



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων και μικροδομής σε  
χάλυβες**

**Παπαδοπούλου Σοφία**

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



*Αφιερώνεται στους γονείς μου*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την πολύτιμη βοήθεια, ηθική στήριξη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και της πενταετούς μου φοίτησης στη Σχολή.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Φούρλαρη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου, για τις πολύτιμες υποδείξεις του και για την συνολικότερη προσφορά του κατά τη διάρκεια της διεκπεραίωσης των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τον Λέκτορα κ. Σπύρο Παπαευθυμίου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου, τις πολύτιμες υποδείξεις του και τα εφόδια που μου έδωσε κατά την εκπόνηση της Πρακτικής Άσκησης αλλά και μετέπειτα στη Σχολή.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα της Σχολής μας κα Πολυξένη Βουρνά για την πολύτιμη βοήθειά της και τη συμπαράστασή της.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ζαφειρία και Μυροφόρο Παπαδοπούλου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για τον ακριβή σχεδιασμό των ηλεκτρικών εξαρτημάτων, χρειάζεται να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι μαγνητικές ιδιότητες των ελασμάτων χάλυβα που χρησιμοποιούνται ως μαγνητικοί πυρήνες. Ωστόσο, η συμπεριφορά του πυρήνα στην αρχική του, μη καταπονημένη κατάσταση είναι διαφορετική από εκείνη που προσδιορίζεται υπό συνθήκες λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στην παρουσία των μηχανικών τάσεων, οι οποίες προέρχονται ήδη από το στάδιο της παραγωγής του. Ωστόσο, για την μελέτη της εντατικής κατάστασης των πυρήνων των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων χρησιμοποιούνται εμπειρικοί τύποι και συντελεστές, διότι η κατανόηση και η μοντελοποίηση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα με τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητές του και μικροδομικές αλλαγές, χρήζει ακόμα διερευνήσεως.

Οι μαγνητικές ιδιότητες των χαλύβδινων ελασμάτων είναι πολύ ευαίσθητες σε μηχανικές στατικές ή δυναμικές καταπονήσεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να παρουσιάσει έναν πειραματικό, in-situ χαρακτηρισμό ενός μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα υπό συνθήκες μονοαξονικής εφελκυστικής καταπόνησης αλλά και να βοηθήσει στη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών μαγνήτισης του ηλεκτρικού χάλυβα με την παρουσία μηχανικών καταπονήσεων.

Οι μαγνητικές παράμετροι που μετρήθηκαν ήταν εκείνες του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Οι μαγνητικές αποκρίσεις σχετίζονται άμεσα με τα στάδια παραμόρφωσης του ηλεκτρικού χάλυβα, τόσο εντός της ελαστικής, όσο και της πλαστικής περιοχής. Η διαδικασία της μαγνήτισης σχετίζεται άμεσα με την αντιστρεπτή και μη κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων εντός της ελαστικής περιοχής και στην παρεμπόδιση της κίνησής τους εξαιτίας της παρουσίας των διαταραχών. Η διάκριση της ελαστικής περιοχής από εκείνη της πλαστικής παραμόρφωσης είναι δυνατή μέσω των μαγνητικών παραμέτρων.

## ABSTRACT

For an accurate design of electrical machines, the magnetic properties of steel laminations used as magnetic cores need to be precisely estimated. However, the material's behavior in the core is different from the one measured under standard conditions. The main reason appears to be the presence of mechanical strains resulting from indispensable manufacturing operations like punching and core assemblage. To account for this difference, an empirical factor is used until now, because the understanding and the modelling the complex magnetomechanical interactions in core materials are still open problems.

The magnetic properties of steel sheets and strips used as magnetic cores in electrical machines are very sensitive to mechanical strains resulting from manufacturing operations. This study presents an experimental in situ characterization of a non-oriented electrical steel and dedicates to a better understanding of the magnetization mechanisms of the electrical steel in the presence of mechanical strains.

The mechanical properties of the study material were determined under a monotonous uniaxial tensile test. Barkhausen noise and magnetic hysteresis measurements were performed on elastically and plastically strained unloaded specimens, showing a strong degradation of the magnetic properties as an effect of plastic strain. This effect is more pronounced for low and medium values of the magnetic field strength, corresponding to the reversible and irreversible motion of domain walls, which stands for the pinning effect of dislocations. The deformation stages are clearly identified by the magnetic parameters.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>III</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>VI</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>XII</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	<b>13</b>
1.1 Οι μαγνητικές μέθοδοι ως τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου .....	13
1.2 Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen (MBN).....	13
1.3 Προέλευση μαγνητικού θορύβου Barkhausen.....	14
1.4 Επίδραση τάσεων στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen.....	17
1.5 Επίδραση μαγνητικής ανισοτροπίας στη μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen.....	18
1.6 Επίδραση παραμενουσών τάσεων στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen.....	20
1.7 Επίδραση διαταραχών στη μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen .....	21
1.8 Επίδραση μικροδομικών χαρακτηριστικών στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen.....	22
1.9 Ανάγκη βαθμονόμησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b> .....	<b>24</b>
2.1 Εισαγωγή .....	24
2.2 Δείγματα που παρελήφθησαν .....	24
2.3 Μεθοδολογία.....	26

2.4	Μη-καταστροφικός έλεγχος.....	29
2.4.1	Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα για τη μέτρηση του θορύβου Barkhausen .	29
2.4.2	Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου .....	31
2.5	Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων .....	37
2.5.1	Με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας .....	37
2.5.2	Με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD) .....	38
2.6	Χαρακτηρισμός μικροδομής.....	39
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>		<b>42</b>
3.1	Μελέτη της επίδρασης εφελκυστικών τάσεων εντός της ελαστικής και της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων .....	42
3.1.1	Μικροδομικός χαρακτηρισμός .....	48
3.2	Προσδιορισμός παραμενουσών τάσεων στο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα που είχε υποβληθεί σε δοκιμή σε κάμψη .....	53
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>		<b>59</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>		<b>60</b>



## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1-1:** Ασυνεχείς, μη αντιστρεπτές μεταβολές της μαγνήτισης  $M$  ως προς το εφαρμοζόμενο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$ , οι οποίες σχετίζονται με το μαγνητικό θόρυβο Barkhausen. .... 14
- Εικόνα 1-2:** Αναπαράσταση των μαγνητικών περιοχών χαρακτηριζόμενων από ένα τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών τους διπόλων, για ένα πολυκρυσταλλικό σιδηρομαγνητικό υλικό, εν τη απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ή εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης [20].  
..... 15
- Εικόνα 1-3:** Μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών με τα μαγνητικά τους δίπολα να είναι ευνοϊκότερα προσανατολισμένα στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη θέση των μαγνητικών τοιχωμάτων, εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου [20]. ..... 16
- Εικόνα 1-4:** Μη αντιστρέψιμα και ασυνεχή άλματα Barkhausen σε τοπικά εντοπισμένα σημεία αγκύρωσης, με αποτέλεσμα τα μαγνητικά τοιχώματα να αναβαθμίζονται ενεργειακά [20]. ..... 17
- Εικόνα 1-5:** Πολικά διαγράμματα χωρίς την εφαρμογή τάσεως (0%) και με την μονοαξονική εφαρμογή εφελκυστικής τάσεως, εντός της ελαστικής περιοχής (0.03%) [41]. 19
- Εικόνα 1-6:** Κατανομή της ενέργειας του μαγνητικού τοιχώματος στα σημεία συσσώρευσης διαταραχών με και χωρίς την εφαρμογή τάσεων εντός της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις αλλαγές λόγω της εφαρμογής τάσης. .... 22
- Εικόνα 2-1:** Κατηγορίες ηλεκτρικού χάλυβα..... 24
- Εικόνα 2-2:** Διαστάσεις (μήκος και πλάτος) του υλικού αναφοράς (as-received sample).  
..... 25
- Εικόνα 2-3:** Διαστάσεις (σε mm) δειγμάτων εφελκυσμού. .... 26
- Εικόνα 2-4:** Αντιπροσωπευτική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από τις δοκιμές εφελκυσμού στο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα που παρελήφθη..... 27

<b>Εικόνα 2-5:</b> Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για δείγματα μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα που είχαν παραμορφωθεί εντός της ελαστικής και πλαστικής περιοχής. .....	27
<b>Εικόνα 2-6:</b> Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen. .....	29
<b>Εικόνα 2-7:</b> Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen. ....	29
<b>Εικόνα 2-8:</b> Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V.....	30
<b>Εικόνα 2-9:</b> Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια του δείγματος. ....	30
<b>Εικόνα 2-10:</b> Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. ....	31
<b>Εικόνα 2-11:</b> Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. ....	32
<b>Εικόνα 2-12:</b> Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. ....	33
<b>Εικόνα 2-13:</b> Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης στις διάταξης του υστερησιογράφου. ....	34
<b>Εικόνα 2-14:</b> Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στις διάταξης του υστερησιογράφου. ....	35
<b>Εικόνα 2-15:</b> Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.....	35
<b>Εικόνα 2-16:</b> Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού. ....	36
<b>Εικόνα 2-17:</b> Βρόχος υστέρησης (μαύρο χρώμα) και βρόχος μαγνητικής διαπερατότητας (μπλε χρώμα).....	37
<b>Εικόνα 2-18:</b> Κρυσταλλογραφικά επίπεδα στην επιφάνεια πολυκρυσταλλικού υλικού..	38

<b>Εικόνα 2-19:</b> Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV...	39
<b>Εικόνα 3-1:</b> Μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας, ως προς την επιβαλλόμενη τάση.....	42
<b>Εικόνα 3-2:</b> Μεταβολή των τιμών της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, ως προς την επιβαλλόμενη τάση. ....	43
<b>Εικόνα 3-3:</b> Δύο στάδια της εξέλιξης της ελαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας. ....	43
<b>Εικόνα 3-4:</b> Δύο στάδια της εξέλιξης της πλαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας. ....	44
<b>Εικόνα 3-5:</b> Δύο στάδια της εξέλιξης της πλαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου. ....	45
<b>Εικόνα 3-6:</b> Μεταβολή του συντελεστή ενδοτράχυνσης εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων.....	47
<b>Εικόνα 3-7:</b> Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του αφόρτιστου ηλεκτρικού χάλυβα.....	49
<b>Εικόνα 3-8:</b> Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα, ο οποίος έχει παραμορφωθεί ελαστικά. ....	50
<b>Εικόνα 3-9:</b> Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα, ο οποίος έχει παραμορφωθεί πλαστικά, πριν τη μέγιστη εφελκυστική τάση θραύσης.....	50
<b>Εικόνα 3-10:</b> Σημειακές χημικές μικροαναλύσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στο αφόρτιστο ηλεκτρικό χάλυβα. ....	51
<b>Εικόνα 3-11:</b> Σημειακές χημικές μικροαναλύσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στον ηλεκτρικό χάλυβα που έχει παραμορφωθεί ελαστικά.....	52
<b>Εικόνα 3-12:</b> Σημειακές χημικές μικροαναλύσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στον ηλεκτρικό χάλυβα που έχει παραμορφωθεί πλαστικά. ....	53
<b>Εικόνα 3-13:</b> Διάταξη δοκιμής κάμψης. ....	54
<b>Εικόνα 3-14:</b> Κατανομή των παραμενουσών τάσεων στο έλασμα του ηλεκτρικού χάλυβα, το οποίο υποβλήθηκε μονοτονική φόρτιση κάμψης.....	54

<b>Εικόνα 3-15:</b> Σημεία προσδιορισμού των παραμενουσών τάσεων στην άνω και κάτω επιφάνεια του ελάσματος του ηλεκτρικού χάλυβα, που είχε υποβληθεί σε μονοτονική φόρτιση κάμψης. ....	55
<b>Εικόνα 3-16:</b> Καμπύλες βαθμονόμησης ηλεκτρικού χάλυβα, ως προς το (α) μαγνητικό θόρυβο Barkhausen και (β) τη μαγνητική διαπερατότητα. ....	56
<b>Εικόνα 3-17:</b> Κανονικοποιημένες καμπύλες βαθμονόμησης ηλεκτρικού χάλυβα, ως προς το (α) μαγνητικό θόρυβο Barkhausen και (β) τη μαγνητική διαπερατότητα. ....	57

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2-1:</b> Χημική σύσταση (wt.-%) του υλικού αναφοράς.....	25
<b>Πίνακας 2-2:</b> Μηχανικές ιδιότητες του υλικού αναφοράς, όπως προκύπτουν από τις δοκιμές εφελκυσμού. ....	26
<b>Πίνακας 3-1:</b> Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBN), της μαγνητικής διαπερατότητας (MP) και της περίθλασης ακτίνων X (XRD)(με αρνητικό πρόσημο σημειώνονται οι θλιπτικές τάσεις και με θετικό, οι εφελκυστικές). ....	57

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

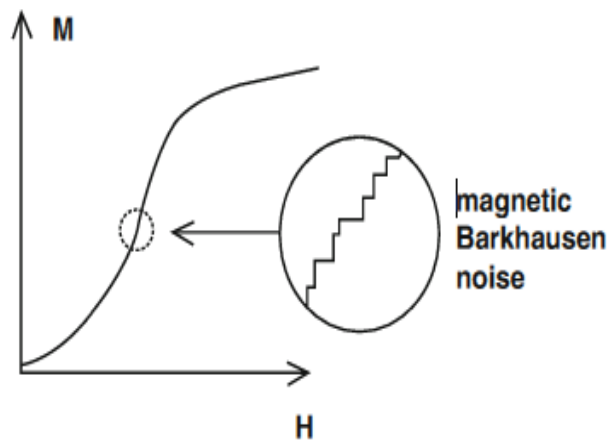
## 1.1 Οι μαγνητικές μέθοδοι ως τεχνικές Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Η διαδικασία μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού που περιγράφεται από τον κύκλο υστέρησης πραγματοποιείται μέσω μιας τυχαίας ακολουθίας ασυνεχών κινήσεων των μαγνητικών τοιχωμάτων, προκαλώντας το γνωστό φαινόμενο που ονομάζεται μαγνητικός θόρυβος Barkhausen (Magnetic Barkhausen Noise - MBN) [1,2]. Η μελέτη της εξέλιξης αυτού του φαινομένου γίνεται μέσω της κατάλληλης τοποθέτησης ενός πηνίου λήψης (pick-up coil) και της ανίχνευσης τυχαίων τιμών τάσεως στην έξοδό του κατά την μαγνήτιση του υλικού [3].

Η ανάλυση του MBN μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την αλληλεπίδραση μεταξύ των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών και της μικροδομής ή της εντατικής κατάστασης (πεδίο τάσεων) του μαγνητικού υλικού [4]. Αποτελεί, επίσης, μία συμπληρωματική, μη καταστροφική μέθοδο, αυτής των δινορευμάτων (eddy-current) [5-7], καθώς και της μαγνητικής διαρροής (magnetic flux leakage - MFL) [8]. Οι δύο αυτές τεχνικές είναι οι δημοφιλέστερες μαγνητικές μέθοδοι μη καταστρεπτικού ελέγχου στη βιομηχανία.

## 1.2 Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen (MBN)

Κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, μέσω της εφαρμογής ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου, παρατηρούνται μη αντιστρεπτές μεταβολές στην αρχική καμπύλη μαγνήτισης [3]. Αυτές σχετίζονται με το MBN (Εικόνα 1.1) και αντιπροσωπεύουν το σιδηρομαγνητικό υλικό [9]. Ο MBN πήρε το όνομά του από τον ερευνητή που τον ανακάλυψε [10], και ονομάζεται "θόρυβος" εξαιτίας του ήχου που ακούγονταν στο μεγάφωνο που χρησιμοποίησε στο αρχικό πείραμά του. Αποκαλείται «μαγνητικός» για να διαχωρίζεται από τον ακουστικό θόρυβο Barkhausen, ο οποίος σχετίζεται με το φαινόμενο της μαγνητοακουστικής εκπομπής [11, 12].



**Εικόνα 1-1:** Ασυνεχείς, μη αντιστρεπτές μεταβολές της μαγνήτισης  $M$  ως προς το εφαρμοζόμενο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$ , οι οποίες σχετίζονται με το μαγνητικό θόρυβο Barkhausen.

### 1.3 Προέλευση μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Ένα αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό μαγνητικών περιοχών (magnetic domains), που χαρακτηρίζονται, στο σύνολό τους, από έναν τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών τους διπόλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνισταμένη των διανυσμάτων της μαγνήτισης να είναι μηδέν [3, 17] (Εικόνα 1.2).

Ο σχηματισμός των μαγνητικών περιοχών είναι το αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης του αλγεβρικού αθροίσματος των ακόλουθων πέντε βασικών ενεργειών, που σχετίζονται με τον σιδηρομαγνητισμό:

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

Η **ενέργεια ανταλλαγής** ( $E_{\text{ανταλλαγής}}$ ) προέρχεται από την κβαντική αλληλεπίδραση των διπόλων και της αλληλεπίδρασης των spin, που είναι υπεύθυνα για τον σιδηρομαγνητισμό [19]. Λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν τα spin των ασύζευκτων ηλεκτρονίων της εξωτερικής στοιβάδας είναι προσανατολισμένα παράλληλα.

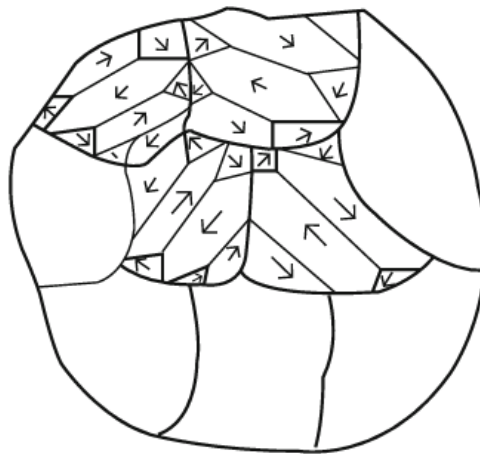
Η **μαγνητοστατική ενέργεια** ( $E_{\text{μαγνητοστατική}}$ ) λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της όταν το διάνυσμα της μαγνήτισης της μαγνητικής περιοχής είναι παράλληλο με αυτό του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [3, 9].

Η κρυσταλλική συμμετρία δημιουργεί μία **μαγνητοκρυσταλλική** (ανισότροπη) **ενέργεια** (Εμαγνητοκρυσταλλική). Η ενέργεια αυτή ελαχιστοποιείται όταν το διάνυσμα της μαγνήτισης της μαγνητικής περιοχής είναι παράλληλο με τον άξονα της εύκολης μαγνήτισης [3, 15].

Η παραμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος σχετίζεται με τη διεύθυνση της μαγνήτισης των μαγνητικών περιοχών μέσω της **μαγνητοελαστικής ενέργειας** (Εμαγνητοελαστική) [9]. Όταν το κρυσταλλικό πλέγμα παραμορφώνεται, η μαγνητοελαστική ενέργεια λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της, ώστε οι μαγνητικές περιοχές να διευρύνονται ή να συρρικνώνονται στη διεύθυνση της μαγνήτισης των μαγνητικών περιοχών [9].

Η **ενέργεια των μαγνητικών τοιχωμάτων** (Ετοιχωμάτων) σχετίζεται με τον μη παράλληλο προσανατολισμό των μαγνητικών διπόλων μεταξύ τους ή με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης και ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας των μαγνητικών τοιχωμάτων.

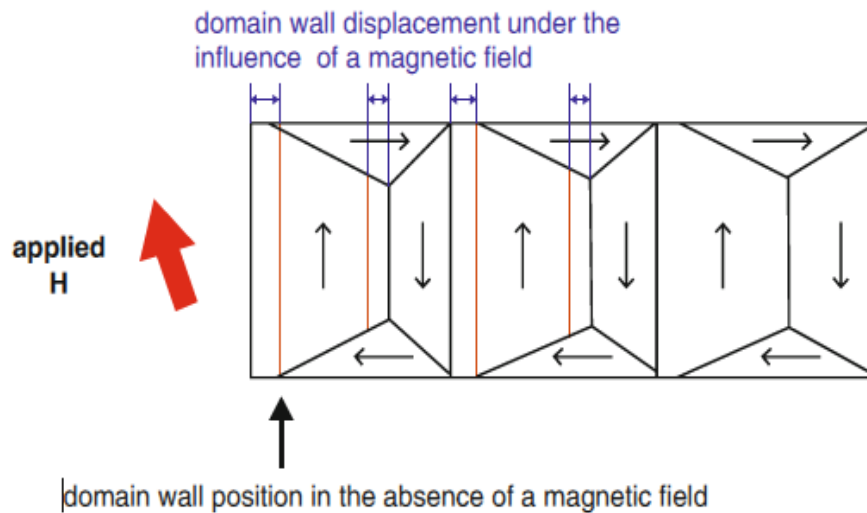
Ο σχηματισμός μίας μαγνητικής περιοχής είναι το αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος όλων των πέντε βασικών ενεργειών, χωρίς όμως να είναι απαραίτητο η κάθε μία από τις ενέργειες του αθροίσματος να λάβει την ελάχιστη τιμή της. Αυξομειώσεις των παραπάνω ενεργειών οδηγούν σε παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος [20].



**Εικόνα 1-2:** Αναπαράσταση των μαγνητικών περιοχών χαρακτηριζόμενων από ένα τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών τους διπόλων, για ένα πολυκρυσταλλικό σιδηρομαγνητικό υλικό, εν τη απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ή εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης [20].

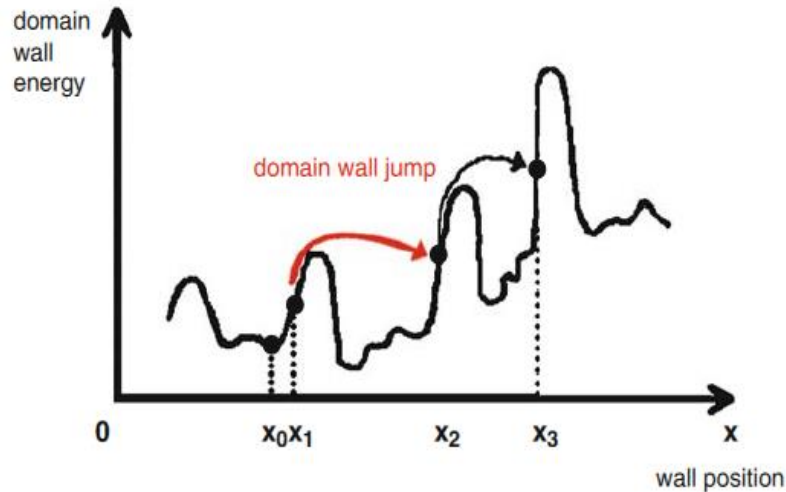


Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τείνει να προσανατολίσει τα μαγνητικά δίπολα με τη διεύθυνσή του. Οι μαγνητικές περιοχές που τα μαγνητικά δίπολα είναι ευνοϊκότερα προσανατολισμένα στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, αυξάνουν τον όγκο τους εις βάρος των γειτονικών τους [9] (Εικόνα 1.3). Η αύξηση αυτή πραγματοποιείται μέσω της μετακίνησης των μαγνητικών τους τοιχωμάτων [17].



**Εικόνα 1-3:** Μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών με τα μαγνητικά τους δίπολα να είναι ευνοϊκότερα προσανατολισμένα στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου. Οι κόκκινες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη θέση των μαγνητικών τοιχωμάτων, εν τη απουσία μαγνητικού πεδίου [20].

Όταν πάψει να εφαρμόζεται το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι περιοχές δεν επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση [9]. Κατά την κίνησή τους τα μαγνητικά τοιχώματα συναντούν εμπόδια, όπως μια τοπική συγκέντρωση τάσεων ή δομικών ατελειών, τα οποία για να υπερνικήσουν χρειάζεται να τους προσφερθεί ενέργεια μέσω της επιβολής πεδίου [3, 9]. Η υπερνίκηση των εμποδίων αυτών έχει ως αποτέλεσμα τα μαγνητικά τοιχώματα να μην μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους θέση χωρίς την επενέργεια του πεδίου. Ο MBN αντιπροσωπεύει τα μη αναστρέψιμα άλματα των μαγνητικών τοιχωμάτων σε χωρικά εντοπισμένα σημεία αγκύρωσης (pinning sites), όπως είναι τα όρια των κόκκων, οι διαταραχές κ.α. (Εικόνα 1.4). Οι οποιοσδήποτε ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος προκαλούν καθυστερήσεις στην κίνηση των τοιχωμάτων, οι οποίες οδηγούν σε άνισες και ασυνεχείς μεταβολές της μαγνήτισης [9, 18].



**Εικόνα 1-4:** Μη αντιστρέψιμα και ασυνεχή άλματα Barkhausen σε τοπικά εντοπισμένα σημεία αγκύρωσης, με αποτέλεσμα τα μαγνητικά τοιχώματα να αναβαθμίζονται ενεργειακά [20].

Πιστεύεται ότι ο MBN οφείλεται κυρίως στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων με προσανατολισμό  $180^\circ$  [3,9,21], δηλαδή τοιχωμάτων που χωρίζουν δύο γειτονικές μαγνητικές περιοχές με αντίρροπα διανύσματα μαγνήτισης [3, 15]. Εν αντιθέσει, τα μαγνητικά τοιχώματα  $90^\circ$ , τα οποία διαχωρίζουν μαγνητικές περιοχές με κάθετα διανύσματα μαγνήτισης, χαρακτηρίζονται από δυσκολία στην κίνησή τους κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης. Η χαμηλότερη ταχύτητά τους [22] συγκριτικά με εκείνη των μαγνητικών τοιχωμάτων  $180^\circ$ , αποδίδεται στο πεδίο παραμορφώσεων που δημιουργείται στο κρυσταλλικό πλέγμα, το οποίο ενισχύεται στη διεύθυνση της μαγνήτισης.

## 1.4 Επίδραση τάσεων στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen

Ο MBN έχει αποδειχθεί ιδιαίτερος ευαίσθητος στις αλλαγές της εντατικής κατάστασης ενός σιδηρομαγνητικού χάλυβα [20, 23-24]. Για το λόγο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο μη καταστρεπτικού ελέγχου (ΜΚΕ) στην αξιολόγηση του ποσοστού των ελαστικών τάσεων και παραμορφώσεων [23], καθώς και της πλαστικής παραμόρφωσης [20, 24], που χαρακτηρίζουν τον εξεταζόμενο φερρομαγνητικό χάλυβα.

Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, στο οποίο επιβάλλεται είτε δυναμική, είτε στατική φόρτιση, προκαλούνται αλλαγές στο συνολικό διάνυσμα της μαγνήτισής του, ακόμα και αν δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο [3]. Το μαγνητικό πεδίο, που απαιτείται για την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και την υπερπήδηση των σημείων αγκύρωσης,

αυξάνεται καθώς ενισχύεται η παρουσία ελαστικών τάσεων στο υλικό [3]. Με τη σειρά τους και τα σημεία αγκύρωσης επηρεάζονται από την επιβολή ελαστικού εντατικού πεδίου [25].

Συγκεκριμένα, μια εφαρμοζόμενη τάση, ακριβώς όπως ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο, διαταράσσει την ισορροπία μεταξύ των πέντε ενεργειών, που συνιστούν την ολική ενέργεια του φερρομαγνητικού υλικού. Χρειάζεται λοιπόν να αναπροσαρμοστούν οι τιμές τους, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το τελικό άθροισμά τους [20]. Υπό την απουσία επίδρασης τάσεων, η μαγνητοστατική ενέργεια είναι μηδέν, ενώ οι κυρίαρχοι όροι στο άθροισμα είναι η μαγνητοκρυσταλλική και η μαγνητοελαστική ενέργεια [9, 15]. Υπό την επίδραση φόρτισης, η μαγνητοκρυσταλλική και η μαγνητοελαστική ενέργεια δρουν ανταγωνιστικά, με στόχο να ορίσουν την κατεύθυνση του διανύσματος της μαγνήτισης κάθε μαγνητικής περιοχής. Ωστόσο, για να μεταβληθεί η τιμή της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας και για να αλλάξει η κατεύθυνση του διανύσματος της μαγνήτισης της εκάστοτε μαγνητικής περιοχής, απαιτείται η εφαρμογή τάσεων πάνω από 1.700 MPa [26]. Συνεπώς, η διεύθυνση του μαγνητικού διπόλου τείνει να παραμένει παράλληλη στον εύκολο άξονα μαγνήτισης. Ο μόνος τρόπος για να επαναπροσανατολιστεί η διεύθυνση του μαγνητικού διπόλου στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης είναι μέσω της μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων. Υπό την επίδραση μονοαξονικών ελαστικών εφελκυστικών τάσεων αναβαθμίζονται ενεργειακά οι μαγνητικές περιοχές με διάνυσμα μαγνήτισης παράλληλο στη διεύθυνση της τάσης, ενώ υπό την επίδραση μονοαξονικών ελαστικών θλιπτικών τάσεων οι περιοχές με μαγνητικές ροπές κάθετες ως προς τον άξονα της εφαρμοζόμενης τάσης γίνονται πιο ευνοϊκές ενεργειακά [21]. Με αυτόν τον τρόπο, η μαγνητοελαστική ενέργεια μειώνεται [15, 26].

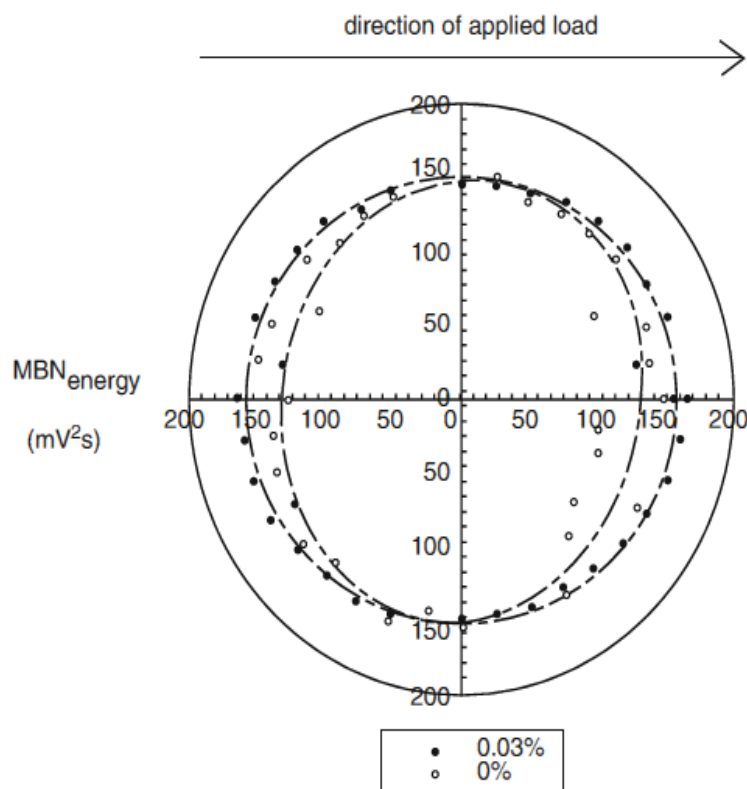
Συνοψίζοντας, παρατηρείται μια αύξηση των μαγνητικών τοιχωμάτων  $180^\circ$  στην κατεύθυνση της τάσης, εάν η τάση αυτή είναι εφελκυστική και μια μείωσή τους, εάν εφαρμόζεται θλιπτική τάση [27, 29-33]. Καθώς ο MBN συνδέεται με την αγκύρωση των μαγνητικών τοιχωμάτων, ένα υψηλότερο σήμα λαμβάνεται κατά μήκος της κατεύθυνσης της τάσης σε εφελκυσμό και χαμηλότερο σε συμπίεση [27].

## **1.5 Επίδραση μαγνητικής ανισοτροπίας στη μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen**

Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού εξαρτώνται από την κατεύθυνση, στην οποία μετρώνται [3]. Μόνο η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία, η οποία είναι άμεσα

συνδεδεμένη με τα κρυσταλλική συμμετρία είναι μια ενδογενής ιδιότητα του υλικού, ενώ όλες οι άλλες μαγνητικές ανισοτροπίες είναι εξωγενείς [15]. Αρκετά συχνά, ο σχεδιασμός των εμπορικών σιδηρομαγνητικών υλικών εξαρτάται από τη μαγνητική ανισοτροπία τους [23]. Ο MBN αποτελεί κατάλληλη τεχνική για την ανίχνευση μαγνητικής ανισοτροπίας σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, χωρίς όμως να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της προέλευσής της. Το σήμα του MBN μετράται σε συγκεκριμένες γωνίες σε σχέση με τον άξονα του εξεταζόμενου δοκιμίου. Με τη βοήθεια μιας μαθηματικής μοντελοποίησης σχεδιάζεται σε ένα πολικό διάγραμμα, στο οποίο η μέγιστη τιμή ορίζει τη διεύθυνση του μακροσκοπικού εύκολου άξονα μαγνήτισης [20, 28].

Στην περίπτωση απουσίας μαγνητικής ανισοτροπίας, το πολικό διάγραμμα απεικονίζεται ως ένας τέλειος κύκλος. Εάν παρατηρείται μαγνητική ανισοτροπία, όπως για παράδειγμα κατά την εφαρμογή ενός μονοαξονικού εφελκυστικού φορτίου, ο κύκλος επιμηκύνεται κατά τη διεύθυνση της μαγνητικής ανισοτροπίας, η οποία στην περίπτωση αυτή είναι η διεύθυνση της φόρτισης [20]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο πολικό διάγραμμα να εμφανίζεται μια έλλειψη (Εικόνα 1-5).



**Εικόνα 1-5:** Πολικά διαγράμματα χωρίς την εφαρμογή τάσεως (0%) και με την μονοαξονική εφαρμογή εφελκυστικής τάσεως, εντός της ελαστικής περιοχής (0.03%) [41].

Ένα αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι, ο μαγνητικά εύκολος άξονας μαγνήτισης εξακολουθεί να υφίσταται και στην πλαστική περιοχή της παραμόρφωσης [25]. Επιπλέον, πολύπλοκες κατανομές τάσης παρατηρούνται σε σύνθετες μηχανικές κατεργασίες, όπως η ψυχρή έλαση [20, 35, 43-46].

Εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων του κρυσταλλικού πλέγματος, παρατηρείται ολίσθηση των κρυσταλλογραφικών επιπέδων, όταν η κρίσιμη διατμητική τάση τους υπερβεί ένα ορισμένο επίπεδο. Μεταξύ των επιπέδων, που έχουν ολισθήσει και αυτών που δεν έχουν, μεταβάλλονται οι ενδοπλεγματικές απόστασεις, δημιουργώντας πεδία τάσεων, ενώ παράλληλα μεταβάλλεται και ο όγκος των μαγνητικών περιοχών. Είναι κατανοητό ότι τα παραμορφωτικά πεδία τάσεων συμβάλλουν στην αναδιανομή των τάσεων εντός του κόκκου, μεταβάλλουν ταυτόχρονα και το μαγνητικό ιστό ανάπτυξης του εύκολου άξονα μαγνήτισης του υλικού. Ως εκ τούτου, η απόκριση του μαγνητικού θορύβου εξαρτάται σημαντικά από το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης [25].

Σε δείγματα χάλυβα, τα οποία έχουν παραμορφωθεί εντός της πλαστικής περιοχής και στη συνέχεια έχει πάψει να επενεργεί το φορτίο, οι γωνιακές μετρήσεις του σήματος MBN έχουν επιβεβαιώσει την παρουσία ενός εύκολου άξονα μαγνήτισης [35]. Σε πλαστικώς παραμορφωμένα δείγματα χάλυβα, αυξημένες τιμές του MBN παρατηρούνται εγκάρσια και κατά μήκος της διεύθυνσης της έλασης, ενδεικτικό της παρουσίας παραμενουσών τάσεων [20]. Σε T- συγκολλημένα δείγματα SAE 1020 χάλυβα έχουν ανιχνευθεί επιτυχώς οι τιμές των παραμενουσών τάσεων [13]. Έχουν παρατηρηθεί σημαντικές αυξήσεις στο σήμα του MBN στις περιοχές γύρω από τη συγκόλληση, πριν αυτό υποβληθεί σε αποτατικές ανοπτήσεις, ώστε να ελαττωθούν οι παραμενουσες τάσεις και να μειωθεί η μαγνητοελαστική ενέργεια [36].

## **1.6 Επίδραση παραμενουσών τάσεων στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen**

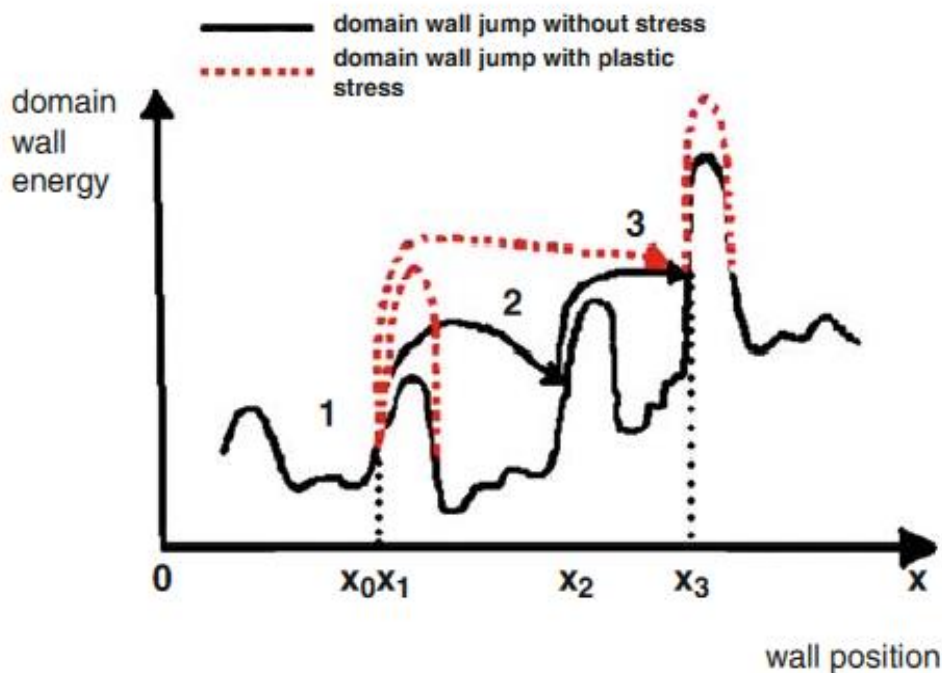
Οι παραμενουσες τάσεις είναι ελαστικές από τη φύση τους, ωστόσο πολλές φορές δρουν συνεργατικά με αλλαγές στη μικροδομή του δείγματος [16]. Οι κόκκοι ενός πολυκρυσταλλικού δείγματος παραμορφώνονται διαφορετικά, ανάλογα με τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό τους σε σχέση με την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης. Η συνολική επιρροή της παραμόρφωσης των κόκκων [37] είναι ορατή στο σήμα του MBN [13, 25].

## 1.7 Επίδραση διαταραχών στη μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen

Έχει διατυπωθεί ότι οι διαταραχές δημιουργούνται ακόμη και πριν επιτευχθεί το μακροσκοπικό όριο διαρροής [39, 40]. Καθώς το ποσοστό της παραμόρφωσης αυξάνεται και το υλικό παραμορφώνεται πλαστικά, παρατηρείται μια μαζική δημιουργία διαταραχών και ολίσθησή τους [40-41]. Ωστόσο, δεν παραμορφώνονται όλοι οι κόκκοι με τον ίδιο ρυθμό, εξαιτίας του διαφορετικού προσανατολισμού τους σε σχέση με την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης [47, 49].

Η εφαρμογή μιας πλαστικής καταπόνησης έχει ως αποτέλεσμα την άνιση ανάπτυξη των μαγνητικών περιοχών, μεταβάλλοντας τα ενεργειακά επίπεδά τους. Παρατηρείται αύξηση της βάρθρωσης της ενέργειας των μαγνητικών περιοχών στα σημεία εκείνα με αυξημένη τοπική συσσώρευση των διαταραχών [25]. Έχει επιβεβαιωθεί ότι οι εμπλεγμένες διαταραχές δρουν ως ισχυρά σημεία αγκύρωσης στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων [42].

Εντός της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης ορισμένες μαγνητικές περιοχές αναβαθμίζονται ενεργειακά ενώ άλλες διατηρούν αμετάβλητα τα ενεργειακά επίπεδά τους (Εικόνα 1-6). Ως εκ τούτου, τα άλματα Barkhausen αναμένεται να πραγματοποιηθούν από μια περιοχή υψηλής ενέργειας σε έναν ακόμα υψηλότερο ενεργειακό χώρο, παρακάμπτοντας περιοχές χαμηλότερης ενέργειας. Μελέτες έχουν δείξει ότι αυτές οι μεταβάσεις ανιχνεύονται στο σήμα του MBN, και κυρίως στην κατανομή του ύψους των μαγνητικών παλμών [20, 25, 50-52].



*Εικόνα 1-6:* Κατανομή της ενέργειας του μαγνητικού τοιχώματος στα σημεία συσσώρευσης διαταραχών με και χωρίς την εφαρμογή τάσεων εντός της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις αλλαγές λόγω της εφαρμογής τάσης.

## 1.8 Επίδραση μικροδομικών χαρακτηριστικών στην μαγνητική απόκριση του θορύβου Barkhausen

Πλήθος ερευνητών [27, 53-58] έχουν επιβεβαιώσει ότι δείγματα με μικρό μέσο μέγεθος κόκκου χαρακτηρίζονται από υψηλότερες τιμές σήματος MBN, επειδή τα όρια των κόκκων τους λειτουργούν ως σημεία αγκύρωσης στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Σε πολλές δημοσιεύσεις [59-71] εξετάστηκαν οι μεταβολές του σήματος MBN ως προς την περιεκτικότητα σε άνθρακα, της μορφολογίας και της διασποράς των καρβιδίων, την ποσοστιαία συμμετοχή των φάσεων και των συστατικών της μικροδομής. Ο μαγνητικός θόρυβος είναι αυξημένος σε δείγματα χάλυβα, τα οποία χαρακτηρίζονται από κανονικούς περιλιτικούς κόκκους (με εναλλασσόμενα πλακίδια φερρίτη – σεμεντίτη), ενώ όταν ο σεμεντίτης εμφανίζεται σφαιροποιημένος, η μαγνητική απόκριση έχει χαμηλότερη ένταση. Ωστόσο, χάλυβες με σφαιροποιημένο σεμεντίτη παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές θορύβου, υπό συνθήκες μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης. Ο σκληρός μαγνητικά μαρτενσίτης παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές θορύβου.

## **1.9 Ανάγκη βαθμονόμησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen**

Το κυριότερο πλεονέκτημα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ως μη καταστρεπτική τεχνική, είναι ότι εξαρτάται σημαντικά από πολλούς παράγοντες της μικροδομής. Κάθε ένας από αυτούς επηρεάζει διαφορετικά τη μαγνητική συμπεριφορά. Ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί είναι δύσκολο να διαχωριστούν, με αποτέλεσμα να απαιτείται ένας έμπειρος χρήστης για να ερμηνεύσει τα μετρούμενα δεδομένα του MBN. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση των μετρήσεων μέσω της χρήσης συγκριτικών μετρήσεων.



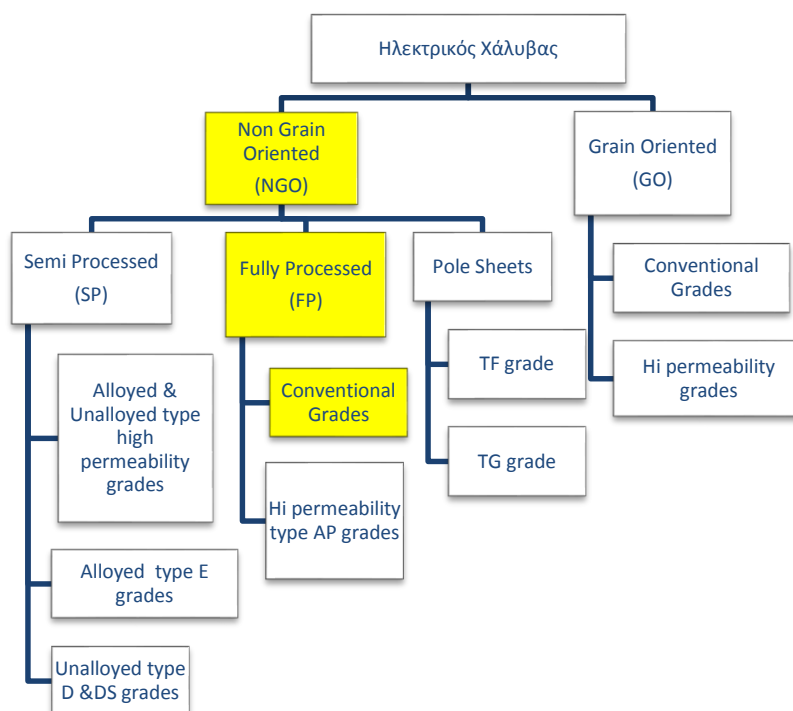
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 2.1 Εισαγωγή

Οι μαγνητικές ιδιότητες των ελασμάτων χάλυβα που χρησιμοποιείται ως μαγνητικοί πυρήνες σε ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ ευαίσθητα σε μηχανικές καταπονήσεις. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση μαγνητικών μη-καταστρεπτικών μεθόδων (Μαγνητικός Θόρυβος Barkhausen και βρόχος υστέρησης) για τον in-situ χαρακτηρισμό μη προσανατολισμένων ηλεκτρικών χαλύβων και την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών μαγνήτισής του, υπό την παρουσία μηχανικών καταπονήσεων (είτε μονοαξονικής εφελκυστικής καταπόνησης είτε καμπτικής φόρτισης).

### 2.2 Δείγματα που παρελήφθησαν

Το υλικό αναφοράς ήταν Μη-Προσανατολισμένος Ηλεκτρικός Χάλυβας (**NOES: Non – Oriented Electrical Steel**) με 2,18 wt.-% Si και πλήρως θερμικά κατεργασμένος (Εικόνα 2.1). Το σύνολο του υπό εξέταση υλικού προήλθε εξολοκλήρου από την LADIS & GYR. Ελήφθησαν συνολικά πενήντα φύλλα χάλυβα διαστάσεων  $12 \text{ cm}^L \times 6 \text{ cm}^W \times 0,058 \text{ cm}^T$  (Εικόνα 2.2). Η χημική σύσταση του αρχικού υλικού, όπως δόθηκαν από τον προμηθευτή, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.



Εικόνα 2-1: Κατηγορίες ηλεκτρικού χάλυβα.



*Εικόνα 2-2:* Διαστάσεις (μήκος και πλάτος) του υλικού αναφοράς (as-received sample).

*Πίνακας 2-1:* Χημική σύσταση (wt.-%) του υλικού αναφοράς.

Si	Al	Mn	C	P	S	Fe
2.18	0.35	0.12	0.0018	0.0000	0.0000	Balanc
				9	5	e

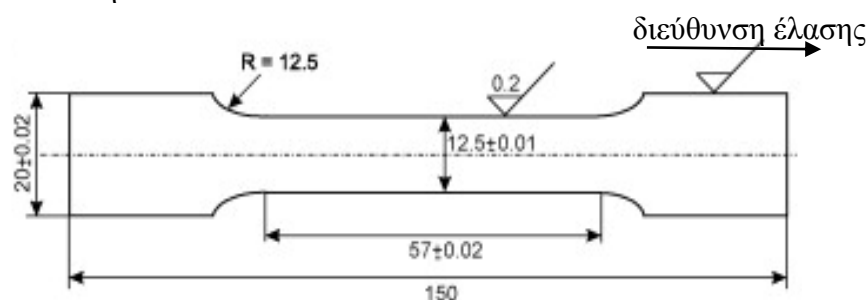
Ο ηλεκτρικός χάλυβας ανήκει στα μαλακά μαγνητικά υλικά και ονομάζεται και πυριτιούχος χάλυβας. Χωρίς τον ηλεκτρικό χάλυβα η οικονομική παραγωγή, διανομή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας θα καθίστατο ζημιογόνα. Ο ηλεκτρικός χάλυβας παράγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να του προσδίδονται οι βέλτιστες μαγνητικές ιδιότητες, όπως υψηλή μαγνητική διαπερατότητα (magnetic permeability -  $\mu$ ) και χαμηλές απώλειες του πυρήνα (core losses - W). Αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας την κατά βάρος περιεκτικότητα του άνθρακα (C) σε ποσοστά μικρότερα του 0,005 wt.-% και ελέγχοντας την προσθήκη πυριτίου (Si), ώστε η ποσοστιαία κατά βάρος συμμετοχή της να διατηρείται κάτω από 3,5 wt.-%. Η προσθήκη πυριτίου (Si) αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική ειδική αντίσταση του χάλυβα, μειώνοντας την πιθανότητα εμφάνισης δινορρεύματων και, κατά συνέπεια, και τις απώλειες του πυρήνα. Το μαγγάνιο (Mn) και το αλουμίνιο (Al) αποτελούν υπολειπόμενες προσθήκες με συμμετοχή έως και 0,5 wt.-%. Εν γένει, μειώνοντας την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα (0,0018 wt.-%) και προσθέτοντας πυρίτιο (Si) βελτιώνονται οι μαγνητικές ιδιότητες του ηλεκτρικού χάλυβα. Συγκεκριμένα παρατηρείται αύξηση της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας (permeability) και μείωση

των απωλειών του πυρήνα (core losses), δηλαδή επιτυγχάνονται στενότεροι βρόχοι υστέρησης.

Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, ο ηλεκτρικός χάλυβας αποτελεί ένα επιθυμητό μαλακό μαγνητικό υλικό με κυρίαρχες ιδιότητες την υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και μαγνητική επαγωγή (μείωση του μεγέθους και του βάρους των εξαρτημάτων), τις χαμηλές μαγνητικές απώλειες (ελαχιστοποίηση του φαινομένου Joule και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας), και τη χαμηλή μαγνητοσυστολή (magnetostriction) (μείωση του θορύβου στους μετασχηματιστές).

## 2.3 Μεθοδολογία

Από τα αρχικά δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής 150 δείγματα εφελκυσμού, σύμφωνα με το πρότυπο E8 [72]. Οι διαστάσεις των δειγμάτων σε mm παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3.

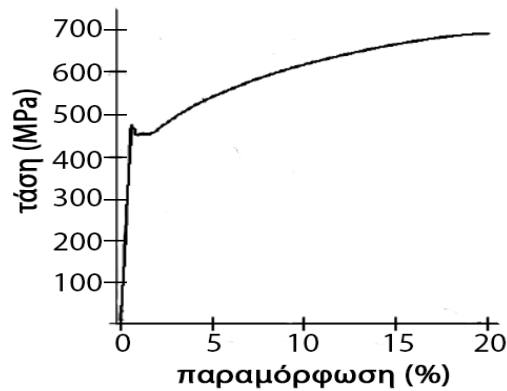


Εικόνα 2-3: Διαστάσεις (σε mm) δειγμάτων εφελκυσμού.

Στη συνέχεια, έξι από το σύνολο των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν μονοαξονικές δοκιμές εφελκυσμού στη μηχανή εφελκυσμού INSTRON και για ρυθμό παραμόρφωσης  $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Η διεύθυνση του εφελκυσμού ήταν παράλληλη στη διεύθυνση της έλασης. Από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ( $\sigma(\text{MPa})$ -  $\epsilon(\%)$ ) του αρχικού δείγματος (Εικόνα 2.4) προσδιορίστηκαν κάθε φορά οι μηχανικές του ιδιότητες (ανώτατο και κατώτατο όριο διαρροής, μέγιστη εφελκυστική τάση θραύσης, ολκιμότητα, μέτρο ελαστικότητας). Ο μέσος όρος των τιμών αυτών αντιπροσώπευε τις μηχανικές ιδιότητες του αρχικού υλικού (Πίνακας 2.2).

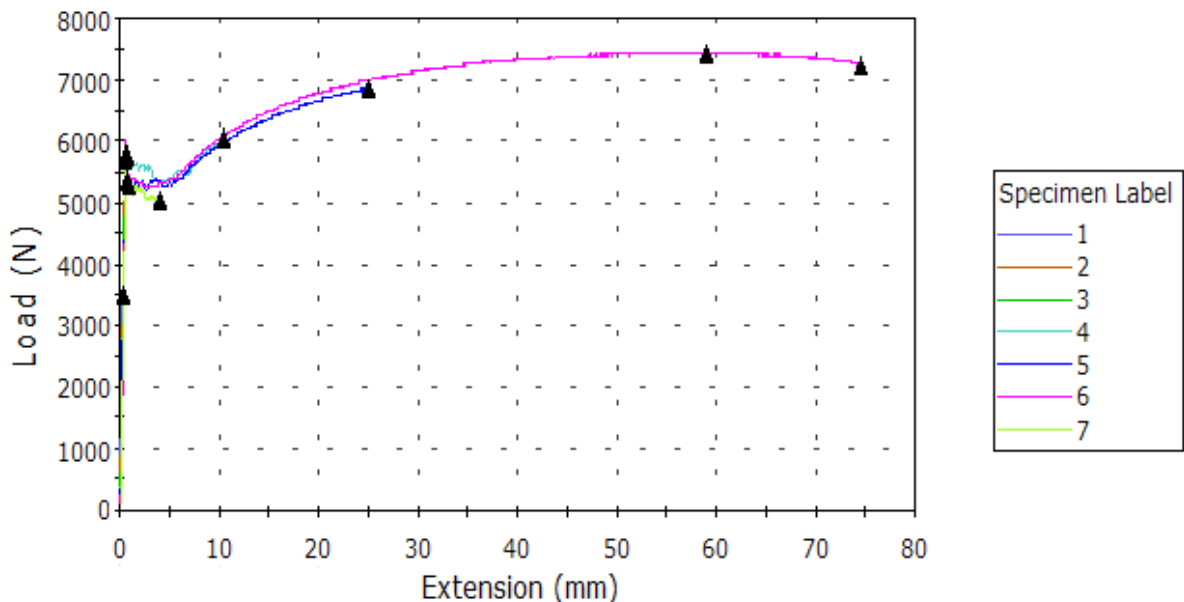
Πίνακας 2-2: Μηχανικές ιδιότητες του υλικού αναφοράς, όπως προκύπτουν από τις δοκιμές εφελκυσμού.

Τύπος χάλυβα	Όριο διαρροής, YS (Yield Strength) (MPa)		Όριο θραύσης, UTS (Ultimate tensile Strength) MPa	ολκιμότητα $\alpha$ (elongation) (%)	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) (GPa)
	min	max			
NOES	430	450	660	30	200



**Εικόνα 2-4:** Αντιπροσωπευτική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από τις δοκιμές εφελκυσμού στο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα που παρελήφθη..

Για να μελετηθεί η επίδραση της ελαστικής και της πλαστικής παραμόρφωσης (Εικόνα 2.5) στη μαγνητική απόκριση των δειγμάτων του μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα, παράλληλα με την καταγραφή του φορτίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας, με τη χρήση των κατάλληλων κάθε φορά μαγνητικών αισθητήρων.



**Εικόνα 2-5:** Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης για δείγματα μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα που είχαν παραμορφωθεί εντός της ελαστικής και πλαστικής περιοχής.

Για το λόγο αυτό, για έξι προεπιλεγμένα ποσοστά ελαστικής παραμόρφωσης εφελκύνστηκαν, παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα στη

μηχανή εφελκυσμού INSTRON με ρυθμό παραμόρφωσης  $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Σε κάθε ελαστική παραμόρφωση πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές εφελκυσμού. Για κάθε σετ μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας. Ο μέσος όρος των μαγνητικών τιμών, για τις πέντε επαναλήψεις αντιπροσώπευε τη χαρακτηριστική μαγνητική παράμετρο για το εκάστοτε ποσοστό παραμόρφωσης ή αντίστοιχα της τάσης.

Ομοίως, στην ελαστική περιοχή πραγματοποιήθηκαν για είκοσι προεπιλεγμένα ποσοστά παραμόρφωσης, δοκιμές εφελκυσμού, των πέντε επαναλήψεων. Οι λειτουργικές συνθήκες της μηχανής INSTRON ήταν οι ίδιες με πριν. Όπως και στην ελαστική παραμόρφωση, οι πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας.

Στην περιοχή του ορίου διαρροής, πραγματοποιήθηκαν δύο σετ μονοαξονικών εφελκυσμών, των πέντε επαναλήψεων, που αντιπροσώπευαν το ελάχιστο και μέγιστο όριο διαρροής. Η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας μετρήθηκε στο gauge length του δοκιμίου εφελκυσμού και ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων τιμών για τις πέντε επαναλήψεις θεωρήθηκε η μαγνητική παράμετρος που αντιστοιχεί στη μετρούμενη παραμόρφωση.

Οι μαγνητικές μετρήσεις ταυτόχρονα με τη μέτρηση του φορτίου στην ελαστική περιοχή παραμόρφωσης, έδωσαν επίσης τη δυνατότητα της βαθμονόμησης του ηλεκτρικού χάλυβα. Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων σε δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα, το οποίο είχε καμφθεί. Για την εκτίμηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων, πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των μετρήσιμων τιμών του μαγνητικού θορύβου με την τιμή της παραμένουσας τάσης. Οι τιμές, που προσδιορίστηκαν με τις μαγνητικές τεχνικές του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας, συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές της μεθόδου περίθλασης ακτίνων X.

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο μαγνητικοί αισθητήρες, οι οποίοι περιγράφονται στην ενότητα 2.4. Ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο  $d\text{-sin}^2\psi$ , η οποία αναλύεται στην ενότητα 2.5.

## 2.4 Μη-καταστροφικός έλεγχος

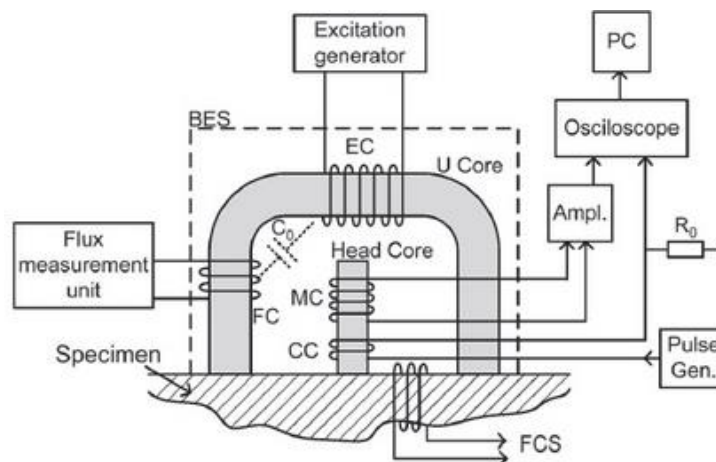
### 2.4.1 Διάταξη μαγνητικού αισθητήρα για τη μέτρηση του θορύβου Barkhausen

Με τη χρήση της συσκευής MEB-2cG (Εικόνα 2-6), λήφθηκε η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBN) στην επιφάνεια των δειγμάτων ηλεκτρικού χάλυβα, τα οποία είχαν παραμορφωθεί ελαστικά και πλαστικά.

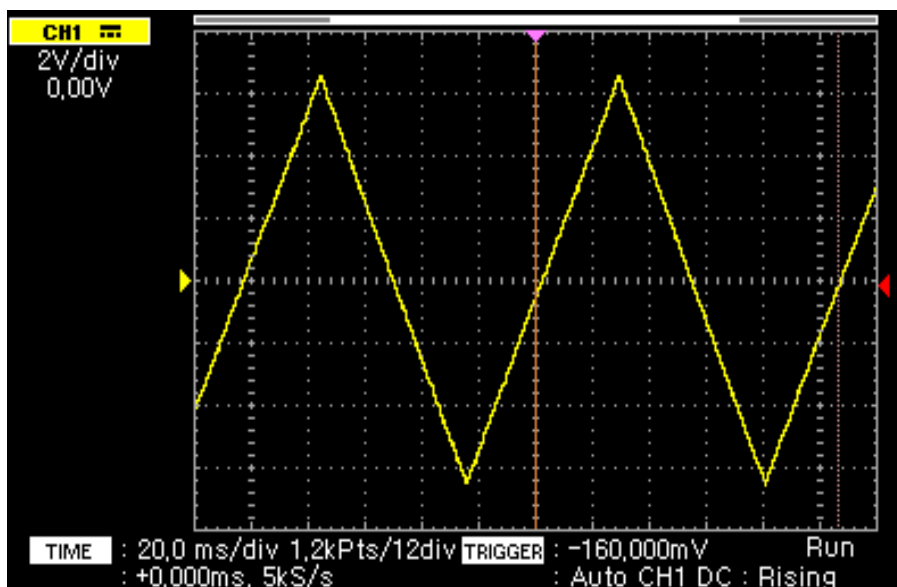


Εικόνα 2-6: Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.

Ο αισθητήρας Barkhausen αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη σε σχήμα Π, όπου στην μεγάλη του πλευρά είναι τυλιγμένο ένα πηνίο διέγερσης (Εικόνα 2.7). Στο πηνίο αυτό εφαρμόζεται ένα τριγωνικό σήμα με συχνότητα 10 Hz και πλάτος παλμού από κορυφή σε κορυφή 14 Volt (Εικόνα 2-8), με αποτέλεσμα να διεγείρεται με πεδίο το υπό εξέταση φερρομαγνητικό υλικό [74-138].

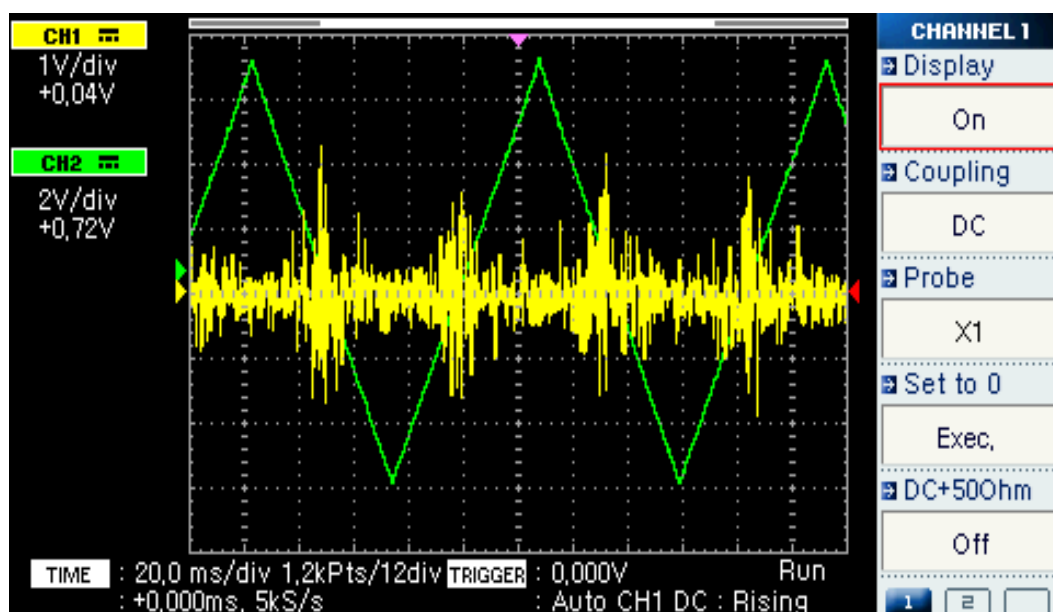


Εικόνα 2-7: Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του αισθητήρα του μαγνητικού θορύβου Barkhausen.



**Εικόνα 2-8:** Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο του τριγωνικού σήματος διέγερσης που εφαρμόζεται στο πηνίο διέγερσης συχνότητας 10Hz και πλάτους, από κορυφή σε κορυφή, 14V.

Ο μαγνητικός θόρυβος (Εικόνα 2-9) λαμβάνεται από το πηνίο λήψης (sensing coil), το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα ραβδόμορφο φερρίτη και βρίσκεται ανάμεσα στα στελέχη του ηλεκτρομαγνήτη. Ο ραβδόμορφος φερρίτης έχει τη δυνατότητα να μετακινείται κατ' ύψος και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος [74-138].



**Εικόνα 2-9:** Απεικόνιση σε ψηφιακό παλμογράφο μιας σημειακής ενδεικτικής μέτρησης του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (κίτρινη κυματομορφή) στη επιφάνεια του δείγματος.



Τα σήμα στο πηνίο λήψης, ενισχύεται και λαμβάνεται από μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων από κατάλληλο λογισμικό σε περιβάλλον LabView λαμβάνονται τρεις χαρακτηριστικές παράμετροι του θορύβου:

1. Ο αριθμός των παλμών του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (counts) πάνω από ένα προκαθορισμένο κατώφλι δυναμικού (threshold)
2. Η ενεργός τιμή του μαγνητικού θορύβου Barkhausen ( $MBN_{RMS} = V1$ )
3. Η ένδειξη της ποιότητας επαφής του αισθητήρα με την επιφάνεια του δείγματος ( $V2$ )

#### 2.4.2 Διάταξη μαγνητικού υστερησιογράφου

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεως της μαγνητικής διαπερατότητας, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας (Εικόνα 2-10).



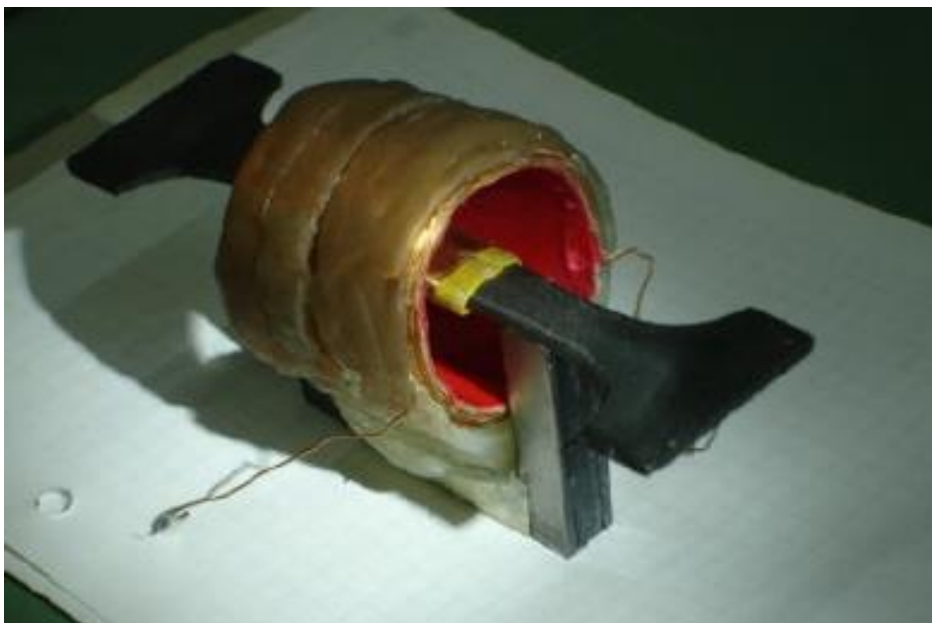
Εικόνα 2-10: Υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Η διάταξη αυτή πρέπει να είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές



τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγο αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις δεν περιγράφονται από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.

Η αρχή λειτουργίας της διάταξης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό, ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει, είτε από το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα (Εικόνα 2-11). Έτσι, το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα με τον ηλεκτρομαγνήτη (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος [78, 99, 105, 112].



**Εικόνα 2-11:** Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης των πηνίων του μαγνητικού υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

Με τον τρόπο αυτό, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο προς εξέταση υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η ημιτονοειδής κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

Το μαγνητικό κύκλωμα της διάταξης αποτελείται από:

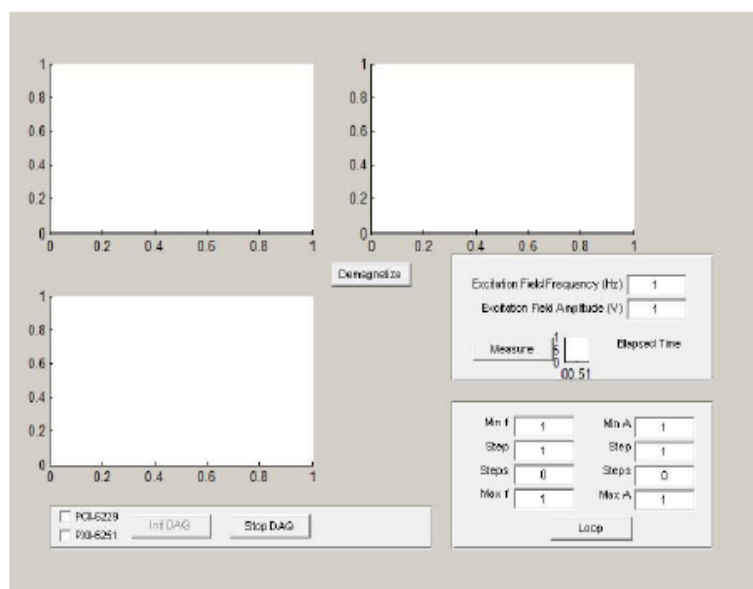
- το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και

- τα πηνία διέγερσης και λήψης, τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού

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

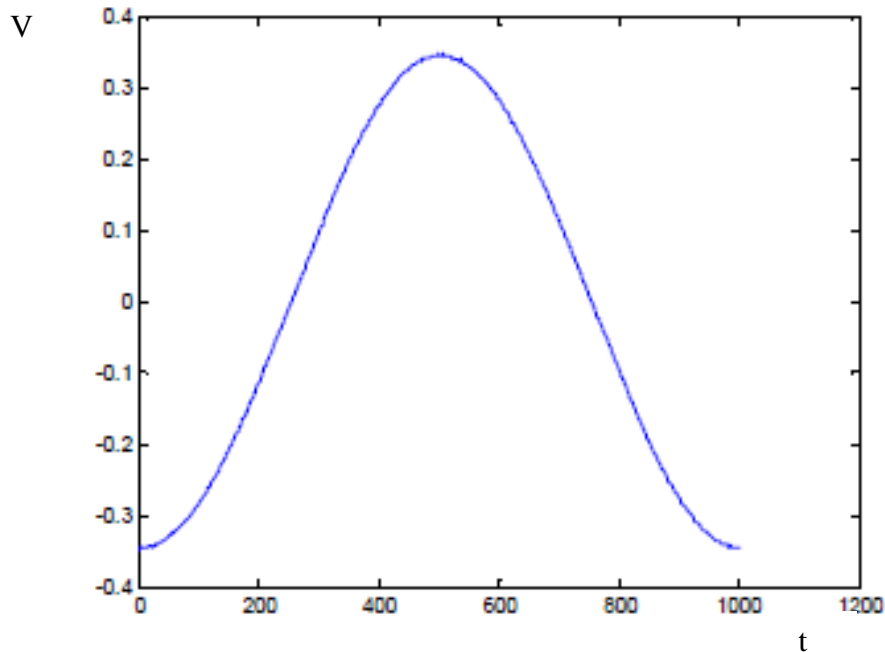
- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ), μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).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

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων, η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για το συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην εικόνα 2-12.



**Εικόνα 2-12:** Πλατφόρμα αλληλεπίδρασης (graphical user interface) του υστερησιογράφου του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας.

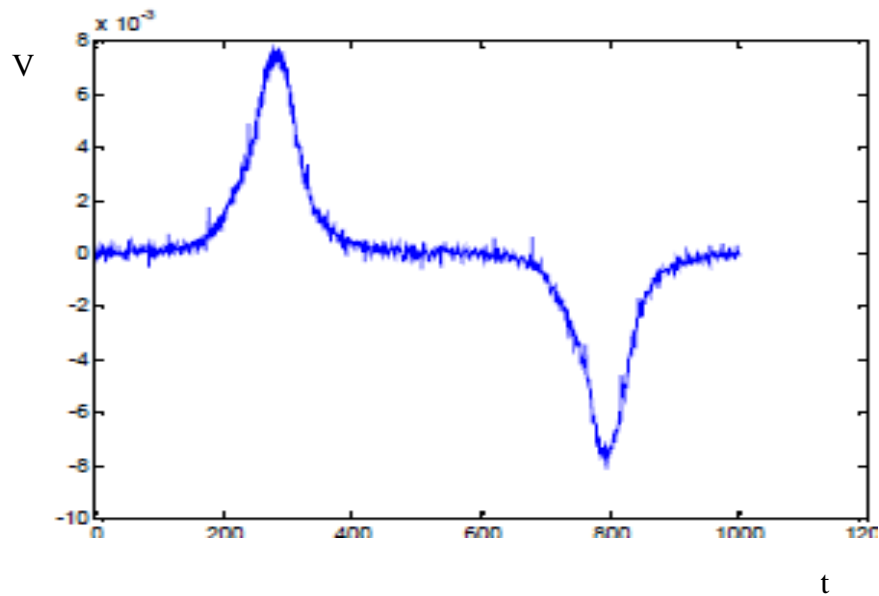
Το σήμα διέγερσης (Εικόνα 2-13) δημιουργείται από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης του Matlab. Μέσω της πλατφόρμας αλληλεπίδρασης δίνεται η δυνατότητα επιλογής στο χρήστη να επιλέξει τις επιθυμητές τιμές του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης, ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.



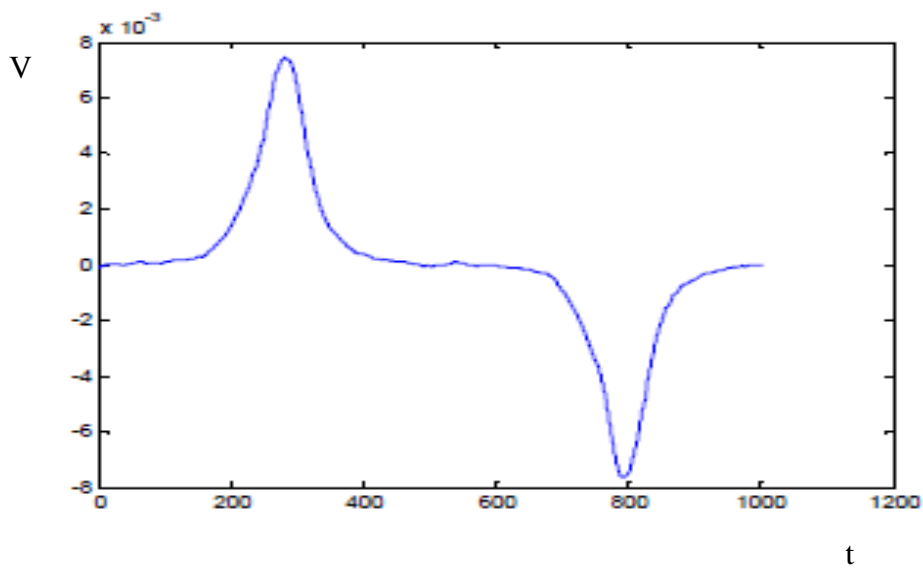
**Εικόνα 2-13:** Κυματομορφή του σήματος διέγερσης που παράγεται από το λογισμικό και επιβάλλεται στο πηνίο διέγερσης της διάταξης του υστερησιογράφου.

Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο, το οποίο δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (Εικόνα 2-14).

Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης, και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπιπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (Εικόνα 15) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (Εικόνα 2-16).

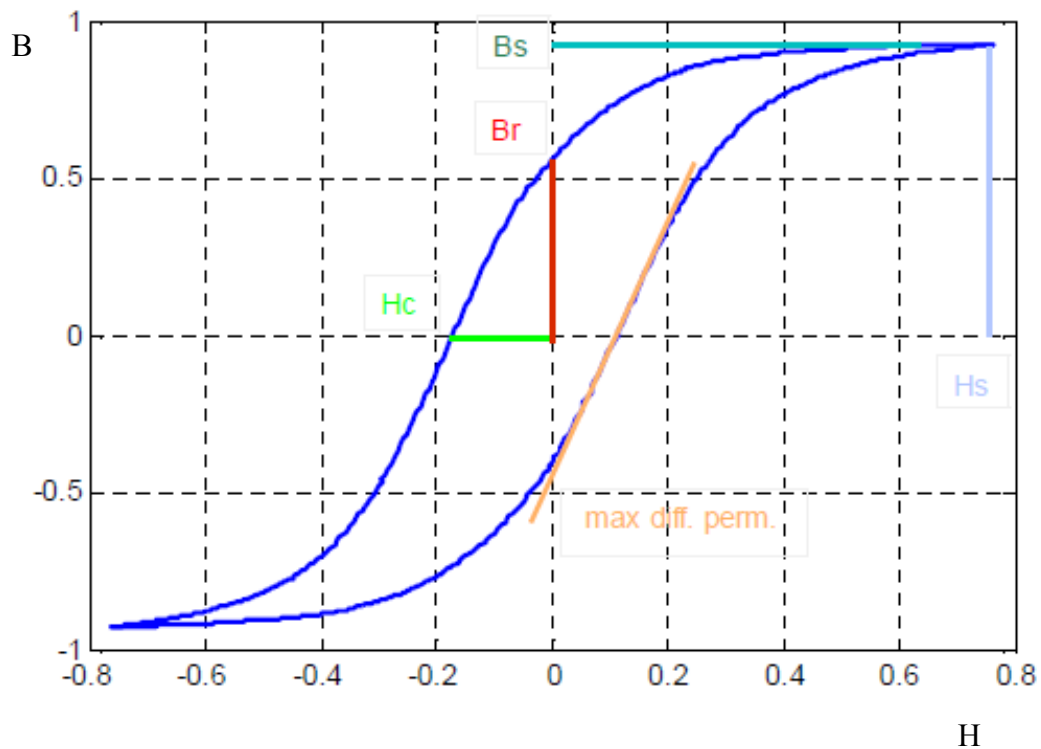


**Εικόνα 2-14:** Κυματομορφή του σήματος λήψης λαμβανόμενη, μέσω κάρτας, από το πηνίο λήψης στης διάταξης του υστερησιογράφου.



**Εικόνα 2-15:** Κυματομορφή του ψηφιακά φιλτραρισμένου σήματος λήψης.

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

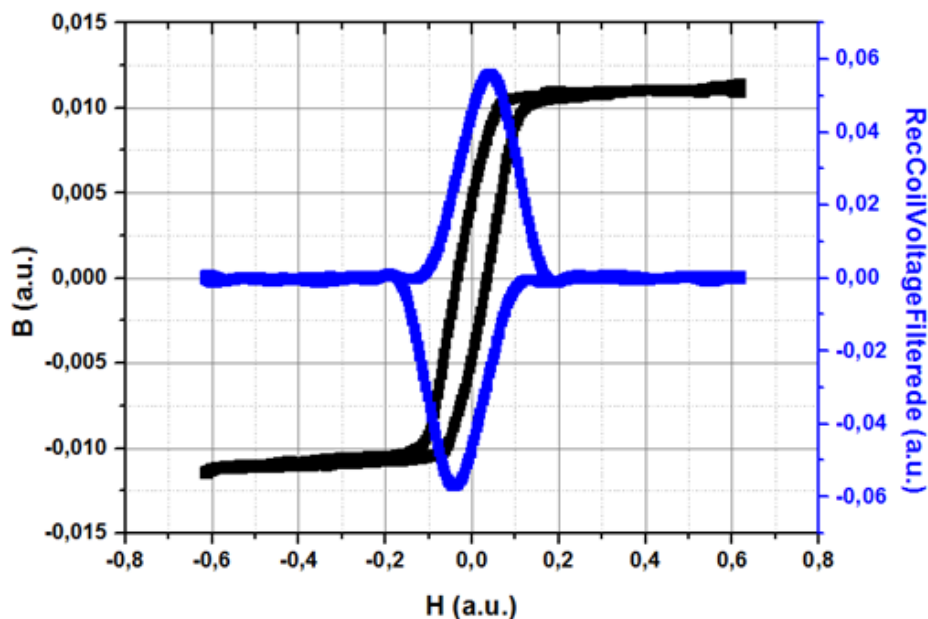


**Εικόνα 2-16:** Κυματομορφή του βρόχου υστέρησης στην οποία απεικονίζονται και τα χαρακτηριστικά μεγέθη που προσδιορίζουν τις μαγνητικές ιδιότητες του προς μέτρηση υλικού.

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων (Εικόνα 2.13, 2.14, 2.15) που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (Εικόνα 2-16) προσδιορίζονται και οι παράμετροι, των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται, και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού [78, 99, 105, 112].

Ο βρόχος της τάσης εξόδου ως προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ανάλογος με τη μεταβολή της τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού ως προς το επιβαλλόμενο πεδίο. Ο βρόχος αυτός λαμβάνονταν μετά την επεξεργασία των δειγμάτων και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.17. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας λαμβάνονταν υπόψη ως η μαγνητική παράμετρος της μέτρησης.



Εικόνα 2-17: Βρόχος υστέρησης (μαύρο χρώμα) και βρόχος μαγνητικής διαπερατότητας (μπλε χρώμα)

## 2.5 Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων

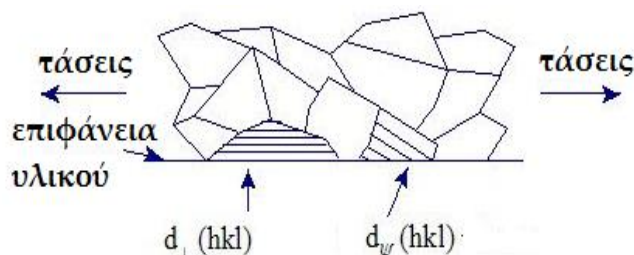
### 2.5.1 Με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας

Πραγματοποιήθηκαν σταδιακές δυναμικές εφελκυστικές και συνθλιπτικές καταπονήσεις εντός της ελαστικής περιοχής, σε προεπιλεγμένα βήματα παραμορφωσιμότητας παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης. Η απόκριση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας μετρήθηκε στο gauge length του δοκιμίου εφελκυσμού και ο μέσος όρος των καταγεγραμμένων τιμών θεωρήθηκε η μαγνητική παράμετρος, που αντιστοιχεί στη μετρούμενη παραμόρφωση. Για τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) στον αριθμό δοκιμές καταπονήσεων σε κάθε προεπιλεγμένο βήμα παραμόρφωσης και ο μέσος όρος των τιμών του μαγνητικού θορύβου αντιπροσώπευε τη μαγνητική παράμετρο της παραμόρφωσης αυτής. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών δυναμικής καταπόνησης εξήχθη η καμπύλη βαθμονόμησης.

Για την εκτίμηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων στα δοκίμια, ηλεκτρικού χάλυβα που είχαν καμφθεί, πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των μετρήσιμων τιμών του μαγνητικού θορύβου με την τιμή των παραμενουσών τάσεων.

## 2.5.2 Με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (XRD)

Για την επαλήθευση των παραμενουσών τάσεων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο XRD. Με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X μετράται η παραμόρφωση που υφίσταται το κρυσταλλικό πλέγμα εξαιτίας της ύπαρξης των τάσεων και στη συνέχεια, οι παραμένουσες τάσεις υπολογίζονται με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών τύπων από τη θεωρία της ελαστικότητας. Οι παραμένουσες τάσεις, που υπολογίζονται αφορούν μόνο στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (hkl) τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του δείγματος (Εικόνα 2.18). Για να μπορέσουν να προσδιοριστούν οι τάσεις είναι αναγκαία η μέτρηση της ενδοατομικής απόστασης  $d$ , για δύο τουλάχιστον γνωστούς προσανατολισμούς, σε σχέση με την επιφάνεια του δείγματος. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται  $d\text{-sin}^2 \psi$ .



Εικόνα 2-18: Κρυσταλλογραφικά επίπεδα στην επιφάνεια πολυκρυσταλλικού υλικού.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Από το δείγμα, που είχε καμφθεί κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής αντιπροσωπευτικά δείγματα. Καθένα από τα δείγματα αυτά προετοιμάστηκε κατάλληλα (λείανση σε χαρτί SiC 800 και 1200 grit), ώστε η επιφάνεια του να είναι όσο το δυνατό πιο λεία. Εν συνεχεία, το καθένα από αυτά τα δείγματα τοποθετήθηκε σε κατάλληλο υποδοχέα στο περιθλασίμετρο ακτίνων X η σάρωση του (220) κρυσταλλογραφικού επιπέδου πραγματοποιήθηκε για ένα εύρος γωνιών  $\psi$  από  $-35^\circ$  έως  $+35^\circ$ . Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων χρειάζονται οι εξής παράμετροι: το μέτρο ελαστικότητας  $E$  που και ο λόγος Poisson που είναι ίσος με  $\nu = 0,33$ . Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός του συντελεστή  $E$  πραγματοποιήθηκε από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του βασικού μετάλλου και όχι από βιβλιογραφικές αναφορές.

## 2.6 Χαρακτηρισμός μικροδομής

Η μελέτη της μικροδομής των δειγμάτων, που είχαν παραμορφωθεί στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης. Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscope), που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπος Jeol GSM 6380-LV (Εικόνα 2-19). Μέσω εικόνας δευτερογενών ηλεκτρονίων παρατηρήθηκε η μορφολογία και η κατανομή των κόκκων στην επιφάνεια του υλικού, ενώ μέσω εικόνας οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων ταυτοποιήθηκαν οι φάσεις και τα μικροδομικά συστατικά του υπό εξέταση δοκιμίου. Οι παράμετροι για την λήψη της εικόνας ήταν:

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



**Εικόνα 2-19:** Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV.

Κατά τη διάρκεια της εξέτασης της μικροδομής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης πραγματοποιήθηκαν σημειακές χημικές μικροανάλυσεις στην επιφάνεια του δείγματος από κατάλληλα προσαρμοσμένο σύστημα μικροανάλυσης τύπου Noray TS 5500 στο



εσωτερικό του μικροσκοπίου. Στόχος της σημειακής μικρο-ανάλυσης ήταν η εξέταση της περιεκτικότητας του πυριτίου εντός κόκκων, αλλά και στα όριά τους.

Τα δείγματα για να εξεταστούν στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης χρειάστηκε να προετοιμαστούν κατάλληλα. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας ήταν η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και, τέλος, η χημική προσβολή.

Κοπή δοκιμίων: Από το κέντρο των δοκιμίων που είχαν παραμορφωθεί ελαστικά και πλαστικά κόπηκαν μικρότερα παραλληλεπίπεδα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών της μικροδομής τους.

Εγκιβωτισμός: Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλοι δοσομετρικοί σωλήνες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλινδρικών καλουπιών της Struers και στη συνέχεια συμπληρώθηκε το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης.

Λείανση: Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in<sup>2</sup>). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην πίεση του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειαζόνταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνταν σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

Στίλβωση: Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να

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

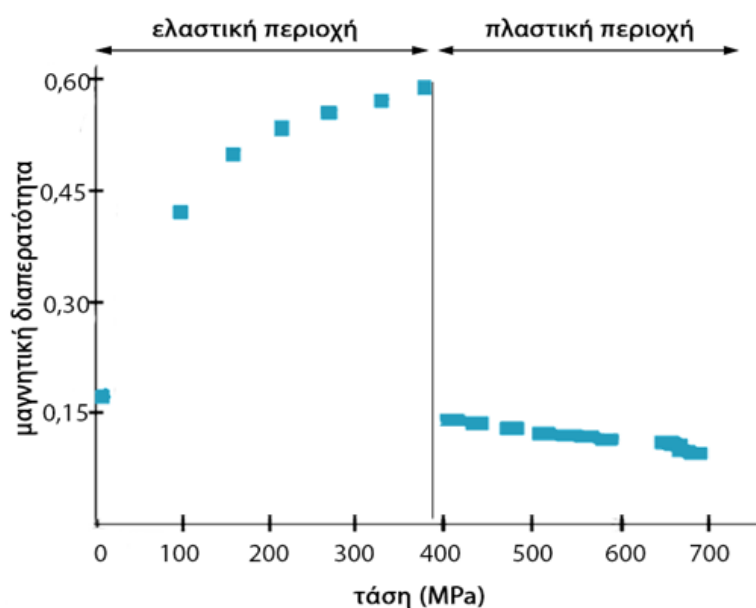
Χημική προσβολή: Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική προσβολή των ορίων των κόκκων (etching). Ουσιαστικά, η επιφάνεια του δείγματος διαβρέχεται από ένα ισχυρά όξινο διάλυμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα η χημική προσβολή της επιφάνειας του δείγματος γίνεται με Nital 2% για 20sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολουθεί έκπλυση του δείγματος με αιθανόλη. Μέθοδοι χαρακτηρισμού μικροδομής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

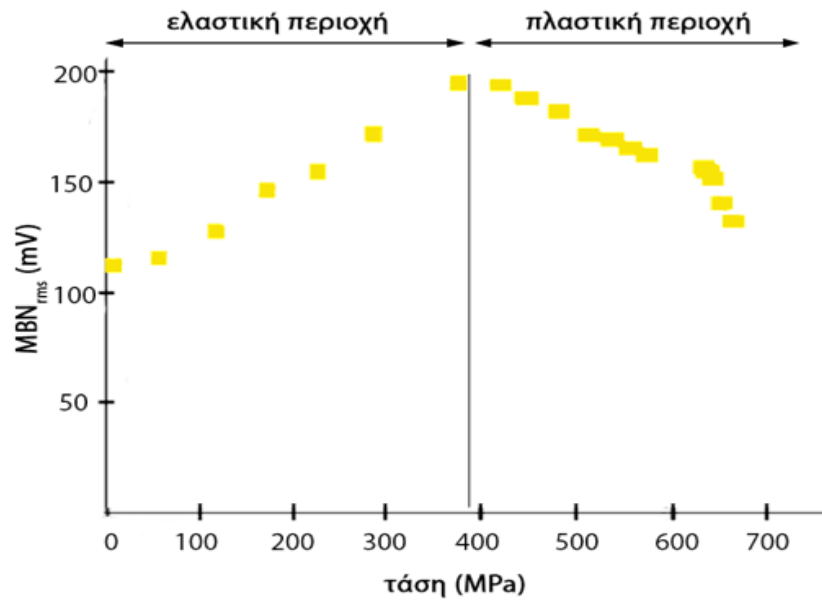
### 3.1 Μελέτη της επίδρασης εφελκυστικών τάσεων εντός της ελαστικής και της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων

Μελετώντας τις διακυμάνσεις της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου και της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς την εφαρμοζόμενη τάση παρατηρήθηκε ότι στην ελαστική περιοχή παραμορφώσεων, εκεί δηλαδή όπου η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης ήταν μικρότερη από του ορίου διαρροής ( $\sigma < 420 \text{MPa}$ ), η μαγνητική συμπεριφορά του ηλεκτρικού χάλυβα βελτιώθηκε, όπως επιβεβαίωσε και η σημαντική αύξηση των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας (Εικόνα 3-1). Η ένταση της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου ήταν επίσης μεγαλύτερη από την αφόρτιστη κατάσταση, στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων, παρουσιάζοντας μια αύξουσα συμπεριφορά (Εικόνα 3-2).

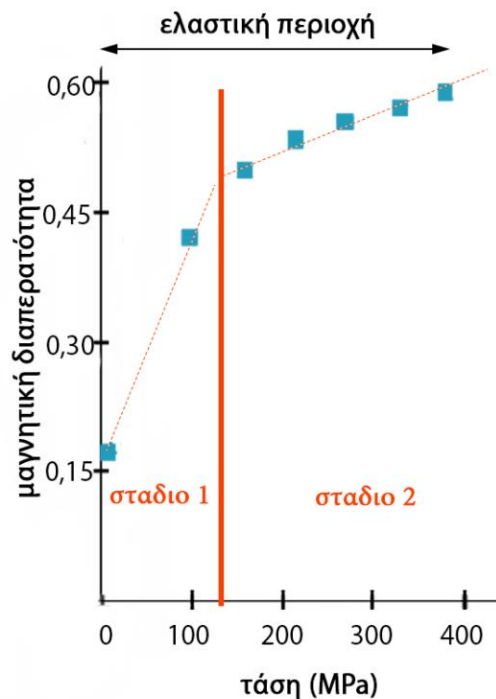
Μια προσεκτικότερη παρατήρηση της μεταβολής των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας εντός της ελαστικής περιοχής απέδειξε ότι αυτή (η μεταβολή) εξελίσσεται σε δύο στάδια. Κριτήριο για την μετάβαση από το ένα στάδιο στο άλλο αποτέλεσε η αλλαγή στην κλίση της καμπύλης εντός της ελαστικής περιοχής (Εικόνα 2.3). Ωστόσο, μια τέτοια μεταβολή δεν γινόταν αισθητή στις μεταβολές του μαγνητικού θορύβου.



Εικόνα 3-1: Μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας, ως προς την επιβαλλόμενη τάση.



**Εικόνα 3-2:** Μεταβολή των τιμών της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen, ως προς την επιβαλλόμενη τάση.



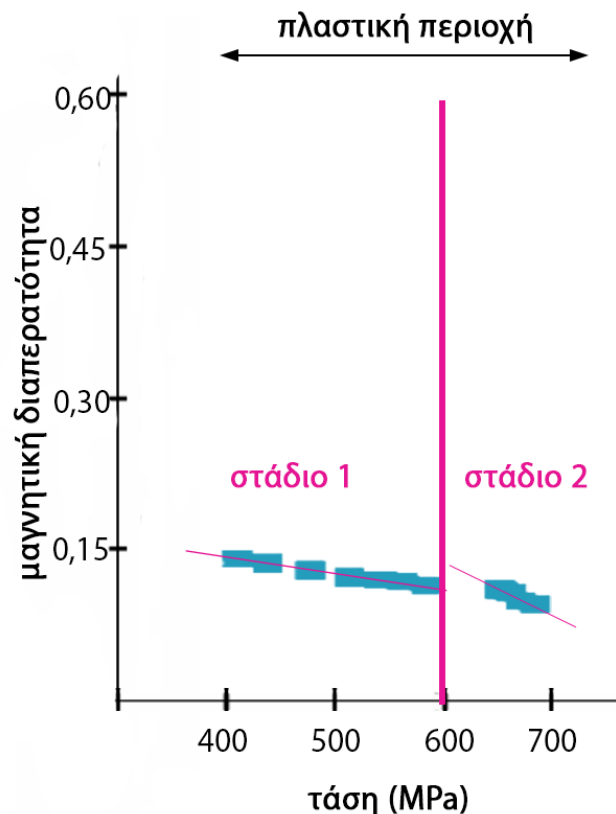
**Εικόνα 3-3:** Δύο στάδια της εξέλιξης της ελαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας.

Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική παραμόρφωση οριοθετήθηκε από την απότομη μείωση των τιμών των μαγνητικών παραμέτρων (Εικόνες 3.1 και 3.2). Μάλιστα, οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας σημείωσαν σημαντική και ταυτόχρονα απότομη

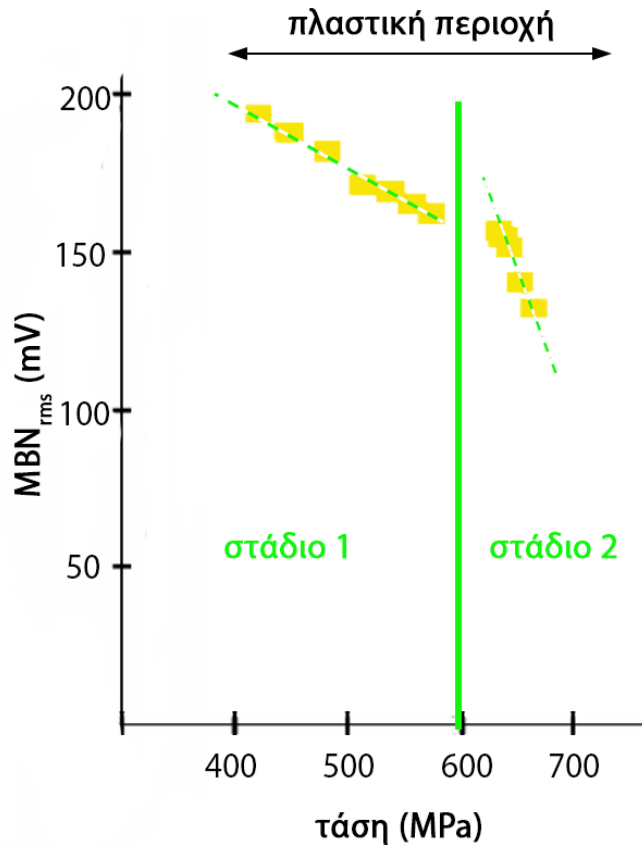
μείωση εντός της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης, ενώ οι τιμές του μαγνητικού θορύβου Barkhausen παρουσίασαν μια περισσότερο σταδιακή μείωση με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Είναι λοιπόν σαφές ότι η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης εντός της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης προκάλεσε μια προοδευτική υποβάθμιση της μαγνητικής συμπεριφοράς του μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα.

Παρατηρήθηκε ότι και στην περίπτωση της πλαστικής περιοχής παραμόρφωσης διαμορφώθηκαν δύο στάδια εξέλιξης, τα οποία ήταν εμφανή στην μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας, αλλά και των τιμών του μαγνητικού θορύβου. Η διάκριση των δύο σταδίων προσδιορίστηκε σαφώς μέσω της αλλαγής της κλίσης των αντίστοιχων καμπυλών, εντός της πλαστικής περιοχής (Εικόνες 3.4 και 3.5).

Η αλλαγή της κλίσης των τιμών της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen στο δεύτερο στάδιο εξέλιξης της πλαστικής παραμόρφωσης ήταν εντονότερη (Εικόνα 3.5). Το όριο της μετάβασης από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο ήταν και στις δύο περιπτώσεις κοντά στα 600 MPa.



**Εικόνα 3-4:** Δύο στάδια της εξέλιξης της πλαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας.



**Εικόνα 3-5:** Δύο στάδια της εξέλιξης της πλαστικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη μεταβολή των τιμών της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου.

Ο χάλυβας, χαρακτηρίζεται ως θετικά μαγνητοσυστολικός ( $\lambda_{si} > 0$ ) για χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενου πεδίου. Ο εύκολος άξονας μαγνήτισης παρατηρείται, εν γένει, στην οικογένεια των  $\langle 100 \rangle$  κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Η παρουσία τάσεων, λόγω στατικής-δυναμικής καταπόνησης (π.χ. εφελκυσμός-κόπωση), ή θερμικής κατεργασίας (ανόπτηση, συγκόλληση), αναγκάζει τη συνολική διάταξη των μαγνητικών περιοχών να ανακατανομηθεί, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια του συστήματος. Οι ενέργειες που μεταβάλλονται σημαντικά είναι η μαγνητοελαστική ενέργεια και η ενέργεια ανισοτροπίας.

Συνεπώς, η επίδραση της εφαρμογής ελαστικών τάσεων στην μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού δύναται να εξηγηθεί μέσω των μεταβολών της μαγνητοελαστικής ενέργειας. Οι μεταβολές αυτές είναι ανάλογες με τις διακυμάνσεις της μαγνητοσυστολής του φερρομαγνητικού υλικού ως προς την εφαρμοζόμενη τάση. Σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier, όταν το κρυσταλλικό πλέγμα παραμορφώνεται, η συνολική δομή των μαγνητικών περιοχών αναδιοργανώνεται, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μαγνητοελαστική

ενέργεια. Ο τρόπος με τον οποίο το υλικό αποκρίνεται στην εφαρμογή τάσεων εξαρτάται μόνο από το πρόσημο του συντελεστή μαγνητοσυστολής και στις εφαρμοζόμενες τάσεις: η μαγνήτιση ενός μαγνητικού υλικού αυξάνεται στην κατεύθυνση όπου εφαρμόζεται το πεδίο των εφαρμοζόμενων τάσεων, εάν και οι δύο όροι,  $\lambda$  (συντελεστής μαγνητοσυστολής) και  $\sigma$  (εφαρμοζόμενη τάση), έχουν το ίδιο πρόσημο, και το αντίστροφο.

Η νέα δομή των μαγνητικών περιοχών προκύπτει είτε με τον επαναπροσανατολισμό των διανυσμάτων της μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων, που περιγράφουν τις μαγνητικές περιοχές, όταν η διεύθυνσή τους διαφέρει από τη διεύθυνση της τάσης, είτε με την αύξηση των μαγνητικών τοιχωμάτων στις  $180^\circ$ . Γνωρίζουμε ότι, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση όπου ο αριθμός των  $180^\circ$ - μαγνητικών τοιχωμάτων είναι μέγιστος. Θεωρώντας τον εύκολο άξονα μαγνήτισης που περιγράφει την κατάσταση όπου καμία τάση δεν επενεργεί στο υλικό αποκλίνει από τη διεύθυνση των τάσεων που παρατηρούνται στη συνέχεια, συμπεραίνουμε ότι στην κατάσταση όπου εμφανίζονται τάσεις στο υλικό, ο αρχικός εύκολος άξονας μαγνήτισης θα περιστραφεί, προσεγγίζοντας τη διεύθυνση των τάσεων.

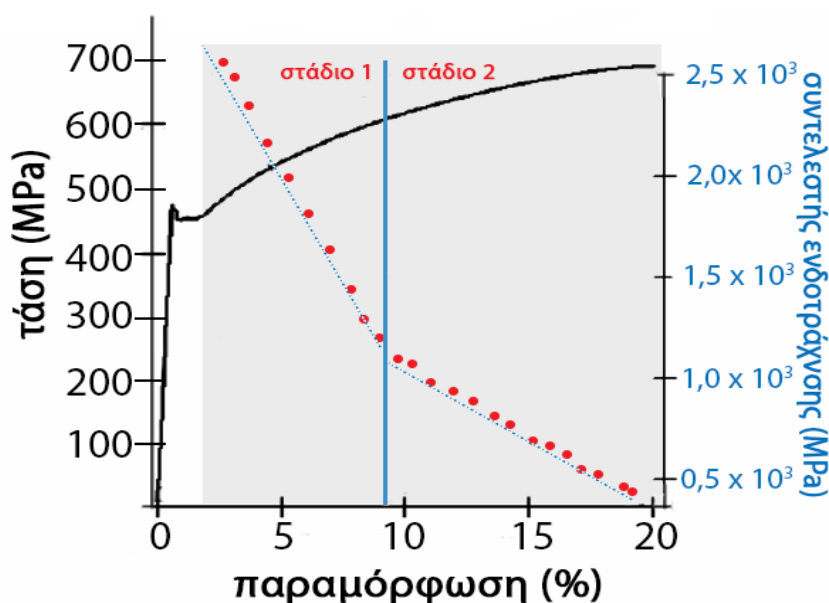
Όπως απεικονίζεται στις εικόνες 3.1 και 3.2, η ενίσχυση της μαγνητικής συμπεριφοράς υπό την εφαρμογή ελαστικών καταπονήσεων, είναι συνέπεια του μακροσκοπικά θετικού συντελεστή μαγνητοσυστολής. Ο αριθμός των  $180^\circ$  - μαγνητικών τοιχωμάτων αυξάνεται στη διεύθυνση εφαρμογής της ελαστικής τάσης, οδηγώντας σε αύξηση της ενεργού τιμής του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας.

Η ολοκλήρωση της ελαστικής παραμόρφωσης σε δύο στάδια θα μπορούσε να οφείλεται στην επίδραση του φαινομένου μικρο-διαρροής (microyielding), πριν να επιτευχθεί το μέγιστο όριο διαρροής. Το πρώτο στάδιο ελαστικής παραμόρφωσης αντιπροσωπεύει μια τέλεια ελαστικά παραμορφωμένη περιοχή, ενώ στο δεύτερο στάδιο αποδίδονται φαινόμενα μικροπλαστικής παραμόρφωσης. Στο στάδιο αυτό, αν και το μεταλλικό σύστημα βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής, αρχίζουν να αναπτύσσονται διαταραχές στα όρια των φερριτικών κόκκων, εξαιτίας των παραμορφώσεων που υφίστανται κόκκοι με διαφορετικούς κρυσταλλογραφικούς ιστούς ανάπτυξης. Οι διαταραχές αυτές δρουν ως σημεία αγκύρωσης στη μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η μέση ελεύθερη διαδρομή των μαγνητικών τοιχωμάτων, παρεμποδίζοντας την ανεμπόδιστη ενίσχυση της μαγνητικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού χάλυβα εντός της ελαστικής περιοχής.

Η συμπεριφορά αυτή είναι εμφανής στην εικόνα 3.3, μέσω της μείωσης της κλίσης της καμπύλης της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς την εφαρμοζόμενη τάση, κατά το δεύτερο στάδιο της ελαστικής παραμόρφωσης. Οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας αυξάνονται με πτωτικό ρυθμό, ο οποίος ελαχιστοποιείται κοντά στο όριο διαρροής. Από την εικόνα αυτή αποδεικνύεται ότι το φαινόμενο της μικροδιαρροής ξεκινούσε για μια εφαρμοσμένη τάση κοντά στα 100 MPa.

Εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων, η αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών, οδήγησε σε μια προοδευτική επιδείνωση της μαγνητικής συμπεριφοράς του μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα. Τόσο οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας, όσο και η δραστηριότητα των μαγνητικών τοιχωμάτων, δηλαδή ο θόρυβος Barkhausen, μειώνονταν. Το φαινόμενο αυτό εντεινόταν κατά τα δεύτερο στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στις εικόνες 3.4 και 3.5, μέσω της αρνητικής κλίσης που εμφάνιζαν τα σημεία της καμπύλης των μαγνητικών αποκρίσεων.

Μελετώντας την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στην πλαστική περιοχή παραμορφώσεων, παρατηρήθηκαν επίσης δύο στάδια στην μεταβολή του συντελεστή ενδοτράχυνσης (Εικόνα 3.6).



**Εικόνα 3-6:** Μεταβολή του συντελεστή ενδοτράχυνσης εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων.

Τα δύο στάδια της εικόνας 3.6 σχετίζονται με την αλλαγή της κλίσης των τιμών του συντελεστή ενδοτράχυνσης εντός της πλαστικής περιοχής και είναι συναφή με τη διαδικασία της δημιουργίας, ανάπτυξης και διάδοσης των διαταραχών.

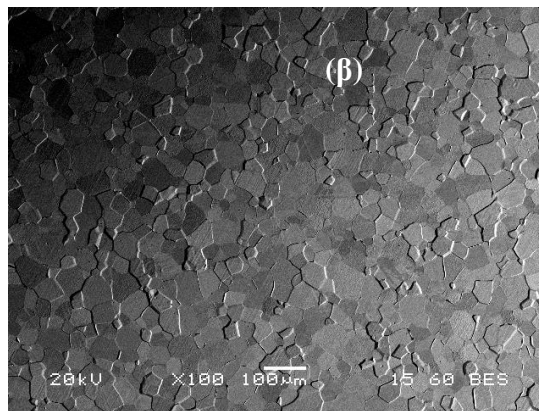
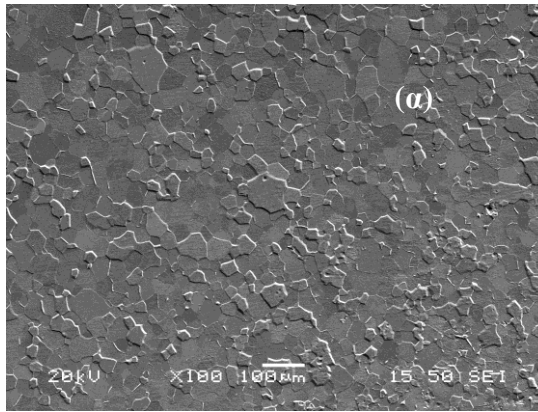


Η αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών με ρυθμό ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της πλαστικής παραμόρφωσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συστάδων (clusters) διαταραχών κατά το πρώτο στάδιο και την εμφάνιση ετερότροπης χωρικής κατανομής περιοχών υψηλής και χαμηλής πυκνότητας διαταραχών κατά το δεύτερο στάδιο. Συνεπώς, στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η μετακίνηση των διαταραχών στα ευνοϊκά συστήματα ολίσθησής τους, ενώ κατά το δεύτερο στάδιο παρατηρείται η δημιουργία εμπλεγμένων (tangled) διαταραχών και διαταραχών κυτταροειδούς μορφολογίας (cell structure).

Η μείωση των τιμών της μαγνητικής απόκρισης τόσο της διαπερατότητας, όσο και του θορύβου Barkhausen, αντικατοπτρίζει την αυξημένη ενέργεια που απαιτείται να προσδοθεί στα μαγνητικά τοιχώματα, ώστε να υπερβούν τα ισχυρά σημεία αγκύρωσης, που δεν είναι άλλα από της διαταραχές υψηλής πυκνότητας.

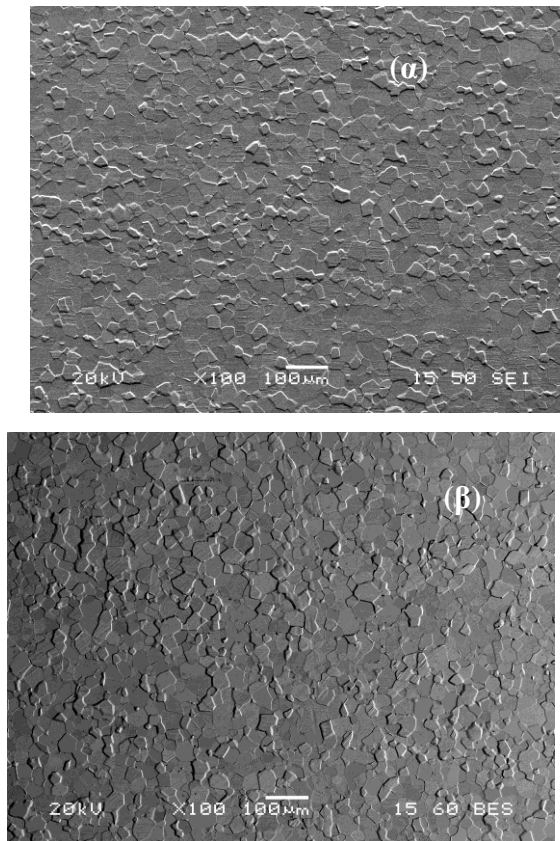
### **3.1.1 Μικροδομικός χαρακτηρισμός**

Όπως προκύπτει από τη εικόνα 3.7 το υλικό ήταν μονοφασικό, με φερριτικούς κόκκους πολυγωνικής, ισοαξονικής μορφολογίας. Οι κόκκοι χαρακτηρίζονταν από ετερογένεια στον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό τους. Παρατηρήθηκε ανομοιόμορφη κατανομή στο μέσο μέγεθος του κόκκου το οποίο προσδιορίζεται ίσο με  $52 \mu\text{m} \pm 12 \mu\text{m}$ .



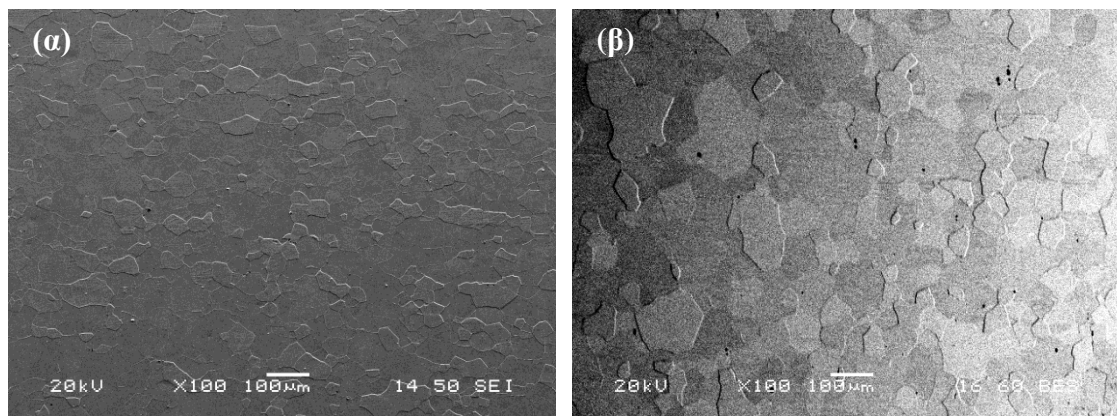
**Εικόνα 3-7:** Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του αφόρτιστου ηλεκτρικού γάλυβα.

Το υλικό εντός της ελαστικής περιοχής διατηρεί την μονοφασικότητά του (εικόνα 3.8). Οι κόκκοι παραμένουν πολυγωνικοί, αν και αυξάνουν ανεπαίσθητα το μέσο μέγεθός τους ( $54 \mu\text{m} \pm 9 \mu\text{m}$ ).



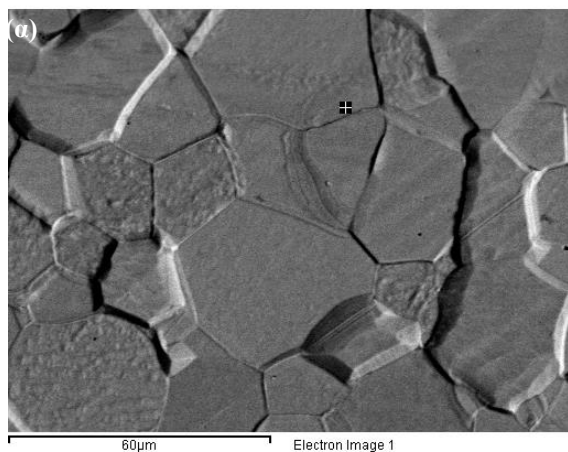
**Εικόνα 3-8:** Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα, ο οποίος έχει παραμορφωθεί ελαστικά.

Ωστόσο, εντός της πλαστικής περιοχής παραμορφώσεων, οι φερριτικοί κόκκοι έχουν επιμηκυνθεί παράλληλα στη διεύθυνση εφαρμογής της τάσης (Εικόνα 3.9). Στον άξονα αυτό το μέσο μέγεθός τους έχει αυξηθεί σημαντικά ( $174 \mu\text{m} \pm 14 \mu\text{m}$ ), ενώ κάθετα στη διεύθυνση του εφελκυσμού, οι κόκκοι εμφανίζονται στενότεροι ( $32 \mu\text{m} \pm 11 \mu\text{m}$ ).

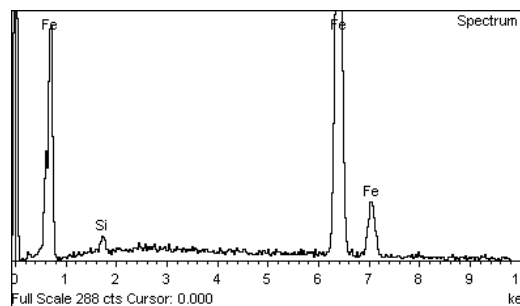
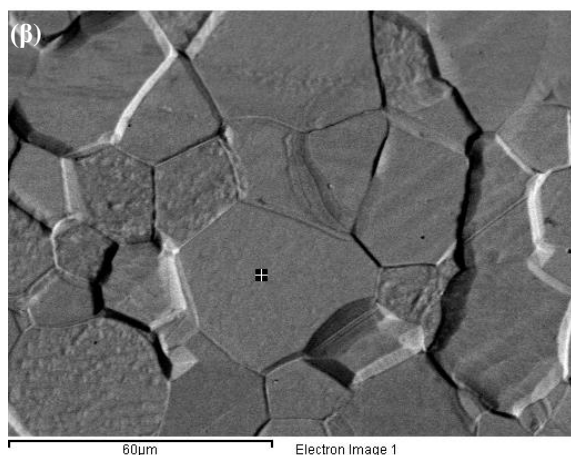
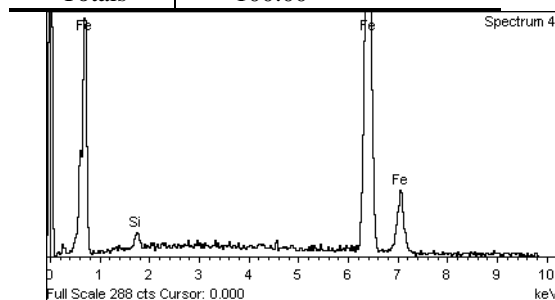


**Εικόνα 3-9:** Εικόνα (α) δευτερογενών και (β) οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα, ο οποίος έχει παραμορφωθεί πλαστικά, πριν τη μέγιστη εφελκυστική τάση θραύσης.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών μικρο-αναλύσεων EDS, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σημειακά εντός κόκκων και στα όρια των φερριτικών κόκκων στον αφόρτιστο ηλεκτρικό χάλυβα (Εικόνα 3.10), αλλά και σε δείγματα που είχαν παραμορφωθεί ελαστικά (Εικόνα 3.11) και πλαστικά (Εικόνα 3.12).

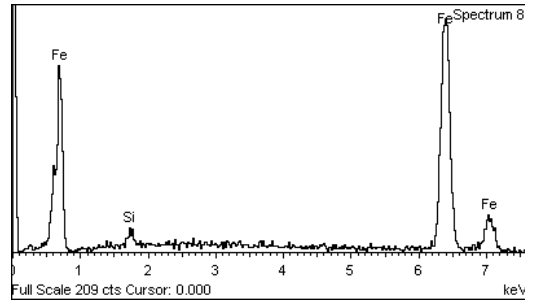
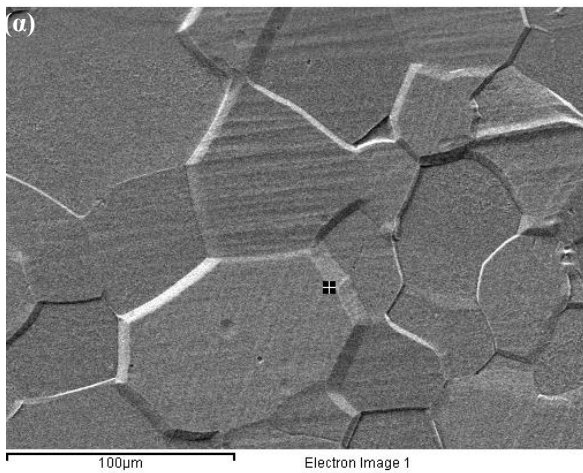


Element	Weight %	Atomic %
Si	1.32	2.58
Fe	98.68	97.42
Totals	100.00	

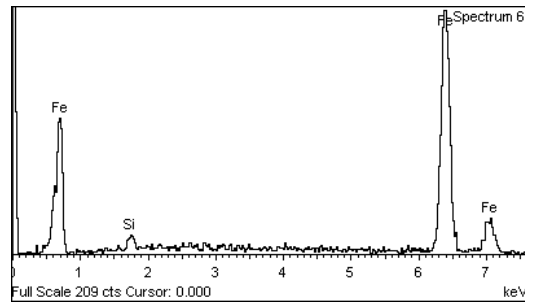
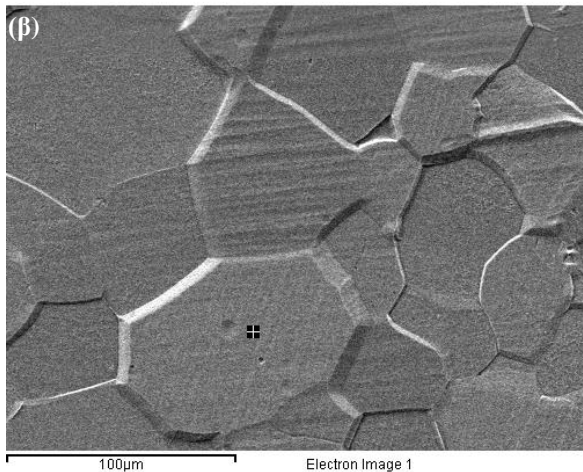


Element	Weight %	Atomic %
Si	1.18	2.32
Fe	98.82	97.68
Totals	100.00	

**Εικόνα 3-10:** Σημειακές χημικές μικροαναλύσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στο αφόρτιστο ηλεκτρικό χάλυβα.

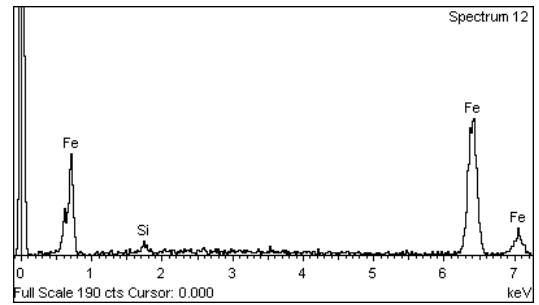
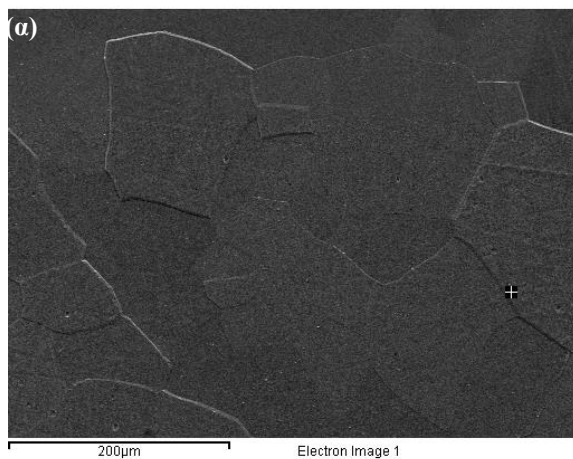


Element	Weight %	Atomic %
Si	1.94	3.79
Fe	98.06	96.21
Totals	100.00	

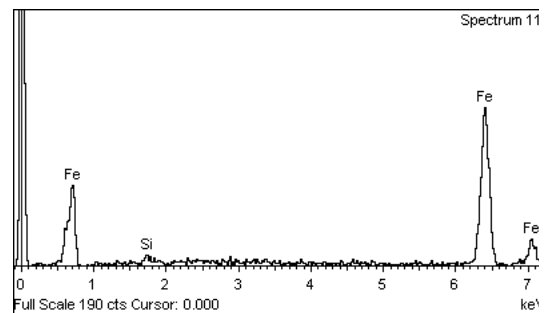
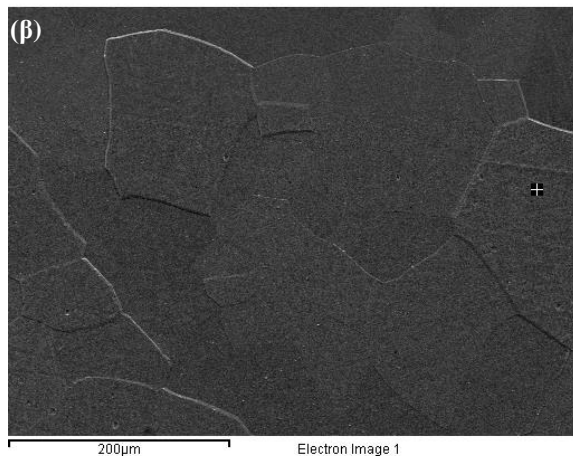


Element	Weight %	Atomic %
Si	1.69	3.31
Fe	98.31	96.69
Totals	100.00	

**Εικόνα 3-11:** Σημειακές χημικές μικροανάλυσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στον ηλεκτρικό χάλυβα που έχει παραμορφωθεί ελαστικά.



Element	Weight %	Atomic %
Si	1.70	3.33
Fe	98.30	96.67
Totals	100.00	



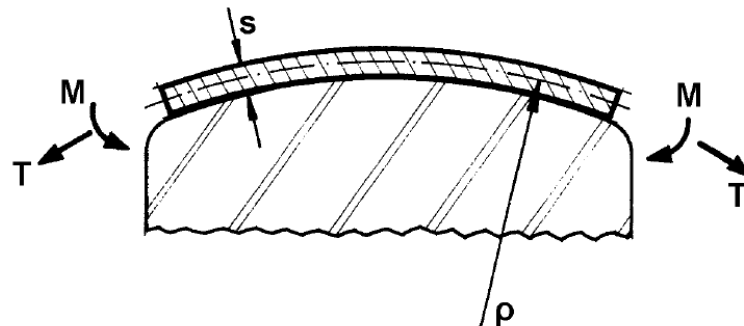
Element	Weight %	Atomic %
Si	1.74	3.40
Fe	98.26	96.60
Totals	100.00	

**Εικόνα 3-12:** Σημειακές χημικές μικροανάλυσεις σε (α) περι- και (β) ενδο- κρυσταλλικά των φερριτικών κόκκων στον ηλεκτρικό χάλυβα που έχει παραμορφωθεί πλαστικά.

### 3.2 Προσδιορισμός παραμενουσών τάσεων στο δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα που είχε υποβληθεί σε δοκιμή σε κάμψη

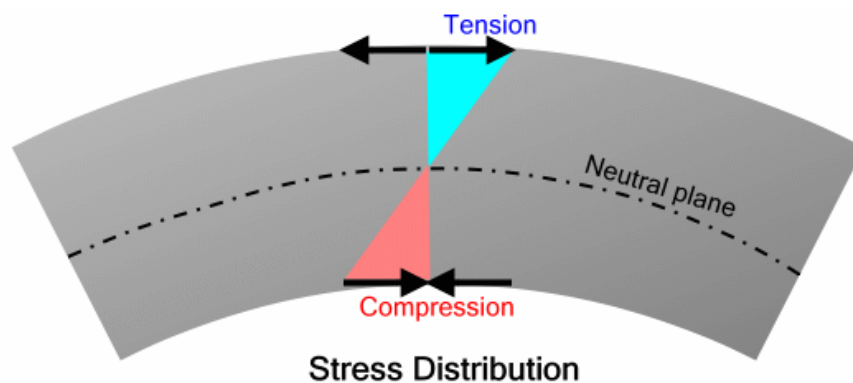
Το αρχικό δοκίμιο του ηλεκτρικού χάλυβα υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση κάμψης (Εικόνα 3.13). Η δοκιμή είχε ως αποτέλεσμα την έκταση του ελάσματος γύρω από διαμορφωτικό έμβολο μικρής καμπυλότητας, μια συνηθισμένη εντακτική κατάσταση σε κατεργασίες αβαθούς κοίλανσης (stamping). Κατά την κατεργασία αυτή το έλασμα του ηλεκτρικού χάλυβα παραμορφώθηκε περί το περίγραμμα του εμβόλου με αποτέλεσμα να

συνυπάρχουν συνθήκες κάμψης και εφελκυσμού. Το φορτίο ασκήθηκε με σταθερή ταχύτητα επιβολής προς τα πάνω στην κάτω επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα. Η καμπυλότητα ( $1/\rho$ ) είναι πολύ μικρή.



**Εικόνα 3-13:** Διάταξη δοκιμής κάμψης.

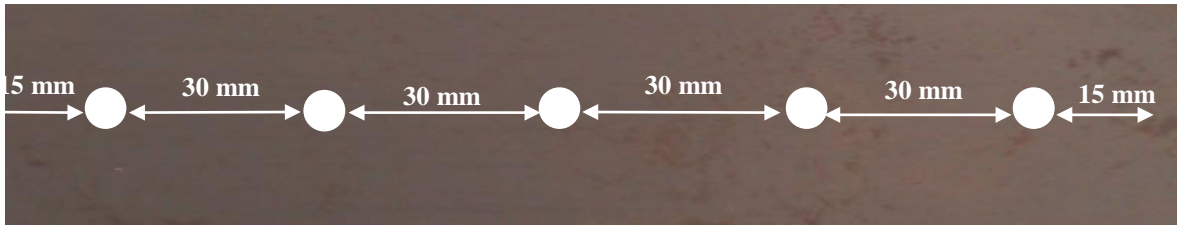
Κατά την κάμψη σχηματίζονται δύο διακριτές περιοχές εκατέρωθεν του ουδέτερου άξονα, μία θλιπτική που μειώνεται προοδευτικά κατά το μήκος της, ενώ αυξάνεται αντίστοιχα κατά το πλάτος της, και μία εφελκυστική με αντίστροφα χαρακτηριστικά. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν εκατέρωθεν του ουδέτερου άξονα κάμψης εφελκυστικές και συνθλιπτικές τάσεις.



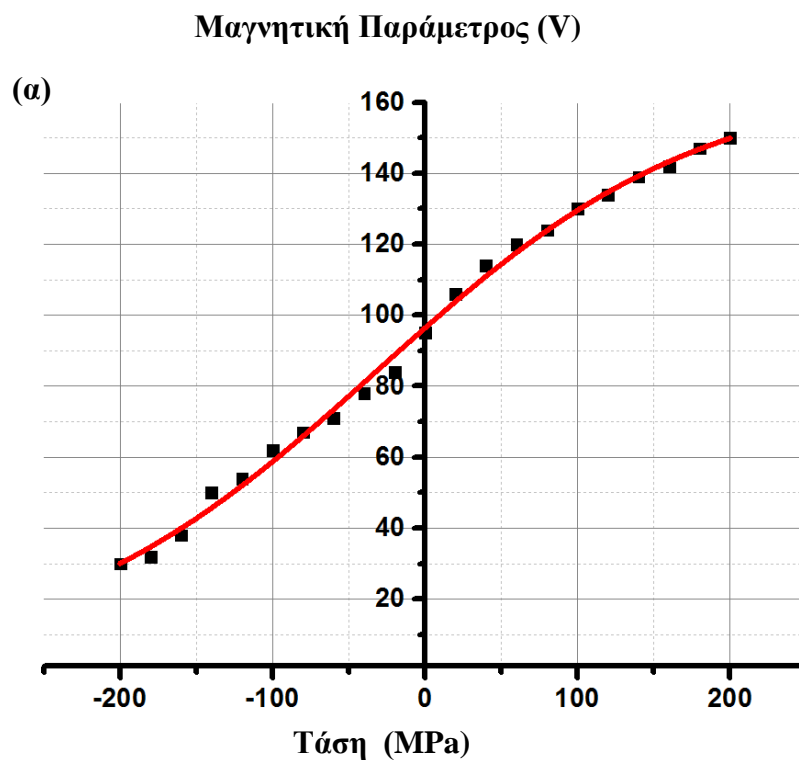
**Εικόνα 3-14:** Κατανομή των παραμενουσών τάσεων στο έλασμα του ηλεκτρικού χάλυβα, το οποίο υποβλήθηκε μονοτονική φόρτιση κάμψης.

Οι παραμένουσες τάσεις στην άνω και κάτω επιφάνεια του δοκιμίου σε κάμψη προσδιορίστηκαν σε προεπιλεγμένα σημεία, τόσο με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X, όσο και με τις μαγνητικές τεχνικές του της μαγνητικής διαπερατότητας και του θορύβου Barkhausen. τα σημεία μέτρησης στην επιφάνεια του ηλεκτρικού χάλυβα παρουσιάζονται στην εικόνα 3.15.

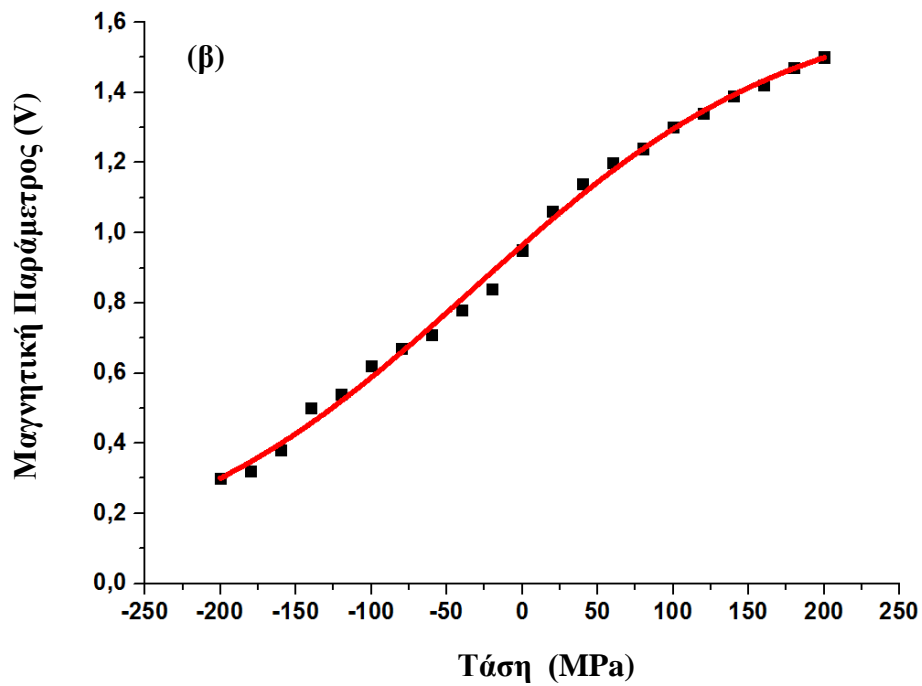
Για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων το αρχικό υλικό βαθμονομήθηκε για τις μαγνητικές παραμέτρους του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας, υπό συνθήκες μονοαξόνικη εφελκυστικής και θλιπτικής παραμόρφωσης. Οι καμπύλες βαθμονόμησης παρουσιάζονται στην εικόνα 3.16.



**Εικόνα 3-15:** Σημεία προσδιορισμού των παραμενουσών τάσεων στην άνω και κάτω επιφάνεια του ελάσματος του ηλεκτρικού χάλυβα, που είχε υποβληθεί σε μονοτονική φόρτιση κάμψης.

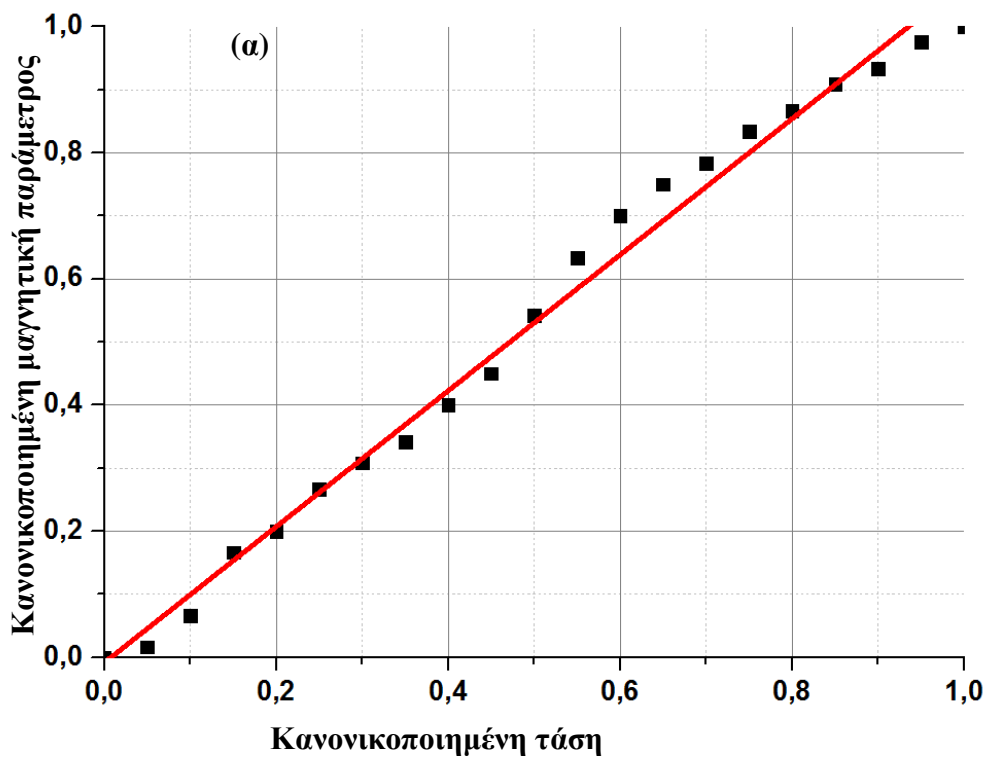


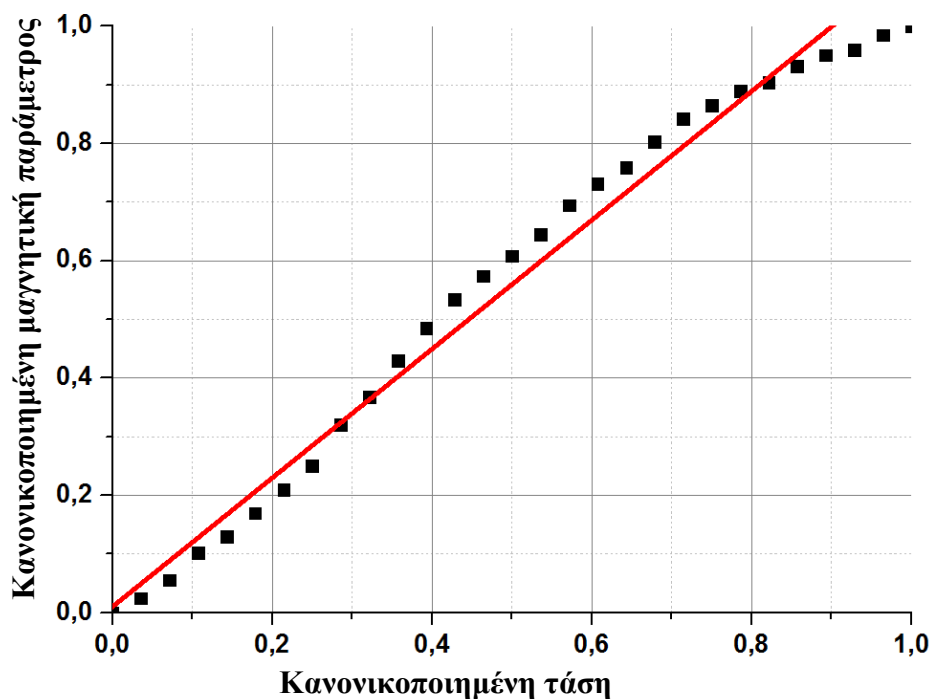




Εικόνα 3-16: Καμπύλες βαθμονόμησης ηλεκτρικού χάλυβα, ως προς το (α) μαγνητικό θόρυβο Barkhausen και (β) τη μαγνητική διαπερατότητα.

Οι κανονικοποιημένες καμπύλες βαθμονόμησης ως προς τις μέγιστες τιμές των μαγνητικών παραμέτρων και των ορίων διαρροής παρουσιάζονται στην εικόνα 3-17.





**Εικόνα 3-17:** Κανονικοποιημένες καμπύλες βαθμονόμησης ηλεκτρικού χάλυβα, ως προς το (α) μαγνητικό θόρυβο Barkhausen και (β) τη μαγνητική διαπερατότητα.

Με την βοήθεια των καμπυλών αυτών προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμενουσών τάσεων στα σημεία μέτρησης (Πίνακα 3.1). Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραμενουσών τάσεων προσδιορίστηκαν και με τη μέθοδο XRD. Οι τιμές παρατίθενται, επίσης, στον πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3-1:** Προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBN), της μαγνητικής διαπερατότητας (MP) και της περίθλασης ακτίνων X (XRD) (με αρνητικό πρόσημο σημειώνονται οι θλιπτικές τάσεις και με θετικό, οι εφελκυστικές).

Άνω επιφάνεια			
Αριθμός Σημείου	Τιμή παραμένουσας τάσης (MPa)		
	MBN	MP	XRD
1	+ 114	+ 124	+ 112
2	+ 147	+ 169	+ 147
3	+ 284	+ 278	+ 279
4	+ 140	+ 131	+ 142
5	+ 117	+ 124	+ 115
Κάτω επιφάνεια			
Αριθμός Σημείου	Τιμή παραμένουσας τάσης (MPa)		
	MBN	MP	XRD
1	- 112	- 128	- 110
2	- 187	- 198	- 190
3	- 286	- 296	- 287
4	- 126	- 187	- 121
5	- 112	- 132	- 110

Είναι εμφανές ότι οι τιμές του μαγνητικού θορύβου Barkhausen συγκλίνουν με αυτές της μεθόδου περίθλασης. Ωστόσο, αν και οι προσδιορισθείσες παραμένουσες τάσεις είναι επιφανειακές, η μαγνητική τεχνική είναι, για συχνότητα διέγερσης 10Hz, επιφανειακότερη της τεχνικής περίθλασης. Αντίθετα, οι προσδιορισθείσες τιμές των παραμενουσών τάσεων με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης της μαγνητικής διαπερατότητας παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις άλλες μεθόδους, για κάθε σημείο. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στο διαφορετικό βάθος διείσδυσης της μεθόδου της μαγνητικής διαπερατότητας από αυτό του θορύβου Barkhausen και της μεθόδου XRD. Οι δύο τελευταίες τεχνικές προσδιορίζουν τις επιφανειακές παραμένουσες τάσεις, ενώ η μέθοδος της μαγνητικής διαπερατότητας προσδιορίζει τις τιμές σε μεγαλύτερο βάθος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης ελαστικών και πλαστικών παραμορφώσεων στην μαγνητική απόκριση δειγμάτων μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο μαγνητικών παραμέτρων, του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και της μαγνητικής διαπερατότητας. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε και η μαγνητική βαθμονόμηση του υλικού ως προς τις ανωτέρω μαγνητικές ιδιότητες. Με αυτή τη βαθμονόμηση κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των παραμενουσών τάσεων σε έλασμα ηλεκτρικού χάλυβα, το οποίο είχε υποβληθεί σε μονοτονική φόρτιση κάμψης.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι, οι μαγνητικές μέθοδοι αποτελούν αξιόπιστες τεχνικές των μη καταστρεπτικών ελέγχων τόσο για τη διερεύνηση τα εντατικής κατάστασης των ηλεκτρικών χαλύβων, όσο και για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων. Μάλιστα, στην τελευταία περίπτωση, τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της μαγνητική τεχνικής του θορύβου Barkhausen με αυτά που προέρχονται από τις πειραματικές μετρήσεις των παραμενουσών τάσεων με η μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X, επιβεβαίωσαν την αξιοπιστία της μαγνητικής απόκρισης του θορύβου. Συγκεκριμένα, η απόκλιση των μετρήσεων του μαγνητικού θορύβου από αυτές της μεθόδου περίθλασης, βρίσκεται εντός αποδεκτών ορίων. Ωστόσο, παρατηρείται σημαντική απόκλιση αυτών από τις προσδιορισθείσες τιμές με τη μέθοδο της μαγνητικής διαπερατότητας, γεγονός που δικαιολογείται από το μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης της τεχνικής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R.M. Bozorth: Ferromagnetism, IEEE Press, New York, 1951.
- [2] W.A. Theiner, H.H. Williams: Determination of Microstructural Parameters by Magnetic and Ultrasonic Quantitative NDE, in Nondestructive Methods Material Property Determination, Plenum Press, New York, 1984
- [3] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, Wiley, New York, 1964
- [4] V.N. Shah, P.E. MacDonald, Residual Life Assessment of Major Light Water Reactor Components, vol. 1, Idaho National Engineering Laboratory, Seattle, 1987.
- [5] S. Nath, B. Wincheski, J.P. Fulton, M. Namkung (1994), “Study of the New Eddy Current Non-Destructive Testing Sensor on Ferromagnetic Materials”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 4644- 4646.
- [6] R.A. Wincheski, M. Namkung, Aerospace Am. 36(3), 27 (1998)
- [7] B. Wincheski, J.P. Fulton, S. Nath, M. Namkung, J.W. Simpson (1994), Self-nulling eddy current probe for surface and subsurface flaw detection, Materials Evaluation, vol. 52, pp. 22-26.
- [8] V. Babbar, B. Shiari, L. Clapham (2004), “Mechanical Damage Detection With Magnetic Flux Leakage Tools: Modeling the Effect of Localized Residual Stresses”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 40, pp. 43-49.
- [9] R. Becker, W. Döring, Ferromagnetismus, Springer Verlag, Berlin, 1939.
- [10] H. Barkhausen (1919), Physik. Z, vol. 20, 401-403.
- [11] A.E. Lord, in Acoustic Emission, ed. by W.P. Mason, R.N. Thurston. Physics Acoustics, vol. 9, Academic Press, New York, 1975.
- [12] M. Namkung, S.G. Allison, J.S. Heyman (1985), Magnetoacoustic stress measurements in steels, IEEE Ultrasonics Symposium, 1022 - 1027.
- [13] K. Tiito, in Nondestructive Evaluation: Application to Materials Processing, ed. by O. Buck, S.M. Wolf , ASM, Materials Park, Ohio, 1984.
- [14] Kleber X. Vincent A (2004), “On the role of residual internal stresses and dislocations on Barkhausen noise in plastically deformed steel”, NDT & E International, vol. 37, pp. 439-445.

- [15] B.D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, 2nd edn., Addison-Wesley, New York, 1972
- [16] Blaow M, Evans JT, Shaw BA (2005), “Magnetic Barkhausen noise: The influence of microstructure and deformation in bending”, *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 279-287.
- [17] D.C. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, New York, 1991.
- [18] J.C. McClure, Jr., K. Schröderv(1973), “Determination of crack growth with the Barkhausen effect”, *Physica Status Solidi (a)*, vol. 19, pp. K57–K60.
- [19] W. Heisenberg, *Physik Z.*, vol. 49, 1928
- [20] C-G. Stefanita, Ph.D. Thesis, Department of Physics, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 1999.
- [21] M. Namkung, D. Utrata (1987), Nondestructive residual stress measurements in railroad wheels using the low-field magnetoacoustic test method, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 7B, pp. 1429-1438.
- [22] R.S. Tebble (1955), “The Barkhausen effect in single crystals”, *Proceedings of the Physical Society. Section B*, vol. 66, pp. 633-641.
- [23] J-K. Yi, Nondestructive Evaluation of Degraded Structural Materials by Micromagnetic Technique, Ph.D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, Korea, 1993.
- [24] H. Kwun, G.I. Burkhardt, *Electromagnetic Techniques for Residual Stress Measurement*, 9th edn. *Metals Handbook*, vol. 17, ASM International, Materials Park, 1989.
- [25] C.G. Stefanita, D.L. Atherton, L. Clapham (2000), “Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel”, *Acta Materialia*, vol. 48, pp. 3545-3551.
- [26] C. Kittel, J.K. Galt (1956), “Ferromagnetic Domain Theory”, *Solid State Physics - Advances in Research and Applications*, vol. 3(C), pp. 437-564.
- [27] T.W. Krause, L. Clapham, A. Pattantyus, D.L. Atherton (1996), “Investigation of the stress-dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen noise”, *Journal of Applied Physics*, vol. 79, pp. 4242-4252.

- [28] T.W. Krause, L. Clapham, D.L. Atherton (1994), “Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise”, *Journal of Applied Physics*, vol. 75, pp. 7983-7988.
- [29] C. Jagadish, L. Clapham, D.L. Atherton (1989), “The influence of stress on surface Barkhausen noise generation in pipeline steels”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp. 3452- 3454.
- [30] C. Jagadish, L. Clapham, D.L. Atherton (1989), “Effect of bias field and stress on Barkhausen noise in pipeline steels”, *NDT International*, vol. 22, pp. 297–301.
- [31] C. Jagadish, L. Clapham, D.L. Atherton (1990), “Orientation effects of anisotropy, stress, excitation, bias and residual fields on Barkhausen noise generation in pipeline steel”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 23, pp. 443-448.
- [32] C. Jagadish, L. Clapham, D.L. Atherton (1990), “Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, pp. 1160 -1163.
- [33] T.W. Krause, K. Mandal, D.L. Atherton (1999), “Modeling of magnetic Barkhausen noise in single and dual easy axis systems in steel”, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 195, pp. 193-205.
- [34] H. Kwun, G.L. Burkhardt (1987), “Effects of grain size, hardness, and stress on the magnetic hysteresis loops of ferromagnetic steels”, *Journal of Applied Physics*, vol. 61, pp. 1576-1579.
- [35] C.G. Stefanita, L. Clapham, J.K. Yi, D.L. Atherton (2001), “Analysis of cold rolled steels of different reduction ratio using the magnetic Barkhausen noise technique”, *Journal of Materials Science*, vol. 36, pp. 2795-2799.
- [36] R.L. Pasley (1970), *Material Evaluation*, vol.28, pp.157-160
- [37] L.E. Murr (1975), “Some observations of grain boundary ledges and ledges as dislocation sources in metals and alloys”, *Metallurgical Transactions A*, vol. 6, pp. 505-513.
- [38] T. Lloyd, D.J. Tangri, T. Malis (1972), “Dislocation generation from grain boundaries in nickel”, *Physica Status Solidi (A) Applied Research*, vol. 11, pp. 275-286.

- [39] R.M. Douthwaite, T. Evans (1973), "Microstrain in polycrystalline aggregates", *Acta Metallurgica*, vol. 21, pp. 525-530.
- [40] V. Moorthy, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, B. Raj, B.P. Kashyap (1999), "Effect of tensile deformation on micromagnetic parameters in 0.2% carbon steel and 2.25Cr-1Mo steel", *Acta Materialia*, vol. 47, pp. 1869-1878.
- [41] C.-G. Stefanita, L. Clapham and D.L. Atherton (2000), "Plastic vs Elastic Stress effects on Magnetic Barkhausen Noise", *Acta Materialia*, vol. 48, pp. 3545-3551.
- [42] A.J. Birkett, W.D. Corner, B.K. Tanner, S.M. Thompson (1989), "Influence of plastic deformation on Barkhausen power spectra in steels", *Journal of Physics D*: vol. 22, pp. 1240-1242.
- [43] W. Six, J.I. Snoek, W.G. Burgers, *De Ingenieur* 49E, 195 (1934)
- [44] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw Hill, New York, 1961.
- [45] S. Chikazumi, K. Suzuki, H. Iwata (1960), "Studies on the magnetic anisotropy induced by cold rolling of ferromagnetic crystal, II. iron-aluminum alloys", *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 15, pp. 250-260.
- [46] N. Tamagawa, Y. Nakagawa, S. Chikazumi (1962), "Magnetic anisotropy induced by cold-rolling of nickel-cobalt alloys", *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 17, pp. 1265-1271.
- [47] J.P. Hirth (1972), "The influence of grain boundaries on mechanical properties", *Metallurgical Transactions*, vol. 3, pp.3047-3067.
- [48] M.A. Meyers, K.K. Chawla, *Mechanical Metallurgy: Principles and Applications*, Prentice Hall, New Jersey, 1984.
- [49] M.A. Meyers and E. Ashworth (1982), "A Model for the Effect of Grain Size on the Yield Stress of Metals", *Philosophy Magazine*, 46, pp. 737-759.
- [50] H. Mughrabi, *Acta Metall. Mater.* 31, 1367 (1983)
- [51] V.E. Iordache, E. Hug, N. Buiron (2003), "Magnetic behavior versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe-(3 wt.%)Si steel", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 359, pp. 62-74.
- [52] K. Kashiwaya (1992), "Magnetoelastic effect of 3.25% Si-Fe single crystal under low magnetic field", *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, vol. 31 (2A), pp. 237-



250.

[53] G. Bertotti, F. Fiorillo, A. Montorsi (1990), "The role of grain size in the magnetization process of soft magnetic materials", *Journal of Applied Physics*, vol. 67, pp. 5574-5576.

[54] D.H.L. Ng, K.S. Cho, M.L. Wong, S.L.I. Chan, X-Y. Ma, C.C.H. Lo (2003), "Study of microstructure, mechanical properties, and magnetization process in low carbon steel bars by Barkhausen emission", *Materials Science and Engineering A*, vol. 358 (1-2), pp. 186-198.

[55] H. Sakamoto, M. Odaka, M. Homma (1987), "Theoretical analysis of Barkhausen noise in carbon steels", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 23, pp. 2236-2238.

[56] R. Ranjan, D.C. Jiles, O. Buck, R.B. Thompson (1987), "Grain size measurement using magnetic and acoustic Barkhausen noise", *Journal of Applied Physics*, vol.61, pp. 3199-3201.

[57] Gatelier-Rothea C, Chicois J, Fougères R, Fleischmann P (1998), "Characterization of pure iron and (130 p.p.m.) carbon-iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: Study of the influence of stress and microstructure", *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 4873-4882.

[58] S. Tiito, M. Ojala, S. Säynäjäkangas (1976), "Document Non-destructive magnetic measurement of steel grain size", *Non-Destructive Testing* vol. 9, pp. 117-120.

[59] J. Kameda, R. Ranjan (1987), "Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic Barkhausen signals-I. Effect of carbide precipitation and hardness", *Acta Metallurgica*, vol. 35, pp. 1515-1526

[60] D.C. Jiles (1988), *J. Phys. D*, vol. 21, pp. 1186.

[61] M.G. Hetherington, J.P. Jakubovics, J. Szpunar, B.K. Tanner (1987), "High-Voltage Lorentz microscopy studies of domain structures and magnetization processes in pearlitic steels", *Philosophical Magazine B: Physics of Condensed Matter; Electronic, Optical and Magnetic Properties*, vol. 56, pp. 561-

577.

[62] L.J. Dijkstra (1950), "Document Effect of inclusions on coercive force of iron", *Physical Review*, vol. 79, pp. 979-985.

- [63] D.G. Hwang, H.C. Kim (1988), “The influence of plastic deformation on Barkhausen effects and magnetic properties in mild steel”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 21, pp. 1807-1813.
- [64] D.J. Buttle, C.B. Scruby, J.P. Jakubovics, J.P. Briggs (1986), “Magnetoacoustic and Barkhausen emission: their dependence on dislocations in iron”, *Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties*, vol. 55, pp. 717-734.
- [65] S.M. Thompson, B.K. Tanner (1993), “The magnetic properties of pearlitic steels as a function of carbon content”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 123, pp. 283-298.
- [66] C.C.H. Lo, C.B. Scruby (1999), “Study of magnetization processes and the generation of magnetoacoustic and Barkhausen emissions in ferritic/pearlitic steel”, *Journal of Applied Physics*, vol. 85, pp. 5193-5195.
- [67] V. Moorthy, B.A. Shaw, P. Hopkins (2005), “Magnetic Barkhausen emission technique for detecting the overstressing during bending fatigue in case-carburised En36 steel”, *NDT&E International*, vol. 38, pp. 159-166.
- [68] M. Lindgren, T. Lepistö (2001), “Effect of pre-straining on Barkhausen noise vs. stress relation,” *NDT & E International*, vol. 34, pp. 337-344.
- [69] ASTM E8-01, *Standard Test Methods For Tension Testing of Metallic Materials*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphía, (2003).
- [70] Ε. Χριστοφόρου: *Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά»*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [71] J.A. Pérez-Benítez, J.H. Espina-Hernández, P. Martínez-Ortiz, A.F. Chávez-González, J.M. De La Rosa (2013), “Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model”, *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 347, pp. 51-60.
- [72] A. Ktena, E. Hristoforu, G.J.L. Gerhardt, F.P. Missell, F.J.G. Landgraf, D.L. Rodrigues Jr, M. Alberteris-Campos: *Barkhausen noise as a microstructure characterization tool*, *Physica B: Condensed Matter*, Volume 435, p. 109-112.
- [73] P. Wang, X. Ji, L. Zhu, G. Tian, E. Yao (2013), “Stratified analysis of the magnetic Barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back

propagation neural network”, *Sensors & Actuators A: Physical*, vol. 201, pp. 421–427.

[74] N. Kasai, H. Koshino, K. Sekine, H. Kihira, M. Takahashi (2013), “Study on the effect of elastic stress and microstructure of low carbon steels on Barkhausen noise”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, pp. 277-285.

[75] O. Stupakov: Local Non-contact Evaluation of the ac Magnetic Hysteresis Parameters of Electrical Steels by the Barkhausen Noise Technique, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Issue 4, pp 405-412.

[76] C.H. Henager Jr., J.S. McCloy, R. Ramuhalli, D.J. Edwards, S. Hu, Y. Li (2013), “Investigation of magnetic signatures and microstructures for heat-treated ferritic/martensitic HT-9 alloy”, *Acta Materialia*, vol. 61, pp. 3285-3296.

[77] F.A. Franco, M.F.R. González, M.F. De Campos, L.R. Padovese (2013), “Relation between magnetic Barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 32, pp. 93-103.

[78] G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš (2013), “Nondestructive magnetic characterization of TRIP steels”, *NDT & E International*, vol. 54, pp. 107-114.

[79] P. Haušild, K. Kolařík, M. Karlík (2013), “Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement”, *Materials & Design*, vol. 44, pp. 548-554.

[80] H. Wang, C. Li, T. Zhu, B. Cai, G. Huo, N. Mohamed: Effect of ball scribing on magnetic Barkhausen noise of grain-oriented electrical steel, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 29, 2013, pp. 673-677.

[81] L. Batista, U. Rabe, S. Hirsekorn: Magnetic micro- and nanostructures of unalloyed steels: Domain wall interactions with cementite precipitates observed by MFM, *NDT & E International*, vol. 57, 2013, pp. 58-68.

[82] J. Pal'a, J. Bydžovský: Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 46, 2013, pp. 866-870.

[83] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel, *NDT & E International*, vol. 34, 2004, pp. 507-514.

- [84] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: Influence of Lüders bands on magnetic Barkhausen noise and magnetic flux leakage signals, *Journal of Materials Science*, vol. 37, 2002, pp. 2441-2446.
- [85] M. Caldas-Morgan, L.R. Padovese: Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method, *NDT and E International*, vol. 45, 2012, pp. 148-155.
- [86] A. Bükki-Deme, I.A. Szabó, C. Cserhádi: Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 322, 2010, pp. 1748-1751.
- [87] O. Stupakov, T. Uchimoto, T. Takagi: Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, 2010, art. no. 195003.
- [88] M. Alberteris Campos, J. Capó-Sánchez, J. Pérez Benítez, L.R. Padovese: Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise, *NDT & E International*, vol. 41, 2008, pp. 656-659.
- [89] J.H. Espina-Hernández, J.A. Pérez-Benítez, F. Caleyó, T. Baudin, A.L. Helbert, J.M. Hallen: Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, 2013, art. no. 392001.
- [90] F. Kováč, M.D. Džubinský, Y. Sidor: Columnar grain growth in non-oriented electrical steels, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 269, 2004, pp. 333–340.
- [91] A. Martinez-de-Guerenu, K. Gurruchaga, F. Arizti: Nondestructive characterization of recovery and recrystallization in cold rolled low carbon steel by magnetic hysteresis loops, *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, 2007, pp.e842 -e845.
- [92] K. Gurruchaga, A. Martínez-De-Guerenu, M. Soto, F. Arizti: Magnetic Barkhausen noise for characterization of recovery and recrystallization, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, 2010, pp. 513-516.
- [93] E. Hristoforou, H. Chiriac and V. Nagacevski: Fast Discrete Wavelet Transform for B-H Loop Tracing, *Sensors & Actuators A*, vol. 76, 1999, pp. 442 – 447.
- [94] Bükki-Deme A, Szabó IA, Cserhádi C (2010), “Effect of anisotropic microstructure on magnetic Barkhausen noise in cold rolled low carbon steel,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 322, pp. 1748-1751.

- [95] Anglada-Rivera J, Padovese LR, Capó-Sánchez J (2001), “Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: Influence of applied tensile stress and grain size,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 231, pp. 299-306.
- [96] Saquet O, Chicois J, Vincent A (1999), “Barkhausen noise from plain carbon steels: Analysis of the influence of microstructure,” *Materials Science & Engineering A*, vol. 269, pp. 73-82.
- [97] Clapham L, Jagadish C, Atherton DL (1991), “The influence of pearlite on Barkhausen noise generation in plain carbon steels,” *Acta Metallurgica Et Materialia*, vol. 39, pp. 1555-1562.
- [98] Sorsa A, Leiviskä K, Santa-aho S, Vippola M, Lepistö T, “An Efficient Procedure for Identifying the Prediction Model Between Residual Stress and Barkhausen Noise,” *Journal of Nondestructive Evaluation* , to be published.
- [99] Wang P, J, X, Yan X, Zhu L, Wang H, Tian G, Yao E (2013), “Investigation of temperature effect of stress detection based on Barkhausen noise,” *Sensors & Actuators, A: Physical*, vol. 194 , pp. 232-239.
- [100] Wang P, Zhu L, Zhu Q, Ji X, Wang H, Tian G, Yao E (2013) “An application of back propagation neural network for the steel stress detection based on Barkhausen noise theory,” *NDT & E International*, vol. 55 , pp. 9-14.
- [101] Vashista M, Paul S (2009), “Correlation between surface integrity of ground medium carbon steel with Barkhausen Noise parameters and magnetic hysteresis loop characteristics,” *Materials & Design*, vol. 30, pp. 1595-1603.
- [102] Mandal K, Loukas ME, Corey A, Atherton DL (1997), “Magnetic Barkhausen noise indications of stress concentrations near pits of various depths,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 175, pp. 255-262.
- [103] Desvaux S, Duquennoy M, Gualandri J, Ourak M (2004), “The evaluation of surface residual stress in aeronautic bearings using the Barkhausen noise effect,” *NDT & E International*, vol. 37, pp. 9-17.
- [104] Stewart DM, Stevens KJ, Kaiser AB (2004), “Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel,” *Current Applied Physics*, vol. 4, pp. 308-311.

- [105] Moorthy V, Shaw BA, Mountford P, Hopkins P (2005), "Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel," *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4997-5006.
- [106] Gauthier J, Krause TW, Atherton DL (1998), "Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique," *NDT & E International*, vol.31, pp. 23-31.
- [107] Altpeter I, Dobmann G, Kröning M, Rabung M, Szielasko S (2009), "Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the II<sup>nd</sup> and III<sup>rd</sup> order," *NDT & E International*, vol. 42, pp. 283-290.
- [108] de Campos MF, Sablik MJ, Landgraf FJG, Hirsch TK, Machado R, Magnabosco R, Gutierrez CJ, Bandyopadhyay A (2008), "Effect of rolling on the residual stresses and magnetic properties of a 0.5% Si electrical steel," *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 320, pp. e377-e380.
- [109] Küpferling M, Fiorillo F, Basso V, Bertotti G, Meiland P (2008), "Barkhausen noise in plastically deformed low-carbon steels," *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 320, pp. e527-e530.
- [110] Perez-Benitez JA, Capó-Sánchez J, Padovese LR (2007), "A study of plastic deformation around a defect using the magnetic Barkhausen noise in ASTM 36 steel," *NDT & E International*, vol. 41, pp. 53-58.
- [111] Campos, AM, Capó-Sánchez J, Pérez Benítez J, Padovese LR (2008), "Characterization of the elastic-plastic region in AISI/SAE 1070 steel by the magnetic barkhausen noise," *NDT and E International*, vol. 41, pp. 656-659.
- [112] Perez-Benitez JA, Padovese LR (2010), "Study of the influence of simultaneous variation of magnetic material microstructural features on domain wall dynamics," *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 322, pp. 3101-3105.
- [113] Stupakov O, Takagi T, Uchimoto T (2010), "Alternative magnetic parameters for characterization of plastic tension," *NDT & E International*, vol. 43, pp. 671-676.
- [114] Stupakov, O, Pal'a J, Tomáš I, Bydžovský J, Novák V (2007), "Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel," *Materials Science & Engineering A*, vol. 462, pp. 351-354.

- [115] O’Sullivan D, Cotterell M, Tanner DA, Mészáros I (2004), “Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques,” *Nondestruct. Test. Eval. Int.*, vol.37, pp. 489–496.
- [116] Moorthy V, Vaidyanathan S, Jayakumar T, Baldev R (1997), “Microstructural characterization of quenched and tempered 0.2% carbon steel using magnetic Barkhausen noise analysis,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 171, pp. 179-189.
- [117] Liu T, Kikuchi H, Kamada Y, Ara K, Kobayashi S, Takahashi S (2007), “Comprehensive analysis of Barkhausen noise properties in the cold rolled mild steel,” *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, vol. 310, pp. e989-e991.
- [118] Sagar SP, Parida N, Das S, Dobmann G, Bhattacharya DK (2005), “Magnetic Barkhausen emission to evaluate fatigue damage in a low carbon structural steel,” *International Journal of Fatigue*, vol. 27, pp. 317-322.
- [119] B. Beidokhti, A.H. Koukabi, A. Dolati: Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, 2009, pp. 4027–4035.
- [120] S.D. Bholea, J.B. Nemadeb, L. Collinsc, C. Liua: Effect of nickel and molybdenum additions on weld metal toughness in a submerged arc welded HSLA line-pipe steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, (2006, pp. 92–100.
- [121] H. Motohashi, N. Hagiwara, T. Masuda: Tensile properties and microstructure of weld metal in MAG welded X80 pipeline steel, *Welding International*, vol. 19, 2005, pp. 100–108.
- [122] M. Rrahim, M. Hamit, I. Shefik: Correlation of microstructure and hardness of two-pass submerged arc welds of line pipe steel X65, *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol. 4, 2009, pp. 347–355.
- [123] J.B. Ju, J.S. Lee, J.I. Jang, W.S. Kim, D. Kwon: Metallurgical and mechanical features of API 5L X65 pipeline steel weldment, *Proceedings of ASME IPC02, 4th international pipeline conference*, 2002.
- [124] D. Ren, F. Xiao, P. Tian, X. Wang, B. Liao: Effects of welding wire composition and welding process on the weld metal toughness of submerged arc

welded pipeline steel, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*,  
vol. 16, 2009, pp. 65–70.