. Στην περίπτωση που η καμπύλη παρουσιάσει μια φθίνουσα πορεία, πέφτει κι η εμβαπτότητα.



Εικόνα 7 Διάγραμμα Σκληρότητας-Απόστασης από το άκρο βαφής με καμπύλες εμβαπτότητας. Η συνεχής καμπύλη δείχνει υψηλή εμβαπτότητα, ενώ η διακεκομμένη χαμηλή. Πηγή: H.K.D.H. Bhadeshia and R.W.K. Honeycombe, "Steels – Microstructure and Properties", Elsevier Ltd, (2006).

Τα γραφήματα Σκληρότητας-Απόστασης από το άκρο βαφής, που περιέχουν τις καμπύλες Jominy μπορούν να συνδεθούν με τα διαγράμματα CCT, που τόσο βοήθησαν στην κατανόηση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού και της εμβαπτότητας στις πρώτες ενότητες του κεφαλαίου. Σκοπός είναι η αντιστοίχιση τμημάτων της καμπύλης εμβαπτότητας με τις διαφορετικές φάσεις που σχηματίζονται στο χάλυβα.



Εικόνα 8 Αντιστοιχία σημείων καμπύλης εμβαπτότητας με σημεία της ράβδου Jominy και ρυθμού ψύξης του διαγράμματος CCT. Πηγή: Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007).

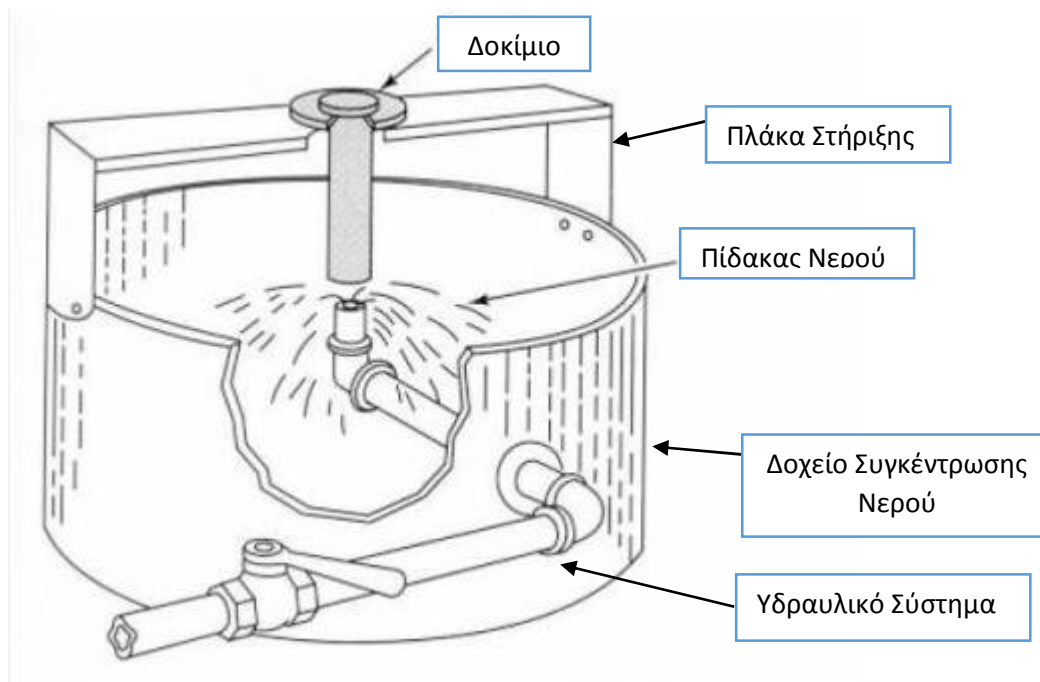
Στην Εικόνα 8 φαίνεται η αντιστοιχία ανάμεσα στα δύο διαγράμματα. Το σημείο 3 στη ράβδο Jominy έχει μεγάλη σκληρότητα, όπως δείχνει η καμπύλη εμβαπτότητας και αντιστοιχεί στην καμπύλη ρυθμού ψύξης 3 στο διάγραμμα CCT, το οποίο φανερώνει το σχηματισμό μαρτενσίτη. Όσο πέφτει η καμπύλη εμβαπτότητας, τα σημεία της αντιστοιχούν σε όλο και πιο αργούς ρυθμούς ψύξης και από το διάγραμμα CCT διακρίνεται ο σχηματισμός άλλων φάσεων.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πέραν της πειραματικής μεθόδου, υπάρχει και η θεωρητική μέθοδος υπολογισμού της εμβαπτότητας Jominy από την τιμή της χημικής ιδεατής διαμέτρου (chemical ideal diameter, DI). Η μέθοδος αυτή έχει βασιστεί στις μελέτες του M.A. Grossman και υπολογίζει το βάθος που θα σχηματιστεί μαρτενσίτης (ως προς τη διάμετρο του δοκιμίου), χρησιμοποιώντας

μόνο τη χημική του σύσταση. Στην περιεκτικότητα κάθε κραματικού στοιχείου, που αυξάνει την εμβαπτότητα, αντιστοιχεί ένας πολλαπλασιαστικός συντελεστής και όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα τόσο αυξάνει ο συντελεστής. Οι συντελεστές όλων των στοιχείων προστίθενται δίνοντας τελικά την τιμή της DI. Μεγάλη προσοχή δίνεται στις περιπτώσεις των χαλύβων που περιέχουν βόριο (B), για αυτό και δημιουργήθηκε ο παράγοντας βορίου (boron factor), ο οποίος έχει αντίστροφη συμπεριφορά από την περιεκτικότητα του άνθρακα και των κραματικών στοιχείων. Όσο μεγαλύτερη είναι τα ποσοστά τους στο χάλυβα, τόσο μικρότερος είναι ο παράγοντας βορίου. Η μέθοδος αυτή δε χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αφού είναι εφαρμόσιμη σε χάλυβες με συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε άνθρακα και κραματικά στοιχεία και οι χάλυβες που εξετάστηκαν είχαν σύσταση εκτός αυτού του εύρους τιμών. Όμως για το πεδίο χαλύβων που κινείται η μέθοδος είναι αρκετά ακριβής και βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

2. Κατασκευή Συσκευής Εμβαπτότητας

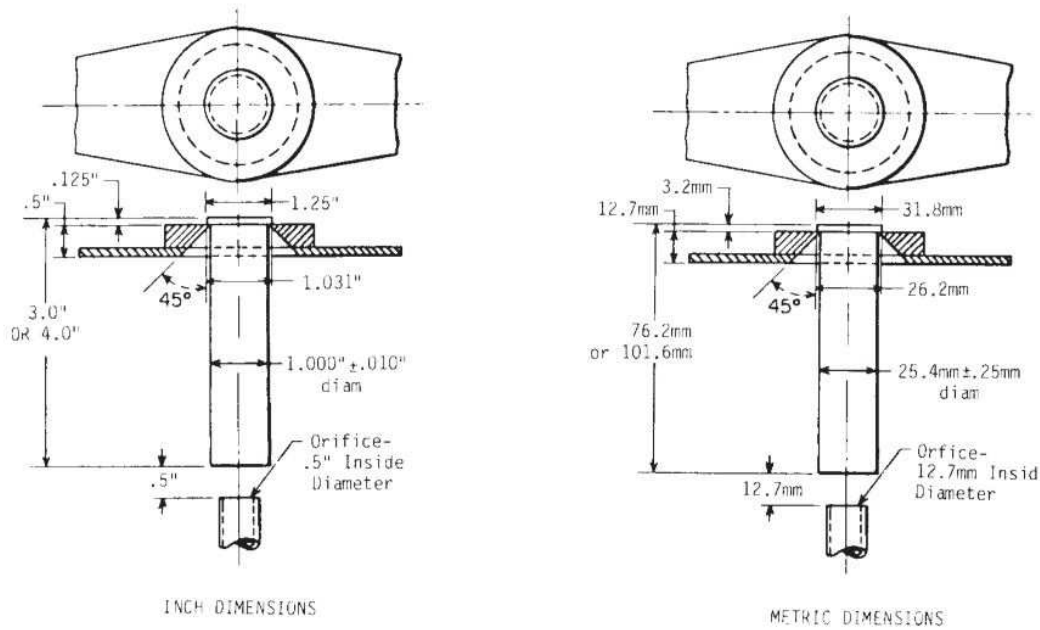
Για την πραγματοποίηση της δοκιμής Jominy κατασκευάστηκε συσκευή για τη βαφή των δοκιμών χάλυβα, σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM A 255 - 02^[8] (βλ. Παράρτημα). Η συσκευή περιλαμβάνει το δοχείο συγκέντρωσης του χρησιμοποιημένου νερού από τη βαφή, που αποτελεί και το «σώμα» της, την πλάκα στήριξης του δοκιμίου, το υδραυλικό σύστημα παροχής του νερού και τον εξωσκελετό στήριξης – μεταφοράς.



Εικόνα 9 Διάταξη συσκευής εμβαπτότητας. Πηγή: www.practicalmaintenance.net

2.1 Σχεδιασμός

Η προδιαγραφή προβλέπει την τοποθέτηση ενός δοκιμίου χάλυβα μέσα στην πλάκα στήριξης. Το κάτω άκρο του δοκιμίου θα πρέπει να απέχει 12.7 mm από το άνοιγμα ενός σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 12.7 mm (0.5") που θα παρέχει το νερό για τη βαφή. Η παροχή του νερού θα πρέπει να ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο πίδακας να φτάνει σε συγκεκριμένο ύψος. Το παρακάτω σχήμα προέρχεται από την προδιαγραφή και ορίζει ακριβώς τις διαστάσεις των τμημάτων της συσκευής που συμμετέχουν άμεσα στη βαφή.

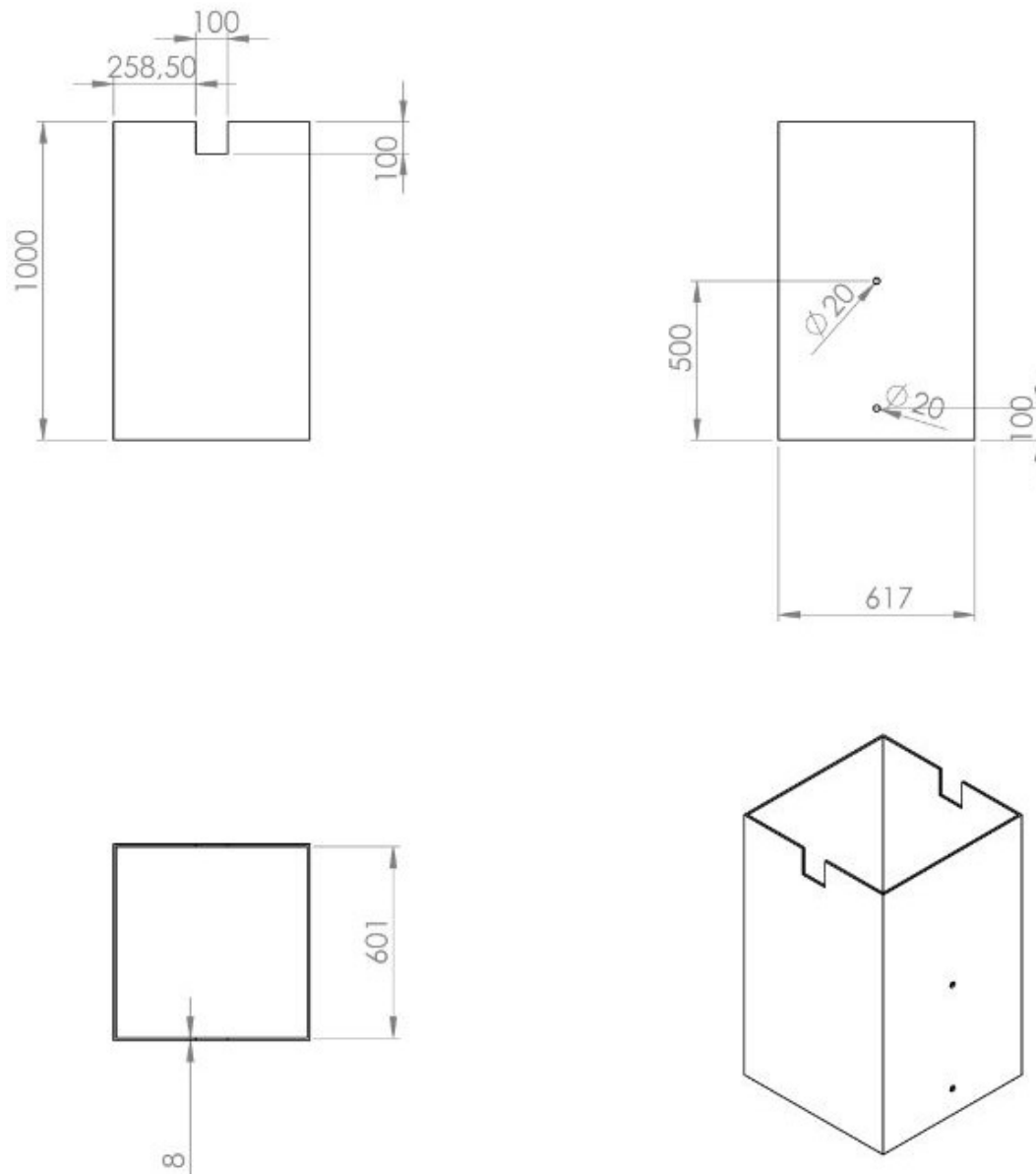


Εικόνα 10 Σχέδιο της συσκευής από την προδιαγραφή.

Ο σχεδιασμός της συσκευής επικεντρώθηκε στα τμήματα που η διαστασιολόγησή τους ορίζεται αυστηρά από την προδιαγραφή. Αυτά είναι η πλάκα στήριξης και τα δοκίμια. Παρά το γεγονός ότι το «σώμα» δεν αναφέρεται, ο σχεδιασμός του ήταν εξίσου σημαντικός, λόγω του μεγάλου μεγέθους του, της συμβολής του στη στήριξη της συσκευής, αλλά και λόγω της μεγάλης συμμετοχής του στο συνολικό κόστος της. Τα υπόλοιπα προαναφερθέντα τμήματα (εκτός του άκρου της σωλήνωσης) δεν ορίζονται από την προδιαγραφή και η κατασκευή τους ήταν ελεύθερη, ώστε να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή λειτουργία της συσκευής.

2.2 Τα Τμήματα της Συσκευής

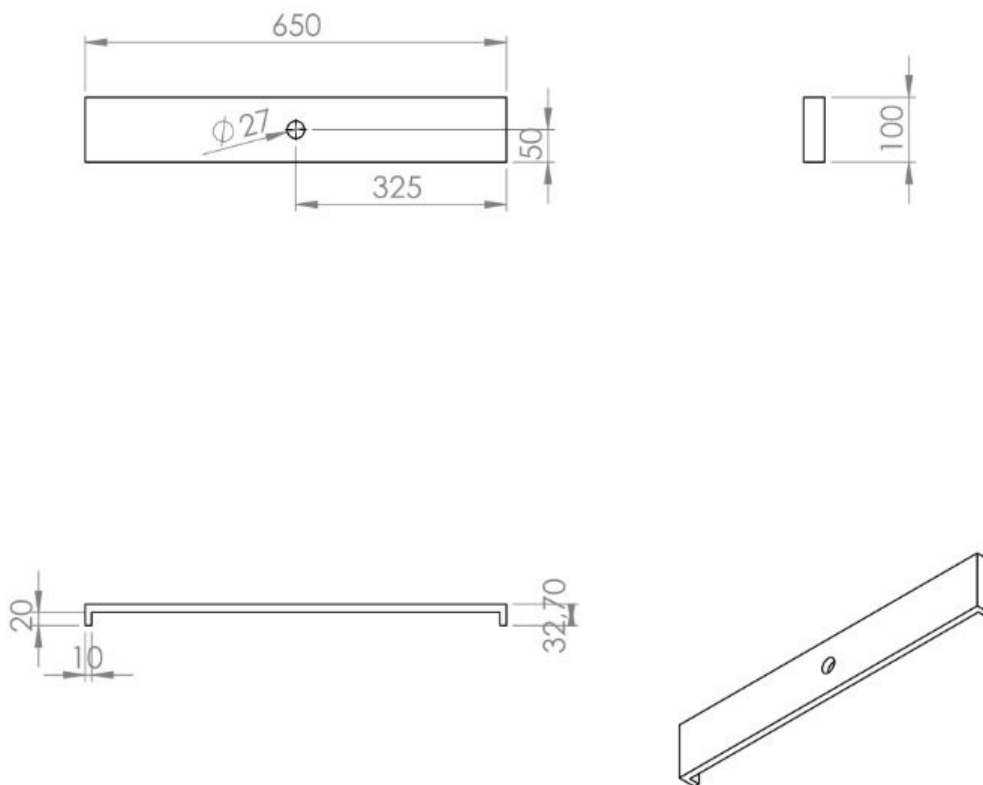
Το δοχείο συγκέντρωσης του νερού σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να συναρμολογηθεί πάνω του όλη η υπόλοιπη συσκευή. Το υλικό κατασκευής είναι το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (Poly methyl methacrylate ή PMMA), γνωστό και ως Plexiglas.



Εικόνα 11 Σχέδιο του δοχείου συγκέντρωσης χρησιμοποιημένων υδάτων

Το σχήμα του είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με βασικές διαστάσεις 617x617x1000 mm και αποτελείται από 4 πλάκες και μια βάση που κολλήθηκαν μεταξύ τους. Το πάχος κάθε πλάκας Plexiglas είναι 8 mm. Το μεγάλο μέγεθος του δοχείου προτιμήθηκε, ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει μια ικανοποιητική ποσότητα νερού πριν χρειαστεί να αδειάσει, αφού κατά τη διάρκεια των δοκιμών Jominy δεν ήταν δυνατή η ταυτόχρονη απομάκρυνση του χρησιμοποιημένου νερού. Στο πάνω μέρος του υπάρχει μια διαμπερής τετραγωνική οπή 100x100 mm, για να τοποθετείται η πλάκα στήριξης. Τέλος σε ύψος 500 mm και 100 mm από τη βάση του υπάρχουν κυκλικές οπές διαμέτρου 20 mm. Από την πρώτη περνά ο σωλήνας παροχής του νερού για τη βαφή, ενώ στη δεύτερη υπάρχει διακόπτης για να απομάκρυνση του χρησιμοποιημένου νερού.

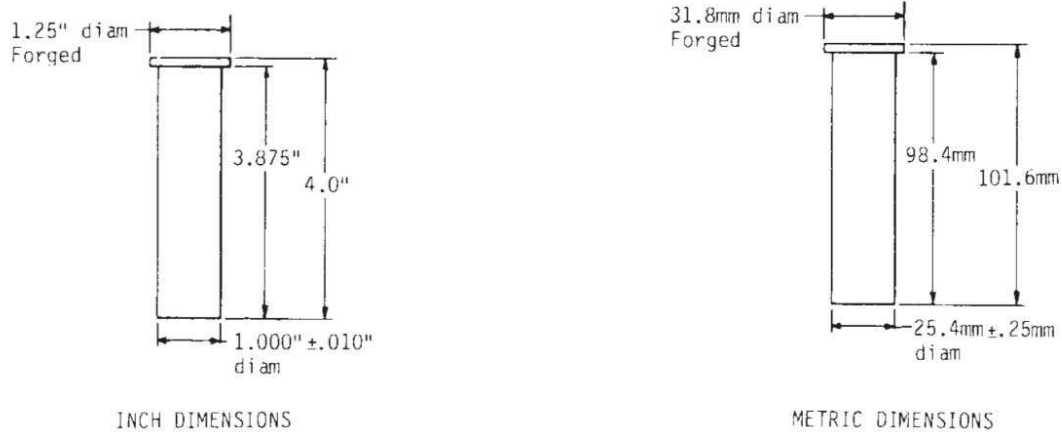
Η πλάκα στήριξης κατασκευάστηκε από ανοξείδωτο χάλυβα SAE 304 με διαστάσεις 650x100x12.7 mm. Το υλικό παρότι δεν προβλέπεται από την προδιαγραφή και είναι αρκετά πιο ακριβό από έναν απλό ανθρακοχάλυβα, προτιμήθηκε για να αποφευχθεί η εμφάνιση οξειδωσης στην πλάκα και να διασφαλιστεί έτσι η μακροβιότητα της συσκευής. Στο τελικό σχέδιο φαίνονται δύο προεξοχές στα άκρα. Αυτές δεν υπήρχαν στο αρχικό σχέδιο, όμως συμφωνήθηκε με τον κατασκευαστή να τοποθετηθούν για λόγους ασφαλείας, στην περίπτωση απότομης κίνησης της συσκευής. Πρόκειται για δύο κομμάτια από το ίδιο υλικό διαστάσεων 100x20x10 mm που συγκολλήθηκαν στα άκρα της πλάκας.



Εικόνα 12 Σχέδιο της πλάκας στήριξης του δοκιμίου

Στο κέντρο της πλάκας (σε απόσταση 350 mm κατά το μήκος και 50 mm κατά το πλάτος) βρίσκεται διαμπερής κυκλική οπή διαμέτρου 27 mm, όπου τοποθετείται το δοκίμιο. Οι διαστάσεις της πλάκας και η οπή διαμορφώθηκαν με κοπή laser. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια δοκιμών για τον έλεγχο της ομαλής λειτουργίας της συσκευής, ορισμένα δοκίμια που θερμάνθηκαν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 850 °C) παρουσίασαν μεγάλη διαστολή με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα στην τοποθέτησή τους μέσα στην πλάκα στήριξης. Για αυτό το λόγο η διάμετρος της οπής αυξήθηκε στα 28 mm.

Η διαστασιολόγηση των δοκιμών ορίζεται αυστηρά από την προδιαγραφή. Το σχήμα ενός δοκιμίου είναι κυλινδρικό με κεφαλή μεγαλύτερης διαμέτρου από τον κορμό, ώστε να μπορεί να κρεμαστεί από την πλάκα στήριξης, αφού τοποθετηθεί στην οπή.



Εικόνα 13 Σχέδιο του δοκιμίου από την προδιαγραφή

Το συνολικό ύψος του δοκιμίου είναι 101.6 mm, ενώ το ύψος κορμού είναι 98.4 mm. Η διάμετρος του κορμού είναι 25.4 mm (± 0.25 mm) και η διάμετρος κεφαλής είναι 31.8 mm. Τα δοκίμια κόπηκαν σε τόρνο από μεγαλύτερα κομμάτια χάλυβα.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω στα υπόλοιπα τμήματα της συσκευής υπήρχε μεγαλύτερη ελευθερία στην κατασκευή. Για την παροχή του νερού χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα από χαλκοσωλήνες, ένα σωλήνα λάστιχου, έναν εύκαμπτο σωλήνα σπирάλ inox, ένα σφαιρικό διακόπτη μέγιστης ροής και έναν διακόπτη με στρόφιγγα (βάννα) για τη ρύθμιση της παροχής. Για την απομάκρυνση του νερού τοποθετήθηκε μια βρύση με διακόπτη στο κάτω μέρος του δοχείου συγκέντρωσης.

Ο εξωσκελετός κατασκευάστηκε από απλό ανθρακοχάλυβα για να αποτελέσει τη βάση του δοχείου συγκέντρωσης και να το ενισχύσει για να αντέξει την πίεση που ασκεί το νερό καθώς συσσωρεύεται (μόνο η μίση χωρητικότητα του δοχείου φτάνει περίπου τα 180 lt). Ανάμεσα στο δοχείο και τον εξωσκελετό τοποθετήθηκε μονωτικό υλικό για την απορρόφηση των κραδασμών. Στο κάτω μέρος κολλήθηκαν τέσσερις ρόδες για τη μετακίνηση της συσκευής, εκ των οποίων οι δύο ήταν εφοδιασμένες με φρένα για την ακινητοποίηση της. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η συσκευή ολοκληρωμένη και πλήρως λειτουργική.



Εικόνα 14 Η συσκευή εμβαπτότητας ολοκληρωμένη.

3. Η Δοκιμή Jominy

3.1 Οι χάλυβες

Πραγματοποιήθηκε μέτρηση της εμβαπτότητας σε οκτώ διαφορετικά είδη χαλύβων. Οι χάλυβες, σύμφωνα με το πρότυπο WNr¹, ήταν οι 1.2510, 1.2344, 1.5919, 1.2379, 1.2080, 1.2083, 1.7131 και 1.0503. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η χημική τους σύσταση και η θερμοκρασία ωστενιτοποίησής τους^[9]. Οι χάλυβες αποτελούν μια ευγενική χορηγία της εταιρίας ΣΚΛΕΡΟ Α.Ε. .

Πίνακας 1 Χημική σύσταση και θερμοκρασία ωστενιτοποίησης των χαλύβων.

Standard Specification	WNr.	1.2510	1.2344	1.5919	1.2379
	DIN	100MnCrW4	X40CrMoV5-1	15CrNi6	X155CrVMo12-1
Chemical Composition (% w/w)	C	0.95	0.39	0.14-0.19	1.55
	Mn	1.1	0.4	0.4-0.6	0.4
	Cr	0.6	5.2	1.4-1.7	11.3
	W	0.6	-	-	-
	V	0.1	0.9	-	0.8
	Si	-	1.0	max 0.4	0.3
	P	-	-	max 0.035	-
	Mo	-	1.4	-	0.8
	Ni	-	-	1.4-1.7	-
	Cu	-	-	-	-
	S	-	-	max 0.035	-
Austenitizing Temperature (°C)		820-825	1020-1050	830-870	1020

¹ WNr είναι ακρωνύμιο της γερμανικής λέξης Werkstoffnummer που σημαίνει «Αριθμός Υλικού».

Πίνακας 1 Συνέχεια

Standard Specification	W.Nr.	1.2080	1.2083	1.7131	1.0503
	DIN	X210Cr12	X42Cr13	16MnCr5	C45
Chemical Composition (% w/w)	C	1.9-2.2	0.36-0.42	0.14-0.19	0.42-0.5
	Mn	0.2-0.6	max 1.0	1-1.3	0.5-0.8
	Cr	11-13	12.5-14.5	0.8-1.1	max 0.4
	W	-	-	-	-
	V	-	-	-	-
	Si	0.1-0.6	max 1.0	max 0.4	max 0.4
	P	Max 0.03	max 0.03	max 0.025	max 0.045
	Mo	-	-	-	max 0.1
	Ni	-	-	-	max 0.4
	Cu	-	-	-	-
	S	Max 0.03	max 0.03	max 0.035	max 0.045
Austenitizing Temperature (°C)		960-980	1040	860-900	820-860

3.2 Η Τυποποιημένη Διαδικασία

Αφού ετοιμαστούν τα δοκίμια χάλυβα και η συσκευή βαφής όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2, η προδιαγραφή ASTM A 255 - 02 προβλέπει τη θέρμανση κάθε δοκιμίου σε φούρνο στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησής του για 30-35 λεπτά. Η συσκευή βαφής πρέπει να ρυθμιστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε ο πίδακας του νερού να φτάνει σε ύψος 63.5 mm χωρίς το δοκίμιο τοποθετημένο. Η πλάκα στήριξης πρέπει να είναι στεγνή πριν την τοποθέτηση κάθε δοκιμίου.

Το κάτω άκρο του δοκιμίου (άκρο βαφής) όταν βρίσκεται μέσα στη συσκευή πρέπει να απέχει 12.7 mm από το στόμιο του σωλήνα, ενώ όταν το δοκίμιο τοποθετηθεί από το φούρνο στη συσκευή η παροχή του νερού πρέπει να ξεκινήσει άμεσα χρησιμοποιώντας το διακόπτη μέγιστης ροής. Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που το δοκίμιο θα βγει από το φούρνο μέχρι και τη στιγμή που θα ξεκινήσει η βαφή

δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5 δευτερόλεπτα. Το νερό για τη βαφή θα πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία 5-30 °C και το δοκίμιο να παραμείνει στη συσκευή τουλάχιστον για 10 λεπτά. Κατά τη διάρκεια της ψύξης πρέπει να διατηρείται άπνοια γύρω από το δοκίμιο και με την ολοκλήρωσή της, αν δεν είναι κρύο, πρέπει να βαφτεί άμεσα σε νερό.

Περνώντας στις μετρήσεις προβλέπεται ότι στα δοκίμια μετά τη βαφή πρέπει να διαμορφωθούν μέσω μηχανουργικής κατεργασίας δύο αντιδιαμετρικά επίπεδα καθ' όλο σε βάθος το λιγότερο 0.38 mm. Κατά μήκος αυτών θα πραγματοποιηθούν οι σκληρομετρήσεις στην κλίμακα Rockwell C. Αφού δημιουργηθούν τα επίπεδα, τα δοκίμια πρέπει να λειανθούν. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων πρέπει να κατασκευαστεί μία τράπεζα με μηχανισμό μετακίνησης και χάρακα (αν δεν υπάρχει ήδη), που να εφαρμόζει στο σκληρόμετρο και πάνω της να τοποθετούνται τα δοκίμια. Ο μηχανισμός μετακίνησης μαζί με το χάρακα βοηθούν, ώστε τα δοκίμια να μετακινούνται με ακρίβεια και κάθε μέτρηση να απέχει συγκεκριμένη απόσταση από την επόμενη. Ξεκινώντας από το άκρο βαφής οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε βήματα μήκους 1/16 in. (1.6 mm) για τα πρώτα 16 δέκατα έκτα (25.4 mm) και στη συνέχεια 18, 20, 22, 24, 28 και 32 δέκατα έκτα της ίντσας. Τιμές μικρότερες των 20 HRC δεν καταγράφονται, αφού θεωρούνται ανακριβείς.

Οι μετρήσεις διεξάγονται σε αντιδιαμετρικά επίπεδα, ώστε να συσχετιστούν οι τιμές μεταξύ των αντίστοιχων σημείων². Στην περίπτωση που οι τιμές μεταξύ δύο αντίστοιχων σημείων διαφέρουν πάνω από 4 HRC, οι μετρήσεις θα πρέπει να επαναληφθούν σε νέα επίπεδα, που θα διαμορφωθούν σε απόσταση 90° από τα προηγούμενα. Αν και στις νέες μετρήσεις παρουσιαστεί το ίδιο πρόβλημα τότε πρέπει να δημιουργηθούν νέα δοκίμια και να επαναληφθεί όλη η διαδικασία από την αρχή. Για τη διευκόλυνση της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, σε κάθε δοκίμιο καταγράφεται ο μέσος όρος των τιμών μεταξύ αντίστοιχων σημείων, ενώ όλες οι δεκαδικές τιμές στρογγυλοποιούνται προς τον κοντινότερο δεκαδικό.

3.3 Προετοιμασία

Ξεκινώντας με την προετοιμασία του πειράματος πρέπει να αναφερθεί ότι από κάθε είδος χάλυβα εκ των οκτώ που χρησιμοποιήθηκαν, προετοιμάστηκαν δύο δοκίμια για την περίπτωση που θα υπήρχε μεγάλη απόκλιση στις μετρήσεις. Έτσι η δοκιμή επαναλήφθηκε 16 φορές. Ακόμη δημιουργήθηκαν μερικά ακόμη δοκίμια “dummies” από απλό ανθρακοχάλυβα για γενική χρήση (διαστασιολογικός έλεγχος των τμημάτων της συσκευής, προετοιμασία της δοκιμής, παρουσίαση κλπ.). Οι δύο φούρνοι προθερμαίνονταν στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης του χάλυβα που συμμετείχε κάθε φορά στη δοκιμή. Στις περιπτώσεις που δεν υπήρχε ακριβής θερμοκρασία, αλλά ένα εύρος τιμών, ο φούρνος ρυθμιζόταν στο μέσο αυτού του διαστήματος. Τα δοκίμια μετά την τοποθέτησή τους παράμεναν εκεί για περίπου μία ώρα. Αυτό συνέβαινε για να εξασφαλιστεί η πλήρης ωστενιτοποίηση του

² Σημεία που βρίσκονται στο ίδιο 16° της ίντσας σε κάθε επίπεδο.

χάλυβα, αφού μπορεί οι φούρνοι να είχαν φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, όμως με την είσοδο των δοκιμίων και το χρόνο που έπαιρνε για τη σωστή τοποθέτησή τους, η θερμοκρασία έπεφτε αισθητά. Οι χάλυβες συμμετείχαν στη δοκιμή κατά αύξουσα σειρά θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, η οποία ήταν 1.2510, 1.0503, 1.5919, 1.7131, 1.2080, 1.2379, 1.2344 και 1.2083. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο ημέρες και οι χάλυβες χωρίστηκαν σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα ήταν οι χάλυβες 1.2510, 1.0503, 1.5919 και 1.7131 με θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης άνω των 900°C και η δεύτερη οι 1.2080, 1.2379, 1.2344 και 1.2083 με θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης κάτω των 900°C. Τα δύο πρώτα δοκίμια σε κάθε ημέρα τοποθετήθηκαν στους φούρνους με διαφορά 20 λεπτών, ώστε να υπάρχει χρόνος να πραγματοποιηθεί η δοκιμή για το πρώτο και να προετοιμαστεί η συσκευή βαφής για να υποδεχτεί το δεύτερο.

Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης των δύο πρώτων δοκιμίων πραγματοποιούνταν η προετοιμασία της συσκευής, η οποία μεταφερόταν όσο το δυνατόν πλησιέστερα στους φούρνους για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος από την έξοδο ενός δοκιμίου από το φούρνο μέχρι την εκκίνηση της δοκιμής. Η συσκευή ακινητοποιούνταν με τη χρήση των φρένων στις ρόδες και συνδεόταν με το δίκτυο νερού του εργαστηρίου, που προερχόταν από το τοπικό δίκτυο ύδρευσης, ενώ γινόταν έλεγχος εάν η θερμοκρασία βρισκόταν εντός του διαστήματος 5-30°C. Στη συνέχεια ρυθμιζόταν η παροχή, μέσω του διακόπτη με στρόφιγγα, ώστε ο πίδακας να φτάνει ελεύθερα στο προβλεπόμενο ύψος. Η σύνδεση με το δίκτυο του εργαστηρίου ενείχε τον κίνδυνο των διακυμάνσεων στη ροή του νερού, αν γινόταν παράλληλη χρήση από την κοινή παροχή του κτιρίου, οδηγώντας στη ακύρωση της ρύθμισης που έγινε στο ύψος του πίδακα. Η προδιαγραφή προβλέπει ότι η συσκευή^[10] θα πρέπει να έχει κάποιο δοχείο παροχής νερού, τέτοιας χωρητικότητας, που να καλύπτει τις ανάγκες της. Λόγω της μεγάλης κατανάλωσης της δοκιμής κάτι τέτοιο κρίθηκε ανέφικτο από πλευράς χώρου (ένα τέτοιο δοχείο θα ήταν μεγαλύτερο ακόμα και από το δοχείο συγκέντρωσης), χρόνου (ο χρόνος που θα χρειαζόταν για να γεμίσει θα ήταν αρκετά μεγάλος, αυξάνοντας και το συνολικό χρόνο της δοκιμής) και φυσικά κόστους. Έτσι προτιμήθηκε η άμεση σύνδεση με το δίκτυο του εργαστηρίου και για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της ασταθούς παροχής τα πειράματα πραγματοποιούνταν ημέρες που η σχολή των Μηχανολόγων δεν λειτουργούσε και το κτίριο ήταν σχεδόν άδειο.



Εικόνα 15 Η συσκευή τοποθετημένη κοντά στους φούρνους που διακρίνονται στο βάθος και συνδεδεμένη με το δίκτυο ύδρευσης.

Ακολουθούσε η τοποθέτηση της πλάκας στήριξης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η πλάκα στήριξης δεν συνδέθηκε μόνιμα με τη συσκευή, λόγω του σχετικά μεγάλου της βάρους που προσέθετε επιπλέον καταπόνηση στο δοχείο συγκέντρωσης, αυξάνοντας έτσι τον πιθανό κίνδυνο αστοχίας της συσκευής. Έτσι τοποθετούνταν μόνο όταν η συσκευή έπρεπε να λειτουργήσει. Πάνω της έχουν καταγραφεί τα σημεία σύνδεσης με το δοχείο, ώστε να ευθυγραμμίζεται με το κέντρο του.

Εν συνεχεία γινόταν χρήση ενός δοκιμίου “dummy” για να ελεγχθεί η ευθυγράμμιση της πλάκας στήριξης και η παροχή του νερού. Με το δοκίμιο τοποθετημένο ο πίδακας νερού θα πρέπει χτυπώντας το άκρο βαφής να παίρνει ένα σχήμα «ομπρέλας». Μετά και από αυτό τον έλεγχο το δοκίμιο “dummy” απομακρύνεται

και η πλάκα στήριξης στεγνώνεται ολοκληρώνοντας την προετοιμασία για τη δοκιμή Jominy.



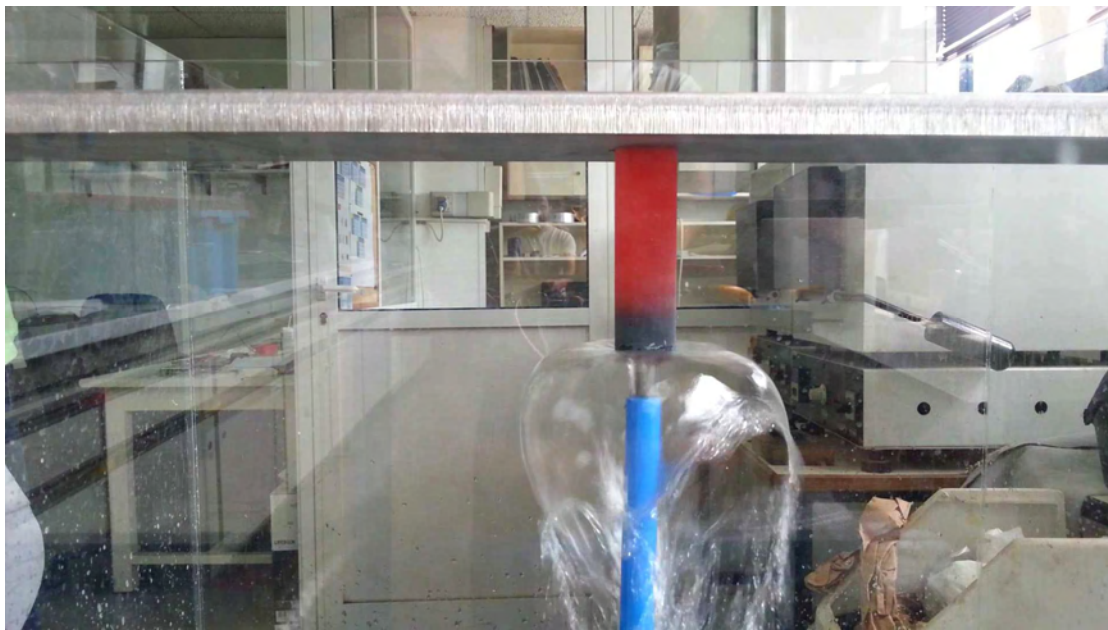
Εικόνα 16 Πραγματοποίηση ελέγχου πριν την εκκίνηση των πειραμάτων με τη χρήση δοκιμίου “dummy”. Φαίνεται καθαρά το σχήμα «ομπρέλας» που παίρνει ο πίδακας χτυπώντας το δοκίμιο, όταν όλη η διάταξη είναι σωστή.

3.4 Το Πείραμα

Μόλις συμπληρωθεί το διάστημα της μίας ώρας κάθε δοκίμιο βγαίνει από το φούρνο και μεταφέρεται στη συσκευή εμβαπτότητας. Τηρώντας τους κανόνες ασφαλείας του Εργαστηρίου Υλικών κάθε μεταφορά πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ειδικών γαντιών, ποδιάς και μιας τσιμπίδας μεγάλου μήκους για να μπορέσει το δοκίμιο να πιαστεί σε ασφαλή απόσταση από το φούρνο, ενώ όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν παρουσία τουλάχιστον ενός ακόμη ατόμου. Με την τοποθέτηση του δοκιμίου στην πλάκα στήριξης ξεκινούσε αμέσως η παροχή του νερού με το άνοιγμα του διακόπτη μέγιστης ροής. Το κάτω χρονικό όριο παραμονής ενός δοκιμίου στη συσκευή που δόθηκε από την προδιαγραφή (10 λεπτά) ξεπεράστηκε και από τους οκτώ χάλυβες. Κατά τη συμπλήρωση των 10 λεπτών όλα τα δοκίμια ήταν ακόμη λιγότερο ή περισσότερο θερμά για αυτό το λόγο και παρέμειναν στη συσκευή περισσότερη ώρα. Ο μέσος χρόνος παραμονής ήταν περίπου τα 15 λεπτά, ενώ τα τελευταία δοκίμια που είχαν και τις υψηλότερες θερμοκρασίες ωστενιτοποίησης (άνω των 1000 °C) χρειάστηκε να βαφτούν σε δοχείο με νερό για να κρυώσουν εντελώς.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας κάθε φορά, το δοκίμιο σκουπιζόταν, στεγνωνόταν με ρεύμα αέρα και στη συνέχεια αποθηκευόταν σε αεροστεγές σακουλάκι. Πριν την τοποθέτηση ενός νέου δοκιμίου απομακρυνόταν το νερό που υπήρχε πάνω στην πλάκα στήριξης. Να σημειωθεί ότι για την εξασφάλιση της μακροβιότητας της συσκευής, καλό είναι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων να μην επιτρέπεται να ανέβει πολύ η στάθμη του χρησιμοποιημένου νερού στο δοχείο

συγκέντρωσης (πάνω από το ήμισυ του ύψους του δοχείου). Για αυτό και όποτε κρινόταν σκόπιμο η πειραματική διαδικασία διακοπτόταν για την απομάκρυνση ενός μέρους των υδάτων. Τέλος όταν τα πειράματα διεκπεραιώνονταν το δοχείο συγκέντρωσης καθαριζόταν από νερό και κομμάτια μετάλλου (λόγω της αποφλοίωσης ορισμένων δοκιμίων κατά τη βαφή), η πλάκα στήριξης διαχωριζόταν από την υπόλοιπη συσκευή, ενώ γινόταν και αποσύνδεση από το δίκτυο ύδρευσης, καθώς και καθαρισμός του υδραυλικού συστήματος της συσκευής από το εναπομείναν νερό.



Εικόνα 17 Δοκίμιο κατά τη διάρκεια της βαφής

Σε αυτό το σημείο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στους λόγους που οδήγησαν στην αύξηση της διαμέτρου της οπής της πλάκας στήριξης από 27 mm σε 28 mm, που αναφέρθηκε και στη ενότητα 2.2, «Τα Τμήματα της Συσκευής». Κατά την ολοκλήρωση των πειραμάτων στην πρώτη ομάδα χαλύβων παρουσιάστηκε πρόβλημα με το πρώτο δοκίμιο του χάλυβα 1.7131. Το δοκίμιο εμφάνισε μεγάλη διαστολή και πέρασε με μεγάλη δυσκολία και χρονική καθυστέρηση μέσα από την οπή της πλάκας. Παρ' ότι η δοκιμή πραγματοποιήθηκε κανονικά, το δεύτερο δοκίμιο αυτού του χάλυβα δεν μπήκε στο φούρνο, ώστε να μην αντιμετωπιστεί τα ίδιο πρόβλημα που ήταν πιθανό να επηρέαζε και τα αποτελέσματα των μετέπειτα μετρήσεων. Αργότερα, για την περεταίρω διερεύνηση του προβλήματος, πραγματοποιήθηκε το πείραμα με ένα δοκίμιο “dummy”, το οποίο θερμάνθηκε στους 950 °C, θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από τους 880 °C, όπου θερμάνθηκε το δοκίμιο του χάλυβα 1.7131. Το “dummy” παρουσίασε τέτοια διόγκωση που χρειάστηκε υποβοήθηση (άσκηση πίεσης στην κεφαλή με την τσιμπίδα) για να τοποθετηθεί σωστά στην οπή. Αυτό επιβεβαίωσε τους φόβους ότι οι χάλυβες με

Θερμοκρασία ωστενιτοποίησης ίση ή και μεγαλύτερη θα παρουσίαζαν την ίδια συμπεριφορά. Για αυτό και ελήφθη η απόφαση η διάμετρος της οπής να αυξηθεί στα 28 mm, αφού ούτως ή άλλως το περιθώριο για τη στήριξη των δοκιμών υπήρχε λόγω της μεγάλης διαμέτρου της κεφαλής τους (31.8 mm). Τα πειράματα στη δεύτερη ομάδα χαλύβων καθώς και στο δεύτερο δοκίμιο του χάλυβα 1.7131 πραγματοποιήθηκαν μετά την τροποποίηση της πλάκας στήριξης. Στις μετρήσεις που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο δοκίμιο του 1.7131.

Όταν η δοκιμή είχε διεξαχθεί για όλους τους χάλυβες, τα δοκίμια εστάλησαν σε μηχανουργείο για να δημιουργηθούν τα επίπεδα που θα γίνονταν οι μετρήσεις. Διαμορφώθηκαν μέσω κοπής με φρέζα σε βάθος 0.4 mm (λίγο πάνω από το ελάχιστο όριο των 0.38 mm). Συνήθης τακτική όσων εφαρμόζουν τη δοκιμή Jominy είναι να αποκόπτουν και να απομακρύνουν την κεφαλή των δοκιμών, ώστε να δημιουργηθούν τα επίπεδα για τις μετρήσεις μόνο στον κορμό. Εδώ κρίθηκε σκόπιμο να προεκταθούν τα επίπεδα και στην κεφαλή, για να σταθεροποιείται καλύτερα το δοκίμιο κατά την τοποθέτησή του πάνω στην τράπεζα του σκληρόμετρου. Μετά την επιστροφή τους από το μηχανουργείο, τα δοκίμια καθαρίστηκαν με λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (γυαλόχαρτα) με μέγεθος κόκκου 500 και 800 grit.

Όλη η πειραματική διαδικασία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά σε δευτεροετείς φοιτητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την εκπόνηση εργαστηριακής άσκησης στο πλαίσιο του μαθήματος «Φυσική Μεταλλουργία».



Εικόνα 18 Δοκίμιο μετά τη διαμόρφωση των επιπέδων και τη λείανση.

3.5 Σκληρομετρήσεις

Φτάνοντας στις μετρήσεις, έπρεπε πλέον να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μετακίνησης του δοκιμίου κατά τα ακριβή διαστήματα μετρημένα σε δέκατα έκτα της ίντσας. Το σκληρόμετρο δεν ήταν εφοδιασμένο με αντικειμενοφόρο τράπεζα που να επιτρέπει την κίνηση του δοκιμίου. Από την άλλη πλευρά η κατασκευή μιας τέτοιας τράπεζας, όπως περιγράφεται στην ASTM A 255 – 02, πέρα από χρονοβόρα ήταν και ανέφικτη. Η τράπεζα του σκληρόμετρου, πάνω στην οποία θα έπρεπε να δεθεί μια τέτοια κατασκευή, έχει κυκλικό σχήμα. Έτσι η εφαρμογή της με τέτοιο τρόπο ώστε να μην κινείται, αυτή ή το δοκίμιο που θα τοποθετούνταν πάνω της κάθε φορά, κατά τη διάρκεια της σκληρομέτρησης ήταν πολύ δύσκολη.

Λόγω αυτών των εμποδίων προκρίθηκε μια πιο απλή μέθοδος. Πάνω σε χάρακα προσημειώθηκαν οι αποστάσεις που ορίζονται από την προδιαγραφή. Με τη βοήθεια αυτού του χάρακα και ξεκινώντας από το άκρο βαφής, οι ίδιες αποστάσεις σημειώθηκαν με μαρκαδόρο πάνω σε κάθε επίπεδο κάθε δοκιμίου, δημιουργώντας τα σημεία των μετρήσεων. Ο μαρκαδόρος ήταν αρκετά λεπτός (πάχος 0.3 mm) ώστε να μην αυξήσει τις αποστάσεις μεταξύ των σημείων. Η περίπτωση της χάραξης των σημείων πάνω στα δοκίμια απορρίφθηκε λόγω της δυσκολίας να πραγματοποιηθεί στην επιφάνεια κάποιων σκληρών χαλύβων, αλλά και για να αποφευχθεί η πιθανότητα να επηρεαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το μαρκάρισμα του χάρακα, των δοκιμίων, αλλά και η διεξαγωγή των μετρήσεων πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη φροντίδα και προσοχή, αφού όλα είναι χειροκίνητα. Η μέθοδος αυτή αν και πιο απλή, σύντομη και οικονομική, βασίζει την ακρίβειά της ξεκάθαρα στην επιμέλεια του ατόμου που θα εκτελέσει τις παραπάνω εργασίες. Παρ' όλα αυτά τόσο τα αποτελέσματα, όσο και η ίδια η εικόνα των δοκιμίων, δικαίωσαν την επιλογή αυτή.



Εικόνα 19 Δοκίμιο μετά τις μετρήσεις με εμφανή τα σημάδια του εντυπωτή.

Οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο χειροκίνητο σκληρόμετρο Frank στην κλίμακα Rockwell C. Το σκληρόμετρο διαθέτει μετρητή που περιλαμβάνει δύο δακτυλίους τιμών. Έναν εσωτερικό με κόκκινους δείκτες (κλίμακα Rockwell B) και έναν εξωτερικό με μαύρους δείκτες (κλίμακα Rockwell C) από τον οποίο πάρθηκαν και οι τιμές των μετρήσεων. Πριν την εκκίνηση των μετρήσεων, κάθε φορά γινόταν έλεγχος της ορθής λειτουργίας του σκληρόμετρου. Διεξαγόταν μια δοκιμαστική μέτρηση πάνω σε ένα test block, του οποίου η σκληρότητα ήταν γνωστή (59 HRC), με ένα περιθώριο σφάλματος 2-3 HRC. Αν η τιμή της μέτρησης ξέφευγε από αυτή την περιοχή σήμαινε ότι η στάθμη λαδιού του υδραυλικού συστήματος πίεσης του σκληρόμετρου ήταν πεσμένη και έπρεπε να συμπληρωθεί λάδι. Έπειτα η δοκιμαστική μέτρηση επαναλαμβανόταν και αν ήταν επιτυχής οι κανονικές μετρήσεις μπορούσαν πλέον να αρχίσουν. Το δοκίμιο τοποθετούνταν στην τράπεζα του σκληρόμετρου, η οποία υψωνόταν με τη δεξιόστροφη κίνηση της βαλβίδας που διαθέτει μέχρι το δοκίμιο να πλησιάσει πολύ κοντά στον κωνικό εντυπωτή. Στη συνέχεια το δοκίμιο μετακινούνταν χειροκίνητα, ώστε ο εντυπωτής να βρίσκεται κάθε φορά πάνω από το σημείο μέτρησης. Όταν αυτό συνέβαινε, η βαλβίδα περιστρεφόταν περεταίρω, με τον εντυπωτή να εισέρχεται μέσα στο δοκίμιο, μέχρι ο δείκτης του μεγάλου μετρητή να φτάσει σε κατακόρυφη θέση και ταυτόχρονα ο δείκτης ενός μικρότερου μετρητή (που βρίσκεται εντός του μεγάλου) να φτάσει στο κόκκινο σημείο. Σε αυτό το σημείο ο μοχλός στο δεξί μέρος του σκληρόμετρου ωθούνταν απαλά προς τα κάτω και απελευθερωνόταν το βάρος. Η εφαρμοζόμενη στο δοκίμιο δύναμη ισοδυναμούσε με 150 kg, χάρη στα τρία βάρη που τοποθετούνταν στο εκκρεμές, στο πίσω μέρος του σκληρόμετρου. Όταν ο δείκτης σταματούσε να κινείται, ο μοχλός έπρεπε να ωθηθεί ξανά στην αρχική κατακόρυφη θέση του, κάνοντας έτσι τον δείκτη να κινηθεί πάλι και να δώσει την τελική τιμή της μέτρησης. Τέλος η βαλβίδα περιστρεφόταν αριστερόστροφα για να κατέβει η τράπεζα προς τα κάτω και να απεμπλακεί το δοκίμιο από τον εντυπωτή.



Εικόνα 20 Μετρητής του σκληρόμετρου Frank σε "νεκρή" θέση. Ο εξωτερικός δακτύλιος τιμών είναι η κλίμακα Rockwell C, ενώ στο κεντρο διακρίνεται ο μικρότερος μετρητής για τη σωστή τοποθέτηση του εντυπωτή.



Εικόνα 21 Το σκληρόμετρο Frank

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όταν παρουσιάζονταν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων κοντά στο προδιαγραφόμενο όριο (5 ή 6 HRC), πριν τη μετάβαση στο στάδιο της δημιουργίας νέων επιφανειών μέτρησης, διεξάγονταν «διορθωτικές» μετρήσεις παραπλεύρως των αρχικών σημείων. Αυτές γίνονταν στην ίδια απόσταση ως προς τον οριζόντιο άξονα (από το άκρο βαφής), αλλά σε διαφορετική ως προς τον κάθετο, με σκοπό τη σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων. Στην Εικόνα 19 που προηγήθηκε είναι διακριτές δύο τέτοιες «διορθωτικές» μετρήσεις.

Από τα 8 δοκίμια στα οποία έγιναν σκληρομετρήσεις τα 3 εμφάνισαν διαφορές άνω των 4 HRC στις τιμές αντίστοιχων σημείων, με τα αποτελέσματα να μην σταθεροποιούνται μέσω των διορθωτικών μετρήσεων, για αυτό και σε αυτά δημιουργήθηκαν νέες επιφάνειες μέτρησης. Επρόκειτο για τα δοκίμια των χαλύβων

1.2083, 1.2510, 1.7131. Οι επαναληπτικές μετρήσεις έδωσαν αποτελέσματα εντός των ορίων, οπότε δε χρειάστηκε η προετοιμασία νέων δοκιμίων.



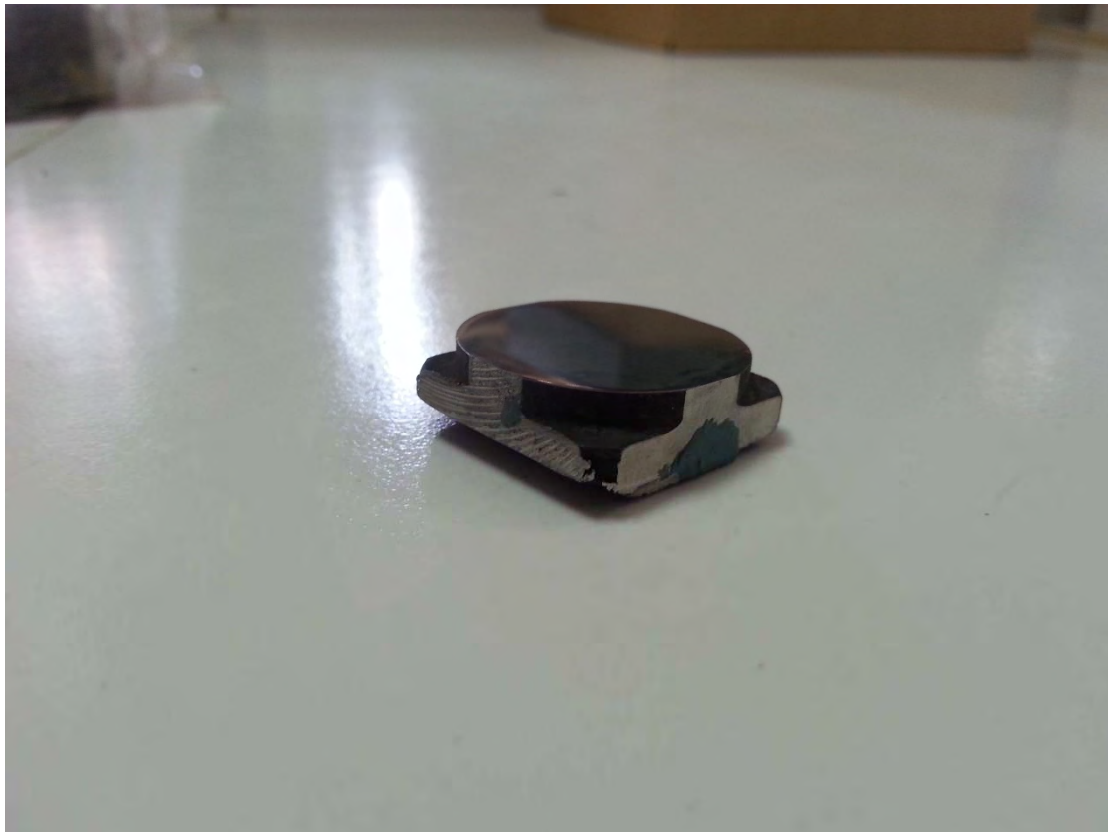
Εικόνα 22 Δοκίμιο με 4 επιφάνειες μετρήσεων

3.6 Μεταλλογραφική Ανάλυση και Μέτρηση Μεγέθους Κόκκου

Μετά την επιτυχή διεξαγωγή των σκληρομετρήσεων το πείραμα προχώρησε ένα βήμα μακρύτερα. Ξεφεύγοντας από τη διαδικασία της δοκιμής Jominy δημιουργήθηκαν δοκίμια (από τα ήδη υπάρχοντα για τις σκληρομετρήσεις) για να παρατηρηθεί η μικροδομή τους μετά τη δοκιμή Jominy, αλλά και να μετρηθεί το μέγεθος του προ-ωστενιτικού κόκκου.

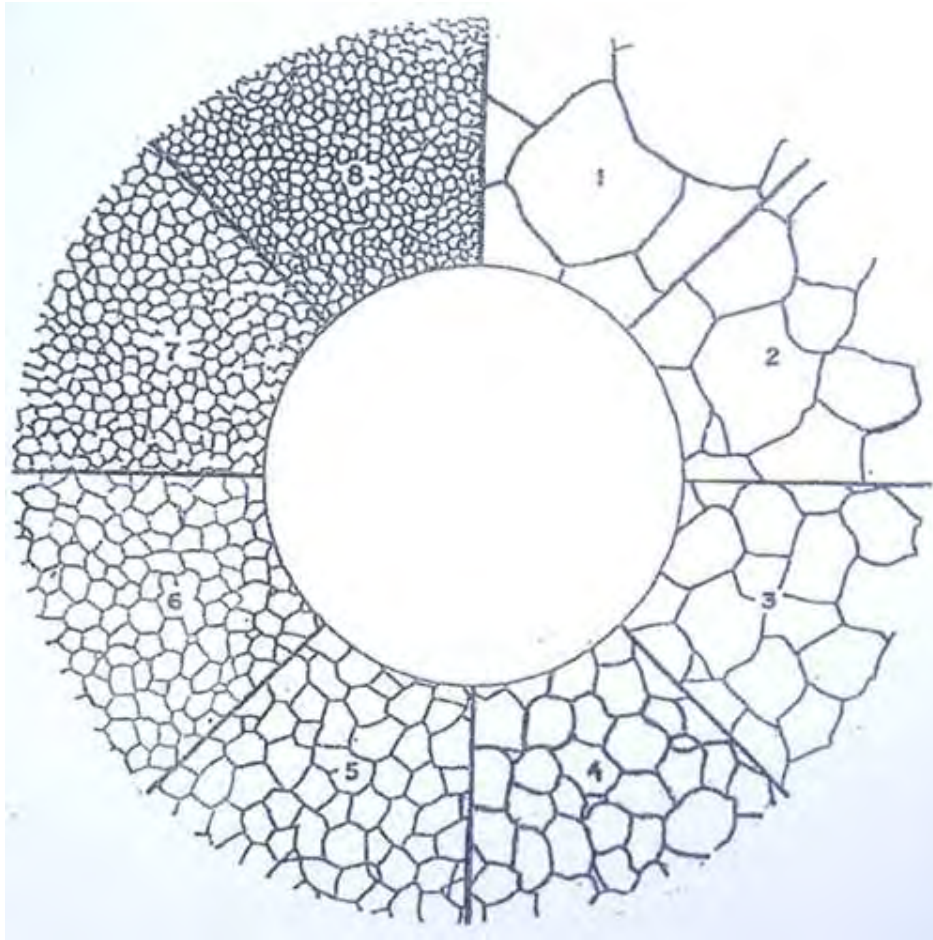
Οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι 1.0503 και 1.2083. Κοινό χαρακτηριστικό των δύο επιλαχόντων είναι ότι πρόκειται για υποευτηκτοειδείς χάλυβες (με σύσταση μικρότερη από 0.8% C). Από τα δοκίμια για τις σκληρομετρήσεις κόπηκαν οι κεφαλές, οι οποίες μετατράπηκαν στα νέα δοκίμια όπου και πραγματοποιήθηκε μεταλλογραφική προετοιμασία. Τόσο η προετοιμασία, όσο και οι μετρήσεις

διεξήχθησαν όπως ορίζει η προδιαγραφή ASTM E 112 – 96^[11]. Κατά τη διάρκεια της λείανσης τα δοκίμια πέρασαν από τροχούς με μέγεθος κόκκου 500, 800 και 1000 grit. Με την τελική λείανση τα δοκίμια καθαρίζονταν με νερό, οινόπνευμα και στεγνώνονταν με ρεύμα θερμού αέρα. Ακολούθησε η στίλβωση σε 2 πάνινους τροχούς που περιείχαν κόκκους διαμαντιού διαμέτρου 3 μm και 1 μm. Τέλος στα δοκίμια έγινε χημική προσβολή, χρησιμοποιώντας το αντιδραστήριο Nital 2%^[12] (2 ml HNO₃, 98 ml οινόπνευμα) για τον χάλυβα 1.0503 και το αντιδραστήριο Marbles^[13] (4gr CuSO₄, 20ml HCl, 20ml H₂O) για τον χάλυβα 1.2083.



Εικόνα 23 Μεταλλογραφικό δοκίμιο του χάλυβα 1.2083

Μετά την αποκάλυψη της μικροδομής, τα δοκίμια παρατηρήθηκαν στο μικροσκόπιο και, ώστε να γίνει και η μέτρηση του μεγέθους των κόκκων. Σύμφωνα με την ASTM E 112 – 96 η μονάδα μέτρησης είναι ο αριθμός μεγέθους κόκκου G (Grain Size Number) και για τον καθορισμό του εφαρμόστηκε η συγκριτική διαδικασία (comparison procedure). Αυτή περιλαμβάνει τη σύγκριση της μικροδομής με μια πρότυπη κλίμακα κατάταξης (σταυρόνημα) προσαρμοσμένη στον προσοφθάλμιο φακό του οπτικού μικροσκοπίου, σε μεγέθυνση 100x. Η κλίμακα ορίζει ότι το G μπορεί να πάρει τιμές από 1 έως 8.



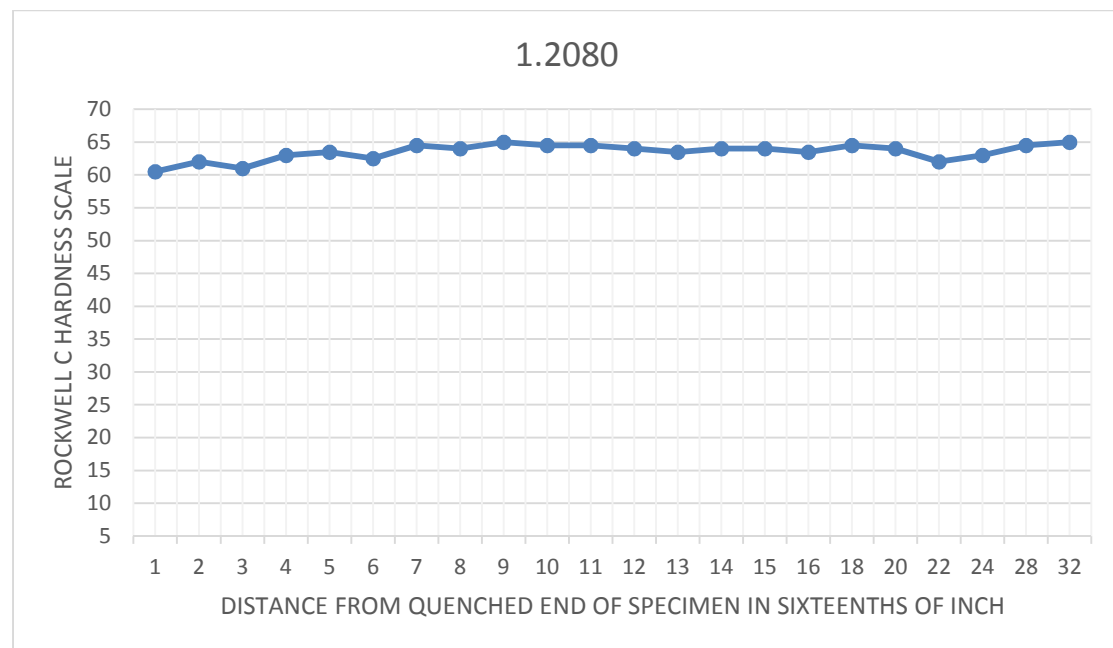
Εικόνα 24 Ενδεικτική αναπαράσταση σταυρονήματος για την εφαρμογή της συγκριτικής μεθόδου εύρεσης του μεγέθους προ-ωστεντικού κόκκου. Πηγή: www.microscopeworld.com

4. Αποτελέσματα

4.1 Σκληρομετρήσεις

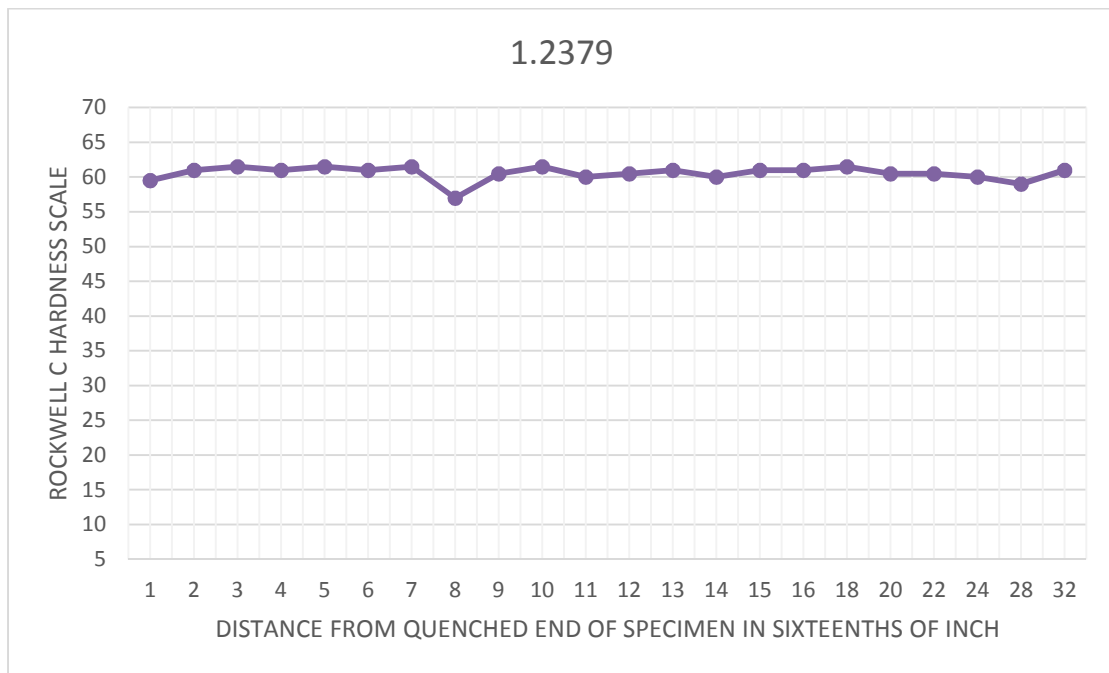
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων με τη μορφή γραφημάτων. Οι πίνακες με τις τιμές των μετρήσεων βρίσκονται στο Παράρτημα.

Γράφημα 1



Wnr.	Chemical composition %						Austenitizing
	C	Mn	Cr	Si	P	S	Temperature (°C)
1.2080	1.9-2.2	0.2-0.6	11-13	0.1-0.6	Max 0.03	Max 0.03	960-980

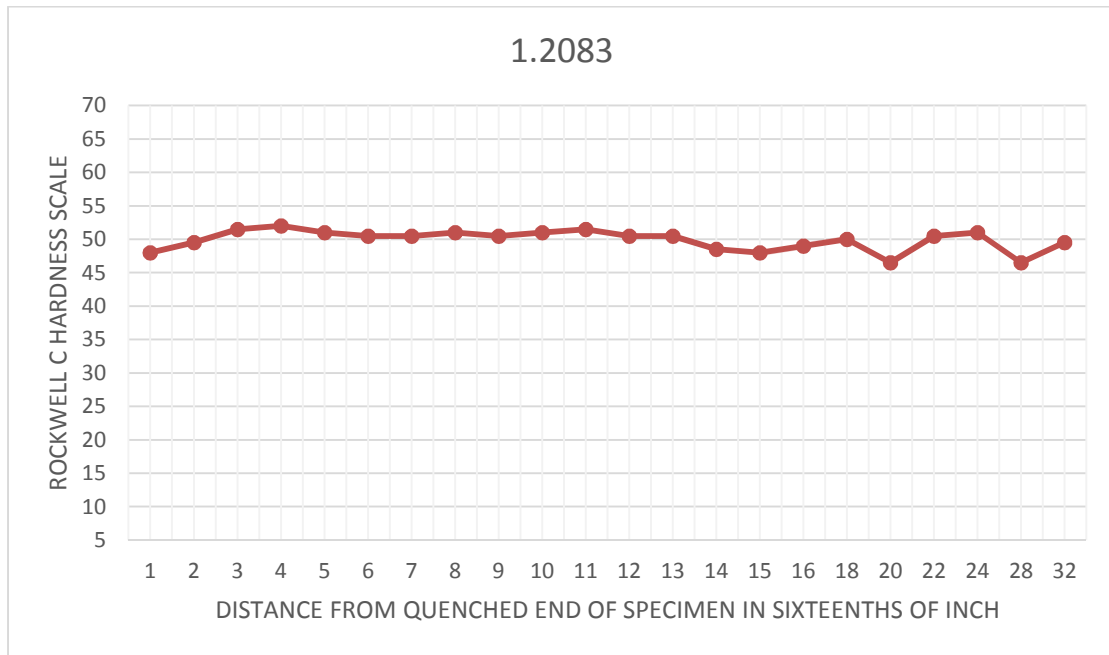
Γράφημα 2



Wnr.	Chemical composition %						Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	V	Si	Mo	
1.2379	1.55	0.4	11.3	0.8	0.3	0.8	1020

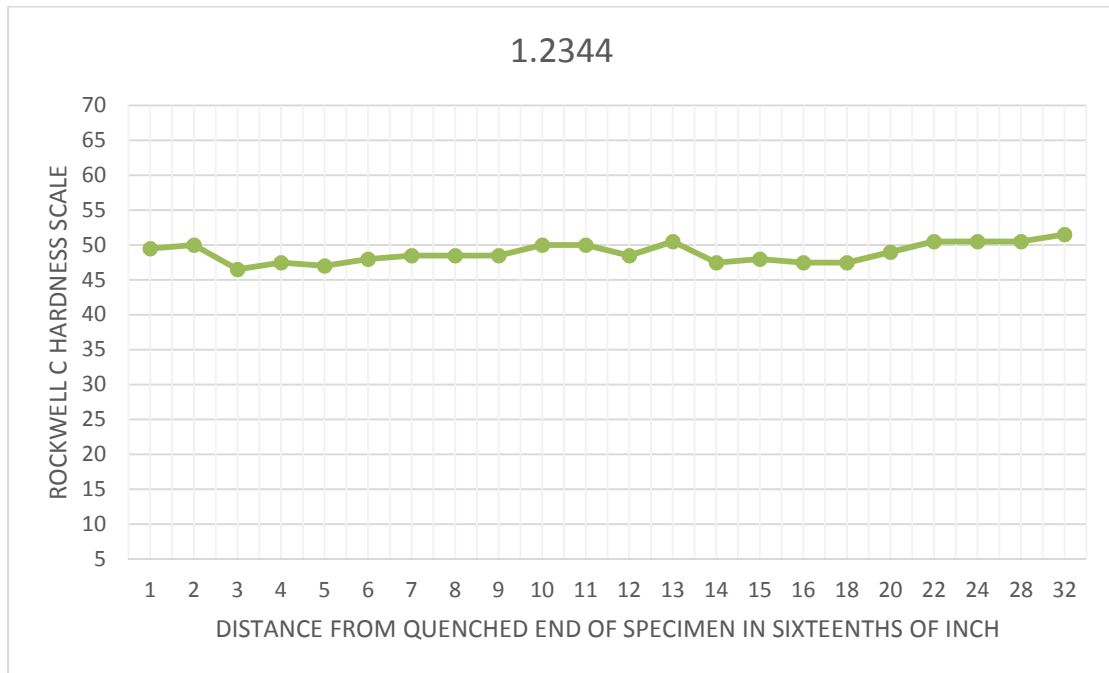
Στα γραφήματα 1, 2 φαίνεται ότι οι χάλυβες 1.2080 και 1.2379 εμφανίζουν μεγάλη σκληρότητα, η οποία τοποθετείται στην περιοχή 55-65 HRC, και τη διατηρούν καθ' όλο το μήκος των επιφανειών μέτρησης.

Γράφημα 3



Wnr.	Chemical composition %						Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	Si	P	S	
1.2083	0.36-0.42	Max 1.0	12.5-14.5	Max 1.0	Max 0.03	Max 0.03	1040

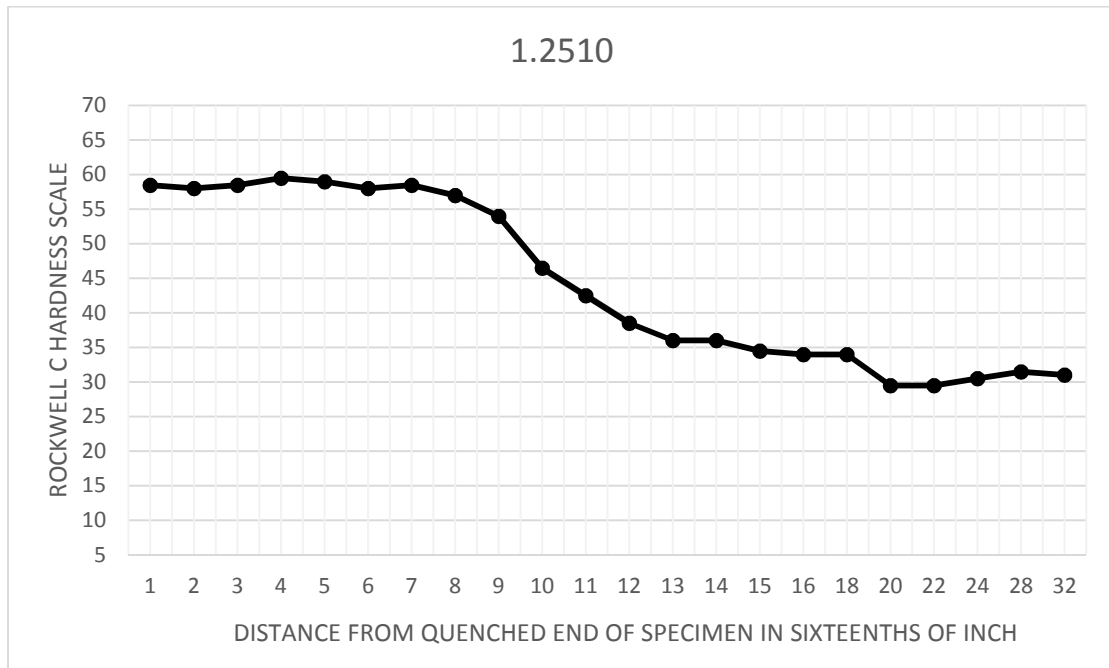
Γράφημα 4



Wnr.	Chemical composition %						Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	V	Si	Mo	
1.2344	0.39	0.4	5.2	0.9	1.0	1.4	1020-1050

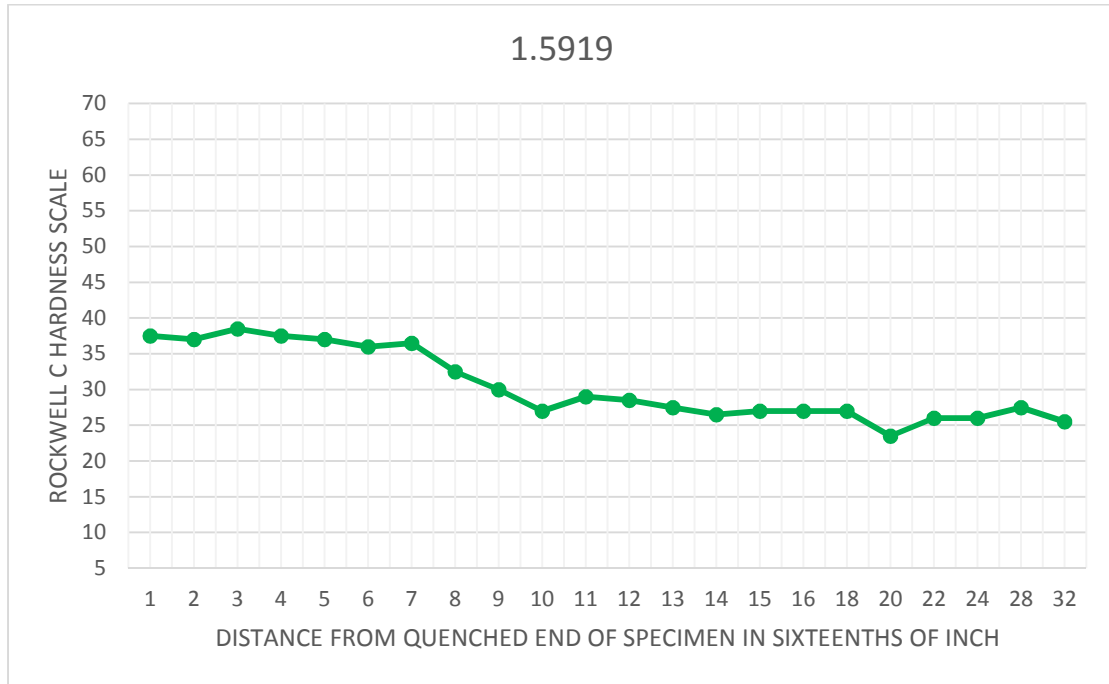
Οι χάλυβες 1.2083 και 1.2344 παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τους προηγούμενους δύο, με τη σκληρότητά τους να βρίσκεται σε χαμηλότερο διάστημα (45-55 HRC).

Γράφημα 5



Wnr.	Chemical composition %					Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	W	V	
1.2510	0.95	1.1	0.6	0.6	0.1	820-825

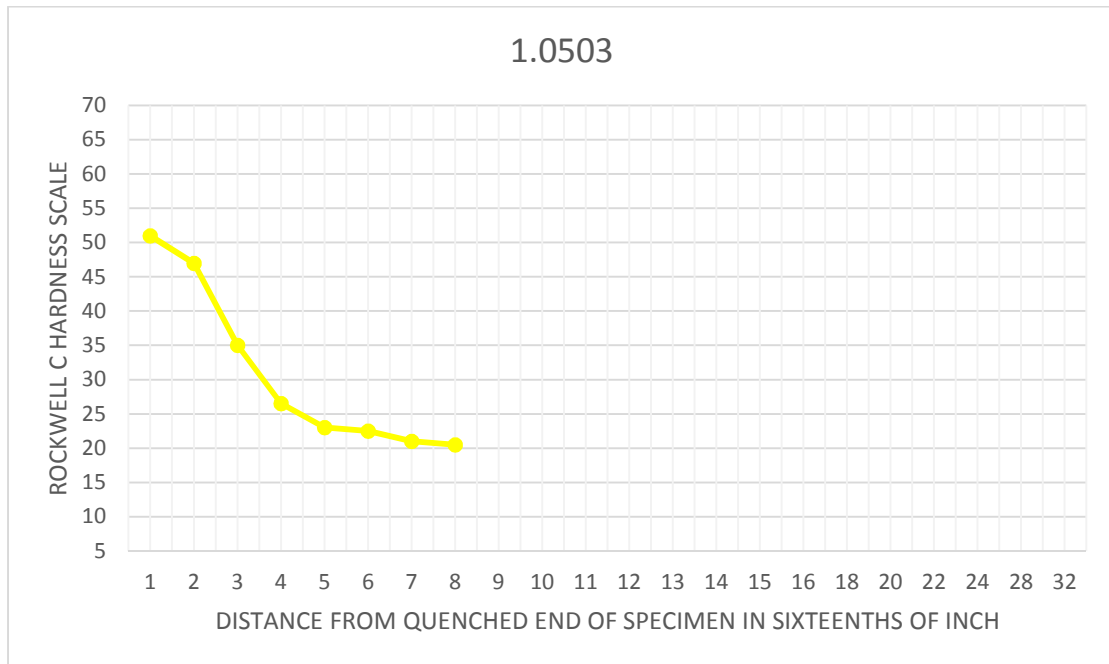
Γράφημα 6



Wnr.	Chemical composition %							Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	Si	P	Ni	S	
1.5919	0.14-0.19	0.4-0.6	1.4-1.7	Max 0.4	Max 0.035	1.4-1.7	Max 0.035	830-870

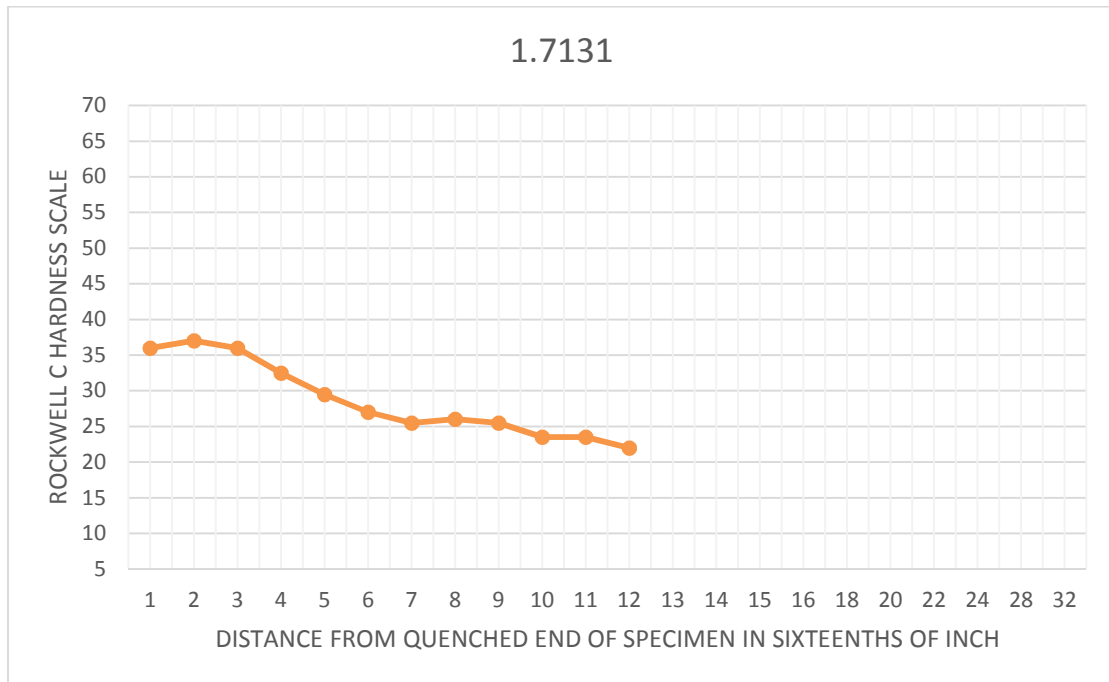
Στα γραφήματα 5 και 6 παρατηρείται μια πιο «ομαλή» πορεία στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ειδικότερα ο χάλυβας 1.2510 εμφανίζει τις μέγιστες τιμές της σκληρότητας του (55-60 HRC) μέχρι και σε απόσταση 8/16 της ίντσας (12.8 mm). Στη συνέχεια και μέχρι τα 20/16 (32 mm) η σκληρότητα πέφτει και σταθεροποιείται ξανά από αυτό το σημείο μέχρι και τα 32/16 της ίντσας (51.2 mm), σε μια περιοχή τιμών 29-32 HRC. Ο χάλυβας 1.5919 δεν έχει μια τόσο ξεκάθαρη εικόνα, όπως ο 1.2510, όμως είναι διακριτές οι τρεις περιοχές που ομαδοποιούνται οι μετρήσεις. Έως και τα 7/16 της ίντσας (11.2 mm) η σκληρότητα κινείται στην περιοχή των μέγιστων τιμών της (35-40 HRC). Μέχρι και τα 10/16 (16 mm) υφίσταται μια πτώση, μικρότερη από αυτή στον 1.2510, ενώ από εκεί και μέχρι το τέλος σταθεροποιείται σε μια περιοχή τιμών 23.5-29 HRC.

Γράφημα 7



Wnr.	Chemical composition %								Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	Si	P	Mo	Ni	S	
1.0503	0.42 -0.5	0.5- 0.8	Max 0.4	Max 0.4	Max 0.045	Max 0.1	Max 0.4	Max 0.045	820-860

Γράφημα 8

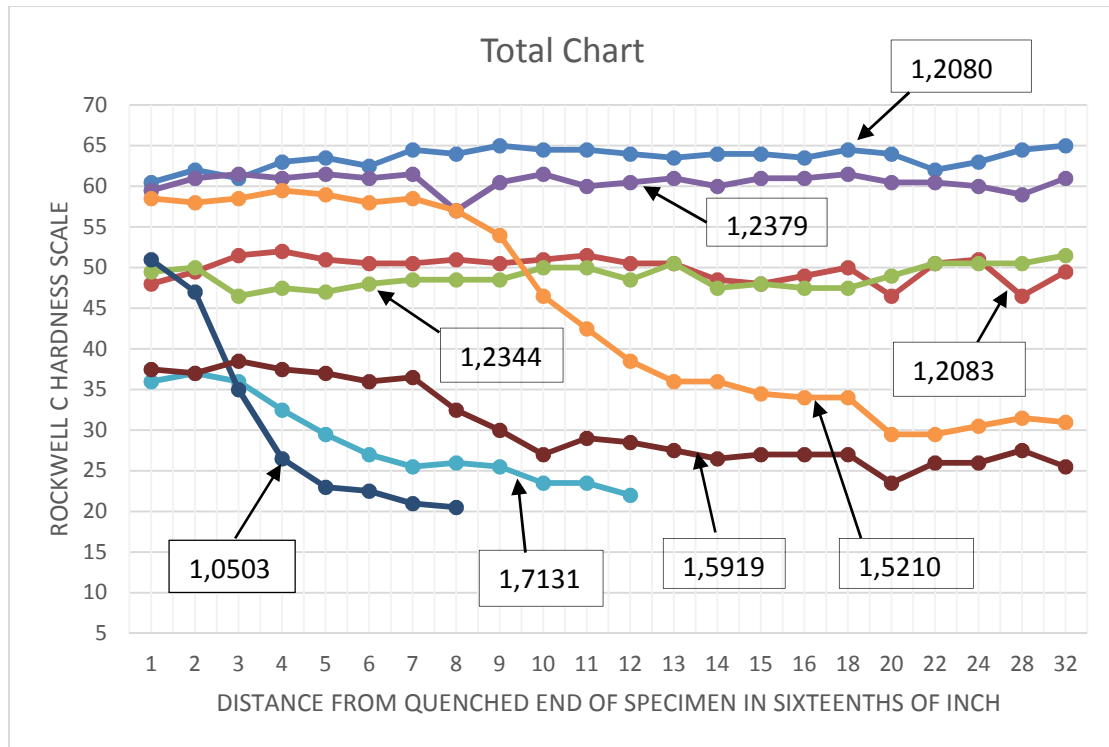


Wnr.	Chemical composition %						Austenitizing Temperature (°C)
	C	Mn	Cr	Si	P	S	
1.7131	0.14-0.19	1-1.3	0.8-1.1	Max 0.4	Max 0.025	Max 0.035	860-900

Στα γραφήματα 7 και 8 ξεχωρίζει το γεγονός ότι τα διαγράμματα των μετρήσεων δε φτάνουν μέχρι και τα πιο απομακρυσμένα σημεία από το άκρο βαφής. Αυτό συνέβη, όχι γιατί δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε εκείνα τα σημεία, αλλά λόγω του περιορισμού που τέθηκε από την προδιαγραφή ASTM A 255 – 02, που αναφέρει ότι τιμές κάτω των 20 HRC θεωρούνται ανακριβείς και δεν λαμβάνονται υπόψη. Έτσι το διάγραμμα του χάλυβα 1.0503 διακόπτεται στα 8/16 της ίντσας, ενώ το αντίστοιχο του 1.7131 διακόπτεται στα 12/16 (19.2 mm). Παρ' όλα αυτά ο 1.0503 φαίνεται να προλαβαίνει να διανύσει όλα τα στάδια των μετρήσεων, που εμφανίστηκαν και στα γραφήματα 5 και 6, με μια κορυφαία τιμή στη σκληρότητα (51 HRC), ακολουθούμενη από μια πολύ απότομη πτώση και μια σταθεροποίηση από τα 5/16 (8 mm). Αν κάποιος δει τα ακριβή αποτελέσματα και το πλήρες γράφημα στο Παράρτημα, θα παρατηρήσει ότι η πτώση της σκληρότητας συνεχίζεται, πολύ πιο ομαλά βέβαια, και η πραγματική σταθεροποίηση ξεκινά από τα 13/16 της ίντσας (20.8 mm) στην περιοχή τιμών 14-17 HRC. Αντίστοιχα και ο 1.7131 παρουσιάζει αρχικά μια μέγιστη τιμή (37 HRC στα 2/16), μόνο που η πτώση της σκληρότητας συνεχίζεται μέχρι και τη διακοπή της καταγραφής των αποτελεσμάτων. Η εικόνα μπορεί να ξεκαθαριστεί πάλι μέσω των ακριβών αποτελεσμάτων και του ολοκληρωμένου γραφήματος στο Παράρτημα, όπου είναι εμφανές ότι η πτώση της σκληρότητας δε σταματά και στα 32/16 της ίντσας έχουμε

τιμή 5 HRC. Προφανώς η σκληρότητα του υλικού είναι τόσο μικρή, ώστε οι τιμές στην κλίμακα Rockwell C πλησίασαν το 0, πράγμα που σημαίνει ότι αν πραγματοποιούνταν μετρήσεις ακόμα πιο μακριά από το άκρο βαφής θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί πλέον η κλίμακα Rockwell B.

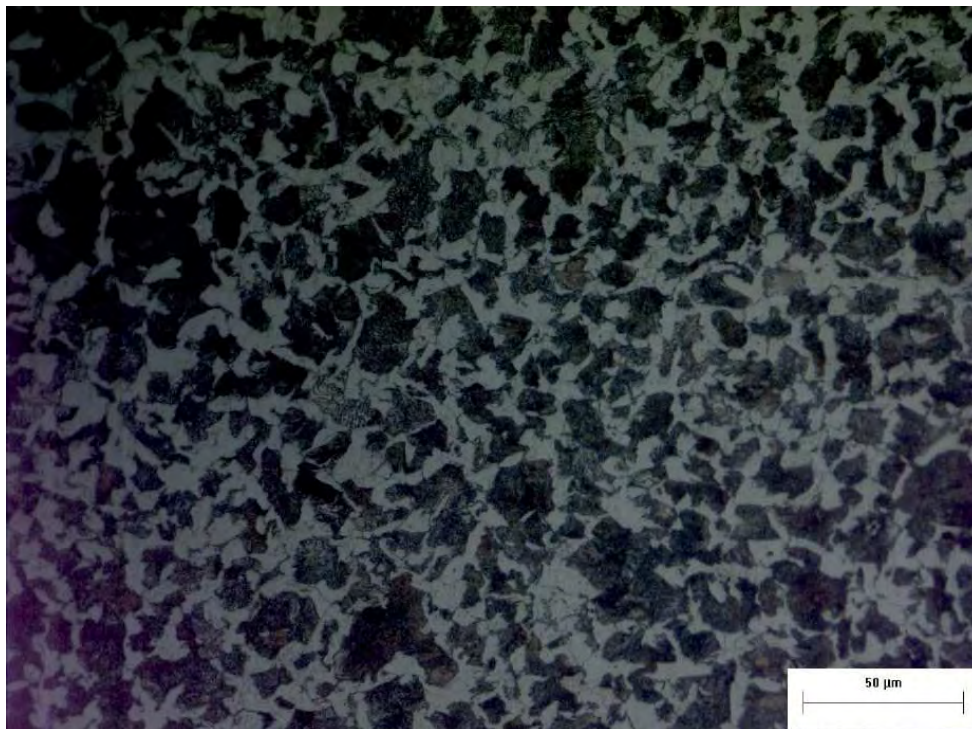
Γράφημα 9



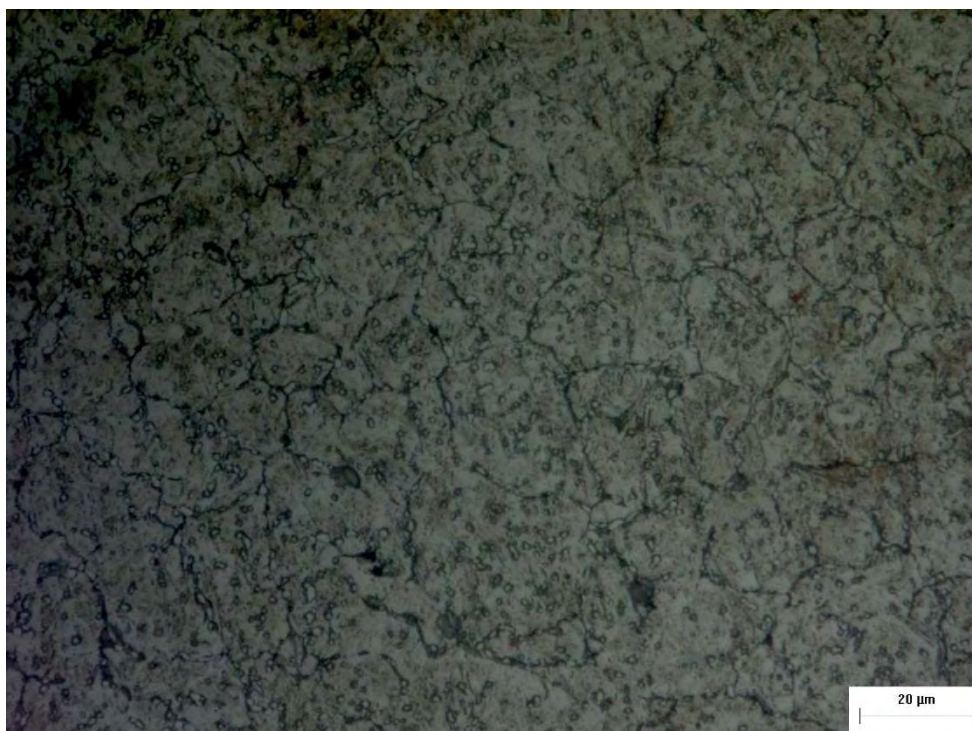
Στο συγκεντρωτικό γράφημα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των οκτώ χαλύβων και αποτυπώνονται καλύτερα οι διαφορετικές συμπεριφορές του καθενός από αυτούς.

4.2 Μεταλλογραφίες

Εδώ παρατίθενται οι μεταλλογραφίες που προήλθαν από τους χάλυβες 1.0503 και 1.2083.



Εικόνα 25 Μικροδομή του χάλυβα 1.0503 σε μεγέθυνση 500x.



Εικόνα 26 Μικροδομή του χάλυβα 1.2083 σε μεγέθυνση 1000x.

Στην Εικόνα 25 φαίνεται καθαρά η φερριτοπερλιτική δομή του 1.0503. Με λευκό χρώμα διακρίνεται ο προευτηκτοειδής φερρίτης και με μαύρο ο περλίτης. Αντίθετα στην Εικόνα 26 η μορφολογία του μαρτενσίτη δε διακρίνεται. Βάσει της θεωρίας η μορφολογία που αναμένεται είναι βελονοειδής μαρτενσίτης ή και μικτή (βελόνες και πλακίδια), λόγω του ποσοστού άνθρακα (0.36-0.42 C), αφού για $C < 0.4\%$ σχηματίζονται βελόνες και για $0.4\% < C < 0.6\%$ και τα δύο. Η δυσκολία στον προσδιορισμό της μορφολογίας οφείλεται στο ότι ο 1.2083 δεν είναι απλός ανθρακοχάλυβας, αλλά ανοξειδωτος. Το υψηλό ποσοστό Cr δυσκολεύει την παρατήρηση μέσω οπτικής μικροσκοπίας. Παρ' όλα αυτά διακρίνονται με ευκολία τα σύνορα του προ-ωστενιτικού κόκκου (prior austenite grain boundary), καθώς και με λευκό χρώμα τα καρβίδια του χρωμίου.

Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα στην περιγραφή της διαδικασίας μέτρησης του κόκκου, το μέγεθος προσδιορίζεται μέσω της σύγκρισης της μεταλλογραφίας σε μεγέθυνση 100 bar με σταυρόνημα που διαθέτει τα πρότυπα μεγέθη. Και οι δύο χάλυβες που εξετάστηκαν σχημάτισαν τόσο λεπτόκοκκο ωστενίτη, ώστε ο αριθμός μεγέθους κόκκου G και στις δύο περιπτώσεις να είναι 8. Οι εικόνες 16 και 17 είναι σε αρκετά μεγαλύτερη μεγέθυνση από 100x που έγινε η σύγκριση, για να είναι η μικροδομή πιο ευδιάκριτη.

5. Συμπεράσματα

5.1 Συσκευή Βαφής

Τα αποτελέσματα και η ομαλή διεξαγωγή των πειραμάτων της δοκιμής Jominy καθιστούν το σχεδιασμό και την κατασκευή της συσκευής επιτυχημένα. Ορισμένες προτάσεις για ακόμη καλύτερη λειτουργία της συσκευής στο μέλλον είναι :

- Η διάνοιξη μιας νέας οπής στη βάση του δοχείου συγκέντρωσης υδάτων και η κατασκευή ενός επιπλέον υδραυλικού συστήματος εκεί, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης απομάκρυνσης του νερού ακόμα και κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενός πειράματος.
- Η τοποθέτηση πλέγματος στο εσωτερικό του δοχείου (μαζί με κάποια στηρίγματα που θα ακουμπούν στη βάση), ώστε σε περίπτωση που ένα δοκίμιο ξεφύγει κατά τη μεταφορά του από το φούρνο στην πλάκα στήριξης, να προστατευθεί το δοχείο από φθορά ή ακόμα και θραύση. Μία ακόμη λειτουργία του πλέγματος θα είναι η συγκράτηση των μεταλλικών κομματιών που προέρχονται από την αποφλοίωση ορισμένων δοκιμών, ώστε να μην συσσωρεύονται και φράσσουν το σύστημα απομάκρυνσης υδάτων. Το πλέγμα θα πρέπει πιθανόν να είναι μεταλλικό, ανοξείδωτο για να μη σκουριάζει λόγω της επαφής του με το νερό και με τέτοιες ιδιότητες που να μπορεί να αντέξει τη σύγκρουση, αλλά και την υψηλή θερμοκρασία του δοκιμίου.

5.2 Σκληρομετρήσεις – Χημική Σύσταση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί κυρίως η επίδραση της περιεκτικότητας σε άνθρακα και αυτή των κραματικών στοιχείων (αντικαταστάσεως) στην εμβαπτότητα και τη σκληρότητα του κάθε δοκιμίου χάλυβα, οπότε θα γίνεται συχνή αναφορά στα Γραφήματα 1-8 που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα».

Χάλυβας 1.2080

Από το Γράφημα 1 φαίνεται ότι ο 1.2080 φθάνει αμέσως τη μέγιστη σκληρότητα του και τη διατηρεί καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου, οπότε έχει και πολύ μεγάλη εμβαπτότητα. Το μέγεθος της εμβαπτότητας μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα C (1.9-2.2%) και χρώμιο Cr (11-13%, ο χάλυβας είναι ανοξείδωτος), καθώς και στην παρουσία μικρής ποσότητας μαγγανίου Mn (0.2-0.6%). Ακόμη, η υψηλή περιεκτικότητα C και Cr (λόγω του σχηματισμού καρβιδίων) αιτιολογεί και τη μεγάλη σκληρότητα του μαρτενσίτη που σχηματίζει ο 1.2080.

Χάλυβας 1.2083

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ παρατηρείται ότι η εμβαπτότητα του 1.2083 είναι υψηλή, μέσω του Γραφήματος 3. Παρά το γεγονός ότι το ποσοστό του C είναι χαμηλό (0.36-0.42%), εκείνο του Cr (12.5-14.5%) και του

Mn (1%) είναι αρκετά ψηλά για να αυξάνουν την εμβαπτότητα. Το υψηλό ποσοστό Cr είναι που δίνει και στο μαρτενσίτη που σχηματίστηκε την υψηλή του σκληρότητα, χαμηλότερη βέβαια από αυτή του 1.2080, αφού η περιεκτικότητα σε C είναι πολύ μικρότερη.

Χάλυβας 1.2344

Ακόμη ένας χάλυβας με υψηλή εμβαπτότητα (Γράφημα 4), παρά το γεγονός ότι η περιεκτικότητά του σε C είναι χαμηλή (0.39%). Όμως σε αυτόν τον χάλυβα υπάρχει ταυτόχρονη παρουσία των τριών αποτελεσματικότερων κραματικών στοιχείων για την αύξηση της εμβαπτότητας, του Cr σε μέτριο ποσοστό (5.2%), του Mn σε χαμηλό ποσοστό (0.4%) και του μολυβδαινίου Mo σε υψηλό ποσοστό (1.4%), που δικαιολογούν το αποτέλεσμα αυτό. Όσον αφορά τη σκληρότητα, αυτή κινείται σε υψηλά επίπεδα, παρά το χαμηλό ποσοστό του C (όπως και στην περίπτωση του 1.2083), λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας των ισχυρά καρβιδιογόνων στοιχείων Cr, Mo και V (βανάδιο).

Χάλυβας 1.2379

Το Γράφημα 2 δείχνει πως και ο 1.2379 έχει υψηλή εμβαπτότητα. Όπως και στον 1.2344 υπάρχει Mo, όμως σε μικρότερη ποσότητα (0.8%), ενώ το ποσοστό Mn είναι και εδώ μικρό (0.4%). Αντίθετα η περιεκτικότητα σε C και Cr είναι αρκετά υψηλή (1.55% και 11.3% αντίστοιχα). Η υψηλή περιεκτικότητα σε αυτά τα δύο στοιχεία, σε συνδυασμό με την παρουσία στο κράμα των Mo και V, έδωσαν στο μαρτενσίτη την πολύ μεγάλη του σκληρότητα (μεγαλύτερη των 60 HRC και εφάμιλλη με του 1.2080).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι τέσσερις προαναφερθέντες χάλυβες αποτελούν τυπικές μορφές «χάλυβα βαθιάς σκλήρυνσης»^[14].

Χάλυβας 1.7131

Βάσει των Γραφημάτων 8 και ΓΠ-1 (Παράρτημα) ο 1.7131 παρουσιάζει χαμηλή εμβαπτότητα. Επικεντρώνοντας στη σύστασή του παρατηρείται ιδιαιτέρως χαμηλή περιεκτικότητα τόσο στον C (0.14-0.19%), όσο και στο Cr (0.8-1.1%), ενώ δεν υπάρχει καθόλου Mo. Το υψηλό ποσοστό Mn (1-1.3%) δεν επηρεάζει από μόνο του σε μεγάλο βαθμό την εμβαπτότητα, όμως ομαλοποιεί έως ένα βαθμό την πτώση της σκληρότητας. Έτσι η πτώση δεν είναι απότομη και ξεκινά από τα 3/16 της ίντσας (σε διαφοροποίηση με τη συμπεριφορά του χάλυβα 1.0503). Στα χαμηλά ποσοστά των C και Cr, καθώς και στην απουσία άλλων καρβιδιογόνων στοιχείων στον 1.7131 οφείλεται και η χαμηλή σκληρότητα.

Χάλυβας 1.2510

Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει στο Γράφημα 5 η εμβαπτότητα του 1.2510 κυμαίνεται σε μέτρια επίπεδα. Η μέγιστη σκληρότητα διατηρείται μέχρι και το σημείο μέτρησης στα 8/16 της ίντσας και ακολουθείται από μια ομαλή πτώση. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στο χαμηλό ποσοστό Cr (0.6%) και στην

απουσία Mo, που μείωσαν την εμβαπτότητα του χάλυβα, σε συνδυασμό με τη μέτρια περιεκτικότητα σε C (0.95%) και τη σχετικά υψηλή σε Mn (1.1%) που μετρίασαν αυτή τη μείωση. Αντίθετα η σκληρότητα του μαρτενσίτη που σχηματίστηκε είναι υψηλή (κοντά στα 60 HRC), λόγω αυτής της μέτριας περιεκτικότητας σε C μαζί με την ταυτόχρονη ύπαρξη στο κράμα των ισχυρά καρβιδιογόνων στοιχείων Cr, V και W ακόμη και σε μικρή ποσότητα.

Χάλυβας 1.0503

Από τα Γράφημα 7 και ΓΠ-2 είναι ξεκάθαρο ότι ο 1.0503 έχει πολύ μικρή εμβαπτότητα (τη μικρότερη από τους 8 χάλυβες που εξετάστηκαν), αφού η σκληρότητά του φτάνει τη μέγιστη τιμή της μόνο στο πρώτο σημείο μέτρησης (1/16 της ίντσας) και στο αμέσως επόμενο υφίσταται μια κατακόρυφη πτώση. Παρά το γεγονός ότι στο χάλυβα υπάρχουν ταυτόχρονα τέσσερα στοιχεία που αυξάνουν την εμβαπτότητα (Cr, Mn, Mo και Ni), αυτή παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα, λόγω των πολύ μικρών ποσοτήτων των προαναφερθέντων στοιχείων (0.4%, 0.5-0.8%, 0.1% και 0.4% αντίστοιχα) και της σχετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε C (0.42-0.5%). Εδώ εμφανίζεται και το πόσο σημαντική είναι η επίδραση των Cr και Mn στην αύξηση της εμβαπτότητας. Συγκρίνοντας τον 1.0503 με τον άλλο χάλυβα που παρουσίασε χαμηλή εμβαπτότητα, τον 1.7131, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι ο 1.0503 έχει μικρότερη εμβαπτότητα, ενώ περιέχει περισσότερα στοιχεία που την αυξάνουν (ο 1.7131 δεν έχει καθόλου Mo και Ni), αλλά και περισσότερο C (0.42-0.5% έναντι 0.14-0.19%). Όμως έχει μικρότερες ποσότητες Cr (0.4% έναντι 0.8-1.1%) Mn (0.5-0.8% έναντι 1-1.3%), τα οποία τελικά αναδεικνύονται στα στοιχεία με τη μεγαλύτερη επιρροή. Παρ' όλα αυτά οι υπάρχουσες ποσότητες C, Cr και Mo αποδεικνύονται αρκετές για να προσδώσουν υψηλή μέγιστη σκληρότητα στο χάλυβα (περίπου 50 HRC). Τέλος να σημειωθεί ότι ο 1.0503 αποτελεί τυπική μορφή «χάλυβα ρηχής σκλήρυνσης»^[15].

Χάλυβας 1.5919

Σύμφωνα με το Γράφημα 6, ο 1.5919 εμφανίζει μέτρια εμβαπτότητα. Η σκληρότητα διατηρεί τη μέγιστη τιμή της μέχρι και τα 7/16 της ίντσας και μετά από μια ομαλή πτώση σταθεροποιείται ξανά στα 10/16. Παρά τα χαμηλά ποσοστά σε C, Cr και Mn (0.14-0.19%, 1.4-1.7% και 0.4-0.6% αντίστοιχα) η εμβαπτότητα καταφέρνει να διατηρηθεί σε αυτά τα μέτρια επίπεδα χάρη στην υψηλή περιεκτικότητα σε Ni (1.4-1.7%). Στις μικρές ποσότητες C και Cr και στη μεγάλη Ni (το οποίο προσδίδει ολκιμότητα στους χάλυβες) οφείλεται και η χαμηλή μέγιστη σκληρότητα του χάλυβα.

5.3 Μικροδομή

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μεταλλογραφική ανάλυση και τη μέτρηση του μεγέθους του προ-ωστενιτικού κόκκου δεν έρχονται σε συμφωνία με τη θεωρία και στους δύο χάλυβες που εξετάστηκαν.

Στην περίπτωση του χάλυβα 1.0503 ήταν αναμενόμενο το υλικό να είναι λεπτόκοκκο, αφού από τις σκληρομετρήσεις φάνηκε ότι είχε πολύ χαμηλή εμβαπτότητα. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε στα αποτελέσματα η δομή ήταν φερριτοπερλιτική.

Αντίθετα στην περίπτωση του χάλυβα 1.2083, βάσει της θεωρίας το μέγεθος του κόκκου θα έπρεπε να είναι μεγάλο, αφού οι σκληρομετρήσεις έδειξαν ότι η εμβαπτότητά του ήταν αρκετά υψηλή. Τελικά η μέτρηση έδωσε αριθμό μεγέθους κόκκου G ίσο με 8, άρα μικρό μέγεθος κόκκου. Η μεγάλη εμβαπτότητα οφείλεται, όπως γράφτηκε στα πρωτότερα, στη μεγάλη περιεκτικότητα σε Cr. Παρά το ότι το υλικό είναι λεπτόκοκκο, έχοντας έτσι πολλά σύνορα κόκκων που θα λειτουργήσουν ως θέσεις ετερογενούς πυρήνωσης για τον περλίτη, η περιεχόμενη ποσότητα Cr είναι αρκετή, ώστε να επιβραδύνει αρκετά τη διάχυση και τον περλιτικό μετασχηματισμό. Έτσι δίνεται περιθώριο για το σχηματισμό μαρτενσίτη καθ' όλο το μήκος του δοκιμίου και αύξηση της εμβαπτότητας. Είναι πιθανό το Cr να εμπόδιζε και την ανάπτυξη των ωστενιτικών κόκκων, μέσω του σχηματισμού καρβιδίων.

5.4 Γενικά Συμπεράσματα

Βλέποντας συνολικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν, φαίνεται η χημική σύσταση να έχει μεγαλύτερη επιρροή στην εμβαπτότητα από το μέγεθος του προ-ωστενιτικού κόκκου. Αυτό η άποψη δεν είναι ακριβής και δε θα πρέπει να υιοθετηθεί σε καμία περίπτωση, αφού στην παρούσα μελέτη τα αποτελέσματα δεν ήταν αρκετά για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, δεδομένου ότι έγινε μέτρηση μεγέθους κόκκων μόνο σε δύο από τους οκτώ υπό εξέταση χάλυβες.

Το ότι η χημική σύσταση αποτελεί τη Λυδία λίθο για το μέγεθος της εμβαπτότητας είναι κάτι αναμενόμενο που επιβεβαιώνεται και από την ίδια την προδιαγραφή της δοκιμής Jominy. Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού της εμβαπτότητας (πέραν της πειραματικής που ήταν και η κύρια ενασχόληση αυτής της εργασίας) που περιλαμβάνει τον υπολογισμό της χημικής ιδεατής διαμέτρου (chemical ideal diameter, DI) του χάλυβα, λαμβάνει υπόψη μόνο τη χημική σύστασή του και τα αποτελέσματά της βρίσκονται αρκετά συχνά σε συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Μάλιστα συμφωνεί και με το συμπέρασμα που προέκυψε πρωτότερα, ότι τα κραματικά στοιχεία Mn και Cr έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο σε κάθε κραματικό στοιχείο αντιστοιχεί ένας πολλαπλασιαστικός συντελεστής (multiplying factor), ο οποίος όσο μεγαλύτερος είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επίδραση του αντίστοιχου στοιχείου στην DI και

στην αύξηση της εμβαπτότητας. Για μια περιεκτικότητα 0.8% τα κραματικά στοιχεία με το μεγαλύτερο συντελεστή (άρα και τη μεγαλύτερη επίδραση στην εμβαπτότητα) είναι τα Mn και Cr με 3.667 και 2.728 αντίστοιχα.

Τέλος παρά το γεγονός ότι η θεωρία προβλέπει μεγάλο μέγεθος προ-ωστενιτικού κόκκου σε χάλυβες με μεγάλη εμβαπτότητα, πάλι η προδιαγραφή ASTM A 255 – 02 έρχεται να μετριάσει αυτή την εντύπωση μέσω της μεθόδου υπολογισμού της χημικής ιδεατής διαμέτρου. Για τον υπολογισμό της DI το μέγεθος κόκκου θεωρείται σταθερό και με G ίσο με 7, δηλαδή λεπτόκοκκος ωστενίτης, αφού μεγάλο ποσοστό των χαλύβων στα πειράματα που διεξήγαν προσαρμόστηκε σε αυτό το μέγεθος^[16].

Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε μια μελέτη της εμβαπτότητας από όλες τις πλευρές, δηλαδή και από την πλευρά του πειράματος και των μετρήσεων, αλλά και από την πλευρά της μικροδομής και της χημικής σύστασης. Πρώτος στόχος ήταν η ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας συσκευής βαφής, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η δοκιμή Jominy. Στη συνέχεια η προσοχή στράφηκε στην επιτυχή διεξαγωγή του πειράματος, ώστε μέσα από αυτό να προκύψουν δοκίμια κατάλληλα για μετρήσεις. Ακολούθησαν οι σκληρομετρήσεις και η μεταλλογραφική ανάλυση. Τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων συγκεντρώθηκαν σε γραφήματα και συνδυάστηκαν με τη σύσταση των χαλύβων, και σε δύο περιπτώσεις και τη μικροδομή τους, για να υπολογιστεί η εμβαπτότητα κάθε χάλυβα, καθώς και οι παράγοντες που την επηρέασαν.

Επειδή η εργασία επικεντρώθηκε στη δοκιμή Jominy και ότι αυτή περιλαμβάνει, δεν δόθηκε μεγάλο βάρος στη μελέτη της μικροδομής των χαλύβων και την επίδραση του μεγέθους του ωστενιτικού κόκκου στην εμβαπτότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν δεδομένα μόνο για δύο από τους οκτώ χάλυβες που εξετάστηκαν. Αυτό είναι και ένα πεδίο το οποίο θα ήταν χρήσιμο να αναλυθεί περισσότερο στο μέλλον, ώστε να προκύψουν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα. Ακόμη η χρήση θερμοστοιχείων μέσα στους φούρνους κατά τη διάρκεια της θέρμανσης των δοκιμίων στην ωστενιτική περιοχή, θα έδινε πολλές πληροφορίες για το ρυθμό θέρμανσης και γενικότερα θα έριχνε φως σε αυτή την κατά κάποιο τρόπο «τυφλή» διαδικασία. Τέλος πολύ ωφέλιμο για την ακόμα καλύτερη λειτουργία της συσκευής βαφής θα ήταν να εφαρμοστούν οι προτάσεις που έγιναν στην ενότητα 5.1.

Βιβλιογραφία

- [1]. Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, «Φυσική Μεταλλουργία», Εκδόσεις Τζιόλα, (2007), σ.685
- [2]. ibid
- [3]. H.K.D.H. Bhadeshia and R.W.K. Honeycombe, “Steels, Microstructure and Properties”, Elsevier Ltd., (2006)
- [4]. ibid
- [5]. ibid σ.167
- [6]. ibid
- [7]. ibid σ.176
- [8]. ASTM International, A 255 - 02 “Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel”
- [9]. C.W. Wegst and M. Wegst, “Stahlschlüssel”, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, (2010)
- [10]. ASTM International, A 255 – 02 “Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel”, Ενότητα 4.2, “Water-Quenching Device”, σ.1
- [11]. ASTM International, E 112 – 96 “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”
- [12]. George F. Vander Voort, “Metallography, Principles and Practice”, ASM International, (1999), σ.632
- [13]. ibid σ.648
- [14]. H.K.D.H. Bhadeshia and R.W.K. Honeycombe, “Steels, Microstructure and Properties”, Elsevier Ltd., (2006), σ.174
- [15]. ibid
- [16]. ASTM International, A 255 – 02 “Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel”, Ενότητα 10.3, “DI Calculation for Non-Boron Steels”, σ.5

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

Πίνακες τιμών των σκληρομετρήσεων – Ολοκληρωμένα Γραφήματα

Στους παρακάτω πίνακες καταγράφηκαν οι τιμές των σκληρομετρήσεων από κάθε επίπεδο (Α,Β) κάθε δοκιμίου, καθώς και η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των αντίστοιχων σημείων. Στην τελευταία στήλη βρίσκεται ο μέσος όρος αυτών των τιμών, από τον οποίο κατασκευάστηκαν και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα». Στους πίνακες των χαλύβων 1.7131 και 1.0503 οι σημειωμένες με κόκκινο χρώμα τιμές, είναι εκείνες που δεν ελήφθησαν υπόψη λόγω των περιορισμών της προδιαγραφής ASTM A 255 – 02 και δεν εμφανίζονται στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα». Μαζί με αυτούς τους πίνακες δίνονται και τα ολοκληρωμένα γραφήματα αυτών των δύο χαλύβων.

Specimen	1,2080			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	61	60	1	60,5
2	62	62	0	62
3	60	62	2	61
4	62	64	2	63
5	64	63	1	63,5
6	62	63	1	62,5
7	64	65	1	64,5
8	64	64	0	64
9	65	65	0	65
10	64	65	1	64,5
11	64	65	1	64,5
12	65	63	2	64
13	62	65	3	63,5
14	64	64	0	64
15	63	65	2	64
16	63	64	1	63,5
18	64	65	1	64,5
20	65	63	2	64
22	63	61	2	62
24	62	64	2	63
28	64	65	1	64,5
32	65	65	0	65

Specimen	1,2083			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	49	47	2	48
2	50	49	1	49,5
3	53	50	3	51,5
4	53	51	2	52
5	51	51	0	51
6	50	51	1	50,5
7	51	50	1	50,5
8	52	50	2	51
9	51	50	1	50,5
10	51	51	0	51
11	53	50	3	51,5
12	52	49	3	50,5
13	52	49	3	50,5
14	49	48	1	48,5
15	48	48	0	48
16	49	49	0	49
18	51	49	2	50
20	48	45	3	46,5
22	52	49	3	50,5
24	51	51	0	51
28	46	47	1	46,5
32	51	48	3	49,5

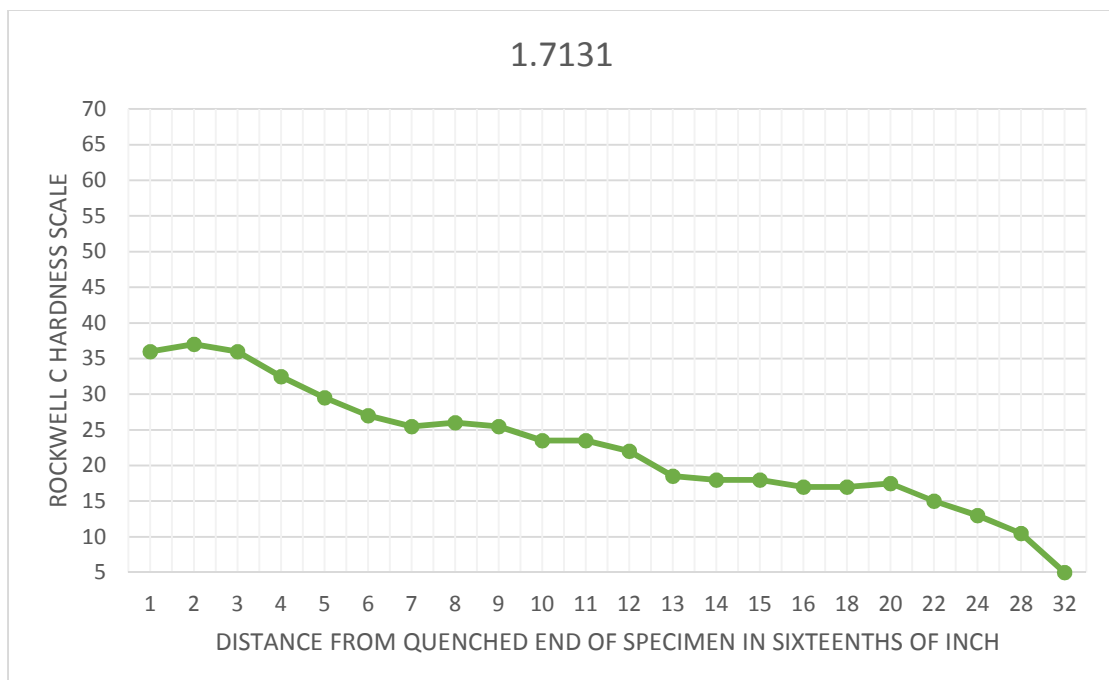
Specimen	1,2344			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	49	50	1	49,5
2	50	50	0	50
3	45	48	3	46,5
4	48	47	1	47,5
5	47	47	0	47
6	48	48	0	48
7	48	49	1	48,5
8	50	47	3	48,5
9	47	50	3	48,5
10	50	50	0	50
11	49	51	2	50
12	49	48	1	48,5
13	52	49	3	50,5
14	47	48	1	47,5
15	49	47	2	48
16	48	47	1	47,5
18	48	47	1	47,5
20	50	48	2	49
22	52	49	3	50,5
24	52	49	3	50,5
28	51	50	1	50,5
32	52	51	1	51,5

Specimen	1,2379			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	60	59	1	59,5
2	62	60	2	61
3	62	61	1	61,5
4	62	60	2	61
5	62	61	1	61,5
6	62	60	2	61
7	61	62	1	61,5
8	57	57	0	57
9	62	59	3	60,5
10	62	61	1	61,5
11	61	59	2	60
12	60	61	1	60,5
13	61	61	0	61
14	61	59	2	60
15	62	60	2	61
16	62	60	2	61
18	62	61	1	61,5
20	61	60	1	60,5
22	61	60	1	60,5
24	60	60	0	60
28	58	60	2	59
32	60	62	2	61

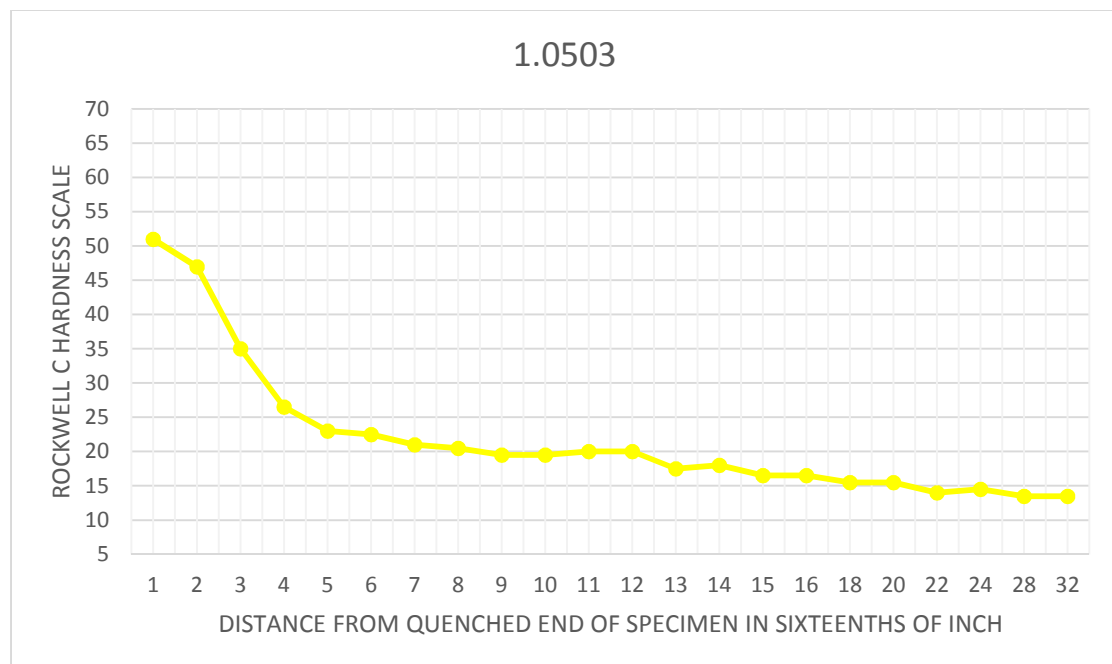
Specimen	1,2510			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	58	59	1	58,5
2	59	57	2	58
3	58	59	1	58,5
4	59	60	1	59,5
5	59	59	0	59
6	59	57	2	58
7	60	57	3	58,5
8	58	56	2	57
9	55	53	2	54
10	48	45	3	46,5
11	44	41	3	42,5
12	40	37	3	38,5
13	36	36	0	36
14	37	35	2	36
15	36	33	3	34,5
16	35	33	2	34
18	35	33	2	34
20	31	28	3	29,5
22	29	30	1	29,5
24	31	30	1	30,5
28	32	31	1	31,5
32	32	30	2	31

Specimen	1,5919			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	39	36	3	37,5
2	37	37	0	37
3	38	39	1	38,5
4	38	37	1	37,5
5	37	37	0	37
6	36	36	0	36
7	35	38	3	36,5
8	34	31	3	32,5
9	30	30	0	30
10	27	27	0	27
11	30	28	2	29
12	29	28	1	28,5
13	28	27	1	27,5
14	28	25	3	26,5
15	28	26	2	27
16	28	26	2	27
18	28	26	2	27
20	24	23	1	23,5
22	27	25	2	26
24	27	25	2	26
28	28	27	1	27,5
32	26	25	1	25,5

Specimen	1,7131			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	36	36	0	36
2	37	37	0	37
3	37	35	2	36
4	33	32	1	32,5
5	29	30	1	29,5
6	27	27	0	27
7	26	25	1	25,5
8	27	25	2	26
9	27	24	3	25,5
10	24	23	1	23,5
11	25	22	3	23,5
12	23	21	2	22
13	20	17	3	18,5
14	18	18	0	18
15	21	15	6	18
16	17	17	0	17
18	16	18	2	17
20	17	18	1	17,5
22	16	14	2	15
24	14	12	2	13
28	10	11	1	10,5
32	5	5	0	5



Specimen	1,0503			
Flats	A	B		
Sixteenths of an inch			Difference	Average
1	51	51	0	51
2	48	46	2	47
3	35	35	0	35
4	26	27	1	26,5
5	23	23	0	23
6	23	22	1	22,5
7	22	20	2	21
8	21	20	1	20,5
9	21	18	3	19,5
10	20	19	1	19,5
11	21	19	2	20
12	21	19	2	20
13	19	16	3	17,5
14	19	17	2	18
15	17	16	1	16,5
16	17	16	1	16,5
18	15	16	1	15,5
20	15	16	1	15,5
22	14	14	0	14
24	14	15	1	14,5
28	13	14	1	13,5
32	12	15	3	13,5



Παράρτημα Β

Προδιαγραφή ASTM International A 255 - 02 “Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel”



Designation: A 255 – 02

Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel¹

This standard is issued under the fixed designation A 255; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the identification and description of test methods for determining the hardenability of steels. The two test methods include the quantitative end-quench or Jominy Test and a method for calculating the hardenability of steel from the chemical composition based on the original work by M. A. Grossman.

1.2 The selection of the test method to be used for determining the hardenability of a given steel shall be agreed upon between the supplier and user. The Certified Material Test Report shall state the method of hardenability determination.

1.3 The calculation method described in these test methods is applicable only to the range of chemical compositions that follow:

Element	Range, %
Carbon	0.10–0.70
Manganese	0.50–1.65
Silicon	0.15–0.60
Chromium	1.35 max
Nickel	1.50 max
Molybdenum	0.55 max

1.4 Hardenability is a measure of the depth to which steel will harden when quenched from its austenitizing temperature (Table 1). It is measured quantitatively, usually by noting the extent or depth of hardening of a standard size and shape of test specimen in a standardized quench. In the end-quench test the depth of hardening is the distance along the specimen from the quenched end which correlates to a given hardness level.

1.5 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee A01 on Steel, Stainless Steel, and Related Alloys and are the direct responsibility of Subcommittee A01.15 on Bars.

Current edition approved March 10, 2002. Published May 2002. Originally published as A 255–42. Last previous edition A 255–99.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials²
- E 112 Test Methods for Determining the Average Grain Size²

END-QUENCH OR JOMINY TEST

3. Description

3.1 This test method covers the procedure for determining the hardenability of steel by the end-quench or Jominy test. The test consists of water quenching one end of a cylindrical test specimen 1.0 in. in diameter and measuring the hardening response as a function of the distance from the quenched end.

4. Apparatus

4.1 *Support for Test Specimen*—A fixture for supporting the test specimen vertically so that the lower end of the specimen is a distance of 0.5 in. (12.7 mm) above the orifice of the water-quenching device. A satisfactory type of support for the standard 1.0-in. (25.4-mm) specimen is shown in Fig. 1.

NOTE 1—A suitable support for other sizes and shapes of specimens is shown in Fig. X1.1.

4.2 *Water-Quenching Device*—A water-quenching device of suitable capacity to provide a vertical stream of water that can be controlled to a height of 2.5 in. (63.5 mm) when passing through an orifice 0.5 in. (12.7 mm) in diameter. A tank of sufficient capacity to maintain the water temperature requirements of 6.3 with a small pump and control valves will be found satisfactory. The water-supply line shall also be provided with a quick opening valve.

5. Test Specimens

5.1 *Wrought Specimens*—End-quench specimens shall be prepared from rolled or forged stock and shall represent the full cross section of the product. If negotiated between the supplier and the user, the end-quench specimen may be prepared from a given location in a forged or rolled product or from a

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

TABLE 1 Normalizing and Austenitizing Temperatures^A

Steel Series	Ordered Carbon Content, max, %	Normalizing Temperature, °F (°C)	Austenitizing Temperature, °F (°C)
1000, 1300, 1500, 3100, 4000, 4100	0.25 and under	1700 (925)	1700 (925)
4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 5000, 5100, 6100, ^B 8100, 8600, 8700, 8800, 9400, 9700, 9800	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1600 (870)
	0.37 and over	1600 (870)	1550 (845)
2300, 2500, 3300, 4800, 9300	0.25 and under	1700 (925)	1550 (845)
	0.26 to 0.36, incl	1650 (900)	1500 (815)
	0.37 and over	1600 (870)	1475 (800)
9200	0.50 and over	1650 (900)	1600 (870)

^A A variation of $\pm 10^\circ\text{F}$ (6°C) from the temperatures in this table is permissible.

^B Normalizing and austenitizing temperatures are 50°F (30°C) higher for the 6100 series.

continuous cast billet. The test specimen shall be 1.0 in. (25.4 mm) in diameter by 4.0 in. (101.6 mm) in length, with means for hanging it in a vertical position for end quenching. Dimensions of the preferred specimen and of an optional specimen (Note 2) are given in Fig. 2 and Fig. 3. The specimen shall be machined from a bar previously normalized in accordance with 6.1 and of such size as to permit the removal of all decarburization in machining to 1.0 in. round. The end of the specimen to be water cooled shall have a reasonably smooth finish, preferably produced by grinding. Normalizing may be waived by agreement between the supplier and the user. The previous thermal history of the specimen tested shall always be recorded.

5.2 Cast Specimens—A separately cast end-quench specimen may be used for non-boron steels. Cast specimens are not suitable for boron steel grades due to erratic results. A graphite or metal mold may be used to form an overlength specimen 1.0 in. (25.4 mm) in diameter which shall be cut to the standard specimen size. The mold may also be used to form a 1.25-in. (31.8-mm) diameter specimen which shall be machined to the final specimen size. Cast tests need not be normalized.

NOTE 2—Other sizes and shapes of test specimens are described in Appendix X1.

6. Procedure

6.1 Normalizing—The wrought product from which the specimen is to be prepared shall be normalized to ensure proper hardening characteristics. The sample shall be held at the temperature listed in Table 1 for 1 h and cooled in air. Tempering of the normalized sample to improve machinability is permitted.

6.2 Heating—Place the specimen in a furnace that is at the specified austenitizing temperature (Table 1) and hold at this temperature for 30 min. In production testing slightly longer times up to 35 min may be used without appreciably affecting results. It is important to heat the specimen in such an atmosphere that practically no scaling and a minimum of decarburization takes place. This may be accomplished by heating the specimen in a vertical position in a container with an easily removable cover containing a layer of cast-iron chips with the bottom face of the specimen resting on the chips.

6.2.1 Other methods consist of placing the specimen in an appropriately sized hole in a graphite block or placing the specimen in an upright tube attached to a flat base, both of a heat-resistant metal, with the collar projecting for a tong hold. Place a disk of graphite or carbon, or a layer of carbonaceous material such as charcoal, in the bottom of the tube to prevent scaling.

6.2.2 For a particular fixture and furnace, determine the time required to heat the specimen to the austenitizing temperature by inserting a thermocouple into a hole drilled axially in the top of the specimen. Repeat this procedure periodically, for example once a month, for each combination of fixture and furnace.

6.3 Quenching—Adjust the water-quenching device so that the stream of water rises to a free height of 2.5 in. (63.5 mm) above the 0.5-in. (12.7-mm) orifice, without the specimen in position. The support for the specimen shall be dry at the beginning of each test. Then place the heated specimen in the support so that its bottom face is 0.5 in. above the orifice, and turn on the water by means of the quick-opening valve. The time between removal of the specimen from the furnace and the beginning of the quench should not be more than 5 s. Direct the stream of water, at a temperature of 40 to 85°F (5 to 30°C), against the bottom face of the specimen for not less than 10 min. Maintain a condition of still air around the specimen during cooling. If the specimen is not cold when removed from the fixture, immediately quench it in water.

6.4 Hardness Measurement—Two flats 180° apart shall be ground to a minimum depth of 0.015 in. (0.38 mm) along the entire length of the bar and Rockwell C hardness measurements made along the length of the bar. Shallower ground depths can affect reproducibility of results, and correlation with cooling rates in quenched bars.

6.4.1 The preparation of the two flats must be carried out with considerable care. They should be mutually parallel and the grinding done in such a manner that no change of the quenched structure takes place. Very light cuts with water cooling and a coarse, soft-grinding wheel are recommended to avoid heating the specimen. In order to detect tempering due to grinding, the flat may be etched with one of the following etchant solutions:

NOTE 3—5 % nitric acid (concentrated) and 95 % water by volume.

NOTE 4—50 % hydrochloric acid (concentrated) and 50 % water by volume.

Wash the sample in hot water. Etch in solution No. 1 until black. Wash in hot water. Immerse in solution No. 2 for 3 s and wash in hot water. Dry in air blast.

6.4.1.1 The presence of lighter or darker areas indicates that hardness and structure have been altered in grinding. If such changes caused by grinding are indicated, new flats may be prepared.

6.4.2 When hardness tests are made, the test specimen rests on one of its flats on an anvil firmly attached to the hardness machine. It is important that no vertical movement be allowed when the major load is applied. The anvil must be constructed to move the test specimen past the penetrator in accurate steps of $\frac{1}{16}$ in. (1.5 mm). Resting the specimen in a V-block is not permitted.

ASME A 255 - 02

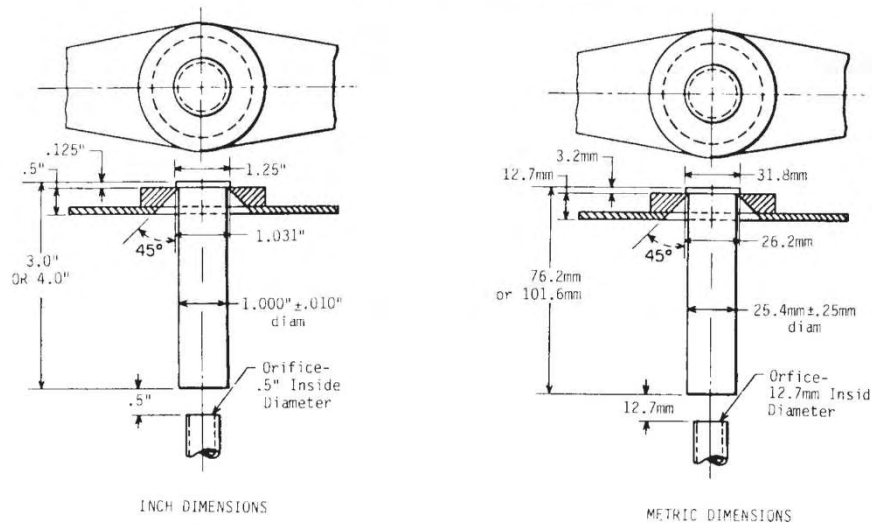


FIG. 1 Test Specimen in Support for Water Quenching

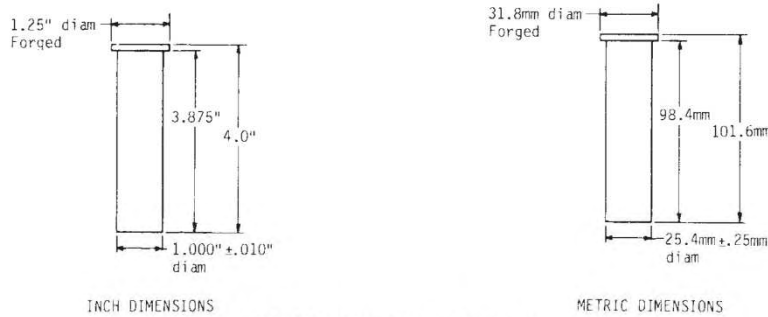


FIG. 2 Preferred Test Specimen

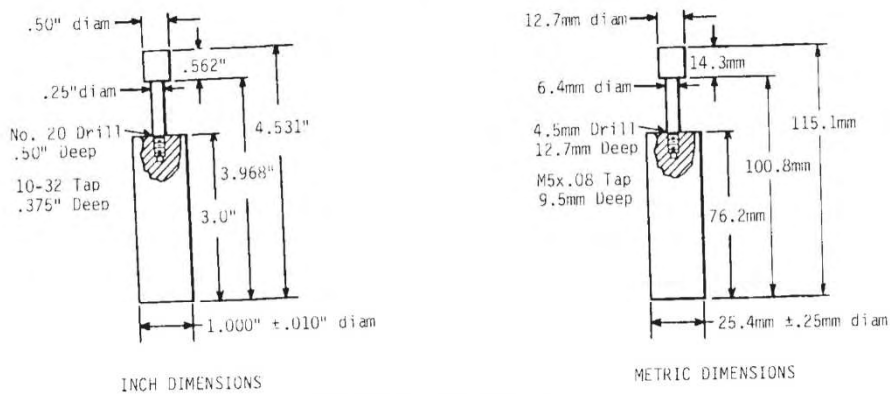


FIG. 3 Optional Test Specimen

6.4.2.1 The Rockwell tester should periodically be checked against standard test blocks. It is recommended that a test block be interposed between the specimen and the indenter to check the seating of the indenter and the specimen simultaneously. For general statements regarding the use of test blocks and surface conditions, reference should be made to 4.7 and 5.2, respectively, of Test Methods E 18.

6.4.3 Exercise care in registering the point of the indenter in relationship to the quenched end of the specimen as well as providing for accurate spacing between indentations. A low-power measuring microscope is suitable for use in determining the distance from the quenched end to the center of the first impression and in checking the distance from center to center of the succeeding impressions. It has been found that with

ASTM A 255 - 02

reasonable operating care and a well-built fixture, it is practical to locate the center of the first impression 0.0625 ± 0.004 in. (1.5 ± 0.10 mm) from the quenched end. The variations between spacings should be even smaller. Obviously, it is more important to position the indenter accurately when testing low-hardenability steels than when testing high-hardenability steels. The positioning of the indenter should be checked with sufficient frequency to provide assurance that accuracy requirements are being met. In cases of lack of reproducibility or of differences between laboratories, indenter spacing should be measured immediately.

6.4.4 Readings shall be taken in steps of $\frac{1}{16}$ in. (1.6 mm) for the first 16 sixteenths (25.4 mm), then 18, 20, 22, 24, 28, and 32 sixteenths of an inch. Values below 20 HRC are not recorded because such values are not accurate. When a flat on which readings have been made is used as a base, the burrs around the indentation shall be removed by grinding unless a fixture is used which has been relieved to accommodate the irregularities due to the indentations.

6.4.4.1 Hardness readings should preferably be made on two flats 180° apart. Testing on two flats will assist in the detection of errors in specimen preparation and hardness

measurement. If the two probes on opposite sides differ by more than 4 HRC points at any one position, the test should be repeated on new flats, 90° from the first two flats. If the retest also has greater than 4 HRC points spread, a new specimen should be tested.

6.4.4.2 For reporting purposes, hardness readings should be recorded to the nearest integer, with 0.5 HRC values rounded to the next higher integer.

7. Plotting Test Results

7.1 Test results should be plotted on a standard hardenability chart prepared for this purpose, in which the ordinates represent HRC values and the abscissae represent the distance from the quenched end of the specimen at which the hardness determinations were made. When hardness readings are taken on two or more flats, the values at the same distance should be averaged and that value used for plotting. A facsimile of the

**A. S. T. M. END QUENCH TEST
FOR HARDENABILITY
OF STEEL (A 255 - 48 T)**

DATE _____
LABORATORY _____
TYPE SPECIMEN _____
TEST NO. _____

TYPE	HEAT NO.	GRAIN SIZE	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	NORM. TEMP. °F.	QUENCH TEMP. °F.
B740	19297	8-7	.44	.89	.019	.016	.27	.58	.50	.25	1600	1550
B620	621271	7-8	.19	.80	.015	.015	.23	.46	.52	.22	1700	1700

REMARKS:

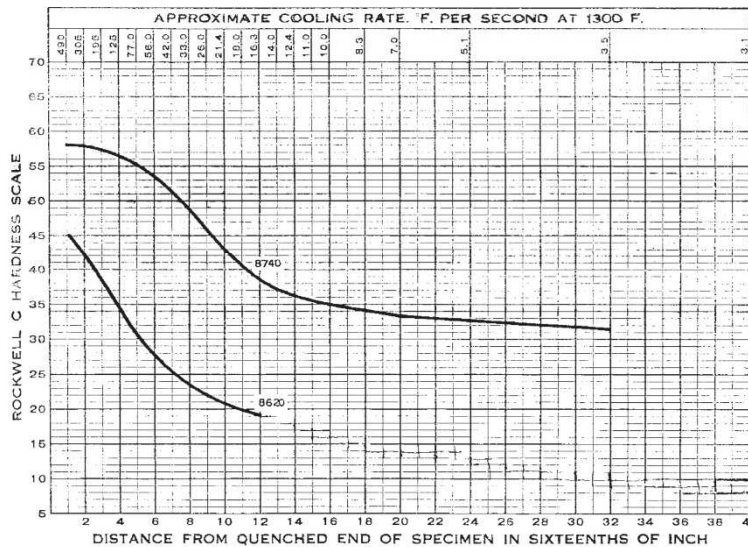


FIG. 4 Facsimile of Standard ASTM Hardenability Chart, Showing Typical Hardenability Curves [Chart Size: 8½ by 11 in. (216 by 279 mm)]



standard ASTM hardenability chart³ on which typical hardenability curves have been plotted is shown in Fig. 4.

8. Index of Hardenability

8.1 The hardenability of a steel can be designated by a specific HRC hardness value or HRC hardness value range at a given Jominy (“J”) distance. Examples of this method are J $\frac{1}{16}$ in. (6.4 mm) = 47 HRC min, J $\frac{7}{16}$ in. (11.1 mm) = 50 HRC max, and J $\frac{5}{16}$ in. (7.9 mm) = 38–49 HRC.

9. Report

9.1 Report the following information that may be recorded on the ASTM hardenability chart:

9.1.1 Previous thermal history of the specimen tested, including the temperature of normalizing and austenitizing,

9.1.2 Chemical Composition,

9.1.3 ASTM grain size (McQuaid-Ehn) as determined by Test Methods E 112, unless otherwise indicated, and

9.1.4 A prominent notation on the standard hardenability chart if any of the test specimens listed in Appendix X1 are used.

CALCULATION OF HARDENABILITY

10. Introduction

10.1 This method of Jominy Hardenability calculation from the chemical ideal diameter (DI) on a steel is based on the original work of M. A. Grossman and provides increased accuracy by refinement of the carbon multiplying factors and the correlation of a boron factor (B.F.) with carbon and alloy content. These refinements were based on analysis of thousands of heats of boron and non-boron 1500, 4100, 5000, and 8600 series steels encompassing a range of compositions as follows and a range of DI as contained in Tables 2-5. The accuracy of this test method and the techniques used to develop it have been documented. For comparison of this test method to others, or for steel compositions outside the mentioned grades, the user should refer to other articles concerned with calculating hardenability.

Element	Range, %
Carbon	0.10–0.70
Manganese	0.50–1.65
Silicon	0.15–0.60
Chromium	1.35 max
Nickel	1.50 max
Molybdenum	0.55 max

10.2 Tables 2-18 are to be used to calculate hardenability from the chemical ideal diameter for the grades shown in 10.1. Hardenability results are to be reported for the first 10 sixteenth (16 mm), the 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, and 32 sixteenths of an inch.

NOTE 5—The reporting of hardenability using the calculated method differs from the procedure as shown in 6.4.4

³ Standard ASTM Hardenability Charts (8½ by 11 in. pads of 50 charts) are available from ASTM International Headquarters, 100 Barr Harbor Drive, P.O. Box C700, W. Conshohocken, PA 19428. Request Adjunct ADJA0255.

10.3 *DI Calculation for Non-Boron Steels*—This calculation relies on a series of hardenability factors (Table 6) for each alloying element in the composition which, when multiplied together, gives a DI value. (For simplicity, only multiplying factors for DI in inch–pound units are given. For DI in millimetres, use the metric value table.) The effects of phosphorous and sulfur are not considered since they tend to cancel one another. A No. 7 austenitic grain size is assumed since most steels with hardenability control are melted to a fine-grain practice where experience has demonstrated that a high percentage of heats conform to this grain size. An example DI calculation is given as follows for an SAE 4118 modified steel:

Element	%	Multiplying Factor
Carbon	0.22	0.119
Manganese	0.80	3.667
Silicon	0.18	1.126
Nickel	0.10	1.036
Chromium	0.43	1.929
Molybdenum	0.25	1.750
Copper	0.10	1.040

where:

$$DI = 0.119 \times 3.667 \times 1.126 \times 1.036 \times 1.929 \times 1.75 \times 1.04 \times = 1.79 \text{ in.}$$

10.4 *DI Calculation for Boron Steels*—With an effective steel making process, the boron factor (signifying the contribution for boron to increased hardenability) is an inverse function of the carbon and alloy content. The higher the carbon or alloy content, or both, the lower the boron factor.

10.4.1 The actual boron factor is expressed by the following relationship:

$$B.F. = \frac{\text{measured DI (from Jominy data and carbon content)}}{\text{calculated DI (from composition excluding boron)}} \quad (1)$$

10.4.2 An example of actual boron factor determination is given as follows for an SAE 15B30 modified steel:

Composition, %	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	B	Calculated DI (boron ex- cluded) 1.24 in.
	0.29	1.25	0.20	0.13	0.07	0.03	0.0015	
End-Quench Test Results, in.								
“J” Position ($\frac{1}{16}$ in.)	1	2	3	4	5	6	7	
Hardness, HRC	50	50	49	48	47	45	41	
“J” Position ($\frac{1}{16}$ in.)	8	9	10	12	14	16		
Hardness, HRC	38	33	28	25	22	20		

10.4.3 Using Table 7, determine the nearest location on the end-quench curve where hardness corresponding to 50% martensite occurs for the actual carbon content. For the example heat with 0.29 carbon, this hardness is 37 HRC occurring at a “J” distance of $\frac{5}{16}$ in. from the quenched end (interpolation required).

10.4.4 From Table 8 (in.), a “J” distance of $\frac{1}{16}$ in. equates to a measured DI of 2.97 in. (interpolation required).

$$\text{Boron factor} = \frac{2.97 \text{ in.}}{1.24 \text{ in.}} = 2.4 \text{ boron factor} \quad (2)$$

10.4.5 *Calculation of DI with Boron (DI_B):*

10.4.5.1 Calculate the DI without boron. For the example in 10.4.4, this DI is 1.24 in.

10.4.5.2 Calculate the alloy factor (the product of all the multiplying factors from Table 6 excluding carbon). For the example in 10.4.4:


A 255 – 02

$$\text{Alloy factor} = \frac{\text{Calculated DI (without boron)}}{\text{Carbon multiplying factor}} = \frac{1.24 \text{ in.}}{0.157 \text{ in.}} = 8 \quad (3)$$

10.4.5.3 Determine the boron multiplying factor from Table 10. For this example with 0.29% carbon and an alloy factor of 8, the boron multiplying factor is 2.36 (interpolation required).

10.4.6 Calculate the DI with boron as follows:

where:

$$DI_B = \text{DI (without boron)} \times \text{boron factor}$$

$$DI_B = 1.24 \text{ in.} \times 2.36$$

$$DI_B = 2.93 \text{ in.}$$

10.5 *Hardenability Curves from Composition*—With a pre-determined DI (DI_B for boron steel), the end-quench hardenability curve can be computed by the following procedure:

10.5.1 The initial hardness (IH) at the $J = 1/16$ in. position is a function of carbon content and independent of hardenability and is selected from Table 7. For the example non-boron SAE 4118 modified heat containing 0.22 % carbon, the initial hardness is 45 HRC.

10.5.2 The hardness at other positions along the end-quench specimen (termed distance hardness) is determined by dividing the initial hardness by the appropriate factor from Table 2 (in.) or Table 3 (mm) for non-boron steels or from Table 4 (in.) or Table 5 (mm) for boron steels.

10.6 For the example non-boron heat with an IH = 45 HRC and a calculated DI of 1.79 in., the hardness at the respective end-quench positions can be calculated by dividing 45 by the appropriate dividing factor listed in Table 2 (in.) for non-boron steels. (For simplicity, the DI should be rounded to the nearest 0.1 in.).

10.7 *Equations for Tables 2-10*—Equations representing a least squares polynomial fit of the data contained in Tables 2-10 are listed in Tables 7-6. The use of these equations to plot curves may result in random inflection points due to the characteristics of polynomial equations. These inflections will be minor, however, and should be disregarded.

11. Keywords

11.1 end-quench hardenability; hardenability