



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Μελέτη ανοπτημένου άξονα πλοίου με μαγνητικές μη-
καταστροφικές τεχνικές**

Άγγελος Β. Τσούτσιας

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή ΕΜΠ κ. Ευάγγελου Χριστοφόρου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την βοήθεια του κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους τόσο στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας όσο και στο εργαστήριο Συγκολλήσεων, για την βοήθεια τους και το ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που δημιουργούσαν. Τέλος, ξεχωριστή αναφορά θα πρέπει να γίνει στην υποψήφια διδάκτορα κ. Ξένια Βουρνά, καθώς χωρίς την πολύτιμη βοήθεια της θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η μελέτη ανοπτημένου, κυλινδρικής συμμετρίας ναυπηγικού χάλυβα, τύπου Grade EN 9 με μη καταστροφικές μαγνητικές μεθόδους. Ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα βρίσκει εφαρμογή σε άξονες πλοίου. Για το σκοπό αυτό, από το αρχικό υλικό αποκόπηκαν όμοια δοκίμια, τα οποία ανοπτήθηκαν σε ένα εύρος θερμοκρασιών και είτε αποψύχθηκαν στον αέρα είτε υπέστησαν βαφή στο λάδι ή το νερό. Τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια χαρακτηρίστηκαν μεταλλογραφικά και μελετήθηκε η μαγνητική απόκριση των βρόχων υστέρησης και της μαγνητικής διαπερατότητας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια:

Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας πραγματοποιείται μια θεωρητική αναφορά στους χάλυβες και τα είδη τους. Συγκεκριμένα, περιγράφονται οι κατηγορίες του χάλυβα ως προς το φάσμα των εφαρμογών τους και ως προς τη χημική τους σύσταση. Στην τελευταία κατηγορία περιγράφονται εκτενώς οι τύποι του χάλυβα ως προς την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα, ενώ πραγματοποιείται ξεχωριστή ιστορική αναφορά στους ναυπηγικούς χάλυβες παραθέτοντας στοιχεία για την κατάταξή τους με βάση τον αμερικανικό νηογνώμονα και την επίδραση των κραματικών στοιχείων σε αυτούς.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα δείγματα που παρελήφθησαν (διαστάσεις, χημική σύσταση), παρουσιάζονται οι θερμικές κατεργασίες ανόπτησης και βαφής που ακολουθήθηκαν και τέλος αναλύονται οι πειραματικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για το μη-καταστροφικό έλεγχο και τον μεταλλογραφικό - μικροδομικό χαρακτηρισμό των ανοπτημένων δειγμάτων.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα οι ελάχιστονες βρόχοι υστέρησης που μετρήθηκαν, οι μαγνητικές μετρήσεις της διαφορικής και της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας, ο μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, η χημική μικροανάλυση μέσω της τεχνικής EDS, το ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X και οι τιμές της μικροσκληρότητας.

Στο 4^ο κεφάλαιο εξάγουμε τα συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και τέλος στο 5^ο προτείνεται η περαιτέρω έρευνα που μπορεί να πραγματοποιηθεί στο παρόν θέμα.

ABSTRACT

The aim of the present dissertation was the non-destructive examination of annealed steels, which were extensively used as ship's axis. The received sample was a cylindrical carbon steel and its grade was EN 9. Smaller and similar specimens were cut from the received sample, annealed in pre-defined temperature and finally, they were cooled in the air, in oil or in water. All the annealed samples were evaluated non-destructively, by using two magnetic techniques: the measurement of the differential magnetic permeability and the measurement of the surface magnetic permeability. Finally, for the microstructural characterization of the samples, specimens were cut and observed under the scanning electron microscope.

The present dissertation is organized in fifth chapters:

In the first chapter, a brief introduction of steels' categorizes was given, according to their applications and chemical composition. Additionally, this chapter include a literature review of the shipping steels pertaining to their chemical composition and alloying elements according to the American Bureau of Shipping (ABS).

In the second chapter, the dimensions and the chemical composition of the received sample were given. Moreover, the annealing and the quenching conditions of the thermal treatment were described. Finally, the experimental methods, which were used both for the magnetic non-destructive evaluation and the metallographic characterization, were analyzed.

In the third chapter, the experimental results were presented, including the minor hysteresis loops, the measurements of the differential and surface magnetic permeability's loops, the microstructural characterization by using scanning electron microscope, the chemical microanalysis by using energy dispersive spectroscopy and the results from the microhardness testing.

In the fourth chapter, the conclusions extracted from the present study were discussed. Finally, suggestions for further work were outlined.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	II
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	IV
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	V
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	VIII
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ	11
1.1 Γενικά για τους χάλυβες	11
1.2 Διάκριση χαλύβων	11
1.2.1 Ως προς τη χημική τους σύσταση.....	11
1.2.2 Ως προς τον προορισμό τους.....	12
1.2.3 Ως προς τις εφαρμογές τους	12
1.2.4 Ως προς την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (C)	12
1.3 Φάσεις και μικροδομικά συστατικά που εμφανίζονται στο διάγραμμα ισορροπίας Fe - Fe ₃ C.....	14
1.3.1 Φερρίτης	14
1.3.2 Ωστενίτης (γ-φάση, γ-Fe).....	15
1.3.3 Σεμεντίτης (Fe ₃ C).....	17
1.3.4 Λεδεμβρουρίτης (ωστενίτητος + σεμεντίτης, γ-Fe + Fe ₃ C).....	18
1.3.5 Περλίτης (φερρίτης + σεμεντίτης, α-Fe + Fe ₃ C)	18
1.3.6 Μαρτενσίτης (martensite).....	21

1.3.7 Μπαινίτης (Bainite)	22
1.4 Ναυπηγικοί Χάλυβες	24
1.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά	24
1.4.2 Κραματικά στοιχεία των ναυπηγικών χάλυβων.....	24
1.4.3 Ιστορική αναδρομή των ναυπηγικών χάλυβων	25
1.4.4 Κατάταξη ναυπηγικών χάλυβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα.	27
1.4.5 Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες	28
1.5 Μαγνητική συμπεριφορά των ναυπηγικών χάλυβων	29
1.6 Αναφορές	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Μεθοδολογία.....	33
2.3 Διαστασιολογία δειγμάτων	33
2.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη	33
2.3.2 Θερμική κατεργασία.....	34
2.4 Μη-καταστροφικός έλεγχος.....	36
2.5 Μεταλλογραφικός - Μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων.....	42
2.5.1 Προετοιμασία δειγμάτων.....	42
2.5.2 Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού	44
2.6 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων.....	45
2.6.1 Δοκιμές μικροσκληρότητας.....	45
2.7 Αναφορές	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	47
3.1 Εισαγωγή	47
3.2 Μη-καταστροφικός έλεγχος.....	47
3.2.1 Μαγνητικές μετρήσεις του βρόχου υστέρησης	47

3.2.2	Μαγνητικές μετρήσεις της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας.....	51
3.2.3	Μαγνητικές μετρήσεις της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας	53
3.2.4	Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)	55
3.2.5	Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy).....	58
3.2.6	Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction).....	61
3.2.7	Μικρο-σκληρομέτρησης.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		63
4.1	Εισαγωγή	Error! Bookmark not defined.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....		66

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Διμερές, μετασταθές διάγραμμα φάσεων Fe – Fe ₃ C.	13
Εικόνα 1-2: (a) Τυπική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτόχρωμες περιοχές), (b) κυβικό χωροκεντρομένο (BCC) κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και το άτομο το ανθρακα παρουσιάζεται ως κόκκινη σφαίρα στο κέντρο του κύβου.	14
Εικόνα 1-3: Παρουσία βήτα-φερρίτη (β-Fe) πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A ₂ (θερμοκρασία Curie). Ο α-Fe είναι φερρομαγνητικός ενώ ο β-Fe είναι παραμαγνητικός, όπως και ο γ-Fe.	15
Εικόνα 1-4: (a) Τυπική μικροδομή ωστενίτη, (b) κυβικό ενδοκεντρωμένο (FCC) κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και τα άτομα του ανθρακα παρουσιάζονται ως κόκκινες σφαίρες στο κέντρο των εδρών του κύβου.	17
Εικόνα 1-5: Ορθορομβικό σύστημα στο οποίο κρυσταλλώνεται ο σεμεντίτης.	17
Εικόνα 1-6: Διαφορετικές μορφολογίες του σεμεντίτη. (α) Πλακοειδής σεμεντίτης και (β) σφαιροποιημένος σεμεντίτης.	18
Εικόνα 1-7: Τυπική μικροδομή του περλίτη.	20
Εικόνα 1-8: Σχηματισμός περλίτη (pearlite), ανώτερου (upper) και κατώτερου (lower) μπαινίτη.	24
Εικόνα 0-1: Βρόγχος υστέρησης της μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής (magnetic induction B) με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (magnetic field, H) σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Η κυκλική μαγνήτιση και απομαγνήτιση, μέχρι τη μαγνήτιση κορεσμού (magnetic saturation), οδηγεί στη χάραξη του βρόχου υστέρησης (hysteresis loop). Η καμπύλη OA είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης (virgin curve).	31
Εικόνα 0-2: Βρόγχος υστέρησης μαγνητικά (α) μαλακού και (β) σκληρού υλικού.	32
Εικόνα 2-1: Δείγμα αναφοράς άξονα πλοίου.	33
Εικόνα 0-3: Διαγράμματα ισοθερμοκρασιακής ανόπτησης στα οποία παρουσιάζεται οι ρυθμοί απόψυξης, (α) στον αέρα, (β) στο λάδι, (γ) στο νερό.	35
Εικόνα 2-3: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.	36
Εικόνα 2-4: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.	37
Εικόνα 0-4 : Το (α) πηνίο διέγερσης και (β) πηνίο λήψης που κατασκευάστηκε με στόχο τη μέτρηση των μαγνητικών βρόχων υστέρησης του αρχικού δείγματος και των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων.	38

Εικόνα 2-6: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.....	39
Εικόνα 2-7: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου.....	39
Εικόνα 2-8: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου.....	40
Εικόνα 2-9: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.....	40
Εικόνα 2-10: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.....	41
Εικόνα 0-5: (α) Πλαϊνή όψη και (β) άνοψη του μαγνητικού αισθητήρα, ο οποίος προσδιορίζει την επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα.....	42
Εικόνα 2-12: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV...	44
Εικόνα 2-13: Περιθλασίμετρο ακτίνων Χ σάρωσης (SEM) τύπου Brucker D8 Focus....	45
Εικόνα 0-6 : Ελάσσονες βρόχων υστέρησης των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων στους (α) 500 °C, (β) 600 °C και (γ) 700 °C, ως συνάρτηση του ρυθμού απόψυξης, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία ανόπτησης.....	48
Εικόνα 0-7 : Ελάσσονες βρόχοι υστέρησης των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων στον (α) αέρα, (β) λάδι και (γ) νερό, για διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης, διατηρώντας σταθερό το μέσο.....	49
Εικόνα 0-8: Υπέρθωση βρόχων διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου πεδίου για τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια.....	52
Εικόνα 0-9: Χρονικά μεταβαλλόμενη επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα για τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια.....	54
Εικόνα 3-5: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από ...	55
Εικόνα 3-6: Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την επιφάνεια.	56
Εικόνα 0-10: Αποτελέσματα σημειακής χημικής μικροανάλυσης για τα θερμικά κατεργασμένα δείγματα.....	61
Εικόνα 3-8 : Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας του μετάλλου βάσης και ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης.	62
Εικόνα 4-1 : Μαγνητική διαπερατότητα σε σύγκριση με το ρυθμό απόψυξης (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία ανόπτησης).....	64
Εικόνα 4-2 : Μαγνητική διαπερατότητα σε σύγκριση με τη θερμοκρασία ανόπτησης (διατηρώντας σταθερό το ρυθμό απόψυξης).....	66

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Ταξινόμηση ναυπηγικών χαλύβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα.....	27
Πίνακας 1-2 Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων.....	28
Πίνακας 1-3: Επίδραση κραματικών στοιχείων στους χάλυβες.....	29
Πίνακας 2-1: Διαστάσεις του αρχικού δείγματος που παρελήφθη.	33
Πίνακας 0-1 : Παράμετροι ισοθερμοκρασιακών κατεργασιών (θερμοκρασία ανόπτησης και χρόνος παραμονής) καθώς και μέσου απόψυξης των δοκιμίων.....	35
Πίνακας 0-2: Χημική σύσταση του Carbon Steel Grade EN 9.....	58
Πίνακας 3-2: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.....	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

1.1 Γενικά για τους χάλυβες

Οι χάλυβες αποτελούν σύγχρονα βιομηχανικά σιδηρούχα κράματα που βρίσκουν ευρείες εφαρμογές στη σύγχρονη τεχνολογία των κατασκευών. Συγκεκριμένα, συνιστούν κράματα Fe-C με περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) μικρότερη ή ίση του 1,5% κ.β. Η μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα τους προσδίδει ικανοποιητική δυσθραυστότητα και συγκολλησιμότητα. Αντίθετα, σε χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C) είναι πολύ πιθανό να σχηματιστεί μαρτενσίτης κατά τη συγκόλλησή τους. Η φάση αυτή του χάλυβα είναι ανεπιθύμητη στις κατασκευές, λόγω της ευθραυστότητάς της.

Ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, οι χάλυβες περιέχουν, σε μικρές ποσότητες, και άλλα στοιχεία κραμάτωσης (προσμίξεις), τα οποία τροποποιούν τις φυσικοχημικές και τις μηχανικές ιδιότητές τους. Οι προσμίξεις αυτές είτε προστίθενται ως συστατικά βελτίωσης των ιδιοτήτων του χάλυβα, είτε ως αποξειδωτικό κατά την παραγωγική διαδικασία, είτε, τέλος, εμφανίζονται ως ακαθαρσίες στα τελικό κράμα [1-6].

1.2 Διάκριση χαλύβων

1.2.1 Ως προς τη χημική τους σύσταση

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

1. Κοινούς ή ανθρακούχους χάλυβες (carbon steels ή mild steels): Περιέχουν μικρό ποσοστό Mn καθώς επίσης και ακαθαρσίες (0,04% P και 0,05% S). Χαρακτηρίζονται από μικρή αντοχή σε μηχανική φθορά και διάβρωση, από μικρή εμβαπτότητα και ανεπαρκή δυσθραυστότητα ή ολκιμότητα.
2. Κραματωμένους ή ειδικούς χάλυβες (alloyed steels): Περιέχουν ως κραματικά στοιχεία τα Ni, Mn, Cr, Si, Mo, ενώ ως δευτερεύοντα τα V, W, Cu, Ti, Al, B, Pb, Nb.

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

1. Ελαφρά κραματωμένους (low alloyed steels), όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μικρότερο του 2%.
2. Μέτρια κραματωμένους (medium alloyed steels), με ποσοστό στοιχείων

προσθήκης από 2% έως 10%.

3. Ισχυρά κραματωμένους (high alloyed steels), όπου το ποσοστό των στοιχείων προσθήκης είναι μεγαλύτερο του 10%.

1.2.2 Ως προς τον προορισμό τους

Ως προς τον προορισμό τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

1. Χάλυβες διαμόρφωσης και
2. Χυτοχάλυβες

1.2.3 Ως προς τις εφαρμογές τους

Ως προς τις χρήσεις τους οι χάλυβες διακρίνονται σε:

1. Χάλυβες κατασκευών (υποευτηκτοειδείς, νικελιούχοι, νικελιοχρωμιούχοι, χρωμιούχοι, χρωμιομολυβδαινιούχοι, χρωμιοβαναδιούχοι, μαγγανιοπυριτιούχοι, χάλυβες μαρτενγήρανσης, διφασικοί φερριτομαρτενσιτικοί).
2. Εργαλειοχάλυβες (χάλυβες αντοχής σε φθορά από τριβή, καλής δυθραυστότητας, καλής εμβαπτότητας, αντοχής σε επαναφορά) όπως π.χ. κοπτικά εργαλεία, μήτρες διαμόρφωσης, έμβολα διέλασης, ράουλα έλασης. Η χρήση γίνεται πάντοτε μετά από θερμική κατεργασία βαφής-επαναφοράς (επιβελτίωση).
3. Ανοξειδωτους ή πυρίμαχους χάλυβες και
4. Χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών (μαγνητικά μαλακοί χάλυβες, μαγνητικά σκληροί χάλυβες, μη μαγνητικοί χάλυβες).

1.2.4 Ως προς την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (C)

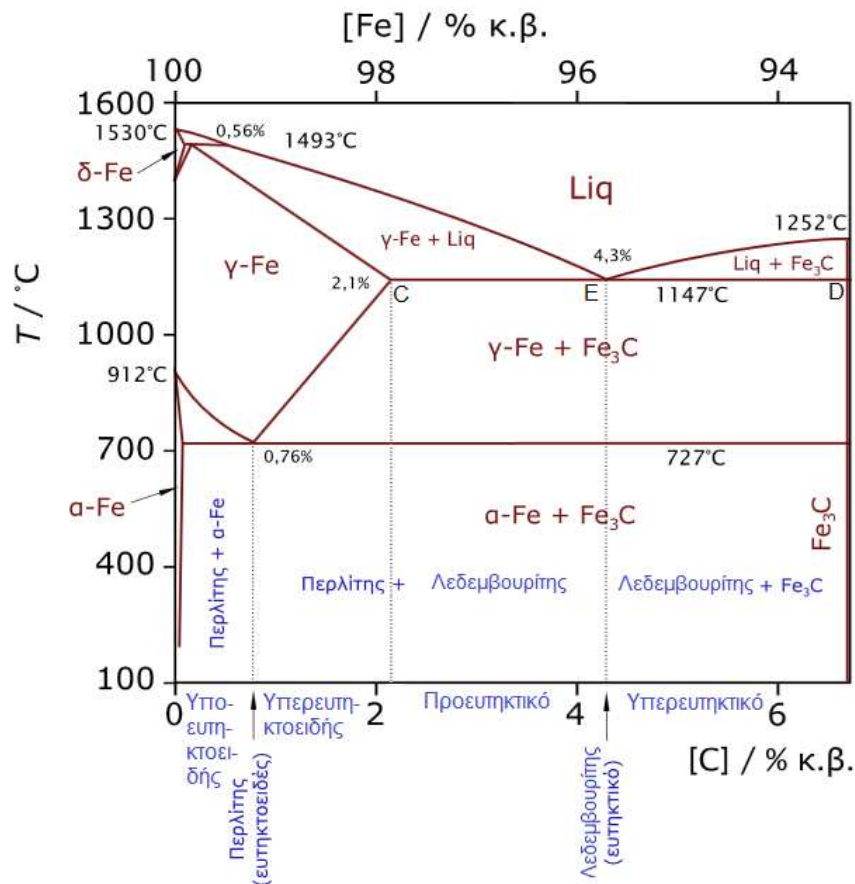
Σύμφωνα με το μετασταθές διάγραμμα φάσεων σιδήρου - άνθρακα (Fe - C), που παρουσιάζεται στην εικόνα 2-1, τα τεχνικά κράματα Fe - C διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε C. Τα κράματα αυτά έχουν μεγάλο βιομηχανικό ενδιαφέρον και οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Σίδηροι, με ποσοστό άνθρακα 0-0,002%
2. Χάλυβες, με ποσοστό άνθρακα από 0.02-2%
3. Χυτοσίδηροι, ποσοστό άνθρακα από 2-5%

Οι χάλυβες περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου - σεμεντίτη (Fe - Fe₃C), με το οποίο καθίστανται γνωστά τα μικρογραφικά στοιχεία του χάλυβα σε σχέση

με την περιεκτικότητά που έχει σε C, αλλά και τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησής τους (εικόνα 1-1).

Το διάγραμμα δεν είναι ευσταθές γιατί ο σεμεντίτης (Fe_3C) που σχηματίζεται αποτελεί μια μετασταθή ένωση. Αυτό σημαίνει ότι το διάγραμμα, που απεικονίζεται στην εικόνα 1-1, δεν αποτελεί ένα διάγραμμα ισορροπίας. Ωστόσο, λόγω του αργού ρυθμού μετασχηματισμού του σεμεντίτη (Fe_3C) στη θερμοκρασία δωματίου, το καρβίδιο του σιδήρου δεν θα μετασχηματιστεί σε σίδηρο και γραφίτη. Αυτός είναι και ο λόγος που το διάγραμμα Fe - Fe_3C είναι αυτό που ισχύει πρακτικά [1-6].



Εικόνα 1-1: Διμερές, μετασταθές διάγραμμα φάσεων Fe - Fe_3C .

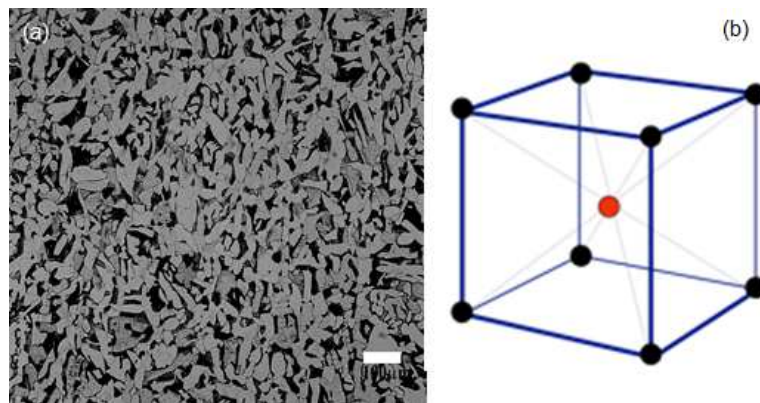
Γίνεται αντιληπτό, ότι ο άνθρακας στους χάλυβες δε βρίσκεται ελεύθερος με τη μορφή γραφίτη, αλλά είτε βρίσκεται στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου, σχηματίζοντας στερεό διάλυμα παρεμβολής, είτε σχηματίζει με το σίδηρο μια χημική ένωση, το καρβίδιο του σιδήρου ή σεμεντίτης (Fe_3C) [1-6].

1.3 Φάσεις και μικροδομικά συστατικά που εμφανίζονται στο διάγραμμα ισορροπίας Fe - Fe₃C.

1.3.1 Φερρίτης

1.3.1.1 Φερρίτης ή α- Fe

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρωμένο σύστημα (body-centered cubic, BCC). Επειδή η κυβική ενδοκεντρωμένη δομή είναι λιγότερο πυκνή, η διαλυτότητα του άνθρακα είναι χαμηλή. Η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στην α-φάση του φερρίτη είναι 0,02 % στους 723 °C. Με τη μείωση της θερμοκρασίας, μειώνεται παράλληλα και η διαλυτότητα του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη, φτάνοντας το 0,008 % στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στους 0 °C η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα φτάνει το 0.005 %. Στον καθαρό σίδηρο, ο φερρίτης είναι θερμοδυναμικά σταθερός κάτω από τους 910 °C.



Εικόνα 1-2: (a) Τυπική μικροδομή φερρίτη (ανοιχτόχρωμες περιοχές), (b) κυβικό χωροκεντρωμένο (BCC) κρυσταλλικό πλέγμα του φερρίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και το άτομο το άνθρακα παρουσιάζεται ως κόκκινη σφαίρα στο κέντρο του κύβου).

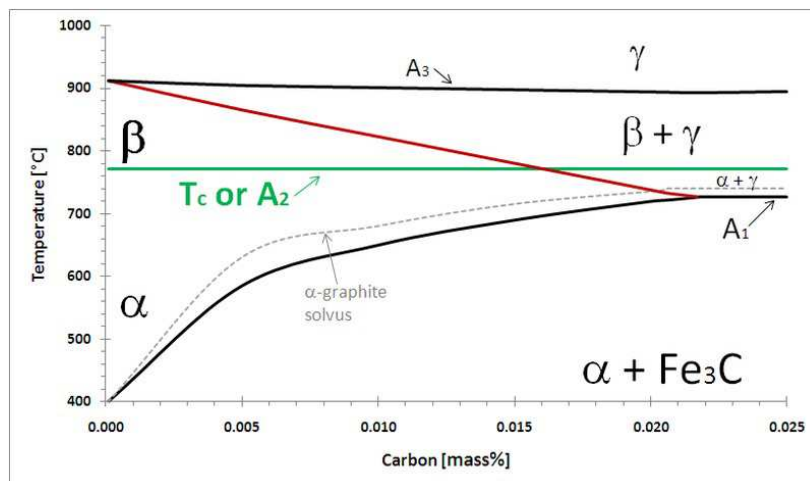
Κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία (A₂), τη θερμοκρασία Curie (771 °C), ο φερρίτης παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά. Συνεπώς, η παρουσία του φερρίτη προσδίδει στο χάλυβα και το χυτοσίδηρο (cast iron) τις μαγνητικές του ιδιότητες, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται ως σιδηρομαγνητικό υλικό [1-6].

Για αυτό το λόγο, οι εργαλιοχάλυβες (tool steels), πάνω από τη θερμοκρασία σκλήρωσης, όπου ο φερρίτης μετασχηματίζεται σε ωστενίτη (austenite, γ-Fe), καθίστανται μη-μαγνητικοί. Οι περισσότεροι μαλακοί ανθρακοχάλυβες με ποσοστό άνθρακα έως περίπου 0,2% κ.β. ή αλλιώς μαλακοί χάλυβες (mild steels) περιέχουν φερρίτη και σεμεντίτη (cementite, Fe₃C) σχηματίζοντας μια σύνθετη δομή που ονομάζεται περλίτης (pearlite, α+Fe₃C). Η ποσοστιαία συμμετοχή του περλίτη στους μαλακούς χάλυβες, αυξάνεται με

την αύξηση της κατά βάρος περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα. Τέλος, οποιοδήποτε κράμα σιδήρου-άνθρακα χαρακτηριζόμενο μικροδομικά από κάποιο ποσοστό φερρίτη μπορεί να είναι θερμοδυναμικά ευσταθές σε θερμοκρασία δωματίου [1-6].

Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_2 και έως τους $910\text{ }^\circ\text{C}$, ο φερρίτης είναι παραμαγνητικός (χάνει δηλ. τις μαγνητικές του ιδιότητες) αλλά διατηρείται θερμοδυναμικά ευσταθής και χαρακτηρίζεται ως βήτα φερρίτης ($\beta\text{-Fe}$). Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται σπάνια καθώς ταυτίζεται κρυσταλλογραφικά και είναι ταυτόσημος με τη γειτνιάζουσα φάση του $\alpha\text{-Fe}$ [1-6].

Η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 70 HV έως 200 HV ενώ το όριο εφελκυστικής τάσης (strength) είναι 280 N/mm^2 (280 Mpa) [2].



Εικόνα 1-3: Παρουσία βήτα-φερρίτη ($\beta\text{-Fe}$) πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία A_2 (θερμοκρασία Curie). Ο $\alpha\text{-Fe}$ είναι φερρομαγνητικός ενώ ο $\beta\text{-Fe}$ είναι παραμαγνητικός, όπως και ο $\gamma\text{-Fe}$.

1.3.1.2 δ -φερρίτης ή $\delta\text{-Fe}$

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό χωροκεντρωμένο (body-centered cubic, BCC) σύστημα. Αποτελεί μια ευσταθή φάση του σιδήρου από τους $1390\text{ }^\circ\text{C}$ έως τη θερμοκρασία τήξης ($1539\text{ }^\circ\text{C}$). Η μέγιστη διαλυτότητα του άνθρακα στη δ -φάση του φερρίτη είναι 0.1% κ.β. στους $1492\text{ }^\circ\text{C}$ [1-6].

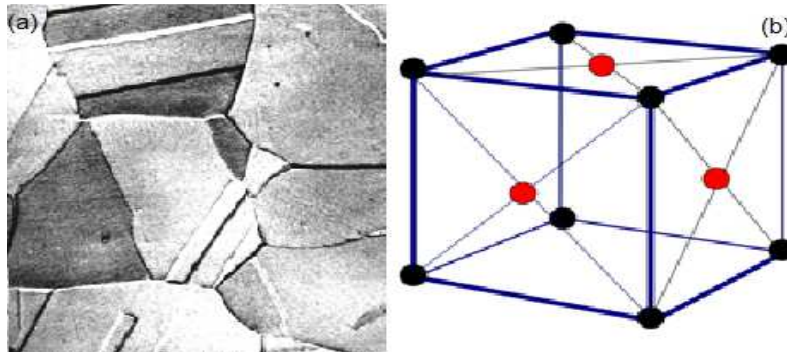
1.3.2 Ωστενίτης (γ -φάση, $\gamma\text{-Fe}$).

Στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα, το οποίο κρυσταλλώνεται στο κυβικό εδροκεντρωμένο (face-centred cubic, FCC) σύστημα. Το άτομο του C καταλαμβάνει τις πυκνές οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής στην κρυσταλλική κυψελίδα του FCC πλέγματος. Η πυκνή κυβική ενδοκεντρωμένη δομή επιτρέπει την αυξημένη διαλυτότητα του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη (austenite) συγκριτικά με το φερρίτη. Η μέγιστη

διαλυτότητα του άνθρακα στον ωστενίτη είναι 0.8 % κ.β. στους 723 °C, ενώ καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται φτάνει το 2,00 % κ.β. στους 1148 °C. Ο ωστενίτης είναι μη-μαγνητικός (παραμαγνητικό) και θερμοδυναμικά ευσταθής σε ένα θερμοκρασιακό εύρος από τους 910 °C έως τους 1400 °C. Έτσι, για παράδειγμα, στους χάλυβες με περιεκτικότητα άνθρακα 0.8 % κ.β., ο άνθρακας που περιέχεται στο φερρίτη και το σεμεντίτη, διαλύεται πιο εύκολα στον ωστενίτη πάνω από μια κρίσιμη θερμοκρασία [1-6].

Κατά την απόψυξη του ωστενίτη, η φάση αυτή είτε μετασχηματίζεται σε φερρίτη και σεμεντίτη, σχηματίζοντας περλιτικές ή μπαινιτικές δομές, είτε το πλέγμα υφίσταται μια μικρή παραμόρφωση οδηγώντας σε μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Το κριτήριο που καθορίζει ποιος από τους παραπάνω μετασχηματισμούς θα πραγματοποιηθεί είναι ο ρυθμός απόψυξης από την ωστενιτική φάση και η περιεκτικότητα σε άνθρακα. Κατ' επέκταση ο ρυθμός απόψυξης καθορίζει την ποσοστιαία συμμετοχή της κάθε φάσης ή του κάθε μικροδομικού συστατικού στον τελικό μικροδομικό ιστό καθώς επίσης και τις τελικές μηχανικές ιδιότητες (π.χ. σκληρότητα, αντοχή σε εφελκυσμό) του χάλυβα [1-6].

Για παράδειγμα, με βραδείς ρυθμούς απόψυξης, σχηματίζεται φερρίτης, περλίτης και σεμεντίτης, με σχετικά υψηλό ρυθμό ψύξης, σχηματίζεται μπαινίτης, ενώ ο ταχύτερος ρυθμός απόψυξης (βαφή του χάλυβα, quenching) από την ωστενιτική περιοχή, οδηγεί στο σχηματισμό μαρτενσίτη (μαρτενσιτικό μετασχηματισμό). Επειδή ο σχηματιζόμενος μαρτενσίτης είναι ιδιαίτερα ψαθυρή φάση του χάλυβα και μάλιστα εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας, απαιτείται περεταίρω θερμική του κατεργασία (επαναφορά, tempering) που οδηγεί στο σχηματισμό παραμένων μαρτενσίτη και επαναφερμένο ωστενίτη (retained austenite). Αυτή είναι η πιο κοινή θερμική κατεργασία που λαμβάνει χώρα στους χάλυβες υψηλών επιδόσεων (high-performance steels). Επίσης, στους μικροκραματωμένους χάλυβες (low-alloy steels), η ωστενιτική φάση σταθεροποιείται με την προσθήκη κραματικών στοιχείων όπως το μαγγάνιο και το νικέλιο. Με αυτό τον τρόπο, διευκολύνεται η θερμική κατεργασία των χαλύβων αυτών. Στην περίπτωση των ωστενιτικών ανοξειδωτών χαλύβων (austenitic stainless steels), η υψηλή κραμάτωση τους με γ-φερρογόνα κραματικά στοιχεία, οδηγεί στη σταθεροποίηση του ωστενίτη φάσης σε θερμοκρασίες δωματίου. Αντίθετα, η προσθήκη πυρίτιου, μολυβδαίνιου και χρώμιου, αποσταθεροποιούν την ωστενιτική φάση, αυξάνοντας την ευτηκτική θερμοκρασία (η θερμοκρασία στην οποία ο φερρίτης και ο σεμεντίτης μετασχηματίζονται σε ωστενίτη) [1-6].

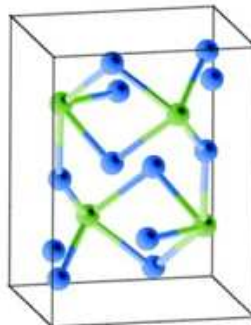


Εικόνα 1-4: (α) Τυπική μικροδομή ωστενίτη, (β) κυβικό ενδοκεντρωμένο (FCC) κρυσταλλικό πλέγμα του ωστενίτη (τα άτομα του σιδήρου παρουσιάζονται ως μαύρες σφαίρες στις ακμές του κύβου και τα άτομα του άνθρακα παρουσιάζονται ως κόκκινες σφαίρες στο κέντρο των εδρών του κύβου).

Ο ωστενίτης είναι όλκιμος και η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 250 HV έως 300 HV [8].

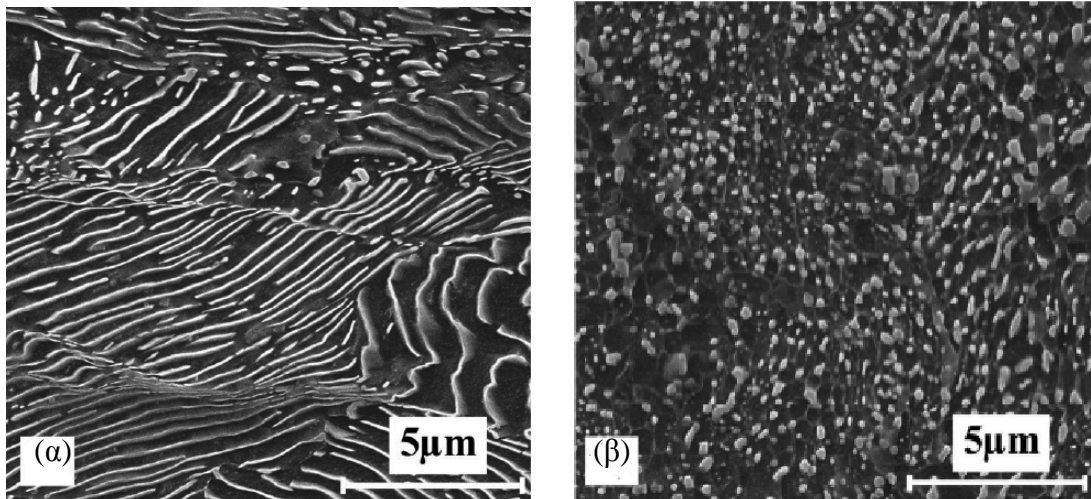
1.3.3 Σεμεντίτης (Fe_3C)

Πρόκειται για μεσομεταλλική ένωση παρεμβολής που κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό, σύστημα. Η σύσταση σε άνθρακα είναι απόλυτα καθορισμένη, σε ποσοστό ίσον προς 6,67% κ.β [1-6].



Εικόνα 1-5: Ορθορομβικό σύστημα στο οποίο κρυσταλλώνεται ο σεμεντίτης.

Στην περίπτωση των λευκών χυτοσιδήρων, σχηματίζεται κατά την διάρκεια της στερεοποίησης τους, ενώ στην περίπτωση των ανθρακούχων χαλύβων σχηματίζεται είτε κατά την απόψυξη του ωστενίτη, είτε κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη. Στους κοινούς ανθρακούχους υποευθηκτοειδείς χάλυβες ($\text{C} < 0,8 \%$ κ.β.), ο σεμεντίτης εμφανίζεται στην δομή του περλίτη ως σκουρόχρωμα φύλλα εναλλασσόμενα με ανοιχτόχρωμα φύλλα φερρίτη. Σε υπερευθηκτοειδείς χάλυβες παρουσιάζεται στον περλίτη αλλά σχηματίζει και ανεξάρτητους λευκούς φυλλοειδείς κόκκους [1-6].

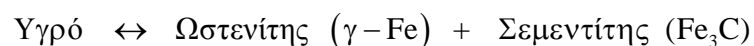


Εικόνα 1-6: Διαφορετικές μορφολογίες του σεμεντίτη. (α) Πλακοειδής σεμεντίτης και (β) σφαιροποιημένος σεμεντίτης.

Όπως οι περισσότερες μεσομεταλλικές ενώσεις, έτσι και το καρβίδιο του σιδήρου (σεμεντίτης - Fe_3C), είναι ένωση πολύ σκληρή και εύθραυστη. Η μηχανική σκληρότητα του κυμαίνεται από 850 HV έως 1100 HV [2].

1.3.4 Λεδεμβρουρίτης (ωστενίτη + σεμεντίτης, $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$)

Είναι μια σύνθετη ευτηκτική δομή φάσεων χαρακτηριζόμενη μορφολογικά από επάλληλα στρώματα (πλακίδια) ωστενίτη και σεμεντίτη. Παράγεται κατά την πήξη της υγρής φάσης του χάλυβα με περιεκτικότητα σε άνθρακα 4,3% κ.β., σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τους 1130°C (ευτηκτική αντίδραση). Η ευτηκτική αντίδραση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

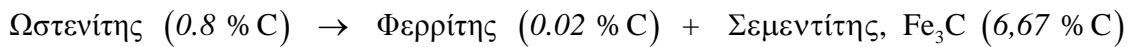


Δεν αποτελεί φάση, αλλά ευτηκτική δομή φάσεων (μικροδομικό συστατικό) και εμφανίζεται κυρίως κατά την στερεοποίηση των χυτοσιδήρων (κράματα σιδήρου-άνθρακα που περιέχουν περισσότερο από 2 % κ.β. άνθρακα). Οι χυτοσίδηροι που περιέχουν άνθρακα σε ποσοστό μικρότερο του 4,3% λέγονται υποευτηκτικοί ενώ αυτοί που περιέχουν περισσότερο από 4,3% άνθρακα λέγονται υπereυτηκτικοί [1-6].

1.3.5 Περλίτης (φερρίτης + σεμεντίτης, $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$)

Είναι μια σύνθετη ευτηκτοειδής δομή φάσεων χαρακτηριζόμενη μορφολογικά από επάλληλα στρώματα (πλακίδια) φερρίτη και σεμεντίτη. Ο περλίτης λοιπόν, δεν αποτελεί φάση, αλλά ευτηκτοειδή δομή φάσεων (μικροδομικό συστατικό) φερρίτη και σεμεντίτη [1-6].

Παράγεται κατά την πολύ αργή απόψυξη του ωστενίτη (ευτηκτοειδής μετασχηματισμός). Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε περλίτη λαμβάνει χώρα στους 723 °C και η αντίδραση παρίσταται ως εξής:



Ο περλιτικός μετασχηματισμός είναι ένας διαχυτικός μετασχηματισμός, που πραγματοποιείται με την ετερογενή πυρήνωση και ανάπτυξη του περλίτη στα όρια των ωστενιτικών κόκκων. Η περλιτική δομή είναι περιοδική και χαρακτηρίζεται από την ενδολαμελική απόσταση. Όσο πιο μικρή είναι η απόσταση των πλακιδίων, τόσο πιο λεπτόκοκκος είναι ο περλίτης και τόσο μεγαλύτερη η σκληρότητά του, λόγω των πολλών διαφασικών ορίων που παρεμποδίζουν την ολίσθηση των διαταραχών. Να σημειωθεί ότι όταν ο περλίτης σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες είναι λεπτόκοκκος. Να σημειωθεί ότι, η ανακατανομή του άνθρακα μεταξύ των διαφόρων φάσεων κατά την ψύξη του χάλυβα πραγματοποιείται με διάχυση. Όταν ο ρυθμός ψύξεως είναι ιδιαίτερα αργός, δίνεται ο απαραίτητος χρόνος για την διάχυση διατηρώντας τις συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας [1-6].

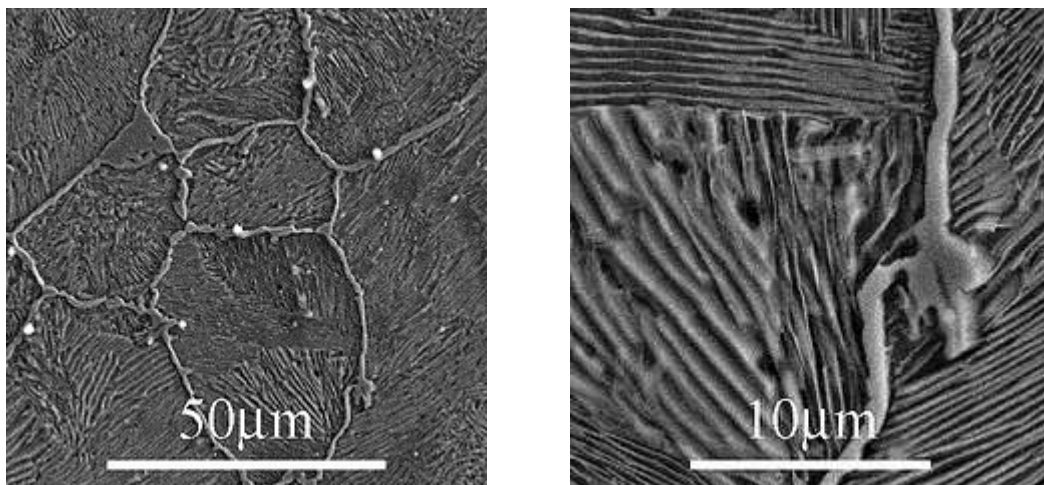
Οι χάλυβες που δεν περιέχουν κραματικά στοιχεία αντικαταστάσεως παρά μόνον άνθρακα ονομάζονται ανθρακοχάλυβες (carbon steels). Ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε άνθρακα οι χάλυβες αυτοί διακρίνονται σε ευτηκτοειδείς (όταν η σύστασή του σε άνθρακα είναι $C = 0.8 \% \text{ κ.β.}$), υποευτηκτοηδείς (όταν η σύσταση του σε άνθρακα είναι μικρότερη από την ευτηκτοειδή, δηλ. $\% C < 0.8 \% \text{ κ.β.}$) και υπερευτηκτοειδείς (όταν η σύσταση του σε άνθρακα είναι μεγαλύτερη από την ευτηκτοειδή, δηλ. $C > 0.8 \% \text{ κ.β.}$) [7-10].

Όταν ένας ευτηκτοειδής χάλυβας θερμανθεί στην ωστενιτική περιοχή και στη συνέχεια αποψυχθεί αργά, τότε η ευτηκτοειδής αντίδραση θα μετασχηματίσει τον ωστενίτη σε 100% περλίτη. Η πυρήνωση του φερρίτη ξεκινά από τα όρια των ωστενιτικών κόκκων και εξελίσσεται με τη μορφή παράλληλων πλακών φερρίτη και σεμεντίτη μέχρι ότου μετασχηματιστεί το 100% του ωστενίτη [7-10].

Κατά την αργή απόψυξη ενός υποευτηκτοειδούς χάλυβα, ένα ποσοστό του ωστενίτη μετασχηματίζεται σε φερρίτη κατά το πέρασμα από τη διαφασική περιοχή ($\alpha+\gamma$), ενώ ο υπόλοιπος ωστενίτης εμπλουτίζεται διαρκώς σε άνθρακα, λόγω της μεγάλης διαφοράς που εμφανίζει ο φερρίτης με τον ωστενίτη στη στερεά διαλυτότητα του άνθρακα. Όταν ο ωστενίτης αποκτήσει την ευτηκτοειδή σύσταση (0.8% C), η ευτηκτοειδής αντίδραση

μετασχηματίζει τον ωστενίτη σε περλίτη. Η κατάσταση δεν αλλάζει σημαντικά κατά την περαιτέρω ψύξη του χάλυβα στη θερμοκρασία δωματίου. Ο φερρίτης, που σχηματίζεται κατά την ψύξη ονομάζεται προευτηκτοειδής φερρίτης, γιατί προέρχεται από τη μερικό μετασχηματισμό του ωστενίτη, πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία. Έτσι οι υποευτηκτοειδείς χάλυβες αποτελούνται από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη, και η δομή τους ονομάζεται φερριτοπερλιτική [7-10].

Κατά την αργή απόψυξη ενός υπereυτηκτοειδή χάλυβα, ένα μέρος του αρχικού ωστενίτη θα μετασχηματιστεί σε σεμεντίτη, κατά το πέρασμα από τη διφασική περιοχή ($\alpha+\gamma$). Ο σεμεντίτης αυτός, πυρηνώνεται στα όρια των ωστενιτικών κόκκων αποσπώντας διαρκώς άτομα άνθρακα από τον ωστενίτη και επειδή σχηματίζεται πριν από την ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ονομάζεται προευτηκτοειδής σεμεντίτης. Έτσι η περιεκτικότητα του ωστενίτη σε άνθρακα μειώνεται τείνοντας προς την ευτηκτοειδή σύσταση (0.8% C). Στην ευτηκτοειδή θερμοκρασία, ο εναπομένον ωστενίτης μετασχηματίζεται σε περλίτη μέσω της ευτηκτοειδούς αντιδράσεως. Επομένως, ένας υπereυτηκτοειδής χάλυβας αποτελείται από κόκκους περλίτη, στα όρια των οποίων υπάρχει προευτηκτοειδής σεμεντίτης [7-10].



Εικόνα 1-7: Τυπική μικροδομή του περλίτη.

Η μηχανική σκληρότητά της περλιτικής δομής αυξάνεται όσο μειώνεται η απόσταση των πλακιδίων φερρίτη-σεμεντίτη. Η μηχανική σκληρότητά του κυμαίνεται από 250 HV έως 350 HV. Επειδή ο περλίτης περιέχει πολύ φερρίτη, είναι και αυτός όλκιμος αν και με μειωμένη όλκιμότητα και δυσθραυστότητα συγκριτικά με τον φερρίτη. Η μείωση της όλκιμότητας οφείλεται στη λειτουργία των διεπιφανειών α -Fe₃C ως θέσεις για πυρήνωση ρωγμών. Επίσης, στους απλούς ανθρακοχάλυβες, η αύξηση του άνθρακα (αύξηση του ποσοστού του περλίτη) οδηγεί σε αύξηση τόσο του ορίου διαρροής (σ_y) όσο και της

μέγιστης αντοχής εφελκυσμού (UTS). Η αύξηση του UTS στον περλίτη, του δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη εργοσκληρυνση (work-hardening) της περλιτικής δομής έναντι της φερριτικής δομής. Η μείωση της ολκιμότητας σε συνδυασμό με την αυξημένη εργοσκληρυνση περιορίζει την πλαστική παραμόρφωση στην αιχμή των ρωγμών [7-10].

1.3.6 Μαρτενσίτης (martensite)

Ο μαρτενσίτης είναι μετασταθής φάση του χάλυβα που σχηματίζεται κατά την ταχύτατη απόψυξη (βαφή) του ωστενίτη (γ -Fe). Θεωρείτε ένα υπέρκορο στερεό διάλυμα φερρίτη με άνθρακα. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός δεν είναι διαχυσιακός, καθώς τα άτομα του άνθρακα δεν προλαβαίνουν να μετακινηθούν από τις οκταεδρικές θέσεις του ωστενιτικού πλέγματος. Αυτό σημαίνει ότι ο άνθρακας καταλαμβάνει τις ίδιες θέσεις παρεμβολής στον ωστενίτη και στον μαρτενσίτη, με αποτέλεσμα το κυβικό εδροκεντρωμένο (FCC) πλέγμα του ωστενίτη να μετασχηματίζεται στο τετραγωνικό χωροκεντρωμένο (body centered tetragonal, BCT) πλέγμα του μαρτενσίτη, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ο άνθρακας [1-6].

Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής στο FCC πλέγμα του ωστενίτη προκαλεί συμμετρικές παραμορφώσεις του πλέγματος και κατ' επέκταση περιορισμένη ισχυροποίηση στερεού διαλύματος. Αντίθετα, η κατάληψη των ίδιων θέσεων στο BCT πλέγμα του μαρτενσίτη προκαλεί μη-συμμετρικές (τετραγωνικές) παραμορφώσεις που οδηγούν σε σημαντικότερη ισχυροποίηση στερεού διαλύματος [1-6].

Η παρουσία του άνθρακα σε οκταεδρικές θέσεις παρεμβολής προκαλεί ασύμμετρη παραμόρφωση στο κρυσταλλικό πλέγμα. Οι λωρίδες και τα πλακίδια του μαρτενσίτη έχουν πολύ μικρό μέγεθος σε σύγκριση με τους μητρικούς κόκκους του ωστενίτη, με συνέπεια την σημαντική αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα. Επίσης, τα πολλά νέα όρια στην μικροδομή του μαρτενσίτη εμποδίζουν την μετακίνηση των διαταραχών και συμβάλλουν έτσι στην αύξηση της σκληρότητας του χάλυβα [1-6].

Η δομή του μαρτενσίτη είναι βελονοειδής. Σε χάλυβες με λιγότερο από 0,4% κ.β. ποσοστό άνθρακα, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή λωρίδων, ενώ σε χάλυβες με περισσότερο από 0,6% κ.β. ποσοστό άνθρακα, ο μαρτενσίτης έχει την μορφή πιο λεπτών πλακιδίων. Σε χάλυβες με περιεχόμενο άνθρακα μεταξύ 0,4 και 0,6% κ.β., παρατηρούνται φακοειδείς λωρίδες και λεπτά πλακίδια. Ο μαρτενσίτης παρουσιάζει επίσης εσωτερική δομή που χαρακτηρίζεται από διδυμίες και έντονη παρουσία διαταραχών [1-6].

Η βαφή του χάλυβα προκαλεί συχνά παραμορφώσεις και μικρορωγματώσεις λόγω συσσώρευσης τοπικών τάσεων. Ο βαμμένος χάλυβας γίνεται ψαθυρός εξαιτίας της παρουσίας μαρτενσίτη και γι' αυτό η κατεργασία της βαφής συνήθως συνοδεύεται από επαναφορά σε θερμοκρασίες 150–650 °C, ώστε να γίνει και πάλι ο χάλυβας όλκιμος με μικρή μείωση της σκληρότητάς του [1-6].

1.3.7 Μπαινίτης (Bainite)

Ο μπαινίτης αποτελεί μια μικρογραφική δομή του χάλυβα που προκύπτει όταν ο χάλυβας θερμανθεί σε θερμοκρασία ανώτερη από την θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και κατόπιν ψυχθεί σε τελική θερμοκρασία κατώτερη από την θερμοκρασία σχηματισμού περλίτη (δηλ. χαμηλότερη από περίπου 550 °C) και υψηλότερη από την θερμοκρασία της έναρξης σχηματισμού μαρτενσίτη (περίπου 250 °C). Η δομή του αποτελείται από λεπτά πλακίδια φερρίτη καθώς και σωματίδια καρβιδίου (κυρίως σεμεντίτη) [1-6].

Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός είναι δύσκολος να μελετηθεί επειδή συνδυάζει χαρακτηριστικά διαχυτικών μετασχηματισμών με πυρήνωση και ανάπτυξη (περλιτικοί μετασχηματισμοί) καθώς και μαρτενσιτικών μετασχηματισμών (διατμησιακοί, μη-διαχυσιακοί μετασχηματισμοί). Ο μπαινίτης, όπως και ο περλίτης, είναι μίγμα φάσεων φερρίτη (μπαινιτικού φερρίτη) και καρβιδίου, που σημαίνει ότι κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό, ο άνθρακας κατανέμεται διαφορετικά στις δύο φάσεις, γεγονός που απαιτεί διάχυση του άνθρακα. Αντίστοιχα, ο μπαινιτικός φερρίτης αναπτύσσεται σε πλακίδια και παρουσιάζει την χαρακτηριστική βελονοειδή μορφή του μαρτενσίτη. Μάλιστα η παραμόρφωση της επιφάνειας ενός δοκιμίου που υφίσταται μπαινιτικό μετασχηματισμό μαρτυρά σημαντικές διατμητικές παραμορφώσεις του πλέγματος, όπως και στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό. Βέβαια πρέπει να τονίσουμε ότι η ανάπτυξη των μπαινιτικών πλακιδίων είναι πολύ πιο αργή από αυτή των μαρτενσιτικών, λόγω του χρόνου που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η διάχυση του άνθρακα [1-6].

Ανάλογα με τη θερμοκρασία σχηματισμού διακρίνουμε τον μπαινίτη σε *άνω μπαινίτη* (upper bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 400 και 500 °C, και *κάτω μπαινίτη* (lower bainite), που πραγματοποιείται μεταξύ 250 και 400 °C [1-6].

1.3.7.1 Ανώτερος μπαινίτης (upper bainite)

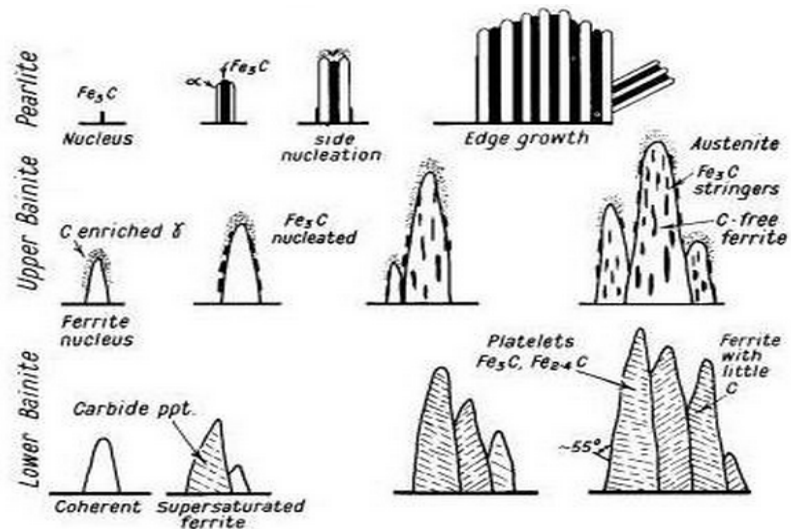
Η δομή ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η πυρήνωση και ανάπτυξη λεπτών πλακιδίων μπαινιτικού φερρίτη, με παράλληλο εμπλουτισμό του

ωστενίτη σε άνθρακα, αφού η στερεά διαλυτότητα του άνθρακα στον φερρίτη είναι πολύ μικρή. Στο δεύτερο στάδιο ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα οδηγεί στην καθίζηση σεμεντίτη μεταξύ των πλακιδίων του φερρίτη. Η μορφολογία του σεμεντίτη εξαρτάται από την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα. Σε χάλυβες με υψηλό ποσοστό άνθρακα, ο σεμεντίτης σχηματίζει συνεχείς λωρίδες που διαχωρίζουν τα πλακίδια του φερρίτη. Όταν όμως η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι χαμηλή, τότε σχηματίζονται μικρά σωματίδια σεμεντίτη. Ο άνω μπαινίτης αναπτύσσεται σε ομάδες παράλληλων πλακιδίων που ονομάζονται *μπαινιτικές δεσμίδες* (bainite sheaves) [1-6].

1.3.7.2 Κατώτερος μπαινίτης (lower bainite)

Ο κατώτερος μπαινίτης σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (250-400 °C). Η σημαντικότερη διαφορά του με τον ανώτερο μπαινίτη είναι ότι κατά την ανάπτυξη του φερρίτη, εκτός από τον εμπλουτισμό του ωστενίτη σε άνθρακα, λαμβάνει χώρα και καθίζηση σεμεντίτη μέσα στον φερρίτη. Έτσι στον κατώτερο μπαινίτη σχηματίζεται σεμεντίτης τόσο μέσα στα πλακίδια του μπαινιτικού φερρίτη όσο και μεταξύ των πλακιδίων αυτών, με απ' ευθείας καθίζηση από τον ωστενίτη [1-6].

Λόγω της καθιζήσεως του σεμεντίτη στον μπαινιτικό φερρίτη ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα είναι μικρότερος με αποτέλεσμα να σχηματίζονται μικρότερα σωματίδια σεμεντίτη μεταξύ των φερριτικών πλακιδίων. Γενικά η διασπορά των καρβιδίων είναι λεπτότερη στον κατώτερο μπαινίτη και το γεγονός αυτό εξηγεί την μεγαλύτερη ολκιμότητα του κατώτερο μπαινίτη σε σχέση μ' αυτήν του ανώτερου μπαινίτη. Στους χάλυβες που περιέχουν υψηλό ποσοστό Si (π.χ. 1% κ.β.) αναστέλλεται η καθίζηση σεμεντίτη στον μπαινιτικό φερρίτη. Αντ' αυτού σχηματίζεται ε-καρβίδιο. Το ίδιο συμβαίνει και στους κραματωμένους χάλυβες όπου σχηματίζεται ε-καρβίδιο ή άλλα σύνθετα καρβίδια με τη συμμετοχή των στοιχείων αντικαταστάσεως [1-6].



Εικόνα 1-8: Σχηματισμός περλίτη (pearlite), ανώτερου (upper) και κατώτερου (lower) μπαϊνίτη.

1.4 Ναυπηγικοί Χάλυβες

1.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Προέρχονται από το είδος αυτό του χάλυβα το οποίο ανήκει στην κατηγορία των κοινών χαλύβων μεταλλικών κατασκευών. Οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων παράγονται κυρίως με μία από τις τρεις μεθόδους: ανοιχτής φλογοκαμίνου, ηλεκτρικής καμίνου, και βασικής οξυγόνου. Σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις προδιαγραφές των διαφόρων νηογνωμόνων προβλέπονται διάφορες ποιότητες ναυπηγικού χάλυβα, οι οποίες όμως δεν είναι κοινές μεταξύ των διαφόρων νηογνωμόνων.

Για παράδειγμα, ο Αμερικανικός Νηογνώμονας (A.B.S.) προσδιορίζει έξι ποιότητες ναυπηγικού χάλυβα συνήθους αντοχής με τα διακριτικά γράμματα A, B, D, E, DS και CS και έξι ποιότητες ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής με τα διακριτικά γράμματα: AH 32, DH 32, EH 32, AH 36, DH 36 και EH 36. Αντίθετα, πως σύμφωνα με το Γερμανικό σύστημα τυποποίησης (DIN) οι χάλυβες γενικά κατατάσσονται σε κατηγορίες με διακριτικό το St και έναν αριθμό που σημαίνει το ελάχιστο φορτίο θραύσης του υλικού σε κιλά ανά τετραγωνικό χιλιοστό – kg/mm^2 .

1.4.2 Κραματικά στοιχεία των ναυπηγικών χαλύβων

Τα τελευταία χρόνια στη ναυπηγική παρατηρείται μία αύξηση της χρήσης χαλύβων υψηλής αντοχής έναντι των κοινών χαλύβων, εξαιτίας των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων που έχουν οι πρώτοι, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μικρότερες διατομές στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση του βάρους της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ευελιξίας και της ταχύτητας του πλοίου.

Οι ποιότητες του ναυπηγικού χάλυβα συνήθους αντοχής που προδιαγράφονται από τον Αμερικανό Νηογνώμονα, περιέχουν άνθρακα από 0,16 – 0,23 % και διάφορα άλλα κραματικά στοιχεία όπως: Μαγγάνιο (Mn), Θείο (S), Φώσφορο (P), κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών (ελασμάτων, μορφοσιδήρων κ.λ.π.) χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις αντοχής. Αντίθετα, οι ποιότητες του ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής περιέχουν άνθρακα μέχρι 0,18 % και κάμποσα άλλα στοιχεία όπως: Μαγγάνιο (Mn), Φώσφορο (P), Θείο (S), Πυρίτιο (Si), Νικέλιο (Ni), Χρώμιο (Cr), Μολυβδαίνιο (Mo), Χαλκό (Cu), Βαννάδιο (V), κ.λ.π. και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών με ιδιαίτερες απαιτήσεις αντοχής.

1.4.3 Ιστορική αναδρομή των ναυπηγικών χαλύβων

Από την αρχή του 20ου αιώνα, οπότε ο σίδηρος αντικαταστάθηκε τελείως από το χάλυβα, ο τελευταίος παραμένει το σημαντικότερο ναυπηγικό υλικό για την υλοποίηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

Κατά τη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών χρήσης του χάλυβα ως ναυπηγικού υλικού, το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής του ήταν το όριο διαρροής ή η τάση θραύσης. Ωστόσο, στη δεκαετία 1942-52 αναφέρθηκαν τουλάχιστον 200 περιπτώσεις πλοίων που υπέστησαν θραύση, ενώ 52 πλοία κόπηκαν στα δύο. Οι περισσότερες των αστοχιών αυτών προκλήθηκαν από λάθη στη σχεδίαση ή από λανθασμένες πρακτικές συγκόλλησης. Η έκταση των καταστροφών αποτέλεσε την αφορμή για την ανάπτυξη νέων τύπων χαλύβων άνθρακα-μαγγανίου, με βελτιωμένη αντοχή σε ψαθυρή θραύση. Έτσι, δίνεται για πρώτη φορά σημασία στις ιδιότητες δυσθραυστότητας και της αντίστασης στη διάδοση προϋπαρχουσών ρωγμών.

Σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη νέων χαλύβων υψηλής αντοχής και καλής δυσθραυστότητας προέκυψε από την ανάγκη κατασκευής υποβρυχίων που να λειτουργούν σε ολοένα μεγαλύτερα βάθη. Στη δεκαετία του 1940 και στις αρχές της δεκαετίας του 1950 τα υποβρύχια κατασκευάζονταν από χάλυβες υψηλής τάσης θραύσης (high-tensile strength, HTS steel), με όριο διαρροής 350 MPa. Οι χάλυβες αυτοί αντικατέστησαν τους μαλακούς χάλυβες που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε και που παρουσίαζαν όριο διαρροής ~ 225 MPa. Από το τέλος της δεκαετίας του 1950 κυριαρχεί η χρήση του χάλυβα HY-80 με όριο διαρροής 560 MPa. Περαιτέρω εξελίξεις του χάλυβα αυτού υψηλής αντοχής περιλαμβάνουν τους τύπους HY-100 και HY-130 με όρια διαρροής 690 MPa και 900 MPa αντίστοιχα. Όλοι οι χάλυβες της σειράς HY έχουν αποκτήσει τις ιδιότητές τους από σειρά

μεταλλουργικών διαδικασιών οι οποίες απαιτούν πολύ αυστηρές προδιαγραφές και ελέγχους για τη συγκόλλησή τους, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ρωγμών.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 και των αρχών της δεκαετίας του 1970 σημειώθηκαν σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία βελτίωσης μιας άλλης ομάδας χαλύβων, των φερριτικών. Την ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή έδωσαν η βιομηχανία κατασκευής θαλάσσιων εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου, που αναζητούσε χάλυβες υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας, που παράλληλα θα παρουσίαζαν και καλή συγκολλησιμότητα. Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής παρουσιάζει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα, μεγαλύτερη σκληρότητα, υψηλότερη αντοχή και καλή συγκολλησιμότητα. Επίσης, εμφανίζει την ίδια αντοχή σε μηχανική κόπωση και διάβρωση.

Σήμερα είναι δυνατή η παραγωγή τέτοιων χαλύβων με χαρακτηριστικά αντοχής και δυσθραυστότητας ίδια ή καλύτερα εκείνων του χάλυβα HY-80. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό μεθόδων παρασκευής, ακριβούς προσθήκης μικρών ποσοτήτων βελτιωτικών-κραματικών στοιχείων και κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φερριτικής μικροδομής που οδηγεί σε πολύ καλύτερη συγκολλησιμότητα. Αυτή η ομάδα χαλύβων έχει ονομαστεί “μικρο-κραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής” (high strength low alloy steels - HSLA), και θεωρείται ένα από τα πολλά υποσχόμενα υλικά στις ναυπηγικές εφαρμογές.

Ανάμεσα στα στοιχεία προσθήκης είναι το μαγγάνιο Mn, σε ποσοστό έως 1.5%, το νιόβιο Nb, το βανάδιο V, το τιτάνιο Ti, σε συνολικό ποσοστό έως 0.1%, ο χαλκός Cu, ο φώσφορος P, κ.ά. Το όριο διαρροής τους κυμαίνεται από 400-650 MPa, ενώ η επιμήκυνσή τους έως τη θραύση είναι σημαντική, από 14% έως 27%. Η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή συμπεριφορά είναι χαμηλή, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων, ενώ η ικανότητα μορφοποίησής τους εν ψυχρώ είναι μικρή.

Οι βελτιωμένες ιδιότητες των χαλύβων HSLA οδηγούν στη μείωση του κόστους συντήρησης και σε πολλές περιπτώσεις και του κόστους κατασκευής-λόγω του μικρότερου απαιτούμενου πάχους-αν και είναι ακριβότεροι από τους κοινούς χάλυβες. Επίσης, αν και ανθεκτικότεροι και σκληρότεροι σε σχέση με τους απλούς χάλυβες, οι χάλυβες υψηλής αντοχής έχουν ικανοποιητική όλκιμότητα και επιπροσθέτως διαμορφώνονται και συγκολλούνται σχετικά εύκολα. Επιπλέον, επειδή πολλοί χάλυβες HSLA έχουν βελτιωμένη αντίσταση σε διάβρωση, επιτυγχάνεται ίδιος χρόνος ζωής για

μικρότερο πάχος, ή μεγαλύτερος χρόνος ζωής για ίδιο πάχος σε σχέση με τους κοινούς χάλυβες. Επίσης η αντοχή σε κόπωση και σε φθορά κατά τη διάρκεια ζωής είναι πολύ καλή.

1.4.4 Κατάταξη ναυπηγικών χάλυβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ναυπηγικοί χάλυβες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Κοινούς χάλυβες – Με τις κωδικές ονομασίες A, B, D, DS, και E και ελάχιστο όριο διαρροής 235 MPa.
2. Χάλυβες υψηλής αντοχής – Με τις κωδικές ονομασίες AH, DH, και EH και ελάχιστο όριο διαρροής 315 ή 350 MPa.

Η χημική σύσταση των κοινών ναυπηγικών χάλυβων δίδεται στον πίνακα 1-1.

Πίνακας 1-1: Ταξινόμηση ναυπηγικών χάλυβων σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα.

	A	B	D	E	AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36 AH40, DH40, EH40
C	0,21	0,21	0,21	0,18	0,18
Mn	όχι λιγότερο από 2,5 φορές την % κ.β περιεκτικότητα σε C	min 0,80	min 0,80	min 0,80	0,90 – 1,60
P	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
S	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Si	max 0,50	max 0,35	0,10 - 0,35	0,10 - 0,35	0,50
Al	-	-	min 0,020	min 0,020	0,015
Nb	-	-	-	-	0,02 - 0,05
V	-	-	-	-	0,05 - 0,10
Ti	-	-	-	-	0,02
Cu	-	-	-	-	0,35
Cr	-	-	-	-	0,20
Ni	-	-	-	-	0,40
Mo	-	-	-	-	0,08

Οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων παρουσιάζονται στον πίνακα 1-2.

Πίνακας 1-2 Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων.

	όριο διαρροής σ _y (MPa)	όριο εφελκυστικής αντοχής UTS (MPa)	ολκιμότητα ε (%)	Δυσθραυστότητα (J) t ≤ 50 mm		
				θ (° C)	διαμήκης	εγκάρσια
A B D E	>235	400 - 520	22	+20		
				0	27	20
				-20	27	20
				-40	27	20
AH32, DH32, EH32	315 - 350	440 – 590	22	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
AH36, DH36, EH36	>350	490 – 620	21	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
AH40, DH40, EH40	>390	510 – 660	20	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

1.4.5 Η επίδραση των κραματικών στοιχείων στους ανθρακούχους χάλυβες

1.4.5.1 Μαγγάνιο

Το Μαγγάνιο (Mn) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνει την περιοχή του ωστενίτη, ελαττώνοντας παράλληλα τις θερμοκρασίες πραγματοποίησης του ευτηκτοειδούς μετασχηματισμού (A1) και ωστενιτοποίησης (A3). Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 1.65%. Υψηλά όμως ποσοστά μαγγανίου οδηγούν στο σχηματισμό MnS, που βελτιώνει μεν την ολκιμότητα του χάλυβα, λόγω παρεμποδιστικού σχηματισμού FeS, αλλά ευνοεί τη διάβρωση οπών. Η επίδραση του μαγγανίου στις μηχανικές ιδιότητες είναι ελάχιστη. Χρησιμοποιείται για τη σκλήρωση στερεού διαλύματος και έχει μια μικρή επίδραση στην ευθραυστότητα [1-6].

1.4.5.2 Πυρίτιο

Το Πυρίτιο (Si) είναι α-φερρογόνο στοιχείο που διευρύνουν την περιοχή του φερρίτη. Το ποσοστό του δεν ξεπερνά το 0.5%. Χρησιμοποιείται για την αποξείδωση σε κατάσταση τήγματος. Το πυρίτιο αυξάνει την αντίσταση στο σχηματισμό ψαθυρών οξειδίων [1-6].

1.4.5.3 Άνθρακας

Ο άνθρακας (C) είναι γ-φερρογόνο στοιχείο περιέχεται στους ανθρακούχους χάλυβες σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 2.06%. Υψηλά ποσοστά άνθρακα προσδίδουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά μειώνουν τη δυσθραυστότητα. Ο άνθρακας είναι ένα ισχυρό μέσο σκλήρωσης στερεού διαλύματος (solid solution strengthening), ενώ έχει δυσμενή επίδραση στη μηχανουργική κατεργασιμότητα του χάλυβα [1-6].

Πίνακας 1-3: Επίδραση κραματικών στοιχείων στους χάλυβες.

Κραματικό στοιχείο	Επίδραση
Fe	Το βασικό στοιχείο των χάλυβων
C	Καθορίζει το είδος του χάλυβα
S	Μειώνει την αντοχή
P	Μειώνει την αντοχή
O	Μειώνει την αντοχή.
Mn	Ενισχύει την αντοχή.
Ni	Ενισχύει την αντοχή και την δυσθραυστότητα.
W	Σκληραίνει και αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στη θερμότητα.
Cr	Ενισχύει την αντίσταση στους αιφνιδιασμούς.
V	Απομακρύνει τις ακαθαρσίες (purifier) και ενισχύει την αντίσταση στην κόπωση.
Si	Σκληραίνει το χάλυβα.
Ti	Απομακρύνει το άζωτο και το οξυγόνο.
Mo	Σκληραίνει και αυξάνει την αντοχή του χάλυβα στη θερμότητα.
Al	Αποξειδωτικό μέσο.

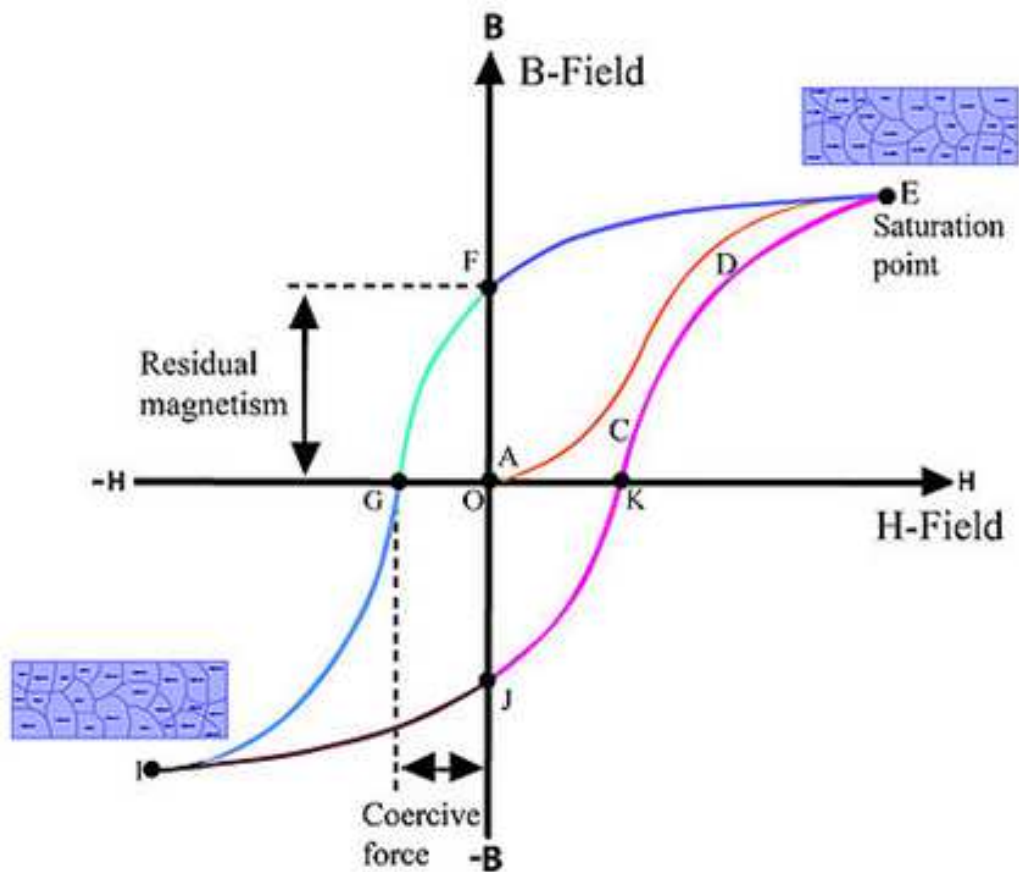
1.5 Μαγνητική συμπεριφορά των ναυπηγικών χάλυβων

Η φερριτική μήτρα των ναυπηγικών χάλυβων στη μικροδομή τους, τους προσδίδει φερρομαγνητική συμπεριφορά. Είναι γνωστό, ότι η επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, προσανατολίζει τις μαγνητικές περιοχές παράλληλα προς επιβαλλόμενο πεδίο [7].

Συγκεκριμένα, οι μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) των οποίων τα μαγνητικά δίπολα είναι ευνοϊκά προσανατολισμένα στο πεδίο, επεκτείνονται σε βάρος των περιοχών με διαφορετικό προσανατολισμό [7]. Η ανάπτυξη αυτή των ευνοϊκά προσανατολισμένων περιοχών πραγματοποιείται με τη μετατόπιση των μαγνητικών τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών [7]. Στα πρώτα στάδια της μαγνήτισης, η μετακίνηση αυτή γίνεται με ιδιαίτερη δυσκολία και μπορεί να απαιτηθεί μεγάλη αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκειμένου να προκληθεί μια μικρή μαγνήτιση. Αυτό φαίνεται από τη μικρή κλίση της γραφικής παράστασης της μαγνητικής επαγωγής B συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου H, η οποία εκφράζει τη μαγνητική επιδεκτικότητα χ του σιδηρομαγνητικού υλικού [7]. Στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται η ένταση του πεδίου, η ανάπτυξη των περιοχών αυτών γίνεται ευκολότερα, οπότε και αυξάνεται η αντίστοιχη

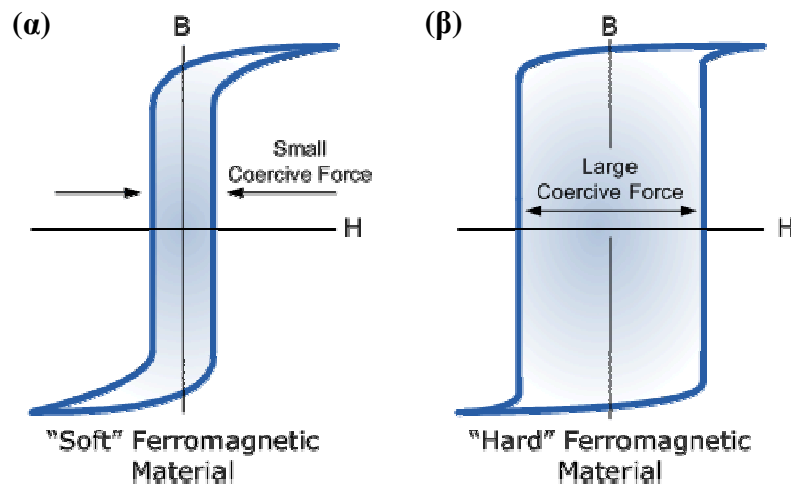
κλίση της γραφικής παράστασης και η μαγνητική επιδεκτικότητα [7]. Όταν ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων περιοχών και αυξηθεί περαιτέρω η ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου, αρχίζει να λαμβάνει χώρα περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, γεγονός που απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη ενέργεια από αυτή για την ανάπτυξη των ευνοϊκά προσανατολισμένων μαγνητικών περιοχών, με αποτέλεσμα η κλίση της καμπύλης B ως προς H να μειώνεται [7]. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου όλες σχεδόν οι περιοχές προσανατολιστούν παράλληλα προς το πεδίο, οπότε και το υλικό αποκτά μια μέγιστη μαγνητική επαγωγή B_s (E saturation point), η οποία ονομάζεται μαγνητική επαγωγή κορεσμού. Η καμπύλη OAE της εικόνας 1-9 αποτελεί την καμπύλη της αρχικής μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού.

Μειώνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου έως ότου μηδενισθεί, η καμπύλη της μεταβολής της μαγνήτισης δεν ακολουθεί αυτή της αρχικής μαγνήτισης (υστερητική συμπεριφορά). Όταν η ένταση του πεδίου μηδενιστεί παραμένει στο υλικό μια ποσότητα μαγνητικής επαγωγής που ονομάζεται παραμένουσα επαγωγή B_r (σημείο F residual magnetism, εικόνα 1-9). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση. Η παραμένουσα επαγωγή κατά το μηδενισμό της έντασης του εξωτερικού πεδίου, σημαίνει ότι παραμένει στο υλικό ένας αριθμός μαγνητικών περιοχών προσανατολισμένες παράλληλα στη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για το μηδενισμό της επαγωγής του υλικού απαιτείται η εφαρμογή ενός αντίθετου πεδίου έντασης H_c , το οποίο ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (σημείο G coercive force, εικόνα 1-9). Εάν η ένταση του αντίθετου πεδίου αυξηθεί ακόμα περισσότερο τελικά το υλικό θα φθάσει στη κατάσταση μαγνητικού κορεσμού στο αντίθετο πεδίο (σημείο I, εικόνα 1-9). Με την απομάκρυνση του αντίθετου πεδίου η μαγνητική επαγωγή παίρνει τη τιμή της παραμένουσας επαγωγής (σημείο J, εικόνα 1-9) και στη συνέχεια εάν εφαρμοστεί θετικό πεδίο η καμπύλη B-H θα ακολουθήσει την JKE ολοκληρώνοντας έναν πλήρη κύκλο. Η κλειστή καμπύλη EFGIJKE ονομάζεται βρόχος υστέρησης και σε οποιαδήποτε περαιτέρω επιβολή στο υλικό ενός μεταβαλλόμενου πεδίου η μαγνητική επαγωγή θα ακολουθεί το βρόχο αυτό. Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης αποτελεί μέτρο των απωλειών ενέργειας σε ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού.



Εικόνα 1-9: Βρόχος υστέρησης της μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής (magnetic induction B) με την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (magnetic field, H) σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Η κυκλική μαγνήτιση και απομαγνήτιση, μέχρι τη μαγνήτιση κορεσμού (magnetic saturation), οδηγεί στη χάραξη του βρόχου υστέρησης (hysteresis loop). Η καμπύλη OA είναι η καμπύλη αρχικής μαγνήτισης (virgin curve).

Ειδικότερα, από την παρατήρηση του βρόχου υστέρησης εξάγουμε συμπεράσματα που σχετίζονται με τη μαγνητική σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού (εικόνα 1-10). Ένα μαλακό μαγνητικό υλικό μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται εύκολα και ο βρόχος υστέρησης του είναι στενότερος σε σύγκριση με ένα σκληρό μαγνητικό υλικό με μικρές τιμές της έντασης του συνεκτικού πεδίου H_c για τις οποίες μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή του υλικού. Για το λόγο αυτό τα μαλακά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες μετασχηματιστών, κινητήρων και γεννητριών. Αντιθέτως, τα σκληρά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα, παρουσιάζουν διευρυμένους βρόχους υστέρησης και μεγάλες τιμές έντασης του συνεκτικού πεδίου, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σαν μόνιμοι μαγνήτες [7-10].



Εικόνα 1-10: Βρόχος υστέρησης μαγνητικά (α) μαλακού και (β) σκληρού υλικού.

1.6 Αναφορές

- [1] Ι. Χρυσουλάκης , Δ.Ι. Παντελής: Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
- [2] Γ. Δ. Παπαδημητρίου: Γενική Μεταλλογνωσία, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989.
- [2] Γ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος: Φυσική μεταλλουργία, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2007.
- [4] D. William, Jr. Callister: Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2008.
- [5] Κονοφάγος, Κ., Μεταλλογνωσία, Τόμος ΙΙΙ, Τα Βιομηχανικά κράματα, 1η έκδοση, Αθήνα 1967.
- [6] Blekkenhorst F., Ferrari G.M., Van der Wekken C.J., Ijsseling F.P., Development of High Strength Low Alloy Steels for Marine Applications, British Corossion Journal, 1986, vol.21 (3), pp.163-176.
- [7] D. C. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, 2nd Edition, Taylor & Francis, Chapter 5, p. 111-124.
- [8] Εργαστηριακές σημειώσεις εργαστηρίου ΙV: ηλεκτρομαγνητισμός, Τμήματος Φυσικής - Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007, (επιμέλεια Αικατερίνη Πομόνη).
- [9] Hugh D. Young, Πανεπιστημιακή φυσική – Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική, Κεφ. 29-8: Μαγνητικά υλικά, τόμος Β, εκδόσεις Παπαζήση, σελ. 821-825.
- [10] A. Aharoni, Introduction to the Theory of Ferromagnetism, Oxford Science University, 1996, Chapter 1, p. 2-3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση μαγνητικών μη-καταστροφικών μεθόδων (βρόχος υστέρησης και μαγνητική διαπερατότητα) για τον τη συσχέτιση της μεταβολής των μαγνητικών ιδιοτήτων σε ανοπτημένα δοκιμεία που προέρχονται από άξονα πλοίου.

2.2 Μεθοδολογία

Για τον έλεγχο της ποιότητας και της αξιοπιστίας συγκόλλησης των δειγμάτων, με μη-καταστροφικό έλεγχο (Non-Destructive Evaluation, NDE), χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι:

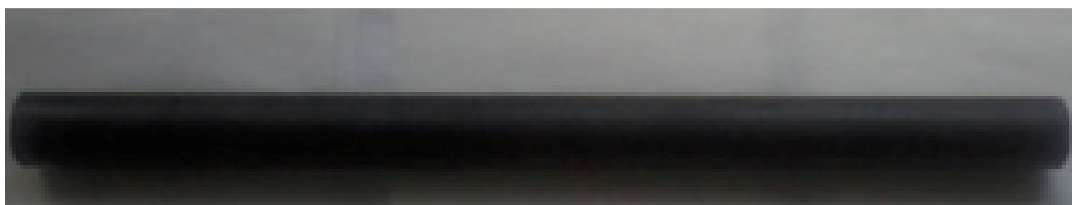
1. Απεικόνιση των βρόχων υστέρησης (B-H loops)
2. Μαγνητική διαπερατότητα

Επιπρόσθετα κρίθηκε αναγκαίος ο μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων, μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, καθώς επίσης και η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του συγκολλημένου δοκιμίου (μικροσκληρότητα) με σκοπό την συσχέτιση των μαγνητικών ιδιοτήτων και των δομικών χαρακτηριστικών των ανοπτημένων δοκιμίων.

2.3 Διαστασιολογία δειγμάτων

2.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού που παρελήφθη

Το αρχικό υλικό που παρελήφθη (εικόνα 2-1) είχε κυλινδρική συμμετρία και οι διαστάσεις του αναγράφονται στον πίνακα 2-1.



Εικόνα 2-1: Δείγμα αναφοράς άξονα πλοίου.

Πίνακας 2-1: Γεωμετρικές διαστάσεις (σε cm) του αρχικού δείγματος που παρελήφθη.

Μήκος	150
Διάμετρος	3

Σε ό,τι αφορά, τη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες του υπό εξέταση χάλυβα θα αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.2 Θερμική κατεργασία

2.3.2.1 Σκοπός ανόπτησης των δειγμάτων

Με τον όρο θερμική κατεργασία ορίζεται μία διεργασία, κατά την οποία το επεξεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται ένα συγκεκριμένο θερμικό κύκλο με τα ακόλουθα στάδια :

1. θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην επιθυμητή θερμοκρασία
2. παραμονή στην εν λόγω θερμοκρασία για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα
3. ψύξη μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Επίσης, το περιβάλλον θέρμανσης (αέρας, τηγμένα άλατα) και η μάζα του κατεργαζόμενου υλικού, αποτελούν βασικά στοιχεία των θερμικών κατεργασιών.

Οι σημαντικότερες κατηγορίες των θερμικών κατεργασιών στους χάλυβες είναι η ανόπτηση, η βαφή και η επαναφορά. Η ανόπτηση έχει ως στόχο τη μείωση των εσωτερικών τάσεων, την αύξηση της πλαστικότητας και της κατεργασιμότητας, αλλά και την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης. Ονομαστικά, τα σημαντικότερα είδη ανόπτησης είναι η ανόπτηση κατεργασίας, η πλήρης ανόπτηση, η ανόπτηση σφαιροποίησης, η ανόπτηση εξομάλυνσης και τα τέλος η ανόπτηση χυτοχάλυβα. Η ανόπτηση θεωρείται θερμική κατεργασία με μικρή ταχύτητα απόψυξης, σε αντιδιαστολή με τη βαφή που θεωρείται θερμική κατεργασία με υψηλή ταχύτητα απόψυξης. Η βαφή έχει ως στόχο τη μηχανική σκλήρυνσή και η επαναφορά, η οποία ακολουθεί τη βαφή, έχει ως στόχο την ανάκτηση της δυσθραυστότητας, μέσω μιας μικρής μείωσης της μηχανικής σκληρότητας.

2.3.2.2 Ισοθερμοκρασιακές κατεργασίες

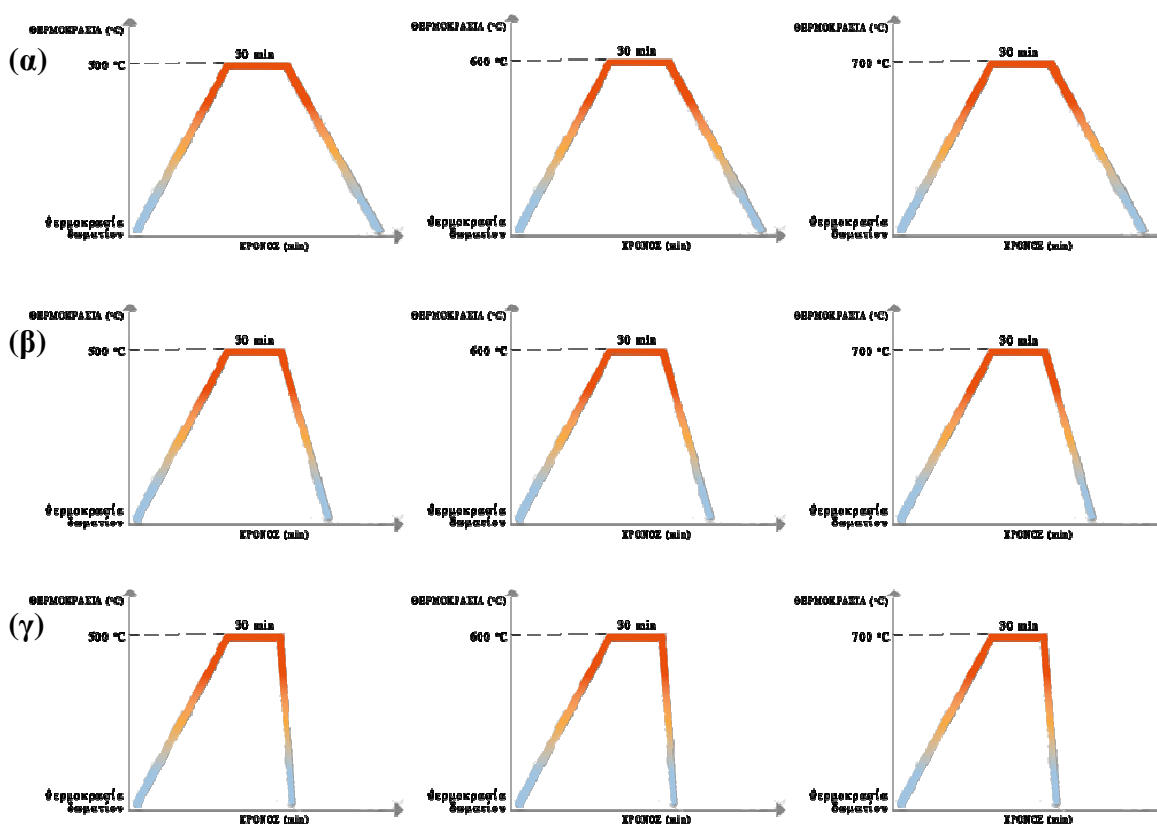
Από το αρχικό δείγμα, αφαιρέθηκαν με μηχανική χειροκίνητη κοπή, εννέα όμοια κυλινδρικά δείγματα, με σκοπό να ανοπτηθούν σε διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών και να αποψυχθούν με κυμαινόμενους ρυθμούς απόψυξης. Θέτοντας ως στόχο, το συγκριτικό συσχετισμό των τιμών που θα ληφθούν από τις μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν στα ανοπτημένα δείγματα, ο χρόνος ανόπτησης, δηλ. ο χρόνος παραμονής σε κάθε θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερός, στα 30 min.

Στον πίνακα 2-2 παρουσιάζονται οι παράμετροι των ισοθερμοκρασιακών κατεργασιών που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Πίνακας 2-2 : Παράμετροι ισοθερμοκρασιακών κατεργασιών (θερμοκρασία ανόπτησης και χρόνος παραμονής) καθώς και μέσου απόψυξης των δοκιμίων.

Δείγμα (#)	Θερμοκρασία ανόπτησης (°C)	Χρόνος ανόπτησης (min)	Απόψυξη (μέσο)
No 1	500	30	Αέρα (air)
No 2			Λάδι (oil)
No 3			Νερό (water)
No 4	600	30	Αέρα (air)
No 5			Λάδι (oil)
No 6			Νερό (water)
No 7	700	30	Αέρα (air)
No 8			Λάδι (oil)
No 9			Νερό (water)

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, σε κάθε θερμοκρασία ανόπτησης ως μέσο απόψυξης, επιλέχθηκε ο αέρας, το λάδι και το νερό. Σχηματίζονται λοιπόν, τρεις οικογένειες μετρήσεων, οι οποίες ορίζονται από τις διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης. Κάθε οικογένεια παραμετροποιείται ως προς το ρυθμό απόψυξης: στον αέρα η απόψυξη είναι πιο αργή, δηλ. παρουσιάζει το χαμηλότερο ρυθμό απόψυξης (εικόνα 2-2 (α)), στο λάδι εμφανίζονται ενδιάμεσες τιμές ρυθμού απόψυξης (εικόνα 2-2 (β)) και τέλος, στο νερό παρατηρείται ο υψηλότερος ρυθμός ανόπτησης, δηλ. πιο γρήγορη απόψυξη (εικόνα 2-2 (γ)).



Εικόνα 2-2: Διαγράμματα ισοθερμοκρασιακής ανόπτησης στα οποία παρουσιάζεται οι ρυθμοί απόψυξης, (α) στον αέρα, (β) στο λάδι, (γ) στο νερό.

2.4 Μη-καταστροφικός έλεγχος

Μη καταστροφικό έλεγχο καλούμε κάθε τεχνική ή μέθοδο που επιτρέπει την επιθεώρηση είτε ενός υλικού είτε μιας μεταλλικής κατασκευής, με σκοπό να διαπιστωθεί η λειτουργικότητά τους, χωρίς να απαιτείται αφαίρεση τμήματός τους ή διακοπή της λειτουργίας τους.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου:

1. Η απεικόνιση των βρόχων υστέρησης (B-H loops) και
2. Η καταγραφή της διαφορικής και επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήριες διατάξεις, οι οποίες είχαν σχεδιασθεί και υλοποιηθεί εξ' ολοκλήρου στο εργαστήριο φυσικής Μεταλλογνωσίας. Η πρώτη αισθητήρια διάταξη αφορά τον εργαστηριακό μαγνητικό υστερησιογράφο, με τον οποίο λαμβάνουμε τη γραφική παράσταση του βρόχου υστέρησης και τη διακύμανση των τιμών της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας ως προς το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Με τη δεύτερη αισθητήρια διάταξη, προσδιορίζουμε τη χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας.

2.4.1.1 Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου

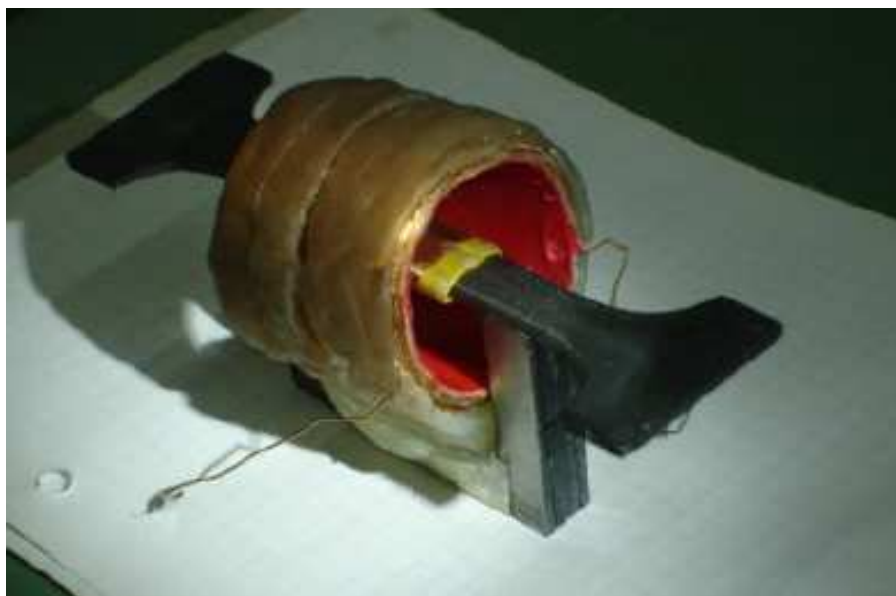
Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων που αφορούν την καταγραφή του βρόχου υστέρησης στα ανοπημένα δείγματα, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας (εικόνα 2-3).



Εικόνα 2-3: Εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας, ο οποίος καταγράφει τους βρόχους υστέρησης και προσδιορίζει την διαφορική μαγνητική διαπερατότητα.

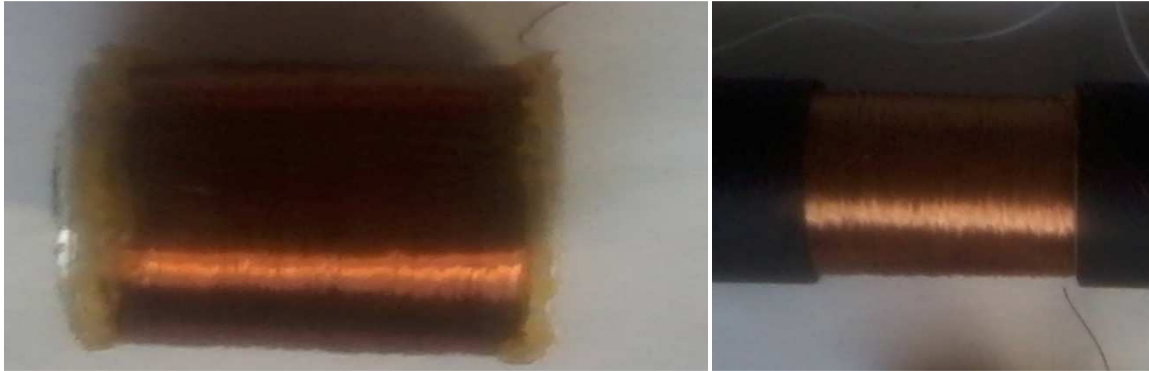
Η διάταξη αυτή είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc (0 Hz) έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγο αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις δεν περιγράφονται από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος. Το πηνίο λήψης (receiving coil ή sensing coil) είναι περιβάλλει το προς μέτρηση υλικό, ενώ η διέγερση επιβάλλεται από ένα πηνίο (excitation coil), το οποίο περικλείει τη διάταξη πηνίου λήψης – εξεταζόμενο δείγμα (εικόνα 2-5). Με τον τρόπο αυτό, το πεδίο επιβάλλεται απευθείας στο προς μέτρηση δείγμα, ενώ ο ηλεκτρομαγνήτης (yoke) να αποτελεί το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος [1]. Με τον τρόπο αυτό, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο προς εξέταση υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Επιπλέον, η ημιτονοειδής κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.



Εικόνα 2-4: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Να σημειωθεί ότι, για να λάβουμε τους βρόχους υστέρησης, χρειάστηκε να κατασκευαστούν εκ νέου τα πηνία διέγερσης και λήψης (εικόνα 2-5), ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις των γεωμετρικών διαστάσεων των ανοπτημένων δοκιμίων.



Εικόνα 2-5 : Το (α) πηνίο διέγερσης και (β) πηνίο λήψης που κατασκευάστηκε με στόχο τη μέτρηση των μαγνητικών βρόχων υστέρησης του αρχικού δείγματος και των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων.

Το μαγνητικό κύκλωμα της διάταξης αποτελείται από:

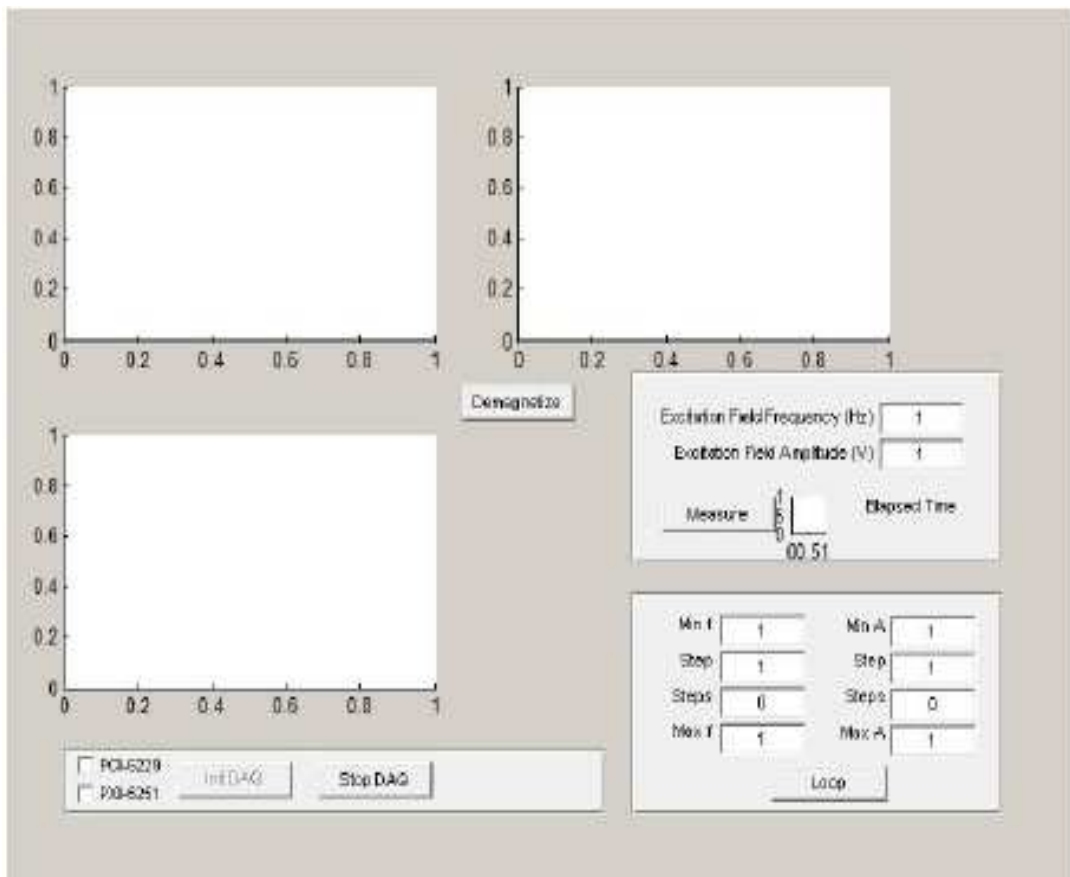
- το προς μέτρηση υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και
- τα πηνία διέγερσης και λήψης. Η τοποθέτηση του εξαρτάται από τον επιθυμητό άξονα μέτρησης του προς εξέταση δείγματος.

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή:

- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).
- Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά $\pm 70V$, $\pm 6A$ της Kerco

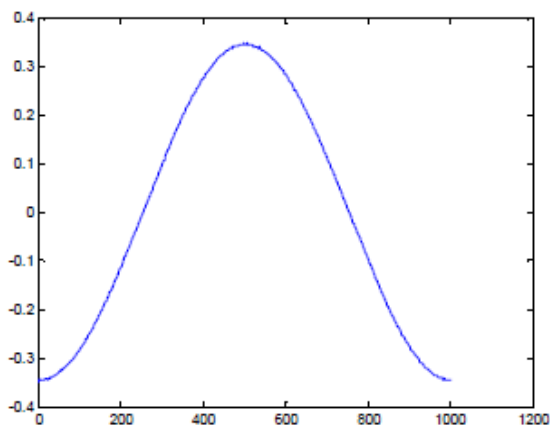
Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην εικόνα 2-6.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, οι παράμετροι εισόδου για τη μέτρηση των βρόχων ήταν: συχνότητα διέγερσης $f=0.1Hz$ και τάση εισόδου $V=1Volt$.



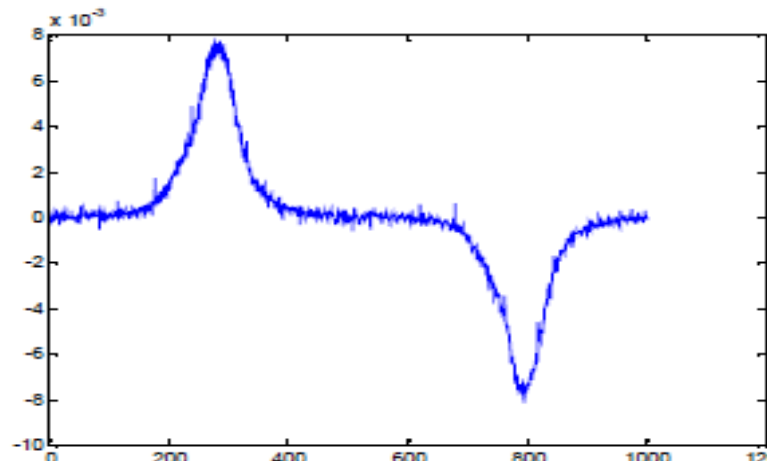
Εικόνα 2-6: Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Το σήμα διέγερσης (εικόνα 2-7) δημιουργείται από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης του Matlab. Μέσω της πλατφόρμας αλληλεπίδρασης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να επιλέξει τις επιθυμητές τιμές του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης, ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.



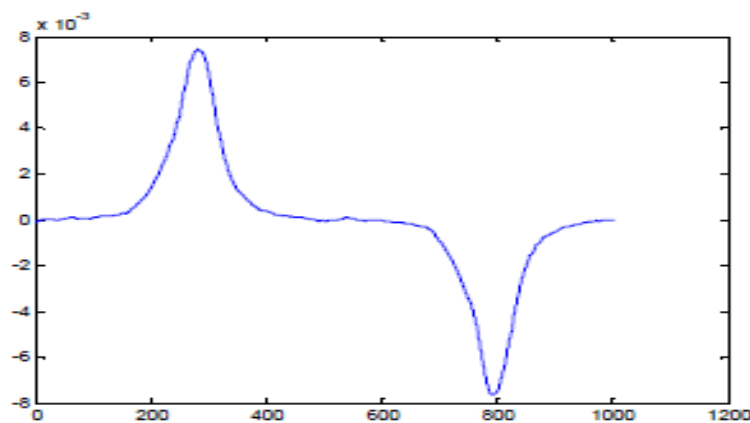
Εικόνα 2-7: Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα είτε απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (εικόνα 2-8).



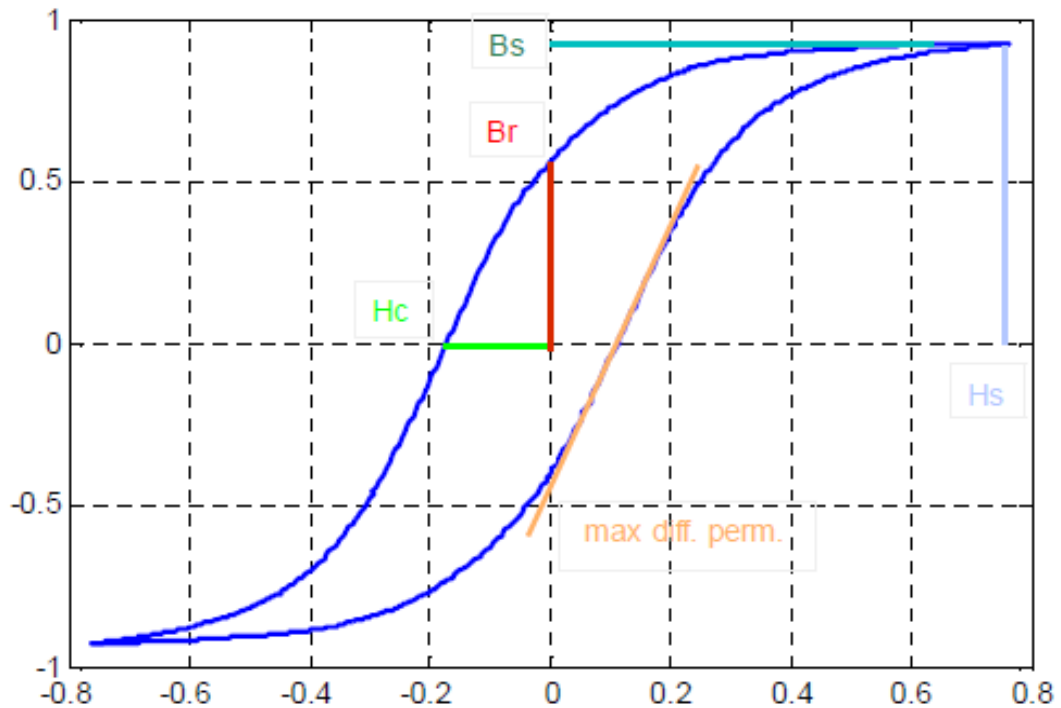
Εικόνα 2-8: Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υψιπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (εικόνα 2-8) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (εικόνα 2-9).



Εικόνα 2-9: Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντας το με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά.



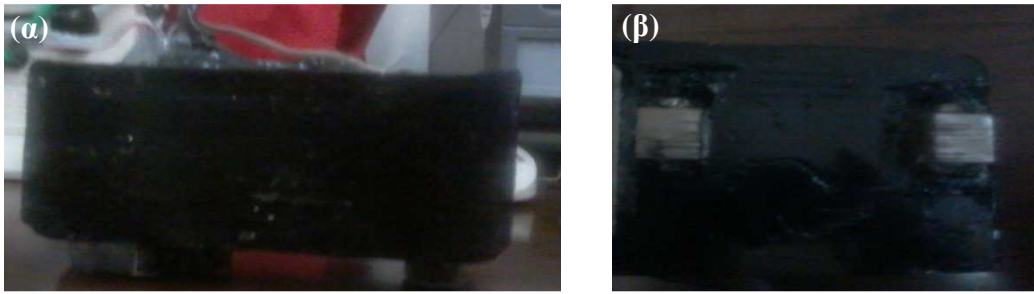
Εικόνα 2-10: Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων (εικόνες 2-7, 2-9, 2-10) που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον προκύπτοντα βρόχο υστέρησης.

Οι μαγνητικές παράμετροι που θα μελετηθούν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι η μορφή του βρόχου υστέρησης και η μορφή του βρόχου της τάσεως εξόδου ως προς το επιβαλλόμενο πεδίο. Η τελευταία παράμετρος σχετίζεται με τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα καθώς είναι ανάλογη με την τιμή της. Από τον βρόχο υστέρησης (εικόνα 2-10) προσδιορίζονται επίσης και οι τιμές μαγνητικών ιδιοτήτων όπως είναι η μαγνητική επαγωγή κορεσμού, η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή και το συνεκτικό πεδίο. Η μεταβολή των τιμών αυτών δίνει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού [2-5].

2.4.1.2 Διάταξη για την καταγραφή της χρονικής μεταβολής των τιμών της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

Για τον προσδιορισμό της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός μαγνητικός αισθητήρας που παρουσιάζεται στην εικόνα 2-11.



Εικόνα 2-11: (α) Πλαϊνή όψη και (β) άνοψη του μαγνητικού αισθητήρα, ο οποίος προσδιορίζει την επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα.

Εν αντιθέσει με τον προηγούμενο αισθητήρα, όπου η περιέλιξη του πηνίου λήψης πραγματοποιείται γύρω από το δείγμα με αποτέλεσμα η λήψη του σήματος περιμετρικά του δείγματος να λαμβάνει υπόψη όλη τη μάζα του, στο δεύτερο αισθητήρα πηνίο λήψης τυλίγεται γύρω από έναν ηλεκτρομαγνήτη με αποτέλεσμα τη λήψη του επιφανειακού σήματος εξόδου.

Ο αισθητήρας διεγείρονταν με ημιτονικό σήμα συχνότητας 1 KHz από μια γεννήτρια συχνοτήτων. Το σήμα διέγερσης και λήψης λαμβάνονταν από ένα σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ), με στόχο την επεξεργασία του (φιλτράρισμα σήματος εξόδου, απεικόνιση γραφικών παραστάσεων) σε περιβάλλον LabView.

2.5 Μεταλλογραφικός - Μικροδομικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων

2.5.1 Προετοιμασία δειγμάτων

Πριν τη μελέτη ενός δοκιμίου πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του, η οποία σε πρώτη φάση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες και σε δεύτερη φάση αποκαλύπτει τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και η χημική προσβολή.

2.5.1.1 Κοπή δοκιμίων

Από τα ανοπτημένα δοκίμια κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής μικρότερα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροδομικών χαρακτηριστικών του καθώς και το χαρακτηρισμό του μικρογραφικού ιστού του.

2.5.1.2 Εγκιβωτισμός

Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener. Σύμφωνα με τις οδηγίες

της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλοι δοσομετρικοί σωλήνες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλινδρικών καλουπιών της Struers και στη συνέχεια συμπληρώθηκε το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης.

2.5.1.3 Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in²). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην πίεση του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειαζόνταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνταν σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

2.5.1.4 Στίλβωση

Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα αντίστοιχο κάθε φορά της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3μm και στη συνέχεια 1μm. Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος λιπαντικό για την ψύξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε τρεχούμενο νερό, καθαρίζονταν με βαμβάκι, στη συνέχεια με αιθανόλη και τέλος ξηραίνονταν σε ρεύμα θερμού αέρα.

2.5.1.5 Χημική προσβολή

Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας

των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων των κόκκων (etching). Ουσιαστικά, η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται από ένα ισχυρά όξινο διάλυμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα η χημική προσβολή της επιφάνειας του δείγματος γίνεται με Nital 2% για 20 sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολουθεί έκπλυση του δείγματος με αιθανόλη.

2.5.2 Μέθοδοι Μικροδομικού χαρακτηρισμού

2.5.2.1 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου Jeol GSM 6380-LV (εικόνα 2-12). Μέσω εικόνας δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η παρατήρηση της μορφολογίας και της κατανομής των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού, ενώ μέσω εικόνας πισσοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ταυτοποιήθηκαν οι φάσεις και τα μικροδομικά συστατικά του υπό εξέταση δοκιμίου. Οι παράμετροι για την λήψη της εικόνας ήταν:

- Τάση επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων (acceleration voltage) 20kV
- Spot size: 50 (για εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων) και 60 (για εικόνα πισσοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων)
- Working distance: 15mm



Εικόνα 2-12: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV.

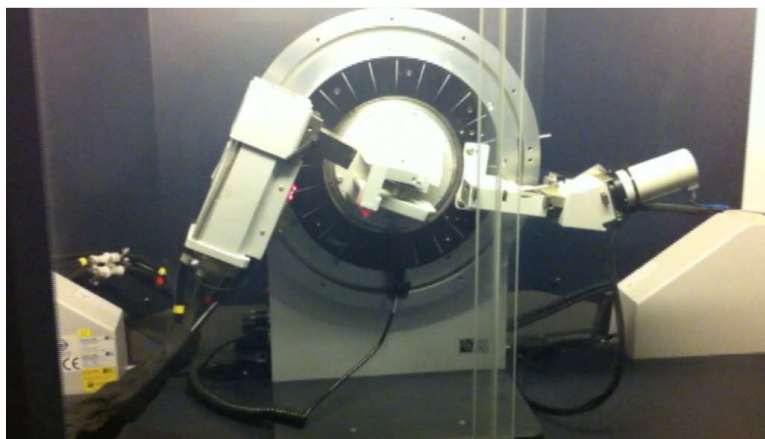
2.5.2.2 Μικροανάλυση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής, στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, πραγματοποιήθηκαν σημειακές και γενικευμένες χημικές στοιχειομετρικές αναλύσεις στην

επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της μικροανάλυσης ήταν η εξέταση της περιεκτικότητας των κραματικών στοιχείων ενδοκρυσταλλικά και διακρυσταλλικά. Ποσοτικός προσδιορισμός ελαφριών στοιχείων (όπως C, N, B, O) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

2.5.2.3 Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction)

Για τον προσδιορισμό του μακρο-κρυσταλλογραφικού ιστού (macrotexture), χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο ακτίνων X (X-ray Diffraction), τύπου Brucker D8 Focus (εικόνα 2-13). Το XRD έφερε λάμπα χαλκού ($\text{CuK}\alpha_1$) με ακτινοβολία $1,5405 \text{ \AA}$, δυναμικό 40KV και ένταση ρεύματος 40 mA. Η βήμα σάρωσης της δέσμης ήταν $0,02^\circ$, ο χρόνος παραμονής σε κάθε μοίρα ήταν 1sec, ενώ το γωνιακό εύρος εξέτασης των δοκιμίων, μετρούμενο σε γωνία 2θ , ήταν από 30 ως 130° για όλα τα υπό εξέταση δοκίμια.



Εικόνα 2-13: Περιθλασίμετρο ακτίνων X σάρωσης (XRD) τύπου Brucker D8 Focus.

2.6 Μέθοδοι προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων

2.6.1 Δοκιμές μικροσκληρότητας

Πριν από τη μικροσκληρομέτρηση απαιτείται η λείανση και η στίλβωση των δοκιμίων. Κάθε αποτύπωμα του διεισδυτή απέχει 1000 μικρά ($0,01\text{mm} = 10\mu\text{m}$) κατά τη διάμετρο του δοκιμίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο της EAB και επιλέχθηκε φορτίο 200 gf και χρόνος επιβολής πλήρους φορτίου 20 sec .

2.7 Αναφορές

- [1] Ε. Χριστοφόρου: Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [2] J.H. Espina-Hernández, J.A. Pérez-Benítez, F. Caleyó, T. Baudin, A.L. Helbert, J.M. Hallen: Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, 2013, art. no. 392001.
- [3] F. Kováč, M.D. Džubinský, Y. Sidor: Columnar grain growth in non-oriented electrical steels, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 269, 2004, pp. 333–340.
- [4] A. Martínez-de-Guerenu, K. Gurruchaga, F. Arizti: Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, 2007, pp.e842 -e845.
- [5] K. Gurruchaga, A. Martínez-De-Guerenu, M. Soto, F. Arizti: Magnetic Barkhausen noise for characterization of recovery and recrystallization, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, 2010, pp. 513-516.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

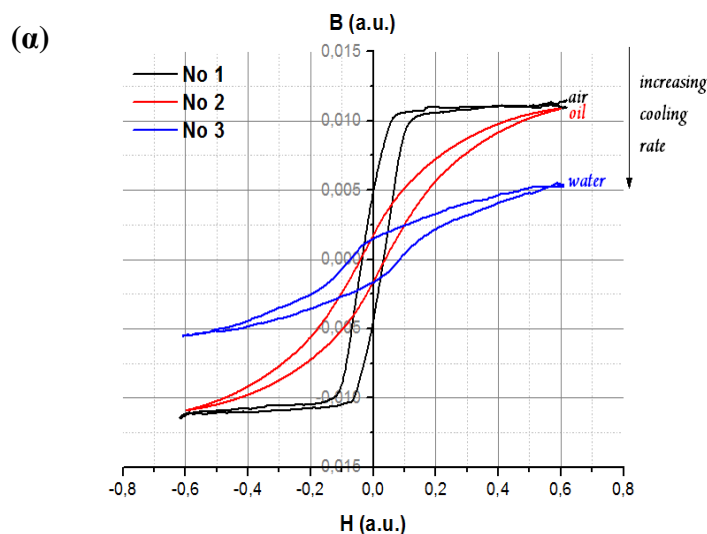
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα θερμικά κατεργασμένα δείγματα. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση των τεχνικών που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.

Ο σχολιασμός των μαγνητικών αποτελεσμάτων αποσκοπεί στη συγκριτική μελέτη των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων και όχι στη συσχέτιση των μαγνητικών τιμών με τα μικροδομικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Η συσχέτιση αυτή θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο της μεταπτυχιακής εργασίας.

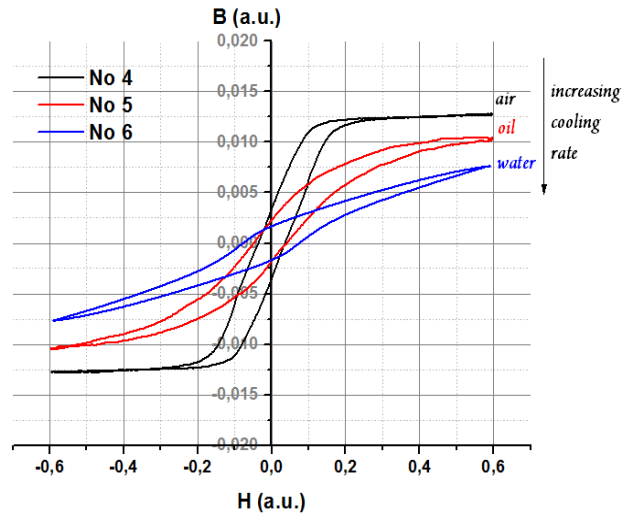
3.2 Μη-καταστροφικός έλεγχος

3.2.1 Μαγνητικές μετρήσεις του βρόχου υστέρησης

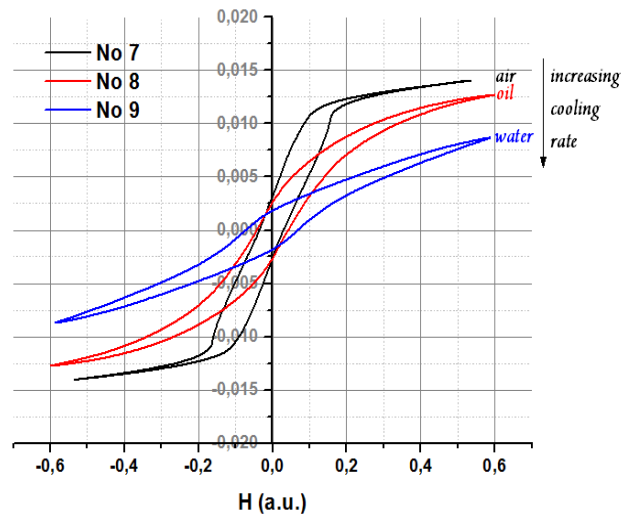
Στην εικόνα 3-1 παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων, ως συνάρτηση του ρυθμού απόψυξης, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία ανόπτησης. Αντίστοιχα, στην εικόνα 3-2 παρουσιάζονται οι βρόχοι υστέρησης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, διατηρώντας σταθερό το μέσο απόψυξης. Αν και οι άξονες στα παραπάνω γραφήματα δεν είναι βαθμονομημένοι (a.u.), μπορούν να εξαρθούν ποιοτικά συμπεράσματα για τη μορφή των βρόχων υστέρησης και τη μεταβολή των διαφόρων μαγνητικών μεγεθών (B_s , B_r , H_c).



(β)

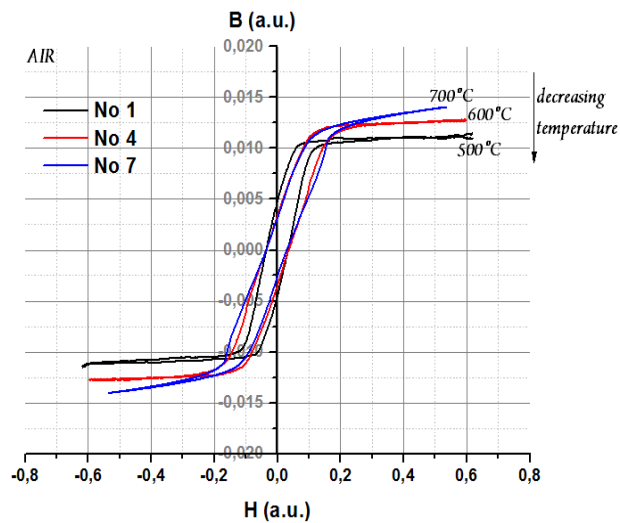


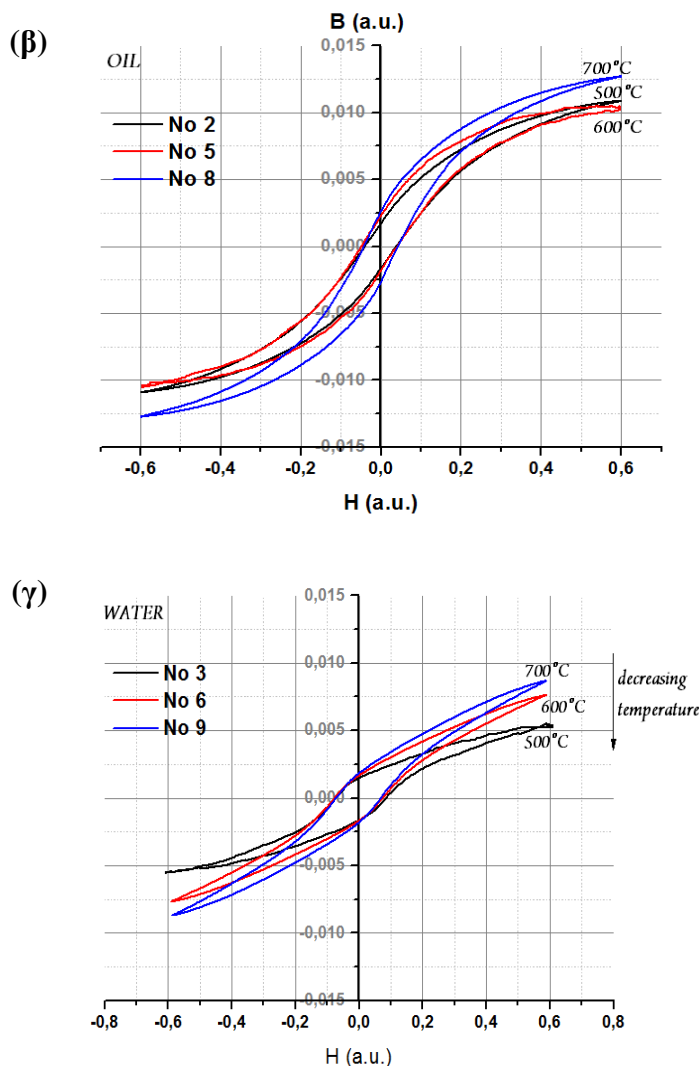
(γ)



Εικόνα 3-1 : Ελάσσονες βρόχων υστέρησης των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων στους (α) 500 °C, (β) 600 °C και (γ) 700 °C, ως συνάρτηση του ρυθμού απόψυξης, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία ανόπτησης.

(α)





Εικόνα 3-2 : Ελάσσονες βρόχοι υστέρησης των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων στον (α) αέρα, (β) λάδι και (γ) νερό, για διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης, διατηρώντας σταθερό το μέσο.

Είναι εμφανές ότι, όταν διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία ανόπτησης και αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης από την ανόπτηση στον αέρα στη βαφή στο νερό (εικόνα 3-1), η κλίση του βρόχου υστέρησης μειώνεται, δηλ. ο μαγνητικός βρόχος παρουσιάζεται να «γέρνει» προς τα δεξιά. Η κλίση αυτή είναι ανάλογη με τη μαγνητική διαπερατότητα του εξεταζόμενου υλικού. Συνεπώς, όταν η κλίση του βρόχου μειώνεται, το υλικό γίνεται σκληρότερο μαγνητικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους $2 \cdot H_c$. Με τη σειρά της, η διεύρυνση του βρόχου επιβεβαιώνει τη μαγνητική σκληρότητα του υλικού. Επίσης, η τιμή της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης, δηλ. εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου, η βραδεία απόψυξη οδηγεί σε βελτίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς.

Οι μεταβολές των μαγνητικών ιδιοτήτων και τιμών, είναι αποτέλεσμα μικροδομικών αλλαγών που συμβαίνουν στις θερμοκρασίες αυτές και οφείλονται στους ρυθμούς

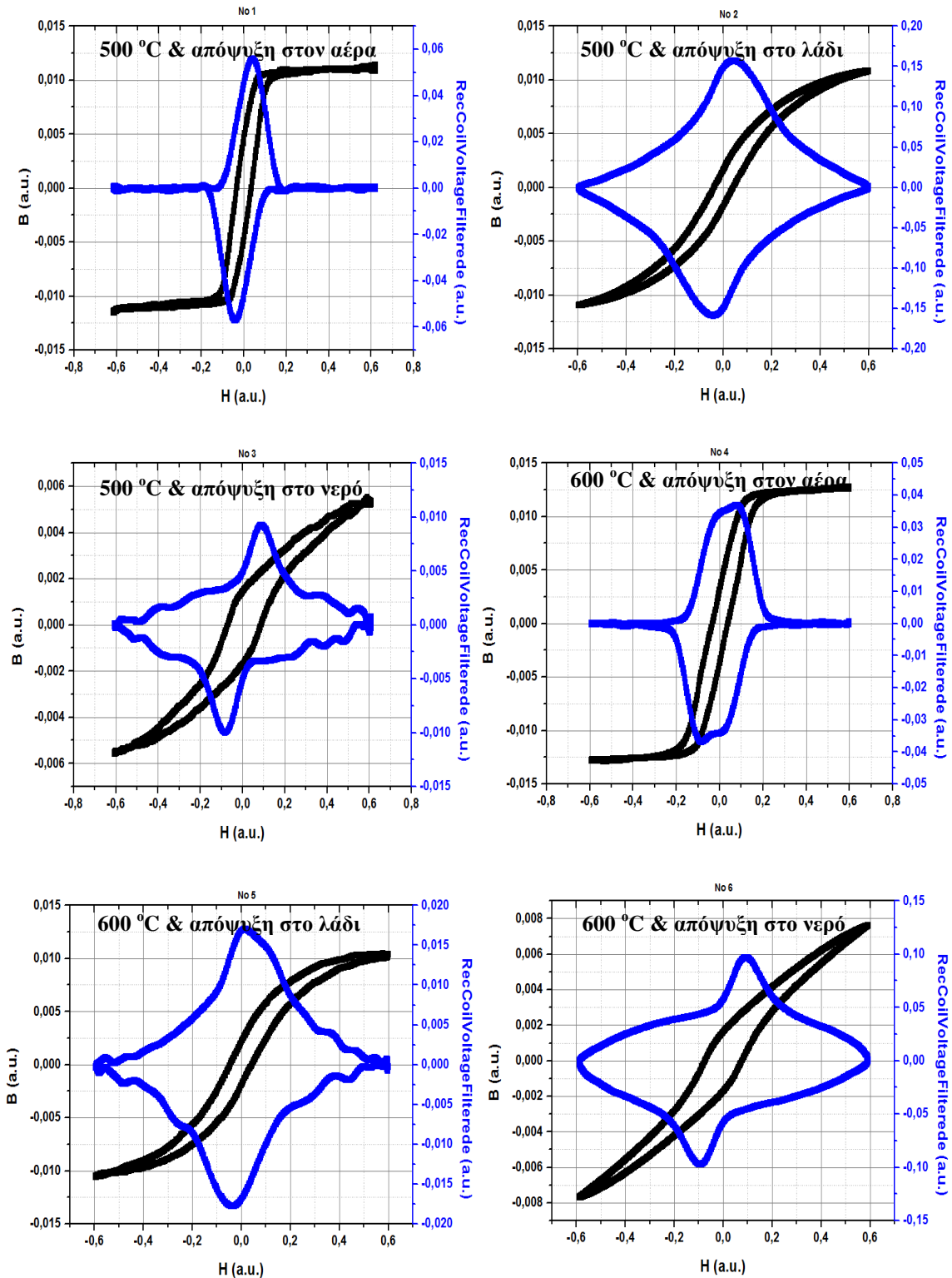
απόψυξης. Όταν το δοκίμιο αποψύχεται στον αέρα, δίδεται στα άτομα ο απαιτούμενος χρόνος, ώστε να ολοκληρωθεί η διάχυση τους. Αυτό οδηγεί στην αποτόνωση του τασικού πεδίου (stress relief annealing), την ανακατανομή των διαταραχών (dislocations) στη μείωση της πυκνότητάς τους και στη βελτίωση της ολκιμότητας. Αντίθετα, η βραδεία απόψυξη, μέσω της βαφής στον αέρα ή το νερό, μειώνει το χρονικό εύρος της διάχυσης, οδηγώντας στην απότομη ψύξη του υλικού. Επειδή, στην περίπτωση αυτή, δεν πληρείται το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί η διάχυση, παρατηρείται μια αύξηση των εσωτερικών τάσεων, της πυκνότητας των διαταραχών και μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων.

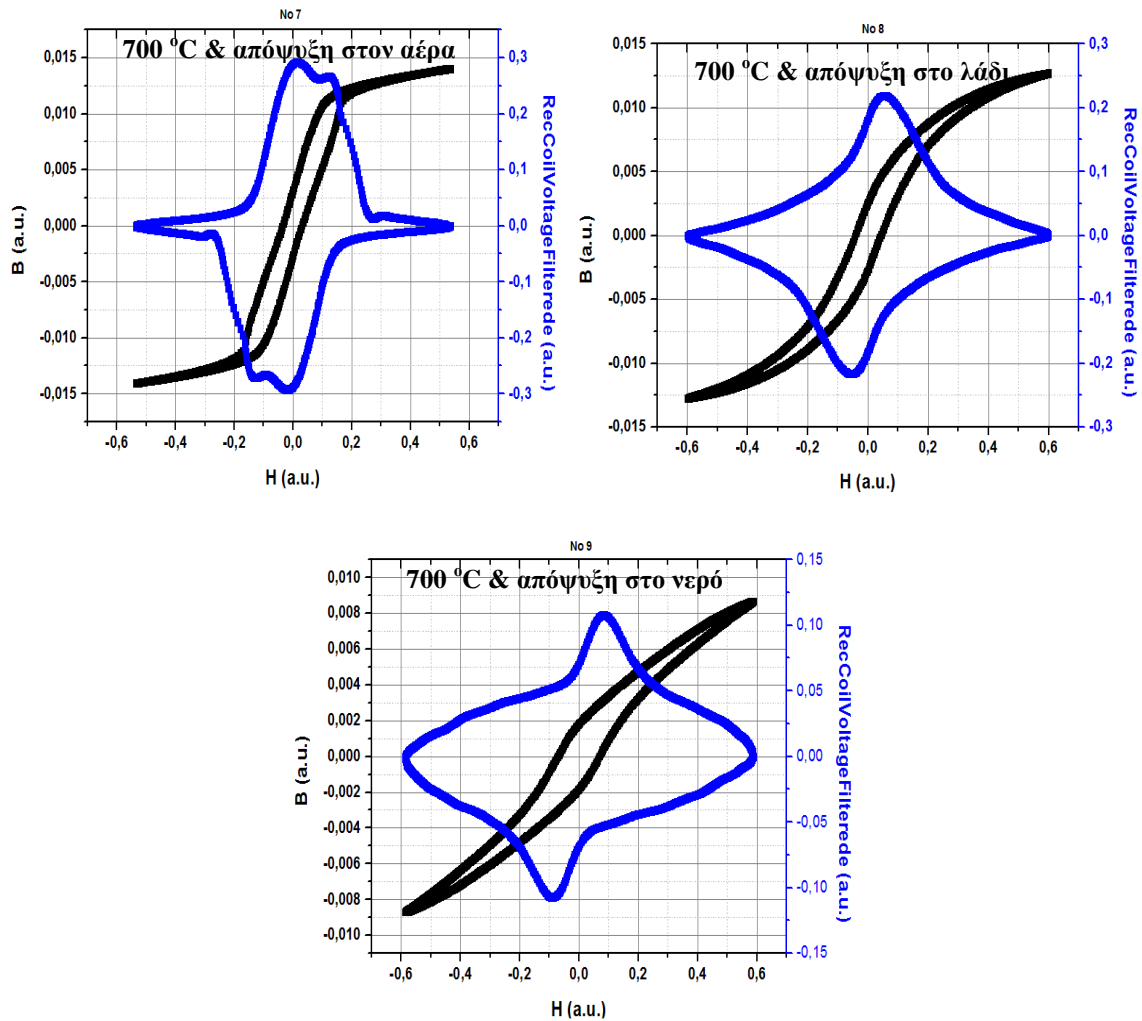
Ομοίως, όταν διατηρείται σταθερό το μέσο απόψυξης και αυξάνεται η θερμοκρασία ανόπτησης (εικόνα 3-2) παρατηρείται αλλαγή στην κλίση των βρόχων υστέρησης. Συγκεκριμένα, όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία ανόπτησης, η κλίση των βρόχων αυξάνεται, συνεπώς, το υλικό παρουσιάζει υψηλότερες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας όταν θερμαίνεται στους 700 °C για όλα τα μέσα απόψυξης. Όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους 700 °C και αποψύχεται στον αέρα, επειδή δίδεται στο σύστημα αρκετός χρόνος ώστε να ολοκληρωθεί η διάχυση, σε συνδυασμό με τους μετασχηματισμούς φάσεως που συντελούνται οδηγεί στη βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Επίσης, είναι εμφανές ότι όταν το δοκίμιο θερμαίνεται για 30 min στους 700 °C και αποψύχεται στον αέρα, το υλικό φτάνει σε μαγνήτιση κορεσμού για μικρότερες τιμές του μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, κατά τη βαφή του χάλυβα, ο βρόχος υστέρησης γίνεται πιο γωνιώδης, απότομος και διευρύνεται, αυξάνοντας το συνεκτικό πεδίο. Με τη σειρά της, η διεύρυνση του βρόχου επιβεβαιώνει τη μαγνητική σκληρότητα του υλικού. Επίσης, η τιμή της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της όταν το μέσο απόψυξης είναι το νερό, εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου, η ταχύτατη απόψυξη οδηγεί σε μειωμένη απόδοση της μαγνητικής συμπεριφοράς.

Η ταχύτατη απόψυξης οδηγεί σε σχηματισμό φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας στο τελικό υλικό ή σε ακολουθία σχηματισμών καρβιδίων το που σκληραίνουν μηχανικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις απότομες μετακινήσεις των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της απομαγνήτισης που οδηγούν σε ένα πιο γωνιώδη βρόχο υστέρησης, μειώνοντας την κλίση του και κατ' επέκταση και την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας,. Επίσης η μαγνητική σκλήρωση είναι συνακόλουθη με την αύξηση της τιμής του συνεκτικού πεδίου.

3.2.2 Μαγνητικές μετρήσεις της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας

Στην εικόνα 3-3 παρουσιάζονται οι μεταβολές της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας (μπλε καμπύλη) ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, H . Σε κάθε γράφημα υπερτίθεται και ο αντίστοιχος βρόχος υστέρησης.





Εικόνα 3-3: Υπέρθυση βρόχων διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου πεδίου για τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια.

Παρατηρώντας τα γραφήματα των βρόχων διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του επιβαλλόμενου πεδίου, είναι εμφανής η μείωση των τιμών της κατά την απόψυξη στο νερό. Οι βρόχοι αυτοί είναι πεπλατυσμένοι και παρουσιάζουν απότομες μεταβολές. Συνεπώς, το υλικό γίνεται σκληρότερο μαγνητικά όταν μεγιστοποιείται ο ρυθμός απόψυξης.

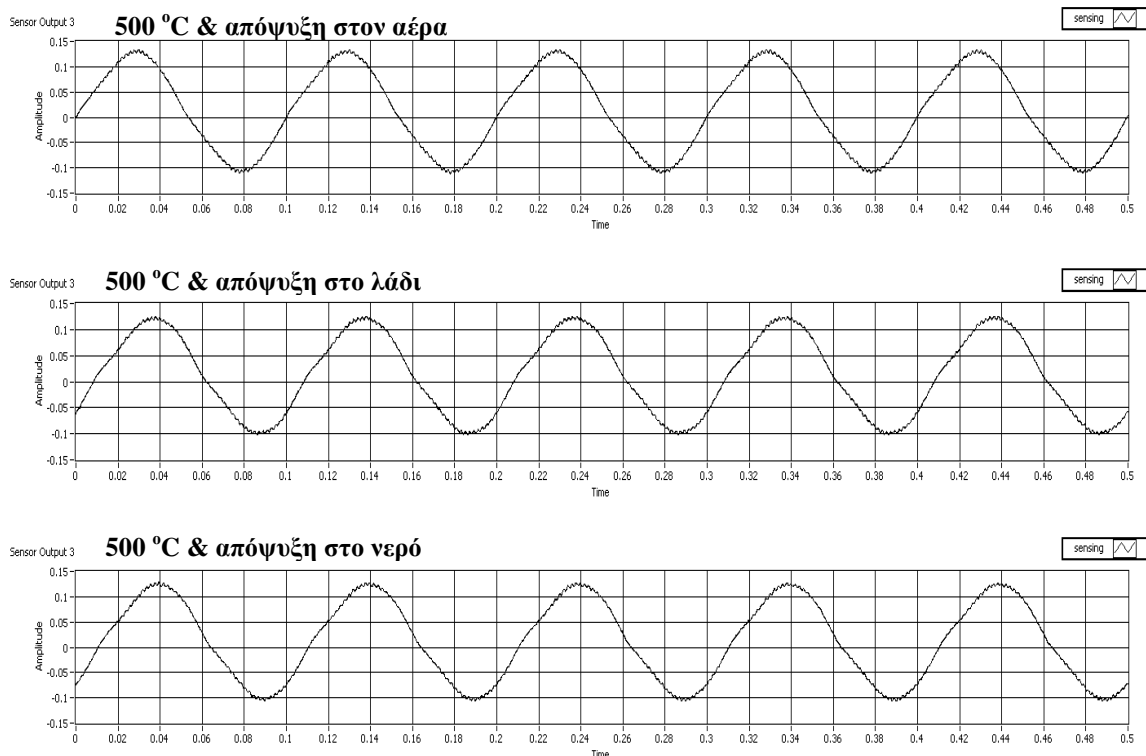
Όταν ο ρυθμός απόψυξης λαμβάνει την μικρότερη τιμή του κατά την απόψυξη στον αέρα, οι βρόχοι της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας γίνονται πιο στενοί και λαμβάνουν την υψηλότερη τιμή τοπικού μεγίστου. Συνεπώς, το υλικό γίνεται μαλακότερο μαγνητικά όταν ελαχιστοποιείται ο ρυθμός απόψυξης. Είναι χαρακτηριστική επίσης, η εμφάνιση διπλής κορυφής στο βρόχο της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας, όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους 700 °C και αποψύχεται στον αέρα, επειδή δίδεται στο σύστημα αρκετός χρόνος ώστε να ολοκληρωθεί η διάχυση, σε συνδυασμό με τους μετασχηματισμούς φάσεως που συντελούνται οδηγεί στη βελτίωση των μαγνητικών

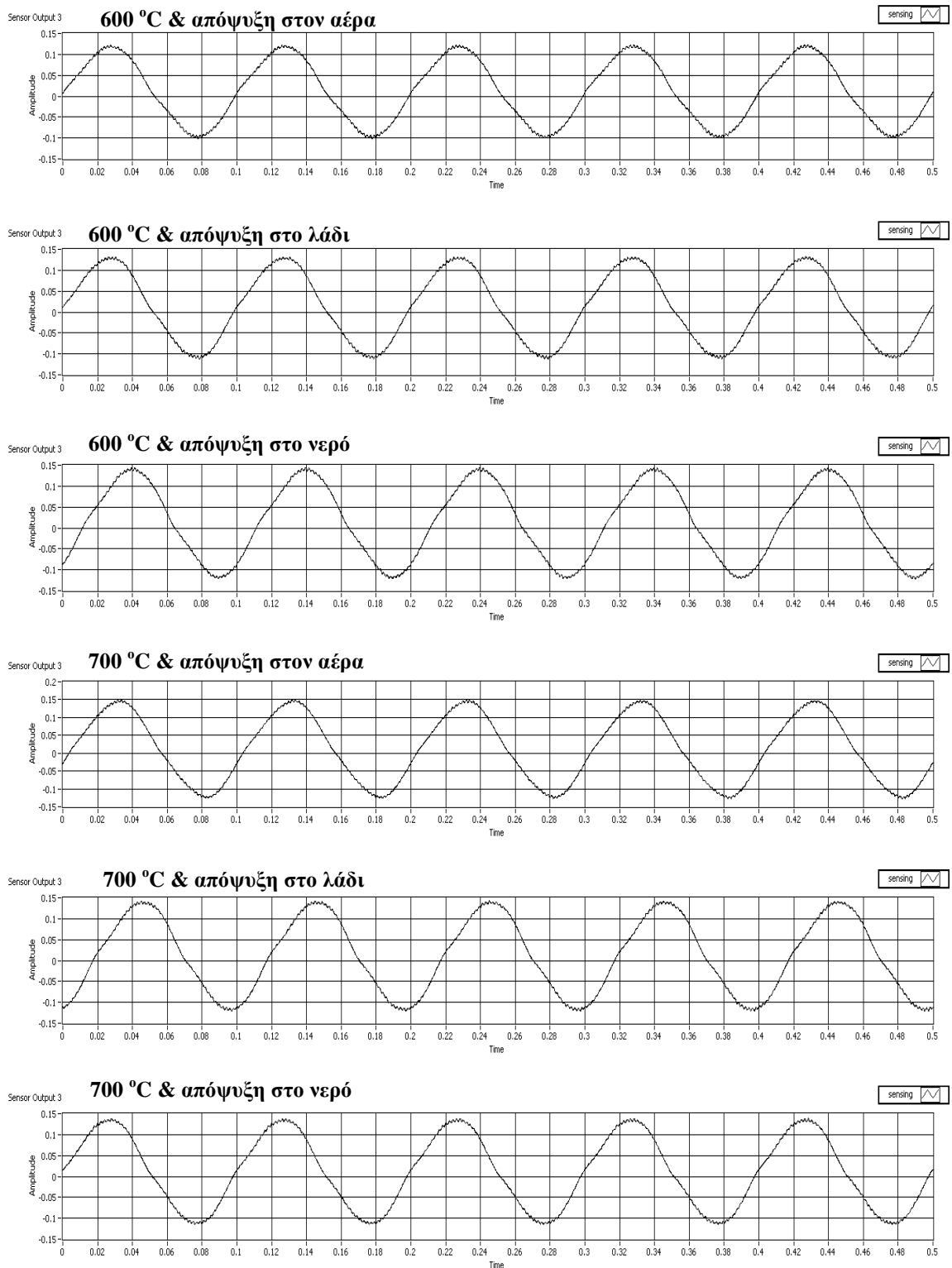
ιδιοτήτων. Η πρώτη από αριστερά κορυφή σχετίζεται με την περιστροφή των μαγνητικών διπόλων στον εύκολο άξονα μαγνήτισης και στην πιθανή πυρήνωση 180° μαγνητικών περιοχών λόγω της αναστροφής των μαγνητικών διπόλων μέσα στον κόκκο. Η δημιουργία των περιοχών αυτών και η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων συντελεί στην ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής και μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας. Η δεύτερη από αριστερά κορυφή, σχετίζεται με την αλληλεπίδραση των 180° μαγνητικών τοιχωμάτων με τα σημεία αγκύρωσης (εμπόδια στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων). Η αλληλεπίδραση αυτή πραγματοποιείται εντός των κόκκων.

Για ενδιάμεσους ρυθμούς απόψυξης, ο βρόχος παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές τοπικού μεγίστου. Μορφολογικά είναι πεπλατυσμένος και στα σημεία καμπής παρουσιάζεται γωνιώδης. Επειδή, στην περίπτωση αυτή, δεν πληρείται το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί η διάχυση, η μορφολογία αυτή του βρόχου οφείλεται στην αύξηση των εσωτερικών τάσεων, της πυκνότητας των διαταραχών, στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων και στο σχηματισμό φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας.

3.2.3 Μαγνητικές μετρήσεις της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

Στην εικόνα 3-4 παρουσιάζονται οι μεταβολές της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του χρόνου για τα δείγματα που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία.





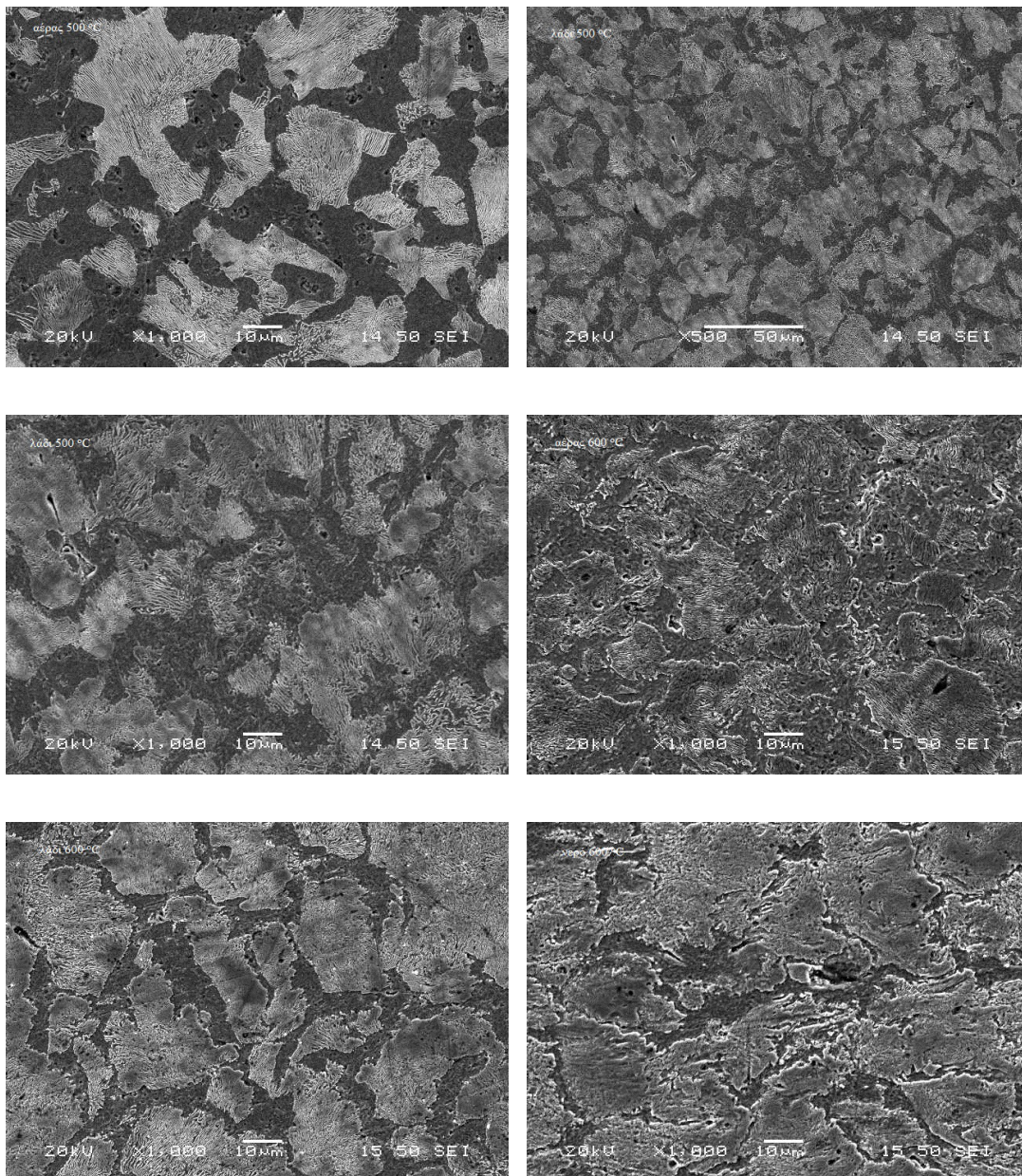
Εικόνα 3-4: Χρονικά μεταβαλλόμενη επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα για τα θερμικά κατεργασμένα δοκίμια.

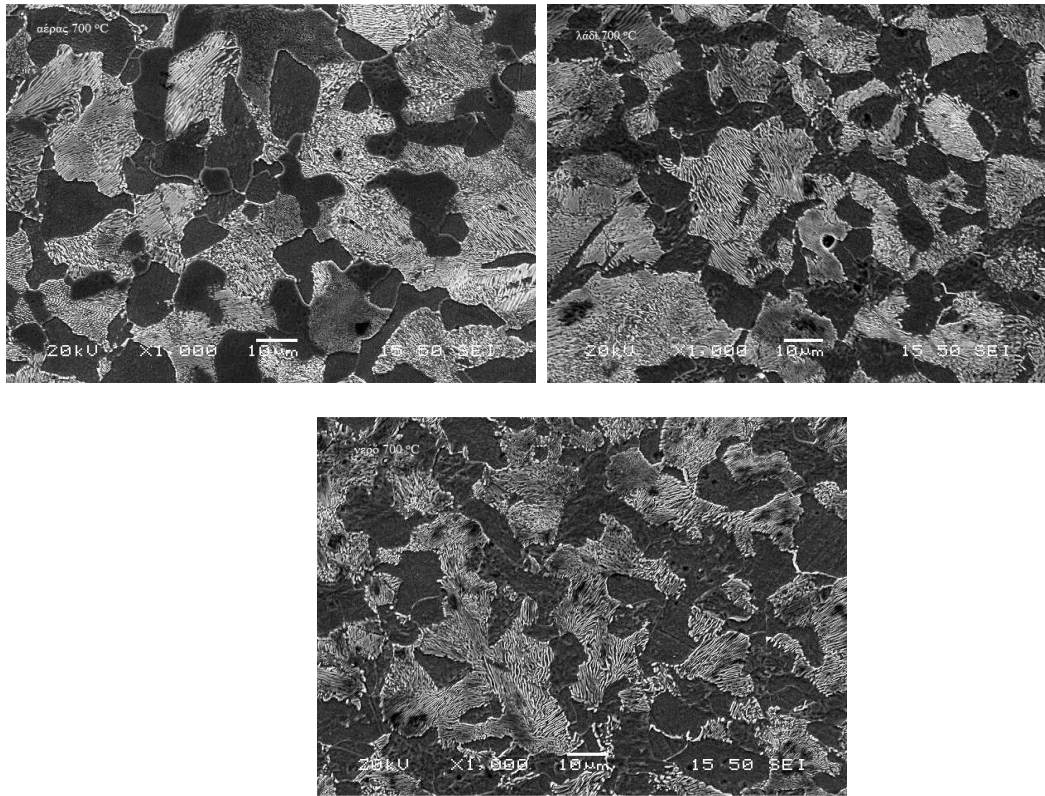
Παρατηρώντας τα γραφήματα της χρονικής μεταβολής της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας είναι εμφανής η μεταβολή των καμπύλων, όταν αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης. Συγκεκριμένα, μετά το μηδενισμό των τιμών της τάσης εξόδου παρατηρείται ένα σκαλοπάτι στη μορφή της καμπύλης, το οποίο είναι πιο έντονο κατά την απόψυξη στο

νερό. Ωστόσο, δεν παρατηρείται έντονη αλλαγή των τιμών των τοπικών μεγίστων. Μια πιθανή εξήγηση είναι ο σχηματισμός ενός επιφανειακού στρώματος οξειδίων κατά τη βαφή των δειγμάτων.

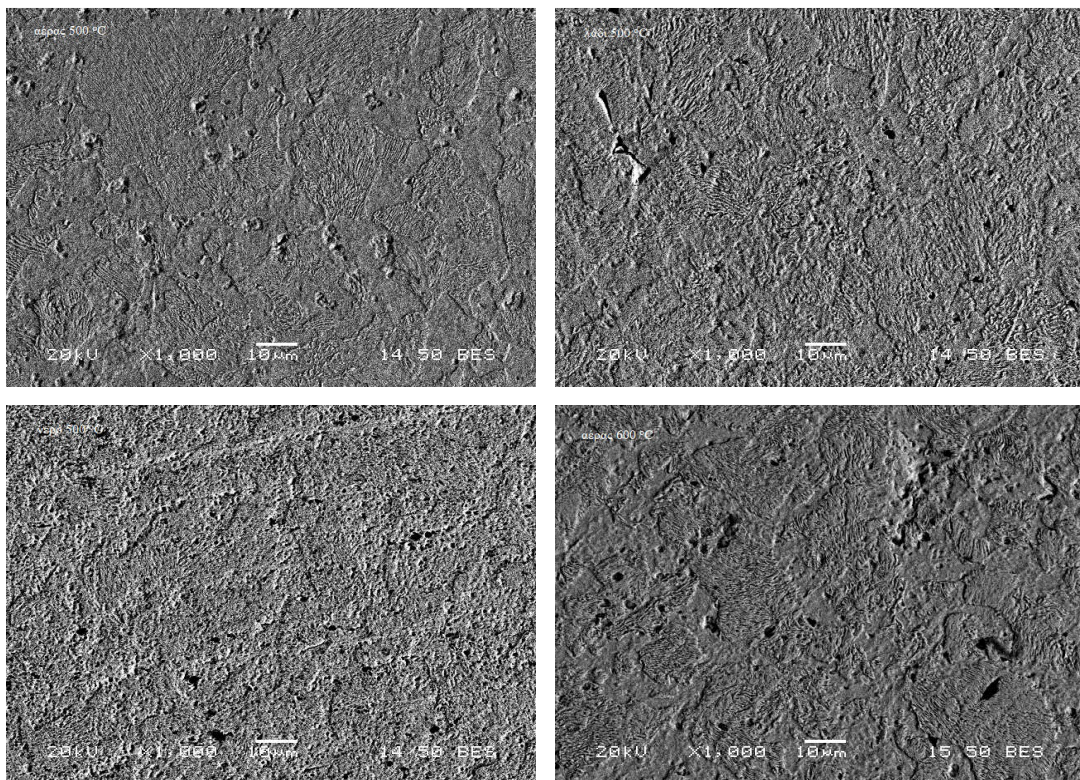
3.2.4 Μικροδομικός χαρακτηρισμός μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM)

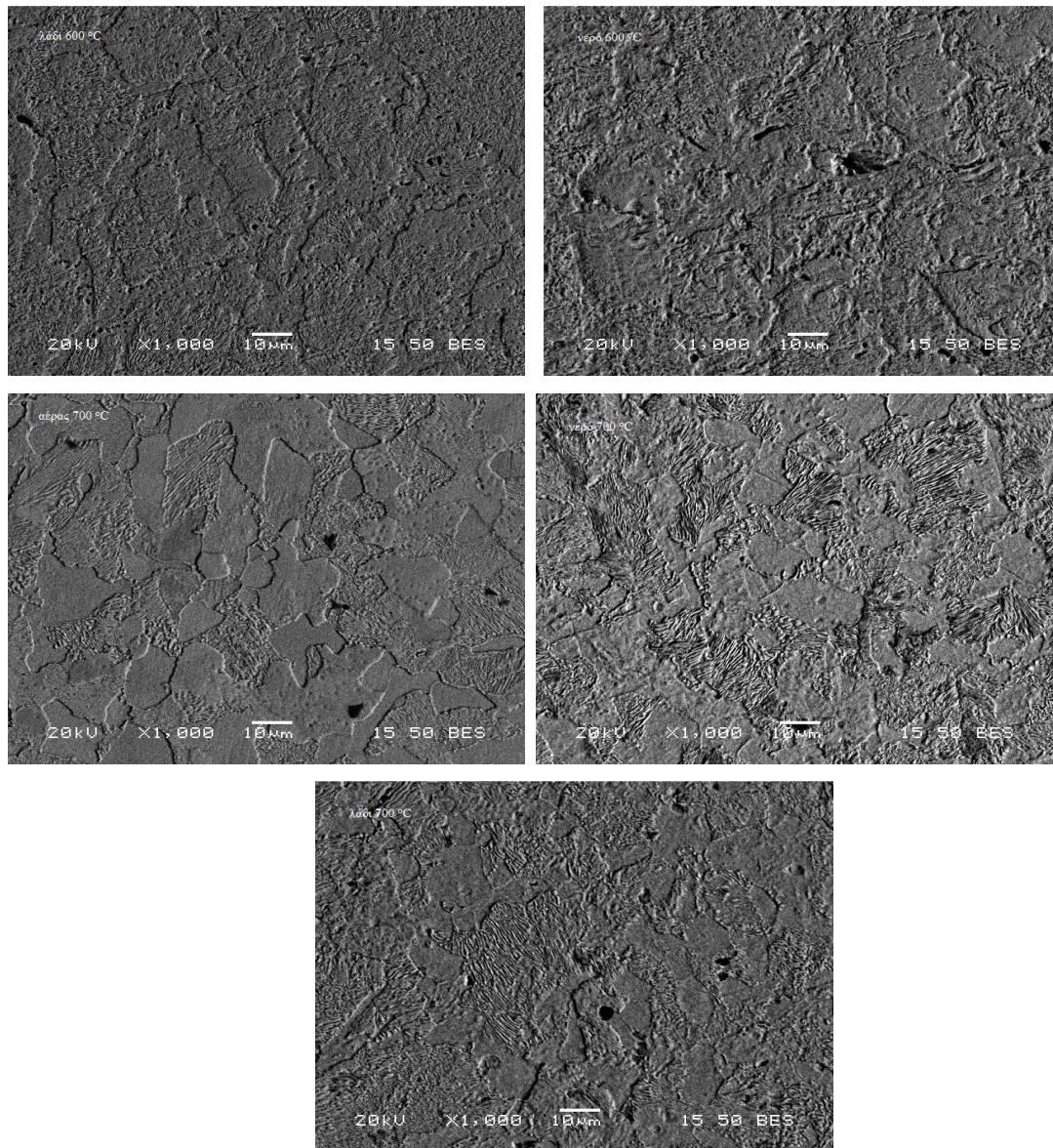
Μέσω των εικόνων των δευτερογενών (εικόνα 3-5) και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (εικόνα 3-6) παρατηρήθηκε η επιφάνεια των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων.





Εικόνα 3-5: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την επιφάνεια των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων.





Εικόνα 3-6: Εικόνα πισσοκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την επιφάνεια των θερμικά κατεργασμένων δειγμάτων.

Από την παρατήρηση της επιφάνειας των δειγμάτων ταυτοποιήθηκε η ανάπτυξη μικρογραφικού ιστού μέσω της συμμετοχής φάσεων εντός θερμοδυναμικής ισορροπίας (προευτηκτοειδή φερρίτης) και μικρογραφικών συστατικών (ευτηκτοειδής περλίτης) στα δείγματα τα οποία έχουν αποψυχθεί στον αέρα. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, το μέσο μέγεθος των κόκκων αυξάνει και αυτό, εξαιτίας της ολοκλήρωσης της διάχυσης. Οι φερριτικοί πολυγωνικοί και ισαξονικοί κόκκοι χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια στην κατανομή του μέσου μεγέθους τους, το οποίο ίσο με $55 \mu\text{m} \pm 17 \mu\text{m}$ όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $500 \text{ }^\circ\text{C}$, με $61 \mu\text{m} \pm 12 \mu\text{m}$ όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $600 \text{ }^\circ\text{C}$ και $67 \mu\text{m} \pm 17 \mu\text{m}$ όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Το κυρίαρχο μικροδομικό συστατικό είναι ο περλίτης και χαρακτηρίζεται από πλακοειδή μορφολογία με το μέσο

μέγεθός τους να προσδιορίζεται ίσο με $98 \mu\text{m} \pm 7 \mu\text{m}$, όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $500 \text{ }^\circ\text{C}$, με $116 \mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$ όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $600 \text{ }^\circ\text{C}$ και $143 \mu\text{m} \pm 9 \mu\text{m}$ όταν το δοκίμιο θερμαίνεται στους $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Καθώς ο ρυθμός απόψυξης αυξάνεται, παρατηρούνται φάσεις εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας όπως είναι ο μπαινίτης και ο φερρίτης Widmanstaen. Οι φάσεις αυτές παρουσιάζουν φυλλολοειδή και γωνιώδη μορφολογία αντίστοιχα. Παράλληλα παρατηρείται συνδυασμένη συμμετοχή προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτη που χαρακτηρίζεται από πυκνή επιστοιβάξη πλακιδίων. Οι συνθήκες γειτνίασης μεταξύ των δύο φάσεων δημιουργούν ισχυρά κέντρα αγκύρωσης καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αναντιστοιχίας πλέγματος και ανισοτροπίας προσανατολισμού.

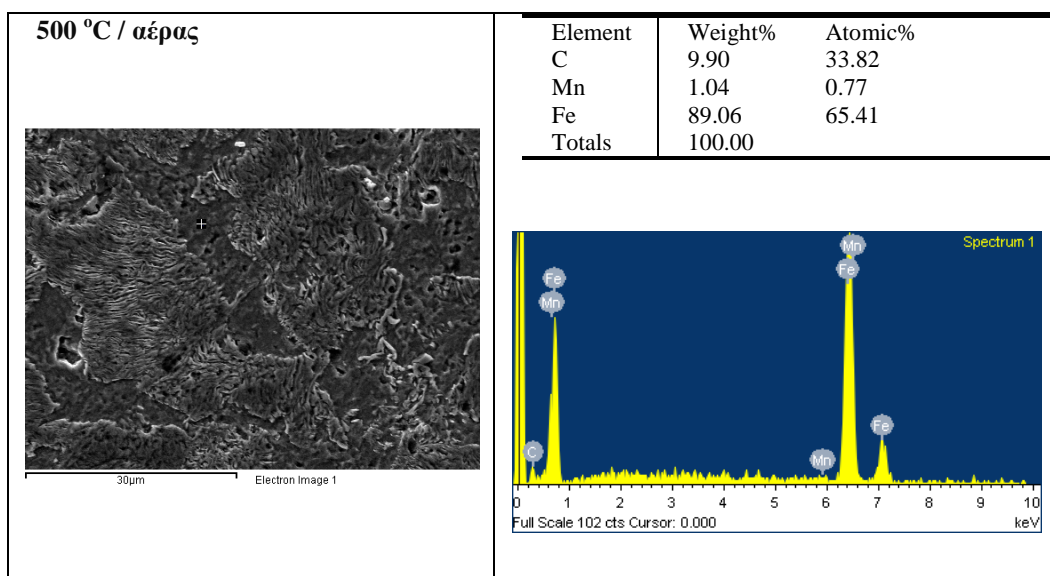
3.2.5 Χημική μικροανάλυση (EDS - Energy Dispersive Spectroscopy)

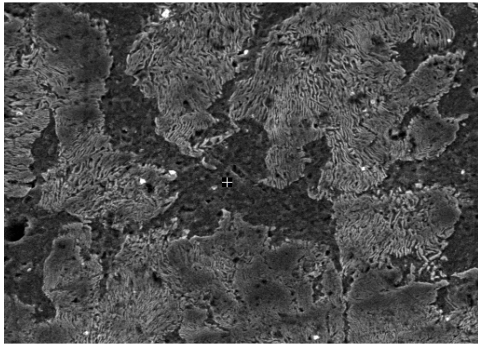
Μετά την γενικευμένη και σημειακή στοιχειομετρική μικροανάλυση (EDS) στο αρχικό δείγμα προκύπτει ότι ο χάλυβας είναι Carbon Steel Grade EN 9.

Πίνακας 3-1: Χημική σύσταση του Carbon Steel Grade EN 9.

Carbon	Manganese	Silicon	Phosphorous	Sulphur
0.50-0.60%	0.50-0.80%	0.05-0.35%	0.06% max	0.06% max

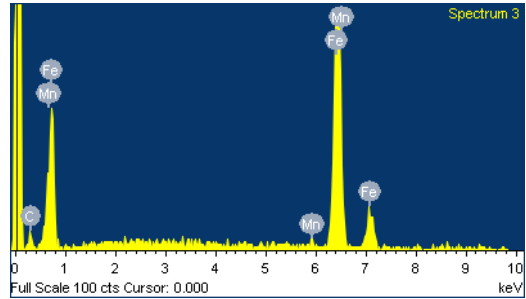
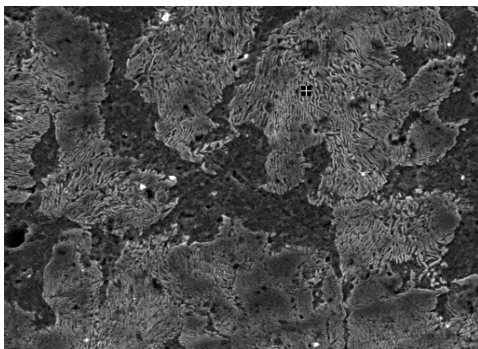
Από τα αποτελέσματα της σημειακής χημικής μικροανάλυσης, παρατηρούμε ότι το υπό εξέταση δείγμα χαρακτηρίζεται από διακυμαινόμενη ανακατανομή των χημικών στοιχείων από ενδοκρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας σε περικρυσταλλικές περιοχές (partitioning). Ενδεικτικές μετρήσεις χημικής μικροανάλυσης παρουσιάζονται στην εικόνα 3-7.



500 °C / λάδι

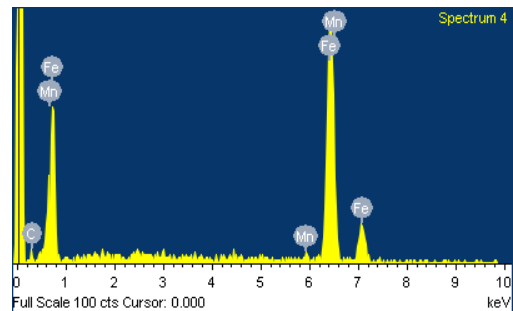
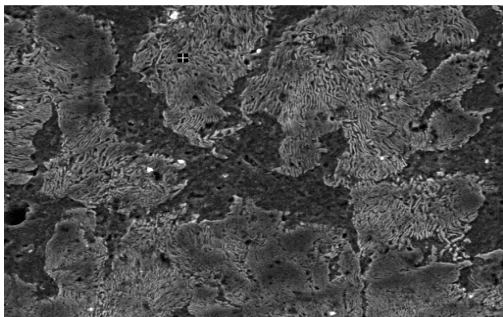
Electron Image 1

Element	Weight%	Atomic%
C	10.45	35.18
Mn	1.41	1.03
Fe	88.14	63.79
Totals	100.00	

**500 °C / νερό**

Electron Image 1

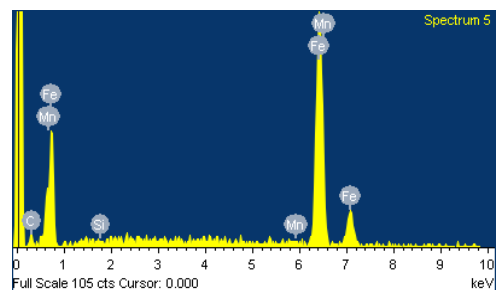
Element	Weight%	Atomic%
C	7.68	27.89
Mn	2.01	1.60
Fe	90.31	70.51
Totals	100.00	

**600 °C / αέρας**

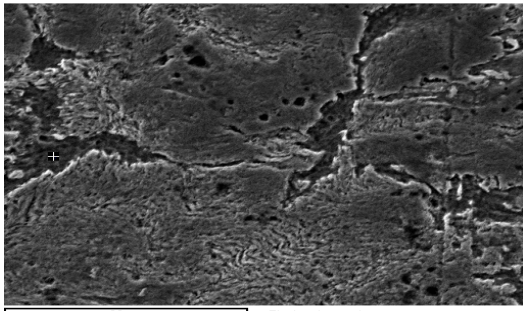
30µm

Electron Image 1

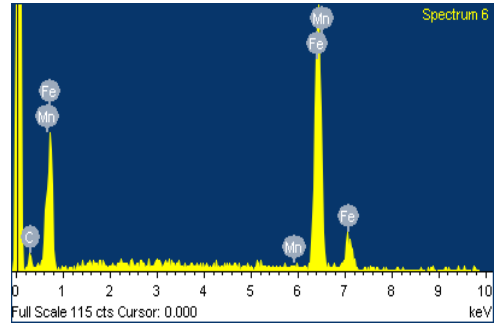
Element	Weight%	Atomic%
C	5.33	20.67
Si	0.42	0.70
Mn	0.47	0.39
Fe	93.78	78.23
Totals	100.00	



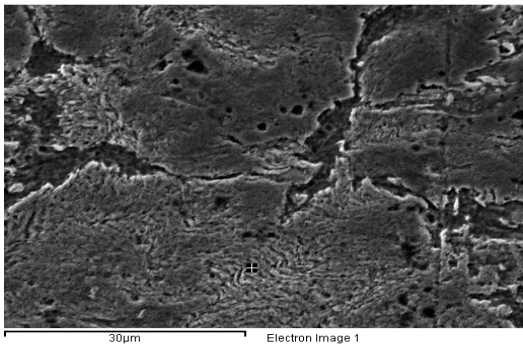
600 °C / λάδι



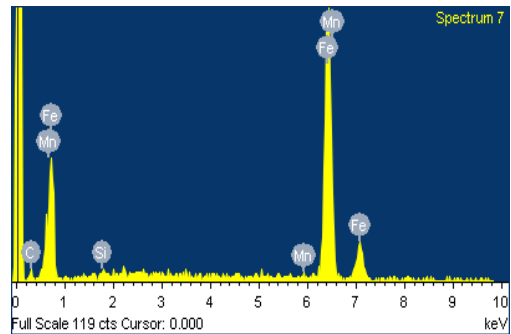
Element	Weight%	Atomic%
C	9.68	33.26
Mn	0.94	0.71
Fe	89.38	66.04
Totals	100.00	



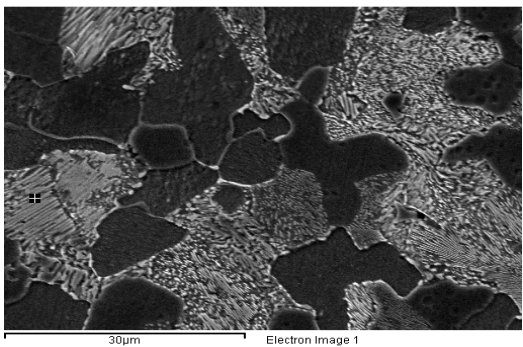
600 °C / νερό



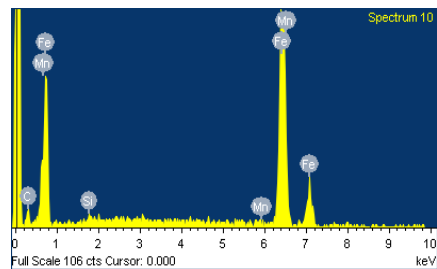
Element	Weight%	Atomic%
C	8.51	30.00
Si	0.83	1.25
Mn	1.57	1.21
Fe	89.09	67.54
Totals	100.00	

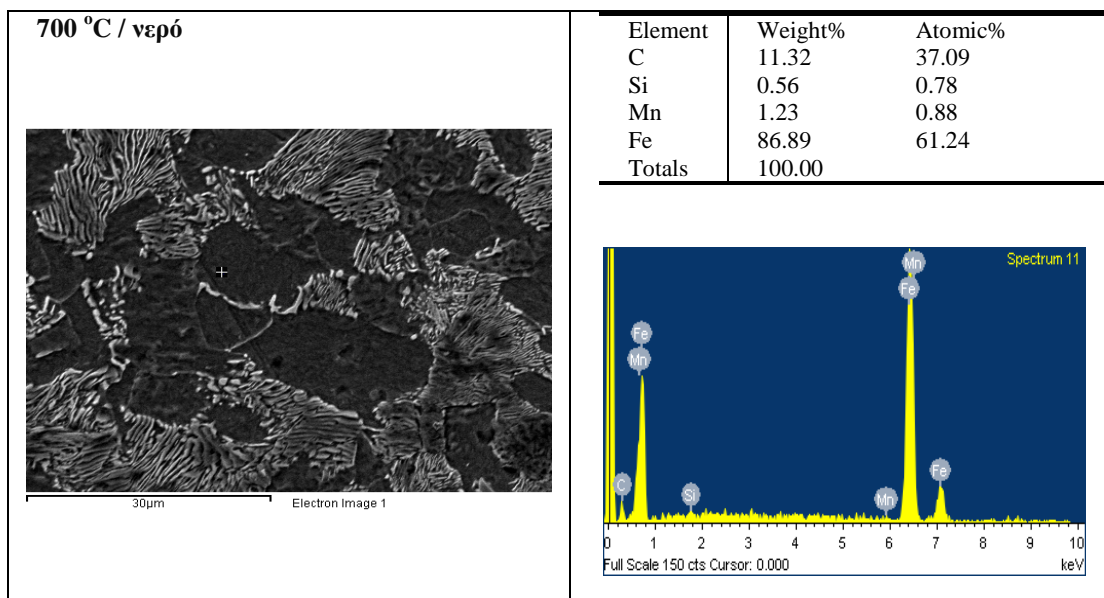
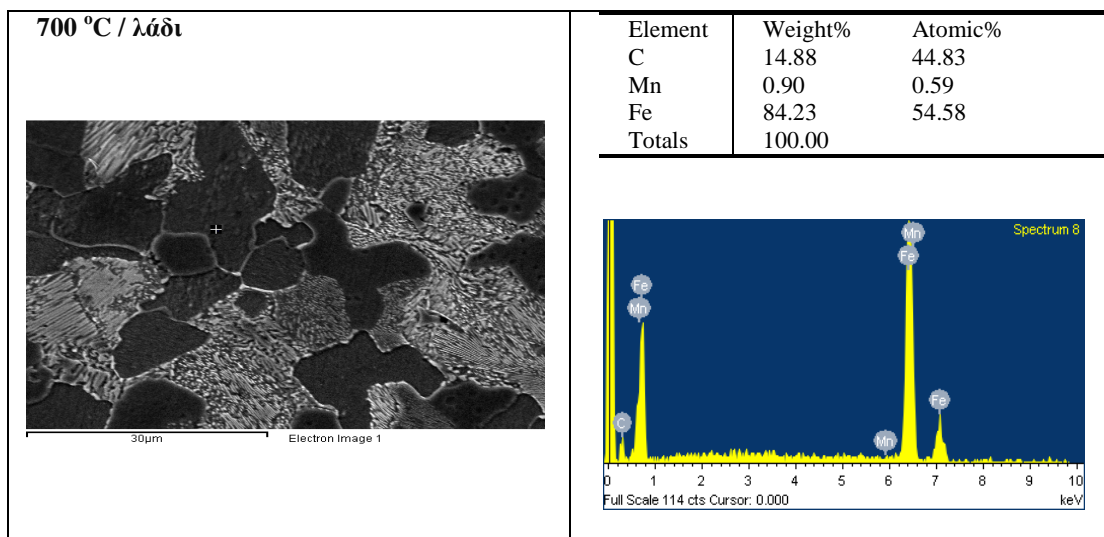


700 °C / αέρας



Element	Weight%	Atomic%
C	13.10	41.02
Si	0.70	0.93
Mn	0.66	0.45
Fe	85.54	57.60
Totals	100.00	

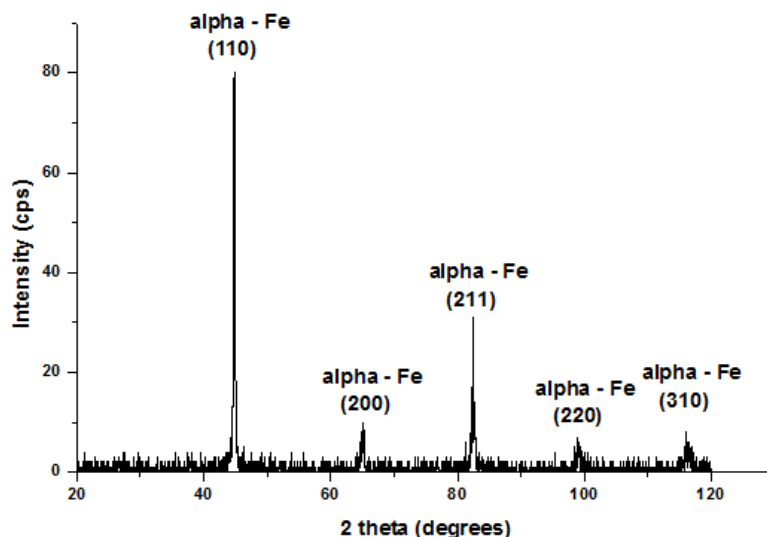




Εικόνα 3-7: Αποτελέσματα σημειακής χημικής μικροανάλυσης για τα θερμικά κατεργασμένα δείγματα.

3.2.6 Περίθλαση ακτίνων X (XRD - X-Ray Diffraction)

Στην εικόνα 3-8 παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας για το ανοπτημένο δοκίμιο στους 700 °C και με απόψυξη στον αέρα. Στο υπό εξέταση δείγμα ταυτοποιήθηκε μόνο η φερριτική φάση και όχι ο περλίτης ως μικροδομικό συστατικό. Αν και ο χάλυβας περιέχει περλίτη δεν ανιχνεύεται γιατί η συσκευή διαθέτει λάμπα Cu. Για το λόγο αυτό δεν πραγματοποιήθηκαν σαρώσεις για τα υπόλοιπα θερμικά ανοπτημένα δείγματα.



Εικόνα 3-8 : Ακτινοδιάγραμμα περιθλασιμετρίας του μετάλλου βάσης και ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης.

3.2.7 Μικρο-σκληρομέτρησης

Στον πίνακα 3-2 παρουσιάζονται οι τιμές της μικροσκληρότητας καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

Πίνακας 3-2: Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	No 1	No 2	No 3
Μικροσκληρότητα	234	263	285
Τυπική απόκλιση	6	9	12
	No 4	No 5	No 6
Μικροσκληρότητα	201	245	256
Τυπική απόκλιση	10	7	12
	No 7	No 8	No 9
Μικροσκληρότητα	189	218	234
Τυπική απόκλιση	14	12	9

Είναι εμφανές ότι, η τιμή της μηχανικής σκληρότητας αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού απόψυξης. Αυτό οφείλεται στη λεπτοκρυσταλλικότητα της μορφολογίας των κόκκων του φερρίτη που σχηματίζονται, στην μείωση της ενδοπλακιδιακής απόστασης που χαρακτηρίζει τους κόκκους του περλίτη, στην αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών και στο σχηματισμό φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Ωστόσο, διατηρώντας το μέσο απόψυξης σταθερό και αυξάνοντας τη θερμοκρασία ανόπτησης, παρατηρείται πτώση των τιμών της μηχανικής σκληρότητας. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων, στην ανακατανομή και μείωση των διαταραχών, στην αποτόνωση του τασικού πεδίου και στο γεγονός ότι δίνεται στο σύστημα ο απαιτούμενος χρόνος για να ολοκληρωθεί η διάχυση.

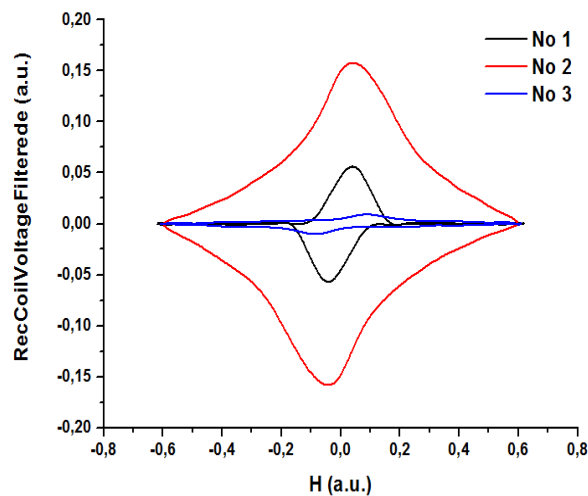
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

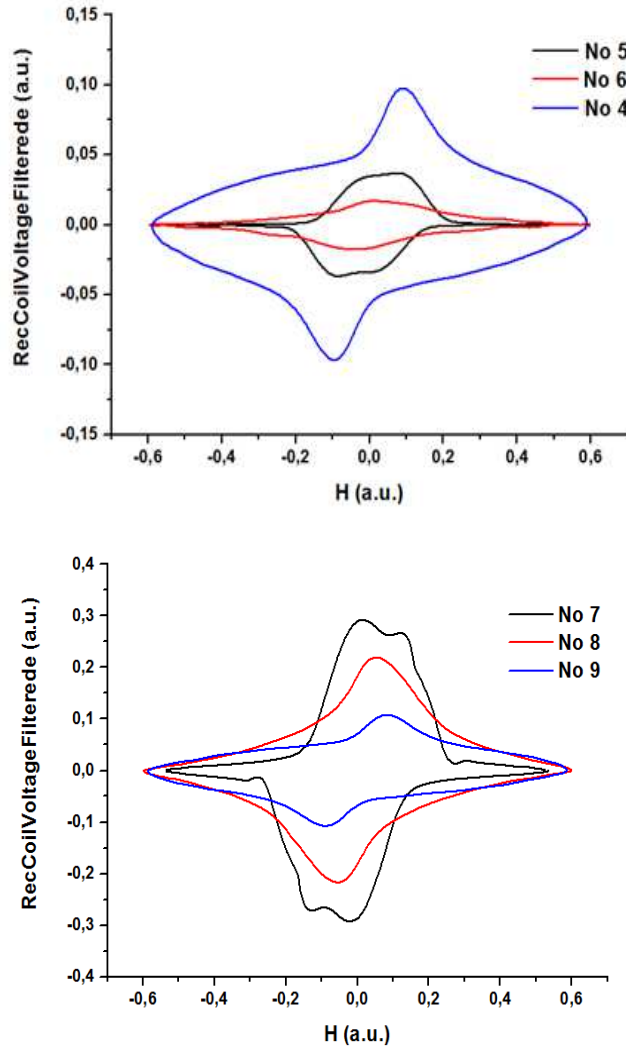
4.1 Εισαγωγή

Κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν ο μη καταστροφικός έλεγχος ανοπτημένων δοκιμών ναυπηγικού χάλυβα μέσω των τεχνικών της μέτρησης και καταγραφής της διαφορικής και επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας. Τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των μαγνητικών τεχνικών επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία της μαγνητικής απόκρισης.

4.2 Παρουσίαση συμπερασμάτων

Όπως παρουσιάστηκε και το προηγούμενο κεφάλαιο, οι ρυθμοί απόψυξης επηρεάζουν σημαντικά τη μαγνητική απόκριση του υλικού. Όπως συνοπτικά παρουσιάζεται στην εικόνα 4-1, για την ίδια θερμοκρασία ανόπτησης, είναι εμφανής η μείωση των τιμών του τοπικού μεγίστου στους βρόχους της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας κατά την απόψυξη στο νερό. Αντίθετα, όταν ο ρυθμός απόψυξης λαμβάνει την μικρότερη τιμή του κατά την απόψυξη στον αέρα, οι βρόχοι της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας γίνονται πιο στενοί και λαμβάνουν την υψηλότερη τιμή τοπικού μεγίστου. Για ενδιάμεσους ρυθμούς απόψυξης, ο βρόχος παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές τοπικού μεγίστου. Μορφολογικά είναι πεπλατυσμένος και στα σημεία καμπής παρουσιάζεται γωνιώδης, λόγω των εσωτερικών τάσεων, της πυκνότητας των διαταραχών, στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων και στο σχηματισμό φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας.

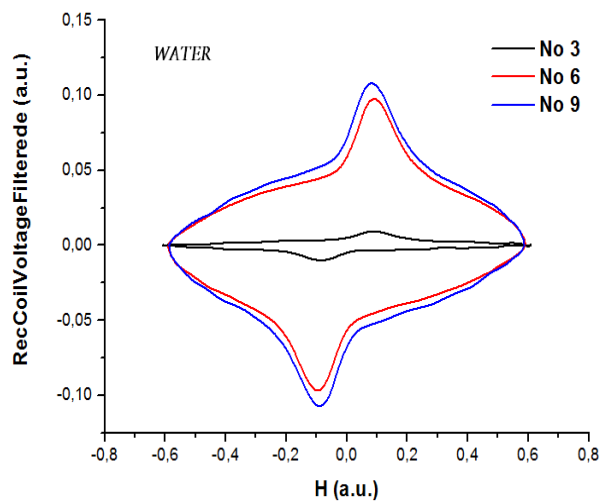
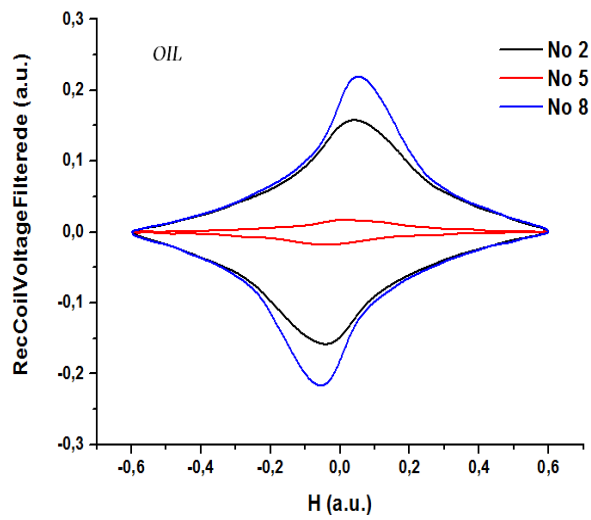
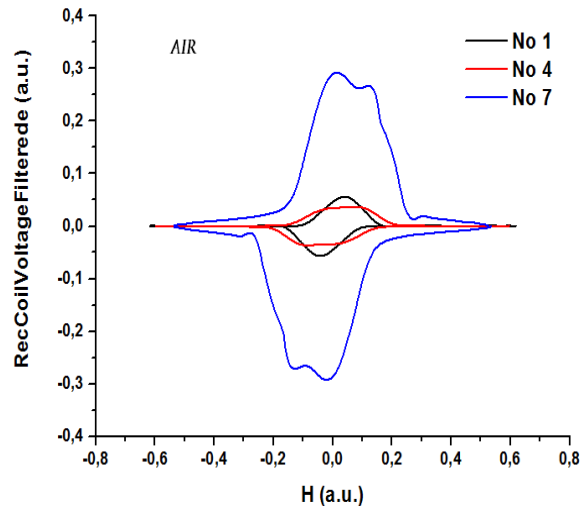




Εικόνα 4-1 : Μαγνητική διαπερατότητα σε σύγκριση με το ρυθμό απόψυξης (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία ανόπτησης)

Καθώς η ταχύτητα απόψυξης αυξάνεται, η διάχυση των ατόμων του υλικού διακόπτεται απότομα και δεν ολοκληρώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία μιας έντονα λεπτοκρυσταλλικής δομής με την παρουσία φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η παρουσία μεγαλύτερης επιφάνειας ορίων κόκκων παρεμποδίζει την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης και μειώνει τις τιμές ενδογενών μαγνητικών παραμέτρων όπως είναι η μαγνητική διαπερατότητα.

Ομοίως, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-2, διατηρώντας το μέσο άποψυξης σταθερό, η θερμοκρασία ανόπτησης επηρεάζει σημαντικά τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας.



Εικόνα 4-2 : Μαγνητική διαπερατότητα σε σύγκριση με τη θερμοκρασία ανόπτησης (διατηρώντας σταθερό το ρυθμό απόψυξης).

Η υψηλότερη θερμοκρασία ανόπτησης σε συνδυασμό με την βραδύτερη απόψυξη (απόψυξη στον αέρα) βελτιώνει σημαντικά τη μαγνητική απόκριση, οδηγώντας στο σχηματισμό ενός μαλακού μαγνητικά υλικού. Η βελτίωση της μαγνητικής συμπεριφοράς, για τις υψηλές θερμοκρασίες ανόπτησης παρατηρείται και στα υπόλοιπα μέσα απόψυξης. Ωστόσο, η απόψυξη στο λάδι και το νερό, οδηγεί στο σχηματισμό ενός σκληρού μαγνητικού υλικού με έντονη παρουσία εσωτερικών παραμενουσών τάσεων. Η παρουσία φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας και η γωνιώδης – βελονοειδής μορφολογία αποβαθμίζει τη μαγνητική συμπεριφορά του υλικού.

Όμοια με τους βρόχους της μαγνητικής διαπερατότητας η μορφή των βρόχων υστέρησης αλλάζει σημαντικά από τις παραμέτρους της θερμοκρασίας ανόπτησης και του μέσου απόψυξης. Όταν διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία ανόπτησης και αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης από την ανόπτηση στον αέρα στη βαφή στο νερό (εικόνα 3-1), η κλήση του βρόχου υστέρησης μειώνεται, δηλ. ο μαγνητικός βρόχος παρουσιάζεται να «γέρνει» προς τα δεξιά.

Ομοίως, όταν διατηρείται σταθερό το μέσο απόψυξης και αυξάνεται η θερμοκρασία ανόπτησης (εικόνα 3-2) παρατηρείται αλλαγή στην κλήση των βρόχων υστέρησης. Συγκεκριμένα, όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία ανόπτησης, η κλήση των βρόχων αυξάνεται, συνεπώς, το υλικό παρουσιάζει υψηλότερες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας όταν θερμαίνεται στους 700 °C για όλα τα μέσα απόψυξης. Ωστόσο, κατά τη βαφή του χάλυβα, ο βρόχος υστέρησης γίνεται πιο γωνιώδης, απότομος και διευρύνεται, αυξάνοντας το συνεκτικό πεδίο. Με τη σειρά της, η διεύρυνση του βρόχου επιβεβαιώνει τη μαγνητική σκληρότητα του υλικού. Επίσης, η τιμή της παραμένουσας μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή της όταν το μέσο απόψυξης είναι το νερό, εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου, η ταχύτερη απόψυξη οδηγεί σε μειωμένη απόδοση της μαγνητικής συμπεριφοράς.

Από τα διαγράμματα της χρονικής μεταβολής της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας είναι εμφανής η μεταβολή των καμπύλων, όταν αυξάνεται ο ρυθμός απόψυξης. Ωστόσο, δεν παρατηρείται έντονη αλλαγή των τιμών των τοπικών μεγίστων. Μια πιθανή εξήγηση είναι ο σχηματισμός ενός επιφανειακού στρώματος οξειδίων κατά τη βαφή των δειγμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στη συνέχεια, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και μελλοντική εργασία σε ό,τι αφορά την επιπρόσθετη μελέτη του ανοπτημένου υλικού και των δυνατοτήτων των μαγνητικών τεχνικών.

Αρχικά, αναγκαία κρίνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων μαγνητικού θορύβου Barkhausen (γραμμικών) στο ανοπτημένο υλικό, με σκοπό τη συσχέτιση της διακύμανσης των τιμών της μαγνητικής απόκρισης με τις μεταβολές τόσο σε επίπεδο μικροδομής όσο και σε επίπεδο μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων.

Εν συνεχεία, κρίνεται χρήσιμη η εξέταση του δείγματος μετά την εφαρμογή δυναμικών καταπονήσεων (κόπωσης) και ερπυσμού καθώς τα αποτελέσματα μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με αυτά του εφελκυσμού και των μαγνητικών αποκρίσεων των μαγνητικών μετρήσεων.

Ενδιαφέρον επίσης προκαλεί η δοκιμή δυσθραυστότητας (charpy tests) καθώς αποτελεί χρήσιμο εργαλείο ως προς τη συγκριτική μελέτη της αντοχής του ανοπτημένου υλικού και της μαγνητική απόκρισης αυτού.

Επίσης θεμιτή είναι η εφαρμογή όλων των προαναφερόμενων μαγνητικών τεχνικών και μεθόδων χαρακτηρισμού σε ανοπτημένα δοκίμια που έχουν θερμανθεί σε κυμαινόμενα εύρη θερμοκρασιών, για μεγαλύτερους χρόνους ανόπτησης. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν τόσο στον EN 9 χάλυβα όσο και σε άλλες κατηγορίες ναυπηγικού χάλυβα. Τέλος, μια παράμετρος εξέτασης μπορεί να αποτελέσει και η αλλαγή της συμμετρίας των υπό εξέταση δοκιμίων.