



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP

Διπλωματική Εργασία της Βαρούτη Ειρήνης
Επιβλέπων: Αναπλ. Καθ. Χριστοφόρου Ευάγγελος

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΟΓΝΩΣΙΑΣ

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ TRIP

Διπλωματική Εργασία της Βαρούτη Ειρήνης

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθ. Χριστοφόρου Ευάγγελος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 5/02/2010

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Αναπλ. Καθηγητής.....

Χρήστος Παναγόπουλος, Καθηγητής.....

Γεώργιος Φούρλαρης, Αναπλ. Καθηγητής.....

.ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2010

Copyright © Βαρούτη Ειρήνη, 2010
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σύνοψη	9
1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ[1,2].....	10
1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΑΥΤΟΥ	10
1.1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ	11
1.1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	11
1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ- ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ	12
1.2.1 ΑΤΟΜΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ	14
1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ	15
1.3.1 Σχέση μεταξύ μαγνήτισης, έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής	15
1.3.2 Μαγνητική διαπερατότητα-Μαγνητική επιδεκτικότητα	15
1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ.....	17
1.4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ	17
1.4.3 ΜΑΓΝΗΤΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ.....	20
1.4.4 ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΛΗ.....	23
1.5 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ	25
1.5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	26
1.5.2 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ	27
1.6 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.....	28
1.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ 1800 ΚΑΙ ΜΗ 1800	30
1.6.2 ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ.....	31
1.7 ΘΟΡΥΒΟΣ BARKHAUSEN	32
1.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	34
1.8.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	34
1.8.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ	34
1.8.3 Μαγνητική υστέρηση.....	34
1.8.4 Μαγνήτιση κορεσμού	36
1.8.5 Συνεκτικό πεδίο	36
1.8.6 Θερμοκρασία Curie.....	36
1.9 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	37
1.9.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	37
1.9.2 Διαμαγνητικά υλικά	37

1.9.3 Παραμαγνητικά υλικά.....	38
1.9.4 Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	38
1.9.5 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	39
1.9.6 Σιδηριμαγνητικά υλικά.....	39
1.10 ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	40
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ TRIP.....	42
2.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ.....	43
2.3 ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ TRIP.....	44
2.3.1 ΕΝΔΟΚΡΙΣΙΜΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ.....	45
2.3.2 ΙΣΟΘΕΡΜΟΣ ΜΠΑΙΝΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΥ.....	45
2.4 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	46
2.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	47
2.5.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗ.....	48
2.5.2 ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Ms.....	48
2.6 Θερμική κατεργασία του υλικού των δοκιμών.....	49
3.Αποκριση του Θορύβου Barkhausen.....	50
3.1 Απόκριση Μαγνητικού θορύβου Barkhausen σε μονοαξονική εφελκυστική φόρτιση.....	50
3.1.1 Πειραματική διάταξη μέτρησης Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen (MBN).....	50
3.1.2 Μέτρηση της έντασης του φαινομένου Barkhausen.....	51
3.2 Επιτόπια μέτρηση θορύβου Barkhausen σε μονοαξονική, εφελκυστική, Συνεχη καταπόνηση.....	52
3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	63
3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	64
3.5 Συμπεράσματα.....	69
4.ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ-ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ.....	70
4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	70
4.2 ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ-ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ Vickers.....	73
4.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ.....	74
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	74
4.5ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	76
4.6 Συσχέτιση μικροσκληρότητας και μακροσκληρότητας με τον θόρυβο Barkhausen.....	78
4.6.1 Συσχέτιση μικροσκληρότητας και Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen.....	79

4.6.2 Συσχέτιση μακροσκληρότητας και Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen.....	83
5. ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ	89
6. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)	94
6.1 Αρχή της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης –	94
Γενικά χαρακτηριστικά	94
Περιγραφή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.....	95
6.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)	97
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
Βιβλιογραφία	106

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, έχω την ηθική υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους, όσους συνετέλεσαν καθ' οιονδήποτε τρόπο σε όλη αυτή την πορεία.

Αρχικά, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας, Αναπληρωτή Καθηγητή, κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την καθοδήγηση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Καθηγητή, κ. Δρ Παναγόπουλο Χρήστο και στον Αναπληρωτή Καθηγητή, κ. Δρ. Φούρλαρη Γεώργιο, μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την βοήθειά τους, τις χρήσιμες συμβουλές τους και την καλοπροαίρετη κριτική τους.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη, αν δεν ευχαριστούσα τον τομεάρχη του Κέντρου Ερευνών Δοκιμών και Προτύπων (ΚΔΕΠ ΔΕΗ) κ. Τσανανά Γεώργιο που μας επέτρεψε να χρησιμοποιήσουμε τα όργανα μέτρησης μακροσκληρότητας και μικροσκληρότητας καθώς, επίσης, και την κα. Σταμέλλου Βασιλική και κ. Λουκά Παναγιώτη που διέθεσαν χρόνο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Κοσμά Κωνσταντίνο και στην Μπάλλιου Αγγελική για την πολυτιμότερη βοήθειά τους και τις χρησιμότερες υποδείξεις τους.

Ακόμα, μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών και κυρίως στους κ. Δρ. Τσακίριδη Πέτρο και στους Υποψήφιους Διδάκτορες, Κοκκωνίδη Παναγιώτη και Ορφανό Παναγιώτη.

Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καλούς μου φίλους και συμφοιτητές με τους οποίους μοιράστηκα τα τελευταία πέντε χρόνια της ζωής μου κυρίως, όμως ευχαριστώ την φίλη και συμφοιτήτριά μου, Γιαννούλη Χριστίνα, για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα και κυρίως για την συμπαράσταση της σε κάθε δυσκολία που ανέκυψε.

Θα ήμουν τουλάχιστον αγνώμων, αν δεν ευχαριστούσα τους γονείς μου Θεολόγο και Μαρία που με δίδαξαν να έχω ήθος και αξιοπρέπεια και να μην φοβάμαι να προσπαθώ για το καλύτερο και κλείνοντας, ευχαριστώ την αδερφή μου, Χριστίνα, γιατί ήταν και είναι πάντα δίπλα μου.

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία στόχος ήταν η μελέτη και η συσχέτιση του μαγνητικού Θορύβου Barkhausen με την πλαστική παραμόρφωση χάλυβα TRIP 800. Συνεπώς, δοκίμια χάλυβα TRIP 800 υποβλήθηκαν σε εφελκυστική καταπόνηση σε όλο το εύρος του διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης ενώ παράλληλα λαμβάνονταν μετρήσεις της απόκρισης του Θορύβου Barkhausen. Μετρήσεις της μαγνητικής Απόκρισης του Θορύβου Barkhausen ελήφθησαν και μετά την αποφόρτιση των δοκιμίων.

Για τη μελέτη της μικροδομής των υλικών πριν αλλά και μετά την πλαστική παραμόρφωση, χρησιμοποιήθηκε Ανάλυση μέσω Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης και Περιθλασιμετρία Ακτινών Χ, ενώ, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις μικροσκληρότητας και μακροσκληρότητας.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά σε γενικές έννοιες που αφορούν το σιδηρομαγνητισμό. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του χάλυβα TRIP 800 ενώ στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα στάδια που περιλαμβάνει η πειραματική διαδικασία πλαστικής παραμόρφωσης με παράλληλη μέτρηση των μαγνητικών παραμέτρων. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μικροσκληρομετρήσεων και μακροσκληρομετρήσεων. Τέλος στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αποτελέσματα της Περιθλασιμετρίας Ακτινών Χ και στο κεφάλαιο 6 τα αποτελέσματα από τη μελέτη μέσω Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης.

Λέξεις κλειδιά: Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen, Trip 800, σκληρότητα Vickers, XRD, SEM

Κεφάλαιο

1

1.ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ[1,2]

Το κεφάλαιο αυτό γίνεται μία σύντομη αναφορά στις έννοιες που σχετίζονται με το μαγνητικό πεδίο και στη μακροσκοπική συμπεριφορά της ύλης αυτού.

1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΑΥΤΟΥ

Μία από τις θεμελιώδεις έννοιες, που διέπουν την θεωρία του μαγνητισμού, είναι το μαγνητικό πεδίο. Όπως και το ηλεκτρικό πεδίο, έτσι και το μαγνητικό πεδίο είναι ένα διανυσματικό πεδίο δηλαδή μια διανυσματική ποσότητα που σχετίζεται με κάθε σημείο του χώρου και στηρίζεται στις εξής αρχές:

- Ένα κινούμενο φορτίο ή ένα ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί ένα **μαγνητικό πεδίο** στον χώρο (επιπρόσθετα με το ηλεκτρικό του πεδίο)
- Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη F πάνω σε κάθε κινούμενο φορτίο ή ηλεκτρικό ρεύμα που βρίσκεται μέσα στο πεδίο.

Όταν στο χώρο εγκαθίσταται μαγνητικό πεδίο, τότε ο χώρος αποκτά ιδιότητες που γίνονται εύκολα ανιχνεύσιμες, από την δύναμη που ασκεί το πεδίο σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, ή σε αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, από την ροπή που εφαρμόζεται σε ένα μαγνητικό δίπολο, όπως είναι ο ραβδόμορφος μαγνήτης ή ακόμα και από τον αναπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων σε ορισμένους τύπους ατόμων.

Αντίστροφα, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, μαγνητικό πεδίο γεννάται, κατά την κίνηση ενός ηλεκτρικού φορτίου, ή φορτισμένου σωματιδίου, όπως κατά την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από έναν αγωγό. Επίσης, μαγνητικό πεδίο παράγεται από πηγές, χωρίς την προφανή παρουσία ηλεκτρικών ρευμάτων, όπως από μόνιμους μαγνήτες. Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχουν συμβατικά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά οι τροχιακές και περιστροφικές κινήσεις των

ηλεκτρονίων, καθώς και η ιδιοπεριστροφή αυτών (spin), προκαλούν την μαγνήτιση του υλικού και την δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο χώρο γύρω από αυτό.

Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου **H** είναι το **ampere/m**. Το **ampere/m** εκφράζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα μακρύ σωληνοειδές που αποτελείται από **n** σπείρες ανά μέτρο και που διαρρέεται από ρεύμα έντασης **1/n amperes**. Η παραπάνω έκφραση είναι θεωρητική και έτσι υπάρχει πιο πρακτικός ορισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου μέσω ενός ρευματοφόρου αγωγού πεπερασμένου μήκους. Συγκεκριμένα, όταν ρεύμα **1 A** διαπερνά ευθύγραμμο αγωγό μήκους **1m**, τότε παράγεται μαγνητικό πεδίο με μορφή ομόκεντρων κύκλων κάθετων στον ρευματοφόρο αγωγό, έντασης **1/4π amperes/m** σε ακτινική απόσταση 1m.

1.1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ

Όταν ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται σε ένα μέσο από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, η απόκριση του μέσου είναι η **μαγνητική του επαγωγή B**. Η μαγνητική επαγωγή, που είναι γνωστή και ως **πυκνότητα μαγνητικής ροής** (flux density), καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα υλικό (ή μη) μέσο αντιδρά όταν βρίσκεται σε χώρο που καταλαμβάνεται από μαγνητικό πεδίο.

Στη συνέχεια θα ορίζεται η μαγνητική ροή **Φ**. Όταν στον κενό χώρο δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται η μαγνητική ροή **Φ**. Η μαγνητική ροή δίνεται σε **Weber (Wb)** και ο ρυθμός μεταβολής της μπορεί να μετρηθεί, καθώς παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη Η.Ε.Δ σε κλειστό κύκλωμα αγωγού, μέσα από το οποίο διέρχεται η ροή. Όμως, το ποσό της μαγνητικής ροής που παράγεται για ορισμένο πεδίο έντασης H, εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου και διαφέρει από το ένα στο άλλο.

Η μαγνητική επαγωγή μπορεί να ορισθεί σαν η μαγνητική ροή **1 Wb**, που περνά από επιφάνεια εμβαδού **1 m²**. Καθώς η μαγνητική ροή είναι ιδιότητα που εξαρτάται από το μέσο, η μαγνητική επαγωγή είναι και αυτή ιδιότητα του μέσου, σε αντίθεση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, που είναι ιδιότητα του χώρου.

1.1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Ο σαφής διαχωρισμός μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και έντασης μαγνητικού πεδίου είναι πολύ κρίσιμος. Μπορεί να αναφερθεί ότι το **B** είναι γραμμική συνάρτηση του **H** και το μέγεθος που παριστάνει τη σχέση μεταξύ έντασης μαγνητικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής καλείται **μαγνητική διαπερατότητα του μέσου**. Συμβολίζεται με **μ** και μπορεί να είναι βαθμωτή συνάρτηση, ή πραγματική σταθερά. Ειδικότερα, στον κενό χώρο έχουμε:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

όπου το μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και ισούται με $4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$.

Η κατηγορία των υλικών που θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην συνέχεια είναι τα φερρομαγνητικά. Στα υλικά αυτά, το \mathbf{B} παύει να είναι γραμμική συνάρτηση του \mathbf{H} και για την ακρίβεια δεν είναι πλέον ούτε μία μονοσήμαντα συνάρτηση του \mathbf{H} . Εδώ έγκειται η κρισιμότητα του διαχωρισμού ανάμεσα στα δύο αυτά μεγέθη και μία απλή χάραξη του βρόχου υστέρησης αρκεί για να γίνει αυτή προφανής. Η σχέση $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ εξακολουθεί να ισχύει, όμως σε τέτοιου τύπου υλικά μέσα, η μαγνητική διαπερατότητα δεν είναι απαραίτητα σταθερή. Μάλιστα, αν και στα παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά το μ παραμένει σταθερό για ένα μεγάλο εύρος τιμών του \mathbf{H} , στα φερρομαγνητικά η διαπερατότητα εξαρτάται έντονα από την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

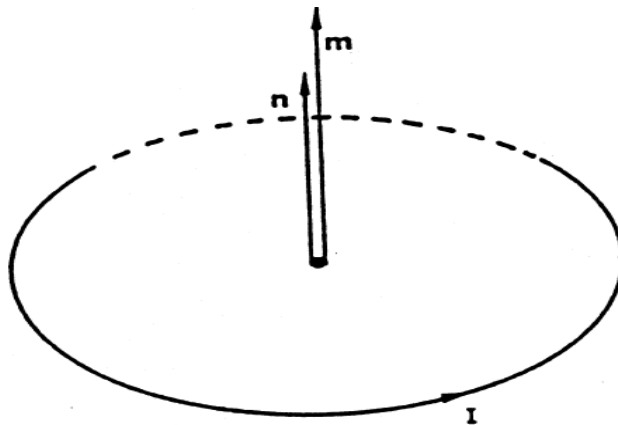
1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΔΙΠΟΛΟ- ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Το απλούστερο κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να προκαλέσουμε μαγνητικό πεδίο είναι ο αγώγιμος κυκλικός βρόχος. Ο βρόχος ρεύματος και το μαγνητικό δίπολο αποτελούν τις δύο στοιχειώδεις οντότητες του μαγνητισμού. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει μια μαγνητική διπολική ροπή που σχετίζεται με τη στοιχειώδη οντότητα.

Στον αγώγιμο κυκλικό βρόχο, που για λόγους απλότητας θα θεωρήσουμε ότι είναι επίπεδος, η μαγνητική διπολική ροπή ισούται με:

$$\vec{m} = IA\vec{n}$$

όπου I είναι η ένταση του ρεύματος, \mathbf{A} η επιφάνεια που οριοθετεί ο βρόχος και \mathbf{n} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα στην επιφάνεια του βρόχου και με φορά τέτοια, ώστε όταν κοιτάζουμε προς την ίδια φορά, το ρεύμα να έχει γύρω μας τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροπής είναι $\text{Amp}\cdot\text{m}^2$.



Σχήμα 1.1: Μαγνητική διπολική ροπή βρόχου ρεύματος εμβαδού A

Όταν μια μαγνητική ροπή βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε επενεργεί σε αυτή μία ροπή, η οποία τείνει να περιστρέψει και να ευθυγραμμίσει τον άξονα της με το μαγνητικό πεδίο. Το δίπολο, δηλαδή τείνει να ευθυγραμμιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική διπολική ροπή να είναι παράλληλη με την μαγνητική επαγωγή του πεδίου, ή εναλλακτικά, το πεδίο, που ο βρόχος ρεύματος δημιουργεί, να είναι παράλληλο με αυτήν. Η μηχανική ροπή που ασκείται σε ένα μαγνητικό δίπολο \mathbf{m} που βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο επαγωγής \mathbf{B} είναι:

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$$

και στο κενό:

$$\vec{\tau} = \mu_0 \vec{m} \times \vec{H}$$

Η ενέργεια του δίπολου με ροπή \mathbf{m} παρουσία μαγνητικού πεδίου με επαγωγή \mathbf{B} είναι:

$$E = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$

και στο κενό:

$$E = -\mu_0 \vec{m} \cdot \vec{H}$$

Ο στοιχειώδης βρόχος ρεύματος είναι και αυτός γνωστός ως μαγνητικό δίπολο για ιστορικούς λόγους. Το πεδίο που δημιουργεί ένας τέτοιος βρόχος σε μεγάλη απόσταση είναι όμοιο με το πεδίο που θα δημιουργούσε μια υποθετική κατανομή δύο αντίθετων μαγνητικών πόλων \mathbf{p} σε απόσταση l μεταξύ τους.

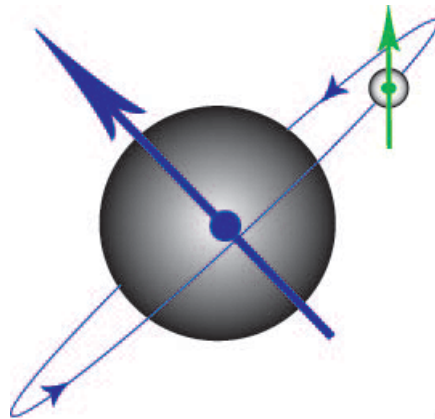
1.2.1 ΑΤΟΜΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ

Ανάλογα, ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται σε ένα άτομο συμπεριφέρεται σαν ένας βρόχος ρεύματος και έχει μαγνητική διπολική ροπή, η οποία ονομάζεται **τροχιακή μαγνητική ροπή** $m_{\text{τροχ}}$ (orbital magnetic moment). Το μέτρο της τροχιακής μαγνητικής ροπής είναι ίσο με:

$$m_{\text{τροχ}} = -\frac{e}{2m_e} L$$

Όπου L είναι η τροχιακή στροφορμή, m_e είναι η μάζα του ηλεκτρονίου και e το φορτίο του. Το ηλεκτρόνιο έχει επίσης και μια εσωτερική στροφορμή S , που αντιστοιχεί στο spin του. Στο spin του ηλεκτρονίου οφείλεται η ύπαρξη της **μαγνητικής ροπής spin**, η οποία συμβολίζεται m_{spin} .

Η συνολική μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου απαρτίζεται από τη $m_{\text{τροχ}}$ και τη m_{spin} , προστιθέμενες με τον κατάλληλο τρόπο εφόσον αμφότερες είναι διανυσματικά μεγέθη. Επιπλέον, η συνολική μαγνητική ροπή $m_{\text{ατομ}}$ του ατόμου εξαρτάται από την τροχιακή κίνηση και τα spin των ηλεκτρονίων.



Σχήμα 1.2: Η μαγνητική ροπή που προκαλείται από την τροχιακή κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα και την περιστροφή του ηλεκτρονίου γύρω από τον άξονα του.

1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

Ως μαγνήτιση ορίζεται η μαγνητική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού μέσου:

$$\vec{M} = n\vec{m}$$

Όπου n είναι ο αριθμός των μαγνητικών διπολικών ροπών m ανά κυβικό μέτρο. Η μονάδα της μαγνήτισης θα είναι τότε A/m όπως και της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Από τη συσχέτιση της μαγνήτισης με τη μαγνητική επαγωγή και λόγω του ορισμού της μαγνητικής επαγωγής ως πυκνότητα μαγνητικής ροής, έχουμε ότι:

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

1.3.1 ΣΧΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ, ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η μαγνητική επαγωγή στο κενό, όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, είναι $\mu_0 H$, ενώ σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, η συνεισφορά από τη μαγνήτιση του υλικού είναι $\mu_0 M$. Η μαγνητική επαγωγή λοιπόν θα είναι απλά το διανυσματικό άθροισμα των δύο μεγεθών:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Όπου το B δίνεται σε **Tesla**, ενώ το M και το H σε **Ampere/m**. Η παραπάνω εξίσωση είναι αληθής σε κάθε περίπτωση. Το μαγνητικό πεδίο H μπορεί να δημιουργηθεί από ηλεκτρικά ρεύματα έξω από το υλικό, ή από ένα σωληνοειδές ή από ένα ηλεκτρομαγνήτη, ή τέλος από ένα μόνιμο μαγνήτη. Η μαγνήτιση είναι αποτέλεσμα των μη αντισταθμισμένων spin και τροχιακών κινήσεων των ασύζευκτων ηλεκτρονίων στον όγκο του υλικού.

1.3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν τα μεγέθη που καθορίζουν την απόκριση-αντίδραση των μαγνητικών υλικών παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Τα μεγέθη αυτά είναι η **μαγνητική διαπερατότητα (permeability)** που ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Και η μαγνητική επιδεκτικότητα (susceptibility) η οποία δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$\chi = \frac{M}{H}$$

Επίσης ορίζουμε την διαφορική διαπερατότητα και επιδεκτικότητα από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\acute{\mu} = \frac{dB}{dH}$$

$$\acute{\chi} = \frac{dM}{dH}$$

Τα B και M δύνανται να είναι ή όχι γραμμικές συναρτήσεις του H, ανάλογα με τον τύπο του υλικού. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι η διαπερατότητα και η επιδεκτικότητα δεν είναι απαραίτητα πραγματικές σταθερές.

Στην πράξη συναντάται ο όρος σχετική μαγνητική διαπερατότητα, που χρησιμοποιείται κυρίως στο S.I σύστημα και ορίζεται ως εξής:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του κενού είναι προφανώς ίση με 1. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα συνδέεται στενά με την μαγνητική επιδεκτικότητα και η ακόλουθη σχέση ισχύει σε κάθε περίπτωση:

$$\mu_r = \chi + 1$$

Άλλα μεγέθη που συχνά χρησιμοποιούνται είναι η αρχική διαπερατότητα και η αρχική επιδεκτικότητα. Οι ποσότητες αυτές παριστάνουν τις τιμές των αντιστοίχων μεγεθών στην αρχή της καμπύλης μαγνήτισης του υλικού.

$$\mu_{in} = \left(\frac{dB}{dH} \right)_{B=0, H=0} = \left(\frac{B}{H} \right)_{B \rightarrow 0, H \rightarrow 0}$$

$$\chi_{in} = \left(\frac{dM}{dH} \right)_{M=0, H=0} = \left(\frac{M}{H} \right)_{M \rightarrow 0, H \rightarrow 0}$$

1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Η αιτία για τη διαίρεση σε περιοχές είναι ότι η συνολική ενέργεια του υλικού είναι μικρότερη από ότι στη κατάσταση ομοιόμορφης μαγνήτισης. Δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική ενέργεια του υλικού καθώς το πρόβλημα αυτό είναι πολύ δύσκολο, αλλά μπορούμε να πούμε πως η συνολική ενέργεια αποτελείται από διάφορες συνεισφορές και αυτή η περιγραφή προσφέρει καλή δικαιολογία για το διαχωρισμό σε περιοχές. Θα εξεταστούν 4 είδη ενέργειας που συνεισφέρουν στη συνολική ενέργεια του υλικού:

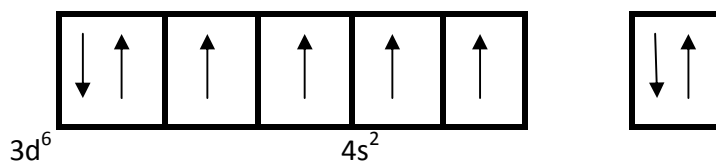
$$E = E_{\text{ανταλλαγής}} + E_{\text{μαγνητοστατική}} + E_{\text{μαγνητοκρυσταλλική}} + E_{\text{μαγνητοελαστική}}$$

1.4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά μπορούν να έχουν μόνιμη μαγνήτιση ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου λόγω της άπειρης επιδεκτικότητάς τους.

Σε ένα μαγνητισμένο κρύσταλλο σιδήρου, όλες οι μαγνητικές ροπές έχουν την ίδια φορά και είναι όλες παράλληλες προς την διεύθυνση [100]. Επομένως, η συνολική μαγνήτιση θα είναι σε αυτή τη διεύθυνση.

Η ηλεκτρονιακή δομή του ατόμου είναι $[\text{Ar}]3d^64s^2$. Σε ένα απομονωμένο άτομο σιδήρου, τέσσερα από τα πέντε τροχιακά της υποστιβάδας 3d είναι μη κατειλημμένα. Λόγω του κανόνα του Hund, τα ηλεκτρόνια τείνουν να ευθυγραμμίσουν τα spin τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα πέντε τροχιακά 3d να περιέχουν ένα ζεύγος ηλεκτρονίων και τέσσερα μονήρη ηλεκτρόνια.



Σχήμα 1.3: Ηλεκτρονιακή διάταξη των ηλεκτρονίων σθένους του ατόμου του σιδήρου

Το απομονωμένο άτομο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια με παράλληλα spin και επομένως η spin μαγνητική του ροπή είναι 4β . Η ποσότητα β είναι ίση με $\beta = eh/2m_e$ και ονομάζεται **μαγνητόνη του Bohr**.

Η προέλευση του κανόνα του Hund έγκειται στο γεγονός ότι, όταν τα spin είναι παράλληλα, τότε, λόγω της αρχής του αποκλεισμού του Pauli, τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να καταλαμβάνουν τροχιακά με διαφορετικό μαγνητικό κβαντικό αριθμό m_l , να έχουν δηλαδή διαφορετική κατανομή στο χώρο.

Η ύπαρξη διαφορετικών τιμών μαγνητικού κβαντικού αριθμού m_l έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια μεταξύ των ηλεκτρονίων λόγω απώθησης Coulomb να είναι στην περίπτωση αυτή μικρότερη από ότι θα ήταν στη περίπτωση όπου τα ηλεκτρόνια έχουν αντίθετα spin καταλαμβάνοντας το ίδιο τροχιακό και επομένως την ίδια περιοχή χώρου. Συνεπώς, αν και η ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρονίων δεν έχει σχέση με τις μαγνητικές δυνάμεις, εξαρτάται όμως από τον προσανατολισμό των spin τους, ή από τις spin μαγνητικές ροπές τους, και είναι μικρότερη όταν **τα spin είναι παράλληλα**. Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ του spin του ηλεκτρονίου i και του ηλεκτρονίου j έχει τη μορφή:

$$E_{ij} = -2J\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

όπου J είναι μία σταθερά που καλείται το ολοκλήρωμα ανταλλαγής. Η τιμή του J υπολογίζεται με τη κβαντική μηχανική. Αν $J > 0$ η ενέργεια E_{ij} είναι ελάχιστη όταν τα διανύσματα \vec{S}_i και \vec{S}_j είναι παράλληλα. Επομένως $J > 0$ είναι η συνθήκη για σιδηρομαγνητισμό. Αν $J < 0$ η τάξη θα ήταν αντισιδηρομαγνητική. Το μέγεθος του J εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των ηλεκτρονίων i και j και γενικά μειώνεται γρήγορα με αυξανόμενη απόσταση.

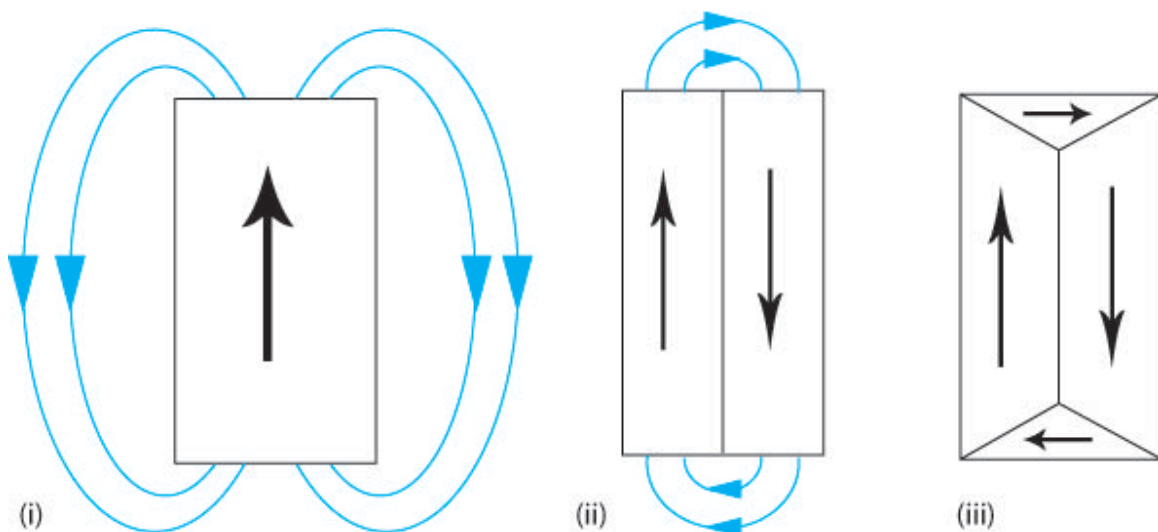
Εν τέλει, δύο ηλεκτρόνια αποκτούν παράλληλα spin, όχι λόγω μιας απευθείας μαγνητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των spin μαγνητικών ροπών τους, αλλά λόγω της **αρχής του αποκλεισμού του Pauli** και της **ενέργειας της ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης**. Τα δύο αυτά δεδομένα συγκροτούν από κοινού **την αλληλεπίδραση ανταλλαγής**, η οποία εξαναγκάζει δύο ηλεκτρόνια τέτοια κατανομή στο χώρο ώστε να ελαχιστοποιείται η ηλεκτροστατική ενέργεια. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον ένα απομονωμένο άτομο Fe έχει στην υποστιβάδα 3d τέσσερα μονήρη ηλεκτρόνια.

Στον κρύσταλλο, βέβαια, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια δεν είναι δεσμευμένα από τα άτομα Fe από τα οποία προέρχονται. Αυτό ισχύει ειδικά για τα ηλεκτρόνια 4s. Τα ηλεκτρόνια χαρακτηρίζονται από κυματοσυναρτήσεις που ανήκουν σε όλο το στερεό. Στο κρυσταλλικό επίπεδο, για το Fe, το Co, και το Ni, εξακολουθεί να ισχύει κάτι σαν το κανόνα του Hund. Αν δύο ηλεκτρόνια 3d αποκτήσουν παράλληλο spin και καταλάβουν διαφορετικές κυματοσυναρτήσεις, τότε η αμοιβαία απώθηση Coulomb που προκύπτει μεταξύ τους και με τα άλλα ηλεκτρόνια, όπως επίσης και η έλξη με τα θετικά ιόντα Fe, έχουν ως αποτέλεσμα μια συνολική μείωση της δυναμικής ενέργειας. Η μείωση της ενέργειας οφείλεται και πάλι στην αλληλεπίδραση ανταλλαγής και είναι άμεσο αποτέλεσμα της αρχής του αποκλεισμού του Pauli και των δυνάμεων Coulomb. Επομένως, η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων 3d παραλληλίζουν τα spin τους χωρίς να χρειάζονται την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Πάρα ταύτα η ενέργεια ανταλλαγής είναι βασική για το σιδηρομαγνητισμό (είναι ένας τρόπος να περιγράψουμε το εσωτερικό (μοριακό) πεδίο) αλλά δεν εξηγεί το διαχωρισμό σε μαγνητικές περιοχές και πρέπει να εισαχθούν άλλες μορφές ενέργειας για να δοθεί μια εξήγηση.

1.4.2 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Στην εικόνα 1.4 απεικονίζεται ένας μονοκρύσταλλος ο οποίος, λόγω του φαινομένου του σιδηρομαγνητισμού, έχει παραμένουσα μαγνήτιση. Ο κρύσταλλος είναι σαν μια συμπαγής μαγνητική ράβδος, και γύρω του υπάρχουν οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Στο μαγνητικό πεδίο αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια η οποία ονομάζεται **μαγνητοστατική ενέργεια**. Για την ελαχιστοποίηση της συνολικής ενέργειας, είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της μαγνητοστατικής ενέργειας. Μπορούμε να ελαττώσουμε την ενέργεια αυτή, διαιρώντας τον κρύσταλλο σε περιοχές. Προσθέτοντας περισσότερες περιοχές, αυξάνεται βέβαια η ενέργεια ανταλλαγής μιας και οι περιοχές δεν μπορούν να ευθυγραμμιστούν παράλληλα. Παρά ταύτα, η συνολική ενέργεια μειώνεται αφού η μαγνητοστατική ενέργεια έχει μεγαλύτερη επίδραση. Η μαγνητοστατική ενέργεια μπορεί να μηδενιστεί αν η δομή των μαγνητικών περιοχών είναι τέτοια ώστε να εξαλείφεται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (κλειστή μαγνητική ροή). Το μέγεθος των περιοχών καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ της μείωσης της μαγνητοστατικής ενέργειας και της αύξησης της συνολικής επιφάνειας των συνόρων μεταξύ των περιοχών, όταν ο αριθμός των περιοχών αυξάνεται.



Σχήμα 1.4: i) Μια μαγνητισμένη ράβδος στην οποία υπάρχει μόνο μια μαγνητική περιοχή, και η οποία δημιουργεί επομένως εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ii) Ο σχηματισμός δύο μαγνητικών περιοχών με αντίθετη μαγνήτιση μειώνει το εξωτερικό

μαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν παρ' όλα αυτά δυναμικές γραμμές στα άκρα του μαγνήτη. *iii*) Ο σχηματισμός περιοχών εγκλεισμού στα άκρα περιορίζει τις εξωτερικές δυναμικές γραμμές.

1.4.3 ΜΑΓΝΗΤΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΛΟΓΩ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ

Η κρυσταλλική δομή έχει μεγάλη επιρροή στην συνολική ενέργεια ενός μαγνητισμένου υλικού. Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία είναι μια εγγενής, εσωτερική ιδιότητα ενός υλικού. Όταν μια ιδιότητα από ένα υλικό είναι συνάρτηση της κατεύθυνσης, αυτήν η ιδιότητα λέγεται ότι εμφανίζει ανισοτροπία. Η προτίμηση για την μαγνήτιση να είναι σε μια καθορισμένη κατεύθυνση είναι ένδειξη μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας.

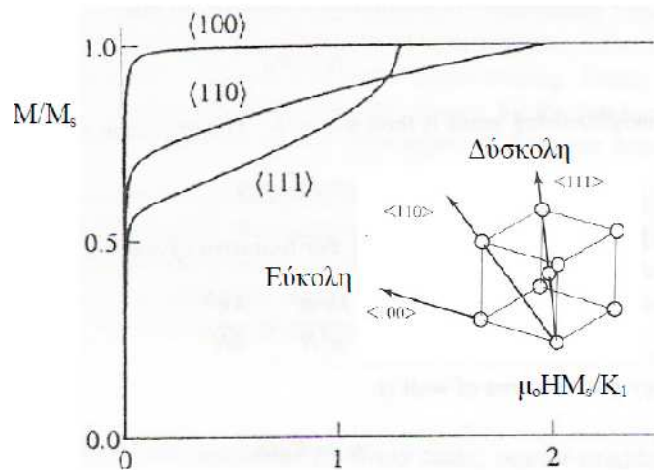
Η προέλευση της ανισοτροπίας δεν είναι μαγνητοστατική αλλά ηλεκτροστατική και εξηγείται με βάση τη κβαντομηχανική (όπως και η ενέργεια ανταλλαγής). Η μαγνητική ανισοτροπία οφείλεται στη σύζευξη μεταξύ του ηλεκτρονικού spin, που καθορίζει κυρίως τη μαγνητική ροπή και της κατανομής των ηλεκτρονικών φορτίων (τροχιάς). Η κατανομή των ηλεκτρονικών φορτίων, όπως προαναφέραμε, επηρεάζεται από το κρυσταλλικό πεδίο των γειτονικών ατόμων (σύζευξη τροχιάς-πλέγματος). Όταν ένα εξωτερικό πεδίο προσπαθεί να αλλάξει τη κατεύθυνση του spin ενός ηλεκτρονίου, η τροχιά τείνει επίσης να αλλάξει κατεύθυνση, όμως εξαιτίας της ισχυρής σύζευξης με το πλέγμα, αντιστέκεται στη προσπάθεια στροφής του spin. Η ενέργεια ανισοτροπίας για τη περιστροφή του σπίν μακριά από τον εύκολο άξονα είναι επομένως η ενέργεια που οφείλεται στη σύζευξη spin-τροχιάς.

Έτσι ένα σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει εύκολες και δύσκολες κατευθύνσεις μαγνήτισης. Οι εύκολοι κρυσταλλογραφικοί άξονες είναι προτιμητέοι και το διάνυσμα μαγνήτισης είναι παράλληλο σε αυτούς. Οι δύσκολοι κρυσταλλογραφικοί άξονες απαιτούν πεδίο υψηλότερης έντασης για την επίτευξη ισοδύναμης μαγνήτισης. Η ενεργειακή διαφορά, συνεπώς, μεταξύ της μαγνήτισης κατά μήκος ενός εύκολου άξονα και ενός δύσκολου, αποτελεί την μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια. Αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τον σχηματισμό περιοχών στις οποίες το διάνυσμα της μαγνήτισης θα είναι παράλληλο με τους εύκολους κρυσταλλογραφικούς άξονες.

Το ιδανικό υλικό θα ήταν αυτό που θα είχε κρυσταλλογραφικούς άξονες κάθετους ο ένας στον άλλο έτσι ώστε να υπάρχει ελαχιστοποίηση και της μαγνητοκρυσταλλικής και της μαγνητοστατικής ενέργειας.

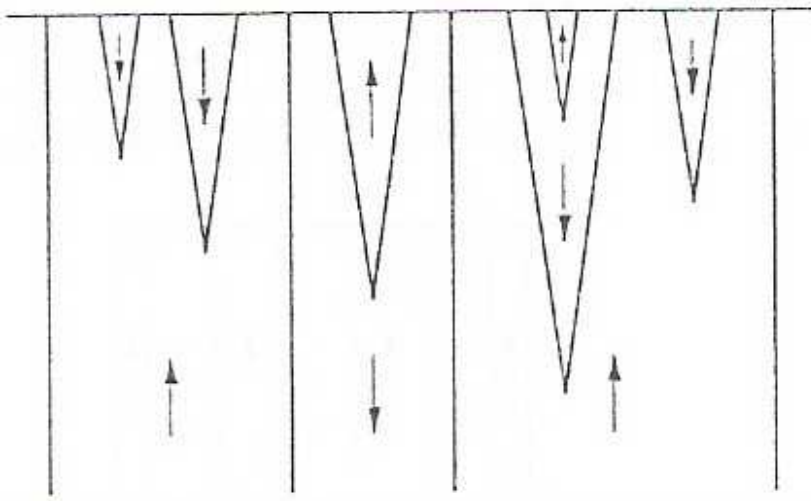
Όσον αφορά το σίδηρο (BCC), τα ατομικά spin που βρίσκονται σε μια περιοχή παραλληλίζονται πιο εύκολα σε μια από τις έξι [100] διευθύνσεις. Επομένως, οι διευθύνσεις αυτές είναι οι εύκολες διευθύνσεις της μαγνήτισης. Όταν εφαρμόζεται ένα πεδίο μαγνήτισης H , παράλληλα με μια από τις διευθύνσεις, τότε τα τοιχώματα των περιοχών μετακινούνται επιτρέποντας στις

περιοχές που έχουν μαγνήτιση με την ίδια φορά με το \mathbf{H} να αναπτυχθούν εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση έχει αντίθετη φορά από το \mathbf{H} .



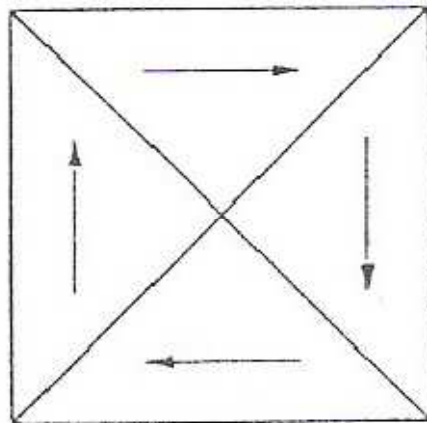
Σχήμα 1.5: Μαγνήτιση κρύσταλλου Fe όταν το πεδίο αυξάνεται σε διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις. Είναι φανερό ότι είναι πιο εύκολη η μαγνήτιση του σιδήρου στη κατεύθυνση <100> παρά στην <110> ή <111>.

Έτσι έχουμε τώρα μία ολοκληρωμένη εικόνα της αιτίας για την ύπαρξη μαγνητικών περιοχών. Ο διαχωρισμός οφείλεται στη μαγνητοστατική ενέργεια και ο προσανατολισμός της ομοιόμορφης μαγνήτισης κάθε περιοχής είναι κατά προτίμηση στη κατεύθυνση κάποιου εύκολου άξονα ανισotropίας, εξ αιτίας της ενέργειας ανισotropίας. Στη περίπτωση μοναξονικών κρυστάλλων μπορούμε να προβλέψουμε ότι οι μαγνητικές περιοχές θα είναι της μορφής του σχήματος 1.6. Στη πραγματικότητα η δομή είναι πιο πολύπλοκη στις περισσότερες περιπτώσεις. Κοντά στην επιφάνεια, όπου το απομαγνητίζον πεδίο είναι συνήθως ισχυρότερο, υπάρχουν ανάστροφες περιοχές ακίδας (reverse spike domains) (σχήμα 1.7) που περιορίζουν τη μαγνητοστατική ενέργεια χωρίς να προσθέσουν υπερβολικά στη συνολική επιφάνεια των συνόρων μεταξύ των περιοχών.



Σχήμα 1.6 Ανάστροφες μαγνητικές περιοχές σε υλικό με μοναξονική ανισοτροπία.

Σε κυβικά πλέγματα όπως ο σίδηρος μία πιθανή δομή των μαγνητικών περιοχών είναι όπως στο Σχήμα 5. Η μαγνητική ροή ακολουθεί κλειστή διαδρομή μέσα στο δείγμα και δεν σχηματίζονται πόλοι στην επιφάνεια ή μέσα στον όγκο του δείγματος και η μαγνητοστατική ενέργεια είναι επομένως μηδενική. Οι περιοχές αυτές λέγονται περιοχές κλειστής ροής (closure domains).



Σχήμα 1.7. Μαγνητικές περιοχές σε υλικό με κυβική ανισοτροπία

Αυτή η δομή περιλαμβάνει σχετικά μικρή ενέργεια ανταλλαγής και ανισοτροπίας, αν οι περιοχές είναι μαγνητισμένες παράλληλα προς τις κατευθύνσεις $\langle 100 \rangle$. Όμως τέτοιες απλές δομές δεν συμβαίνουν συνήθως, στη πραγματικότητα υπάρχει ένας πολύ μεγαλύτερος

αριθμός περιοχών με μικρότερες διαστάσεις. Για να διαπιστώσουμε την αιτία, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη το τέταρτο όρο που είναι η μαγνητοελαστική ενέργεια.

1.4.4 ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΣΥΣΤΟΛΗ

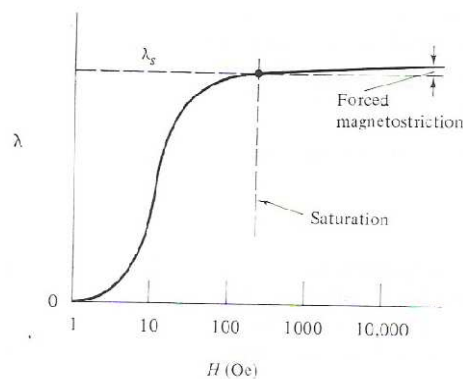
Όταν παραμορφώνουμε ένα σιδηρομαγνητικό κρύσταλλο (ασκώντας του μια τάση) σε μια του διεύθυνση, τότε μεταβάλλουμε τις μαγνητικές ιδιότητες του κρυστάλλου. Κατά το αντίστροφο φαινόμενο, η μαγνήτιση του κρυστάλλου δημιουργεί παραμορφώσεις, ή μεταβολές των φυσικών διαστάσεων του κρυστάλλου. Αυτές οι μεταβολές, βέβαια, είναι απειροελάχιστες, όμως, είναι σημαντικές καθώς επηρεάζουν τη δομή των μαγνητικών περιοχών.

Όταν ένας κρύσταλλος βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό που είναι παράλληλο προς την εύκολη διεύθυνση του, τότε επιμηκύνεται σε αυτή τη διεύθυνση και συστέλλεται στις κάθετες διευθύνσεις (Σχήμα 1.8). Η μία κίνηση αντιτίθεται στην κίνηση της άλλης και έτσι προκαλούνται ελαστικές τάσεις στο υλικό οι οποίες είναι ανάλογες του όγκου των περιοχών που συστέλλονται.

Η διαμήκης επιμήκυνση $\Delta l/l$ παράλληλα προς τη διεύθυνση της μαγνήτισης ονομάζεται **σταθερά μαγνητοσυστολής**, και συμβολίζεται με λ . Η σταθερά μαγνητοσυστολής εξαρτάται από την κρυσταλλική διεύθυνση και μπορεί να είναι θετική (επιμήκυνση) ή αρνητική (συστολή). Όταν η μαγνήτιση είναι παράλληλα σε μια από τις εύκολες διευθύνσεις, τότε η σταθερά λ είναι πάντοτε θετική.

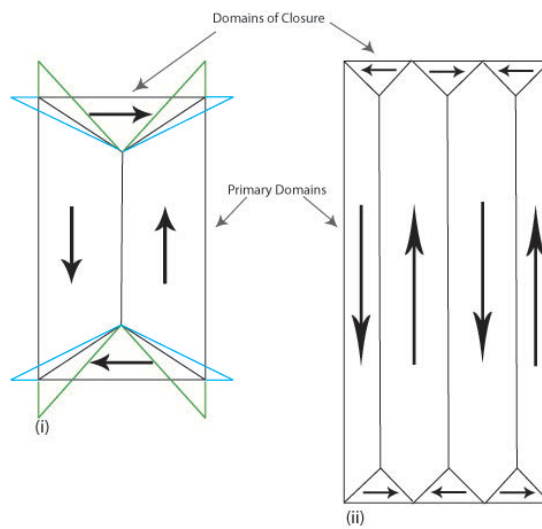
Το μέγεθος της μαγνητοσυστολής αυξάνεται με το πεδίο, όπως στο Σχήμα 1.8, και η τιμή όταν $M=M_s$ είναι η μαγνητοσυστολή κόρου λ_s που είναι ωστόσο μικρή της τάξης 10^{-5} . Ο συνολικός όγκος του δείγματος παραμένει σταθερός επομένως η μαγνητοσυστολή στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις είναι

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2}$$



Σχήμα 1.8. Μεταβολή της μαγνητοσυστολής λ με το πεδίο H

Η ενέργεια λόγω της παραμόρφωσης του κρυσταλλικού πλέγματος που σχετίζεται με τη μαγνητική παραμόρφωση ονομάζεται ενέργεια μαγνητικής συστολής και μπορεί να μειωθεί με μείωση του μεγέθους των μαγνητικών περιοχών και αύξηση του αριθμού τους.



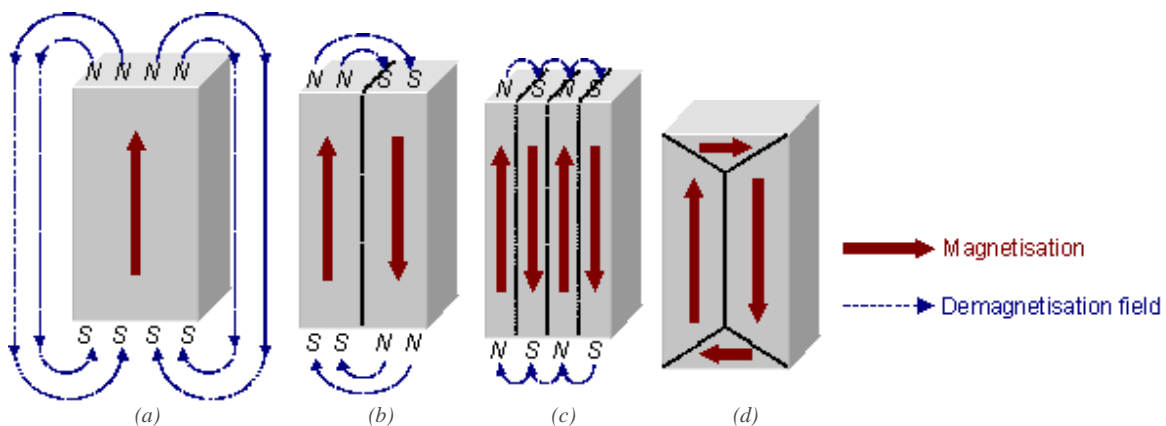
Σχήμα 1.9 : Η μεταβολή του μεγέθους και του αριθμού των μαγνητικών περιοχών λόγω της μαγνητικής συστολής

Η τελική δομή των μαγνητικών περιοχών είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ όλων των προαναφερθέντων ενεργειακών συνεισφορών

1.5 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από μαγνητικές περιοχές ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου. Μια μαγνητική περιοχή (magnetic domain) είναι μια περιοχή όπου όλες οι spin μαγνητικές ροπές έχουν το ίδιο προσανατολισμό έτσι ώστε να παράγεται μαγνητική ροπή σε μια διεύθυνση. Η ύπαρξη των μαγνητικών περιοχών είναι συνέπεια της απαίτησης για κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, καθώς ένα δείγμα μιας περιοχής έχει αυξημένη μαγνητοστατική ενέργεια.

Το «σπάσιμο» της μαγνήτισης σε τοπικές περιοχές μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια. Αυτού του είδους οι περιοχές, εμφανίζονται στα πρώτα στάδια απομαγνήτισης, καθώς εξασφαλίζουν διαδρόμους της μαγνητικής ροής μέσα στο στερεό και δημιουργούνται από ατέλειες. Στο επόμενο σχήμα 1.10, δίνεται σχηματικά η εμφάνιση και ανάπτυξη των περιοχών σε ένα δείγμα που ενώ αρχικά έχει παραμένουσα μαγνήτιση και είναι κορεσμένο, απομαγνήτιζεται. Το δείγμα στο σχήμα (a) έχει μεγάλη μαγνητοστατική ενέργεια. Η αυξημένη μαγνητοστατική ενέργεια είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ελεύθερων μαγνητικών γραμμών οι οποίες εξέρχονται από την επιφάνεια του υλικού και προκαλούν τη δημιουργία εξωτερικού πεδίου απομαγνήτισης. Το πεδίο απομαγνήτισης αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα μαγνήτιση του υλικού. Η διαίρεση της μαγνήτισης σε δύο περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα (b), μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια κατά το ήμισυ, στο σχήμα (c) κατά το ένα τέταρτο της αρχικής και ούτω καθεξής. Στο σχήμα (d) η μαγνητοστατική ενέργεια θα είναι θεωρητικά μηδενική αν δεν υπεισερχόταν ο παράγοντας της ανισοτροπίας και των γειτονικών περιοχών που έχουν διαφορά προσανατολισμού κατά 180° .



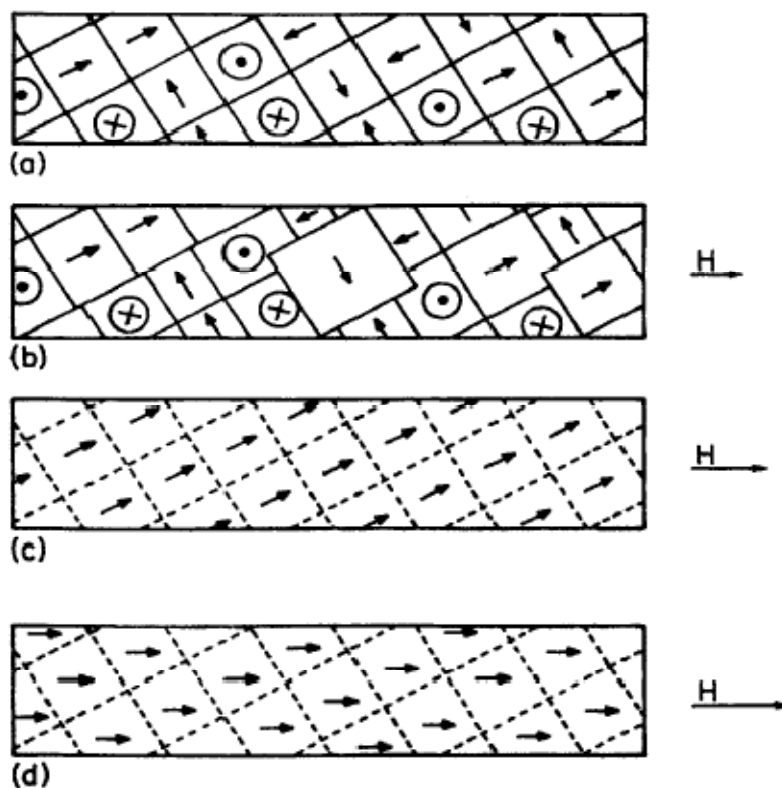
Σχήμα 1.10: Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές. Σε κάθε περιοχή, τα spin είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό.

1.5.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από μαγνητικές περιοχές ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μαγνήτισης και στην κατάσταση απομαγνήτισης είναι η διαφορετική διάταξη και προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών. Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμοσθεί σε ένα μη μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό οι μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} συναρτήσει του πεδίου \mathbf{H} παράγουν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης.

Σε ενδιάμεσες τιμές πεδίου ένας άλλος μηχανισμός αρχίζει να αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Αυτός ο μηχανισμός είναι η περιστροφή μαγνητικών περιοχών, κατά τον οποίο οι ατομικές ροπές σε περιοχή που είναι προσανατολισμένη σε μη θεμιτή κατεύθυνση ξεπερνούν την ενέργεια ανισοτροπίας και περιστρέφονται έως ότου προσανατολιστούν παράλληλα με έναν ισοδύναμο εύκολο κρυσταλλογραφικό άξονα που σχηματίζει μικρότερη γωνία με το επιβαλλόμενο πεδίο.

Η τελική επίδραση του πεδίου στις μαγνητικές περιοχές εμφανίζεται σε ισχυρά πεδία. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι μαγνητικές ροπές που έχουν σχηματίζει μικρή γωνία με το πεδίο), αρχίζουν με την περαιτέρω αύξηση του πεδίου να αποκλίνουν σταδιακά τείνοντας να ευθυγραμμιστούν απόλυτα με το πεδίο. Έτσι το υλικό αποκτά μία μόνο μαγνητική περιοχή.

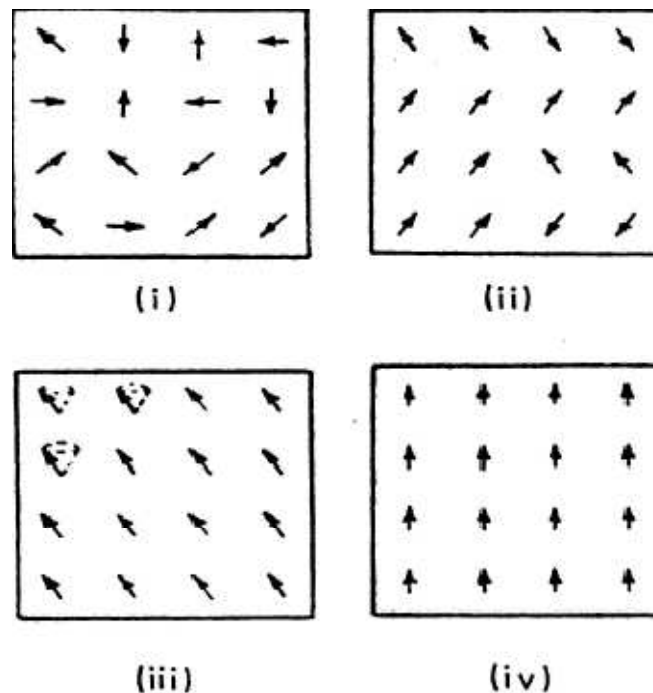


Σχήμα 1.11: Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμπής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (c) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (d)

1.5.2 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ

Όταν όλες οι περιοχές έχουν προσανατολιστεί, με το διάνυσμα της αυθόρμητης μαγνήτισης τους παράλληλα στο πεδίο, το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μία μόνο μαγνητική περιοχή. Η κατάσταση αυτή αποκαλείται **τεχνητή μαγνήτιση κόρου**. Εάν το μαγνητικό πεδίο αυξηθεί πέρα από αυτή την τιμή, τότε παρατηρείται μία περαιτέρω, αργή, αύξηση της μαγνήτισης. Σε αυτό το σημείο οι ατομικές μαγνητικές ροπές, που δεν είναι τέλεια

διατεταγμένες λόγω της θερμικής κίνησης, φθάνουν σε κατάσταση πλήρους διάταξης, με αποτέλεσμα την αύξηση της αυθόρμητης μαγνήτισης του υλικού. Η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους 0 K είναι ίση με τη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πέφτει το μηδέν καθώς προσεγγίζεται η θερμοκρασία Curie. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 K, οι μαγνητικές ροπές εκτελούν μία μεταπτωτική κίνηση γύρω από τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της θερμικής ενέργειας. Αυτή η κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα η αυθόρμητη μαγνήτιση να είναι μικρότερη από τη μαγνήτιση κορεσμού. Σε πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία οι μαγνητικές ροπές διατάσσονται πλήρως και η μαγνήτιση φθάνει τη μαγνήτιση κορεσμού.



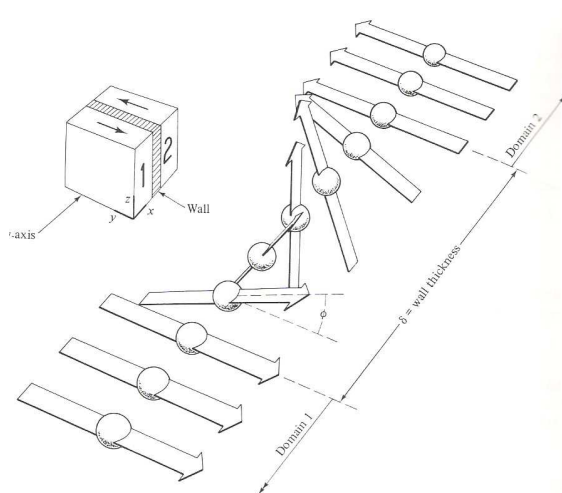
Σχήμα 1.12: Διάταξη των ατομικών μαγνητικών ροπών στο εσωτερικό μιας περιοχής σε διάφορες θερμοκρασίες. Πάνω από τη θερμοκρασία Curie i) τυχαία διάταξη ii) κάτω από τη θερμοκρασία Curie iii) σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου οι μαγνητικές ροπές εκτελούν μία μεταπτωτική κίνηση γύρω από τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και iv) πλήρης διάταξη στους 0 K, όπου δεν υπάρχει θερμική ενέργεια.

1.6 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

Τα μαγνητικά τοιχώματα αποτελούν τα χωρίσματα των μαγνητικών περιοχών, στις οποίες η μαγνήτιση έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Μέσα στο τοίχωμα, η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση από αυτή της μίας περιοχής στην άλλη. Τα τοιχώματα αυτά δεν είναι απείρως λεπτά αλλά έχουν ένα πεπερασμένο πλάτος. Το πάχος τους ουσιαστικά είναι ένας

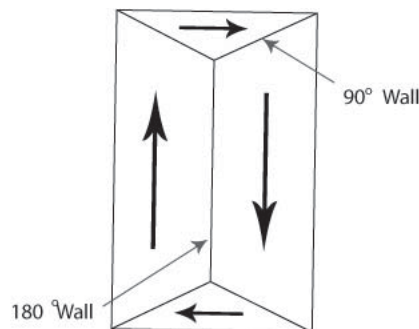
συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής (που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους) και την ενέργεια ανιστροπίας (που απαιτεί την ύπαρξη ενός λεπτού τοιχώματος). Ένα στενό τοίχωμα δημιουργεί μεγάλες γωνίες για γειτονικά spin και η ενέργεια ανταλλαγής είναι μεγάλη, ενώ σε ένα ευρύ τοίχωμα, πολλά spin έχουν κατεύθυνση μακριά από τις διευθύνσεις εύκολης μαγνήτισης με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας ανιστροπίας. Έτσι το πάχος ισορροπίας είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανιστροπίας εντός του τοιχώματος.

Γενικά τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα 180° και σε μη- 180° , δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές. Τα τοιχώματα 180° συναντώνται σχεδόν σε όλα τα υλικά και διαφέρουν από όλα τα άλλα τοιχώματα στο ότι δεν επηρεάζονται από την επιβολή μηχανικής τάσης. Στα τοιχώματα αυτά οι διευθύνσεις της μαγνήτισης σε γειτονικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες και κατά συνέπεια οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών έχουν διευθύνσεις ισοδύναμων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Στο σχήμα 1.13 απεικονίζεται ένα τοίχωμα 180° που διαχωρίζει δύο περιοχές με μαγνήτιση σε αντίθετες διευθύνσεις. Αν η μαγνήτιση περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια του τοιχώματος, τότε το τοίχωμα καλείται **τοιίχωμα Bloch**.



Σχήμα 1.13: Δομή τοιχώματος Bloch 180°

Στα υλικά που κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα, τα τοιχώματα μη- 180° είναι όλα 90° , έτσι ώστε οι διευθύνσεις των δίπολων σε γειτονικές μαγνητικές περιοχές να είναι ορθές γωνίες (Σχήμα 1.14). Γι' αυτό στο σίδηρο που οι κύριοι άξονες είναι στις διευθύνσεις (100), τα μαγνητικά τοιχώματα ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και $(\bar{1}00)$ είναι όλα 180° , ενώ αυτά που είναι ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (010) είναι τοιχώματα 90° . Συχνά όλα τα μη- 180° μαγνητικά τοιχώματα αναφέρονται εσφαλμένα ως τοιχώματα 90° για να τονίζεται η ευαισθησία που έχουν στην επιβολή μηχανικής τάσης σε σχέση με τα τοιχώματα 180° .



Σχήμα 1.14: Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90° .

1.6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ 180° ΚΑΙ ΜΗ 180°

Η εφαρμογή μιας ομοαξονικής εφελκυστικής μηχανικής τάσης κατά μήκος της διεύθυνσης στον σίδηρο, θα κάνει τη συγκεκριμένη διεύθυνση (100) μικρότερη σε ενέργεια από τις διευθύνσεις (010) και (001) που είχαν μικρότερη ενέργεια πριν ασκηθεί η τάση. Η ενέργεια της διεύθυνσης $(\bar{1}00)$ μειώνεται κατά το ίδιο ποσοστό. Συνεπώς ένα τοίχωμα 180° που χωρίζει δύο μαγνητικές περιοχές προσανατολισμένες στις δύο αυτές διευθύνσεις δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή μηχανικές τάσεις.

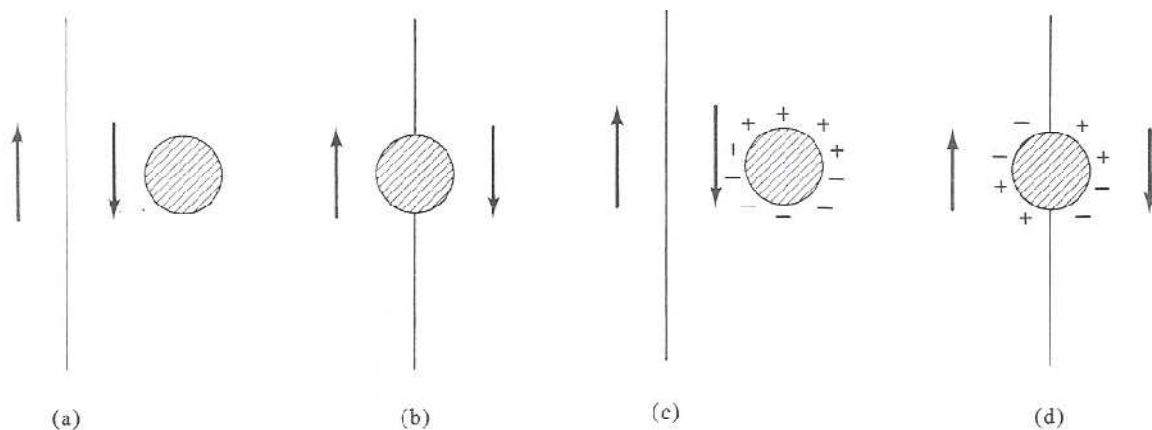
Στην περίπτωση, όμως, ενός τοιχώματος 90° ανάμεσα σε μαγνητικές περιοχές προσανατολισμένες στις διευθύνσεις (100) και (010) στο σίδηρο, η εφαρμογή εφελκυστικής τάσης κατά τη διεύθυνση (100) την κάνει ενεργειακά ευνοημένη. Κατά συνέπεια τα τοιχώματα 90° θα μετακινηθούν, υπό την επίδραση της τάσης αυτής, για να αυξήσουν τον όγκο των περιοχών που είναι προσανατολισμένες στο (100) εις βάρος αυτών που είναι στο (010). Δηλαδή τα τοιχώματα 90° είναι ευαίσθητα στην εφαρμογή τέτοιων τάσεων.

1.6.2 ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Για να μαγνητιστεί, ένας σιδηρομαγνητικός μονοκρυστάλλος θα πρέπει ένα μετακινηθούν τα τοιχώματα των περιοχών που έχουν μαγνήτιση παράλληλη προς το επιβαλλόμενο πεδίο εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι αντίθετη προς τη μαγνήτιση του επιβαλλόμενου πεδίου.

Η μετατόπιση ενός τοιχώματος εντός ενός κρυστάλλου επηρεάζεται από τις κρυσταλλικές ατέλειες, και τις προσμίξεις. Έτσι δεν είναι ομαλή και είναι, συνήθως, μη αντιστρεπτή εκτός από την περίπτωση που το υλικό είναι υψηλής καθαρότητας.

Τα μαγνητικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επηρεάζονται από τις μη μαγνητικές προσμίξεις, τα εγκλείσματα, τρύπες και ρωγμές. Ένα εγκλείσμα για παράδειγμα που βρίσκεται σε μια περιοχή, μαγνητίζεται και δημιουργούνται σε αυτό βόρειος και νότιος πόλος (Σχήμα 1.15). Αν το τοίχωμα έπρεπε να περάσει από μέσα από το εγκλείσμα, τότε η μαγνητοστατική ενέργεια θα ήταν μικρότερη, γεγονός που είναι ενεργειακά προτιμότερο. Η μείωση της μαγνητοστατικής δυναμικής ενέργειας σημαίνει ότι απαιτείται πλέον μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθεί το τοίχωμα και να απομακρυνθεί από το εγκλείσμα. Έτσι μακροσκοπικά φαίνεται ότι οι προσμίξεις έλκουν τα τοιχώματα και καταφέρνουν να συγκρατούν κατά κάποιο τρόπο την κίνηση τους.



Σχήμα 1.15: Αλληλεπιδράσεις τοιχωμάτων περιοχών με εγκλείσματα. Το εγκλείσμα μαγνητίζεται και υπάρχει μαγνητοστατική ενέργεια.

Επίσης, οι διαταραχές στον κρύσταλλο του υλικού δημιουργούν πεδία τοπικών τάσεων, τα οποία με τη σειρά τους αναπτύσσουν μία ανομοιογενή τάση μέσα στον όγκο του στερεού

εμποδίζοντας έτσι την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Αυτό εξηγεί γιατί δοκίμια που έχουν υποστεί ψυχρή μηχανουργική κατεργασία εμφανίζουν υψηλότερο συνεκτικό πεδίο και μικρή αρχική επιδεκτικότητα σε σχέση με άλλα δοκίμια του ίδιου υλικού, τα οποία έχουν ανακτηθεί. Για την απομάκρυνση ενός τοιχώματος από μία διαταραχή, απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Το τοίχωμα συγκρατείται σε κάποιο σημείο από μία ατέλεια ή από μία πρόσμειξη και για να ελευθερωθεί απαιτείται η εφαρμογή ενός ισχυρότερου πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί, το τοίχωμα κινείται μέχρις ότου να δεσμευτεί από μία άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο αυξηθεί ακόμα παραπάνω και ούτω καθεξής. Από αυτή ακριβώς την κίνηση του τοιχώματος πηγάζει ο **θόρυβος Barkhausen**. Κάθε φορά που το τοίχωμα αποδεσμεύεται, παράγονται πλεγματικές ταλαντώσεις, πράγμα που σημαίνει ότι μέρος της ενέργειας χάνεται ως θερμότητα. Η συνολική κίνηση του τοιχώματος είναι αναντιστρεπτή και συνεπάγεται απώλεια ενέργειας με τη μορφή θερμότητας που διοχετεύεται στον κρύσταλλο.

1.7 ΘΟΡΥΒΟΣ BARKHAUSEN

Σύμφωνα με το φαινόμενο Barkhausen, ενώ το εξωτερικά επιβαλλόμενο, μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο συναρτήσει του χρόνου, παρατηρείται ασυνεχή μετάβαση στην πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Η αρχική παρατήρηση του φαινομένου έγινε όταν ένα πηνίο λήψης τυλιγμένο γύρω από ένα δείγμα σιδήρου συνδέθηκε με ενισχυτή και ηχείο. Καθώς το πεδίο H αυξανόταν ομοιόμορφα, το ηχείο παρήγαγε μια σειρά ασθενών ήχων, τα οποία οφείλονταν σε μικρού πλάτους παλμούς που επάγονταν στο σημείο λήψης.

Αρχικά, το φαινόμενο αποδόθηκε στην αιφνίδια περιστροφή της μαγνήτισης μιας περιοχής από ένα κύριο άξονα σε ένα άλλο κύριο άξονα, πλησιέστερο στη διεύθυνση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Σήμερα, είναι γνωστό ότι κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που προκαλεί το θόρυβο Barkhausen, μολονότι και οι δύο μηχανισμοί είναι υπαρκτοί και συμβάλλουν στο φαινόμενο.

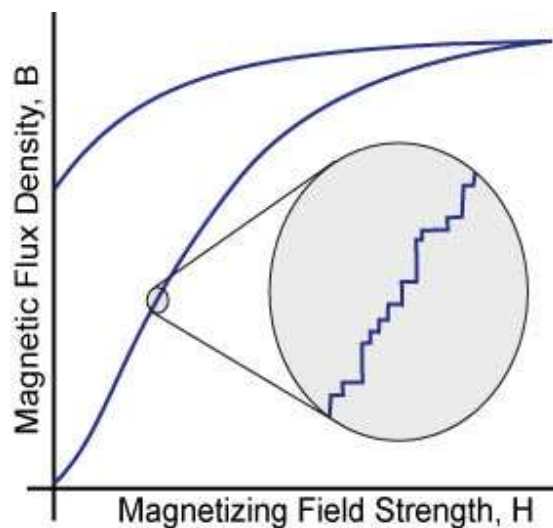
Από τα είδη των μαγνητικών τοιχωμάτων, εκείνα στα οποία οφείλεται ο θόρυβος Barkhausen περισσότερο είναι τα τοιχώματα 180° . Τα τοιχώματα 90° είναι λιγότερο ευκίνητα καθώς συνδέονται με πεδία τάσεων και η κίνηση τους παρεμποδίζεται περισσότερο.

Κάθε απότομο άλμα στη μετακίνηση των τοιχωμάτων, αυξανομένου του μαγνητικού πεδίου, προκαλεί ένα παλμό εξόδου. Το σύνολο των παλμών αποτελεί το θόρυβο Barkhausen. Ο

θόρυβος εμφανίζεται στα σημεία του βρόχου υστέρησης όπου η κλίση είναι μεγάλη καθώς η κλίση του διαγράμματος του βρόχου υστέρησης αποτελεί τη διαφορική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Όλες οι ανομοιογένειες του κρυσταλλικού πλέγματος μπορούν να αποτελέσουν σημεία αγκύρωσης και κατ' επέκταση είναι υπεύθυνα για την πρόκληση μαγνητικής εκπομπής θορύβου Barkhausen. Αυτές, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μπορεί να είναι σημειακές ατέλειες, εγκλείσματα, διαταραχές, κατακρημνίσματα, παραμένουσες τάσεις ή ακόμη και τα όρια κόκκων.

Γενικά, η αύξηση των ατελειών του κρυσταλλικού πλέγματος επιφέρει αύξηση της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου Barkhausen, αφού τα τοιχώματα συναντούν περισσότερα εμπόδια στην κίνησή τους. Επίσης, αύξηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen επιφέρει η ύπαρξη εφελκυστικών τάσεων παράλληλα στον άξονα μαγνήτισης, ενώ το αντίθετο αποτέλεσμα έχει η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων παράλληλα στον άξονα μαγνήτισης. Τέλος, ο θόρυβος Barkhausen έχει ανάλογη σχέση με το μέγεθος κόκκου. Έτσι όσο πιο λεπτοκρυσταλλικό είναι ένα υλικό, τόσο υψηλότερη απόκριση εμφανίζει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα όρια των κόκκων είναι τοποθεσίες που ευνοούν την αγκύρωση των μαγνητικών τοιχωμάτων.



Σχήμα 1.16: Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος της καμπύλης μαγνήτισης

1.8 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ

1.8.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική του επαγωγή \mathbf{B} ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου \mathbf{H} σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του \mathbf{H} (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης).

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες τιμές, απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy. Τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου.

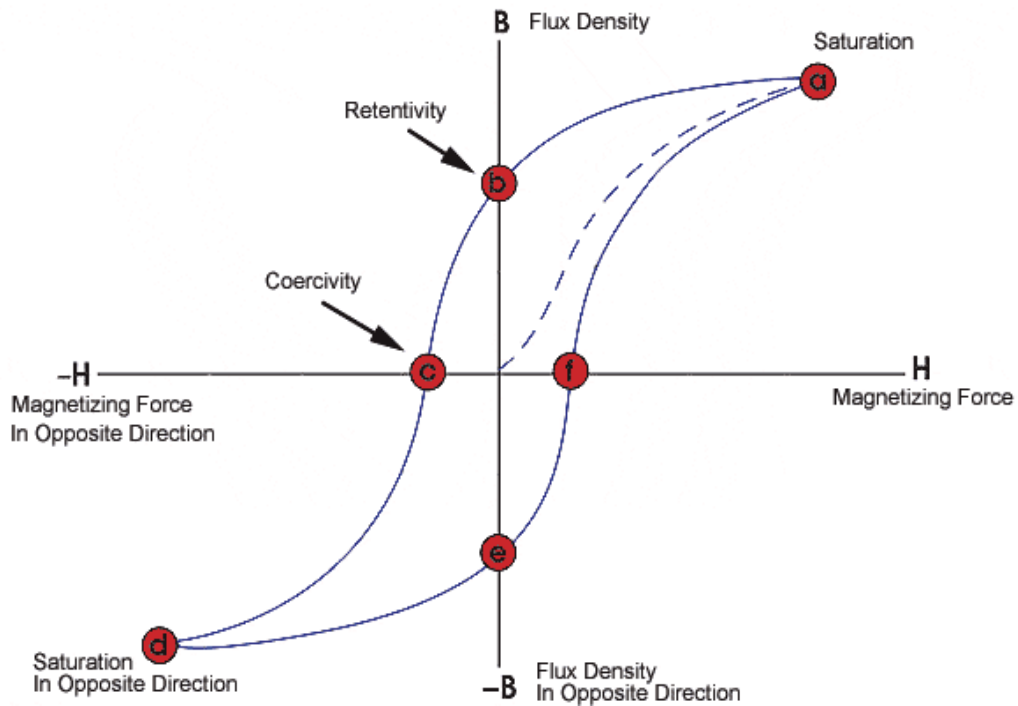
1.8.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο και να διατηρούν τη μαγνήτιση τους και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ικανότητα τους αυτή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία αν και εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου παύουν να είναι μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνση αυτού.

1.8.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος του της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} συναρτήσει του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες.

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης φαίνεται στο σχήμα 1.16. Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.



Σχήμα 1.17 : Καμπύλη βρόχου υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, ακολουθεί αρχικά την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος 3.2, καθώς το εξωτερικό πεδίο αρχίζει να αυξάνεται. Είναι προφανές, ότι για ένα μεγάλο γενικά εύρος τιμών του H , το B συνεχίζει διαρκώς να αυξάνεται. Φτάνοντας στο σημείο a , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή. Σε αυτό το σημείο λέμε ότι το υλικό έχει φτάσει τη μαγνήτιση κορεσμού (§ 3.2.4). Στη συνέχεια, καθώς το H αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο a στο b . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής δεν είναι μηδέν. Το σημείο b παριστάνει την αντίσταση απομαγνήτισης (retentivity) του υλικού. Στη συνέχεια, καθώς το πεδίο αρχίζει να λαμβάνει αρνητικές τιμές, δηλαδή να αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο c μηδενίζεται. Το σημείο αυτό δίνει πληροφορίες για το συνεκτικό πεδίο του υλικού, (coercivity), (§ 3.2.6). Καθώς το πεδίο εξακολουθεί να αυξάνεται αρνητικά, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Στη συνέχεια, το εξωτερικό πεδίο ελαττώνεται και η καμπύλη περνάει από το σημείο e όπου αντιστοιχεί στην αντίσταση απομαγνήτισης της αντίστροφης φοράς. Παρατηρούμε ότι καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H , η καμπύλη δεν θα περάσει ξανά από την αρχή των αξόνων, αλλά από το σημείο f , λόγω της παραμένουσας μαγνήτισης (remanence), (§ 3.2.5). Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να κατανοήσουμε τη σημασία των

μεγεθών μ_{in} και χ_{in} τα οποία ορίσαμε στις εξισώσεις (2.12), (2.13) τα οποία αντιστοιχούν στην κλίση της διακεκομμένης καμπύλης κοντά στην αρχή των αξόνων.

1.8.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} προς την διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} , η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή \mathbf{M}_0 . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο \mathbf{H} και ονομάζεται **μαγνήτιση κορεσμού**. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου με βάση την επόμενη σχέση:

$$\vec{M}_0 = n\vec{m}$$

Το \mathbf{M}_0 εξαρτάται μόνο από το υλικό και από τη μικροδομή του.

1.8.5 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου έντασης \mathbf{H}_c . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του \mathbf{H} στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης.

1.8.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie, εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραματικών.

1.9 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

1.9.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα μαγνητικά υλικά κατατάσσονται εν γένει σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες: τα διαμαγνητικά υλικά, τα παραμαγνητικά υλικά, τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά και τα σιδηριμαγνητικά υλικά και ταξινομούνται με βάση την επιδεκτικότητα που παρουσιάζουν[26-28].

1												2						
H												He						
3	4											5	6	7	8	9	10	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
11	12											13	14	15	16	17	18	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89																
Fr	Ra	Ac																
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		

Σχήμα 1.18 : Διάγραμμα του περιοδικού πίνακα όπου φαίνονται τα στοιχεία χρωματισμένα ανάλογα με το είδος το μαγνητισμού που παρουσιάζουν σε θερμοκρασία δωματίου

1.9.2 ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

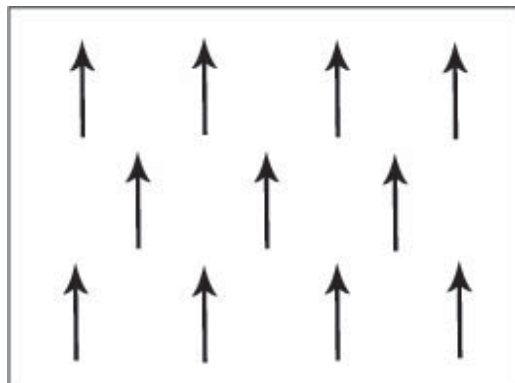
Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή της τάξης $\chi = -10^{-5}$. Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Όταν μια διαμαγνητική ουσία, δηλαδή, τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης M εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επίσης μια ουσία είναι διαμαγνητική όταν τα άτομα που την αποτελούν έχουν συμπληρωμένες στιβάδες και υποστιβάδες. Αυτό σημαίνει ότι απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, κανένα άτομο δεν έχει μόνιμη μαγνητική ροπή. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν οι ομοιοπολικοί κρύσταλλοι και πολλοί ιοντικοί κρύσταλλοι, αφού τα άτομα τους έχουν συμπληρωμένες υποστιβάδες και οι υπεραγωγοί με $\chi = -1$.

1.9.3 ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική και κυμαίνεται από 10^{-3} έως 10^{-5} . Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαίους προσανατολισμούς. Παρουσία μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση M συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, και η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο.

1.9.4 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

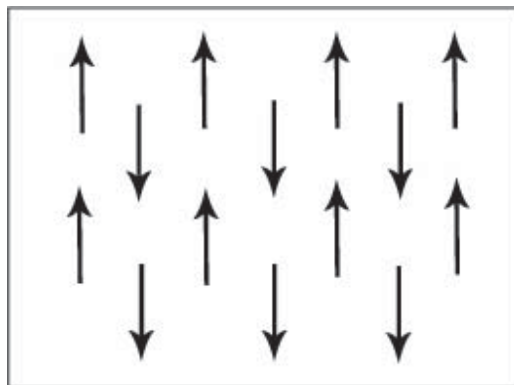
Η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000) και εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση M και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι μη γραμμική. Το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_c . Για θερμοκρασία πάνω από την T_c ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματα τους.



Σχήμα 1.19 : Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών ευθυγραμμισμένες παράλληλα σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό.

1.9.5 ΑΝΤΙΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.19. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, απουσία πεδίου εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν υπάρχει μαγνήτιση. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel T_N . Σε θερμοκρασίες πάνω από την T_N , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά.



Σχήμα 1.20: Απεικόνιση των μαγνητικών διπολικών ροπών με μαγνήτιση αντιπαράλληλη σε ένα αντισιδηρομαγνητικό υλικό. Αυτή είναι μια από τις δυνατές διατάξεις των μαγνητικών ροπών.

1.9.6 ΣΙΔΗΡΙΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_C), παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_C , τα σιδηριμαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές, μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν διαφορετικό μέτρο, και έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος

ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι οι φερρίτες (Fe_3O_4) [1,2].

1.10 ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές[2,24].

Κεφάλαιο

2

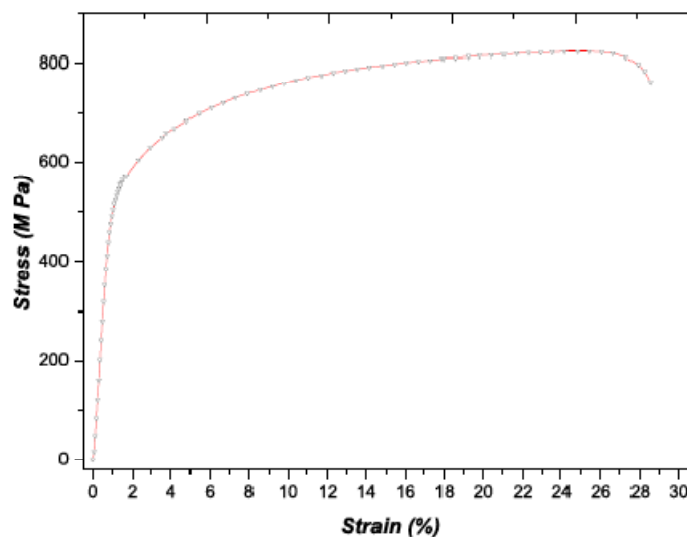
2. ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως υλικό των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας 800 (Transformation Induced Plasticity) της εταιρείας Arcelor, του οποίου η % κατά βάρος χημική σύσταση είναι η εξής:

Πίνακας 3.1: Χημική σύσταση % κατά βάρος του χάλυβα TRIP 800

	C	Mn	Si
TRIP 800	0.195	1.64	1.58

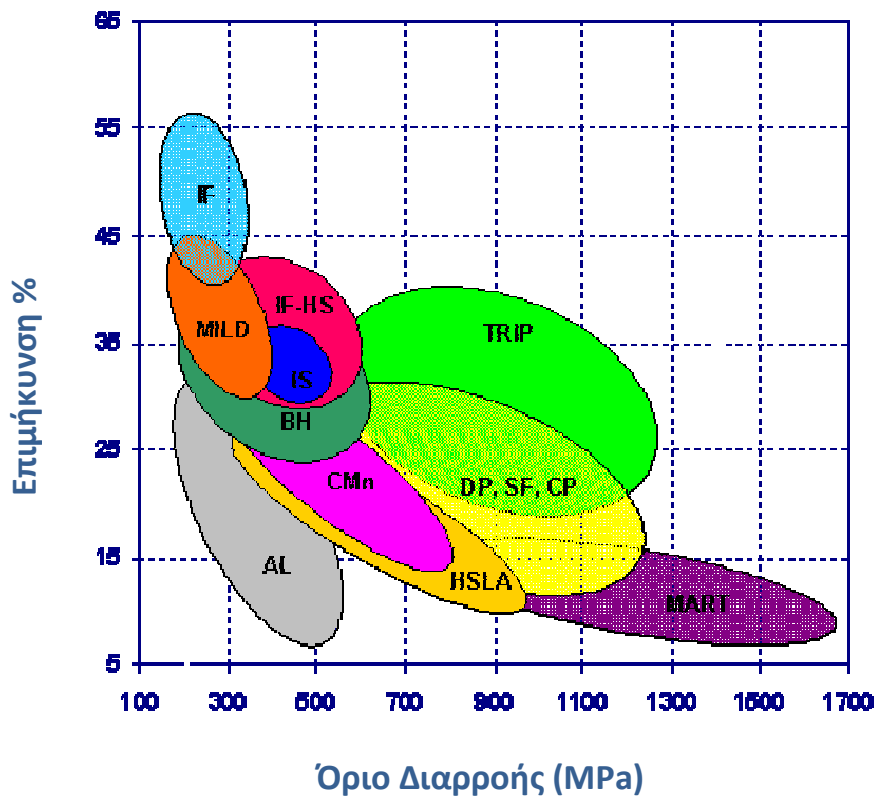
Στο σχήμα φαίνεται τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης του υλικού:



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης του χάλυβα TRIP 800

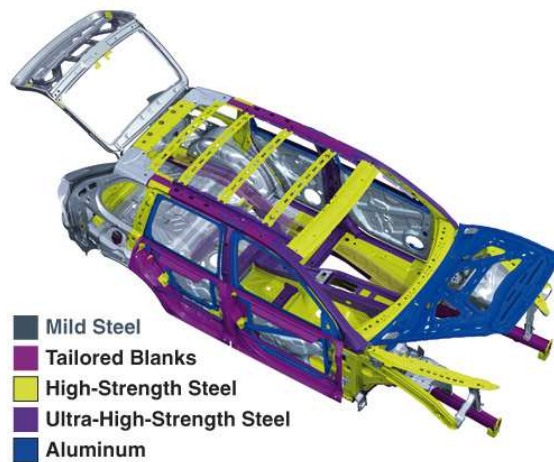
2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ TRIP

Οι χάλυβες TRIP αποτελούν υποευτηκτοειδή κράματα σιδήρου άνθρακα με περιεχόμενο ποσοστό 0.12-0.20% C κατά βάρος. Ανήκουν στην κατηγορία των χάλυβων υψηλής αντοχής και χαμηλής κραμάτωσης καθώς χαρακτηρίζονται από το συνδυασμό μεγάλης αντοχής σε θραύση και υψηλής ολκιμότητας όπως φαίνεται από το ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 2.2: Η θέση των χάλυβων TRIP στο διάγραμμα συνολικής επιμήκυνσης-όριο διαρροής συγκριτικά με άλλους χάλυβες

Η ανάπτυξή του, επιβάλλεται λόγω των περιβαλλοντικών περιορισμών που απαιτούν την παραγωγή αυτοκινήτων, φιλικών προς το περιβάλλον. Η χρήση των χάλυβων TRIP επιτρέπει την ελάττωση του πάχους των χάλυβδινων μερών χωρίς επακόλουθη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στην κατασκευή ελαφρύτερων οχημάτων που συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων. Οι χάλυβες TRIP, λόγω της καλής ισορροπίας αντοχής και ολκιμότητας, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μερών του οχήματος τα οποία είναι πιο ευάλωτα σε περίπτωση σύγκρουσης (σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση των χαλύβδινων μερών ενός οχήματος. Τα σημεία με κίτρινο χρώμα είναι αυτά που κατασκευάζονται από τον χάλυβα TRIP.

Όσον αφορά τη μικροδομή του χάλυβα TRIP, χαρακτηρίζεται ως σύνθετη πολυφασική μικροδομή, η οποία αποτελείται από τις εξής φάσεις: **φερρίτης (α)**, **μπαινιτικός φερρίτης (α_b)**, και **υπολειπόμενος ωστενίτης (γ_R)**. Η καλή απόκριση του παραπάνω χάλυβα, κατά την πλαστική παραμόρφωση, οφείλεται στο **μετασχηματισμό της φάσης του μετασταθούς υπολειπόμενου ωστενίτη (γ_R) στο θερμοδυναμικά σταθερό μαρτενσίτη (α')**.

Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα TRIP είναι η σταθερότητα του υπολειπόμενου ωστενίτη (γ_R) που με τη σειρά του σχετίζεται άμεσα με τη χημική σύσταση, το μέγεθος κόκκου, την εντατική κατάσταση του υλικού και τη θερμοκρασία. Οι παράμετροι αυτοί είναι αλληλοσυνδεόμενοι και έτσι η προσέγγιση των βέλτιστων μηχανικών ιδιοτήτων είναι δύσκολο εγχείρημα.

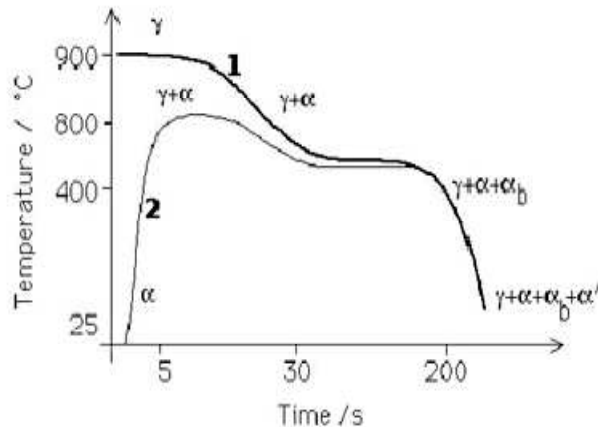
2.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ

Ως αναφέρθηκε ανωτέρω, η μικροδομή του χάλυβα TRIP μπορεί να επιτευχθεί, είτε ακολουθώντας το στάδιο παραγωγικής διαδικασίας που περιλαμβάνει θερμή έλαση, είτε το στάδιο που περιλαμβάνει ψυχρή έλαση. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνει χώρα μετασχηματισμός από πλήρως ωστενιτοποιημένη κατάσταση, ακολουθούμενη από απόψυξη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος με ελεγχόμενο ρυθμό. Έτσι επέρχεται μερικός μετασχηματισμός του ωστενίτη (γ) σε φερρίτη (α) και εν συνεχεία σε μπαινιτικό φερρίτη (α_b).

Στην περίπτωση που έχει προηγηθεί ψυχρή έλαση, απαιτούνται δύο στάδια θερμικής κατεργασίας, για την επίτευξη της τελικής δομής του εν λόγω χάλυβα. Το κράμα θερμαίνεται

ώστε να εισέλθει στην διφασική περιοχή $\alpha+\gamma$ (ωστενίτη-φερρίτη) . Ύστερα ο ωστενίτης δίνει σε χαμηλότερη θερμοκρασία, ως προϊόν αποσύνθεσης, μπαινιτικό φερρίτη (α_b). (Σχήμα 2.4)[6,8]

Σχήμα 2.4 Γενική σχηματική αναπαράσταση των δύο πιθανών πορειών από τις οποίες μπορεί να προκύψει η



μικροδομή του χάλυβα TRIP. Η καμπύλη 1 αντιστοιχεί στην πορεία που περιλαμβάνει θερμή έλαση ενώ η 2 σε αυτή που περιλαμβάνει τη ψυχρή έλαση. Οι συμβολισμοί γ , α , α_b και α' ανήκουν στον ωστενίτη, φερρίτη, μπαινιτικό φερρίτη και μαρτενσίτη αντίστοιχα.

2.3 ΨΥΧΡΗ ΕΛΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ TRIP

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφεί το τελικό στάδιο θερμικής κατεργασίας που ακολουθεί την ψυχρή έλαση, καθώς αυτή ακολουθήθηκε στην περίπτωση των χαλυβδόφυλλων, από τα οποία προήλθαν τα δοκίμια.

Γενικά, η ψυχρή έλαση εγγυάται υψηλότερη ποιότητα επιφανείας σε σύγκριση με τη θερμή έλαση. Η θερμική κατεργασία των ψυχρών ελασμάτων χάλυβα TRIP διαχωρίζεται στο στάδιο της **ενδοκρίσιμης ανόπτησης** και στο στάδιο της **ισόθερμοκρασιακής μπαινιτικής βαφής**. Καθ'όλη τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας ο ωστενίτης εμπλουτίζεται σε άνθρακα επιτυγχάνοντας έτσι τη σταθεροποίησή του σε θερμοκρασία δωματίου.

Αρχικά, κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση, συγκεντρώνεται άνθρακας στον ωστενίτη με την προοδευτική διαλυτοποίηση του περλίτη. Στη συνέχεια, κατά το μπαινιτικό μετασχηματισμό, αποβάλλεται άνθρακας από το μπαινιτικό φερρίτη στον περιβάλλοντα ωστενίτη,

συμβάλλοντας έτσι στον περαιτέρω εμπλουτισμό του. Το ποσοστό του υπολειπόμενου ωστενίτη αυξάνεται με ανάλογη αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου άνθρακα [6,8,13,14].

2.3.1 ΕΝΔΟΚΡΙΣΙΜΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ

Η αρχική μικροδομή των ψυχρών ελασμάτων αποτελείται από φερρίτη και περλίτη (α -Fe₃C). Κατά τη διάρκεια της ενδοκρίσιμης ανόπτησης τα κλάσματα όγκου του ωστενίτη και του φερρίτη μεταβάλλονται με σταδιακή αύξηση του κλάσματος όγκου του ωστενίτη. Αναφέρεται ότι θερμοδυναμικοί και κινητικοί παράγοντες θέτουν ανώτατο και κατώτατο όριο στο παραγόμενο κλάσμα όγκου του ωστενίτη κατά την ενδοκρίσιμη ανόπτηση.

2.3.2 ΙΣΟΘΕΡΜΟΣ ΜΠΑΙΝΙΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΥ

Η ανάπτυξη του μπαινιτικού φερρίτη προκύπτει από την αποβολή του άνθρακα στον ωστενίτη αυξάνοντας έτσι τη σταθερότητα του τελευταίου. Μετρήσεις του περιεχόμενου άνθρακα σε νησίδες υπολειπόμενου ωστενίτη δείχνουν αξιόλογη αύξηση του ποσοστού άνθρακα σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 1.25%- 1.40% κ.β.

Ο μπαινιτικός μετασχηματισμός συνδυάζει χαρακτηριστικά διαχυσιακού και μη διαχυσιακού μετασχηματισμού και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες κατώτερες εκείνων που αντιστοιχούν στην περλιτική περιοχή (500-550°C).

Χωρίς ακόμα να έχει διαλευκανθεί πλήρως ο μηχανισμός του μπαινιτικού μετασχηματισμού, γίνεται αποδεκτό ότι η φύτρωση του μπαινίτη γίνεται από το φερρίτη, κατόπιν διάτμησης του κρυσταλλικού πλέγματος του ωστενίτη, συνοδευόμενη από διάχυση σε μικρή απόσταση, η οποία επιτρέπει ανακατανομή των ατόμων άνθρακα [7].

Η παρατηρούμενη μορφολογία είναι πολύ διαφορετική εκείνης του περλίτη. Οι κόκκοι του φερρίτη αναπτύσσονται εντός της ωστενιτικής περιοχής κατά μήκος προτιμητέων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων απόλυτα καθορισμένων. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάχυσης του άνθρακα είναι μικρή, αυτός απωθείται προς τα όρια του μετώπου ανάπτυξης και κατακρημνίζεται υπό μορφή σεμενίτη, σε λεπτή διασπορά.

Οι μπαινιτικοί και οι περλιτικοί μετασχηματισμοί είναι ανταγωνιστικοί. Εάν κάποιο μέρος ενός κράματος έχει μετασχηματιστεί σε περλίτη ή μπαινίτη, ο περαιτέρω μετασχηματισμός στο άλλο μικροσυστατικό είναι αδύνατος χωρίς προηγούμενη ωστενιτοποίηση.

Οι μπεινιτικές δομές είναι επιθυμητές λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν. Ο μπεινίτης των χάλυβων παρουσιάζει ικανοποιητική μηχανική αντοχή, συγχρόνως όμως και καλή ολκιμότητα.

Ο μπεινίτης, ανάλογα με τη θερμοκρασία του μετασχηματισμού, διακρίνεται σε **ανώτερο μπεινίτη** και **κατώτερο μπεινίτη**. Ο ανώτερος μπεινίτης σχηματίζεται σε θερμοκρασίες όχι πολύ κατώτερες της θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στο όριο της περλιτικής περιοχής (550°C) και μικρογραφικά έχει τη μορφή βελόνων ή πτερών. Ο κατώτερος μπεινίτης σχηματίζεται σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλότερες (κοντά στην M_s) και μικρογραφικά εμφανίζει βελονοειδή μορφή και έτσι συγχέεται πολλές φορές με το μαρτενσίτη.

2.4 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΚΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα κραματικά στοιχεία προστίθενται για τους εξής λόγους:

- Προκαλούν αύξηση του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη
- Εμποδίζουν το σχηματισμό του σεμεντίτη
- Αυξάνουν της σκληρότητα του φερρίτη
-

➤ **ΑΝΘΡΑΚΑΣ, ΜΑΓΓΑΝΙΟ, ΠΥΡΙΤΙΟ**

Ο άνθρακας όπως επίσης και το μαγγάνιο είναι στοιχεία γ-φερρογόνα καθώς σταθεροποιούν τον ωστενίτη. Το μαγγάνιο προστίθεται σε ποσοστά 1.5-2.5 % κ.β. Το μαγγάνιο αυξάνει τη διαλυτότητα του άνθρακα, επιτρέποντας έτσι τον περαιτέρω εμπλουτισμό του. Το πυρίτιο αν και είναι α-φερρογόνο, καθώς σταθεροποιεί τον φερρίτη, συμβάλλει καθοριστικά και στη σταθεροποίηση του ωστενίτη, εμποδίζοντας την κατακρήμνιση του σεμεντίτη. Προστίθεται σε ποσοστά 1.5-2.5 % κ.β. Πέραν της προηγούμενης ιδιότητας του πυριτίου, η προσθήκη του συμβάλλει και στην αύξηση της αντοχής του φερρίτη και κατ' επέκταση του χάλυβα γενικότερα.

➤ **ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΣ**

Αμφότερα το αλουμίνιο και ο φωσφόρος, εμποδίζουν την κατακρήμνιση του σεμεντίτη και κατά συνέπεια μπορούν να αντικαταστήσουν ως ένα βαθμό το πυρίτιο. Όσον αφορά την αντοχή, ο φωσφόρος παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με το πυρίτιο, ενώ το αλουμίνιο όχι. Έτσι χάλυβες στους οποίους μέρος του πυριτίου έχει αντικατασταθεί από αλουμίνιο ίσως έχουν μειωμένη αντοχή. Αύξηση του περιεχόμενου φωσφόρου συμβάλλει στην αύξηση του κλάσματος όγκου του υπολειπόμενου ωστενίτη και εμποδίζει το σχηματισμό.

➤ **ΝΙΟΒΙΟ ΚΑΙ ΜΟΛΥΒΔΑΙΝΙΟ**

Η δράση του νιοβίου και του μολυβδαινίου δεν έχει εξηγηθεί πλήρως. Το νιόβιο συγκαταλέγεται στα α-φερρογόνα στοιχεία όμως έχει παρατηρηθεί ότι συμβάλλει και στην αύξηση του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη. Κατακρημνίσματα καρβιδίων του νιοβίου προσδίδουν επίσης αντοχή στο φερρίτη. Το μολυβδαίνιο δρα ως εμπόδιο στο σχηματισμό του σεμεντίτη.

➤ **ΧΑΛΚΟΣ**

Ο χαλκός όντας γ-φερρογόνο σταθεροποιεί τον ωστενίτη καθώς επίσης συμβάλλει και στην αύξηση της αντοχής του χάλυβα, μέσω των κατακρημνισμάτων του. Συνεπώς, θα μπορούσε να είναι αντικαταστάτης του πυριτίου σταθεροποιώντας τον ωστενίτη και προσδίδοντας αντοχή στο χάλυβα.

➤ **ΒΟΡΙΟ**

Μικρές συγκεντρώσεις βορίου φαίνεται να αυξάνουν τη δυσθραυστότητα και να συμβάλλουν στην αύξηση του ποσοστού του υπολειπόμενου ωστενίτη [6,8].

2.5 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

- ✓ Πρόκειται για στρατιωτικό μετασχηματισμό καθώς συνοδεύεται από παραμόρφωση του πλέγματος μέσω διάτμησης, διατηρώντας, παράλληλα, αντιστοιχία μεταξύ αρχικών και τελικών πλεγματικών θέσεων.
- ✓ Είναι μη διαχυτικός, καθώς δεν απαιτείται διάχυση ατόμων για τη πραγματοποίησή του. Τα άτομα επαναταξινομούνται σε μία πιο σταθερή κρυσταλλική δομή χωρίς, όμως, να μεταβάλουν τις σχετικές τους αποστάσεις και τη χημική σύσταση της κρυσταλλικής τους δομής.
- ✓ Οι μαρτενσιτικές αντιδράσεις είναι διεργασίες φύτρωσης και ανάπτυξης, καθώς η εξέλιξη του μετασχηματισμού γίνεται, όχι με ανάπτυξη των υφιστάμενων μετασχηματισμένων περιοχών, αλλά με εμφάνιση μαρτενσίτη σε νέες περιοχές.
- ✓ Ως στρατιωτικός μετασχηματισμός, χαρακτηρίζεται από προτιμητέα, αν όχι δεδομένη, σχέση προσανατολισμού μεταξύ αρχικής και τελικής φάσης.

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός εκδηλώνεται κατά την απόψυξη, με την πρακτικά ακαριαία εμφάνιση της νέας φάσης, από μία θερμοκρασία και κάτω που ονομάζεται **θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s)**. Η μαρτενσιτική φάση σχηματίζεται αμέσως μόλις αποκτηθεί αυτή η θερμοκρασία και δεν συνεχίζεται με ισοθερμοκρασιακού τύπου συνθήκες. Προκειμένου να συνεχισθεί ο μετασχηματισμός θα πρέπει να ελαττωθεί εκ νέου η θερμοκρασία. Ο μετασχηματισμός συνεχίζεται με σχηματισμό του μαρτενσίτη σε νέες περιοχές και όχι με ανάπτυξη των προηγούμενα σχηματισθέντων μαρτενσιτικών περιοχών. Με

M_f παριστάνεται η **θερμοκρασία ολοκλήρωσης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού**. Το ποσοστό του μετασχηματισμού είναι συνάρτηση της μείωσης θερμοκρασίας.

Προκειμένου να επιτευχθεί μαρτενσιτική βαφή, πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

- ✓ Ο μαρτενσίτης σχηματίζεται μόνο μέσα από την ωστενιτική φάση, και επομένως απαραίτητη προϋπόθεση για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό είναι η ωστενιτοποίηση του χάλυβα πριν τη βαφή.
- ✓ Η ταχύτητα απόψυξης (V) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μίας κρίσιμης ταχύτητας (V_c), χαρακτηριστική για κάθε χάλυβα ($V > V_c$). Η κρίσιμη ταχύτητα βαφής (V_c) μεταβάλλεται συναρτήσει της περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα, την περιεκτικότητα σε κραματικά στοιχεία και εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων.
- ✓ Η θερμοκρασία του λουτρού βαφής (T_1), πρέπει να είναι χαμηλότερη της θερμοκρασίας έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (M_s), η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε χάλυβα ($T_1 < M_s$).

2.5.1 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΜΑΡΤΕΝΣΙΤΗ

Ο μαρτενσίτης κρυσταλλώνεται στο χωροκεντρωμένο τετραγωνικό σύστημα (BCT). Μορφολογικά ο μαρτενσίτης μπορεί να εμφανίζεται ως:

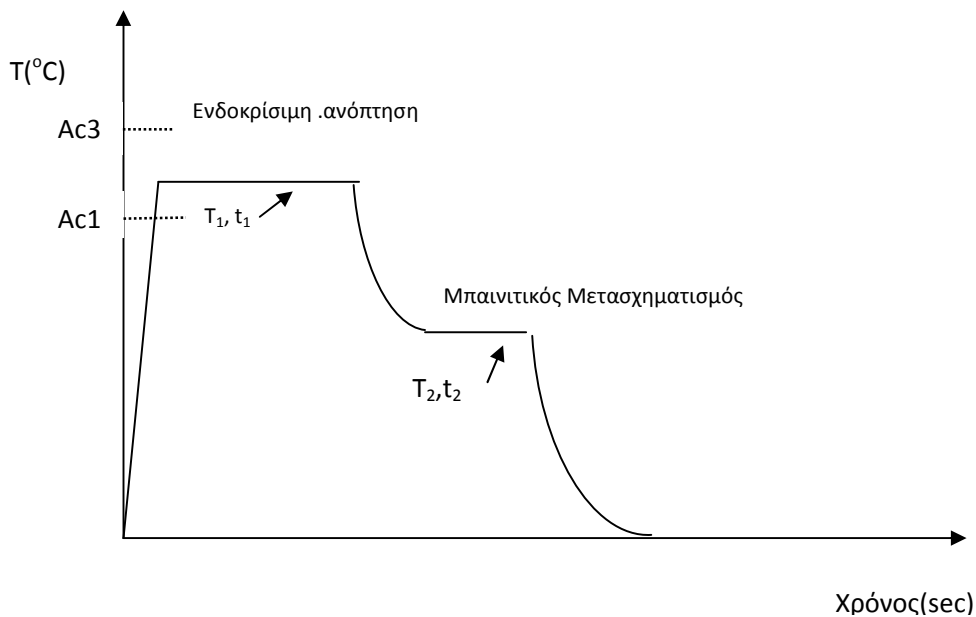
- ✓ Πλακοειδής μαρτενσίτης, στο οποίο οι μαρτενσιτικές περιοχές εμφανίζονται με τη μορφή μικρών παραλληλεπίπεδων, πάχους 0,1 μ m, συσσωρεύονται σε πακέτα παράλληλα μεταξύ τους και περιέχουν μεγάλη πυκνότητα διαταραχών.
- ✓ Βελονοειδής μαρτενσίτης, στο εσωτερικό του οποίου οι μαρτενσιτικές περιοχές δεν είναι παράλληλες, αλλά σχηματίζουν μεταξύ τους απόλυτα καθορισμένες γωνίες.

2.5.2 ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ M_s

Οι τιμές του M_s επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και σε μικρότερο βαθμό από την παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων. Στην περίπτωση του χάλυβα TRIP, ο σχηματισμός του μαρτενσίτη ενεργοποιείται από την εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση και την συνακόλουθη πλαστική παραμόρφωση. Η εξωτερική τάση και η συνακόλουθη πλαστική παραμόρφωση αποτελεί την ωθούσα δύναμη για να συμβεί ο μετασχηματισμός σε θερμοκρασία πάνω από την M_s .

2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ενδοκρίσιμη ανόπτηση στους 780°C (T_1) όπου εισερχόμαστε στην περιοχή ωστενίτη-φερρίτη για 5 min (t_1). Ακολουθεί ψύξη με ρυθμό $10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$. Στους 450°C (T_2) παραμένει το υλικό για 400 sec (t_2). Κατά την παραμονή του υλικού στους 450°C πραγματοποιείται ο μπαινιτικός μετασχηματισμός και η σταθεροποίηση του ωστενίτη. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου με ρυθμό $10^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση της θερμικής κατεργασίας την οποία υπέστη το υλικό μετά την ψυχρή έλαση

Κεφάλαιο

3

3. ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία και τα αποτελέσματα που περιλαμβάνουν μέτρηση της απόκρισης του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen παράλληλα με συνεχή εφελκυστική καταπόνηση δοκιμίων χάλυβα TRIP 800 αλλά και μετά την αποφόρτισή τους.

3.1 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η απόκριση και μεταβολή του σήματος του φαινομένου Barkhausen ως εξάρτηση στατικής, μονοαξονικής, εφελκυστικής καταπόνησης σε δείγματα χάλυβα TRIP. Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο ομάδες πειραματικών μετρήσεων:

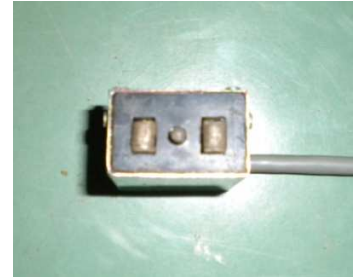
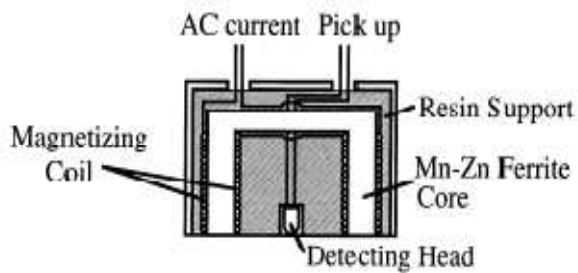
- Μέτρηση του θορύβου Barkhausen κατά τη διάρκεια **συνεχούς**, μονοαξονικής εφελκυστικής φόρτισης των δοκιμίων.
- Μέτρηση του θορύβου Barkhausen σε δοκίμια **μετά την αποφόρτιση** τους από την εφελκυστική καταπόνηση.

3.1.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN (MBN)

Για την μέτρηση του φαινομένου Barkhausen χρησιμοποιήθηκε η διάταξη σημειακής μέτρησης **MEB-2c**. Η εν λόγω διάταξη αποτελείται από δύο μέρη που είναι τα εξής:

1. Μία κεφαλή για τη διέγερση και ανίχνευση του σήματος Barkhausen. Η κεφαλή έχει στο εσωτερικό της ένα πεταλοειδή ηλεκτρομαγνήτη ο οποίος τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα διέγερσης, τριγωνικής μορφής, σταθερής συχνότητας **10 Hz** και διεγείρει με πεδίο το υπό εξέταση υλικό. Ο πυρήνας του ηλεκτρομαγνήτη διαθέτει πηνίο τυλιγμένο γύρω του για τον έλεγχο, μεν, της σωστής ηλεκτρομαγνητικής

σύζευξης της κεφαλής με την επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος και τη μαγνητική διαπερατότητα, δε, του υπό εξέταση υλικού. Επίσης στο ενδιάμεσο των δύο άκρων του ηλεκτρομαγνήτη βρίσκεται κινούμενος φερρίτης ραβδοειδούς μορφής, ο οποίος φέρει τυλιγμένο γύρω του το πηνίο λήψης. Η κίνηση του φερρίτη του προσφέρει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται με μεγαλύτερη ευκολία και ακρίβεια στην επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 3.1 Σχηματική απεικόνιση της κεφαλής της διάταξης Barkhausen

2. Μία κεντρική μονάδα η οποία τροφοδοτεί με ρεύμα την κεφαλή, επεξεργάζεται και αποστέλλει τα δεδομένα σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η κεντρική μονάδα διαθέτει αναλογικό και ψηφιακό μέρος για τον έλεγχο και επεξεργασία των εξερχόμενων δεδομένων.



Σχήμα 3.2 :Κεντρική μονάδα τροφοδοσίας σήματος και επεξεργασίας δεδομένων

3.1.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ BARKHAUSEN

Η μέτρηση της έντασης του φαινομένου Barkhausen μέσω της διάταξης σημειακής μέτρησης MEB-2c περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους. Οι δύο κύριες, **V1** και **counts**, σχετίζονται άμεσα με το θόρυβο Barkhausen. Η τρίτη παράμετρος, **V2**, εξαρτάται από τη θέση της κεφαλής και την

επαφή με την επιφάνεια του δείγματος. Αναλυτικότερα: η παράμετρος **V1** είναι η **ενεργός τιμή του σήματος Barkhausen** ενώ η παράμετρος **counts** αντιπροσωπεύει τον **αριθμό των παλμών** πάνω από ένα άνω όριο τάσης (threshold) που μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη ανάλογα με το υλικό προς μέτρηση. Η παράμετρος V2 αποτελεί ένδειξη της μαγνητικής διαπερατότητας του δείγματος και με βάση αυτή βελτιώνεται η θέση της κεφαλής στην επιφάνεια του δείγματος και γίνεται εκτίμηση των μαγνητικών του ιδιοτήτων.

Το σήμα της διάταξης λαμβάνεται και ενισχύεται από μία κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) και έτσι οι τρεις παράμετροι V1, V2 και counts απεικονίζονται στην οθόνη LCD κύριας μονάδας και μεταφέρονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με χρήση λογισμικού **Mag-Lab**. Ο παλμός Barkhausen και η τριγωνική κυματομορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος φαίνονται με τη χρήση παλμογράφου.



Σχήμα 3.3: Φωτογραφία του χρησιμοποιούμενου παλμογράφου

3.2 ΕΠΙΤΟΠΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ, ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ, ΣΥΝΕΧΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Ο εφελκυσμός όλων των δοκιμών έγινε στη μηχανή εφελκυσμού Instron 4482 του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια χάλυβα TRIP 800, πάχους 1,25mm και διαμορφωμένα για τη δοκιμή του εφελκυσμού σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8M.

Η πρώτη ομάδα μετρήσεων αφορά συνεχή εφελκυστική καταπόνηση 7 δοκιμών κατά τη διάρκεια της οποίας λαμβάνονταν μετρήσεις των παραμέτρων V1, V2 και counts. Οι παραμορφώσεις των δοκιμών έγιναν σε επιλεγμένες τιμές από όλο το εύρος του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης του υλικού. Έτσι η σειρά της πειραματικής αλληλουχίας έχει ως εξής:

Πίνακας 3.1 Αλληλουχία της πειραματικής διαδικασίας

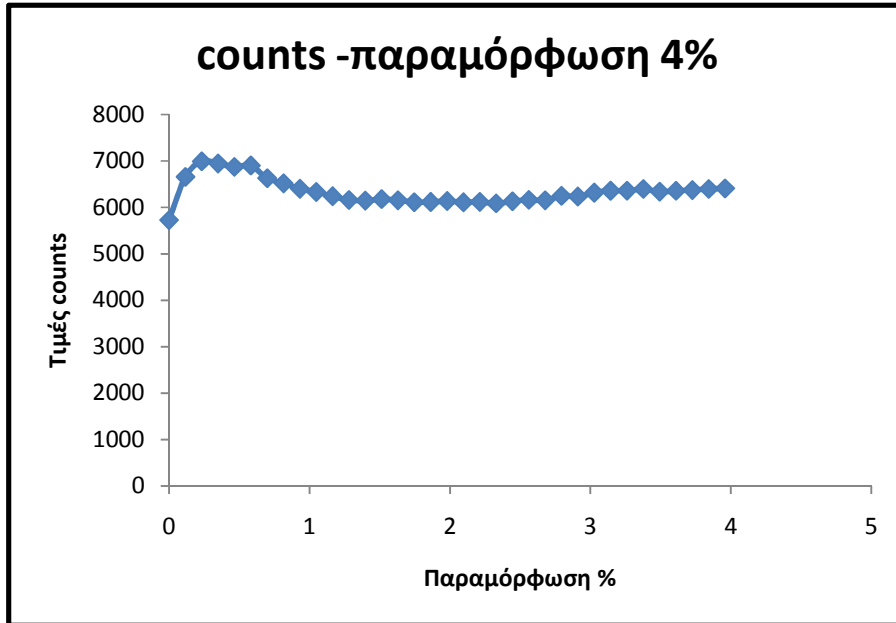
Α/Α Δοκίμιου	Ποσοστό Παραμόρφωσης
1 ^ο δοκίμιο	Έως 4%
2 ^ο δοκίμιο	Έως 8%
3 ^ο δοκίμιο	Έως 12%
4 ^ο δοκίμιο	Έως 16%
5 ^ο δοκίμιο	Έως 20%
6 ^ο δοκίμιο	Έως 24%
7 ^ο δοκίμιο	Έως τη θραύση

Κατά την πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

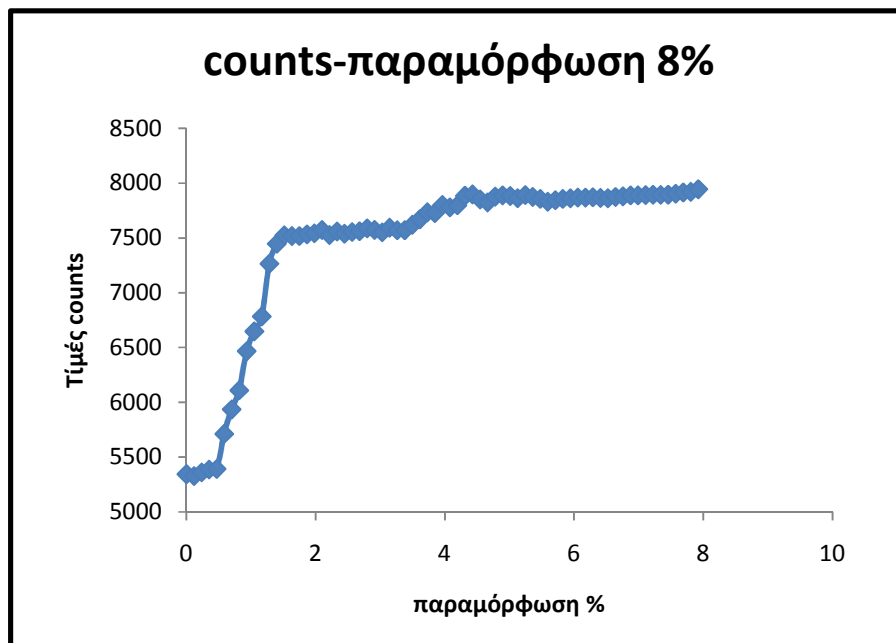
- ✓ Η διάταξη σημειακής μέτρησης προσαρμόζεται στην επιφάνεια του δοκίμιου μετά την τοποθέτησή του στην μηχανή εφελκυσμού ελέγχοντας πάντα η κεφαλή να είναι στη θέση βέλτιστης σύζευξης. Η θέση βέλτιστης σύζευξης είναι αυτή στην οποία μεγιστοποιούνται οι τιμές των παραμέτρων V2 και counts.
- ✓ Ο ρυθμός παραμόρφωσης των δοκιμών επελέγη να είναι **0.1 mm/min**.
- ✓ Η συχνότητα μαγνήτισης διατηρήθηκε ίδια και ίση με 10 Hz.
- ✓ Οι τιμές των παραμέτρων του θορύβου Barkhausen (V1,V2 και counts) καθώς και η τιμή της παραμόρφωσης σε mm λαμβάνονταν ανά **1min**.
- ✓ Η εφελκυστική καταπόνηση κάθε δοκίμιου πραγματοποιούνταν ως το επιλεγμένο ποσοστό παραμόρφωσης κάθε φορά.
- ✓ Λαμβάνονταν πέντε τιμές για κάθε μία εκ των παραμέτρων V1,V2 counts /min

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η εξάρτηση των παραμέτρων V1, V2 και counts από την παραμόρφωση στα δοκίμια. Σε κάθε τιμή παραμόρφωσης αντιστοιχεί ο μέσος όρος των πέντε μετρήσεων της εκάστως παραμέτρου του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

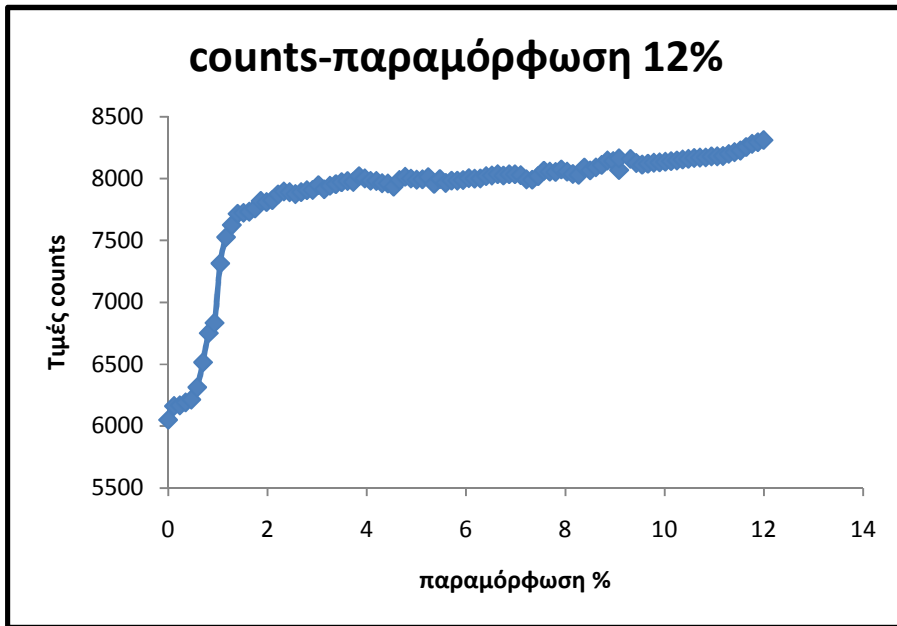
➤ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ COUNTS ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ



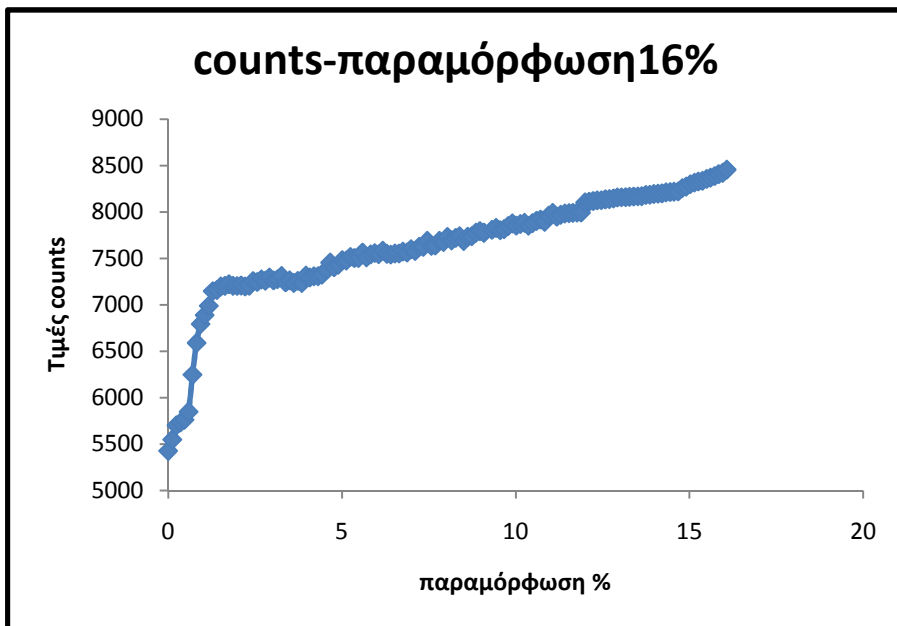
Σχήμα 3.4: Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 4%



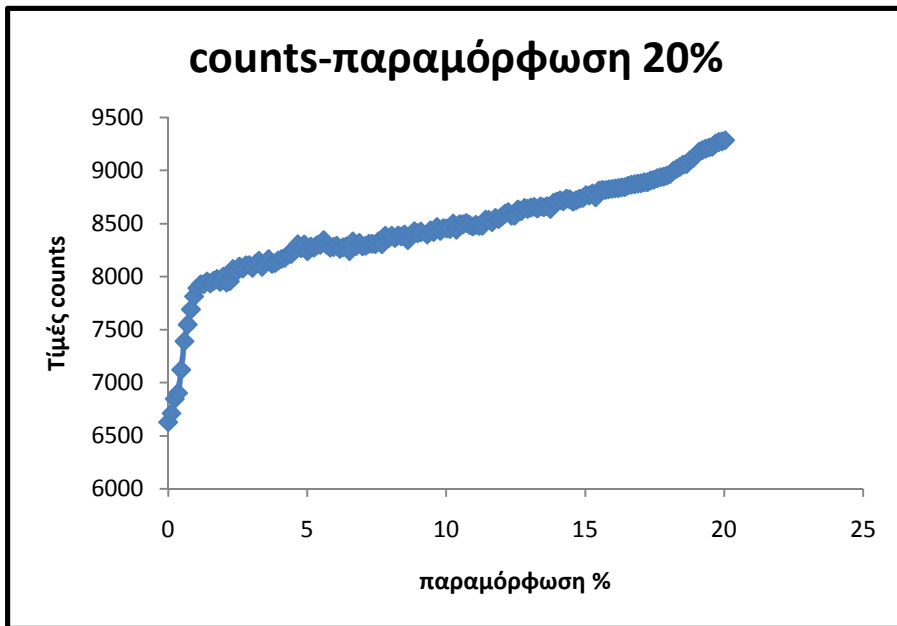
Σχήμα 3.5: Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 8%



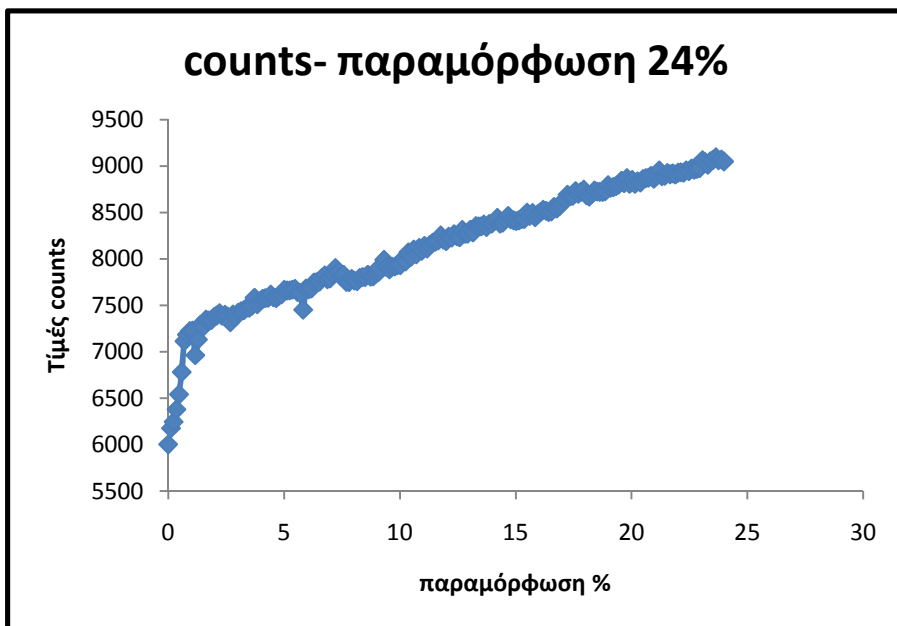
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 12%



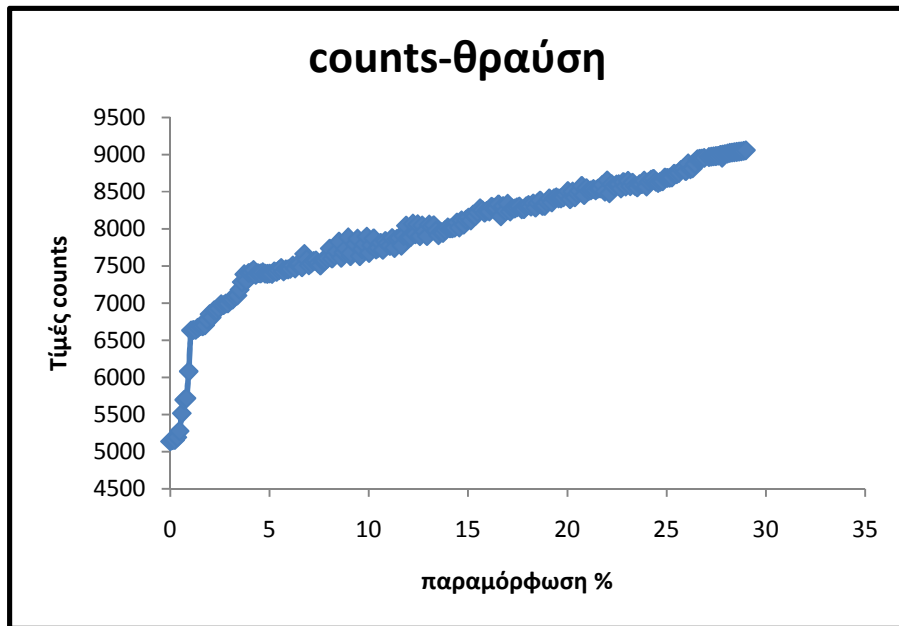
Σχήμα 3.7 Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 16%



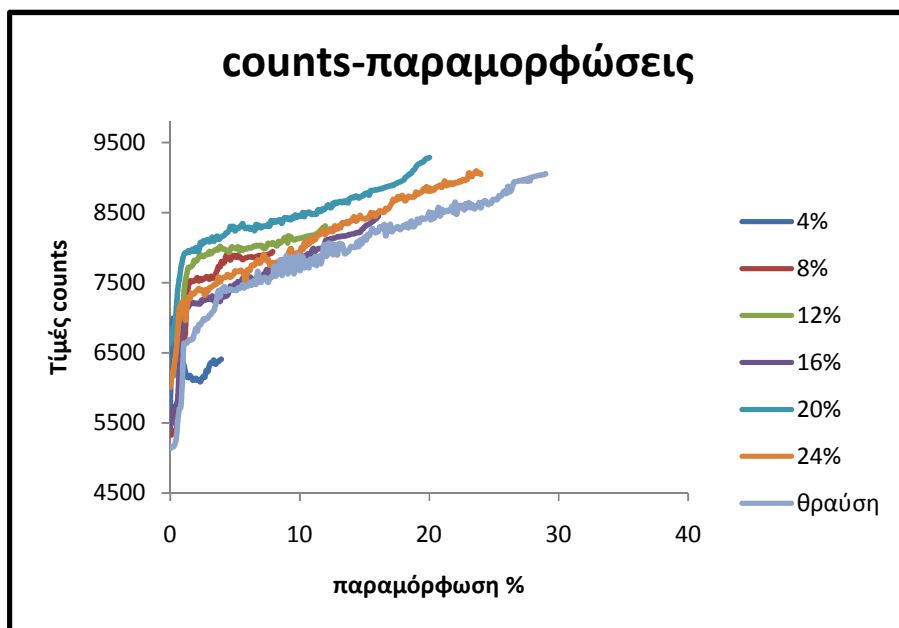
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 20%



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 24%

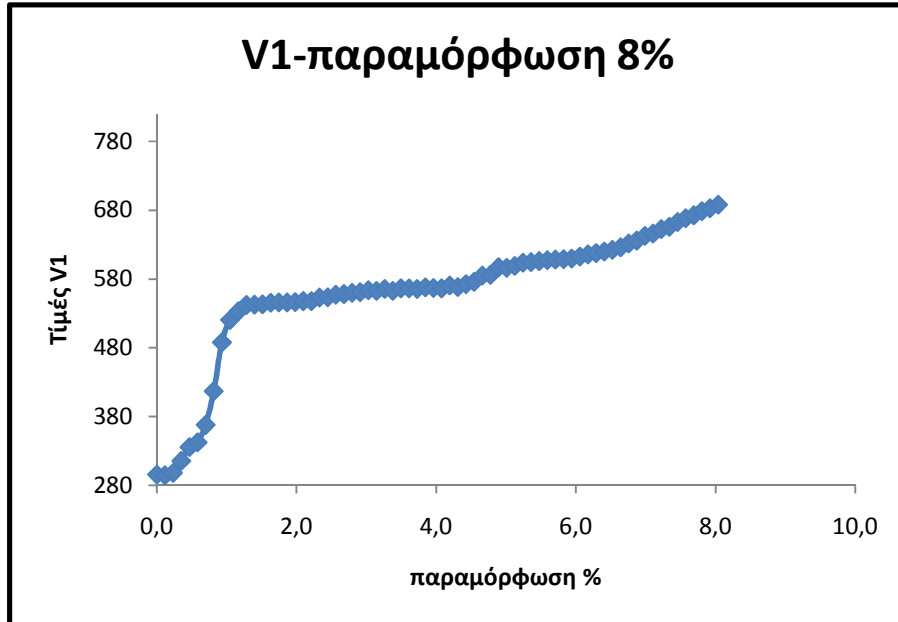


Σχήμα 3.10 Διάγραμμα μεταβολής των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση έως θραύση

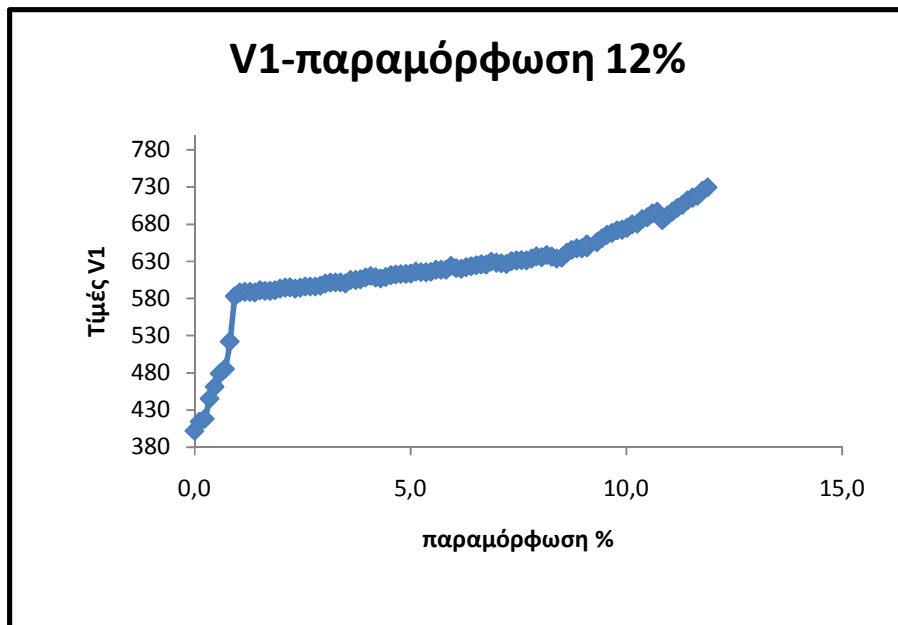


Σχήμα 3.11 Συνολικό διάγραμμα μεταβολής των counts

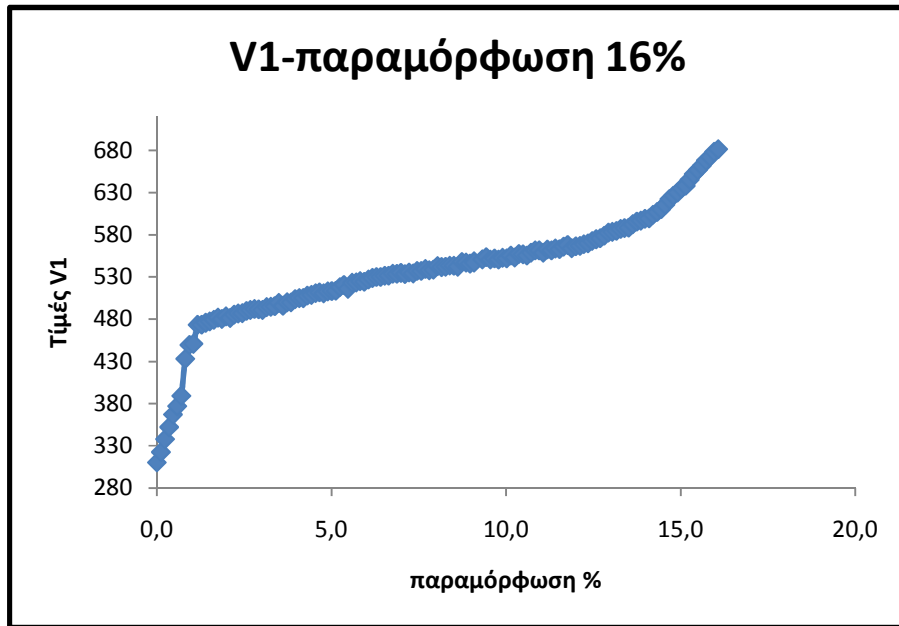
- **ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ V1 (RMS) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**



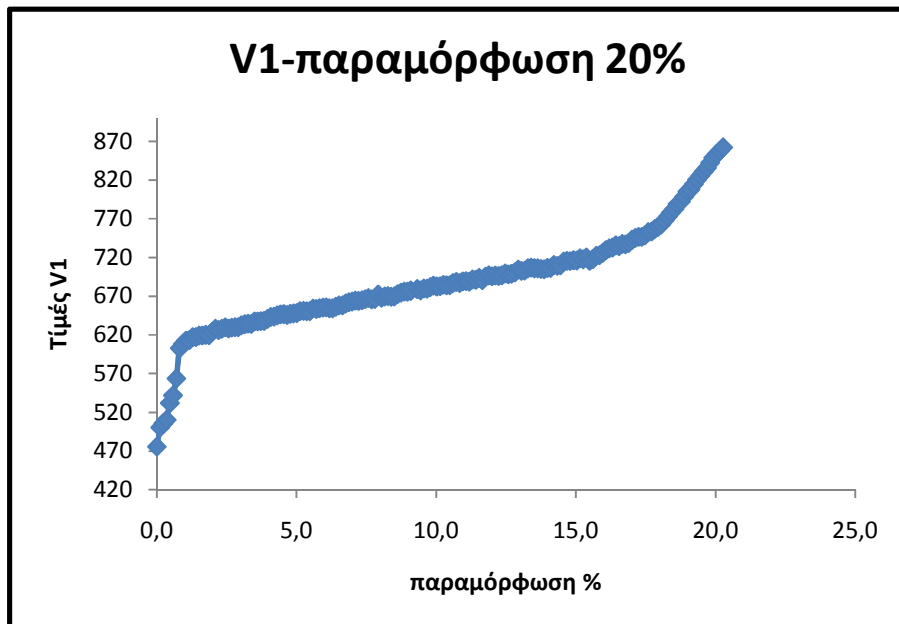
Σχήμα: 3.12 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 8%



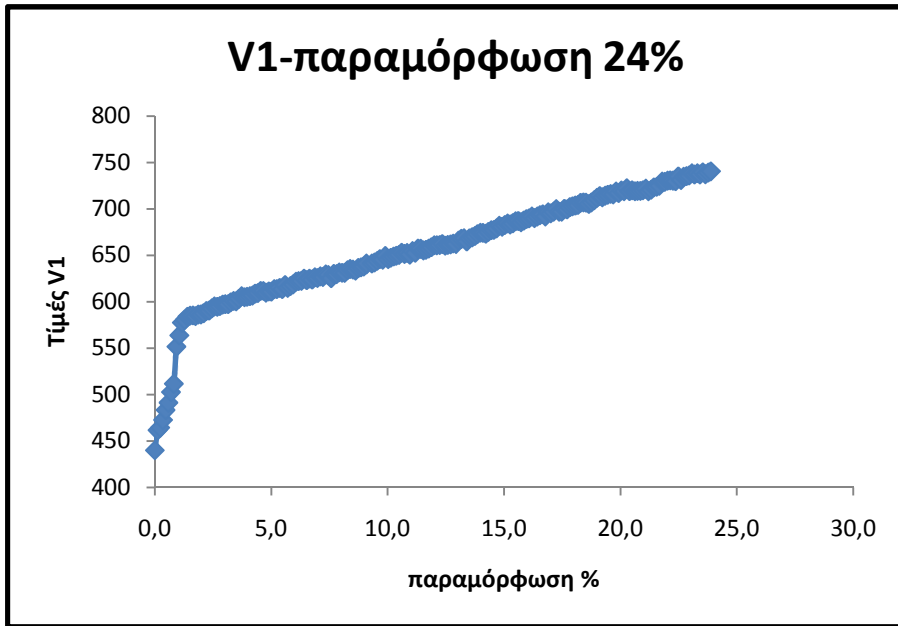
Σχήμα: 3.13 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 12%



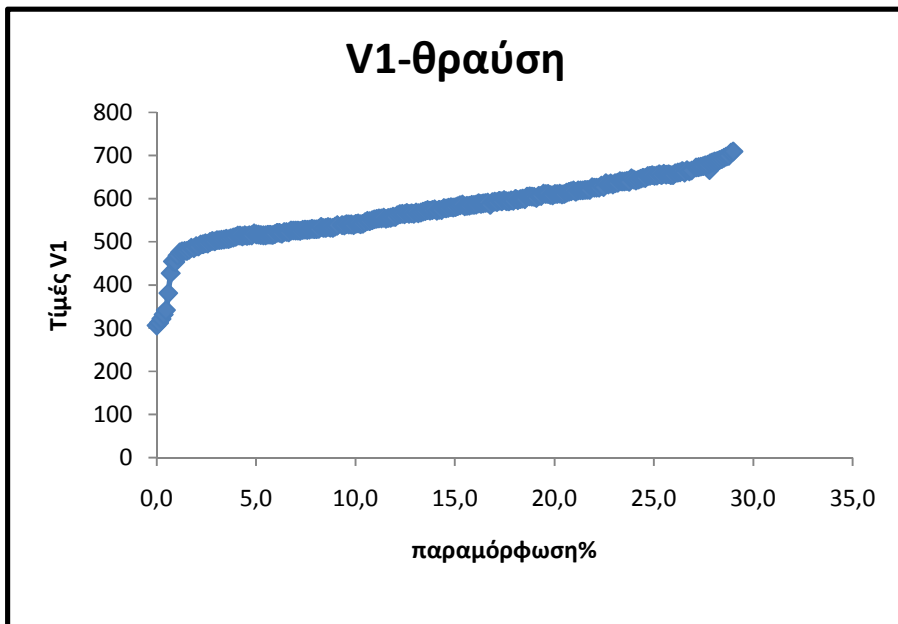
Σχήμα: 3.14 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 16%



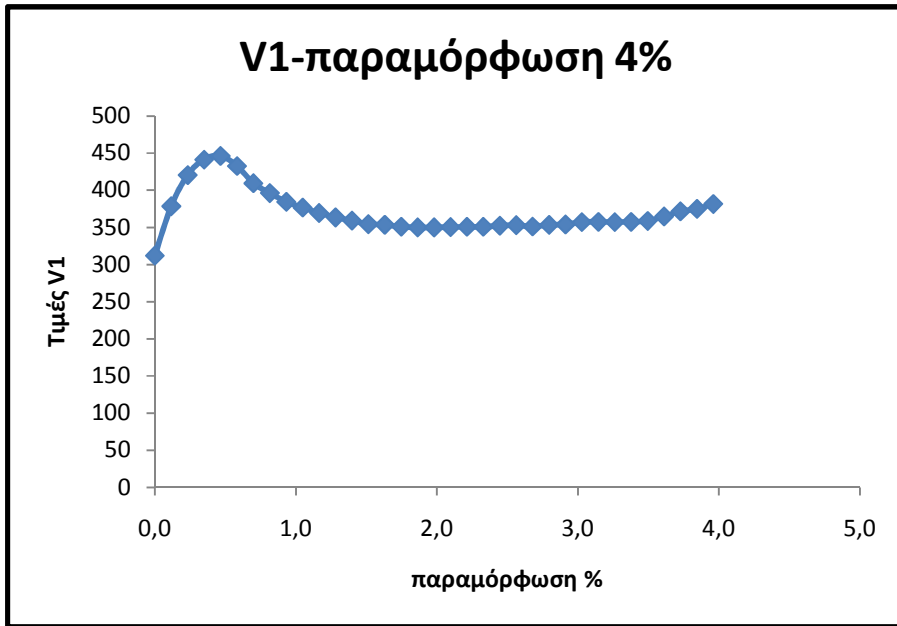
Σχήμα: 3.15 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 20%



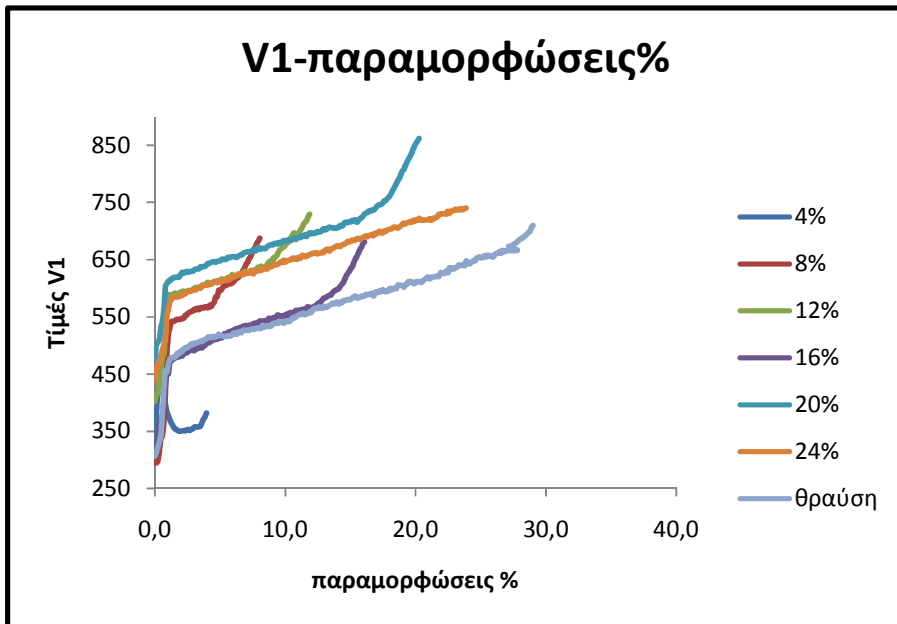
Σχήμα: 3.16 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 24%



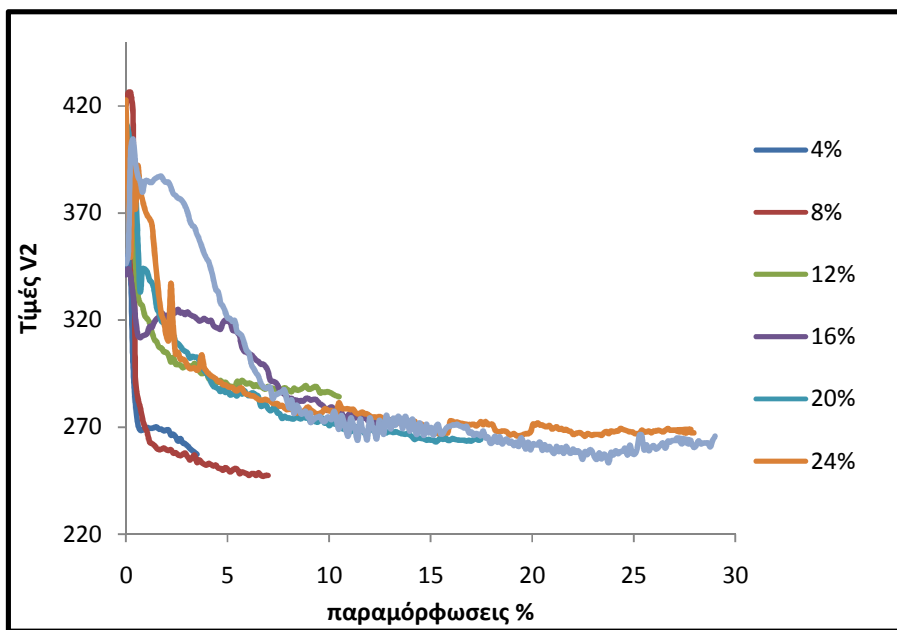
Σχήμα: 3.17 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση ως τη θραύση



Σχήμα: 3.18 Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 4%



Σχήμα: 3.19 Συνολικό Διάγραμμα μεταβολή του V1 σε συνάρτηση με την παραμόρφωση 4%



Σχήμα 3.19 Συνολικό διάγραμμα μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας V2

3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζεται η μεταβολή του αριθμού των counts και της τιμής V1 (rms) συναρτήσει της παραμόρφωσης %. Από την παρατήρησή τους, φαίνεται ότι η διακύμανση των τιμών counts και των τιμών V1 παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά για όλα τους επιλεγμένους βαθμούς παραμόρφωσης.

Αρχικά, σε μικρές παραμορφώσεις, παρατηρείται απότομη αύξηση της απόκρισης του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen (counts και V1), ενώ η κλίση αλλάζει για μεγαλύτερα ποσοστά παραμόρφωσης, χωρίζοντας έτσι ουσιαστικά κάθε διάγραμμα σε δυο περιοχές. Η αρχική, απότομη αύξηση αποδίδεται στο γεγονός ότι το υλικό των δοκιμών ανήκει στους χάλυβες, οι οποίοι έχουν θετική μαγνητοσυστολική σταθερά. Στα υλικά με θετική μαγνητοσυστολική σταθερά, η εφαρμογή εφελκυστικών τάσεων στον άξονα διεύθυνσης μαγνήτισης προκαλεί αύξηση των μαγνητικών κινητών τοιχωμάτων 180° , από την ασυνεχή κίνηση των οποίων πιστεύεται ότι προέρχεται ο θόρυβος Barkhausen. Η ένταση του θορύβου Barkhausen ενισχύεται όχι μόνο από την αύξηση του αριθμού τους, αλλά και από την αύξηση της μέσης ανεμπόδιστης απόστασης που μπορούν να διανύσουν. Η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων 180° υποβοηθείται και από την επιβαλλόμενη εφελκυστική φόρτιση. Η αντίδραση μιας σιδηρομαγνητικής περιοχής σε μονοαξονική, εφελκυστική φόρτιση, με παράλληλη εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, περιγράφεται σε 2 στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση της περιοχής με τον **κοντινότερο** εύκολο άξονα στη διεύθυνση μονοαξονικής φόρτισης και στη διεύθυνση μαγνήτισης. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την ευθυγράμμιση **ακριβώς** με τη διεύθυνση μονοαξονικής φόρτισης και τη διεύθυνση μαγνήτισης. Έτσι όταν το υλικό μαγνητίζεται υπό την επίδραση εφελκυσμού, το μεγαλύτερο μέρος του πρώτου σταδίου έχει ήδη επιτευχθεί από τη φόρτιση και το δεύτερο στάδιο της ακριβούς ευθυγράμμισης ξεκινάει νωρίτερα. Η επιβαλλόμενη φόρτιση, συνεπώς, δρα σαν επιπρόσθετο πεδίο μαγνήτισης και ενισχύει την υπερπήδηση σημείων αγκύρωσης. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η υποβολή ενός πολυκρυσταλλικού υλικού σε εφελκυστικές τάσεις, επιφέρει αύξηση και του μεγέθους των περιοχών που έχουν παράλληλες τις μαγνητικές ροπές τους στον άξονα της επιβαλλόμενης φόρτισης και στον άξονα μαγνητικής διέγερσης καθώς είναι ενεργειακά ευνοημένες. Στα αρχικά ποσοστά παραμόρφωσης, στην περιοχή που η απόκριση του θορύβου Barkhausen εμφανίζει απότομη αύξηση, η κίνηση των τοιχωμάτων επηρεάζεται κυρίως από τα όρια κόκκων και τυχόν εγκλείσματα που συναντούν στην πορεία τους [14-18].

Σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ο θόρυβος Barkhausen συνεχίζει να αυξάνεται αλλά με μειωμένο ρυθμό (αλλαγή κλίσης). Πλέον το υλικό σκληραίνει μαγνητικά και έτσι απαιτείται ολοένα και μεγαλύτερο πεδίο διέγερσης για την περιστροφή και προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών. Η μείωση του ρυθμού αύξησης της απόκρισης του Μαγνητικού

Θορύβου Barkhausen αποδίδεται στη μείωση του ρυθμού αύξησης του πληθυσμού των μαγνητικών τοιχωμάτων 180° καθώς ο πληθυσμός τους πλησιάζει τον κορεσμό. Ο Θόρυβος Barkhausen επηρεάζεται πλέον τις συνθήκες κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων 180° , έτσι όπως αυτές διαμορφώνονται από την συνεχή γένεση διαταραχών κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης [16-19].

Στη γενική αύξηση της απόκρισης του Θορύβου Barkhausen, συμβάλλει και ο μετασηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη καθώς ο μαρτενσίτης παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά εν αντιθέσει με τον ωστενίτη που παρουσιάζει παραμαγνητική συμπεριφορά.

Εξαίρεση αποτελεί το διάγραμμα τόσο των counts όσο και του V1 που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 4%. Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται μικρή μείωση της απόκρισης του Θορύβου Barkhausen στις μικρές παραμορφώσεις η οποία αποδίδεται σε πιθανή κακή τοποθέτηση του δοκιμίου στη μηχανή εφελκυσμού.

Όσον αφορά τη μεταβολή της ενδεικτικής τιμής, μαγνητικής διαπερατότητας, παρατηρείται ότι δεν παρουσιάζει, αρχικά, σταθερή διακύμανση για ποσοστό παραμόρφωσης μέχρι περίπου 6%. Στη συνέχεια, όμως, παρουσιάζει φθίνουσα μονοτονική συμπεριφορά για παραμορφώσεις πάνω από 6% έως τη θραύση. Η μεταβολή της ενδεικτικής μαγνητικής διαπερατότητας είναι ένδειξη της αναμενόμενης μαγνητικής σκλήρυνσης του υλικού λόγω πλαστικής παραμόρφωσης.

3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

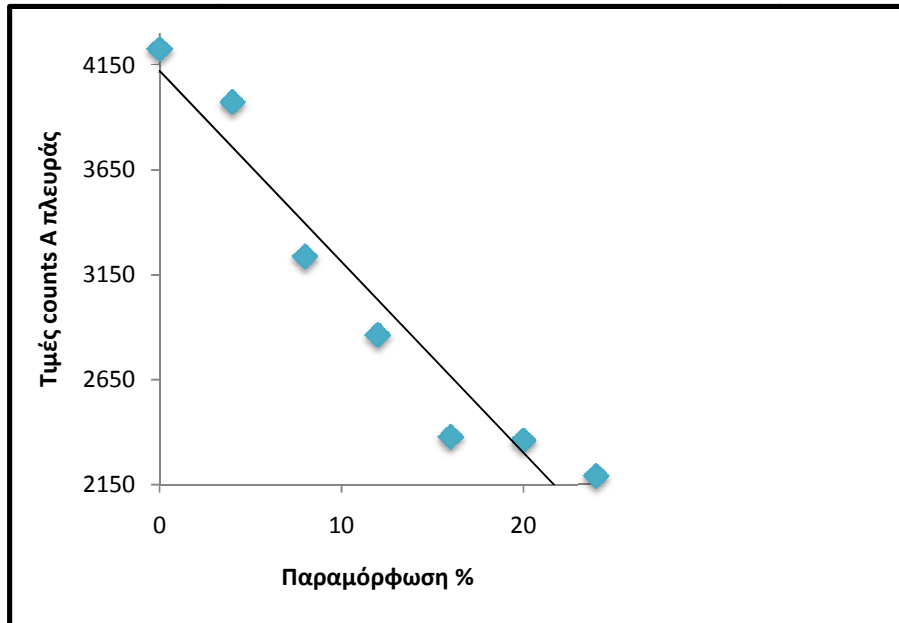
Η δεύτερη σειρά πειραμάτων περιλαμβάνει τη μέτρηση των παραμέτρων του θορύβου Barkhausen (V1, V2, counts) μετά από την αποφόρτιση-απομάκρυνση των δοκιμίων από την μηχανή Instron.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, περιλαμβάνει μέτρηση σε κάθε δοκίμιο σε 5 ισαπέχοντα σημεία και στις δύο πλευρές (Α και Β) του κάθε δοκιμίου. Σε κάθε σημείο ελήφθησαν 5 μετρήσεις από τις οποίες εξάγονται οι μέσοι όροι.

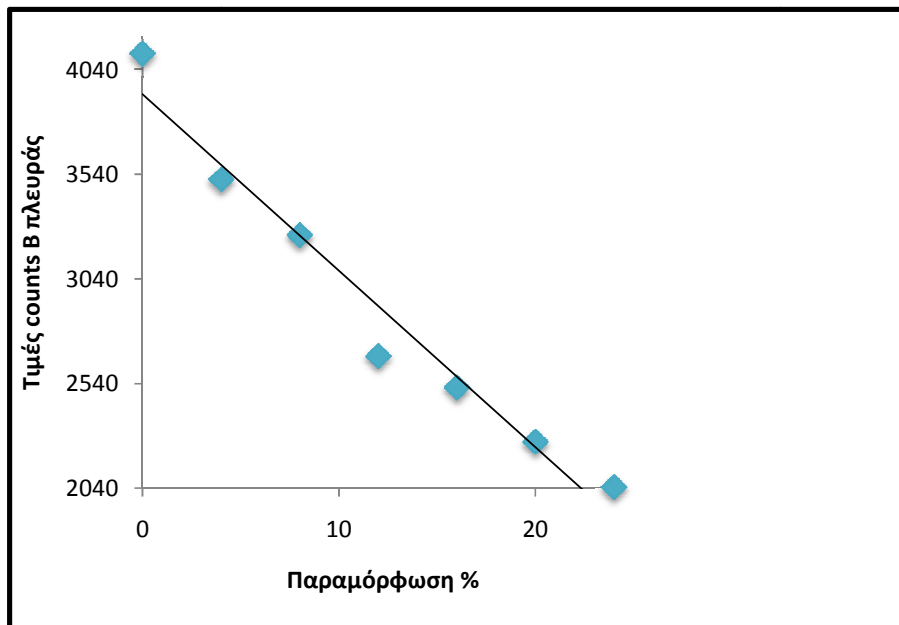
Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διατήρηση της σωστής σύζευξης μεταξύ της κεφαλής του ηλεκτρομαγνήτη και του δοκιμίου, προσέχοντας η τιμή της παραμέτρου V2 (ένδειξη μαγνητικής διαπερατότητας) να είναι μέγιστη.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η εξάρτηση των παραμέτρων V1, V2 και counts από την παραμόρφωση στα δοκίμια μετά την αποφόρτιση των δοκιμίων.

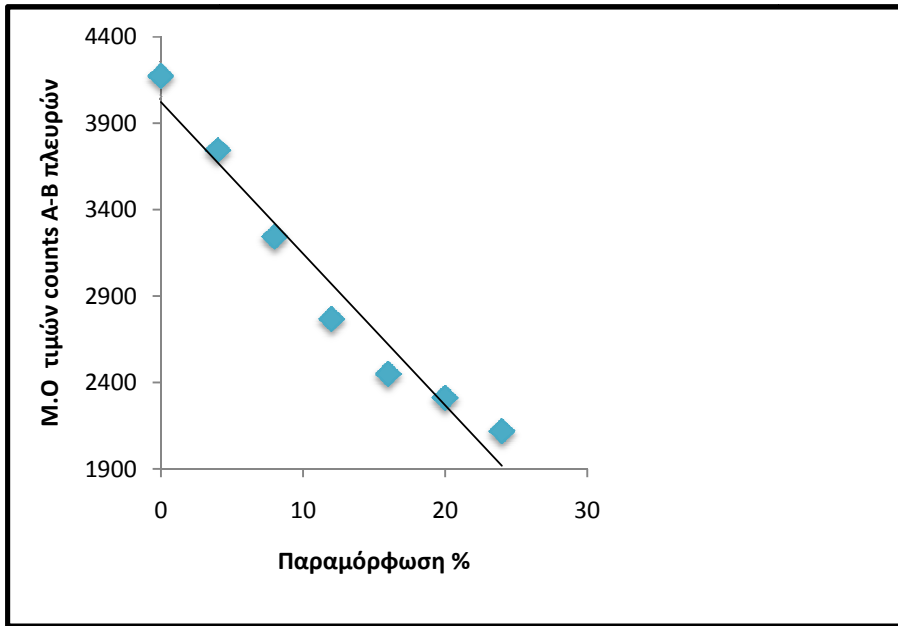
- **ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ COUNTS ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**



Σχήμα 3.20: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών counts συναρτήσει της παραμόρφωσης (Α πλευρά)



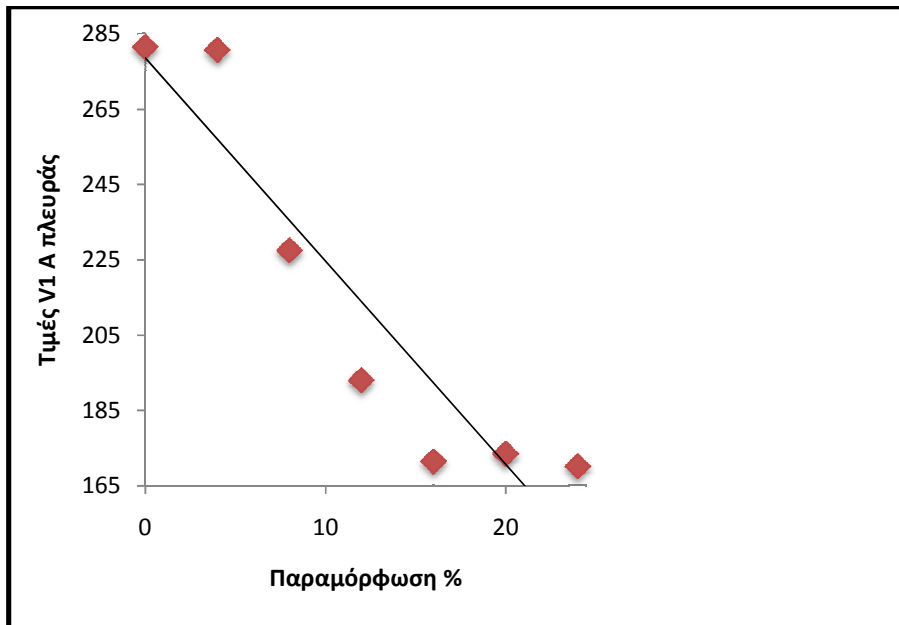
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών counts συναρτήσει της παραμόρφωσης (Β πλευρά)



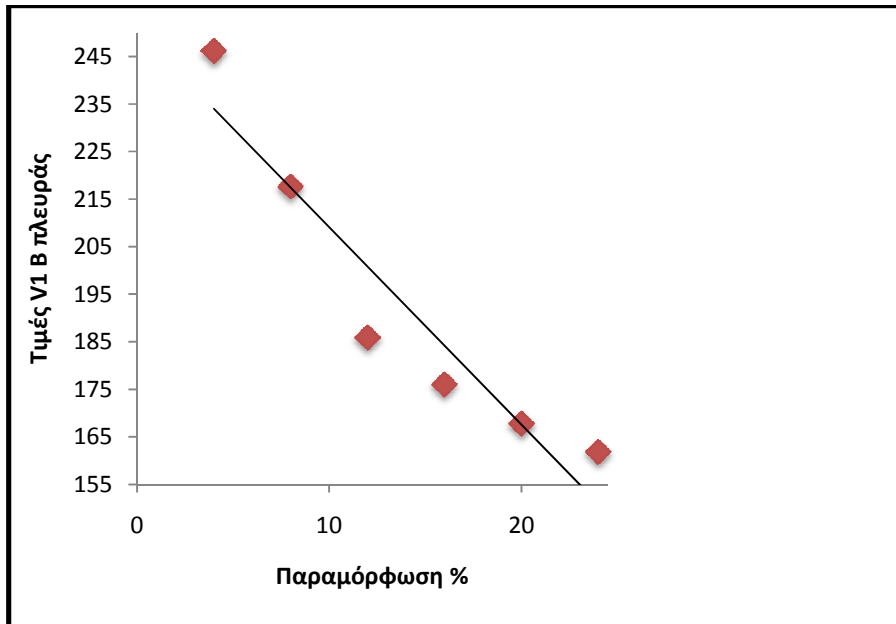
Σχήμα 3.21: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών counts συναρτήσει της παραμόρφωσης (A και B πλευρά)

- **ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΩΝ V1(RMS) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**

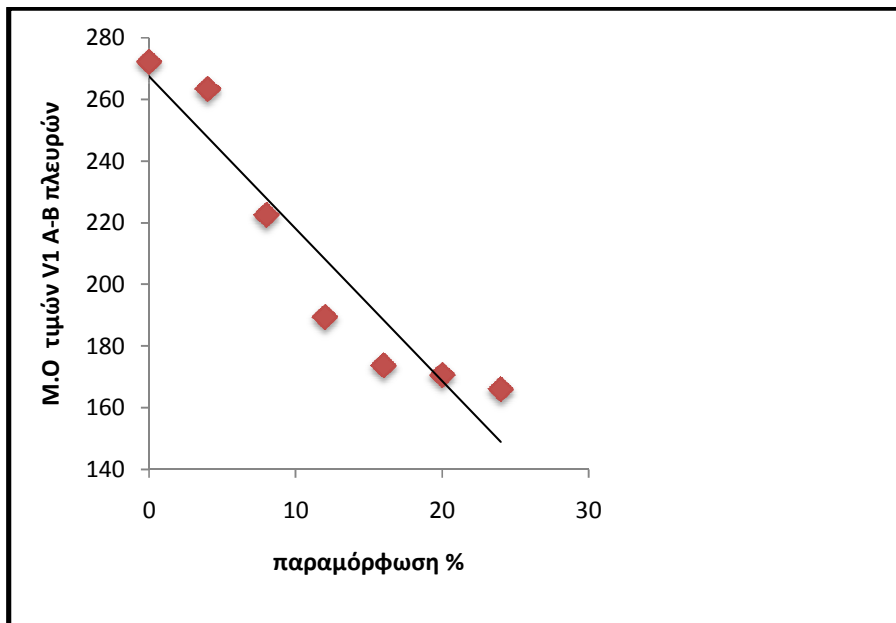
•



Σχήμα 3.22: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V1 συναρτήσει της παραμόρφωσης (A πλευρά)

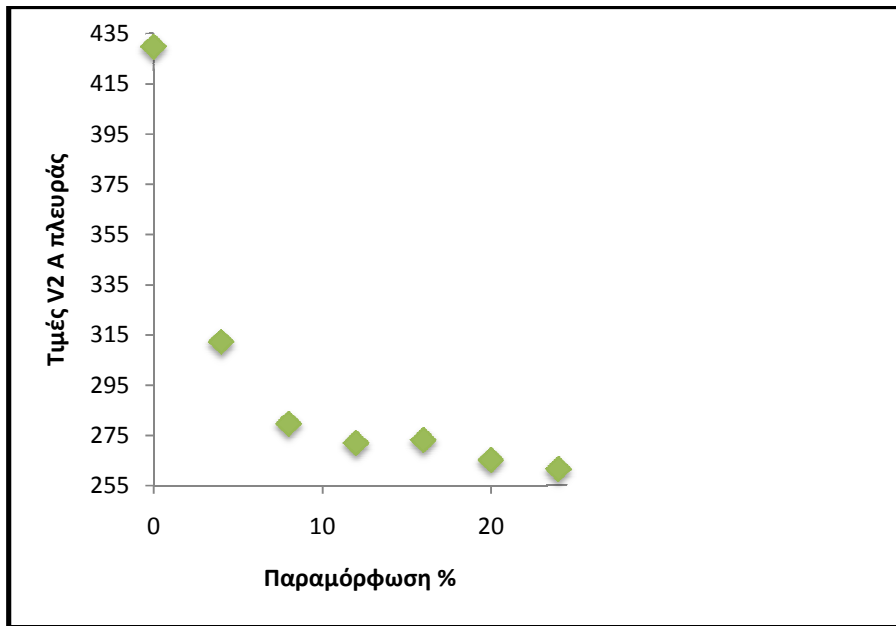


Σχήμα 3.22: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V1 συναρτήσει της παραμόρφωσης (B πλευρά)

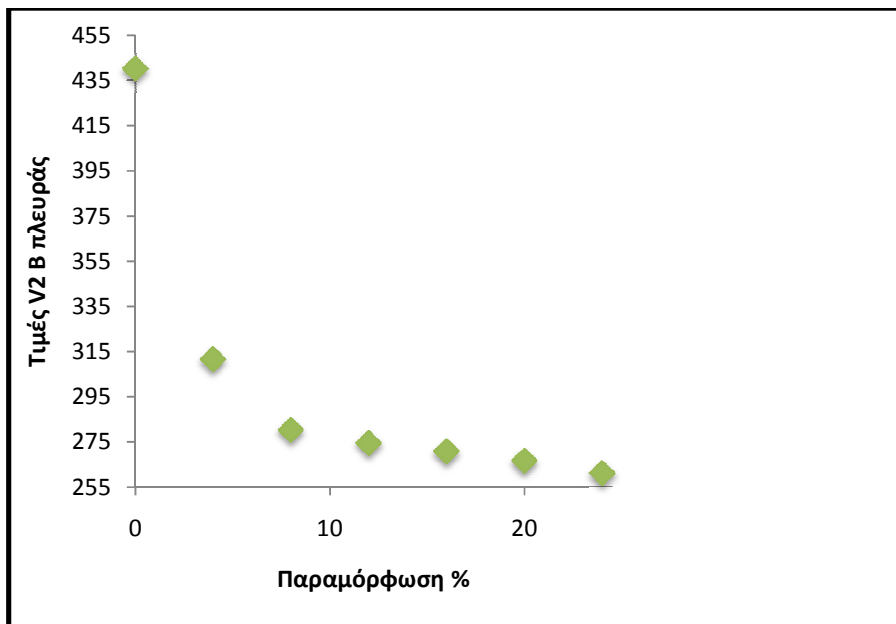


Σχήμα 3.23: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V1 συναρτήσει της παραμόρφωσης (A και B πλευρά)

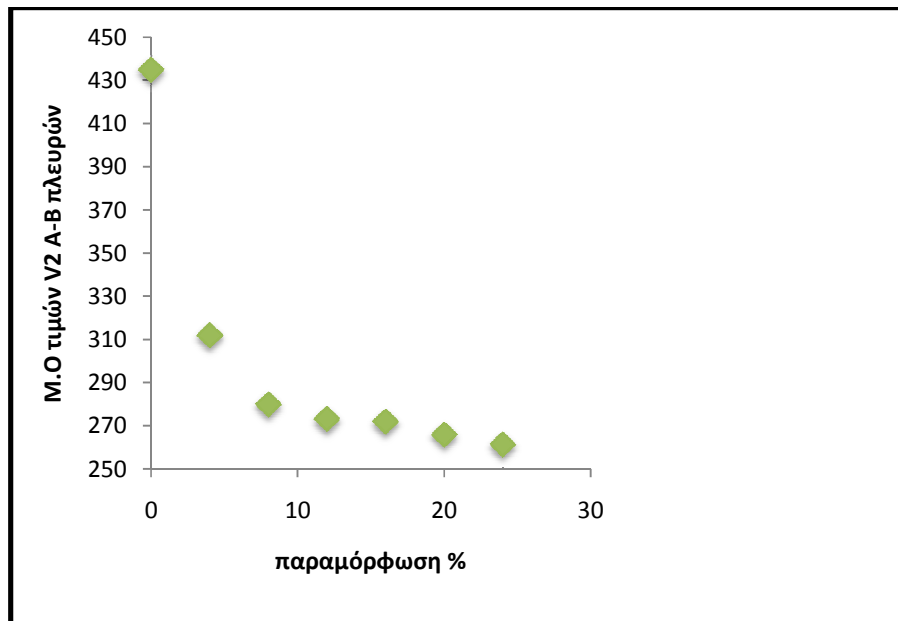
➤ **ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ V2 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ**



Σχήμα 3.23: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V2 συναρτήσει της παραμόρφωσης (A πλευρά)



Σχήμα 3.24: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V2 συναρτήσει της παραμόρφωσης (B πλευρά)



Σχήμα 3.23: Διάγραμμα μεταβολής των τιμών V2 συναρτήσει της παραμόρφωσης (A και B πλευρά)

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόκριση του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen παρουσιάζει πτωτική πορεία συναρτήσει της παραμόρφωσης γεγονός που υποδεικνύει την μαγνητική σκλήρυνση του υλικού .

Η πτώση των μέσων όρων των τιμών V1, V2 και counts σε κάθε πλευρά των δοκιμίων (A και B) αλλά και στο σύνολό τους, προσομοιάζει την κατάσταση στην οποία το υλικό βρίσκεται υπό καθεστώς θλιπτικών τάσεων. Πιθανή εξήγηση του παραπάνω ισχυρισμού είναι η ακόλουθη: Η εφελκυστική παραμόρφωση πάνω από το όριο διαρροής έχει επιφέρει την εισαγωγή μη ομογενών κατανομών τάσεων. Η ύπαρξη περιοχών στις οποίες υπάρχει συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων επιφέρει στον κύριο όγκο του υλικού, ο οποίος είναι εγκλωβισμένος ανάμεσα σε αυτές, την εισαγωγή θλιπτικών τάσεων. Η συνολική συμπεριφορά του υλικού διαμορφώνεται με βάση τη διάταξη και την κατανομή των μαγνητικών περιοχών ανάμεσα στα σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Η εναλλαγή περιοχών συγκέντρωσης θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων επιφέρει μαγνητική σκλήρυνση του υλικού και κατά συνέπεια δυσκολία στην τεχνητή μαγνήτιση του [13-16].

Επίσης, όπως αναφέρεται στα συμπεράσματα της συνεχούς εφελκυστικής καταπόνησης, η εφελκυστική φόρτιση σε διεύθυνση παράλληλη με τον άξονα επιβολής μαγνητικού πεδίου διέγερσης δρα σαν επιπρόσθετο μαγνητικό πεδίο διέγερσης. Η διακοπή, συνεπώς, της εξωτερικής, εφελκυστικής φόρτισης επιφέρει μείωση του ανιχνευόμενου σήματος Barkhausen [15-17].



Κεφάλαιο

4

4.ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ- ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μικροσκληρομέτρησης και μακροσκληρομέτρησης των δοκιμίων του χάλυβα TRIP. Μέχρι στιγμής μελετήθηκε η μαγνητική απόκριση του χάλυβα TRIP υπό καθεστώς μονοαξονικής εφελκυστικής φόρτισης σε όλο το εύρος της καμπύλης τάσης –παραμόρφωσης, καθώς και μετά την αποφόρτιση των εφελκυσμένων δοκιμίων. Με τη διαδικασία της σκληρομέτρησης θα γίνει προσπάθεια έμμεσου προσδιορισμού της εξελικτικής πορείας των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα TRIP συναρτήσει της εφελκυστικής καταπόνησης και συσχέτιση τους με τη μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen.

4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Πριν τη σκληρομέτρηση των δοκιμίων, είναι απαραίτητο το στάδιο της κατάλληλης προετοιμασίας αυτών. Η σκληρομέτρηση επηρεάζεται άμεσα από την ποιότητα της επιφάνειας του υλικού που μετράται, γεγονός το οποίο τονίζει την ιδιαίτερη σημασία της σωστής προετοιμασίας των δειγμάτων. Στη συνέχεια περιγράφεται πιο αναλυτικά πως έγινε η προετοιμασία των δοκιμίων.

✓ ΚΟΠΗ

Το πρώτο στάδιο της προετοιμασίας των δειγμάτων για τη σκληρομέτρηση περιλαμβάνει την κοπή των δοκιμίων, τα οποία προέρχονται από το εκάστωτε στάδιο εφελκυστικής παραμόρφωσης. Η κοπή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με χρήση δισκοτόμου.

✓ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΣ

Μετά την κοπή ακολουθεί ο εγκιβωτισμός. Συνήθως τα δείγματα εγκιβωτίζονται όταν είναι πολύ μικρά ή έχουν έντονα ανομοιόμορφο σχήμα ώστε να είναι πιο εύκολη η συγκράτηση τους στα επόμενα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης. Ο εγκιβωτισμός γίνεται με τη χρήση ρητίνης η οποία στερεοποιείται γύρω από το δείγμα, αφήνοντας ακάλυπτη την προς εξέταση επιφάνεια. Οι ρητίνες χωρίζονται σε θερμού και ψυχρού εγκιβωτισμού ανάλογα με το αν απαιτούν ή όχι θέρμανση για να χυτευθούν. Πριν τον εγκιβωτισμό σε ρητίνη πρέπει η επιφάνεια του δοκιμίου να καθαρίζεται από ακαθαρσίες και λιπαρές ουσίες, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη πρόσφυση μεταξύ του μεταλλικού δοκιμίου και της ρητίνης. Το δείγμα πρέπει να καλύπτεται πλήρως από τη ρητίνη και να μην προεξέχει κανένα μέρος του έκτος και αν πρόκειται να υποστεί ηλεκτροχημική προσβολή.

Η ρητίνη, που χρησιμοποιήθηκε για τα δείγματα στην παρούσα εργασία, ήταν η Doro-fix και ανήκει στις ψυχρού τύπου ρητίνες. Για την παρασκευή της αναμειγνύονται 2 μέρη σκόνης με 1 μέρος υγρού. Ο εγκιβωτισμός των δοκιμίων έγινε σε πρότυπα, ειδικά, κυλινδρικά καλούπια. Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε στο κέντρο του κυλινδρικού καλουπιού και στη συνέχεια προστίθεται το μίγμα της ρητίνης. Τέλος μαζί με το κάθε δείγμα εγκιβωτίστηκε ένα μικρό χαρτί με την ονομασία του. Οι ενδείξεις γράφονται με μολύβι ή στυλό διαρκείας έτσι ώστε να μην διαχυθεί το μελάνι στη ρητίνη. Η πήξη της συγκεκριμένης ρητίνης διαρκεί περίπου 30 min και μετά αφαιρείται το καλούπι από το δείγμα, το οποίο είναι πλέον έτοιμο για περαιτέρω διεργασίες.

✓ ΛΕΙΑΝΣΗ

Η λείανση των δειγμάτων είναι το επόμενο βήμα μετά τον εγκιβωτισμό τους. Το στάδιο αυτό αποσκοπεί στην μείωση της επιφανειακής τραχύτητας των δειγμάτων, απομακρύνοντας το κατεστραμμένο στρώμα της επιφάνειάς τους.

Κατά τη λείανση χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά, διαδοχικά από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο χαρτί, σε ένα μονοαξονικά, περιστρεφόμενο, υδρόψυκτο δίσκο. Το νερό, το οποίο ρέει, βοηθάει στην απομάκρυνση των αποσπώμενων τεμαχίων του μετάλλου, της ρητίνης και του λειαντικού μέσου από την επιφάνεια επαφής και συμβάλλει επίσης στην ψύξη του δοκιμίου.

Στόχος είναι κάθε φορά να εξαλείφονται οι ανωμαλίες της επιφάνειας ή οι γραμμές από το προηγούμενο χαρτί, δημιουργώντας μία ομοιόμορφη επιφάνεια με ολοένα και πιο λεπτές γραμμές. Κατά τη διάρκεια της λείανσης εξετάζουμε περιοδικά την επιφάνεια του δείγματος

για να διαπιστωθεί αν έχουν εξαλειφθεί οι ατέλειες από τον προηγούμενο δίσκο. Αν κατά τη διάρκεια της λείανσης προκύψει σφάλμα τότε πρέπει να αυξηθεί η ασκούμενη πίεση και να μην χρησιμοποιηθεί πιο λεπτόκοκκος δίσκος. Διαπιστώνετε η ύπαρξη σφάλματος όταν κατά την παρατήρηση η επιφάνεια του δείγματος εμφανίζεται θαμπή ή αν μένει νερό πάνω σε αυτή. Τότε το δείγμα πρέπει να παραμείνει στο δίσκο που δημιουργήθηκε το ελάττωμα ή να επιστρέψει στον προηγούμενο. Μετά την τελική λείανση το δείγμα καθαρίζεται με βαμβάκι και νερό, περιχύνεται με οινόπνευμα και στεγνώνεται με ρεύμα θερμού αέρα.

Η λείανση πραγματοποιήθηκε στη μηχανή λείανσης Struers LaboPol-5 και χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου τα οποία είχαν κοπεί σε κυκλικούς τομείς. Η πρώτη πυκνότητα κόκκων ήταν 600 grit/inch² και εν συνεχεία ακολούθησαν λειαντικά χαρτιά με πυκνότητα κόκκων 800, 1000, 1200, και 2500 (λεπτόκοκκο) grit/inch².

✓ ΣΤΙΛΒΩΣΗ

Μετά τη λείανση, τα δείγματα στιλβώθηκαν προκειμένου να αποκτήσουν επίπεδη επιφάνεια, χωρίς ατέλειες. Η στιλβωση γίνεται πάνω σε κατάλληλα υφάσματα στα οποία απλώνεται αδαμαντόπαστα ή πάστα οξειδίων (π.χ. αλούμινας). Η αδαμαντόπαστα πρέπει να διασπείρεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του υφάσματος. Τα υφάσματα τοποθετούνται σε περιστρεφόμενο τροχό και η διαδικασία απαιτεί και υγρό λιπαντικό μέσο. Ανάλογα με το στάδιο στιλβωσης, γίνεται και η ανάλογη χρήση υφάσματος. Τέλος, κάθε στάδιο χρησιμοποιεί, όπως και στη λείανση μικρότερο μέγεθος λειαντικών σωματιδίων από το προηγούμενο.

Για τη στιλβωση των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκαν αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 6μm και εν συνεχεία αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 1 μm της εταιρίας Stuers. Μέγεθος 6μm και 1μm σημαίνει ότι περιέχονται κόκκοι διαμαντιού διαμέτρου 6μm και 1μm αντίστοιχα. Μετά το τέλος κάθε βήματος το δείγμα καθαρίζεται με νερό και οινόπνευμα και στεγνώνεται με ρεύμα θερμού αέρα υπό γωνία.

✓ ΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ

Προσβολή καλείται η διαδικασία κατά την οποία ένα δείγμα έρχεται σε επαφή με κάποιο αντιδραστήριο παρουσία ή μη δυναμικού με στόχο την αποκάλυψη της μικροδομής του. Το στάδιο της χημικής προσβολής είναι απαραίτητο όσον αφορά τον προσδιορισμό της σκληρότητας του εξεταζόμενου υλικού καθώς μόνο έτσι μπορεί να γίνει σωστή εστίαση στην περιοχή που θα γίνει η μέτρηση. Μετά από την προσβολή η επιφάνεια εκπλένεται με νερό για να απομακρυνθεί το αντιδραστήριο και να σταματήσει η προσβολή, καθαρίζεται με οινόπνευμα και στεγνώνεται.

Για την χημική προσβολή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο Nital 2% το οποίο είναι διάλυμα νιτρικού οξέος σε αιθανόλη περιεκτικότητας 2%.

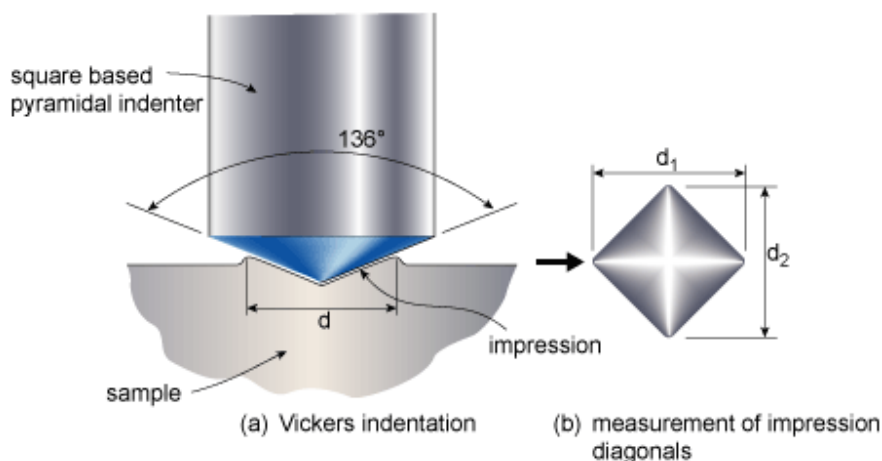
4.2 ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ-ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ VICKERS

Η μέθοδος σκληρομέτρησης κατά Vickers χρησιμοποιεί σαν εντυπωτή αδαμαντοπυραμίδα τετραγωνικής βάσης και γωνία κορυφής 136° . Το φορτίο, κατά τη μέτρηση της μακροσκληρότητας, κυμαίνεται από 1-120 kg και ο χρόνος εφαρμογής του είναι από 10-15 δευτερόλεπτα.

Η μέτρηση της σκληρότητας περιλαμβάνει κάθετη πίεση της πυραμίδας στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η εντύπωση κατά τη σκληρομέτρηση αυτή έχει σχήμα τετραγώνου και με κατάλληλο μικροσκόπιο μετρώνται οι διαγωνιοί του και υπολογίζεται η μέση τιμή του μήκους των διαγωνίων και στη συνέχεια η σκληρότητα Vickers από τον τύπο:

$$HV = 0.9272 \frac{P}{A} = \frac{2P \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \cong 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Όπου HV= σκληρότητα σε Vickers, P= φορτίο σε kgf (όπου 1kgf = 9,81N), A= εμβαδόν σε mm^2 , d=μέση τιμή μετρούμενων διαγωνίων αποτυπώματος σε mm.



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση της δοκιμής σκληρομέτρησης Vickers (α) διείδυση της αδαμαντοπυραμίδας Vickers και (β) μέτρηση των διαγωνίων του αποτυπώματος.

Κατά τη μέτρηση Vickers το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην παρουσιάζεται εξόγκωμα από την πίσω πλευρά της μέτρησης και οπωσδήποτε η διαγώνιος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τα 2/3 του πάχους του δείγματος και το βάθος διείδυσης κατά συνέπεια το 1/10 του πάχους του.

Επίσης, απαίτηση για τη σκληρομέτρηση είναι η απόσταση των στιγμάτων να είναι τουλάχιστον 3d .

4.3 ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

Ο όρος μικροσκληρομέτρηση αναφέρεται στη μέτρηση της σκληρότητας με τη χρήση πολύ μικρών φορτίων που κυμαίνονται από 1 gr-1 kgr. Ο χρησιμοποιούμενος εντυπωτής είναι η αδαμαντοπυραμίδα της μεθόδου Vickers ή ο εντυπωτής KNOOP ο οποίος είναι ρομβοεδρική αδαμαντοπυραμίδα με βάση ρόμβο με λόγο διαγωνίων 7:1 και γωνίες κορυφής 172°30' και 130° αντίστοιχα. Οι διαστάσεις του αποτυπώματος που δημιουργείται, επειδή το μέγεθος του είναι πολύ μικρό, μετρούνται με μικροσκόπιο. Η μέθοδος χρησιμοποιείται όταν απαιτείται πολύ μικρό μέγεθος εντύπωσης, π.χ σε επιφανειακά στρώματα, λεπτά υλικά, σκληρότητα μεταλλουργικών φάσεων. Στην κλίμακα Vickers η μικροσκληρότητα υπολογίζεται όπως και στην μακροσκληρότητα.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗΣ

Οι μακροσκληρομετρήσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο σκληρόμετρο **Emco Test M4C** στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του ΚΔΕΠ ΔΕΗ , το οποίο διαθέτει λογισμικό υπολογισμού των διαγωνίων και της τιμής της σκληρότητας του κάθε δείγματος. Σε κάθε δείγμα πραγματοποιήθηκαν 9 σκληρομετρήσεις και το εφαρμοζόμενο φορτίο ήταν σε όλες σταθερό στα 30 kg (ή 294 N). Μας ενδιαφέρει , κυρίως, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση που υπολογίζονται μέσω των σκληρομετρήσεων και όχι οι απόλυτες τιμές αυτών.

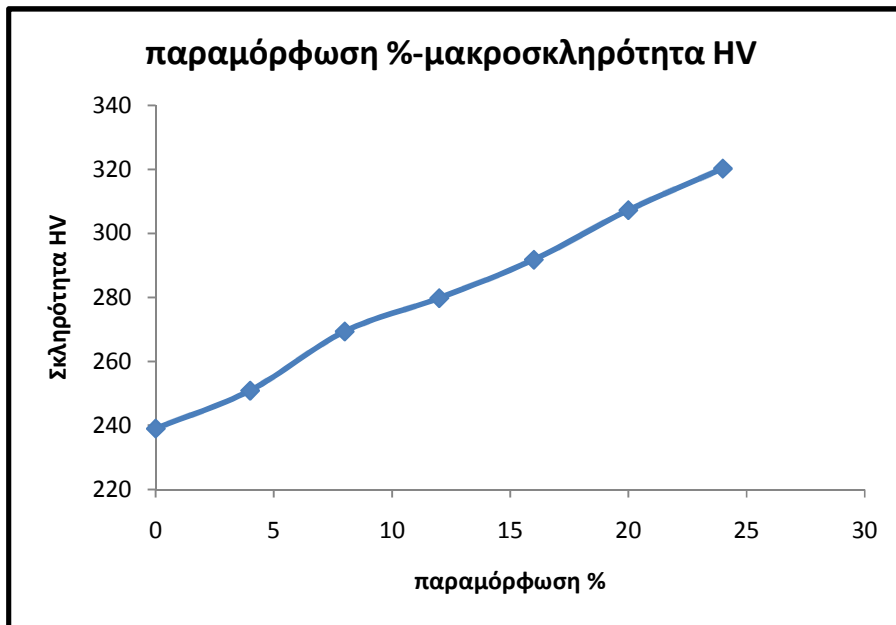
Οι μετρήσεις που ελήφθησαν είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα Μακροσκληρομετρήσεων

Α/Α Δοκιμής	Μακροσκληρότητα Vickers						
	0%	4%	8%	12%	16%	20%	24%
1η	240	251	268	280	292	305	318
2η	238	249	270	280	290	310	319
3η	238	249	269	278	289	309	322
4η	239	251	267	280	292	305	319
5η	239	254	270	278	290	305	319
6η	238	252	269	280	294	306	319
7η	240	252	271	278	292	306	322
8η	240	252	271	282	293	310	322
9η	239	248	269	282	294	309	322
Μ. Όρος	239	250.88	269.33	279.77	291.77	307.22	320.22
Τ. απόκλιση	0.86	1.9	1.32	1.56	1.78	2.22	1.71

Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων μακροσκληρομετρήσεων

% Παραμόρφωση	Μ.Ο Vickers	Τυπ.Απόκλιση
0%	239	0.86
4%	250.88	1.9
8%	269.33	1.32
12%	279.77	1.56
16%	291.77	1.78
20%	307.22	2.22
24%	320.22	1.71



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα μέσων όρων μακροσκληρομετρήσεων-παραμόρφωσης

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΜΕΤΡΗΣΗ

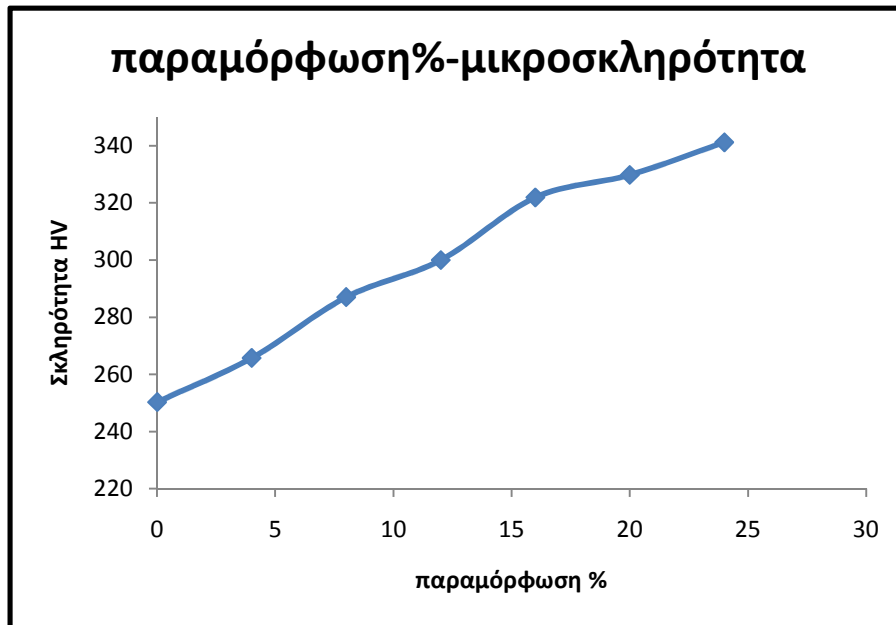
Οι μικροσκληρομετρήσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο σκληρόμετρο Duramin 20 της εταιρίας Struers στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του ΚΔΕΠ ΔΕΗ, το οποίο διαθέτει, επίσης, λογισμικό υπολογισμού των διαγωνίων και της τιμής της σκληρότητας του κάθε δείγματος. Ο αριθμός των σκληρομετρήσεων ποικίλει ανάλογα με το πλάτος του κάθε δείγματος. Το εφαρμοζόμενο φορτίο ήταν 500 ρ

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα Μικροσκληρομετρήσεων

Α/Α Δοκιμής	Σκληρότητα Vickers						
	0%	4%	8%	12%	16%	20%	24%
1η	252.1	265.7	287.6	298	322.7	329.8	338.8
2η	250.4	268.6	283.8	300.5	328.3	320.2	338.5
3η	247.2	280.3	289.4	300.2	332.5	338.3	334.2
4η	252.9	263.4	275.6	305.6	323.2	338.2	334.9
5η	258.1	259.1	286.3	290.4	326.8	323.2	347.5
6η	245.7	259.2	280.5	305.7	316.4	336.9	347.2
7η	246.6	262.9	281.1	306.4	325	330.6	340.2
8η	256.1	263.1	280	298.6	328.7	338.4	340.7
9η	241.9	267.8	282.7	289.1	313.7	336.9	358.3
10η	249.6	271.1	290	307.7	317.7	328.2	337
11η	244.7	263.8	286.3	296.5	325	335.3	332.6
12η	247.3	272.3	291	298.7	321.3	323.2	335.2
13η	250.6	258.4	292.5	303.7	317.4	342.3	344.3
14η	246.1	261.9	289.9	305.2	314.2	323.2	360.7
15η	256.6	261.7	291.9	303	329.4	320	336.4
16η	247.9	261.6	291.5	301.7	322.1	328.7	334.7
17η	259.4	266.4	291	294.6	314.9	321.3	331
18η	251.7	275.8	295.2	294.2	315.2	321.8	349.9
Μ. Όρος	250.27	265.72	287.01	299.98	321.91	329.8	341.22
Τ. απόκλιση	4.9	5.99	5.33	5.48	5.89	7.52	8.51

Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων μακροσκληρομετρήσεων

Παραμόρφωση %	Μ.Ο Vickers	Τ. απόκλιση
0	250.27	4.9
4	265.72	5.99
8	287.01	5.33
12	299.98	5.48
16	321.91	5.89
20	329.8056	7.52
24	341.2278	8.51



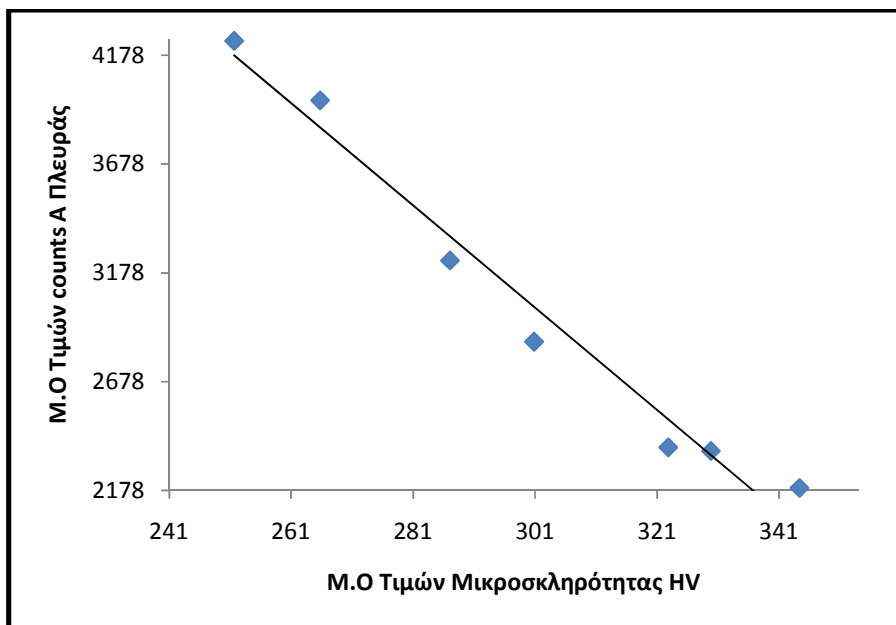
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα μέσων όρων μικροσκληρομετρήσεων-παραμόρφωσης

Όπως είναι αναμενόμενο, τα αποτελέσματα της μακροσκληρομέτρησης και της μικροσκληρομέτρησης εμφανίζουν αύξουσα πορεία συναρτήσεως του ποσοστού παραμόρφωσης λόγω ενδοτράχυνσης του υλικού και του μετασχηματισμού φάσης του ωστενίτη σε μαρτενσίτη.

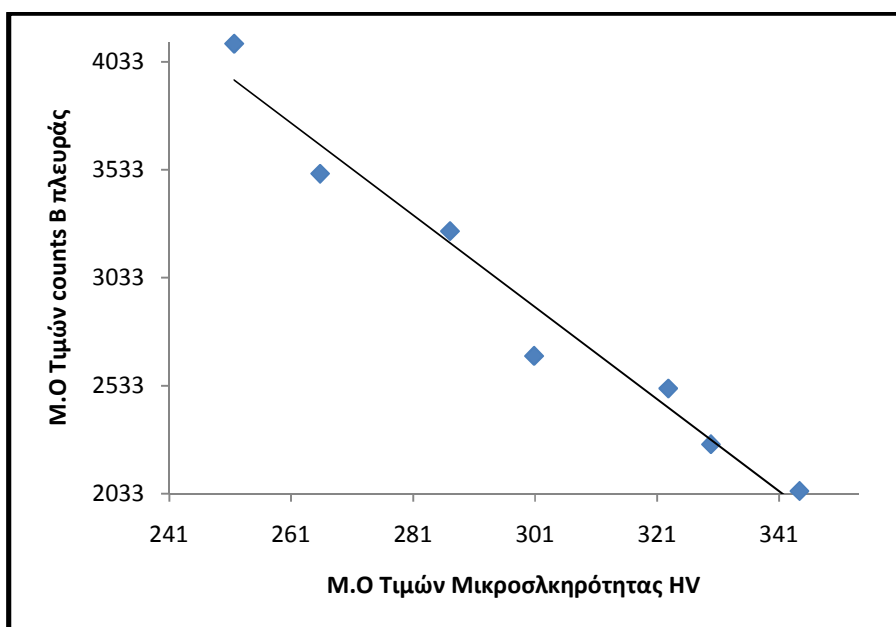
4.6 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟΝ ΘΟΡΥΒΟ BARKHAUSEN

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει προσπάθεια συσχετισμού των παραμέτρων του Μαγνητικού Θορύβου Barkhausen (V1, V2 και counts), όπως αυτές ελήφθησαν μετά την αποφόρτιση των δοκιμίων από την μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση, με τις μετρήσεις σκληρότητας. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ τους.

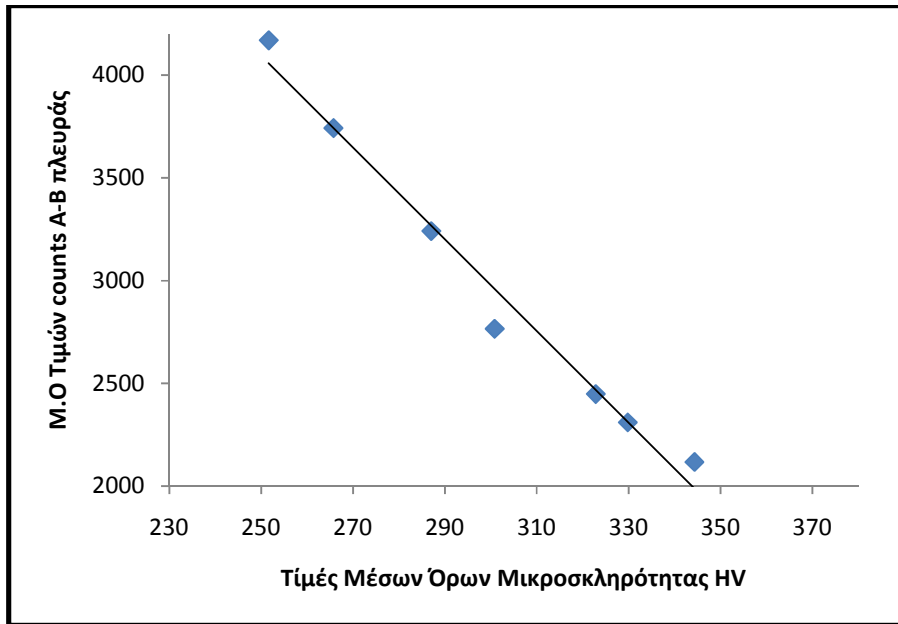
4.6.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΘΟΥΡΒΟΥ BARKHAUSEN



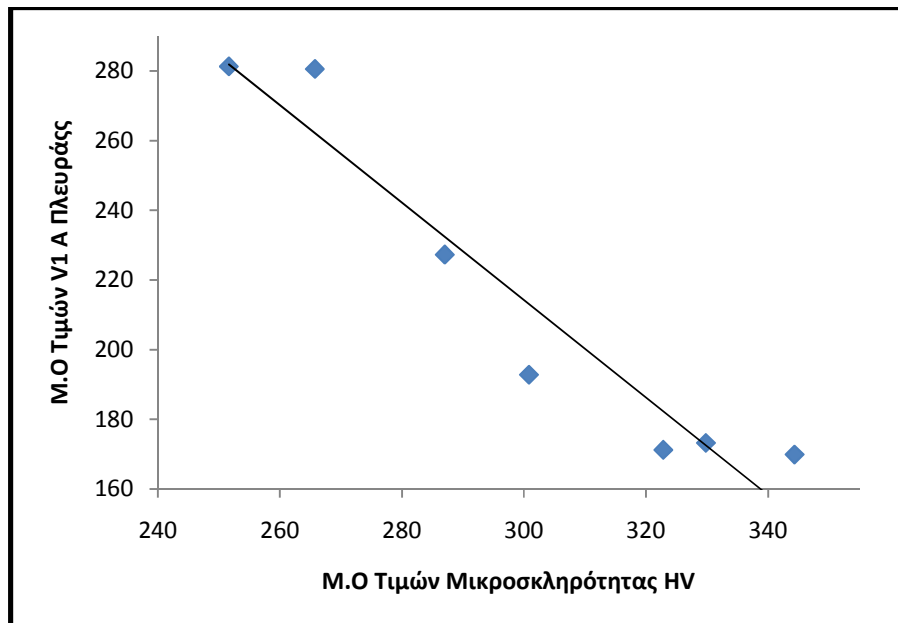
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών counts-HV A πλευράς



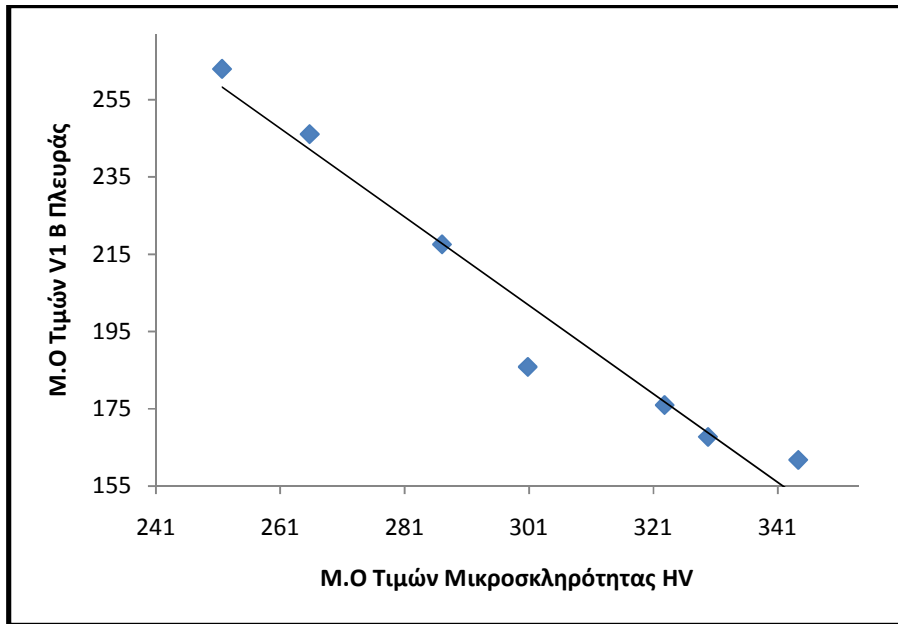
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών counts-HV B πλευράς



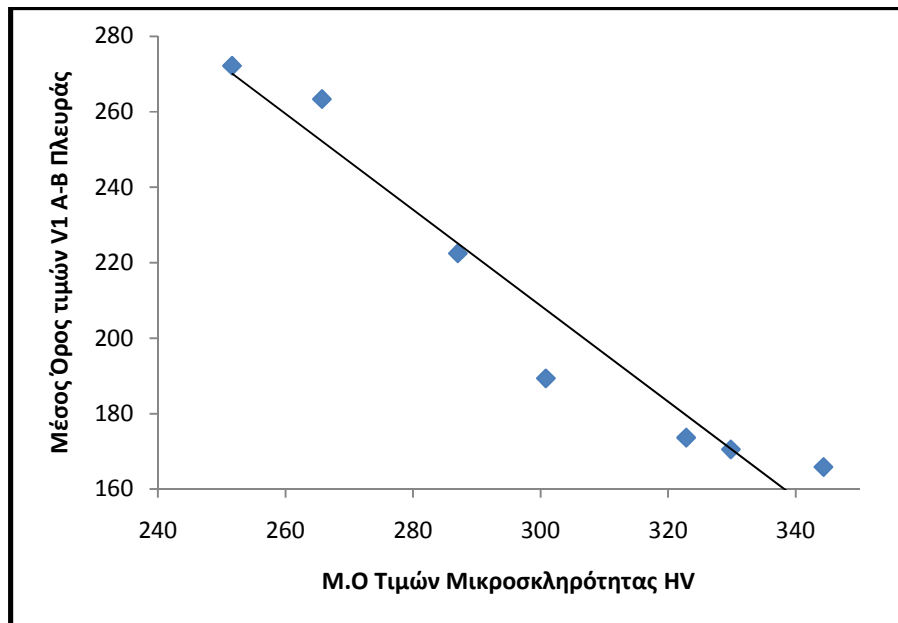
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών counts-HV A-B πλευράς



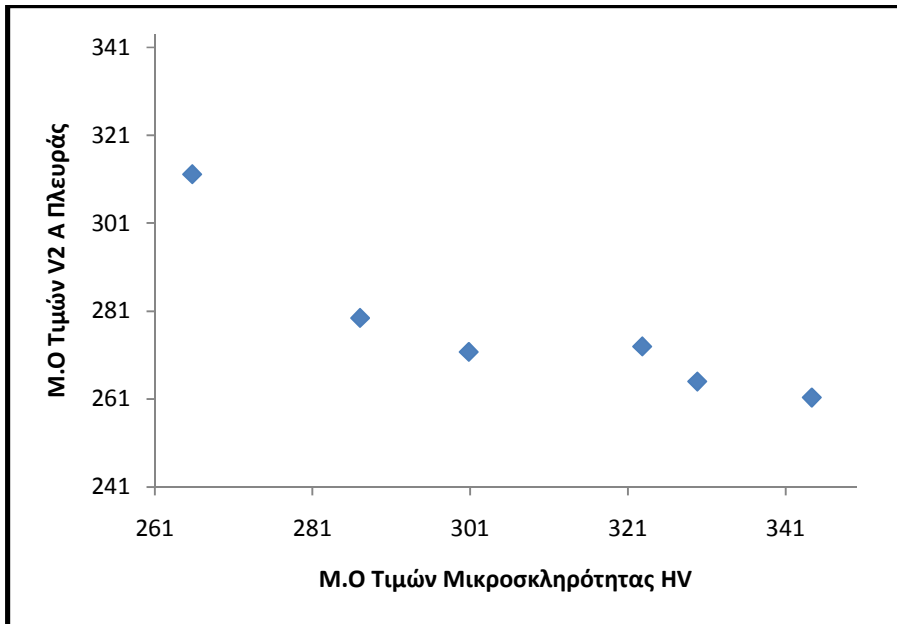
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V1-HV A πλευράς



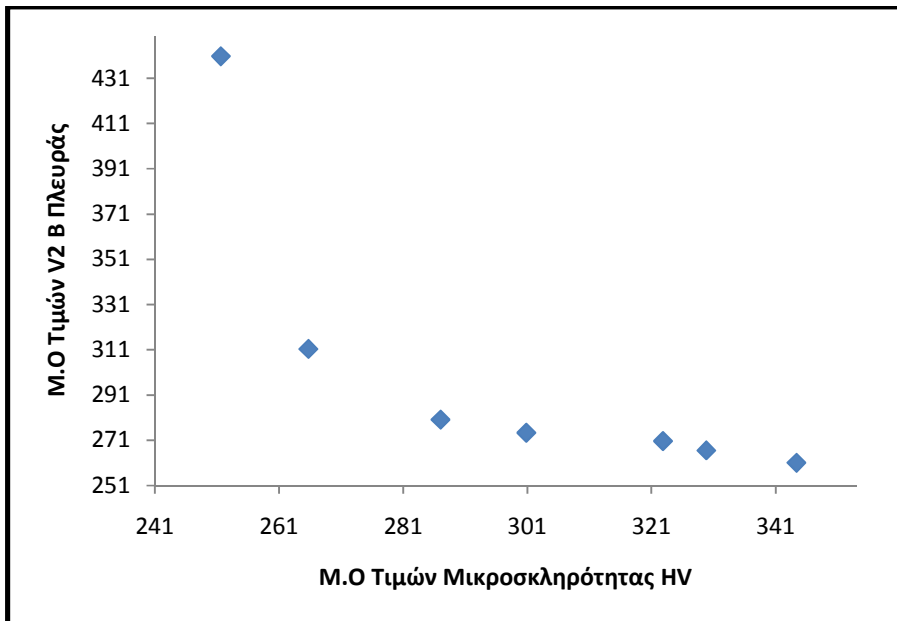
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών counts-HV B πλευράς



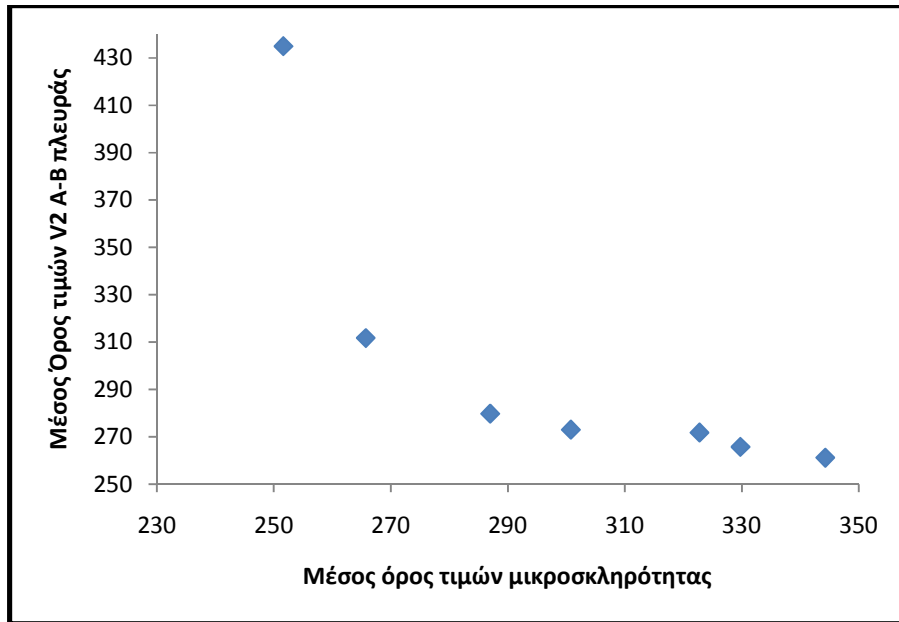
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών V1-HV A-B πλευράς



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V2-HV A πλευράς

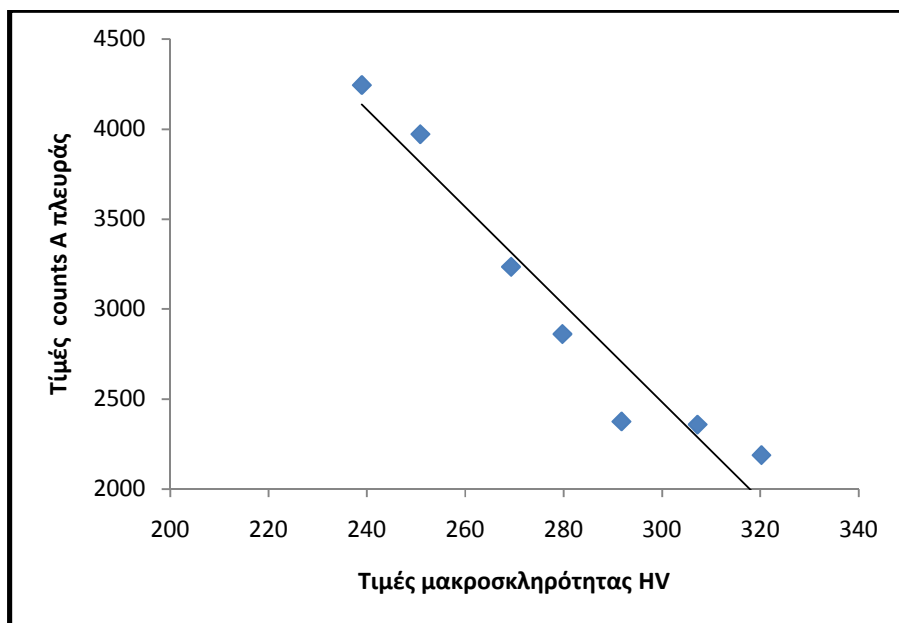


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V2-HV B πλευράς

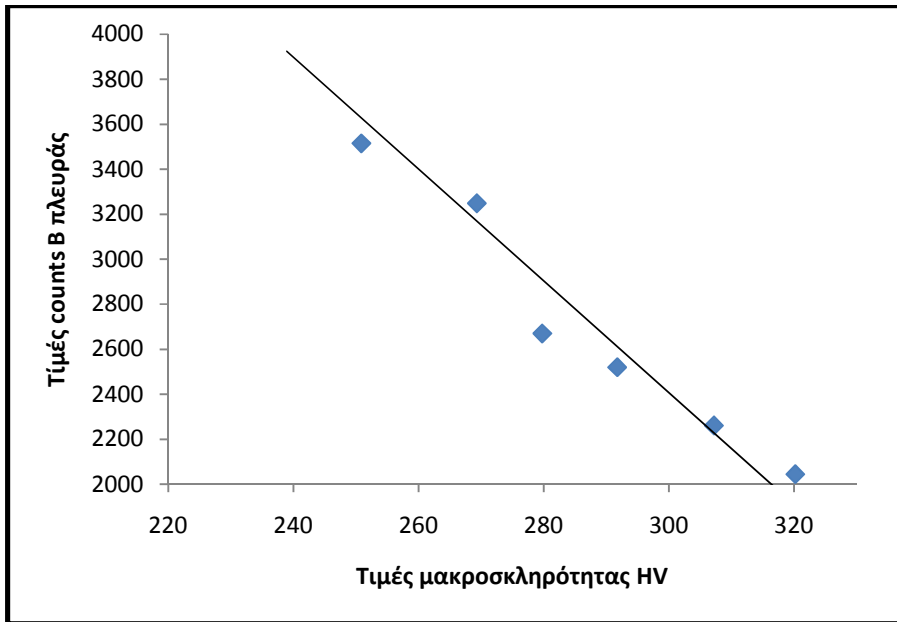


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών V2-HV A-B πλευράς

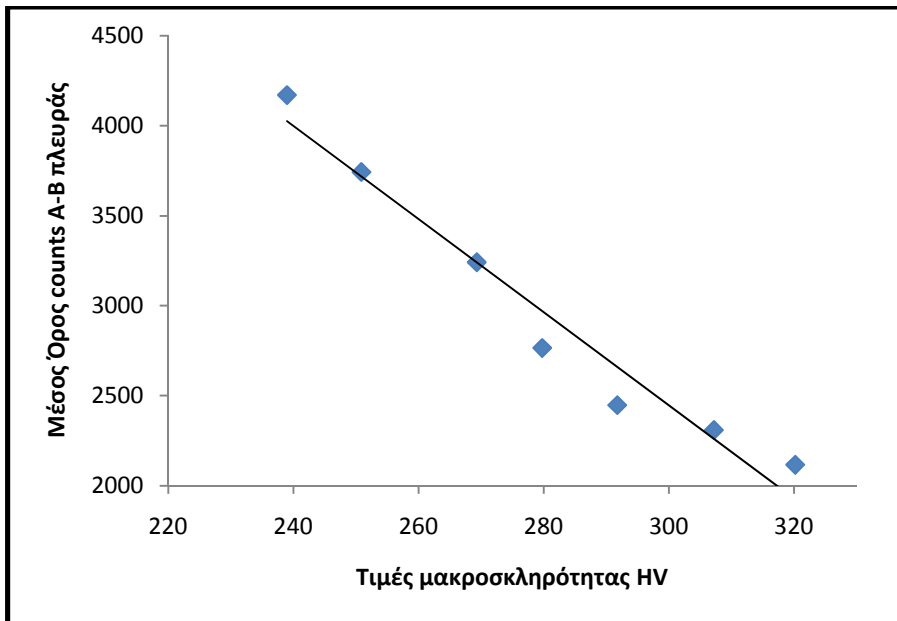
4.6.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΑΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ BARKHAUSEN



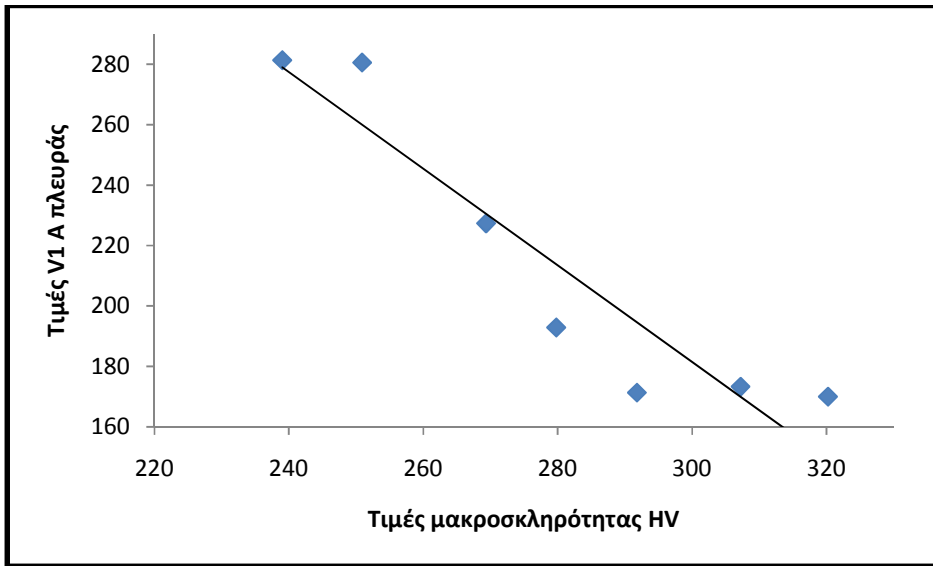
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών counts-HV A πλευράς



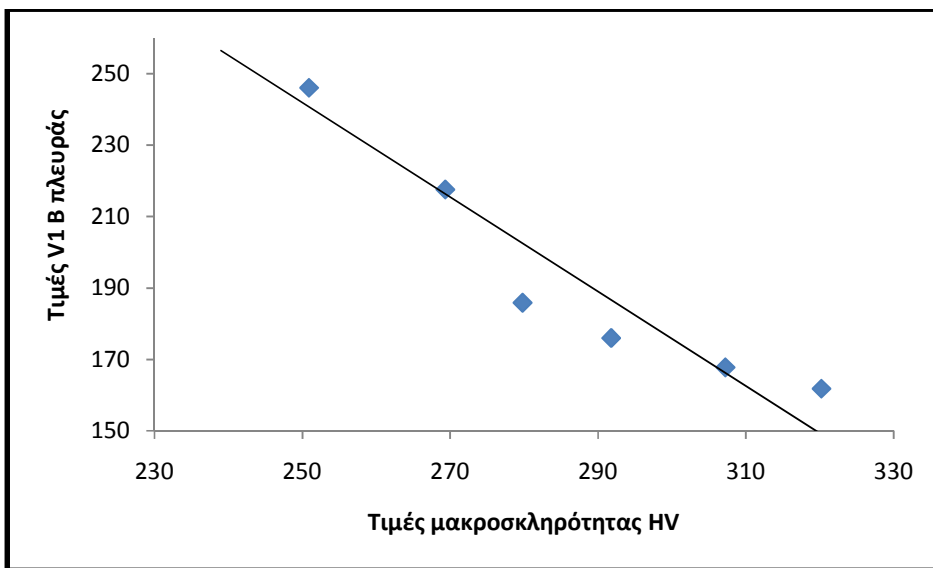
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών counts-HV B πλευράς



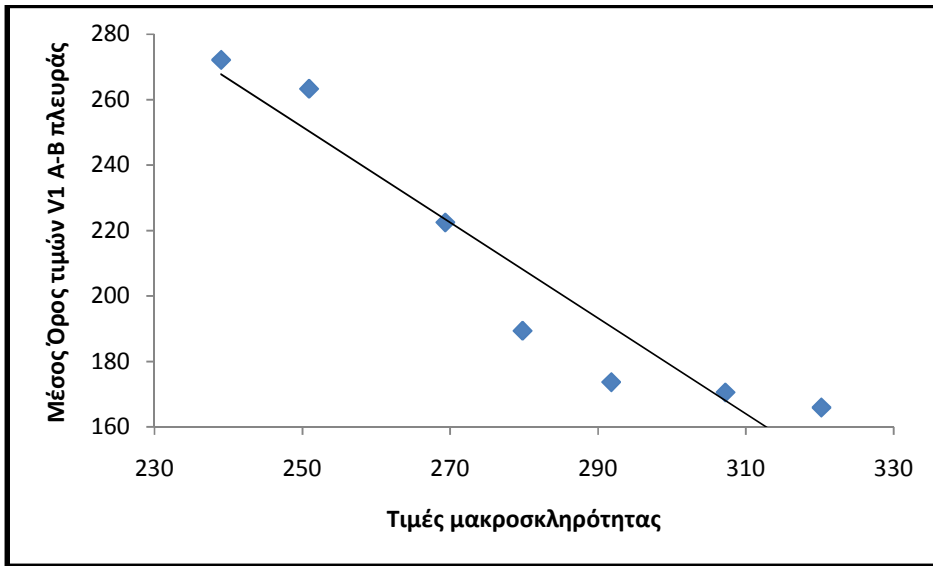
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών counts-HV A-B πλευράς



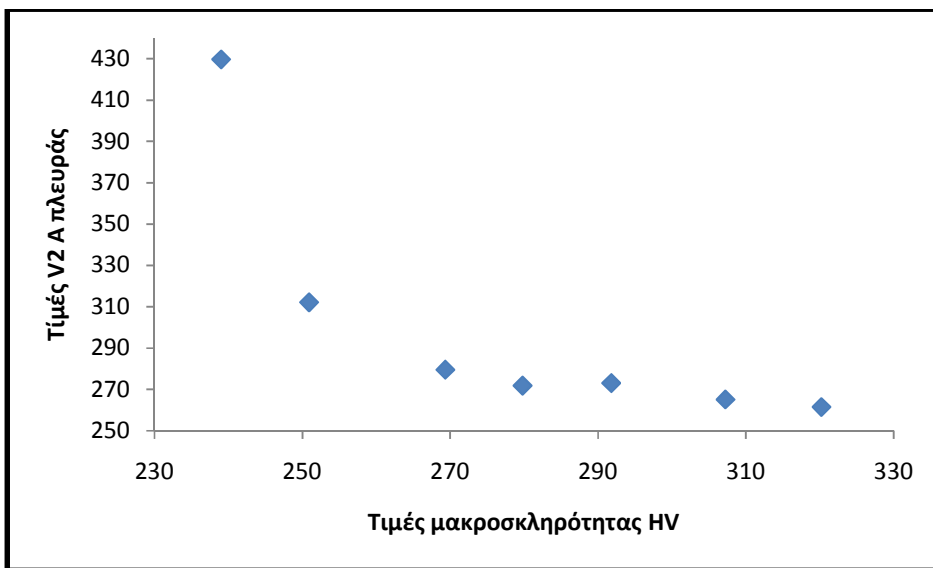
Σχήμα 4.13: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V1-HV A πλευράς



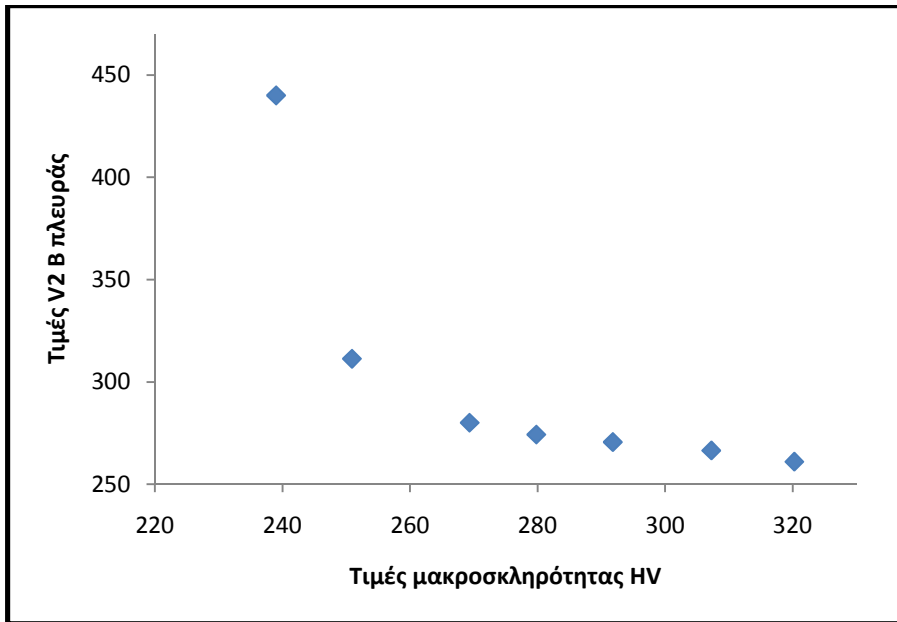
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V1-HV B πλευράς



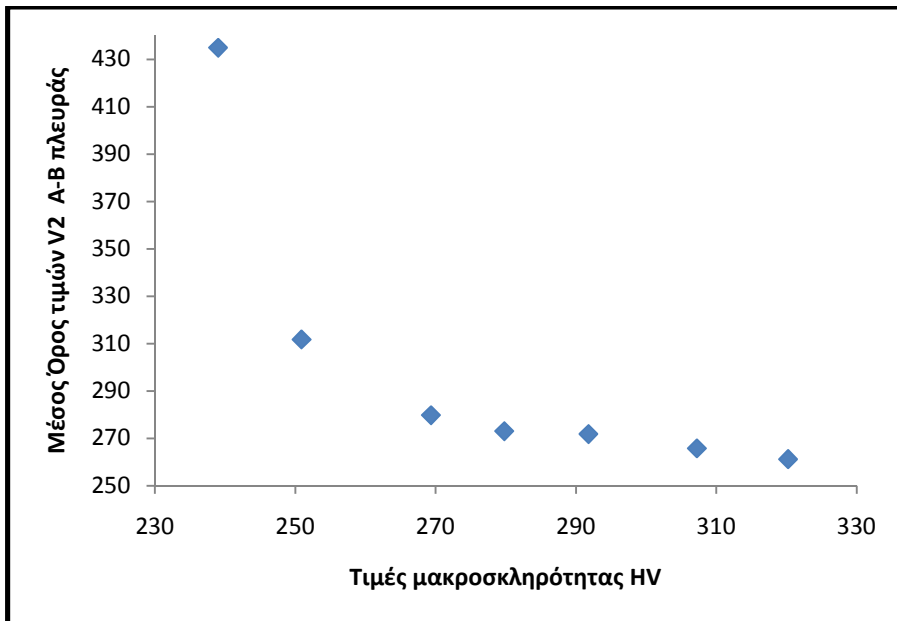
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V1-HV A πλευράς



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα μεταβολής μέσω των όρων τιμών V2-HV A πλευράς



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών V2-HV B πλευράς



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα μεταβολής μέσων όρων τιμών V2-HV A-B πλευράς

Από την παρατήρηση των διαγραμμάτων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι υπάρχει μονοτονικότητα μεταξύ της συσχέτισης των τιμών σκληρότητας με τις μαγνητικές παραμέτρους (V_1 και counts). Αυτό είναι, ίσως, το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς συσχετίζεται άμεσα το ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης με τις μαγνητικές ιδιότητες. Είναι δυνατό δηλαδή, να συγκριθούν δύο υλικά ίδιας σύστασης και θερμικής κατεργασίας που διαφέρουν μόνο στο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης μέσω της μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

Κεφάλαιο

5

5. ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΙΑ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Για την ταυτοποίηση των φάσεων των δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε το περιθλασίμετρο D8 Focus της εταιρίας BRUKER που βρίσκεται εγκατεστημένο στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

Το XRD βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας ακτίνων Roentgen, γνωστού μήκους κύματος λ , πάνω στα επίπεδα (hkl) του κρυσταλλικού πλέγματος του υπό εξέταση δοκιμίου. Η περίθλαση είναι ο συνδυασμός των φαινομένων της διάθλασης και της ανάκλασης.

Ένα κρυσταλλικό σώμα χάρη στην περιοδικότητα των ατόμων του, επανεκπέμπει μια προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων Χ σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, δηλαδή περιθλά τις ακτίνες Χ. Αντίθετα ένα άμορφο σώμα απλώς διαχέει τις ακτίνες Χ, δηλαδή τις διασκορπίζει ομοιόμορφα στο χώρο. Ανάμεσα στις δύο αυτές ακραίες καταστάσεις (περίθλασης ή απλής διάχυσης) υπάρχουν όλες οι δυνατές διαβαθμίσεις. Ανάλογα με την τελειότητα της δομής τους, τα στερεά σώματα μπορούν να ανακατανεύμουν τις ακτίνες Χ, δίνοντας από το τέλειο φάσμα της περίθλασης ως το απλό ασαφές προφίλ της διάχυσης. Το όργανο που χρησιμοποιούμε είναι φασματόμετρο ακτίνων Χ ή αλλιώς περιθλασίμετρο, το οποίο μετράει και καταγράφει την ένταση των ακτίνων Χ που περιθλώνται.

Οι ακτίνες Χ έχουν πολύ μικρό μήκος κύματος (παραπλήσιο με τις πλεγματικές αποστάσεις των ατόμων σε μια ένωση) της τάξης 1-2 Åm, και μεγάλη διεισδυτικότητα. Οι ακτίνες Χ παράγονται από λυχνία χαλκού. Η κάθοδος της λυχνίας αποτελείται από νήμα βολφραμίου και η άνοδος από χαλκό. Η διάταξη βρίσκεται σε κενό. Κατά την εφαρμογή τάσης στο νήμα

βολφραμίου τα ηλεκτρόνια θερμαίνονται, διεγείρονται και υπό κενό οδηγούνται στην άνοδο χαλκού. Έτσι τα ηλεκτρόνια του Cu διεγείρονται, μεταπηδούν σε εξωτερικές στιβάδες και κατά την επαναφορά τους στη θεμελιώδη στιβάδα παράγουν φωτόνια μήκους κύματος ακτίνων X.

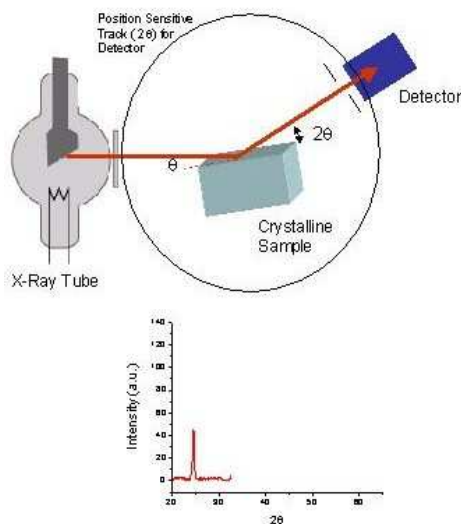
Η άνοδος του Cu παράγει ακτίνες μήκους κύματος $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$. Η κάθοδος W διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I=40 \text{ mA}$ και τάσης $V=40 \text{ kV}$.

Το περιθλασίμετρο έχει γωνιόμετρο που περιστρέφει το δείγμα κατά γωνία θ (που ορίζουμε εμείς) και ο ανιχνευτής περιστρέφεται κατά γωνία 2θ για να λαμβάνει όλη την ακτινοβολία. Η σχέση μεταξύ γωνίας θ , του μήκους κύματος λ και των ακτινών X και της διαπλεγματικής απόστασης d , δίνεται από την γνωστή εξίσωση Bragg.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \leftrightarrow d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$$

Οι συνθήκες που επιλέχθηκαν για την ταυτοποίηση των φάσεων ήταν ανίχνευση από 20° - 150° , με βήμα $0,02^\circ$ και παραμονή σε κάθε βήμα 10 sec.

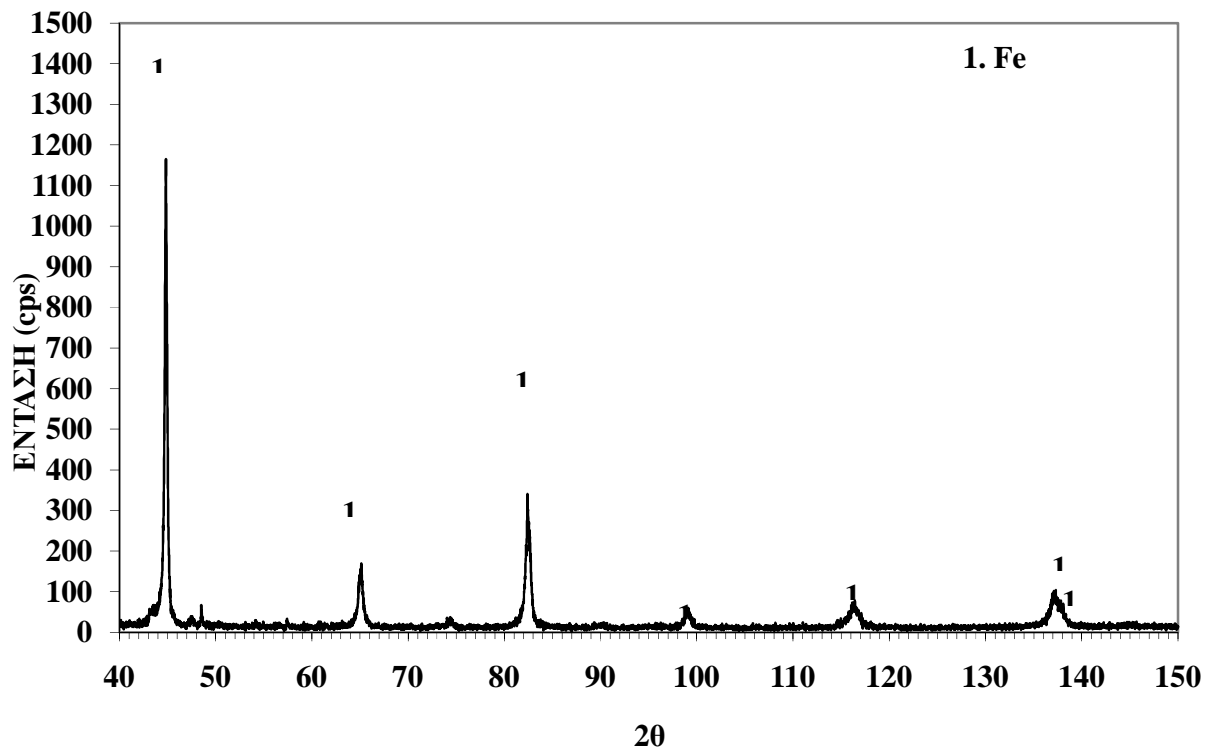
Για την ανάλυση με ακτίνες X προηγήθηκε μεταλλογραφική προετοιμασία των δειγμάτων που περιελάμβανε κοπή, εγκιβωτισμό και λείανση ως 2000 grit/inch^2 όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 που περιγράφεται η σκληρομέτρηση.



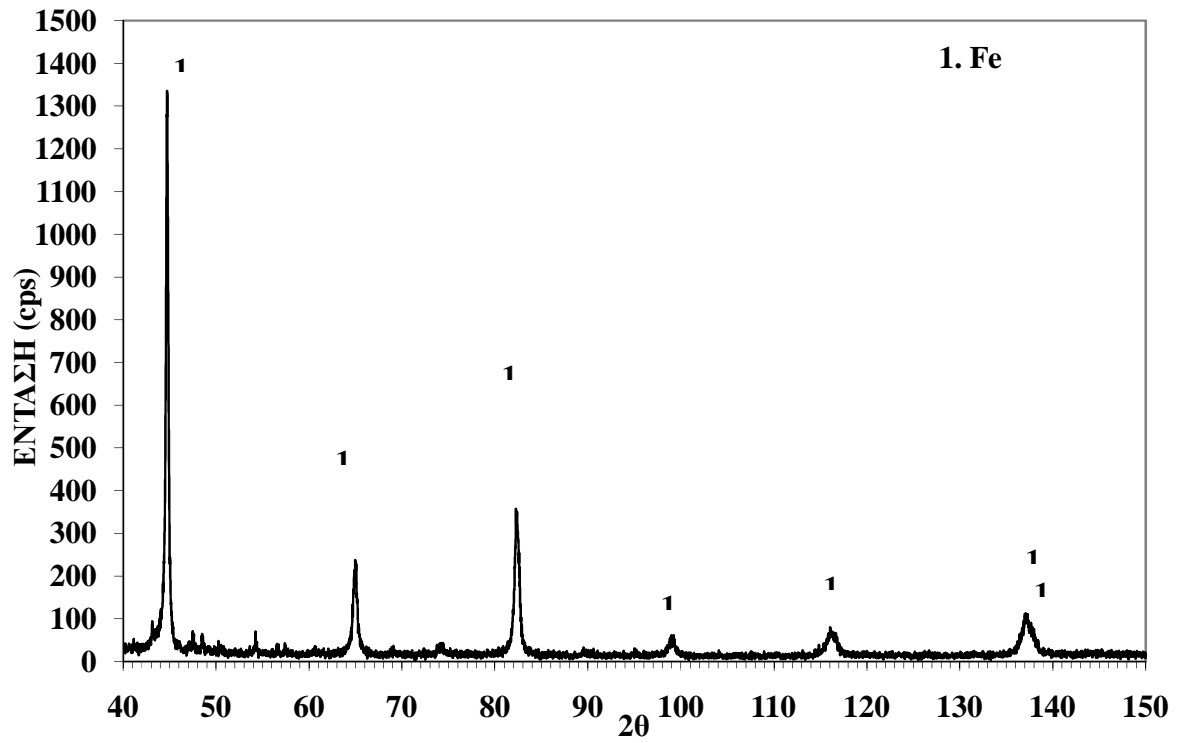
Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση της εξαγωγής ακτινοδιαγράμματος μέσω της περιθλασιμετρίας ακτίνων X.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΙΜΕΤΡΙΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

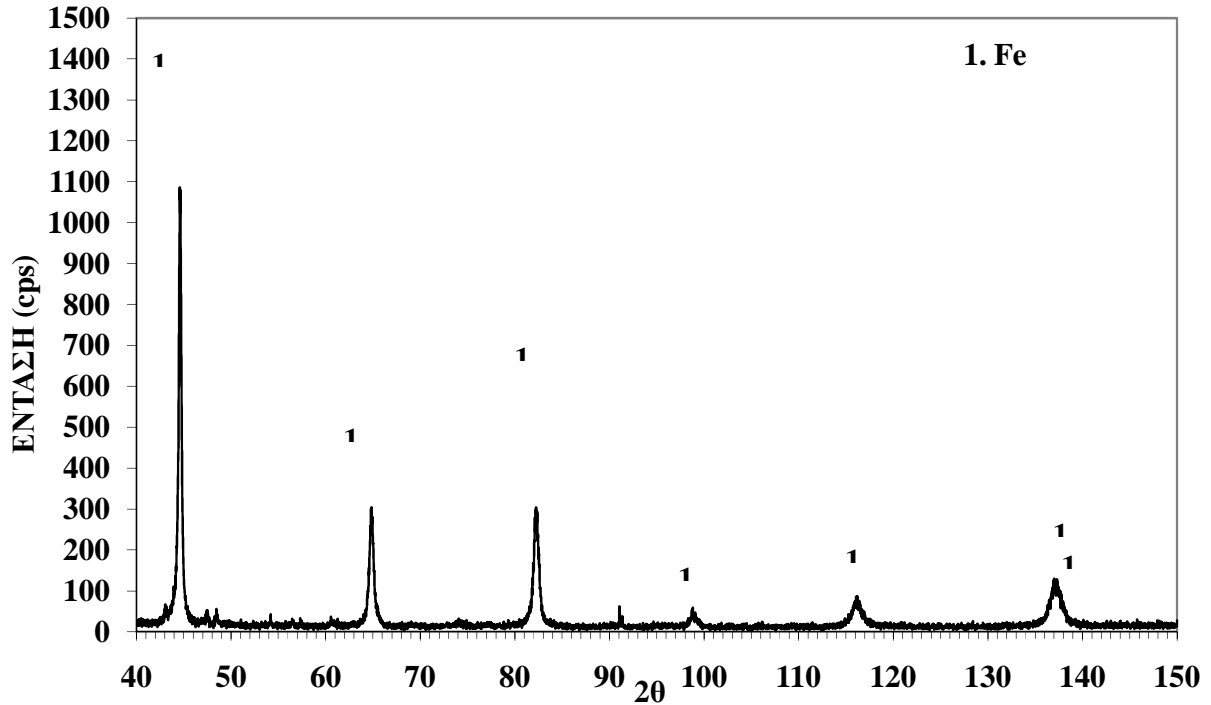
Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ πραγματοποιήθηκε για δείγματα που προέρχονται από όλα τα ποσοστά παραμόρφωσης (0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24%). Για λόγους παρουσίασης παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα των δειγμάτων που προέρχονται από δοκίμια με 0% παραμόρφωση, 12% παραμόρφωση και 24% παραμόρφωση. Τα δείγματα που προέρχονται από δοκίμια με τα συγκεκριμένα ποσοστά παραμόρφωσης αρκούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς προέρχονται από την κατάσταση αναφοράς, από το ενδιάμεσο και το τελικό στάδιο παραμόρφωσης αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος με 0% παραμόρφωση



Σχήμα 6.3 Ακτινοδιάγραμμα δείγματος με 12% παραμόρφωση



Σχήμα 6.4: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος με 24% παραμόρφωση

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το δείγμα με 0% παραμόρφωση αποτελεί το δοκίμιο αναφοράς. Γνωρίζοντας ότι σε κατάσταση αναφοράς το υλικό έχει ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη ίσο με 13,3%, αναμένεται από την παρατήρηση του ακτινοδιαγράμματος η εμφάνιση κορυφών που ταυτοποιούν την ύπαρξη της φερριτικής φάσης καταρχάς και η εμφάνιση κορυφών που ταυτοποιούν την ύπαρξη της ωστενιτικής φάσης. Όμως, κάτι τέτοιο δεν προκύπτει από την παρατήρηση των ακτινοδιαγραμμάτων περίθλασης ακτίνων Χ. Στο ακτινοδιάγραμμα εμφανίζονται μόνο οι κορυφές που αντιστοιχούν στη φάση του φερρίτη-μπαινιτικού φερρίτη και όχι οι κορυφές που να αντιστοιχούν στον ωστενίτη. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο μικρό κλάσμα όγκου συμμετοχής του ωστενίτη, στη διασπορά και την μορφολογία του ωστενίτη, στο μέγεθος κόκκου, στους περιορισμούς του οργάνου ή σε ενδεχόμενη κακή μεταλλογραφική προετοιμασία.

Όσον αφορά τη φερριτική φάση, έχουμε αλληλουχία τριών τουλάχιστον κορυφών άρα η ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης είναι έγκυρη. Την υψηλότερη ένταση την παρουσιάζει η πρώτη, κύρια κορυφή και εν συνεχεία η τρίτη κορυφή (1164 και 340 counts αντίστοιχα).

Στα ακτινοδιαγράμματα των δειγμάτων προερχόμενα από παραμόρφωση 12% και 24% δεν αναμενόταν η εμφάνιση κορυφών που να ταυτοποιούν την ύπαρξη της ωστενιτικής φάσης λόγω του μετασχηματισμού της φάσης του ωστενίτη σε μαρτενσίτη. Πράγματι τα ακτινοδιαγράμματα που αντιστοιχούν στα δείγματα με παραμόρφωση 12% και 24% εμφανίζουν κορυφές που αντιστοιχούν στη φερριτική φάση. Η ταυτοποίηση της φερριτικής φάσης είναι έγκυρη καθώς έχουμε αλληλουχία τουλάχιστον τριών κορυφών. Την υψηλότερη ένταση την παρουσιάζουν τόσο το ακτινοδιάγραμμα του δείγματος με 12% παραμόρφωση, όσο και το ακτινοδιάγραμμα του δείγματος με 24% παραμόρφωση, στην πρώτη, κύρια κορυφή (1335 και 1085 counts) αντίστοιχα και εν συνεχεία η Τρίτη κύρια κορυφή (357 και 285 counts αντίστοιχα).

Από την σύγκριση των counts της πρώτης και τρίτης κύριας κορυφή και των τριών ακτινοδιαγραμμάτων, παρατηρείται μείωση της έντασης τους καθώς αυξάνεται το ποσοστό παραμόρφωσης. Αντιθέτως παρατηρείται παράλληλη αύξηση της έντασης των counts της δεύτερης κύριας κορυφής (107, 199 και 290 counts για παραμόρφωση 0%, 12% και 24% αντίστοιχα) με την αύξηση του ποσοστού παραμόρφωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον προτιμητέο αναπτυσσόμενο κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης ή σε προτιμητέα επίπεδα ολίσθησης λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης.



Κεφάλαιο

6

6. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

6.1 ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ –

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscopy) χρησιμεύει για την παρατήρηση επιφανειών και σε συνδυασμό με τα κατάλληλα συστήματα μικροανάλυσης για την στοιχειακή ανάλυση συγκεκριμένων περιοχών ή σημειακά της υπό παρατήρηση εικόνας.

Η λειτουργία του SEM βασίζεται στην θέρμανση νήματος βολφραμίου το οποίο εκπέμπει μια πρωτογενή δέσμη ηλεκτρονίων η οποία προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου όπου και διεγείρει τα ηλεκτρόνια των ατόμων της. Το νήμα βολφραμίου αποτελεί μέρος του "όπλου ηλεκτρονίων" το οποίο δημιουργεί την δέσμη ηλεκτρονίων και είναι τοποθετημένο στην κορυφή του της στήλης του μικροσκοπίου που στεγάζει όλους τους απαραίτητους φακούς και τα διαφράγματα.

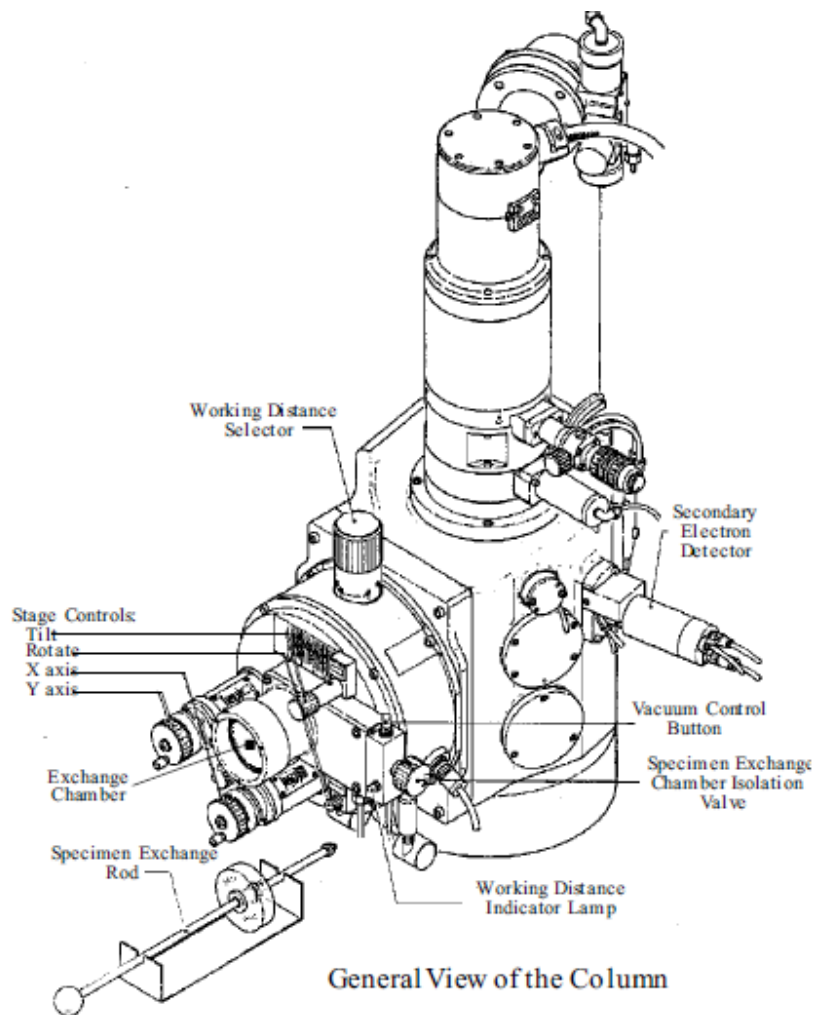
Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται κατά μήκος μιας διαφοράς δυναμικού μεγέθους δεκάδων ή εκατοντάδων kV ώστε να παραχθεί μια δέσμη ελεγχόμενης ενέργειας. Το νήμα γίνεται κάθοδος και το δοκίμιο άνοδος. Η εστίαση της δέσμης γίνεται με χρήση φακών "συμπύκνωσης". Κατά την αποδιέγερση των ατόμων του δοκιμίου ή την σκέδαση των ηλεκτρονίων της πρωτογενούς δέσμης λαμβάνουμε τις εξής δέσμες: α) δευτερογενών ηλεκτρονίων, β) πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, γ) ακτινών X, δ) εκπομπή φωτονίων. Από την δέσμη δευτερογενών ηλεκτρονίων αναμένουμε την τοπογραφική ανάλυση της επιφάνειας του δοκιμίου. Από τα πισωσκεδαζόμενα αναμένουμε τον χαρακτηρισμό του δοκιμίου ως προς τον ατομικό αριθμό καθώς παράγονται σε κάποιο βάθος τις επιφανείας. Οι ακτίνες X μας δίνουν την χημική ανάλυση του δοκιμίου καθώς κάθε στοιχείο παράγει χαρακτηριστικές ακτίνες X. Η όλη διαδικασία διεξάγεται μέσα σε κενό επειδή τα ηλεκτρόνια σε περίπτωση που είχαμε αέρια θα

διασκορπίζονταν. Τα ηλεκτρόνια φέρουν φορτίο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθούν εικόνες στο μικροσκόπιο σάρωσης

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ

Τα κύρια μέρη ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης είναι:

- Η στήλη (ή κολώνα) του μικροσκοπίου
- Ο θάλαμος του δοκιμίου
- Το σύστημα δημιουργίας κενού
- Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου
- Το σύστημα εικόνας.



Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση της στήλης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης

Δευτερογενή και πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια

Διάφορες ακτινοβολίες εκπέμπονται από το δοκίμιο, όταν προσπίπτουν στην επιφάνεια του τα ηλεκτρόνια της δέσμης: δευτερογενή ηλεκτρόνια, πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια, ηλεκτρόνια Auger και ακτίνες X. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια συλλαμβάνονται από ανιχνευτές και χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό της εικόνας. Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται για τη σημειακή μικροανάλυση.

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρόνια που παράγονται από τις ανελαστικές κρούσεις των ηλεκτρονίων δέσμης με το δοκίμιο και χαρακτηρίζονται από ενέργεια κάτω από 50eV (ανελαστικές λέγονται οι κρούσεις που συνοδεύονται από μεταβολή της ορμής, δηλαδή πρακτικά από μεταβολή της ταχύτητας).

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια εκτινάσσονται από το δοκίμιο από την πρόσκρουση των ηλεκτρονίων δέσμης και είναι ηλεκτρόνια της στοιβάδας αγωγιμότητας (προκειμένου για μέταλλα) ή της στοιβάδας σθένους (προκειμένου για ημιαγωγούς και μονωτές) δηλαδή ηλεκτρόνια χαλαρά συνδεδεμένα με τα άτομα του δοκιμίου.

Ο ανιχνευτής δευτερογενών ηλεκτρονίων τα συλλαμβάνει και τα μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα για τη διαμόρφωση της εικόνας. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια είναι χρήσιμα για να δώσουν την κύρια εικόνα του δοκιμίου.

Τα πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρόνια της δέσμης που διαχέονται είτε ελαστικά, είτε ανελαστικά κατά την πρόσκρουσή τους στην επιφάνεια του δοκιμίου. Σε τελείως ομοιογενές υλικό δεν θα υπήρχε διαφορά μεταξύ της εικόνας ανάμεσα στα δευτερογενή και τα πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια. Το μειονέκτημα των πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων είναι ότι επειδή προέρχονται από το βάθος, απορροφούνται από τη μάζα και είναι χαμηλής ενέργειας, άρα χρησιμοποιείται άλλος ανιχνευτής που είναι όσο πιο κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου.

Τα πισωσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια δίνουν το Μέσο Ατομικό Αριθμό. Ο Μέσος Ατομικός Αριθμός είναι ίσος με το ημίθροισμα των ατομικών αριθμών δύο στοιχείων. Ο Μέσος Ατομικός Αριθμός μας δίνει, δηλαδή τη μέση σύσταση. Με το Μέσο Ατομικό Αριθμό, συγκρίνεται η αντίθεση της εικόνας γιατί επηρεάζει την εικόνα. Μικρός Μέσος Ατομικός Αριθμός αντιστοιχεί σε σκουρόχρωμη αντίθεση ενώ μεγάλος Μέσος Ατομικός Αριθμός αντιστοιχεί σε ανοιχτόχρωμη αντίθεση. Άρα με παρατήρηση της εικόνας εξάγεται πληροφορία για το Μέσο Ατομικό Αριθμό η οποία πιστοποιείται με την μικροανάλυση και έτσι λαμβάνεται πληροφορία για την ανακατανομή των κραματικών στοιχείων από την εικόνα.

6.2 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)

Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης παρατηρήθηκε η μικροδομή των δειγμάτων που προέρχονταν από δοκίμια όλων των επιλεγμένων ποσοστών παραμόρφωσης 0%, 4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24%. Για λόγους παρουσίασης, παρατίθενται η ανάλυση και οι φωτογραφίες των δειγμάτων που προέρχονται από παραμόρφωση 0%, 12% και 24%. Η επιλογή παράθεσης φωτογραφιών που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα ποσοστά παραμόρφωσης, έγκειται στο γεγονός ότι αποτελούν την κατάσταση αναφοράς, το ενδιάμεσο και το τελικό στάδιο αντίστοιχα.

- **Μεταλλογραφική προετοιμασία δειγμάτων για παρατήρηση της μικροδομής με Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης.**

Η μεταλλογραφική προετοιμασία των δειγμάτων για παρατήρηση με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης συμπίπτει με αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο των μετρήσεων μακροσκληρότητας και μικροσκληρότητας. Η προετοιμασία περιλαμβάνει κοπή των δειγμάτων, εγκιβωτισμό, λείανση μέχρι 2500 grit/inch² και στίλβωση με αδαμαντόπαστα 6 και 1 μμ.

- **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΣΑΡΩΣΗΣ (SEM)**

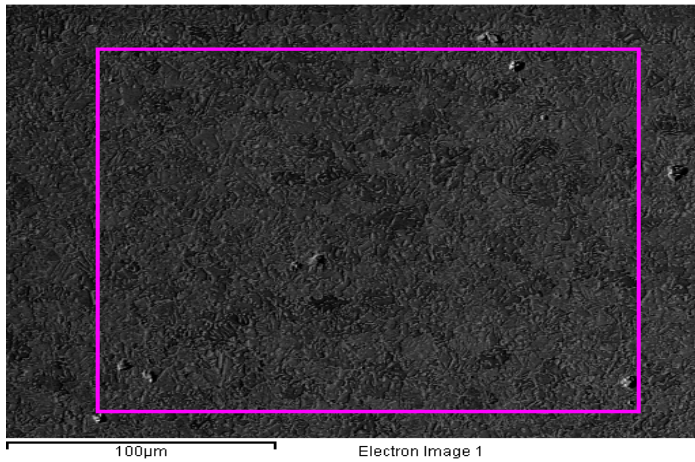
Για την παρατήρηση των δοκιμίων με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, χρησιμοποιήθηκε δυναμικό ισχύος 20 kV. Τα 20 kV ίσως να μην είναι αρκετά ικανά για να διεγείρουν όλα τα ηλεκτρόνια, όλων των στοιβάδων, όλων των στοιχείων άρα ίσως να υπάρχει αλληλοκάλυψη στις στοιβάδες των στοιχείων (π.χ K_{β} του Mn και K_{α} του Fe ή K_{β} του Cr και K_{α} του Mn ή K_{α} του S και λ του Mo).

- **Δείγμα με 0% παραμόρφωση**

Το δείγμα με 0% παραμόρφωση δεν έχει υποστεί εφελκυστική καταπόνηση και είναι το δείγμα αναφοράς καθώς χαρακτηρίζεται από την εργοστασιακή κατεργασία μόνο. Από την παρατήρηση των φωτογραφιών που ελήφθησαν δεν παρατηρείται επιμήκυνση κόκκων προς μια κοινή κατεύθυνση λόγω της μεταλλοτεχνικής, εργοστασιακής κατεργασίας.

Χημική Ανάλυση EDS

Στο δείγμα 0% παραμόρφωσης πραγματοποιήθηκε γενικευμένη χημική ανάλυση η οποία δίνει τα εξής αποτελέσματα:



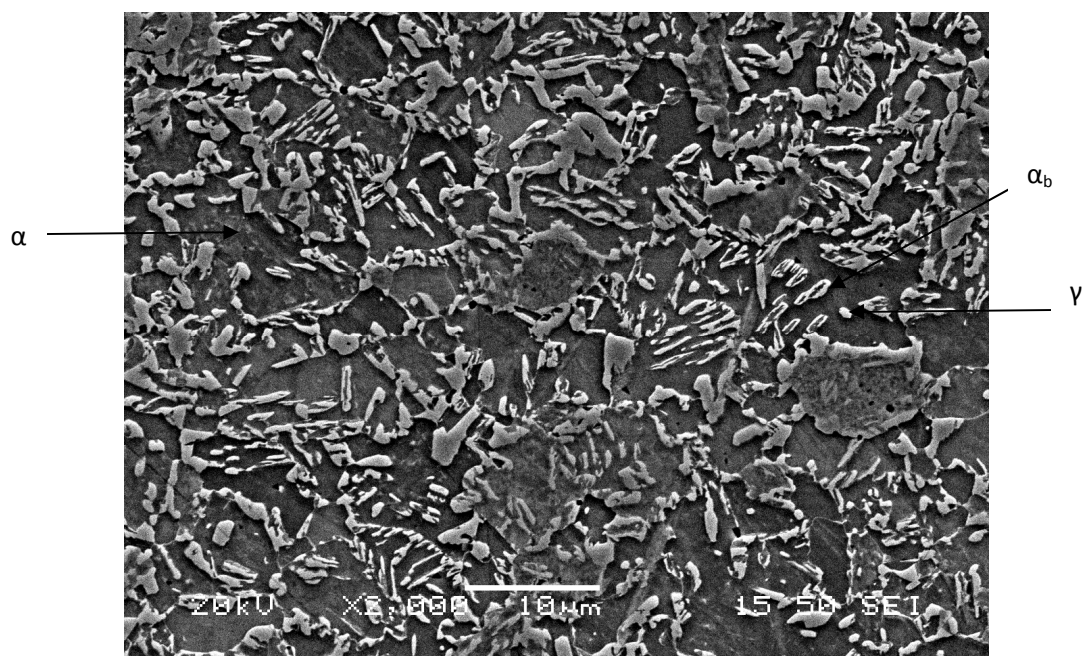
Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.76	3.43
Mn K	1.96	1.95
Fe K	96.29	94.61
Totals	100.00	

Παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένα ποσοστά πυριτίου και μαγγανίου συγκριτικά με τη δοσμένη χημική σύσταση.

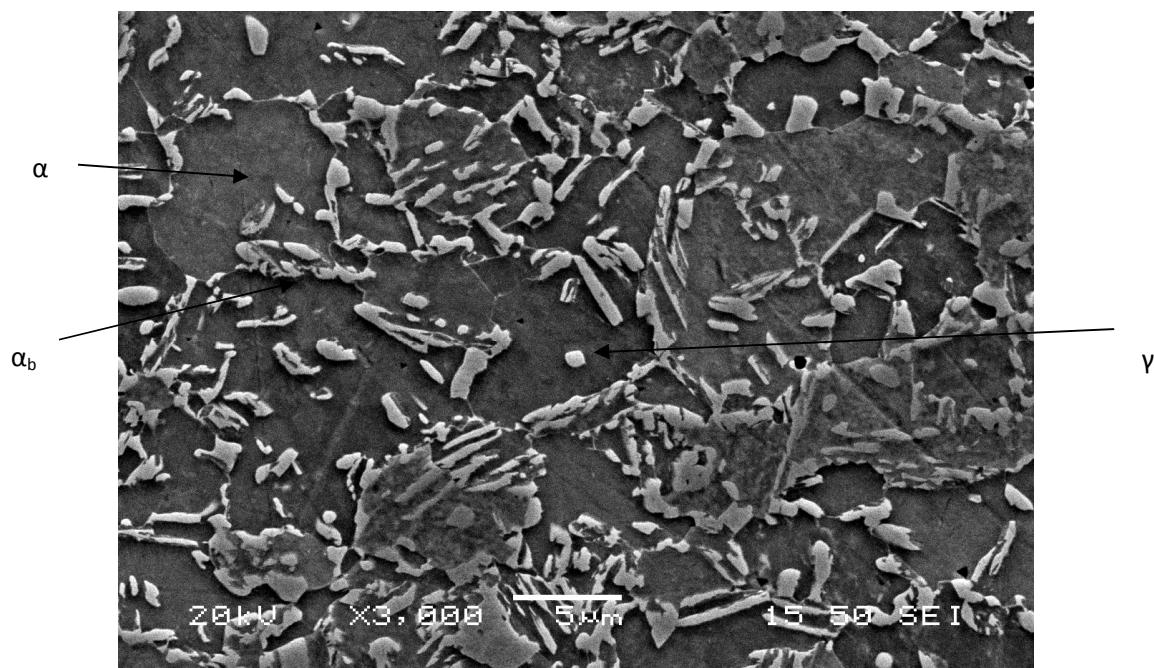
Η περιθλασιμετρία ακτίνων Χ έδωσε ως αποτέλεσμα τη συμμετοχή μόνο του φερριτικού υποβάθρου, καθώς μόνο αυτό παρουσίαζε κατάλληλο κλάσμα όγκου, μέγεθος κόκκου, κατανομή και μορφολογία και δεν ταυτοποιήθηκε η ωστενιτική φάση.

Όμως, κατά την παρατήρηση των φωτογραφιών δευτερογενών ηλεκτρονίων του δείγματος με 0% παραμόρφωση, εμφανίζεται υψηλό τοπογραφικό ανάγλυφο και δομή που αποτελείται από φερριτικό υπόβαθρο και στα όρια κόκκων του φερριτή φιλμ μπαινίτη και διεσπαρμένες νησίδες ωστενίτη.

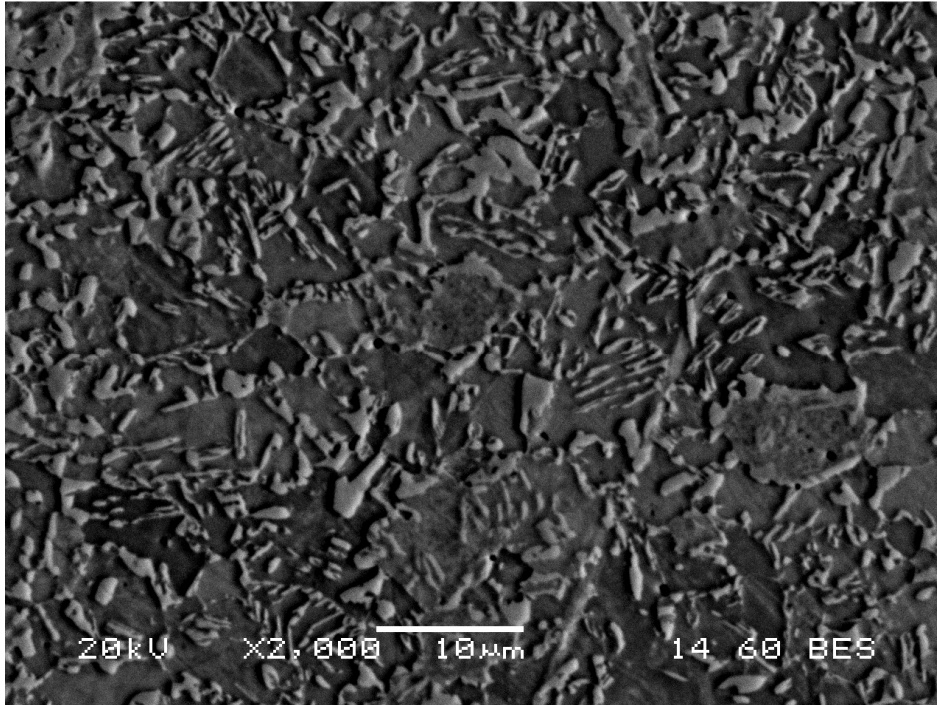
Στη φωτογραφία πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων αναζητήθηκε διαφορά αντίθεσης πεδίου λόγω διαφοράς μέσου ατομικού αριθμού εξαιτίας της ύπαρξης του ωστενίτη, αλλά δεν διακρίνεται.



Εικόνα 6.2: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση * 2000 του δείγματος με 0% παραμόρφωση.



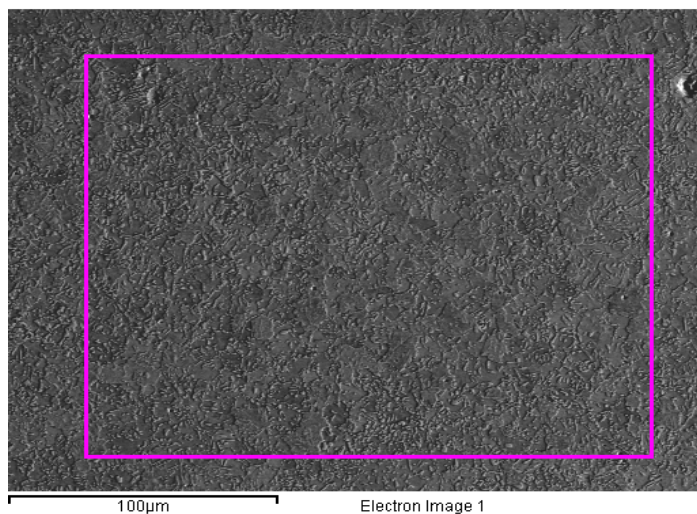
Εικόνα 6.3: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση *3000 του δείγματος με 0% παραμόρφωση.



Εικόνα 6.4: Εικόνα πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων * 2000 του δείγματος με 0% παραμόρφωση

- **Δείγμα με 12% παραμόρφωση**

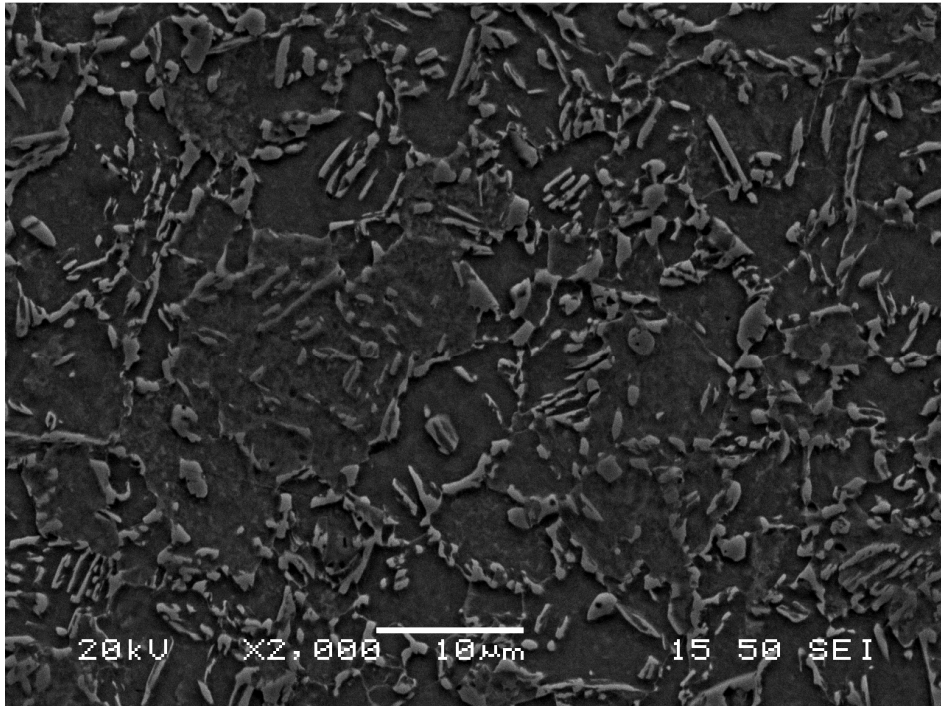
Στο δείγμα 12 % παραμόρφωσης πραγματοποιήθηκε γενικευμένη χημική ανάλυση η οποία δίνει τα εξής αποτελέσματα:



Element	Weight%	Atomic%
Si K	1.61	3.14
Mn K	1.83	1.83
Fe K	96.57	95.03
Totals	100.00	

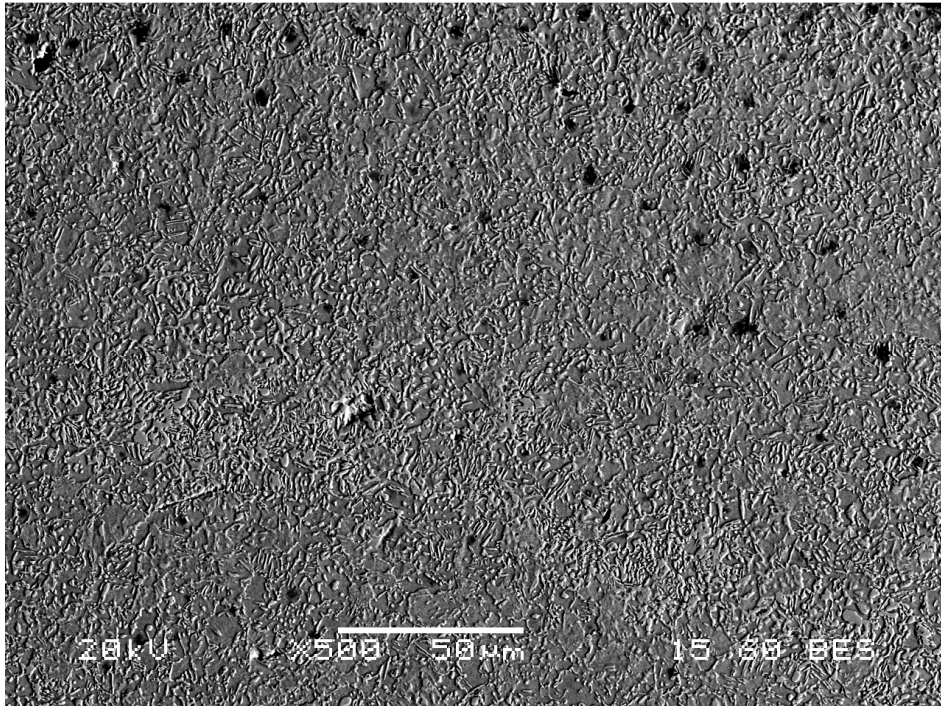
Παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένα ποσοστά πυριτίου και μαγγανίου συγκριτικά με τη δοσμένη χημική σύσταση.

Στις φωτογραφίες του δείγματος 12% παραμόρφωσης δεν παρατηρείται παραμόρφωση και επιμήκυνση των κόκκων προς μια κατεύθυνση λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης όπως θα ήταν αναμενόμενο. Μπορούμε να διακρίνουμε το φερριτικό υπόβαθρο φιλμ μπαινίτη γύρω από τα όρια κόκκων του φερρίτη δεν μπορούμε όμως να διακρίνουμε την ύπαρξη μαρτενσίτη.



Εικόνα 6.5: Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση * 2000 του δείγματος 12% παραμόρφωσης

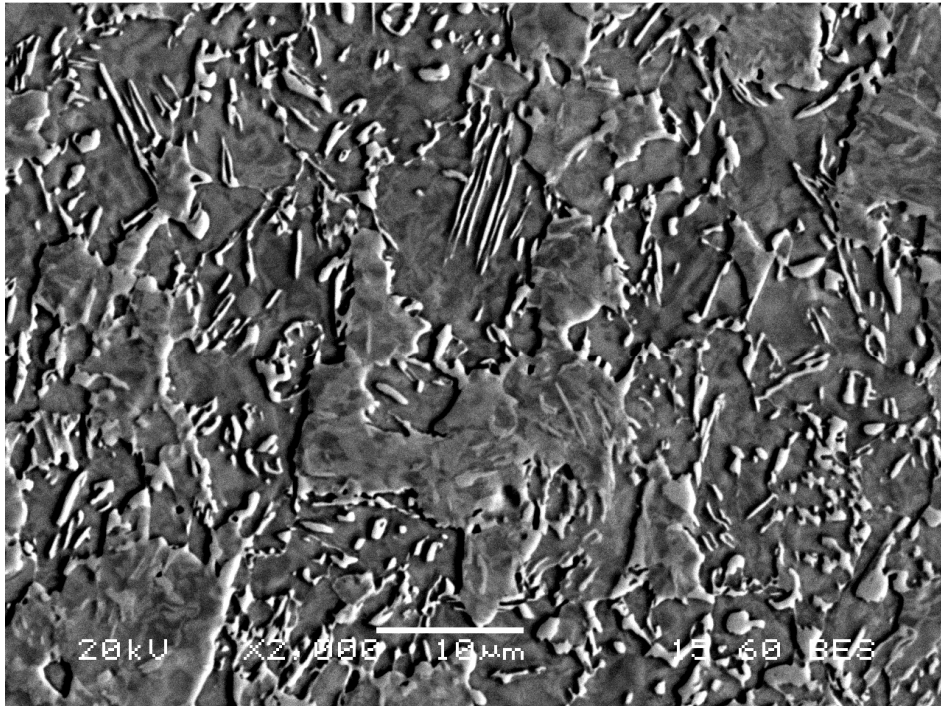
Εντούτοις, στη φωτογραφία των πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων, διακρίνεται η παρουσία οπών λόγω αποκόλλησης ή θραύσης εγκλεισμάτων κατά τη λείανση.



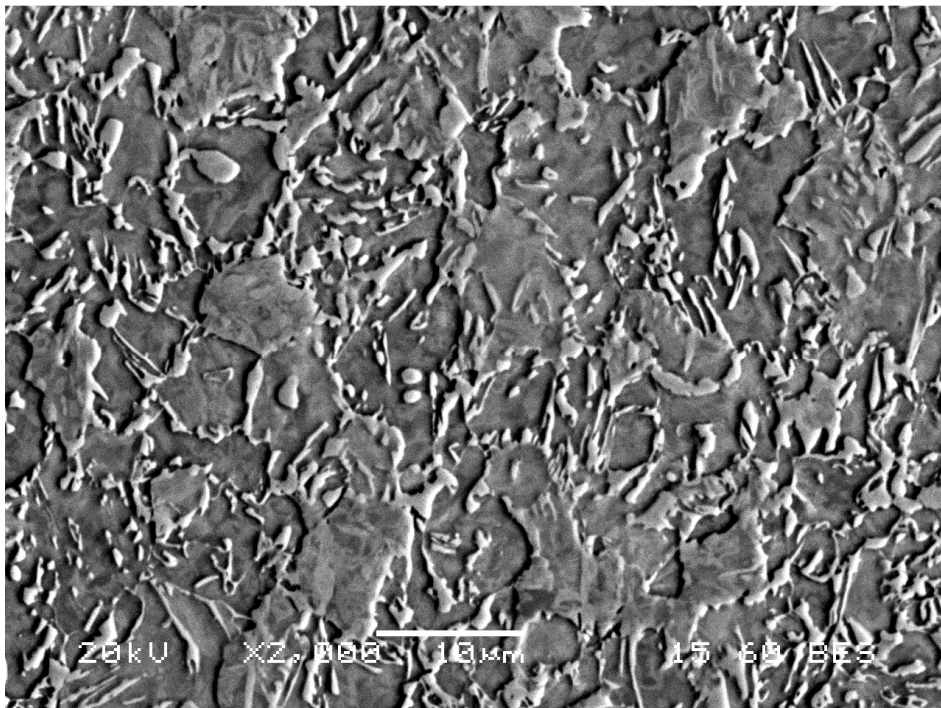
Εικόνα 6.6: Εικόνα πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση *500 του δείγματος 12% παραμόρφωσης.

- **Δείγμα με 24% παραμόρφωση**

Στο δείγμα 24% παραμόρφωσης αναμένεται η μικροδομή να συνίσταται από φερριτικό υπόβαθρο, φιλμ μπαινιτικού φερρίτη γύρω από τα όρια κόκκων του φερρίτη και μαρτενσίτη ως προϊόν μετασχηματισμού του ωσενίτη λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Από τις φωτογραφίες τόσο των δευτερογενών, όσο και των πισωσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων δεν μπορεί να διακριθεί η φάση του μαρτενσίτη.



Εικόνα 6.7: Εικόνα πιασκαδαζόμενων ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση *2000 του δείγματος 24% παραμόρφωσης.



Εικόνα 6.8: Εικόνα πιασκαδαζόμενων ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση *2000 του δείγματος 24% παραμόρφωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εφαρμογή της μεθόδου Barkhausen έγκειται στην κατανόηση του βασικού φαινομένου, υπεύθυνου για την επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και ποσοτικοποίηση των δεδομένων σε όρους σήματος. Η ανάλυση με θόρυβο Barkhausen είναι ευαίσθητη στην εντατική κατάσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι υπάρχει συσχετισμός μεταξύ του ποσοστού παραμόρφωσης και των μετρήσεων της μαγνητικής απόκρισης του Θορύβου Barkhausen. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μονοτονική, σχεδόν, συσχέτιση των τιμών του ανιχνευόμενου σήματος με τις τιμές της σκληρότητας. Η ευαισθησία της τεχνικής, εξαιτίας των σύνθετων μαγνητικών χαρακτηριστικών της μεταλλικής μικροδομής, καθώς επίσης, και η εφαρμογή της μεθόδου σπάνια σε ιδανικά δοκίμια, επιβάλλουν την περαιτέρω διερεύνηση της μεθόδου πριν μπορέσουμε με ασφάλεια να ισχυριστούμε ότι η μπορεί να αποτελέσει επαρκή μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jiles D., "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", Chapman and Hall, London, σελ.511.
- [2] Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, S. Q Kasar, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004, σελ.851-872
- [3] Some comparison between the measurement of stress in steel by means of Barkhausen noise and rotation of magnetization, NDT International Volume 20, 1987
- [4] Analysis of the martensitic transformation at various scales in TRIP steels, M.R Berrahmoune, S.Berveiller, K.Inal , A. Moulin, E. Patoor, Materials Science and Engineering, 2003 σελ. 304-307
- [5] Investigation of retained austenite stability in Mn-Si trip steel in tensile deformation condition, O. Muransky, P. Hornak, P. Lukas, J.Zrnik, P.Sittner, Journal of achievement in materials and manufacturing engineering, vol 14 2006
- [6] Transformation in TRIP – assisted Steels: Microstructure and Properties, Sourabh Chatterjee, Thesis, university of Cambridge 2006 σελ. 10-26
- [7] Γενική Μεταλλογνωσία II, Τα Κράματα, Γ.Δ Παπαδημητρίου, Αθήνα 1993, σελ 184-186
- [8] Modelling of Microstructure in TRIP Assisted steels, Guo Lei, Master Thesis, Pohang University of Science and Technology, 2007, σελ. 5-14
- [9] Microstructure and tensile behavior of cold rolled TRIP-aided steels, A. Wasilkowska, P.Tsipouridis, E.A. Werner, A. Pichler, S. Traint, Journal of Materials Processing Technology, 2004
- [10] Modeling of the DP and TRIP microstructure in the CMnSi automotive steel, A.K. Lis, B. Gajda, journal of achievements in materials and manufacturing engineering, vol 15 2006
- [11] Investigation of retained austenite stability in Mn-Si TRIP steel in tensile deformation condition, Q. Muransky, P. Hornak, P. Lukas, J. Zrnik, P. Sittner, journal of achievements in materials and manufacturing engineering, vol 14 2006
- [12] Effect of microstructure on the stability of retained austenite in transformation induced plasticity steels, I.B. Timokhina, P.D. Hodgson, E.V. Pereloma, journal of metallurgical and material transactions, vol 35A 2004
- [13] Stress vs Barkhausen noise relation in steel M. Lindgren, T. Lepisto, journal NDT&E international, 2003

- [14]Some comparison between the measurements of stress in steel by means of Barkhausen noise and rotation of magnetization, R. Langman, journal NDT&E international, 1997
- [15]Relation between residual stress and Barkhausen noise in steel, M. Lindgren, T. Lepisto, journal NDT&E international, 2004
- [16]The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials, S. Yamaura, Y. Furuya, T. Watanabe, journal acta materiala, 2001
- [17]On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel, X. Kleber, A. Vincent, journal NDT&E international, 2003
- [18]Chaotic phenomena of rotational Barkhausen noise, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Yoshitomi, journal magnetism and magnetic materials, 2000
- [19]Barkhausen noise in low carbon steels, M. Kupferning, F. Fiorillo, V. Basso, G. Bertotti, P. Meiland, journal magnetism and magnetic materials, 2008
- [20]Characterization of the elastic-plastic region in steels by the magnetic Barkhausen noise, M Alberteris Campos, J. Capo-Sanchez, J. Perez Benitez, L.R. Padovese, journal NDT&E international, 2008
- [21]A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in steel, J. Capo-Sanchez, J. Perez Benitez, L.R. Padovese, J. Anglada-Rivera journal NDT&E international, 2008
- [22]Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel, D.M. Stewart, K.J. Stevens, A.B. Kaiser, journal of current applied physics, 2004
- [23]Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel, A. Bukki-Demme, I.A. Szabo, C. Cserhati, journal of magnetism and magnetic materials, 2009
- [24] http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_d/hg2m_d.html interatomic exchange
- [25] <http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/NMR/NMR-3.html> Magnetic Moments for spin 1/2
- [26] <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Fe/econ.html> Electronic Configuration
- [27] <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Co/xtal.html> Crystal Structure
- [28] <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node45.html> Magnetization

[29]<http://magnet.atp.tuwien.ac.at/scholz/projects/report/node11.html>

Magnetization of demagnetized state

[30]http://sls.web.psi.ch/view.php/science/lisy/organization/group_mm/group_mm_home.html Magnetism on the nanoscale