



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Ανάπτυξη συστήματος για την αξιολόγηση
παραμενουσών τάσεων σε δείγματα χάλυβα με τη
βοήθεια του βρόχου υστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρίνα Κ. Τριανταφυλλάκη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ανάπτυξη συστήματος για την αξιολόγηση παραμενουσών τάσεων σε
δείγματα χάλυβα με τη βοήθεια του βρόχου υστέρησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρίνα Τριανταφυλλάκη

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 1^η Οκτωβρίου 2024.

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Μαρίνα Κ. Τριανταφυλλάκη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαρίνα Τριανταφυλλάκη, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

1 Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου συστήματος μη καταστρεπτικού ελέγχου, το οποίο επιτελεί αξιολόγηση των παραμενουσών τάσεων σε δείγματα χάλυβα, με την βοήθεια του βρόχου υστέρησης. Δοκίμια ηλεκτρικού χάλυβα, υπέστησαν απότομες θερμικές διεγέρσεις, προκειμένου να δημιουργηθούν ατέλειες διαφόρων πυκνοτήτων στην μικροδομή τους με την μορφή παραμενουσών τάσεων, και στην συνέχεια μετρήθηκαν από την μετρητική διάταξη που αναπτύχθηκε.

Για την αξιολόγηση των μετρήσεων, κεντρικό ρόλο κατέχει η αντίδραση της κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων απέναντι στις ασυνέχειες στην μικροδομή, και κατά συνέπεια η επίδραση αυτών στις παραμέτρους που ορίζουν τον βρόχο υστέρησης στα δοκίμια. Οι παράμετροι αυτοί αποτελούν θεμελιώδη κριτήρια για την ικανότητα μαγνήτισης των υλικών.

Λέξεις-κλειδιά: βρόχος υστέρησης, μαγνητικά τοιχώματα, συνεκτικό πεδίο, μαγνητική διαπερατότητα, παραμένουσες τάσεις

2 Abstract

In this thesis, the main goal was the development of a reliable system that conducts non-destructive testing, for the evaluation of residual stresses on electric steel materials, with the help of the hysteresis loop. Abrupt thermal stimulus was inflicted on electric steel samples, in order to create impurities of various densities in their microstructure, in the form of residual stresses, and then they were measured by the self-developed measurement layout.

For the measurements' evaluation, focus is mainly centered upon the response of the magnetic walls' movement around the inflicted material defects, and consequentially their effect on the hysteresis loop parameters of the specimens. Those parameters are fundamental criteria for the materials' magnetization capability.

Keywords: *hysteresis loop, magnetic walls, coercive field, magnetic permeability, residual stresses*

3 Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στην πορεία των σπουδών μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου και κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Ιωάννη Γκόνο (Καθηγητής Ε.Μ.Π) και τον κ. Χρήστο Χριστοδούλου (Επίκουρος Καθηγητής), για την τιμή που μου κάνουν να παρευρίσκονται στην παρουσία της εργασίας μου.

Οφείλω πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Γεωργία Στάμου, για την επίβλεψη της εργασίας, για την συνεργασία και για όλη την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε. Ευχαριστώ πολύ όλα τα μέλη του εργαστηρίου Αισθητήρων για την στήριξη και τις συμβουλές που μου παρείχαν και ιδιαιτέρως, τον διδάκτορα Σπυρίδων Αγγελόπουλο για την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας και για τις πολύτιμες επιστημονικές συμβουλές.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την στήριξη, την εμπιστοσύνη και την κατανόηση που μου έδειξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Χαρίκλεια, και τα αδέρφια μου, Ιωάννη και Ηλία, οι οποίοι υπήρξαν τα πιο πολύτιμα στηρίγματα και στους οποίους οφείλω την διαδρομή των σπουδών μου.

4 Πίνακας περιεχομένων

1	Περίληψη	iii
2	Abstract.....	v
3	Ευχαριστίες.....	vii
4	Πίνακας περιεχομένων	ix
5	Ευρετήριο Σχημάτων.....	xiii
6	Ευρετήριο Πινάκων.....	xvii
7	Πρόλογος	xix
1.	Εισαγωγή στον Μαγνητισμό.....	1
1.1.	Βασικά Μεγέθη του Μαγνητικού Πεδίου	1
1.1.1	Μαγνητικό πεδίο	1
1.1.2	Μαγνήτιση.....	2
1.1.3	Μαγνητική Διαπερατότητα και Μαγνητική Επιδεκτικότητα	2
1.1.4	Μαγνητική Ροή	4
1.2	Θεμελιώδεις Νόμοι Μαγνητικού Πεδίου	4
1.2.1	Νόμος του Biot-Savart.....	4
1.2.2	Εξισώσεις του Maxwell.....	5
1.3	Μαγνητική Ροπή και Μαγνητικά Δίπολα.....	7
1.3.1	Μαγνητική Ροπή.....	8
1.3.2	Καταστατική σχέση μαγνητικής επαγωγής.....	9
1.3.3	Μαγνητικό Δίπολο.....	10
2.	Μαγνητικά Υλικά.....	11
2.1.	Βασικές Ιδιότητες των Μαγνητικών Υλικών.....	11
2.1.1.	Συνεκτικό Πεδίο.....	11
2.1.2.	Διαφορική μαγνητική διαπερατότητα	11
2.1.3.	Μαγνήτιση Κόρου	12
2.1.4.	Παραμένουσα Μαγνήτιση	12
2.1.5.	Θερμοκρασία Curie	13
2.1.6.	Ενεργειακό Γινόμενο	13
2.1.7.	Ανισοτροπία	13
2.2.	Κατηγορίες Μαγνητικών Υλικών	14

2.2.1.	Κατηγοριοποίηση με βάση την μικροδομή.....	14
2.2.2.	Κατηγοριοποίηση με βάση την μαγνητική διαπερατότητα.....	15
2.2.3.	Κατηγοριοποίηση με βάση την σκληρότητα.....	20
2.3.	Μαγνητικές Περιοχές και Μαγνητικά Τοιχώματα	21
2.3.1.	Μαγνητικές Περιοχές.....	21
2.3.2.	Μαγνητικά Τοιχώματα	22
2.3.3.	Ενεργειακές Καταστάσεις.....	23
2.4.	Διαδικασία Μαγνήτισης.....	26
2.5.	Κίνηση Μαγνητικών Τοιχωμάτων	28
3.	Βρόχος Υστέρησης	29
3.1.	Σχηματισμός του βρόχου υστέρησης.....	29
3.2.	Τα αίτια της υστέρησης.....	33
3.3.	Χαρακτηρισμός Υλικών από τον Βρόχο Υστέρησης	33
4.	Καταστρεπτικές και Μη Καταστρεπτικές μελέτες.....	35
4.1.	Καταστρεπτικές Μελέτες	35
4.2.	Μη Καταστρεπτικές Μελέτες.....	37
4.2.1.	ΜΚΕ Εσωτερικού Ελέγχου	38
4.2.2.	ΜΚΕ Επιφανειακού Ελέγχου	44
5.	Αξιολόγηση παραμενουσών τάσεων με τη βοήθεια βρόχου υστέρησης.....	49
5.1.	Μέτρηση βρόχου υστέρησης.....	49
5.2.	Επίδραση διαταραχών στην απόκριση του βρόχου υστέρησης.....	50
5.3.	Επίδραση παραμενουσών τάσεων στην απόκριση του βρόχου υστέρησης.....	51
5.4.	Διατάξεις μέτρησης του βρόχου υστέρησης	52
5.4.1.	Σύστημα Διέγερσης	53
5.4.2.	Σύστημα Λήψης.....	55
5.5.	Ευαισθησία Μετρητικής Διάταξης.....	57
5.6.	Σημασία και εφαρμογές της μελέτης του βρόχου υστέρησης	59
6.	Πειραματική Διάταξη	61
6.1.	Σχεδιασμός Πειραματικής Διάταξης.....	61
6.2.	Δείγματα Υλικών προς Μελέτη	61
6.3.	Πηνίο Διέγερσης.....	63
6.4.	Κύκλωμα Διέγερσης	65
6.4.1.	Γεννήτρια Συχνοτήτων.....	65
6.4.2.	Ενίσχυση Ισχύος	66

6.5. Πηνίο Λήψης	67
6.6. Διάταξη Λήψης.....	68
7. Πειραματική Διαδικασία.....	69
7.1. Μετρήσεις δείγματος 1.....	70
7.2. Μετρήσεις δείγματος 2.....	72
7.3. Μετρήσεις δείγματος 3.....	74
7.4. Αξιολόγηση Μετρήσεων	77
7.5. Συμπεράσματα	78
7.6. Μελλοντική Εργασία	79
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

5 Ευρετήριο Σχημάτων

Εικόνα 1: Διευθύνσεις των θεμελιωδών διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου εντός ενός μαγνητικού διπόλου, κατά την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου [4].	10
Εικόνα 2: Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία διαμαγνητικού υλικού. Το διαμαγνητικό υλικό φαίνεται να απωθεί το πεδίο [10].	16
Εικόνα 3: (α) Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία διαμαγνητικού υλικού [10]. (β) Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του παραμαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο[11].	17
Εικόνα 4: (α) Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία φερρομαγνητικού υλικού [10]. (β) Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του φερρομαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο [11].	18
Εικόνα 5: Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του αντιφερρομαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο [11].	19
Εικόνα 6: Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του φερριμαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο[11].	20
Εικόνα 7: Διαμόρφωση μαγνητικών περιοχών και μαγνητικών τοιχωμάτων [13].	22
Εικόνα 8: (πάνω) Στροφή του διανύσματος μαγνήτισης γύρω από το τοίχωμα Néel, (κάτω) Στροφή του διανύσματος μαγνήτισης γύρω από το τοίχωμα Bloch [14].	23
Εικόνα 9: Χωρισμός του υλικού σε μαγνητικές περιοχές, για την μείωση της μαγνητοστατικής ενέργειας[43].	24
Εικόνα 10: (αριστερά) Τυχαίος προσανατολισμός ροπών μαγνητικών περιοχών κατά την απουσία πεδίου, (δεξιά) Στροφή και παραλληλισμός των ροπών των μαγνητικών ροπών με το επιβαλλόμενο πεδίο [16].	27
Εικόνα 11: (αριστερά) Βρόχος υστέρησης M-H, (δεξιά) βρόχος υστέρησης B-H [18].	29
Εικόνα 12: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: καμπύλη παρθενικής μαγνήτισης.....	30
Εικόνα 13: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: Υστερητική συμπεριφορά πεδίου λόγω απομαγνήτισης.	31

Εικόνα 14: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: Μηδενισμός πεδίου.	31
Εικόνα 15: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: Αύξηση αντίστροφου πεδίου μέχρι τον κορεσμό.	32
Εικόνα 16: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: επιστροφή πεδίου στην αρχική κατεύθυνση και επανάληψη διαδικασίας.....	32
Εικόνα 17: (αριστερά) Βρόχος υστέρησης μαλακού μαγνητικού υλικού, (δεξιά) βρόχος υστέρησης σκληρού μαγνητικού υλικού [44].	34
Εικόνα 18: Συνήθης μετρητική διάταξη ραδιογραφικού ελέγχου [22]......	39
Εικόνα 19: Συνήθης μετρητική διάταξη υπερηχογραφικού ελέγχου με μονό μετατροπέα [17].	40
Εικόνα 20: Συνήθης μετρητική διάταξη ακουστικού ελέγχου [23].	42
Εικόνα 21: Συνήθης μετρητική διάταξη θερμογραφικού ελέγχου [24].	43
Εικόνα 22: Συνήθης διαδικασία ελέγχου με διεισδυτικά υγρά [25].	44
Εικόνα 23: Συνήθης διάταξη ελέγχου με διανορήματα [22].	45
Εικόνα 24: Μορφή διαρροϊκού πεδίου λόγω ατέλειας [22].	46
Εικόνα 25: Συνήθης μετρητική διάταξη μέτρησης θορύβου Barkhausen [31]......	48
Εικόνα 26: Συνήθης διάταξη μέτρησης του βρόχου υστέρησης [40].	52
Εικόνα 27: (αριστερά) Διάταξη πηνίων διέγερσης με πηνίο λήψης τοποθετημένο γύρω από το υλικό, (δεξιά) Διάταξη πηνίων διέγερσης και λήψης με πηνίο λήψης τοποθετημένο πάνω στην επιφάνεια του υλικού [33].	56
Εικόνα 28: Μετρητική διάταξη με απόσταση ανάμεσα στο υλικό και τα πηνία[43].	58
Εικόνα 29: Δείγματα υλικών υπό μελέτη.	61
Εικόνα 30: Δείγμα 1: Δείγμα με την μεγαλύτερη καταπόνηση.....	62
Εικόνα 31: Δείγμα 2: Δείγμα με μέτρια καταπόνηση.....	62
Εικόνα 32: Δείγμα 3: Δείγμα χωρίς καταπόνηση.	63
Εικόνα 33: Πυρήνας πηνίου διέγερσης από άμορφο κράμα σιδήρου.	63
Εικόνα 34: Ηλεκτρομαγνήτης διέγερσης.	65
Εικόνα 35: Σχέδιο κυκλώματος ενίσχυσης ισχύος.....	66
Εικόνα 36: Υλοποίηση κυκλώματος ενίσχυσης σε δοκιμαστική πλακέτα.	67
Εικόνα 37: Πηνίο λήψης.	68
Εικόνα 38: Συνολική διάταξη πηνίων λήψης και διέγερσης.	68
Εικόνα 39: Σημεία μετρήσεων δείγματος 1.....	70

Εικόνα 40: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.....	70
Εικόνα 41: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.....	71
Εικόνα 42: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.....	71
Εικόνα 43: Σημεία μετρήσεων δείγματος 1.....	72
Εικόνα 44: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.....	73
Εικόνα 45: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.....	73
Εικόνα 46: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.....	74
Εικόνα 47: Σημεία μετρήσεων δείγματος 3.....	75
Εικόνα 48: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.....	75
Εικόνα 49: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.....	76
Εικόνα 50: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.....	76

6 Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 1.....	72
Πίνακας 2: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 2.....	74
Πίνακας 3: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 3.....	77

7 Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία γίνεται αναλυτική περιγραφή των αποφάσεων σχεδιασμού και ανάπτυξης της μετρητικής διάταξης, συνοδευόμενη πάντα από την απαραίτητη θεωρητική ανάλυση για την κατανόηση και την ερμηνεία των μαγνητικών φαινομένων που μελετήθηκαν.

Στα κεφάλαια 1 και 2, περιγράφονται βασικές θεωρητικές έννοιες για το μαγνητικό πεδίο και τα μαγνητικά υλικά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κίνηση των μαγνητικών περιοχών και στις ενεργειακές τους καταστάσεις κατά την διάρκεια του κύκλου μαγνήτισης.

Στο κεφάλαιο 3 αναλύεται η διαδικασία σχηματισμού του βρόχου υστέρησης καθώς και τα βασικά του χαρακτηριστικά, τα οποία έπειτα συσχετίζονται με την απόδοση ιδιοτήτων στα μαγνητικά υλικά.

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύσσονται θεωρητικά οι έννοιες των καταστρεπτικών και μη-καταστρεπτικών μελετών, καθώς και κάποιες από τις βασικές μεθόδους τους, με επίκεντρο τις μαγνητικές.

Στα κεφάλαιο 5 περιγράφεται η επίδραση των ατελειών του υλικού στα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης, και η αλληλουχία των μετρητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται ευρέως για την μέτρηση αυτών.

Στην συνέχεια το κεφάλαιο 6 παρουσιάζει την υλοποίηση του τελικού συστήματος αξιολόγησης των παραμενουσών τάσεων, συνοδευόμενο από τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα αυτών στο κεφάλαιο 7.

1. Εισαγωγή στον Μαγνητισμό

1.1. Βασικά Μεγέθη του Μαγνητικού Πεδίου

1.1.1 Μαγνητικό πεδίο

Μαγνητικό Πεδίο είναι η φυσική ποσότητα που περιγράφει την περιοχή γύρω από έναν μαγνήτη, ηλεκτρικό ρεύμα ή κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Πρόκειται για ένα διανυσματικό πεδίο, το οποίο ασκεί μαγνητικές δυνάμεις σε κάθε κινούμενο φορτίο ή μαγνητικό αντικείμενο, που μπορεί να βρεθεί εντός αυτού.

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται είτε από μαγνήτες είτε από ηλεκτρικά ρεύματα. Πιο συγκεκριμένα, φυσικοί ή τεχνητοί μαγνήτες δημιουργούν μαγνητικό πεδίο γύρω τους λόγω της ευθυγράμμισης των μαγνητικών ροπών από τις τροχιακές και περιστροφικές κινήσεις των ηλεκτρονίων, καθώς και την ιδιοπεριστροφή αυτών (spin). Αντίστοιχα ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από την τροχιά του, το οποίο αποτελεί και θεμελιώδες φαινόμενο για τη λειτουργία των ηλεκτρομαγνητών και των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από αγωγούς με ρεύμα [1].

Το μαγνητικό πεδίο χαρακτηρίζεται από την ένταση (H) και την μαγνητική ροή (B), και απεικονίζεται με τις «μαγνητικές» δυναμικές γραμμές, οι οποίες δείχνουν την κατεύθυνση, την ισχύ και την πυκνότητα του πεδίου. Μονάδα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι το Tesla (T).

Η μαγνητική ένταση του πεδίου (H) είναι η διανυσματική ποσότητα που περιγράφει το πόσο ισχυρό είναι το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται σε ένα σημείο [2]. Η μονάδα της στο SI είναι το Ampère ανά μέτρο (A/m). Η μαγνητική ένταση οφείλεται στην πηγή του μαγνητικού πεδίου (π.χ. ρεύμα).

Η μαγνητική επαγωγή (B), επίσης γνωστή ως πυκνότητα μαγνητικής ροής, είναι η διανυσματική ποσότητα που εκφράζει τη συνολική μαγνητική δύναμη που αισθάνεται ένα φορτίο ή ένα μαγνητικό υλικό εντός του πεδίου [3]. Η μονάδα

μέτρησής της στο SI είναι το Tesla (T), και η σχέση της μαγνητικής έντασης και της μαγνητικής επαγωγής είναι:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (1.1)$$

Όπου μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Η μαγνητική διαπερατότητα είναι βαθμωτό μέγεθος, επομένως το διάνυσμα της επαγωγής έχει ίδια διεύθυνση και φορά με το διάνυσμα του πεδίου.

Καθώς η μαγνητική ροή είναι ιδιότητα που εξαρτάται από το μέσο, η μαγνητική επαγωγή είναι και αυτή ιδιότητα του μέσου, σε αντίθεση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, που είναι ιδιότητα του χώρου.

1.1.2 Μαγνήτιση

Μαγνήτιση (M) είναι η φυσική ποσότητα που εκφράζει πόσο έντονα ένα υλικό εμφανίζει μαγνητικές ιδιότητες όταν του ασκείται κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Πρόκειται για μια διανυσματική ποσότητα και η μονάδα μέτρησής της στο SI είναι το Ampere ανά μέτρο (A/m). Η μαγνήτιση σχετίζεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της σχέσης:

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (1.2)$$

Όπου χ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού. Η ένταση της μαγνήτισης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και την ισχύ του εξωτερικού πεδίου.

1.1.3 Μαγνητική Διαπερατότητα και Μαγνητική Επιδεκτικότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα μ είναι ένας καθαρός αριθμός ο οποίος χαρακτηρίζει τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών και αποτελεί το μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να υποστηρίξει το σχηματισμό μαγνητικού πεδίου εντός του ίδιου. Συνήθως η μαγνητική διαπερατότητα των υλικών γράφεται ως πολλαπλάσιο της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού.

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (1.3)$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και έχει την τιμή:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (1.4)$$

Μονάδα μέτρησής της αποτελεί το H/m, όπου η μονάδα 1 Henry (H) είναι η μονάδα του συντελεστή αυτεπαγωγής και είναι ίση με 1 Wb/A. Η αδιάστατη σταθερά μ_r ονομάζεται σχετική μαγνητική διαπερατότητα και είναι αυτή που καθορίζει πόσο μαγνητίζεται ένα υλικό.

Επιπλέον, η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να εκφραστεί και ως ο βαθμός της μαγνήτισης που μπορεί να αποκτήσει το υλικό συγκριτικά με το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο, και υποστηρίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (1.5)$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα χ είναι μια αδιάστατη σταθερά αναλογίας, η οποία αποτελεί ένα μέτρο των μαγνητικών ιδιοτήτων του υλικού. Δείχνει αν ένα υλικό έλκεται ή απωθείται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\chi = \frac{\vec{M}}{\vec{H}} \quad (1.6)$$

Οι ποσοτικές μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας παρέχουν επίσης ιδέες για τη δομή ενός υλικού, δίνοντας εικόνες για τους δεσμούς και τα ενεργειακά επίπεδα.

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα συνδέεται άρρηκτα με την μαγνητική επιδεκτικότητα και η ακόλουθη σχέση ισχύει σε κάθε περίπτωση.

$$\mu_r = \chi + 1 \quad (1.7)$$

1.1.4 Μαγνητική Ροή

Η ενέργεια που δαπανάται για να εγκατασταθεί το μαγνητικό πεδίο στο χώρο ισούται με την μαγνητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πεδίο, και προκύπτει από την σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Phi_B \quad (1.8)$$

Όπου Φ_B είναι η μαγνητική ροή που δημιουργεί το i στον χώρο, και ο ρυθμός μεταβολής της μπορεί να μετρηθεί μέσω της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αναπτύσσεται στον αγωγίμο βρόχο, όταν τον διαπερνά μαγνητική ροή.

Η μαγνητική ροή (Φ_B) μπορεί να εκφραστεί και ως το σύνολο της μαγνητικής επαγωγής που περνάει μέσω μιας επιφάνειας S [37]. Υπολογίζεται με το τύπο:

$$\overrightarrow{\Phi_B} = \int S \cdot \vec{B} \cdot dA \quad (1.9)$$

Όπου B είναι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής και dA είναι το στοιχείο της επιφάνειας. Η μονάδα μέτρησης στο SI είναι το Weber(Wb).

1.2 Θεμελιώδεις Νόμοι Μαγνητικού Πεδίου

Τα μαγνητικά πεδία ερμηνεύονται από βασικούς νόμους οι οποίοι συμβάλλουν σε μια πιο λεπτομερή και μαθηματικά ακριβή κατανόηση του πως δημιουργούνται και περιγράφονται.

1.2.1 Νόμος του Biot-Savart

Ο νόμος του Biot-Savart είναι ένας από τους θεμελιώδεις νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, ο οποίος είναι παράγωγο πειραματικής παρατήρησης παρά θεωρητικής προσέγγισης. Δίνει τη μαθηματική περιγραφή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα μικρό τμήμα αγωγού μέσω του οποίου ρέει ηλεκτρικό ρεύμα [3]. Σύμφωνα με αυτόν το νόμο, το στοιχειώδες μαγνητικό πεδίο dB που δημιουργείται σε ένα σημείο r από ένα τμήμα ρεύματος Idl είναι:

$$dB = \left(\frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \right) \cdot \left(\frac{dI \times r}{r^{3d}} \right) \quad (1.10)$$

όπου:

- dI είναι το στοιχειώδες τμήμα του αγωγού,
- r είναι η θέση του σημείου στο οποίο υπολογίζεται το πεδίο σε σχέση με το τμήμα του αγωγού,
- I είναι η ένταση του ρεύματος που διατρέχει τον αγωγό,
- μ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού.

Ο νόμος του Biot-Savart είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου γύρω από απλά σχήματα αγωγών, όπως ευθύγραμμα τμήματα, κυκλικούς βρόχους και σπείρες.

1.2.2 Εξισώσεις του Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν πλήρως την δημιουργία και την αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων. Είναι τέσσερις θεμελιώδεις εξισώσεις που ενοποιούν τον ηλεκτρομαγνητισμό και περιλαμβάνουν τον νόμο του Ampère (με τη διόρθωση του Maxwell), τον νόμο της επαγωγής του Faraday, τον νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο, και τον νόμο του Gauss για το μαγνητικό πεδίο.

I. Νόμος του Ampère-Maxwell

Σύμφωνα με τον Ampère, όταν σε ένα κύκλωμα υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα, τότε γύρω του δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από το μονοπάτι της αγωγής και την ένταση του ρεύματος [2]. Αν υποθέσουμε ότι κάθε κύκλωμα αποτελείται από πολλά στοιχειώδη ρεύματα που συνεισφέρουν στο πεδίο, τότε σύμφωνα με τον Ampère θα ισχύει:

$$\vec{I} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1.11)$$

Δηλαδή το πεπλεγμένο ρεύμα I σε μια κλειστή διαδρομή l , ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου H , κατά το μήκος της διαδρομής αυτής.

Ο νόμος του Ampère, με τη διόρθωση του Maxwell, περιγράφει πώς τα ρεύματα και τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούν μαγνητικά πεδία:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.12)$$

όπου:

- B είναι το μαγνητικό πεδίο,
- J είναι η πυκνότητα ρεύματος,
- ϵ_0 είναι η ηλεκτρική σταθερά.
- E είναι η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη

Αυτός ο νόμος δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί όχι μόνο από ηλεκτρικά ρεύματα (κινούμενα φορτία), αλλά και από μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, κάτι που είναι κρίσιμο για την περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

II. Νόμος της Επαγωγής του Faraday

Ο νόμος της επαγωγής του Faraday είναι σημαντικός για την κατανόηση της δυναμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων και για τη λειτουργία των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, και περιγράφει πώς ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργήσει ένα ηλεκτρικό πεδίο:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.13)$$

Όπου E είναι το διάνυσμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης λόγω επαγωγής, και B είναι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου.

III. Νόμος του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο

Σύμφωνα με τον νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο, η ηλεκτρική ροή η οποία διαπερνά μια κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το καθαρό ηλεκτρικό φορτίο που περικλείεται μέσα σε αυτήν.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.14)$$

Όπου:

- E είναι το ηλεκτρικό πεδίο
- ρ είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου
- ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού

Ποιοτικά, ο νόμος αυτός περιγράφει ότι ένα φορτίο παράγει ηλεκτρικό πεδίο που διαχέεται ακτινικά προς τα έξω ή προς τα μέσα από αυτό ανάλογα με το πρόσημο του φορτίου.

IV. Νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο

Ο δεύτερος νόμος του Gauss στην γενική του μορφή, δίνει την ροή του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής μέσα από μια κλειστή επιφάνεια, ως το επιφανειακό ολοκλήρωμα του διανύσματος αυτού. Ερμηνεύοντας την προαναφερόμενη σχέση για το μαγνητικό πεδίο, συνδυαστικά με το γεγονός ότι η μαγνητική ροή εισόδου σε μια κλειστή επιφάνεια, ισούται με την μαγνητική ροή εξόδου, τότε εύλογα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μαγνητική ροή B που διαπερνά μια κλειστή επιφάνεια είναι ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.15)$$

Αυτό σημαίνει ότι οι μαγνητικές γραμμές πεδίου είναι πάντα κλειστές καμπύλες και δεν ξεκινούν ούτε τελειώνουν πουθενά. Στην φύση αυτό μεταφράζεται ως ότι δεν υπάρχουν μονοπόλοι μαγνητών.

1.3 Μαγνητική Ροπή και Μαγνητικά Δίπολα

Σύμφωνα με τον νόμο του Ampere, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα τότε στον περιβάλλοντα χώρο δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Το πιο απλό κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να προκαλέσουμε μαγνητικό πεδίο είναι ο αγώγιμος κυκλικός βρόχος. Ο αγώγιμος βρόχος ρεύματος μαζί με το στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο,

αποτελούν τις δυο στοιχειώδεις οντότητες του μαγνητισμού. Σε κάθε περίπτωση υπάρχει μια μαγνητική διπολική ροπή που συνδέεται άρρηκτα με την στοιχειώδη οντότητα. Στον βρόχο ρεύματος η μαγνητική ροπή δίνεται από το γινόμενο της έντασης i και της επιφάνειας A του βρόχου, ενώ στο στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο ισούται με το γινόμενο του μαγνητικού φορτίου p και της απόστασης l μεταξύ των δυο πόλων.

Η μαγνητική ροπή και τα μαγνητικά δίπολα αποτελούν κεντρικά στοιχεία της μαγνητικής αλληλεπίδρασης και είναι θεμελιώδη στην κατανόηση των φαινομένων του μαγνητισμού, τόσο σε ατομικό όσο και σε μακροσκοπικό επίπεδο. Η θεωρητική κατανόηση αυτών των εννοιών προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο τα υλικά αντιδρούν σε εξωτερικά μαγνητικά πεδία και πως αναπτύσσουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες.

1.3.1 Μαγνητική Ροπή

Η μαγνητική ροπή είναι μια διανυσματική ποσότητα που εκφράζει τη δύναμη και την κατεύθυνση της μαγνητικής επιρροής ενός συστήματος, όπως ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κλειστό κύκλωμα ή ένα spin ηλεκτρονίου [2]. Στο ατομικό επίπεδο η μαγνητική ροπή προκύπτει από τις δυο στοιχειώδεις αρχές του μαγνητισμού, το μαγνητικό δίπολο και το τροχιακό. Συγκεκριμένα:

- Το spin των ηλεκτρονίων θεωρείται ένα στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο, και δημιουργεί μαγνητική ροπή.
- Το τροχιακό περιγράφει την κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα σε τροχιές. Η κυκλική αυτή κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί μαγνητική ροπή.

Η μαγνητική ροπή είναι υπεύθυνη για την αλληλεπίδραση του μαγνητικού διπόλου με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, παράγοντας μια ροπή που τείνει να ευθυγραμμίσει το δίπολο με το πεδίο. Η σχέση μεταξύ της διανυσματικής μαγνητικής ροπής m και του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B δίνεται από την εξίσωση της μηχανικής ροπής που ακολουθεί.

$$\vec{\tau} = \vec{m} \cdot \vec{B} \quad (1.16)$$

Όπου τ είναι η ροπή στρέψης. Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι το μαγνητικό δίπολο τείνει να ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο B .

Λόγω της μαγνητικής ροπής, τα μαγνητικά δίπολα εντός ενός υλικού τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα με το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο. Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε την μαγνήτιση M ως την μαγνητική ροπή m ανά μονάδα όγκου V του υλικού μέσου, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο.

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \quad (1.17)$$

Αν θεωρήσουμε μαγνήτη μήκους l με εμβαδό διατομής A και μαγνητική ροή Φ , η μαγνητική ροπή του θα δίνεται από την σχέση

$$\vec{m} = \frac{\vec{\Phi} \cdot l}{\mu_0} \quad (1.18)$$

Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροπής στο SI είναι το $(A \cdot m^2)$.

Επομένως καταλήγουμε στην εξής σχέση για την μαγνήτιση M .

$$\vec{M} = \frac{\vec{\Phi}}{A \cdot \mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (1.19)$$

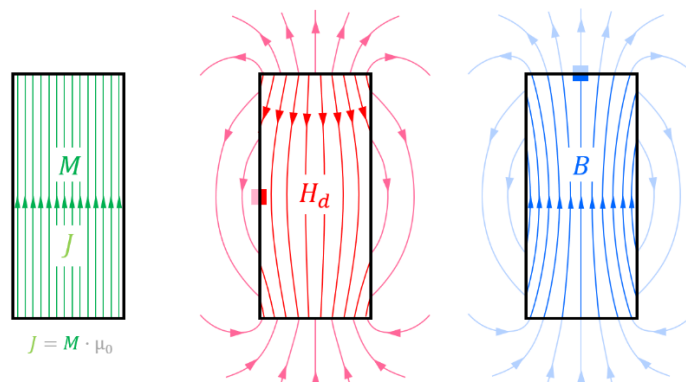
Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι τόσο η μαγνήτιση M όσο και η ύπαρξη εξωτερικού πεδίου H , συνεισφέρουν εξίσου στην μαγνητική επαγωγή.

1.3.2 Καταστατική σχέση μαγνητικής επαγωγής

Σύμφωνα με τις προηγούμενες ενότητες, αποδεικνύεται ότι η μαγνητική επαγωγή στο κενό θα είναι γραμμική συνάρτηση το διανυσματικού αθροίσματος της ποσότητας $\mu_0 \vec{H}$ και της συνεισφοράς της μαγνήτισης του υλικού $\mu_0 \vec{M}$ [2].

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.20)$$

Η παραπάνω εξίσωση δίνει μια ολοκληρωμένη περιγραφή του μαγνητικού πεδίου σε ένα μεγάλο ποσοστό των υλικών και είναι θεμελιώδης για την κατανόηση και τον σχεδιασμό ηλεκτρομαγνητικών τεχνολογιών.



Εικόνα 1: Διευθύνσεις των θεμελιωδών διανυσμάτων του μαγνητικού πεδίου εντός ενός μαγνητικού διπόλου, κατά την εφαρμογή εξωτερικού πεδίου [4].

1.3.3 Μαγνητικό Δίπολο

Όπως η ύλη αποτελείται από άτομα και μόρια, έτσι και τα μαγνητικά υλικά αποτελούνται από στοιχειώδεις μαγνήτες, τα μαγνητικά δίπολα. Το μαγνητικό δίπολο είναι ένα σύστημα δύο μαγνητικών πόλων, ενός βόρειου και ενός νότιου, οι οποίοι βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους [5]. Η μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού διπόλου είναι το βασικό μέγεθος που καθορίζει την αλληλεπίδρασή του με εξωτερικά μαγνητικά πεδία.

Στην ατομική κλίμακα, τα μαγνητικά δίπολα συνδέονται συχνά με το spin των ηλεκτρονίων και την τροχιακή κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα. Κάθε ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο έχει μια μαγνητική ροπή που προκύπτει από το spin και την τροχιακή του κίνηση. Αυτή η μαγνητική ροπή δημιουργεί ένα μαγνητικό δίπολο, το οποίο μπορεί να αλληλεπιδράσει με εξωτερικά μαγνητικά πεδία.

Όταν ένα μαγνητικό δίπολο τοποθετείται σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ασκείται πάνω του μια ροπή στρέψης, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει το δίπολο με το πεδίο. Τότε, το μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μια δυναμική ενέργεια U στο δίπολο, που δίνεται από τη σχέση:

$$U = -\mu \cdot B \quad (1.21)$$

Αυτή η ενέργεια είναι ελάχιστη όταν το μαγνητικό δίπολο είναι πλήρως ευθυγραμμισμένο με το εξωτερικό πεδίο.

2. Μαγνητικά Υλικά

2.1. Βασικές Ιδιότητες των Μαγνητικών Υλικών

Για κάθε μαγνητικό υλικό, υπάρχουν ενδογενείς και εξωγενείς παράμετροι που το χαρακτηρίζουν και του προσδίδουν τις ιδιότητές του. Οι ενδογενείς μαγνητικές ιδιότητες είναι οι ιδιότητες που διέπουν ένα δεδομένο υλικό, όπως είναι η αυθόρμητη μαγνήτιση, η ανισοτροπία κτλ. Οι εξωγενείς μαγνητικές ιδιότητες επηρεάζονται κυρίως από το σχήμα, το μέγεθος και τη μικροδομή του υλικού. Ορισμένες από τις πιο βασικές παραμέτρους, που συμβάλλουν στην κατανόηση των ιδιοτήτων των υλικών, περιγράφονται αναλυτικά στην παρούσα ενότητα.

2.1.1. Συνεκτικό Πεδίο

Το συνεκτικό πεδίο (H_c), ή αλλιώς πεδίο απομαγνήτισης, είναι ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει αντίθετη διεύθυνση από την μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη και προσπαθεί να την μηδενίσει [2]. Πρόκειται ουσιαστικά για το μέγεθος του πεδίου που απαιτείται για τον μηδενισμό της μαγνήτισης του υλικού, μετά την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου. Η τιμή του συνεκτικού πεδίου εξαρτάται σημαντικά από το δείγμα και από την μέγιστη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

2.1.2. Διαφορική μαγνητική διαπερατότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, δεν αντικατοπτρίζει απόλυτα τις ιδιότητες ενός υλικού, καθώς λόγω της υστερητικής συμπεριφοράς του κύκλου μαγνήτισης-απομαγνήτισης, η διαπερατότητα δεν λαμβάνει κάποια σταθερή τιμή. Για αυτόν τον λόγο ορίζεται το μέγεθος της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας μ' , που εξαρτάται άμεσα από την ένταση του μαγνητικού πεδίου και υπολογίζεται από τον τύπο που ακολουθεί [2].

$$\mu' = \frac{dB}{dH} \quad (2.1)$$

Όπου $\frac{dB}{dH}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής B ως προς την ένταση του πεδίου H .

Λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν το πεδίο ισούται με το συνεκτικό πεδίο, και σε συνδυασμό με την αρχική μαγνητική επιτρεπτότητα, που είναι η κλίση της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης, δίνουν μια πιο σαφή εικόνα για τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών.

2.1.3. Μαγνήτιση Κόρου

Όταν εφαρμόζεται ένα ισχυρό εξωτερικό πεδίο στο μαγνητικό υλικό, παρατηρείται αύξηση της μαγνήτισης προς την κατεύθυνση του πεδίου, με αποτέλεσμα να φτάνει κάποια στιγμή σε μια μέγιστη τιμή, την μαγνήτιση κόρου (M_s). Όταν το υλικό βρεθεί σε αυτήν την κατάσταση, τότε όλες οι μαγνητικές ροπές σε αυτό είναι προσανατολισμένες προς την διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου [2]. Η μαγνήτιση κόρου υπολογίζεται και από την σχέση:

$$M_s = m \cdot n \quad (2.2)$$

Όπου m είναι η μαγνητική ροπή και n το πλήθος των ατόμων ανά μονάδα όγκου.

2.1.4. Παραμένουσα Μαγνήτιση

Εφόσον εφαρμοστεί κάποιο ισχυρό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στο υλικό, αυτό φτάνει την μέγιστη δυνατή τιμή της μαγνήτισης του, την μαγνήτιση κόρου. Όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο μηδενιστεί, τότε η πυκνότητα της μαγνητικής ροής δεν μηδενίζεται, και το υλικό εξακολουθεί να εμφανίζει μαγνητική επαγωγή, η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση (B_R). Η παραμένουσα μαγνήτιση δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$B_R = \mu_0 M_r \quad (2.3)$$

Όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και M_r είναι η υπολειμματική μαγνήτιση. Η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης εξαρτάται από την τιμή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου καθώς και από το μέγεθος της μαγνήτισης κόρου.

2.1.5. Θερμοκρασία Curie

Οι εναλλαγές της θερμοκρασίας επηρεάζουν εν γένει τις ιδιότητες των υλικών. Στην περίπτωση των φερρομαγνητικών και αντιφερρομαγνητικών υλικών, με την αύξηση της θερμοκρασίας, έχουμε αύξηση των θερμικών ταλαντώσεων των ατόμων, οι οποίες θέτουν τυχαίες τις διευθύνσεις των μαγνητικών ροπών, προκαλώντας την μερική απόκλιση από την ευθυγράμμιση των διπόλων, ανεξάρτητα από την ύπαρξη κάποιου εξωτερικού πεδίου [6]. Επομένως, όταν ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, τα υλικά αυτά συμπεριφέρονται ως παραμαγνητικά. Αυτή η θερμοκρασία ονομάζεται θερμοκρασία Curie, και είναι χαρακτηριστική του κάθε υλικού. Σε αυτή τη θερμοκρασία, η διαπερατότητα του υλικού μειώνεται ξαφνικά, ενώ το συνεκτικό πεδίο και η παραμένουσα μαγνήτιση μηδενίζονται.

2.1.6. Ενεργειακό Γινόμενο

Κατά την διάρκεια της κυκλικής μαγνήτισης ενός υλικού, το ενεργειακό γινόμενο δίνεται συνεχώς από την σχέση $B \cdot H$ και παρουσιάζει διαφορετικές τιμές κατά την διάρκεια κάθε κύκλου μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή της. Η μέγιστη αυτή τιμή αντιπροσωπεύει την ενέργεια που χρειάζεται ένας μαγνήτης για να απομαγνητιστεί. Επομένως, όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το γινόμενο, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια απομαγνήτισης χρειάζεται, και είναι τόσο πιο σκληρό το υλικό.

2.1.7. Ανισοτροπία

Η μαγνητική ανισοτροπία είναι το φαινόμενο που εκφράζει την εξάρτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων σε μια προτιμώμενη κατεύθυνση. Οι πηγές της ανισοτροπίας

είναι το σχήμα του δείγματος, η κρυσταλλική του δομή, και η υφή του σε ατομική κλίμακα. Επομένως οι τρεις βασικοί τύποι ανισοτροπίας είναι οι ακόλουθοι.

- i. Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία: σε αυτό το είδος της ανισοτροπίας, όλη η διαδικασία της μαγνήτισης είναι διαφορετική όταν το ίδιο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται προς διαφορετικές κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, αντικατοπτρίζοντας έτσι την κρυσταλλική συμμετρία του δείγματος [7]. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου εξαιτίας των γειτονικών ατόμων και στην αλληλεπίδραση σπιν-τροχιάς.
- ii. Ανισοτροπία λόγω σχήματος: αυτή η ανισοτροπία οφείλεται στην μορφή και το μέγεθος των κόκκων και στο σχήμα του υλικού [3]. Πηγάζει από το πεδίο απομαγνήτισης, καθώς όταν ένα υλικό μαγνητίζεται δημιουργεί πόλους στην επιφάνειά του με κατανομή η οποία καθορίζεται από το σχήμα των κόκκων.
- iii. Επαγόμενη ανισοτροπία: προκύπτει όταν δημιουργείται μια διεύθυνση εύκολης μαγνήτισης κατά την εφαρμογή τάσης ή όταν κατά την ανόπτηση ενός κράματος, παρουσία μαγνητικού πεδίου, δημιουργείται διαφορετική υφή σε ατομική κλίμακα.

2.2. Κατηγορίες Μαγνητικών Υλικών

Οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών εξαρτώνται από την ατομική τους δομή και την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων τους με εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Τα στερεά μαγνητικά υλικά συνολικά, με βάση την ατομική τους διάταξη, χωρίζονται σε δυο μεγάλες υποκατηγορίες, τα κρυσταλλικά και τα άμορφα.

2.2.1. Κατηγοριοποίηση με βάση την μικροδομή

Σύμφωνα με την εσωτερική μικροδομή τους, τα μαγνητικά υλικά διαχωρίζονται σε δυο κατηγορίες, στα κρυσταλλικά υλικά και στα άμορφα υλικά.

Τα κρυσταλλικά υλικά, αποτελούν μαγνητικά υλικά τα οποία είναι διατεταγμένα σε τακτικό επαναλαμβανόμενο μοτίβο, και τοποθετημένα σε τρεις διαστάσεις.

Συνήθως τα μεταλλικά κρυσταλλικά υλικά ακολουθούν τρία συστήματα κρυσταλλικής δομής, το κυβικό χωροκεντρωμένο (bcc – body centered cubic), το κυβικό εδρωκεντρωμένο (fcc – face centered cubic) και, την εξαγωνική κρυσταλλική δομή πυκνής διάταξης (hcp – hexagonal close packed). Τα περισσότερα μέταλλα και κράματα είναι κρυσταλλικά, δηλαδή τα άτομά τους βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις και περιοχές στον χώρο, στους κρυστάλλους.

Τα άμορφα στερεά υλικά, είναι μαγνητικά υλικά που δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη τακτική δομή. Σε αυτά, τα άτομα ή τα μόρια είναι τυχαία διατεταγμένα, χωρίς να ακολουθούν μακροχρόνια κρυσταλλική τάξη, όπου οι πλεγματικές αποστάσεις είναι όλες διαφορετικές μεταξύ τους και μακριά η μία από την άλλη [8]. Λόγω της άτακτης δομής τους, τα άμορφα υλικά δεν παρουσιάζουν όρια και κόκκους, προσδίδοντάς τους ιδιότητες όπως υψηλή ελαστικότητα, μεγάλη επιτρεπτότητα, χαμηλές απώλειες μαγνητισμού, και αυξημένη αντίσταση σε διαβρώσεις [9]. Παραδείγματα άμορφων υλικών περιλαμβάνουν τα κράματα, τα πολυμερή και τα μεταλλικά γυαλιά, που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές και ενεργειακές εφαρμογές.

Από μηχανικής άποψης, κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μια καμπύλη stress-strain. Η καμπύλη αυτή αποτελείται από κάποιες διακριτές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη παρουσιάζει αρχικά μια ελαστική περιοχή, η οποία ακολουθείται από ένα όριο διαρροής, και εν συνεχεία από μια πλαστική περιοχή η οποία σταδιακά φθίνει. Στα άμορφα υλικά, η ελαστική περιοχή έχει μεγάλο εύρος, επομένως παρουσιάζουν πολύ μεγάλη και γραμμική μηχανική αντοχή.

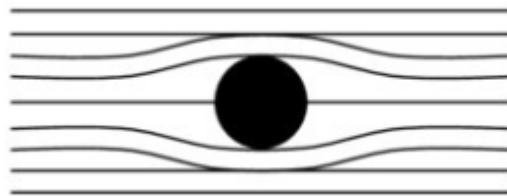
2.2.2. Κατηγοριοποίηση με βάση την μαγνητική διαπερατότητα

Με βάση τις μαγνητικές τους ιδιότητες, και κυρίως την μαγνητική τους διαπερατότητα, τα μαγνητικά υλικά διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, στα διαμαγνητικά, παραμαγνητικά και φερρομαγνητικά. Υπάρχουν επίσης, οι υποκατηγορίες των φερριμαγνητικών και αντιφερρομαγνητικών υλικών.

- Διαμαγνητικά Υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από την τάση τους να δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο αντίθετο με το εξωτερικό πεδίο που τους ασκείται. Αυτό συμβαίνει επειδή τα ηλεκτρόνια τους, καθώς αντιδρούν στην εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, δημιουργούν ένα ασθενές επαγόμενο μαγνητικό πεδίο που αντιτίθεται στο εξωτερικό πεδίο. Παρουσιάζουν δηλαδή χαμηλή και αρνητική μαγνητική διαπερατότητα της τάξεως του -10^{-5} . Ως αποτέλεσμα, τα διαμαγνητικά υλικά εκτοπίζονται από τις περιοχές ισχυρού μαγνητικού πεδίου [5].

Ο διαμαγνητισμός είναι μια αδύναμη μορφή μαγνητισμού και παρατηρείται σε όλα τα υλικά, αλλά είναι ο κυρίαρχος τύπος μόνο σε υλικά όπου οι άλλες μορφές μαγνητισμού δεν υπάρχουν [5]. Παραδείγματα διαμαγνητικών υλικών περιλαμβάνουν τον χαλκό, το βισμούθιο, τον άργυρο και το βηρύλλιο.



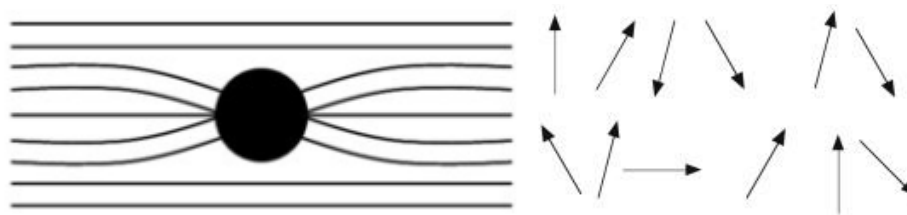
Εικόνα 2: Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία διαμαγνητικού υλικού. Το διαμαγνητικό υλικό φαίνεται να απωθεί το πεδίο [10].

- Παραμαγνητικά Υλικά

Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν ατομικές μαγνητικές ροπές που τείνουν να ευθυγραμμιστούν με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Σε αντίθεση με τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά υλικά ενισχύουν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο που τους ασκείται. Όμως, λόγω της θερμικής κίνησης, αυτή η ευθυγράμμιση είναι συνήθως αδύναμη και το παραμαγνητικό υλικό χάνει τις μαγνητικές του ιδιότητες όταν το εξωτερικό πεδίο αφαιρεθεί [5]. Τα παραμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μικρή αλλά θετική μαγνητική διαπερατότητα της τάξεως του 10^{-3} έως 10^{-5} .

Το παραμαγνητικό φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί μέσω της θεωρίας του Langevin, η οποία περιγράφει την ευθυγράμμιση των ατομικών μαγνητικών ροπών

με το εξωτερικό πεδίο και την επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτή τη διαδικασία [5]. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι το αλουμίνιο, η πλατίνα και το οξυγόνο.



Εικόνα 3: (α) Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία διαμαγνητικού υλικού [10]. (β) Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του παραμαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο [11].

- Φερρομαγνητικά Υλικά

Τα φερρομαγνητικά υλικά είναι οι ισχυρότεροι τύποι μαγνητικών υλικών και είναι τα μόνα που μπορούν να διατηρούν μαγνήτιση και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [6]. Σε αυτά τα υλικά, οι ατομικές μαγνητικές ροπές τείνουν να ευθυγραμμιστούν παράλληλα ή μία με την άλλη λόγω των εσωτερικών αλληλεπιδράσεων, σχηματίζοντας μαγνητικές περιοχές [2]. Τα φερρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν θετική μαγνητική διαπερατότητα, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας, και συνήθως μπορεί να βρίσκεται εντός τους εύρους τιμών 50 έως και 10000.

Σε ατομικό επίπεδο, τα φερρομαγνητικά υλικά είναι στοιχεία μετάπτωσης του περιοδικού πίνακα (Fe, Co, Ni) όπου η συμπεριφορά τους χαρακτηρίζεται από την αλληλεπίδραση των σπιν των ηλεκτρονίων της 3d στιβάδας. Όταν σε ένα άτομο εντός μιας κρυσταλλικής δομής, δεν καλύπτονται πλήρως οι θέσεις των ηλεκτρονίων της στιβάδας αυτής, τα ηλεκτρόνια τείνουν να ελαχιστοποιούν την εσωτερική ενέργεια του συστήματος, οπότε ομοπαράλληλίζουν τις ροπές τους, σύμφωνα με την διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου.

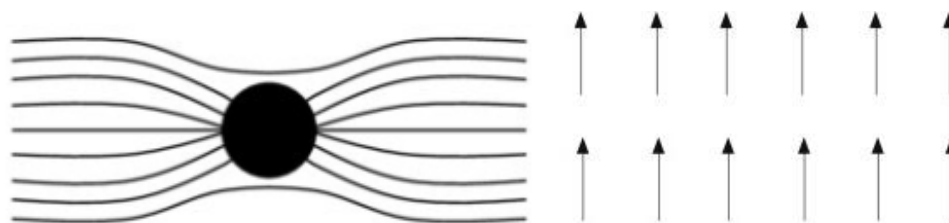
Για παράδειγμα στον σίδηρο, ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην 3d στιβάδα είναι 6. Όταν το άτομο σιδήρου είναι απομονωμένο στον χώρο, τα ηλεκτρόνια της 3d στιβάδας έχουν αντιπαράλληλα σπιν τα οποία αλληλοαναιρούνται, επομένως έχει παραμαγνητική συμπεριφορά. Όταν όμως αυτό το άτομο Fe είναι μέρος μιας

κρυσταλλικής στερεάς δομής, τότε λόγω των μικρών πλεγματικών αποστάσεων, τα ηλεκτρόνια όλων των ατόμων της εξωτερικής στιβάδας (3d) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Το κάθε ηλεκτρόνιο έχει θεωρητικά μαγνητική ροπή ίση με $\frac{1}{2} \cdot \mu_B$, οπότε η γειτνίασή του με το τροχιακό σπιν κάποιου άλλου ατόμου Fe, προσφέρει μαγνητικό πεδίο στο άτομο και κατά συνέπεια μαγνητοστατική ενέργεια ίση με $-\frac{1}{4} \cdot \mu_B^2$ όταν τα δυο σπιν είναι παράλληλα και $+\frac{1}{4} \cdot \mu_B^2$ όταν τα δυο σπιν είναι αντιπαράλληλα. Τα ηλεκτρόνια εντός του κρυστάλλου προσπαθούν να ελαχιστοποιούν την ενέργεια του συστήματος, επομένως παραλληλίζουν τα σπιν μεταξύ τους, με ελάχιστη αύξηση ή μείωση ενεργειακής στάθμης στην υποστιβάδα.

Σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, δεν είναι εφικτό δυο ηλεκτρόνια ενός ατόμου να βρίσκονται στην ίδια ενεργειακή στάθμη, επομένως στον Fe, ο παραλληλισμός των σπιν είναι εφικτός για τα 5 από τα 6 ηλεκτρόνια, αφήνοντας το έκτο ηλεκτρόνιο με αντιπαράλληλο σπιν [5]. Έτσι, τα 4 από τα 5 παραλληλισμένα σπιν του ατόμου του Fe δίνουν συνολική μαγνητική ροπή ίση με $2\mu_B$. Αντίστοιχα στα άτομα του κοβαλτίου (Co) η θεωρητική μαγνητική ροπή είναι $1.5\mu_B$, και του νικελίου (Ni) $1\mu_B$.

Η μαγνήτιση των φερρομαγνητικών υλικών εξαρτάται από την εφαρμογή του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και την φύση του υλικού, όπως περιγράφεται από το φαινόμενο της υστέρησης και τον βρόχο υστέρησης.

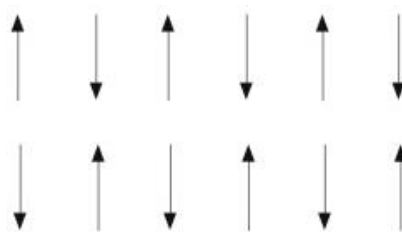


Εικόνα 4: (α) Αναπαράσταση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου με την παρουσία φερρομαγνητικού υλικού [10]. (β) Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του φερρομαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο [11].

- Αντιφερρομαγνητικά Υλικά

Στα αντιφερρομαγνητικά υλικά, οι ατομικές μαγνητικές ροπές τείνουν να ευθυγραμμιστούν αντιπαράλληλα, δηλαδή μία μαγνητική ροπή τείνει να ευθυγραμμιστεί αντίθετα από την γειτονική της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό μαγνητικό πεδίο να είναι σχεδόν μηδενικό [5]. Ωστόσο, με την αύξηση της θερμοκρασίας (πάνω από την θερμοκρασία Néel), αυτές οι ευθυγραμμίσεις μπορούν να διαταραχθούν, μετατρέποντας το υλικό σε παραμαγνητικό.

Παραδείγματα αντιφερρομαγνητικών υλικών είναι το μαγγάνιο (Mn), το οξείδιο του μαγγανίου (MnO) και ο αιματίτης (Fe₂O₃). Παρά το γεγονός ότι το Mn ανήκει στα στοιχεία μετάπτωσης, και θα μπορούσε να προσφέρει μεγαλύτερη μαγνήτιση, παρουσιάζει μεγαλύτερη πλεγματική απόσταση στις ενώσεις του, επομένως οι 3d στιβάδες του δεν αλληλεπιδρούν ή αλληλεπιδρούν ασθενώς, ώστε να παραλληλιστούν.

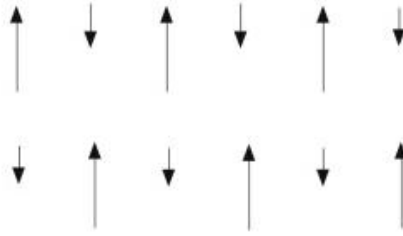


Εικόνα 5: Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροπών του αντιφερρομαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο [11].

- Φερριμαγνητικά Υλικά

Τα φερριμαγνητικά υλικά είναι παρόμοια με τα αντιφερρομαγνητικά, αλλά οι μαγνητικές ροπές των γειτονικών ατόμων δεν είναι ίσες σε μέγεθος και έτσι το υλικό μπορεί να παρουσιάσει συνολική μαγνήτιση [5]. Τα φερριμαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως μαγνητικοί πυρήνες λόγω της ισχυρής μαγνήτισης τους και των χαμηλών απωλειών.

Παραδείγματα φερριμαγνητικών υλικών αποτελούν ο μαγνητίτης (Fe₃O₄) και οι φερρίτες, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικές εφαρμογές.



Εικόνα 6: Αναπαράσταση της διεύθυνσης των μαγνητικών ροών του φερριμαγνητικού υλικού κατά την διέγερση από εξωτερικό πεδίο[11].

2.2.3. Κατηγοριοποίηση με βάση την σκληρότητα

Τα φερρομαγνητικά υλικά ταξινομούνται περαιτέρω με κριτήριο την τιμή του συνεκτικού τους πεδίου. Ο συσχετισμός της σκληρότητας με το συνεκτικό πεδίο του κάθε υλικού, προήλθε κατόπιν της παρατήρησης ότι υλικά με μεγάλη σκληρότητα παρουσίαζαν υψηλή τιμή συνεκτικού πεδίου, ενώ το αντίθετο παρατηρήθηκε σε υλικά με μικρότερη σκληρότητα.

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά έχουν μεγάλο συντελεστή απομαγνήτισης και υπολειμματική μαγνήτιση. Όπως περιγράφεται παραπάνω, τα σκληρά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μεγάλο συνεκτικό πεδίο και εμβαδό επιφάνειας, καθιστώντας τα ιδανικά για τη δημιουργία μόνιμων μαγνητών και για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας.

Αντιθέτως τα μαλακά μαγνητικά υλικά έχουν μικρό συντελεστή απομαγνήτισης και υπολειμματική μαγνήτιση, επομένως μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα. Παρουσιάζουν μικρές απώλειες ισχύος ανά κύκλο, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη μαγνήτιση και απομαγνήτιση, όπως στους πυρήνες μετασχηματιστών. Επιπλέον, λόγω του μικρού εμβαδού επιφάνειας του βρόχου και του μικρού συνεκτικού πεδίου, γίνεται αντιληπτό ότι τα μαλακά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στις αλλαγές της μαγνήτισης, θέτοντάς τα ως ιδανικά για εφαρμογές σε διατάξεις μαγνητικών αισθητήρων.

Ενδεικτικά, τα σκληρά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν συνεκτικό πεδίο μεγαλύτερο από 10kA/m ενώ τα μαλακά μαγνητικά έχουν τιμές συνεκτικού πεδίου μικρότερες από 1kA/m.

2.3. Μαγνητικές Περιοχές και Μαγνητικά Τοιχώματα

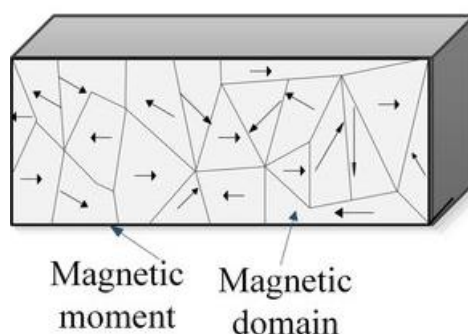
Τα μαγνητικά υλικά θεωρείται ότι αποτελούνται από επιμέρους ατομικές μαγνητικές περιοχές. Ως μαγνητικές περιοχές ορίζονται οι μικρότερες περιοχές του υλικού στις οποίες οι μαγνητικές ροπές ή τα μαγνητικά δίπολα είναι διατεταγμένα παράλληλα μεταξύ τους. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται περιοχές Weiss. Τα μαγνητικά τοιχώματα (ή τοιχώματα περιοχής) είναι λεπτές ζώνες μέσα σε φερρομαγνητικά υλικά όπου αλλάζει βαθμιαία η κατεύθυνση της μαγνήτισης από τη μία μαγνητική περιοχή στην άλλη. Αυτές οι ζώνες παίζουν κεντρικό ρόλο στις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών, ειδικά στη διαδικασία της μαγνήτισης και απομαγνήτισης.

2.3.1. Μαγνητικές Περιοχές

Ο σχηματισμός των μαγνητικών περιοχών είναι αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης της ελεύθερης ενέργειας [12]. Σε αυτή την κατάσταση υπάρχουν περιοχές μερικών nm με διαφορετική διεύθυνση μαγνήτισης, η οποία ονομάζεται αυθόρμητη μαγνήτιση και συμβαίνει κατά την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η αυθόρμητη μαγνήτιση σε κάθε περιοχή ισούται με την μαγνήτιση κορεσμού του υλικού στους 0 K. Η τιμή της αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται στη θερμοκρασία Curie. Η διεύθυνσή της συνήθως ταυτίζεται με έναν από του εύκολους κρυσταλλογραφικούς άξονες του υλικού.

Ουσιαστικά η ελαχιστοποίηση της ενέργειας του υλικού, και κατά συνέπεια η δημιουργία των μαγνητικών περιοχών, στηρίζεται στην ισορροπία των βασικών ενεργειών που διέπουν την μαγνήτιση των υλικών, χωρίς όμως να είναι απαραίτητο η κάθε μία από τις ενέργειες του αθροίσματος να λάβει την ελάχιστη τιμή της [8].

Αυξομειώσεις των παραπάνω ενεργειών οδηγούν σε παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος.



Εικόνα 7: Διαμόρφωση μαγνητικών περιοχών και μαγνητικών τοιχωμάτων [13].

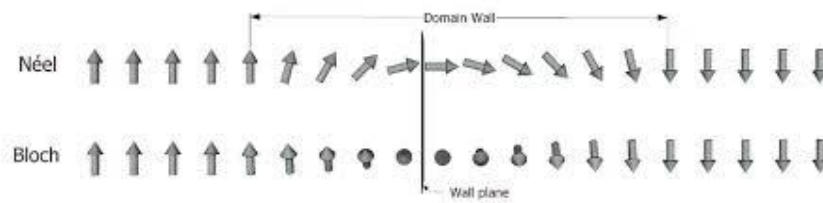
2.3.2. Μαγνητικά Τοιχώματα

Τα μαγνητικά τοιχώματα διαχωρίζουν γειτονικές μαγνητικές περιοχές μέσα σε ένα υλικό όπου η μαγνήτιση είναι ομοιόμορφη, αλλά με διαφορετική κατεύθυνση σε κάθε περιοχή [6]. Η μαγνήτιση μέσα σε κάθε περιοχή είναι σχεδόν πλήρως ευθυγραμμισμένη, αλλά στις ζώνες όπου αυτές οι περιοχές συναντώνται, η μαγνήτιση στρέφεται σταδιακά κατά γωνία ίση με $\delta\theta$ ώστε να αλλάξει προσανατολισμό, έως ότου γίνει παράλληλη με την κατεύθυνση της μαγνήτισης της γειτονικής περιοχής. Το πάχος του μαγνητικού τοιχώματος είναι της τάξης των μερικών nm έως δεκάδων nm, και εξαρτάται από την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της μαγνητοστατικής ενέργειας βραχείας και μακράς κλίμακας και της μαγνητοστατικής ενέργειας του μαγνητικού τοιχώματος.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μαγνητικών τοιχωμάτων:

- Τοιχώματα Néel: Σε λεπτά φιλμ ή σε υλικά με σημαντική ανισοτροπία, τα τοιχώματα Néel είναι πιο συνήθη. Εδώ, η μαγνήτιση στρέφεται σε ένα επίπεδο παράλληλο στο τοίχωμα, αλλά κάθετα στη διεύθυνση του τοιχώματος [8].
- Τοιχώματα Bloch: Σε τρισδιάστατα φερρομαγνητικά υλικά, τα τοιχώματα Bloch είναι τα πιο συνηθισμένα. Σε αυτά, η μαγνήτιση περιστρέφεται ομαλά

μέσα στο τοίχωμα, παραμένοντας κατά κύριο λόγο παράλληλη στο επίπεδο του τοιχώματος.



Εικόνα 8: (πάνω) Στροφή του διανύσματος μαγνήτισης γύρω από το τοίχωμα Néel, (κάτω) Στροφή του διανύσματος μαγνήτισης γύρω από το τοίχωμα Bloch [14].

2.3.3. Ενεργειακές Καταστάσεις

Υπάρχουν διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις των φερρομαγνητικών υλικών, οι οποίες καθορίζουν την μαγνητική δομή τους [5]. Όπως αναφέρεται παραπάνω, ο σχηματισμός των μαγνητικών περιοχών είναι το αποτέλεσμα της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των ακόλουθων πέντε βασικών ενεργειών [15] που σχετίζονται με τον φερρομαγνητισμό:

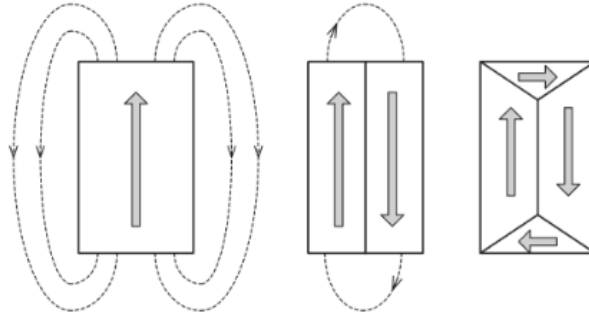
$$E = E_{\text{μαγνητοστατική}} + E_{\text{ανταλλαγής}} + E_{\text{μαγνητοκρυσταλλική}} \quad (2.4) \\ + E_{\text{μαγνητοελαστική}} + E_{\text{τοιχωμάτων}}$$

Αυτές οι ενεργειακές καταστάσεις περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

- Μαγνητοστατική Ενέργεια

Η μαγνητοστατική ενέργεια U_{mag} του υλικού προέρχεται από ασυνέχειες στην κάθετη συνιστώσα της μαγνήτισης σε μια διεπιφάνεια, και είναι η ενέργεια που τείνει να προσανατολίσει τα σπιν στις διεπιφάνειες με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείνουν οι μαγνητικές γραμμές και να μην προκύπτουν μονόπολα [5].

Όταν έχουμε μια μαγνητισμένη ράβδο ενός φερρομαγνητικού υλικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9, η μαγνήτιση του υλικού είναι αντίθετη με το πεδίο που δημιουργείται έξω από αυτήν.



Εικόνα 9: Χωρισμός του υλικού σε μαγνητικές περιοχές, για την μείωση της μαγνητοστατικής ενέργειας[43].

Το εικονιζόμενο εξωτερικό πεδίο ονομάζεται πεδίο απομαγνήτισης (demagnetizing field, H_d), καθώς τείνει να απομαγνητίσει την ράβδο. Το πεδίο αυτό δημιουργείται από την μαγνήτιση του υλικού, και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H_d = N_d \cdot M \quad (2.4)$$

Όπου N_d είναι ο απομαγνητίζων παράγοντας και καθορίζεται από το σχήμα του δείγματος, και M είναι η μαγνήτιση του υλικού. Αν οι παράγοντες αυτοί είναι μεγάλοι, τότε απαιτούνται μεγάλα πεδία για την μαγνήτιση του υλικού ακόμη και αν το υλικό έχει μεγάλη επιδεκτικότητα.

Ουσιαστικά πρόκειται για την αλληλεπίδραση των ελεύθερων μαγνητικών διπόλων στον χώρο και η ενέργεια αυτή τείνει να αποδιοργανώσει τις μαγνητικές ροπές. Σε ένα μαγνητοστατικό σύστημα n ελεύθερων πόλων έντασης m , με μαγνητικό ϕ σε κάθε θέση, η συνολική δυναμική ενέργεια δίνεται από την εξίσωση:

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \phi_i \quad (2.5)$$

Η μαγνητοστατική ενέργεια του υλικού μειώνεται αν μειωθεί το εξωτερικό πεδίο απομαγνήτισης. Η μείωση αυτή συνήθως επιτυγχάνεται με τον χωρισμό του υλικού σε μαγνητικές περιοχές. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 9, με τον χωρισμό της ράβδου σε δυο περιοχές, ήδη το εξωτερικό πεδίο έχει μειωθεί, οπότε αποθηκεύει και λιγότερη μαγνητοστατική ενέργεια.

Οι μαγνητικές ροπές στο όριο των δυο περιοχών είναι αντιπαράλληλες, οπότε με την δημιουργία περισσότερων περιοχών εντός του υλικού αυξάνεται η ενέργεια ανταλλαγής. Για να μειωθεί περαιτέρω η μαγνητοστατική ενέργεια, έως τον μηδενισμό της, οι περιοχές θα πρέπει να χωριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αφήνουν μαγνητικούς πόλους στην επιφάνεια του δείγματος. Αυτή η διαμόρφωση είναι προτιμότερη διότι έτσι εξουδετερώνεται το απομαγνητίζον πεδίο και η μαγνητοστατική ενέργεια χωρίς να αυξάνεται η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπική ενέργεια.

- Ενέργεια Αλληλεπίδρασης ή Ανταλλαγής

Η ενέργεια αλληλεπίδρασης ή ανταλλαγής U_{ex} , είναι η ενέργεια που τείνει να ευθυγραμμίσει ομόρροπα δυο γειτονικά σπιν και τα αναγκάζει να παραμείνουν μεταξύ τους παράλληλα. Όταν έχουμε δυο γειτονικά άτομα με σπιν, αυτά αλληλεπιδρούν ηλεκτροστατικά λόγω ίδιων φορτίων των ηλεκτρονίων, και προκειμένου να βρίσκονται κοντά αυτά τα φορτία απαιτείται ενεργειακό κόστος, δηλαδή η ενέργεια αλληλεπίδρασης. Στην περίπτωση των φερρομαγνητικών υλικών η ενέργεια ελαχιστοποιείται με την παράλληλη ευθυγράμμιση των σπιν των γειτονικών ατόμων.

- Μαγνητοκρυσταλλική Ενέργεια

Άλλη μια κατηγορία ενεργειακής κατάστασης αποτελεί η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια U_a , η οποία περιγράφει την εξάρτηση της εσωτερικής ενέργειας στην κατεύθυνση του κρυσταλλογραφικού άξονα μαγνήτισης, στους φερρομαγνητικούς κρυστάλλους [5]. Οι διευθύνσεις που προτιμώνται ονομάζονται εύκολοι άξονες μαγνήτισης, διότι όταν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, κατά μήκος των διευθύνσεων αυτών επιτυγχάνεται ευκολότερα και γρηγορότερα η μαγνήτιση κόρου. Ο λόγος που υπάρχουν προτιμώμενες διευθύνσεις είναι ότι ο κρύσταλλος έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις όταν μαγνητίζεται ως προς τον δύσκολο άξονα. Η διαφορά ενέργειας ανά μονάδα όγκου ανάμεσα σε δείγματα που είναι μαγνητισμένα στις δυο κατευθύνσεις αποτελεί την μαγνητοκρυσταλλική

ενέργεια του υλικού. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αυτή η ενέργεια, οι μαγνητικές περιοχές σχηματίζονται με τέτοιον τρόπο, ώστε οι μαγνητίσεις τους να προσανατολίζονται προς τους εύκολους άξονες μαγνήτισης.

Οι άξονες μαγνήτισης του κρυστάλλου καθορίζονται από τον τρόπο κρυστάλλωσης του κάθε υλικού. Στους fcc (face centered cubic) ο εύκολος άξονας βρίσκεται στην διεύθυνση $\langle 111 \rangle$.

Καθώς η ενέργεια της μαγνητικής ανισοτροπίας ακολουθεί συνήθως την ίδια συμμετρία με την κρυσταλλική δομή του υλικού, η ενέργεια αυτή είναι ταυτόσημη με την μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία.

- Μαγνητοελαστική Ενέργεια

Τέλος, η μαγνητοελαστική ενέργεια U_m , είναι η ενέργεια που οφείλεται στην μαγνητοελαστική συμπεριφορά του υλικού. Στηρίζεται δηλαδή στην τάση των φερρομαγνητικών υλικών να κάνουν μικρές αλλαγές στο μήκος τους όταν τους επιβάλλεται κάποια μαγνητική διέγερση, καθώς επηρεάζεται και η δομή των μαγνητικών περιοχών [5]. Όταν ένα υλικό επιμηκύνεται σύμφωνα με την διεύθυνση της μαγνήτισης, θα έχει θετική μαγνητοελαστική ενέργεια, ενώ όταν θα συρρικνώνεται θα έχει αρνητική μαγνητοελαστική ενέργεια.

- Ενέργεια Μαγνητικών Τοιχωμάτων

Η ενέργεια των μαγνητικών τοιχωμάτων στηρίζεται στον μη παράλληλο προσανατολισμό των μαγνητικών διπόλων μεταξύ τους ή ως προς τον εύκολο άξονα μαγνήτισης, και ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας των μαγνητικών τοιχωμάτων.

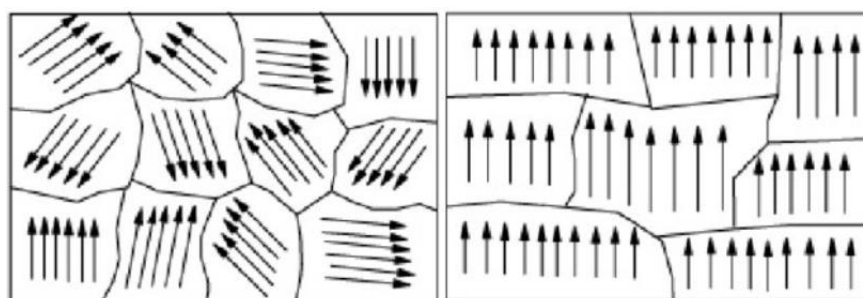
2.4. Διαδικασία Μαγνήτισης

Η μαγνήτιση ενός φερρομαγνητικού υλικού οφείλεται κυρίως στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων και στην περιστροφή των μαγνητικών ροπών των

μαγνητικών περιοχών του υλικού. Κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έντασεως H στο υλικό, τα μαγνητικά τοιχώματα αρχίζουν να κινούνται, αυξάνοντας τον όγκο της μαγνητικής περιοχής που είναι παράλληλη ή σχετικά παράλληλη με το H , μειώνοντας ταυτόχρονα ισόποσα τον όγκο της περιοχής που είναι αντιπαράλληλη με αυτό, αυξάνοντας έτσι την συνολική μαγνήτιση [8].

Σε ιδανικές συνθήκες, χωρίς ατέλειες στο υλικό, η διαδικασία αυτή είναι ανυστερητική. Ωστόσο, οι ατέλειες στο υλικό μπορούν να αγκυρώσουν τα μαγνητικά τοιχώματα, απαιτώντας μεγαλύτερη ένταση πεδίου για να τα απελευθερώσουν. Αυτό προκαλεί υστερητική απόκριση και το φαινόμενο του θορύβου Barkhausen.

Όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται περαιτέρω, οι μαγνητικές ροπές περιστρέφονται ξαφνικά προς τη διεύθυνση του πεδίου, ξεπερνώντας την ενέργεια ανισοτροπίας του υλικού. Σε ακόμη μεγαλύτερα πεδία, το υλικό φτάνει στην κατάσταση κορεσμού, όπου όλες οι μαγνητικές ροπές είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες με το πεδίο. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει υστέρηση, ειδικά κατά την απομαγνήτιση του υλικού, όπου χρειάζεται αντίστροφο πεδίο για την πλήρη απομαγνήτιση του. Οι υστερητικές διεργασίες προκαλούνται από τις ατέλειες του υλικού, που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των τοιχωμάτων και τον βρόχο υστέρησης του μαγνητικού υλικού.



Εικόνα 10: (αριστερά) Τυχαίος προσανατολισμός ροπών μαγνητικών περιοχών κατά την απουσία πεδίου, (δεξιά) Στροφή και παραλληλισμός των ροπών των μαγνητικών ροπών με το επιβαλλόμενο πεδίο [16].

Οι αλλαγές στη μαγνήτιση μπορεί να είναι αντιστρεπτές ή μη αντιστρεπτές, ανάλογα με την ένταση του μαγνητικού πεδίου και τις ιδιότητες του υλικού. Σε χαμηλά πεδία, παρατηρούνται συνήθως αντιστρεπτές μεταβολές, όπου η μαγνήτιση επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση όταν απομακρύνεται το πεδίο. Ωστόσο, σε μεγαλύτερα πεδία, λαμβάνουν χώρα μη αντιστρεπτές μεταβολές, όπου οι μαγνητικές

περιοχές αλλάζουν κατεύθυνση και παραμένουν ευθυγραμμισμένες ακόμα και μετά την απομάκρυνση του πεδίου, οδηγώντας σε υστέρηση στη μαγνήτιση.

2.5. Κίνηση Μαγνητικών Τοιχωμάτων

Καθώς εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τα μαγνητικά τοιχώματα κινούνται για να αυξήσουν την έκταση των περιοχών που είναι ευθυγραμμισμένες με το πεδίο. Η κίνηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί είτε με την παράλληλη μετατόπιση των τοιχωμάτων, είτε με την μετατόπιση με κυρτότητα.

Η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε διακριτά βήματα, που συνδέονται με την υπερνίκηση των ενεργειακών φραγμάτων εντός του υλικού, όπως οι ανωμαλίες στην κρυσταλλική δομή ή οι ανωμαλίες στο υλικό.

Η κίνηση των τοιχωμάτων είναι συχνά πιο περίπλοκη και μη γραμμική, λόγω της αλληλεπίδρασης με ανωμαλίες και της ύπαρξης φαινομένων όπως το άλμα Barkhausen, που προκαλεί απότομες και ασυνεχείς αλλαγές στη μαγνήτιση.

Η παράλληλη μετατόπιση των τοιχωμάτων είναι συνήθως μη αντιστρεπτή, εκτός αν το υλικό είναι καθαρό από ατέλειες. Η μετατόπιση αυτή εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Όταν το πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, το τοίχωμα αποσπάται από τις αγκυρώσεις του και κινείται μη αντιστρεπτά, χωρίς να επιστρέφει στην αρχική του θέση μετά την απομάκρυνση του πεδίου.

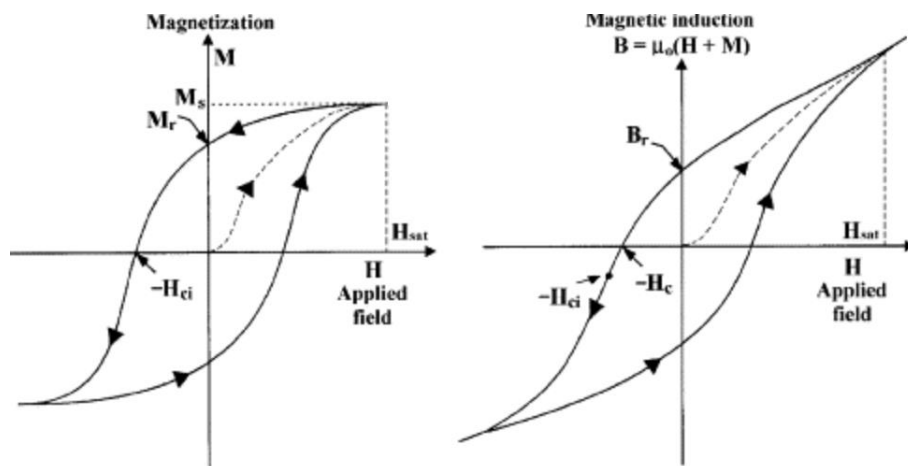
Η μετατόπιση με κυρτότητα, είναι αντιστρεπτή για μικρά πλάτη πεδίων. Το τοίχωμα συμπεριφέρεται σαν ελαστική μεμβράνη που επεκτείνεται υπό την επίδραση του πεδίου και επανέρχεται στην αρχική του θέση όταν το πεδίο απομακρύνεται. Η καμπύλωση του τοιχώματος εξαρτάται από την ένταση του πεδίου και την ενέργεια των μαγνητικών τοιχωμάτων, με τα υψηλής ενέργειας τοιχώματα να μην καμπυλώνονται εύκολα.

Σε περιπτώσεις ισχυρού πεδίου, η κυρτότητα μπορεί να γίνει μη αντιστρεπτή και το τοίχωμα να μετατοπιστεί σε νέα σημεία ισορροπίας λόγω της απώλειας αγκυρώσεων.

3. Βρόχος Υστέρησης

Όλες οι προαναφερόμενες ποσότητες που επηρεάζουν τις ιδιότητες των υλικών, συγκεντρώνονται στο διάγραμμα του βρόχου υστέρησης. Ο βρόχος υστέρησης είναι μια γραφική αναπαράσταση της μαγνητικής απόκρισης ενός φερρομαγνητικού υλικού σε σχέση με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου [17].

Συγκεκριμένα, απεικονίζει την εξάρτηση της μαγνήτισης (M) ή της μαγνητικής επαγωγής (B) του υλικού από την ένταση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (H). Τα σημεία ενδιαφέροντος που είτε φαίνονται άμεσα είτε υπολογίζονται από τον βρόχο υστέρησης είναι το συνεκτικό πεδίο, η μαγνήτιση κόρου, η παραμένουσα μαγνήτιση, η μαγνητική διαπερατότητα και η ενέργεια μαγνήτισης-απομαγνήτισης του υλικού.

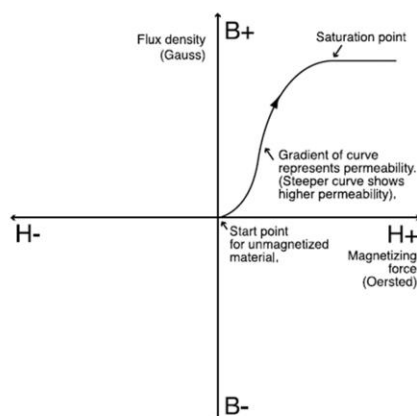


Εικόνα 11: (αριστερά) Βρόχος υστέρησης M - H , (δεξιά) βρόχος υστέρησης B - H [18].

3.1. Σχηματισμός του βρόχου υστέρησης

Για να σχηματιστεί ο βρόχος υστέρησης, το υλικό υποβάλλεται σε ένα κυκλικό μαγνητικό πεδίο. Αρχικά, όταν το πεδίο είναι μηδενικό, το υλικό μπορεί να έχει ή να μην έχει μαγνήτιση. Στα πρώτα στάδια μαγνήτισής του, και συγκεκριμένα στην καμπύλη της παρθενικής μαγνήτισης, όπου τα πεδία είναι χαμηλά, η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων χαρακτηρίζεται ως αντιστρεπτή, δηλαδή μπορούν να

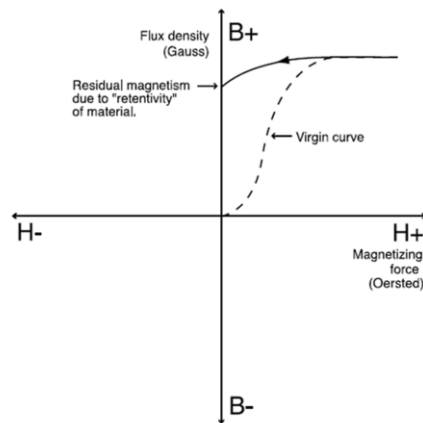
απαγκιστρωθούν από τα σημεία αγκύρωσης και να επιστρέψουν στην αρχική τους κατάσταση, χωρίς την συμβολή κάποιας εξωτερικής διέγερσης.



Εικόνα 12: Σχηματισμός θρόχου υστέρησης: καμπύλη παρθενικής μαγνήτισης.

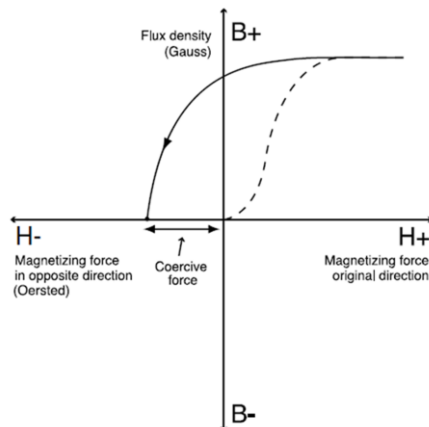
Έπειτα, όσο το πεδίο αυξάνεται, τα μαγνητικά τοιχώματα προσπερνάνε τα σημεία αγκύρωσης (άλματα Barkhausen) και η κίνηση τους πλέον χαρακτηρίζεται ως μη αντιστρεπτή. Αφότου ξεπεραστούν αυτά τα όρια, παρατηρείται η ευνοϊκότερη διεύρυνση των μαγνητικών περιοχών που έχουν μαγνητικές ροπές σύμφωνες με την διεύθυνση του πεδίου. Η περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου, εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διεύρυνση των ευνοϊκά προσανατολισμένων μαγνητικών περιοχών, οδηγεί στην περιστροφή των μαγνητικών διπόλων, ώστε να παραλληλίζονται με το επιβαλλόμενο πεδίο. Κατά την ολοκλήρωση της περιστροφής των μαγνητικών διπόλων, το υλικό τείνει να γίνει εξολοκλήρου μια ομοιόμορφα προσανατολισμένη μαγνητική περιοχή και λαμβάνει την μέγιστη τιμή μαγνήτισης, την μαγνήτιση κόρου (MS), βρίσκεται δηλαδή σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού.

Με την χρήση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (συνεκτικό πεδίο HC), το υλικό απομαγνητίζεται από την κατάσταση κορεσμού παρουσιάζοντας υστερητική συμπεριφορά [19].



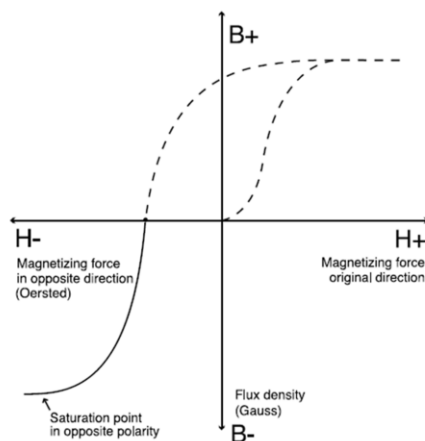
Εικόνα 13: Σχηματισμός θρόχου υστέρησης: Υστερητική συμπεριφορά πεδίου λόγω απομαγνήτισης.

Κατά την διάρκεια της απομαγνήτισης, κάποια στιγμή οι μαγνητικές περιοχές θα διαταχθούν με τέτοιον τρόπο όπου η συνισταμένη δύναμη θα είναι μηδενική. Όταν το πεδίο μειωθεί στο μηδέν, το υλικό δεν απομαγνητίζεται πλήρως, αλλά διατηρεί ένα ποσοστό της μαγνήτισής του, την παραμένουσα μαγνήτιση (B_R).



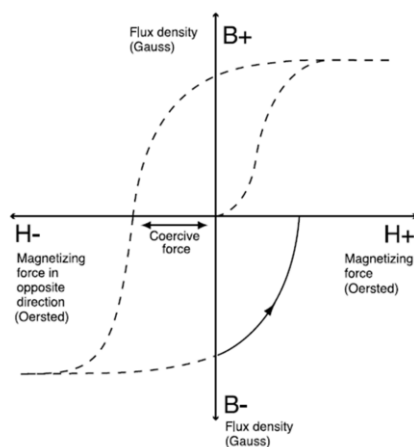
Εικόνα 14: Σχηματισμός θρόχου υστέρησης: Μηδενισμός πεδίου.

Καθώς το αντίστροφο πεδίο συνεχίζει να αυξάνεται, η μαγνήτιση αυξάνεται στην αντίθετη κατεύθυνση, φτάνοντας και πάλι σε ένα σημείο κορεσμού.



Εικόνα 15: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: Αύξηση αντίστροφου πεδίου μέχρι τον κορεσμό.

Η ίδια διαδικασία συμβαίνει κατά την επιστροφή του πεδίου στην αρχική του κατεύθυνση, δημιουργώντας τον χαρακτηριστικό βρόχο.



Εικόνα 16: Σχηματισμός βρόχου υστέρησης: επιστροφή πεδίου στην αρχική κατεύθυνση και επανάληψη διαδικασίας.

Το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι ενδεικτικό της ποσότητας ενέργειας που χάνεται σε έναν κύκλο μαγνήτισης λόγω θερμικής απώλειας, γνωστής ως απώλεια υστέρησης.

Η τιμή της μαγνήτισης κορεσμού είναι πάντα σταθερή για ένα σιδηρομαγνητικό υλικό [17]. Ωστόσο η καμπύλη της αρχικής μαγνήτισης μεταβάλλεται στο ίδιο υλικό, ανάλογα με τις κατεργασίες και τις καταπονήσεις που έχει δεχθεί. Όταν το υλικό

χαρακτηρίζεται από την τιμή της μαγνήτισης κορεσμού, τότε ο αντίστοιχος βρόχος θεωρείται ο κύριος βρόχος, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θεωρείται ελάσσονας βρόχος [20].

3.2. Τα αίτια της υστέρησης

Όταν ένα φερρομαγνητικό υλικό υποστεί κάποια μηχανική κατεργασία ή πρόσμιξη με άλλα μη μαγνητικά υλικά, αλλάζουν οι ιδιότητές του όπως οι απώλειες υστέρησης και το συνεκτικό πεδίο [2].

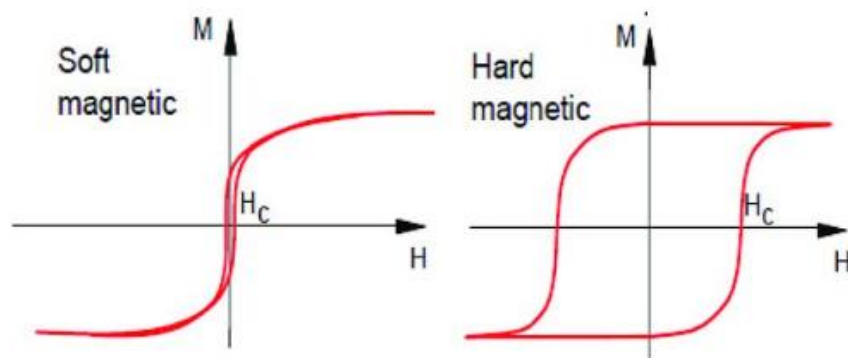
Κατά την διάρκεια αυτών των διεργασιών, δημιουργούνται στο υλικό επιφανειακές ατέλειες ή ατέλειες στην μικροδομή οι οποίες μεταβάλλουν περαιτέρω τις ενεργειακές απώλειες κατά την διάρκεια της μαγνήτισης. Το φαινόμενο της υστέρησης στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη αυτών των ατελειών.

Επιπλέον, η ύπαρξη της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας στα υλικά, παρακινεί την ευθυγράμμιση των μαγνητικών διπόλων με τους διάφορους κρυσταλλογραφικούς άξονες του υλικού, ακόμη και με την απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Κατόπιν της επιβολής εξωτερικού πεδίου, τα μαγνητικά δίπολα στρέφονται ώστε να παραλληλιστούν με το πεδίο, πλην των διπόλων όπου ο κρυσταλλογραφικός τους άξονας παρουσιάζει πολύ μικρή γωνία με το πεδίο. Αυτή η ασυνεχής μη αναστρέψιμη περιστροφή των διπόλων, ευνοεί την υστερητική συμπεριφορά της μαγνήτισης.

3.3. Χαρακτηρισμός Υλικών από τον Βρόχο Υστέρησης

Η μορφή του βρόχου υστέρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως δείκτης για την σκληρότητα ενός υλικού. Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, η σκληρότητα ενός φερρομαγνητικού υλικού συσχετίζεται άμεσα με το συνεκτικό πεδίο και το ενεργειακό γινόμενο $B-H$ κατά την διάρκεια της μαγνήτισης. Καθώς τα μαλακά μαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μικρό συνεκτικό πεδίο και χαμηλές ενεργειακές απώλειες, αναμένεται ότι ο βρόχος υστέρησής τους θα είναι

μακρόστενος. Αντιθέτως, εφόσον τα σκληρά μαγνητικά υλικά, έχουν μεγάλο συνεκτικό πεδίο και μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλα ποσά ενέργειας [8], ο βρόχος υστέρησης τους είναι πεπλατυσμένος.



Εικόνα 17: (αριστερά) Βρόχος υστέρησης μαλακού μαγνητικού υλικού, (δεξιά) βρόχος υστέρησης σκληρού μαγνητικού υλικού [44].

4. Καταστρεπτικές και Μη Καταστρεπτικές μελέτες

Στην σύγχρονη βιομηχανία, οι καταστρεπτικοί και μη καταστρεπτικοί έλεγχοι των υλικών είναι θεμελιώδεις μέθοδοι ποιοτικού ελέγχου, που διασφαλίζουν την τήρηση βασικών κριτηρίων ασφαλείας σε υλικά που έχουν υποστεί μηχανικές κατεργασίες. Τα κριτήρια αυτά υπαγορεύονται από διεθνή πρότυπα και ο έλεγχος και η τήρησή τους διασφαλίζεται από εκπαιδευμένο προσωπικό με την χρήση πιστοποιημένων μεθόδων και μηχανών. Βασικός στόχος των ελέγχων αυτών είναι η δειγματοληπτική μελέτη των αντοχών/ορίων των υλικών, με απώτερο στόχο τον εντοπισμό και την εξάλειψη των ατελειών.

4.1. Καταστρεπτικές Μελέτες

Οι καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου χρησιμοποιούνται ευρέως για ανάλυση σφάλματος, επικύρωση διαδικασιών και χαρακτηρισμό υλικών, και αποτελούν βασικό κριτήριο κρίσιμων μηχανικών αξιολογήσεων [17]. Συνήθως είναι πιο ακριβείς μέθοδοι, καθώς παρέχουν λεπτομερή δεδομένα για την απόδοση και την αντοχή του υλικού.

Πρόκειται για ανάλυση όπου τα υλικά παραμορφώνονται ή καταστρέφονται πλήρως έτσι ώστε να παρατηρηθεί πως αντιδρούν σε συνθήκες πίεσης, προκειμένου να βρεθούν οι οριακές συνθήκες λειτουργίας τους. Ως αποτέλεσμα των καταστρεπτικών μελετών μπορούν να συσταθούν οι απαραίτητες οδηγίες λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης του εκάστοτε υλικού.

Οι καταστρεπτικοί έλεγχοι διεξάγονται πριν την εκκίνηση της μαζικής παραγωγής, σε μικρή ποσότητα υλικών, ώστε να αποφευχθούν λειτουργικά σφάλματα και να ανιχνευθούν τα ελαττώματα σε πρώιμο στάδιο.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους καταστρεπτικού ελέγχου.

- Δοκιμή Εφελκυσμού (Tensile Testing)

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι μία από τις πιο διαδεδομένες καταστροφικές δοκιμές και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής του υλικού σε εφελκυσμό [17]. Στη διαδικασία αυτή, ένα δείγμα υπόκειται σε αυξανόμενη δύναμη έως ότου ραγίσει, παρέχοντας πληροφορίες για την αντοχή, την αντοχή στη θραύση και την επιμήκυνση του υλικού.

- Δοκιμή Κρούσης (Impact Testing)

Η δοκιμή κρούσης μετρά την ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια και να αντιστέκεται σε θραύση υπό ταχεία φόρτιση [17]. Διεξάγεται με την εφαρμογή αιφνίδιου φορτίου σε ένα δείγμα, χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα, ένα εκκρεμές τύπου Charpy. Αυτή η δοκιμή είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της σκληρότητας του υλικού.

- Δοκιμή Σκληρότητας (Hardness Testing)

Η δοκιμή σκληρότητας αξιολογεί την αντίσταση ενός υλικού στην παραμόρφωση υπό εφαρμογή δύναμης [17]. Κοινές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη μέθοδο Brinell, τη μέθοδο Rockwell και τη μέθοδο Vickers, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετική μορφή εφαρμογής δύναμης και μετρά την επιφανειακή βλάβη.

- Δοκιμή Κόπωσης (Fatigue Testing)

Η δοκιμή κόπωσης αφορά την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή φορτίου σε ένα δείγμα για την αξιολόγηση της αντοχής του σε κυκλική φόρτιση. Αυτή η δοκιμή είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της μακροπρόθεσμης αντοχής των υλικών και τη διάρκεια ζωής τους υπό επαναλαμβανόμενη χρήση [17].

4.2. Μη Καταστρεπτικές Μελέτες

Οι Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι (ΜΚΕ) ή Μη καταστροφικές δοκιμές (ΜΚΔ) συμπεριλαμβάνουν μια κατηγορία τεχνικών ανάλυσης με ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή σε πολλούς τομείς των μηχανικών επιστημών, όπως σε περιπτώσεις ελέγχου κτιριακών εγκαταστάσεων, στην εξέταση βιομηχανικών εγκαταστάσεων και γενικότερα μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, στην εξέταση της υπάρχουσας κατάστασης αλλά και των επεμβάσεων συντήρησης σε πολιτισμικά έργα.

Ο όρος του μη καταστρεπτικού ελέγχου αναφέρεται στον έλεγχο ενός αντικειμένου με μεθοδολογίες, οι οποίες δεν επηρεάζουν τη μελλοντική χρησιμότητά του [21]. Δηλαδή, οι τεχνικές αυτές, αποσκοπούν στον καθορισμό ορισμένων ιδιοτήτων -χαρακτηριστικών του υλικού, που συνδέονται έμμεσα με την αντοχή και την λειτουργικότητά του, χωρίς την πρόκληση φθορών. Οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα, στην αεροπορική βιομηχανία, στην ενέργεια, στη ναυτιλία και αλλού.

Η εδραίωση των ΜΚΕ ως μιας αξιόπιστης τεχνολογίας μελέτης των υλικών και των κατασκευών, αλλά και η προτίμηση ως προς αυτές συγκριτικά με τις καταστρεπτικές μελέτες, οφείλεται σε ένα πλήθος πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Κάποια από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα μελέτης των υλικών χωρίς να μεταβάλλεται η φυσική τους κατάσταση, η δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων της υπό εξέτασης κατασκευής σε πλήρη λειτουργία, η δυνατότητα επιτόπου επιθεώρησης σε μεγάλες κατασκευές και η λήψη αξιόπιστων μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον η μεγάλη συμβολή των ΜΚΕ στον ποιοτικό έλεγχο των κατασκευών, και κατά συνέπεια η ευρύτατη χρήση τους, έχουν οδηγήσει στην κατάρτιση και την θέσπιση διεθνών προτύπων και κανονισμών.

Η βασική αρχή πίσω από τις τεχνικές ΜΚΕ στηρίζεται στην κατανόηση και στην γνώση της ιδιότητας του εξεταζόμενου υλικού, καθώς και στην κατανόηση του φαινομένου αλληλεπίδρασης του μετρητικού εξοπλισμού με το υπό εξέταση αντικείμενο. Επομένως η σχεδίαση μιας μη καταστρεπτικής μελέτης και η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής, πρέπει να γίνονται λαμβάνοντας υπόψη την φύση του υπό

διερεύνηση προβλήματος αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της πιθανότητας ανίχνευσης και λήψης σωστών αποτελεσμάτων. Ο καθορισμός λοιπόν του φυσικού φαινομένου που θα επηρεάσει και θα αλληλεπιδράσει με την μετρούμενη διάταξη, συντάσσει το βασικό κριτήριο για την επιλογή μιας ΜΚΕ και κατά συνέπεια μιας επιτυχούς επιθεώρησης. Βέβαια υπάρχουν και δευτερεύοντες παράγοντες που επίσης μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή μιας ΜΚΕ, που σχετίζονται με το κόστος εφαρμογής του ελέγχου, την απαίτηση για πλήρη λειτουργία του υπό εξέταση στόχου, την αμεσότητα ανάκτησης του αποτελέσματος-διάγνωσης και την καταλληλότητα των συνθηκών για επιτόπου μετρήσεις

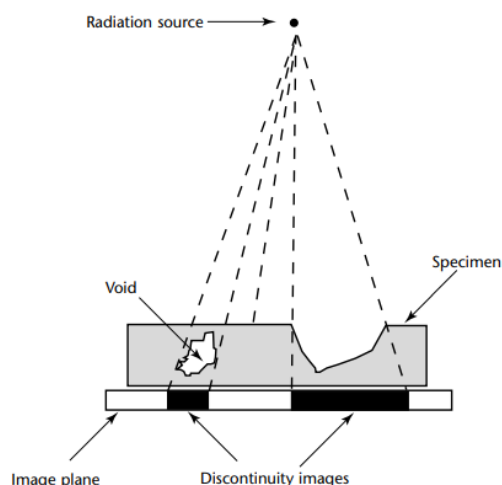
Τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους ΜΚΕ μεταλλικών κατασκευών θα τις ταξινομήσουμε βάσει του βάθους διείσδυσης της κάθε μεθόδου στο υπό εξέταση υλικό. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε τις μεθόδους επιφανειακού ελέγχου, οι οποίες εστιάζουν κυρίως στην ανίχνευση των ατελειών που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα, όπως είναι ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, ο φωσφορίζον έλεγχος, ο μαγνητοσκοπικός έλεγχος και ο έλεγχος με δινορρεύματα. Επιπλέον έχουμε τις μεθόδους εσωτερικού ελέγχου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ατελειών εντός του υλικού, οι οποίες δεν είναι ορατές στην επιφάνεια τους. Στις τεχνικές αυτές περιλαμβάνονται ο ακτινογραφικός έλεγχος με ακτίνες-Χ, ακτίνες-Γ ή νετρόνια, ο υπερηχογραφικός έλεγχος, η ακουστική εκπομπή, η θερμογραφία.

4.2.1. ΜΚΕ Εσωτερικού Ελέγχου

- Ραδιογραφικός Έλεγχος

Η τεχνική του ακτινογραφικού ελέγχου με ακτίνες Χ ή Γ, που ονομάζεται αντίστοιχα ραδιογραφία ακτίνων Χ ή Γ, είναι μια ευαίσθητη μέθοδος ανίχνευσης ρωγμών, ατελειών και κενών σε όλα τα υλικά, μεταλλικά και μη μεταλλικά ανεξαρτήτως σχήματος ή δομής. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο υπό μελέτη υλικό, όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και συγκρούονται σε αυτό [17]. Η ακτινοβολία διεισδύει σε αυτό και ανάλογα με την πυκνότητα και τη σύνθεσή του, απορροφάται ή διαχέεται, φαινόμενο

το οποίο καταγράφεται, παρέχοντας μια εικόνα που αποκαλύπτει τυχόν ατέλειες. Η συνολική διάταξη της ραδιογραφίας υλοποιείται τοποθετώντας το υλικό μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και του συστήματος ανίχνευσης.



Εικόνα 18: Συνήθης μετρητική διάταξη ραδιογραφικού ελέγχου [22].

Ο ραδιογραφικός έλεγχος, βασίζεται στη διαφορά πάχους διαδρομής της εκάστοτε ακτίνας λόγω διαφοράς πυκνότητας ή μεταβολής πάχους [22]. Έτσι, η διαφορετική απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα την απεικόνιση με διαφορετικό τρόπο στο μέσο αποτύπωσης. Οι ανιχνευόμενες ατέλειες εμφανίζονται ως περιοχές με διαφορετική απορρόφηση ακτινοβολίας, επιτρέποντας την ανάλυση του μεγέθους, του σχήματος και της θέσης τους. Τα σημεία με μεγαλύτερη πυκνότητα στην σύνθεση του υλικού απορροφούν περισσότερες ακτίνες, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σκοτεινά στην τελική εικόνα.

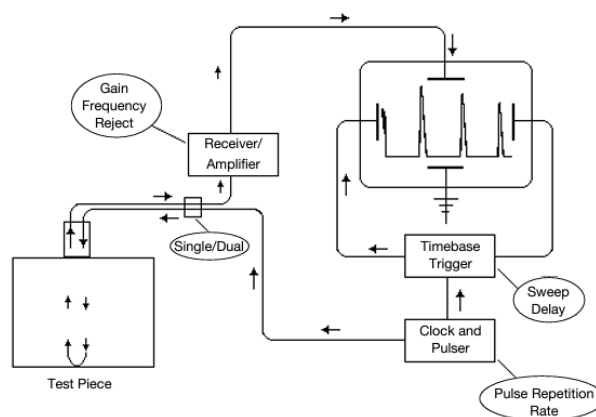
Η ραδιογραφία είναι εξαιρετική στην ανίχνευση ατελειών όπως πόρους, ρωγμές, εγκλεισμούς, συγκολλήσεις με κενά ή φυσαλίδες αέρα, και γενικά οποιαδήποτε ασυνέχεια στην πυκνότητα του υλικού. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος των ακτίνων τόσο μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης των ακτίνων.

Μια ακόμη περίπτωση ραδιογραφικού ελέγχου αποτελεί η ραδιογραφία με χρήση νετρονίων, όπου η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αντικαθίσταται με την χρήση δέσμης νετρονίων (νετρονιογραφία), δημιουργώντας έτσι τις εικόνες της εσωτερικής δομής των υλικών.

- Υπερηχογραφικός Έλεγχος

Ο υπερηχογραφικός έλεγχος αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους ΜΚΕ, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανίχνευση εσωτερικών και επιφανειακών ατελειών. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στην εκπομπή υπερηχητικών κυμάτων υψηλών συχνοτήτων, τα οποία μεταδίδονται από έναν πομπό προς το εσωτερικό του υλικού. Μέρος της μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων ανακλάται στην περιοχή ύπαρξης μιας ατέλειας, ρωγμής, κενού ή άλλης ανομοιομορφίας [17]. Οι αντανakλάσεις αυτές εντοπίζονται και αναλύονται για να προσδιοριστεί η παρουσία και η θέση των ατελειών.

Μια βασική διάταξη υπερηχογραφικού ελέγχου, απαρτίζεται από μια πηγή υπερηχητικών κυμάτων, συνήθως με συχνότητες από 1 έως 10MHz. Τα κύματα αυτά εισάγονται μέσα στο υλικό μέσω ενός μετατροπέα και διαδίδονται προς το υλικό [22]. Ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνική, η διάταξη μπορεί να έχει αποκλειστικά έναν μετατροπέα, ο οποίος ταυτόχρονα καταγράφει το ανακλώμενο κύμα, που δημιουργείται κατά την συνάντηση του εκπεμπόμενου υπερηχητικού κύματος με μια ατέλεια.



Εικόνα 19: Συνήθης μετρητική διάταξη υπερηχογραφικού ελέγχου με μονό μετατροπέα [17].

Ο χρόνος που απαιτείται για την επιστροφή του ανακλώμενου κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η θέση της ατέλειας. Η άλλη τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αποτελείται από δυο μετατροπείς, οι οποίοι τοποθετούνται σε αντίθετες πλευρές του υλικού. Ο ένας μεταδίδει το κύμα ενώ ο

άλλος το λαμβάνει. Οι ατέλειες εντοπίζονται αν το κύμα δεν φτάσει στο δέκτη ή αν φτάσει με μειωμένη ένταση.

Ο υπερηχογραφικός έλεγχος απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε υλικά στα οποία είναι εφικτή η διάδοση ηχητικών δονήσεων, όπως τα μέταλλα, και η επιφάνειά τους δεν έχει αρκετά σύνθετη γεωμετρία ή ανομοιογενή δομή.

Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται μεγάλο βάθος ανίχνευσης και υψηλή ευαισθησία στον εντοπισμό εσωτερικών ατελειών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ερμηνεύονται εύκολα, ενώ δίνεται η δυνατότητα και για ανάκτηση ποσοτικών πληροφοριών. Παρ'όλα αυτά, με την χρήση του υπερηχητικού ελέγχου, καθίσταται δύσκολος ο έλεγχος επιφανειών σύνθετης γεωμετρίας ή η εξέταση μεγάλων επιφανειών.

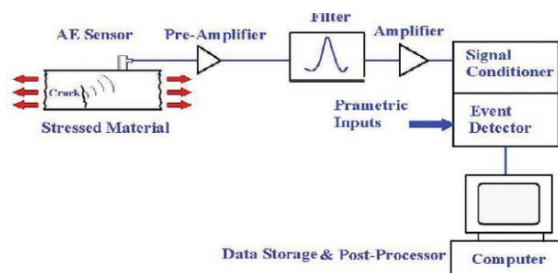
- Ακουστική Εκπομπή

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής είναι μια μέθοδος ΜΚΕ που βασίζεται στην τροποποίηση των ρυθμών παραγωγής, διάδοσης και ανίχνευσης ελαστικών κυμάτων μέσα στο υπό εξέταση υλικό λόγω των υπαρχουσών ατελειών στη μικροδομή. Αυτά τα κύματα είναι γνωστά και ως κύματα ακουστικής εκπομπής, τα οποία δημιουργούνται από την εκλυόμενη ενέργεια όταν το υλικό υφίσταται μικρο-ρωγμές, αποκόλληση φάσεων, πλαστική παραμόρφωση, ή άλλες αλλαγές στην μικροδομή του.

Η ακουστική εκπομπή στηρίζεται στην αρχή ότι όταν ένα υλικό υπόκειται σε μηχανικές ή θερμικές καταπονήσεις, παράγονται εσωτερικές ενεργές πηγές, δηλαδή αλλαγές στην μικροδομή, οι οποίες εκπέμπουν ελαστικά κύματα [17]. Αυτά τα κύματα διαχέονται μέσα στο υλικό, και είναι ανιχνεύσιμα με την χρήση κατάλληλων μετατροπέων (αισθητήρων), οι οποίοι τοποθετούνται στην επιφάνεια του υλικού. Ο εντοπισμός των σημάτων και η ανάλυσή τους επιτρέπει την ταυτοποίηση και τη χαρτογράφηση των ενεργών ζωνών του υλικού όπου αναπτύσσονται τα φαινόμενα αστοχίας.

Ο ΜΚΕ ακουστικής εκπομπής εφαρμόζεται σε υλικά και κατασκευές, τα οποία κατά την λειτουργία τους καταπονούνται από φορτίσεις. Η μέθοδος είναι βέλτιστη στην περιοχή χαμηλότερων συχνοτήτων, και είναι ικανή να ανιχνεύει διάφορα είδη εσωτερικών ατελειών, όπως μικρο-ρωγμές, ρωγμές κόπωσης καθώς και τις διαδικασίες διάδοσης αυτών [23].

Κατά την διαδικασία της ακουστικής εκπομπής, τοποθετούνται οι αισθητήρες καταγραφής στην επιφάνεια του δοκιμαζόμενου υλικού σε στρατηγικά σημεία ώστε να την καλύπτουν σχεδόν εξ ολοκλήρου. Η επιλογή του αισθητήρα και της θέσης τοποθέτησής του θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά μελετημένα, καθώς επηρεάζεται η ευαισθησία της μεθόδου. Έπειτα το υλικό ή η κατασκευή υποβάλλεται σε κάποιο φορτίο ή καταπονήσεις, με σκοπό να προκαλέσουν μικρο-ρωγμές ή αλλαγές στην δομή τους. Στην συνέχεια οι αισθητήρες καταγράφουν τα σήματα ακουστικής εκπομπής που προέρχονται από τις ατέλειες μέσα στο υλικό [24]. Τα σήματα αυτά αναλύονται ως προς το πλάτος, τη συχνότητα, και το χρόνο άφιξης για να προσδιοριστεί η θέση και η φύση της ατέλειας.



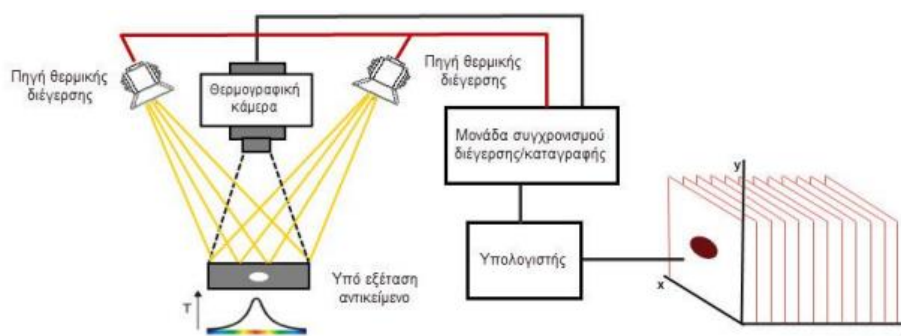
Εικόνα 20: Συνήθης μετρητική διάταξη ακουστικού ελέγχου [23].

Συνολικά, η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής δίνει την δυνατότητα ανίχνευσης και παρακολούθησης της βλάβης ενός υλικού σε πραγματικό χρόνο από αρκετά πρώιμο στάδιο, προσφέροντας καλή απόδοση σε αρκετές περιπτώσεις υλικών, όπως μέταλλα, σύνθετα ή κεραμικά. Η μέθοδος ωστόσο, παρουσιάζει ευαισθησία στον εξωτερικό θόρυβο, ο οποίος μπορεί να επηρεάσει την ακρίβειά της.

- Θερμογραφικός Έλεγχος

Άλλη μια περίπτωση τεχνικής ΜΚΕ αποτελεί ο θερμογραφικός έλεγχος, που χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία για την ανίχνευση θερμοκρασιακών διαφορών στην επιφάνεια των υλικών ή των κατασκευών, οι οποίες υποδηλώνουν την ύπαρξη υποεπιφανειακών ανομοιογενειών [24]. Το φαινόμενο αυτό βασίζεται στην αρχή ότι οι ατέλειες μέσα σε ένα υλικό επηρεάζουν τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και κατά συνέπεια την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του. Όταν το υλικό υποστεί θερμοκρασιακές μεταβολές, τα σημεία με ατέλειες θα παρουσιάσουν ανομοιογένεια συγκριτικά με την υπόλοιπη θερμοκρασιακή κατανομή του υλικού [17].

Στην μέθοδο αυτή, μετά την θερμοκρασιακή διέγερση του υλικού (θέρμανση ή ψύξη), καταγράφονται οι θερμοκρασιακές διαφορές στην επιφάνεια του υλικού με την χρήση υπέρυθρων καμερών, οι οποίες εξάγουν τις μετρήσεις τους με τη μορφή θερμογραφικής εικόνας.



Εικόνα 21: Συνήθης μετρητική διάταξη θερμογραφικού ελέγχου [24].

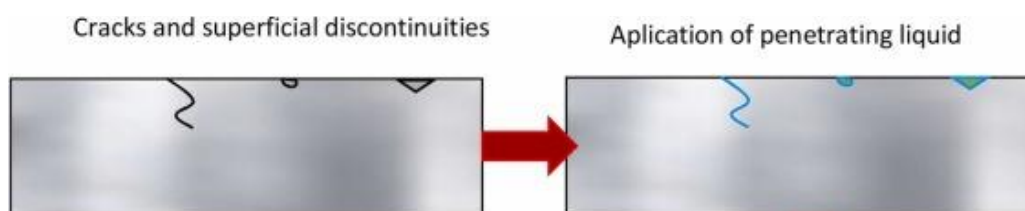
Η ακρίβεια της μεθόδου καθορίζεται από την ποιότητα της θερμικής διέγερσης, την ανάλυση της υπέρυθρης κάμερας, τις επιφανειακές και υποεπιφανειακές ατέλειες, από τον συντελεστή εκπομπής του υλικού, ενώ μειώνεται με την αύξηση του βάθους της ατέλειας κάτω από την επιφάνεια.

4.2.2. ΜΚΕ Επιφανειακού Ελέγχου

- Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ασυνεχειών σε μη πορώδη υλικά, όπως μέταλλα, γυαλί, πλαστικά, και κεραμικά. Η υλοποίηση της μεθόδου εκμεταλλεύεται την τριχοειδή δράση, όπου ένα υγρό με φθορίζοντα χρώματα διεισδύει στις επιφανειακές ρωγμές ή άλλες ατέλειες, καθιστώντας ικανό τον εντοπισμό τους [25].

Η διαδικασία του ελέγχου με διεισδυτικά υγρά, απαιτεί πρώτα την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας ώστε να μην παρεμποδιστεί η διείσδυση του υγρού. Έπειτα, ένα ειδικό διεισδυτικό υγρό εφαρμόζεται στην επιφάνεια και αφήνεται να διεισδύσει στις ατέλειες για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (dwell time). Το διεισδυτικό υγρό μπορεί να είναι χρωματιστό (ορατό) ή φθορίζον (ανιχνεύεται υπό υπεριώδες φως). Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές. Τέλος, ένα απορροφητικό υλικό (developer) εφαρμόζεται στην επιφάνεια του υλικού, το οποίο τραβά το υγρό από τις ατέλειες και δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση και κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές, είτε με φυσικό είτε με υπεριώδες φως.

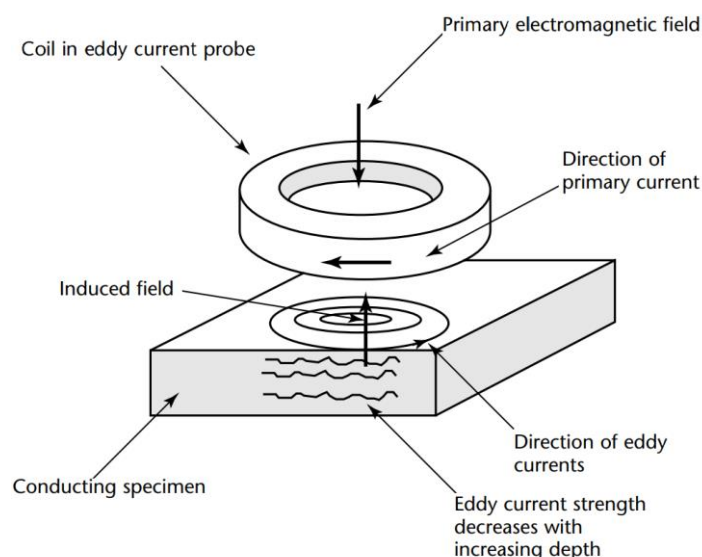


Εικόνα 22: Συνήθης διαδικασία ελέγχου με διεισδυτικά υγρά [25].

Στην πράξη, η μέθοδος εφαρμογής των διεισδυτικών υγρών είναι απλή, οικονομική και γρήγορη ενώ παρουσιάζει πολύ μεγάλη ευαισθησία για επιφανειακές ατέλειες ανιχνεύοντας ακόμη και πολύ μικρές ρωγμές. Βασικός περιορισμός της μεθόδου αποτελεί ότι η αποτελεσματικότητά της μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας ή της πολυπλοκότητας του δοκιμίου.

- Έλεγχος με Δινorρεύματα

Μια αρκετά κοινή μέθοδος ΜΚΕ είναι η μέθοδος ελέγχου δινorρευμάτων. Η τεχνική είναι βασισμένη στη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής [21]. Όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα αγώγιμο υλικό, επάγονται δινorρεύματα μέσα στο υλικό. Αυτά τα ρεύματα παράγουν δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία, τα οποία αλληλεπιδρούν με το αρχικό πεδίο και αλλάζουν τη φάση και το μέγεθος των δινorρευμάτων. Οι αλλαγές αυτές είναι ενδεικτικές της παρουσίας ατελειών ή άλλων ιδιοτήτων του υλικού, όπως η αγωγιμότητα και το πάχος [26].



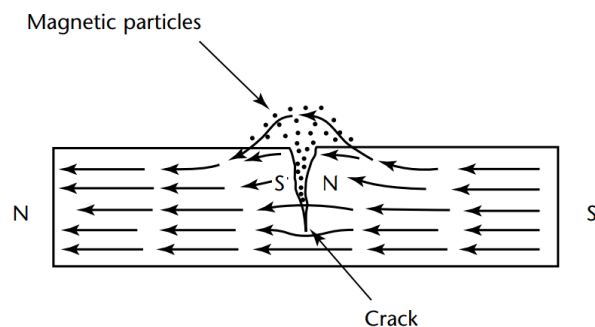
Εικόνα 23: Συνήθης διάταξη ελέγχου με δινorρεύματα [22].

Το επιβαλλόμενο πεδίο δημιουργεί δινorρεύματα βάθους διείσδυσης δ , των οποίων οι ηλεκτρικές γραμμές διαφοροποιούνται εξαιτίας της παρουσίας ατελειών στα πιο επιφανειακά στρώματα του υλικού, με αποτέλεσμα το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο να είναι ανομοιόμορφο στην περιοχή των ατελειών. Αυτή η ανομοιόμορφη κατανομή, πρακτικά είναι μια βάρθρωση πεδίου η οποία δείχνει την ύπαρξη ατελειών. Με σύγχρονα αυτοματοποιημένα συστήματα, μετρούνται οι αλλαγές στην φάση και το μέγεθος του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου, οι οποίες αποτελούν και βασικές ενδείξεις παρουσίας ασυνεχειών, αξιολογώντας έτσι το μέταλλο υπό δοκιμή.

- Μαγνητοσκοπικός Έλεγχος

Όπως αναφέρεται σε προηγούμενη ενότητα, υπάρχει σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ της μαγνητικής συμπεριφοράς με τα ενδογενή και τα εξωγενή χαρακτηριστικά ενός φερρομαγνητικού υλικού, γεγονός που καθιστά αναγκαία την χρήση μαγνητοσκοπικών μεθόδων στους μη καταστροφικούς ελέγχους.

Μια κλασσική μέθοδος μαγνητικής ΜΚΕ είναι η μέθοδος επιθεώρησης με μαγνητικά σωματίδια [21], η οποία βρίσκει εφαρμογή σε σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως ο χάλυβας και ο σίδηρος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, το υλικό μαγνητίζεται και έπειτα διοχετεύεται σε αυτό διεσδυτικό υγρό με μαγνητικά νανοσωματίδια. Τα μαγνητικά σωματίδια συγκεντρώνονται χωροταξικά σε περιοχές μεγάλης βάρμωσης πεδίου, όπως είναι οι ρωγμές και οι ατέλειες, οι οποίες στην συνέχεια χαρτογραφούνται οπτικά ή ηλεκτρονικά [27]. Η ανάλυση αυτής της μεθόδου μπορεί να φτάσει τα 10μm. Μια εξέλιξη αυτής της μεθόδου αποτελεί η τεχνική διαρροής της μαγνητικής ροής, κατά την οποία σε περιοχές ατελειών η μαγνητική ροή διακόπτεται και δημιουργούνται μαγνητικά διαρροϊκά πεδία. Εφαρμόζοντας σωματίδια σιδήρου στην επιφάνεια, παρατηρείται η αλληλεπίδραση αυτών με το διαρροϊκό πεδίο, οπότε συγκεντρώνονται και γύρω από αυτό αποκαλύπτοντας τις επιμέρους ατέλειες.



Εικόνα 24: Μορφή διαρροϊκού πεδίου λόγω ατέλειας [22].

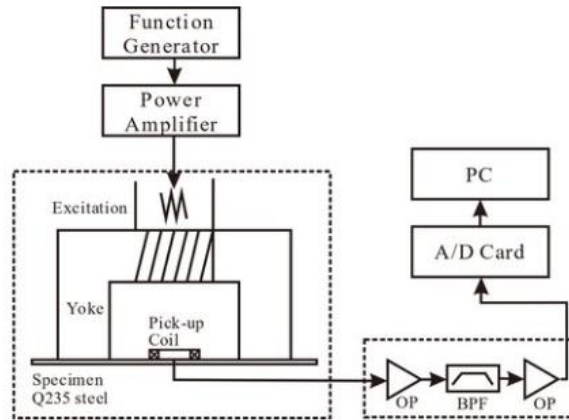
Άλλες δυο χαρακτηριστικές μη καταστροφικές μαγνητικές μέθοδοι, στηρίζονται στην χρήση συστημάτων επίπεδης μετατόπισης κεφαλών ανάγνωσης, πάνω στην εξεταζόμενη επιφάνεια του υπό μελέτη υλικού [28]. Αυτές οι μέθοδοι είναι η μέθοδος του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και η μέθοδος της μέτρησης του βρόχου υστέρησης.

Η μετατόπιση των κεφαλών μπορεί είτε να διενεργείται από αυτοματοποιημένες μηχανές είτε από τον χειριστή του εκάστοτε ελέγχου, όπου δια χειρός μετατοπίζονται οι κεφαλές πάνω στα σημεία ενδιαφέροντος (ρωγμές, σημεία θερμικής καταπόνησης) και σε όλο το μήκος του υλικού [29]. Η κεφαλή ανάγνωσης, συνήθως αποτελεί κάποια διάταξη ηλεκτρομαγνήτη, όπου δια της επαγωγής διεγείρει το δοκίμιο του κάθε πειράματος, μαζί με κάποια διάταξη λήψης του επαγόμενου σήματος, το οποίο μετέπειτα μελετάται ώστε να ολοκληρωθεί ο εντοπισμός και ο χαρακτηρισμός των ατελειών ή των παραμενουσών τάσεων [21]. Ο σχεδιασμός και η γεωμετρία της κάθε διάταξης εξαρτάται από τις ιδιότητες και την γεωμετρία του δοκιμίου.

Η μέθοδος τους μαγνητικού θορύβου Barkhausen στηρίζεται στο φαινόμενο Barkhausen, το οποίο είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης φερρομαγνητικών υλικών και αποτελεί απόδειξη της ασυνεχούς βηματικής αλλαγής της μαγνήτισης σε αυτά τα υλικά. Το φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Heinrich Barkhausen το 1919 και ονομάστηκε προς τιμήν του.

Οι βαθμωτές αυτές αλλαγές στη μαγνήτιση, αντιπροσωπεύουν είτε την ξαφνική υπερπήδηση (άλμα Barkhausen) ενός εμποδίου κατά την κίνηση ενός μαγνητικού τοιχώματος με την συσσώρευση παρεχόμενης τεχνητής μαγνήτισης, είτε την ξαφνική αλλαγή προσανατολισμού των διπόλων μιας μαγνητικής περιοχής σε κρυσταλλογραφικό άξονα που είναι κοντινότερα στην διεύθυνση τους εξωτερικώς επιβαλλόμενου πεδίου. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ευαισθησία και στον εντοπισμό θλιπτικών ή εφελκυστικών τάσεων στο υλικό αλλά και σε ανομοιομορφίες της μικροδομής.

Για την μέτρηση του φαινομένου, χρησιμοποιούνται μετρητικές διατάξεις διέγερσης και λήψης, όπως περιγράφηκαν προηγουμένως, οι οποίες ανάλογα με την εφαρμογή παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά [30].



Εικόνα 25: Συνήθης μετρητική διάταξη μέτρησης θορύβου Barkhausen [31].

Η μέθοδος της μέτρησης του βρόχου υστέρησης, εξηγείται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα ως προς την εφαρμογή της στον χαρακτηρισμό των παραμενουσών τάσεων εντός ενός υλικού.

5. Αξιολόγηση παραμενουσών τάσεων με τη βοήθεια βρόχου υστέρησης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το κεντρικό αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε μια περίπτωση μη καταστρεπτικού μαγνητοσκοπικού ελέγχου και συγκεκριμένα η αξιολόγηση παραμενουσών τάσεων με την μέτρηση των παραμέτρων του βρόχου υστέρησης.

5.1. Μέτρηση βρόχου υστέρησης

Μέσω του βρόχου υστέρησης είναι εφικτή η εξέταση είτε της μαγνήτισης είτε της μαγνητικής επαγωγής ως προς το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι παράμετροι που εξάγονται, είναι αποτέλεσμα της απευθείας μελέτης των χαρακτηριστικών του βρόχου ή της επεξεργασίας αυτού.

Στην περίπτωση του βρόχου μαγνήτισης M-H, μπορούν να μελετηθούν απευθείας από τον σχηματισμό του, η μαγνήτιση κόρου M_s , η παραμένουσα μαγνήτιση M_R , το συνεκτικό πεδίο H_C , ενώ από περαιτέρω επεξεργασία του βρόχου υπολογίζονται οι απώλειες του βρόχου W_H , υπολογίζοντας το εμβαδόν του βρόχου, η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, από τον υπολογισμό της κλίσης της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης, και η μέγιστη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας, από την κλίση της καμπύλης στο σημείο $H = H_C$.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του βρόχου B-H εξάγονται μετρήσεις για την μαγνητική επαγωγή κορεσμού B_s , την παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_R , το συνεκτικό πεδίο H_C . Από τον βρόχο μπορούν επίσης να υπολογιστούν οι απώλειες του βρόχου W_H , από το εμβαδόν του βρόχου, η διαφορική μαγνητική επιδεκτικότητα, από τον υπολογισμό της κλίσης της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης, και η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας, από την κλίση της καμπύλης στο σημείο $H = H_C$.

Στην εφαρμογή του μη καταστρεπτικού ελέγχου με μέτρηση του βρόχου, περιλαμβάνεται η μελέτη της συμπεριφοράς των μετρούμενων σημάτων γύρω από τα σημεία ενδιαφέροντος του βρόχου μαγνήτισης, του εκάστοτε υλικού [32].

5.2. Επίδραση διαταραχών στην απόκριση του βρόχου υστέρησης

Οι κοινές ατέλειες στα υλικά, όπως είναι οι ρωγμές, οι προσμίξεις, οι καταπονήσεις, η οξείδωση, αποτελούν περιοχές όπου η μαγνητική συνοχή διακόπτεται, και προκαλούνται τοπικές διαταραχές στην μαγνητική δομή του υλικού.

Όταν αυξάνεται η πυκνότητα των διαταραχών αυτών, η κατανομή τους γίνεται πιο πυκνή και αποκτά πολύπλοκη μορφολογία, δημιουργώντας έτσι πολλά και ισχυρά κέντρα αγκύρωσης κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων καθώς το μαγνητικό πεδίο δυσκολεύεται να διαπεράσει το υλικό. Λόγω των κέντρων αγκύρωσης, οι μαγνητικοί τομείς χρειάζονται μεγαλύτερη ενέργεια για να αλλάξουν κατεύθυνση, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της επιφάνειας του βρόχου υστέρησης.

Στην περίπτωση των χημικών μεταβολών του υλικού, όπως είναι η οξείδωση, μειώνεται η αγωγιμότητα και η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, αυξάνεται η εξωτερική μαγνητική αντίσταση. Και σε αυτή την περίπτωση διαταραχής παρατηρείται αύξηση του συνεκτικού πεδίου και μείωση της ικανότητας του υλικού να αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια, διευρύνοντας το πλάτος του του βρόχου. Συνολικά, σε αρκετές μελέτες, όπως αυτές των και Šternberk [33] και Lubitz [34] έχει βρεθεί ότι οι μετρούμενες τιμές του συνεκτικού πεδίου H_c είναι ανάλογες της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας των διαταραχών ρ .

$$H_c \propto \sqrt{\rho} \quad (5.1)$$

Σε ανάλογες μελέτες, όπως αυτές των Qureshi [35] και Kronmüller [36], όπου μελετήθηκε η συσχέτιση της αρχικής μαγνητικής διαπερατότητας μ_0 με την

πυκνότητα των διαταραχών ρ , συμφώνησαν ότι στα χαμηλά πεδία μαγνήτισης, ισχύει η ακόλουθη σχέση.

$$\mu_0 \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}} \quad (5.2)$$

5.3. Επίδραση παραμενουσών τάσεων στην απόκριση του βρόχου υστέρησης

Στα φερρομαγνητικά υλικά, οι παραμένουσες τάσεις που προκαλούνται κατά την διάρκεια μηχανικής ή θερμικής επεξεργασίας, επηρεάζουν το συνολικό διάνυσμα μαγνήτισης [37], ακόμα και χωρίς την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η ύπαρξη τάσεων στο υλικό προκαλεί μεταβολές στη μικροδομή του υλικού, οι οποίες επηρεάζουν την ενεργειακή ισορροπία του, αυξάνοντας τις απαιτήσεις της μαγνητικής διέγερσης για την κίνηση των τοιχωμάτων και την υπερπήδηση των εμποδίων.

Υπό την επίδραση τάσεων, επηρεάζονται κυρίως η μαγνητοκρυσταλλική και η μαγνητοελαστική ενέργεια, όπου η κάθε μια προσπαθεί να ορίσει την διεύθυνση των διανυσμάτων μαγνήτισης των μαγνητικών περιοχών του υλικού. Ωστόσο συνήθως υπερισχύει η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια, καθώς χρειάζεται αρκετά μεγάλες τάσεις προκειμένου να μεταβληθεί, οπότε εν τέλει η μαγνήτιση των περιοχών ακολουθεί την διεύθυνση του εύκολου άξονα.

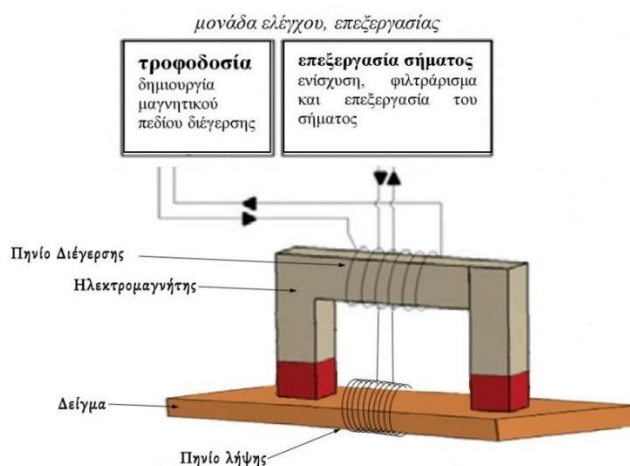
Συνολικά η αύξηση των ποσοστών παραμόρφωσης λόγω τάσεων σε ήδη υπάρχουσες επιφανειακές διαταραχές, λειτουργεί ενισχυτικά στην αύξηση της πολυπλοκότητας κατανομής και διάδοσης των διαταραχών εντός του υλικού. Έτσι, οι αλλαγές στην μαγνήτιση κατά την εφαρμογή τάσεων, οδηγούν σε αύξηση των τιμών του συνεκτικού πεδίου, ανάλογη της πολυπλοκότητας των διαταραχών [38], και σε μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας, γεγονός που προκαλεί την αύξηση της επιφάνειας του βρόχου υστέρησης, άρα και την αύξηση των απωλειών ενέργειας.

Σύμφωνα με τον Jiles, επιβεβαιώνεται ότι με την αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών λόγω παραμόρφωσης, αυξάνονται και οι τιμές του συνεκτικού πεδίου και των απωλειών του βρόχου υστέρησης.

5.4. Διατάξεις μέτρησης του βρόχου υστέρησης

Η μέτρηση των παραμέτρων του βρόχου υστέρησης, έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία σε αλλαγές της φυσικής κατάστασης ενός ηλεκτρικού χάλυβα. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται ως εργαλείο μη καταστρεπτικού ελέγχου (ΜΚΕ) για την αξιολόγηση των ελαστικών τάσεων, των παραμορφώσεων ή της καθαρότητας που χαρακτηρίζουν τον εξεταζόμενο χάλυβα.

Τα παραδοσιακά συστήματα μέτρησης του βρόχου υστέρησης, αποτελούνται συνήθως από μια διάταξη πηνίων διέγερσης και λήψης, τα ηλεκτρονικά διέγερσης και λήψης, και από μια συσκευή μέτρησης και καταγραφής των δεδομένων [39].



Εικόνα 26: Συνήθης διάταξη μέτρησης του βρόχου υστέρησης [40].

Με τη χρήση πηνίων διέγερσης (excitation coils), εφαρμόζουμε μαγνητικό πεδίο ποικίλης συχνότητας και πλάτους. Η καταγραφή της απόκρισης του υλικού, υπό το εφαρμοζόμενο πεδίο, επιτυγχάνεται με τη χρήση πηνίων ανίχνευσης (inductive coils), τα οποία καταγράφουν τις διακυμάνσεις της μαγνήτισης ως ηλεκτρικά σήματα [40]. Ανάλογα με την εφαρμογή και τις ιδιότητες της μετρούμενης διάταξης, τα πηνία

λήψης και διέγερσης δύναται να παρουσιάζουν ποικιλομορφία ως προς την γεωμετρία και τα υλικά του πυρήνα τους [33].

Τα σήματα αυτά στη συνέχεια αναλύονται για να αποκαλύψουν τα χαρακτηριστικά του βρόχου υστέρησης υπό την επιρροή παραμενουσών τάσεων διαφορετικής συνοχής και πυκνότητας [41]. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της μικροδομής και των ιδιοτήτων του υλικού και για τη διάγνωση πιθανών προβλημάτων, όπως μηχανικές καταπονήσεις ή ελαττώματα στην κατασκευή του υλικού.

5.4.1. Σύστημα Διέγερσης

Στην απλουστευμένη της μορφή, η διάταξη διέγερσης αποτελείται από ένα επαγωγικό πηνίο τυλιγμάτων χαλκού γύρω έναν σιδηρομαγνητικό πυρήνα διαφόρων γεωμετριών [3], το οποίο με την εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος, δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και λειτουργεί ως ηλεκτρομαγνήτης (excitation yoke). Η χρήση της συγκεκριμένης διάταξης πηνίων είναι μια από τις παλαιότερες και πιο γνωστές διατάξεις, για την διεξαγωγή μαγνητικών μετρήσεων.

Τα τυλίγματα του πηνίου μπορούν είτε να εφαρμόζονται στην μεγάλη πλευρά του πηνίου διέγερσης είτε σε ένα εκ των δυο ποδιών του [45]. Η κυματομορφή για τη διέγερση του δείγματος μπορεί να είναι ημιτονοειδούς ή τριγωνικής μορφής. Εφαρμόζοντας τον ηλεκτρομαγνήτη πάνω στην ερευνώμενη επιφάνεια, επιτυγχάνεται η διέγερση του υλικού από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Συνήθως διεγείρεται μαγνητικό πεδίο μεγάλου πλάτους και μικρής συχνότητας, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κυκλική μαγνήτιση του υλικού γύρω από το βρόχο υστέρησης, με το μεγαλύτερο δυνατό βάθος διείσδυσης. Σε μικρές συχνότητες, ο συνδυασμός μικρού σήματος με μεγάλο χρόνο ενσωμάτωσης στο υλικό, επιφέρει καλό έλεγχο της μετατόπισης του σήματος στο κύκλωμα λήψης.

Το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο φθίνει εκθετικά με το βάθος του μετρούμενου υλικού, σε κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του υλικού, λόγω της απόσβεσης των ρευμάτων Eddy. Το βάθος διείσδυσης του παραγόμενου πεδίου

επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους του υλικού υπό μελέτη και της πειραματικής διάταξης, όπως είναι η συχνότητα της διέγερσης, η αγωγιμότητα και η διαπερατότητα του υλικού. Το βάθος διείσδυσης δ υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (5.3)$$

Όπου f είναι η συχνότητα, σ είναι η αγωγιμότητα του υλικού, μ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού και μ_r είναι η σχετική διαπερατότητα του υλικού.

Η αύξηση του συνεκτικού πεδίου και των απωλειών του βρόχου υστέρησης δεν παρατηρούνται ομοιόμορφα κατά τον κύκλο μαγνήτισης, αλλά συγκεντρώνονται κυρίως δυο φορές κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Επομένως, σε κάθε μέτρηση, ο ηλεκτρομαγνήτης θα πρέπει να εφάπτεται για τουλάχιστον μισό κύκλο μαγνήτισης. Αυτή η παραδοσιακή διάταξη μαγνήτισης, αποτελεί μια στατική τεχνική μέτρησης του βρόχου υστέρησης.

Καθώς η μέτρηση του βρόχου υστέρησης έχει πολλές εφαρμογές, σε αρκετές περιπτώσεις ο ηλεκτρομαγνήτης παρουσιάζει ποικιλομορφία στον σχεδιασμό του ώστε να εφαρμόζεται σωστά πάνω στην γεωμετρία του εκάστοτε πειραματικού δοκιμίου. Ο σχεδιασμός του ηλεκτρομαγνήτη είναι αρκετά κρίσιμος για την λειτουργία ολόκληρου του συστήματος διέγερσης, καθώς επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου.

Μερικές από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες περιπτώσεις γεωμετριών για τον πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη διέγερσης, είναι οι μονοί μαγνητικοί βραχίονες (yokes) σχημάτων C, U ή Π [33]. Και στις τρεις αυτές διατάξεις πηνίων επιτρέπεται η δημιουργία συμπυκνωμένου και ελεγχόμενου μαγνητικού πεδίου μεταξύ των άκρων του πυρήνα. Είναι σημαντικό, ο πυρήνας να παρουσιάζει σε κάθε διατομή ίδιο εμβαδό ώστε το πεδίο που το διαρρέει να είναι παντού ομογενές, και να λαμβάνονται πιο εύκολα ερμηνεύσιμες μετρήσεις. Το πηνίο ή τα πηνία, τοποθετούνται γύρω από τον κεντρικό βραχίονα δημιουργώντας μαγνητική ροή διαμέσου του υλικού του δοκιμίου. Η ένταση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου από το πηνίο διέγερσης, υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο των Ampere Maxwell από την παρακάτω εξίσωση.

$$H(t) = \frac{N \cdot i(t)}{l_{core}} \quad (5.4)$$

Όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου διέγερσης, $i(t)$ είναι το ρεύμα διέγερσης του συστήματος και l_{core} είναι το μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής του πυρήνα.

Προκειμένου να δημιουργηθούν υψηλά επίπεδα έντασης μαγνητικού πεδίου, ώστε να επιτευχθεί ο κορεσμός των υλικών, τα τυλίγματα του πηνίου διέγερσης, θα πρέπει να κατασκευάζονται από σύρμα σχετικά μεγάλου εμβαδού διατομής, ώστε να μπορούν να διαπερνώνται από υψηλά επίπεδα ρευμάτων.

Για την κατασκευή του πυρήνα του ηλεκτρομαγνήτη, συνήθως προτιμώνται μαλακά φερρομαγνητικά υλικά, όπως κράμα πυριτιούχου σιδήρου (Fe-Si) ή σίδηρο-νικέλιο (Fe-Ni). Τα υλικά αυτά παρέχουν χαμηλές απώλειες λόγω υστέρησης, επομένως η μαγνητική τους συμπεριφορά ακολουθεί γρήγορα τις αλλαγές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Παρουσιάζουν δηλαδή μεγάλη ευαισθησία στις μικρές μαγνητικές μεταβολές [42]. Επιπλέον, ο μαλακός πυρήνας επιτρέπει την ομαλότερη ροή του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζοντας ελάχιστη μαγνητική αντίσταση.

5.4.2. Σύστημα Λήψης

Η διάταξη λήψης του συστήματος μέτρησης των χαρακτηριστικών του βρόχου υστέρησης, χρησιμοποιείται κυρίως για την μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής που δημιουργείται από το πηνίο διέγερσης. Συνήθως αποτελείται από ένα πηνίο λήψης τυλιγμάτων χαλκού, με ή χωρίς πυρήνα, και από μια μετρητική διάταξη. Μέσω της διάταξης αυτής ερευνάται η απόκριση των χαρακτηριστικών του βρόχου ως το παράγωγο της μη αναστρέψιμης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων.

Συγκεκριμένα, το πηνίο λήψης (pickup coil) εντοπίζει τις αναδιατάξεις της δομής των μαγνητικών περιοχών, που προκαλούνται από τις αλλαγές της μαγνήτισης, ως αντίδραση στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Η απόκριση του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου εκφραζόμενη ως τάση, εντοπίζεται από το πηνίο λήψης το οποίο είτε τοποθετείται γύρω από το μετρούμενο υλικό είτε πάνω στην επιφάνεια αυτού,

σύμφωνα με τον νόμο επαγωγής του Faraday. Οποιαδήποτε αλλαγή της μαγνήτισης B , επάγει μια αντίστοιχη αλλαγή στην τάση V στα άκρα του πηνίου λήψης, η οποία εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση.

$$V = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (5.5)$$

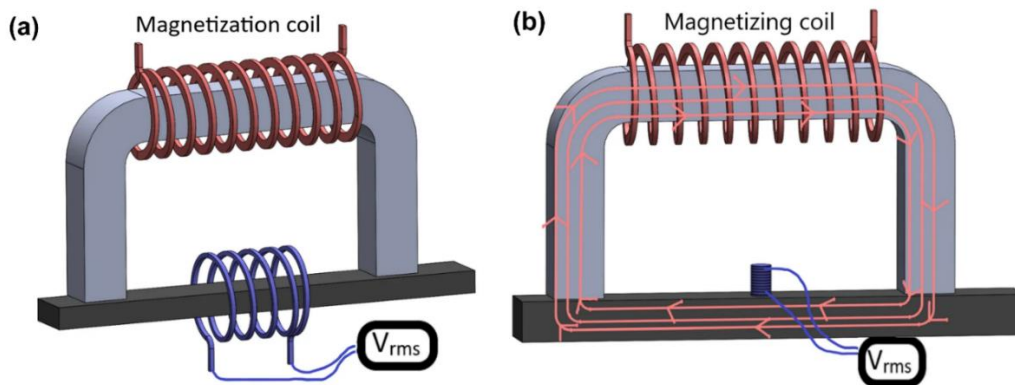
Όπου, V είναι η επαγόμενη τάση στο πηνίο λήψης, N είναι ο αριθμός των περιελίξεων του πηνίου, A είναι το συνολικό εμβαδό του πηνίου, και $\frac{dB}{dt}$ είναι ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας του πεδίου ως προς τον χρόνο.

Η παραπάνω εξίσωση, αποτελεί μια έκφραση για την επαγόμενη τάση, που υπολογίζεται από τον θεμελιώδη νόμο της επαγωγής των Lenz-Faraday και μπορεί να λάβει και την παρακάτω μορφή.

$$\begin{aligned} V &= -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} \\ &= -N \cdot A \cdot \mu(H) \cdot \frac{dH}{dt} \\ &= -N \cdot A \cdot \omega \cdot \mu(H) \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow \\ v(t) &\propto A \cdot \mu(H) \cdot \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (5.6)$$

Όπου Φ είναι η μαγνητική ροή που διαπερνά από ένα πηνίο επιφάνειας A και με πλήθος τυλιγμάτων N .

Από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις πηνίων λήψης, αποτελούν οι διατάξεις πηνίων που τοποθετούνται πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, με πυρήνα ή χωρίς, και οι διατάξεις με πηνίο τυλιγμένο γύρω από το υλικό υπό μελέτη.



Εικόνα 27: (αριστερά) Διάταξη πηνίων διέγερσης με πηνίο λήψης τοποθετημένο γύρω από το υλικό, (δεξιά) Διάταξη πηνίων διέγερσης και λήψης με πηνίο λήψης τοποθετημένο πάνω στην επιφάνεια του υλικού [33].

Στην περίπτωση των πηνίων που τοποθετούνται στην επιφάνεια του υλικού, επιτρέπεται η ανίχνευση του μαγνητικού θορύβου σε μικρές μόνο περιοχές. Η ύπαρξη πυρήνα αυξάνει την μαγνητική επαγωγή, βελτιώνοντας την ευαισθησία του πηνίου, ενώ η απουσία πυρήνα δίνει χαμηλότερη ευαισθησία [3] αλλά μεγαλύτερα όρια κορεσμού, καθιστώντας το κατάλληλο για πολύ ισχυρά πεδία [9]. Η περίπτωση των surrounding coils επιτρέπει μεγαλύτερη κάλυψη της επιφάνειας του δείγματος από το πηνίο λήψης, μεγιστοποιώντας την πιθανότητα ανίχνευσης των απότομων αλλαγών στον βρόχο μαγνήτισης από περισσότερες περιοχές του δοκιμίου ταυτόχρονα.

Ο πυρήνας, αν χρησιμοποιηθεί, πρέπει να είναι από μαλακό φερρομαγνητικό υλικό ώστε να διασφαλιστεί ότι το πηνίο δεν θα δημιουργεί παρεμβολές στην καταγραφή των μικρών μεταβολών του μαγνητικού πεδίου.

Συγκριτικά με το πηνίο διέγερσης, το πηνίο λήψης συνήθως παρουσιάζει χαμηλότερη μαγνητική διαπερατότητα, ώστε να μην επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο διέγερσης και να εξασφαλιστεί η ακριβέστερη καταγραφή των αλλαγών στο πεδίο που προκαλούνται από τον εντοπισμό παραμενουσών τάσεων στο δοκίμιο.

5.5. Ευαισθησία Μετρητικής Διάταξης

Η απόκριση της συνολικής μετρητικής διάταξης, εξαρτάται από πολλούς ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες.

Στους ενδογενείς παράγοντες συγκαταλέγονται οι ιδιότητες των μαγνητικών υλικών των πυρήνων και των δοκιμίων, καθώς και οι παράμετροι της κυματομορφής διέγερσης (συχνότητα, πλάτος), τα οποία αναλύονται σε προηγούμενη υποενότητα.

Στους εξωγενείς παράγοντες συγκαταλέγονται κυρίως τα στοιχεία της γεωμετρίας της πειραματικής διάταξης, και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Παρακάτω περιγράφονται οι εξωγενείς αυτοί παράμετροι και το πεδίο επιρροής τους στην συνολική διάταξη μέτρησης.

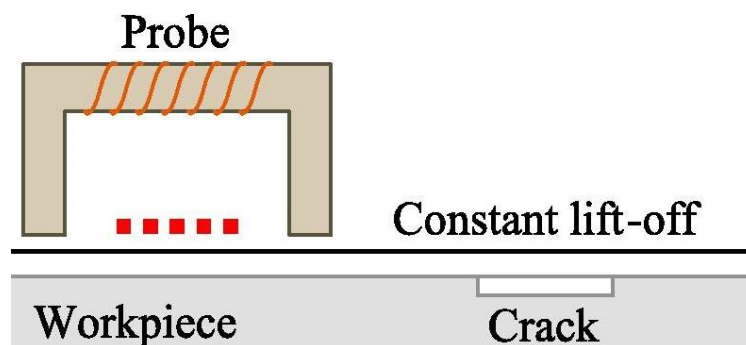
- Ακροδέκτες πηνίου

Όσον αφορά την γεωμετρία του υλικού, θεμελιώδης παράμετρος που επηρεάζει την τελική ισχύ της διέγερσης είναι η μορφή της καμπύλης των ακροδεκτών του πυρήνα διέγερσης (curvature tip). Αυτή η παράμετρος καθορίζει άμεσα την ποιότητα της επαφής του δοκιμίου με το πηνίο.

Επιτυγχάνεται βέλτιστη λειτουργία όταν το εμβαδό του άκρου είναι σύμφωνο με το εμβαδό διατομής που τηρείται κατά μήκος του ομοιόμορφου μαγνητικού μονοπατιού του πυρήνα καθώς και όταν η καμπύλη των ακροδεκτών είναι σύμφωνη με την επιφάνεια του δοκιμίου και εφάπτεται ακριβώς σε αυτή. Εάν τηρούνται αυτοί οι περιορισμοί, διοχετεύεται στο δοκίμιο η μέγιστη δυνατή πυκνότητα μαγνητικής ροής, διεγείροντάς το καταλλήλως ώστε να επιτευχθεί ο εντοπισμός των παραμενουσών τάσεων.

- Διάκενο πηνίων με δοκίμιο

Η απόσταση ανάμεσα στους ακροδέκτες των πηνίων διέγερσης και λήψης και των υλικών υπό μελέτη (liftoff), επηρεάζει άμεσα την ισχύ της διέγερσης.



Εικόνα 28: Μετρητική διάταξη με απόσταση ανάμεσα στο υλικό και τα πηνία [43].

Όσο απομακρύνεται το πηνίο από το δοκίμιο, η μαγνητική ροή αλλάζει μέσω διάδοσης από τον πυρήνα του μαγνητικού υλικού στον αέρα και έπειτα στο δοκίμιο [7]. Λόγω της χαμηλότερης μαγνητικής διαπερατότητας του αέρα, ως μέσου διάδοσης της μαγνήτισης, το πεδίο παρουσιάζει αυξημένες απώλειες και επομένως η επαγόμενη έντασή στο δοκίμιο είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη, και

μειώνεται αναλόγως με την αύξηση του διάκενου μεταξύ των διατάξεων, έως τον μηδενισμό της. Για βέλτιστη λειτουργία θα πρέπει η κάθετη απόσταση μεταξύ των πηνίων και του δοκιμίου να είναι μηδενική, και η διεπαφή τους να παρουσιάζει λεία επιφάνεια.

- Μήκος πυρήνα πηνίου διέγερσης

Σύμφωνα με την έκφραση των Ampere-Maxwell για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, έχει αποδειχθεί ότι η έντασή του είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του μονοπατιού που ακολουθεί η μαγνητική ροή. Επομένως, προκειμένου να διεγείρεται επαρκώς το δοκίμιο με χαμηλές ενεργειακές απώλειες, θα πρέπει ο πυρήνας του πηνίου διέγερσης να μην έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις [29].

- Απόσταση ακροδεκτών πυρήνα πηνίου

Η μικρή απόσταση μεταξύ των ακροδεκτών-πόλων του πηνίου διέγερσης, δίνει την δυνατότητα μεγιστοποίησης της πυκνότητας της μαγνητικής ροής του τελικού μαγνητικού κυκλώματος. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος μεγιστοποίησης της μαγνητικής ροής δεν είναι βέλτιστη καθώς αυξάνονται οι παρεμβολές μεταξύ των δυο πόλων, με αποτέλεσμα να επάγεται θόρυβος στην διάταξη λήψης, διαταράσσοντας έτσι την αξιόπιστη λήψη αποτελεσμάτων. Επομένως ο πυρήνας του πηνίου διέγερσης θα πρέπει να τηρεί μικρή απόσταση μεταξύ των πόλων του, μέχρι ενός ορίου, το οποίο πρέπει να εξακριβώνεται πειραματικά.

5.6. Σημασία και εφαρμογές της μελέτης του βρόχου υστέρησης

Η μελέτη των χαρακτηριστικών του βρόχου υστέρησης παρουσιάζει αρκετές εφαρμογές στη μη καταστροφική δοκιμή υλικών (NDT). Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν την ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων, καταπονήσεων και άλλων ανωμαλιών στα φερρομαγνητικά υλικά χωρίς να απαιτείται η καταστροφή τους. Επιπλέον οι

μετρήσεις των χαρακτηριστικών του βρόχου υστέρησης χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς μαγνητικών υλικών σε μικροσκοπική κλίμακα, κάτι που είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη νέων μαγνητικών υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες.

6. Πειραματική Διάταξη

6.1. Σχεδιασμός Πειραματικής Διάταξης

Για τον σχεδιασμό των αισθητήρων και των κυκλωμάτων της πειραματικής διάταξης, κρίθηκε πρώτα αναγκαίος ο καθορισμός των παραμέτρων του μετρητικού συστήματος και των χαρακτηριστικών των σημάτων διέγερσης και λήψης για την μαγνητική διέγερση των δοκιμίων.

Βασική γενικευμένη παράμετρος του σχεδιασμού ήταν η αποτελεσματικότητα της διέγερσης, η αξιοπιστία του τελικού αισθητήρα, ακολουθούμενη πάντα από τα κατάλληλα τεχνοοικονομικά κριτήρια. Για το πηνίο διέγερσης επιλέχθηκε πυρήνας άμορφου κράματος σιδήρου, ενώ για το πηνίο λήψης επιλέχθηκε διάταξη με τυλίγματα γύρω από το υλικό προς μελέτη (surrounding coil) για λόγους που αναλύονται παρακάτω. Τα κυκλωματικά στοιχεία των διατάξεων διέγερσης και λήψης, επιλέχθηκαν προσεκτικά ώστε να συμβάλλουν στην καλύτερη δυνατή ποιότητα του σήματος διέγερσης.

6.2. Δείγματα Υλικών προς Μελέτη

Για την μελέτη των παραμενουσών τάσεων με την βοήθεια του βρόχου υστέρησης, χρησιμοποιήθηκαν τρία πειραματικά δοκίμια από φύλλα ηλεκτρικού χάλυβα ίδιου μεγέθους και διαστάσεων $300 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$.



Εικόνα 29: Δείγματα υλικών υπό μελέτη.

Πρόκειται για ηλεκτρικό χάλυβα μη προσανατολισμένων φερριτικών κόκκων, ο οποίος αποτελεί κράμα με υψηλές περιεκτικότητες σιδήρου (Fe), και χαμηλότερες περιεκτικότητες άνθρακα (C) και πυριτίου (Si). Θεωρείται μαλακό μαγνητικό υλικό καθώς παρουσιάζει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και έχει την δυνατότητα να μαγνητίζεται και να απομαγνητίζεται εύκολα, καθιστώντας το ιδανικό για την παρούσα μελέτη.

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα και να συγκριθούν τα αποτελέσματα, ως προς την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων στα πειραματικά δοκίμια, έχουν ολοκληρωθεί κάποιες επιμέρους διεργασίες σε κάθε δείγμα.

Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα 1, έχει υποστεί πολύ έντονη τοπική θερμική διέγερση, συνοδευόμενη από επακόλουθη απότομη ψύξη. Οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του δοκιμίου, οδήγησαν στην δημιουργία αρκετά έντονων ατελειών, επιφανειακών και μη, και την μεγάλη αύξηση των παραμενουσών τάσεων λόγω θερμικής διέγερσης, σε όλα τα στρώματα του υλικού. Το σημείο καταπόνησης του δείγματος 1 και οι επιφανειακές ατέλειες στο συγκεκριμένο σημείο, διαφαίνονται στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30: Δείγμα 1: Δείγμα με την μεγαλύτερη καταπόνηση.

Το δείγμα 2 υπεβλήθη επίσης σε θερμική διέγερση συνοδευόμενη από έντονη ψύξη, μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση η καταπόνηση του δοκιμίου είχε χαμηλότερη θερμοκρασιακή ένταση και χαμηλότερη διάρκεια έκθεσης σε αυτήν. Ως εκ τούτου, στο δεύτερο δείγμα δημιουργήθηκαν ατέλειες και τάσεις χαμηλότερης έντασης και περιεκτικότητας. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 31), η καταπόνηση έχει και πάλι συγκεντρωθεί σε ένα μεμονωμένο σημείο του δείγματος.



Εικόνα 31: Δείγμα 2: Δείγμα με μέτρια καταπόνηση.

Το δείγμα 3 δεν υποβλήθηκε σε καμία επιπλέον κατεργασία, και οι μετρήσεις πάνω σε αυτό θα αποτελέσουν σημείο αναφοράς, στην ανίχνευση και την σύγκριση των παραμενουσών τάσεων στα δείγματα 1 και 2. Οι μετρήσεις του δοκιμίου αυτού αντιπροσωπεύουν ενδεικτικά την απόκριση του αρχικού φύλλου χάλυβα υπό εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο, με την μοναδική διαφορά της μερικής ύπαρξης σημείων οξείδωσης του υλικού, που ενδεχομένως να επηρεάσουν αρνητικά την διέγερση. Τα σημεία οξείδωσης είναι αρκετά ευδιάκριτα στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32: Δείγμα 3: Δείγμα χωρίς καταπόνηση.

6.3. Πηνίο Διέγερσης

Για την διάταξη του πηνίου διέγερσης επιλέχθηκε επαγωγικό πηνίο, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε ο πυρήνας AMCC0025 της εταιρίας Proterial, με γεωμετρία U και διαστάσεων $41 \times 82 \times 25 \text{ mm}^3$. Ο πυρήνας αυτός, αποτελείται από πολλά λεπτά φύλλα άμορφου κράματος σιδήρου με προσμίξεις από κοβάλτιο, βόριο, νικέλιο και άλλες μεταλλικές ενώσεις. Ο πυρήνας της διέγερσης, επιλέχθηκε να είναι από άμορφο μαγνητικό υλικό λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων που προσφέρει η κατηγορία αυτή ως μαλακό υλικό [46].



Εικόνα 33: Πυρήνας πηνίου διέγερσης από άμορφο κράμα σιδήρου.

Τα άμορφα μαγνητικά υλικά μπορούν να προσφέρουν καλύτερη μαγνητική διαπερατότητα από τα κρυσταλλικά υλικά, δηλαδή έχουν την δυνατότητα να παρουσιάζουν αυξημένη πυκνότητα των μαγνητικών γραμμών εντός του υλικού. Έτσι, είναι εφικτό να επιτυγχάνεται η ζητούμενη μαγνήτιση των υλικών, με αρκετά μικρότερες διαστάσεις των υλικών [12].

Στην διεξαγωγή μετρήσεων με την χρήση μαγνητικών αισθητήρων, όπως είναι η μέτρηση των χαρακτηριστικών του βρόχου υστέρησης, είναι θεμελιώδες τα πηνία διέγερσης να διατηρούν μικρές διαστάσεις, καθώς έτσι δεν μειώνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου, ενώ μειώνονται οι συνολικές απώλειες. Μικρότερα μήκη πυρήνα προσδίδουν στο πηνίο χαμηλή αυτεπαγωγή, γεγονός που επιτρέπει στο πηνίο να παράγει πιο αποτελεσματικά μαγνητικό πεδίο μεγάλου πλάτους και χαμηλής συχνότητας.

Έτσι, με μικρότερα μεγέθη πυρήνα ενισχύεται η ικανότητα της διάταξης, να μαγνητίζει το δείγμα πιο ομοιόμορφα και με μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής, στα επιθυμητά εύρη πλάτους και συχνοτήτων. Επομένως η χρήση άμορφου υλικού στο πηνίο διέγερσης, κρίθηκε ιδανική για την μετρητική διάταξη του αισθητήρα μέτρησης μαγνητικής διαπερατότητας.

Για το πηνίο διέγερσης χρησιμοποιήθηκε σύρμα περιέλιξης χαλκού, διαμέτρου 1mm, με συνολικά 30 τυλίγματα, τα οποία τυλίχθηκαν στο χέρι σε 3 στρώσεις, όπου κάθε στρώση έχει σταθεροποιηθεί και συγκρατηθεί με την χρήση μονωτικής ταινίας Karton. Προκειμένου να μην υπάρχει απευθείας επαφή του πυρήνα με το πηνίο αλλά και για να είναι πιο τακτοποιημένη και εύχρηστη η διάταξή του, οι περιελίξεις του περιορίζονται από μια 3d printed θήκη, η οποία εφαρμόζει σε ένα εκ των δυο ποδιών του πηνίου διέγερσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 34. Η εμπέδηση του τελικού πηνίου, μετρήθηκε ότι ήταν ίση με 0.088Ω.



Εικόνα 34: Ηλεκτρομαγνήτης διέγερσης.

6.4. Κύκλωμα Διέγερσης

Για το κύκλωμα διέγερσης, χρησιμοποιήθηκαν τα απαραίτητα ηλεκτρονικά προκειμένου να επιτευχθεί ακρίβεια στην διέγερση των δοκιμών. Η υλοποίηση των μετρήσεων επιτεύχθηκε με την ολοκλήρωση των σχεδιασμένων κυκλωμάτων σε πλακέτα δοκιμών (breadboard) στον πάγκο. Τα κυκλώματα αυτά χωρίζονται σε δυο επιμέρους διατάξεις.

6.4.1. Γεννήτρια Συχνοτήτων

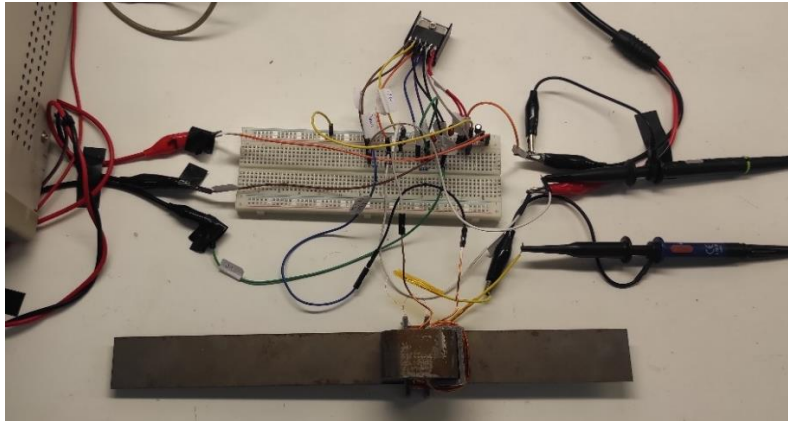
Για την δημιουργία των AC κυματομορφών διέγερσης, χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια συχνοτήτων από τα εργαλεία του πάγκου του εργαστηρίου. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, μελετήθηκε ποικιλία αλληλουχιών συχνότητας και πλάτους διέγερσης, ώστε να εντοπιστούν τα αποδεκτά εύρη, όπου το υλικό διεγείρεται και στην απόκρισή του διαφαίνονται πράγματι τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά για τον καθορισμό ύπαρξης παραμενουσών τάσεων.

Κατόπιν της μελέτης αυτής, εντοπίστηκε ότι ημιτονοειδής κυματομορφή διέγερσης με πλάτος 100mV_{pp}, έντασης 30mA και εύρος συχνοτήτων 0.1-1Hz, σε

Η ένταση του επαγόμενου πεδίου, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πυρήνα διέγερσης και του πλάτους της διέγερσης, υπολογίζεται θεωρητικά ότι θα είναι ίση με 241 A/m.

Η ημιτονοειδής κυματομορφή που εξάγεται από την γεννήτρια συχνοτήτων, στην συνέχεια οδηγήθηκε σε μια κυκλωματική διάταξη ενίσχυσης ώστε να ενισχυθεί η συνολική ισχύς του σήματος, και να επιτευχθεί η απαραίτητη μαγνητική διέγερση του υλικού. Για την ενίσχυση του σήματος επιλέχθηκε ο τελεστικός ενισχυτής OPA549 της εταιρείας Texas Instruments, καθώς δίνει την δυνατότητα για σημαντική ενίσχυση του σήματος μέχρι και 8A στην έξοδό του. Τέλος, στην έξοδο του ενισχυτή ισχύος συνδέεται καλωδιακά το πηνίο διέγερσης, όπου και διοχετεύεται η τελική κυματομορφή.

66

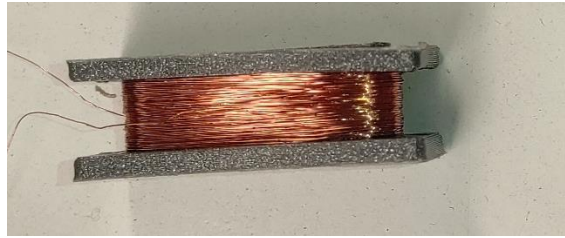


Εικόνα 36: Υλοποίηση κυκλώματος ενίσχυσης σε δοκιμαστική πλακέτα.

6.5. Πηνίο Λήψης

Για το πηνίο λήψης, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη πηνίου γύρω από το δοκίμιο (surrounding coil). Η επιλογή της συγκεκριμένης διαρρύθμισης για το πηνίο λήψης, αφενός επιλέχθηκε με αφορμή την γεωμετρία και τις διαστάσεις των δοκιμών, αφετέρου λόγω και της πολύ καλής του απόκρισης στις αλλαγές του μαγνητικού πεδίου. Η μέθοδος αυτή, ανά μέτρηση καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια του υλικού υπό μελέτη, γεγονός που ενισχύει την δυνατότητα μελέτης παραμενοουσών τάσεων στο υλικό. Επιπλέον, εφόσον τα δοκίμια είναι σε μορφή μικρών και λεπτών φύλλων χάλυβα, η κατασκευή ενός surrounding coil ήταν αρκετά εύκολη. Για την κατασκευή του πηνίου αυτού, κατασκευάστηκε μια 3d printed θήκη ώστε να το περιορίζει να μην έρχεται σε απευθείας επαφή με το δοκίμιο, να είναι πιο δομημένο αλλά και να καθίσταται πιο εύκολη η μετατόπισή του κατά μήκος των υλικών. Επιπλέον, καθώς το πηνίο λήψης τοποθετείται ανάμεσα από τα πόδια του yoke διέγερσης, η 3d printed θήκη συμβάλλει και στον διαχωρισμό και την προστασία των δυο πηνίων.

Για τις περιελίξεις του πηνίου χρησιμοποιήθηκε σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm, και ο συνολικές περιελίξεις ανήλθαν στις 300. Τα επιμέρους τυλίγματα υλοποιήθηκαν σε 6 στρώσεις, όπου κάθε στρώση σταθεροποιήθηκε και διαχωρίστηκε με ειδικό μονωτικό βερνίκι.



Εικόνα 37: Πηνίο λήψης.

Η επιλογή της αναλογίας 1:10 για τα δυο πηνία, δηλαδή δέκα περιελίξεις στο πηνίο λήψης για κάθε περιέλιξη στο πηνίο διέγερσης, επιλέχθηκε ώστε να έχουμε βελτιωμένη ευαισθησία και ενισχυμένη απόκριση του σήματος μέτρησης, ενώ ελαχιστοποιείται ο θόρυβος. Η συνολική μετρητική διάταξη και οργάνωση των δυο πηνίων ως προς την επιφάνεια των δειγμάτων υπό μελέτη διαφαίνεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 38: Συνολική διάταξη πηνίων λήψης και διέγερσης.

6.6. Διάταξη Λήψης

Για την μέτρηση των σημάτων από το πηνίο λήψης χρησιμοποιήθηκαν εξ ολοκλήρου εργαλεία πάγκου. Δηλαδή με την χρήση παλμογράφου, πραγματοποιήθηκαν όλες οι καταγραφές των μετρήσεων και ο έλεγχος της διέγερσης κατά τα την διάρκεια των διαφόρων συνθηκών παραμετροποίησης του κυκλώματος διέγερσης.

7. Πειραματική Διαδικασία

Κατά την διεξαγωγή των πειραματικών διαδικασιών, μελετήθηκαν και τα τρία δείγματα φύλλων ηλεκτρικού χάλυβα, από τα οποία λήφθηκαν μετρήσεις κατά μήκος αυτών σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος, κρίνοντας από την ύπαρξη επιφανειακών ατελειών. Για την διέγερση των τριών δειγμάτων, εφαρμόστηκαν σήματα διέγερσης με διάφορες διαβαθμίσεις συχνότητας και πλάτους. Ενδεικτικά βρέθηκαν επαρκή αποτελέσματα για διαβάθμιση πλάτους 100mVpp η οποία στην συνέχεια ενισχύεται $\times 3$ και τρεις διαβαθμίσεις συχνοτήτων 0.1Hz, 0.5Hz και 1Hz. Κατά την διέγερση ήταν σημαντικό να εφαρμοστούν σήματα σχετικά μεγάλου πλάτους και μικρής συχνότητας, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης.

Κατόπιν εξωτερικής οπτικής αξιολόγησης των επιφανειακών ατελειών των δειγμάτων, για κάθε συνδυασμό διέγερσης, υλοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρία διαφορετικά σημεία κατά μήκος του κάθε δοκιμίου. Για τα δείγματα 1 και 2 πραγματοποιήθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις από ένα σημείο που παρουσιάζεται σχετική καθαρότητα, από ένα σημείο μέτριας καταπόνησης, συγκεκριμένα ακριβώς πάνω στα όρια όπου αρχίζει να διαφαίνεται η ατέλεια, και από ένα σημείο μεγάλης καταπόνησης, πιθανότητα το σημείο όπου επικεντρώθηκε η θερμική διέγερση, και έχουν συγκεντρωθεί οι παραμένουσες τάσεις. Για το δείγμα 3, επίσης λήφθηκαν μετρήσεις από τρία διαφορετικά σημεία, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ομοιόμορφη συμπεριφορά της μαγνήτισης και να εξακριβωθεί το ποσοστό των τάσεων που ενδεχομένως μπορούν να δημιουργηθούν από την εμφάνιση της οξείδωσης.

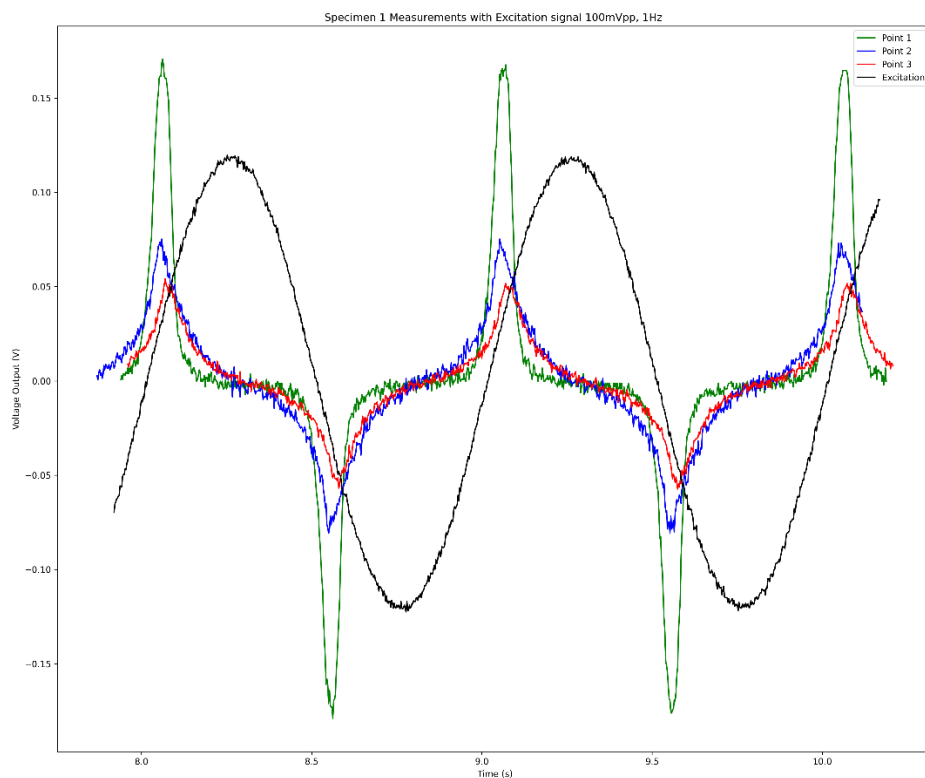
7.1. Μετρήσεις δείγματος 1

Για την μελέτη του δείγματος 1, λήφθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία, που περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα, όπως επισημαίνονται στην Εικόνα 39.

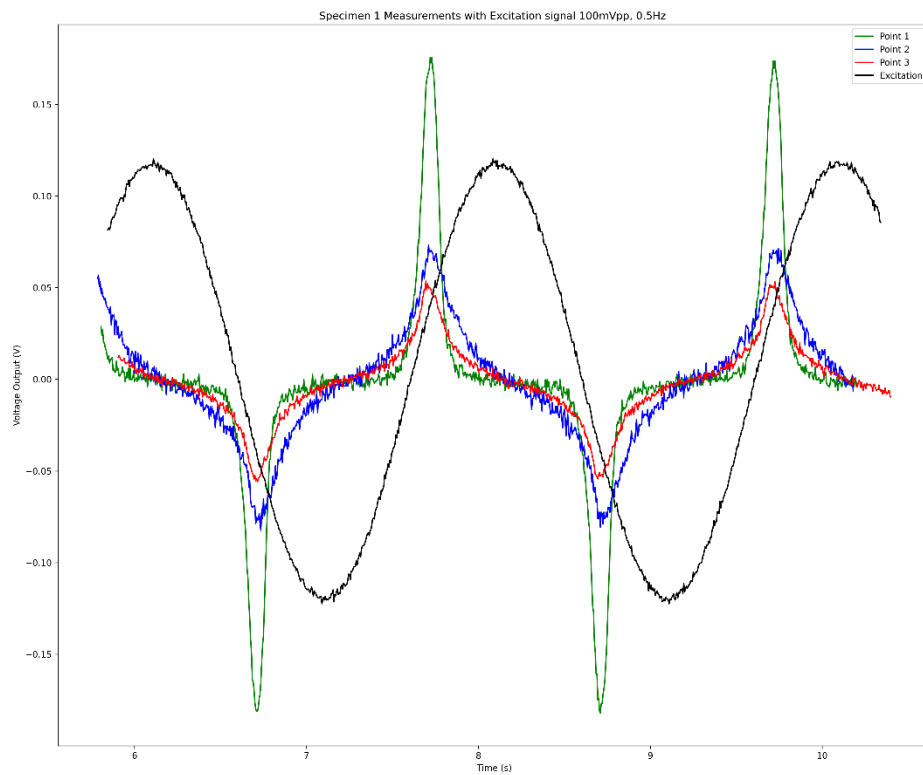


Εικόνα 39: Σημεία μετρήσεων δείγματος 1.

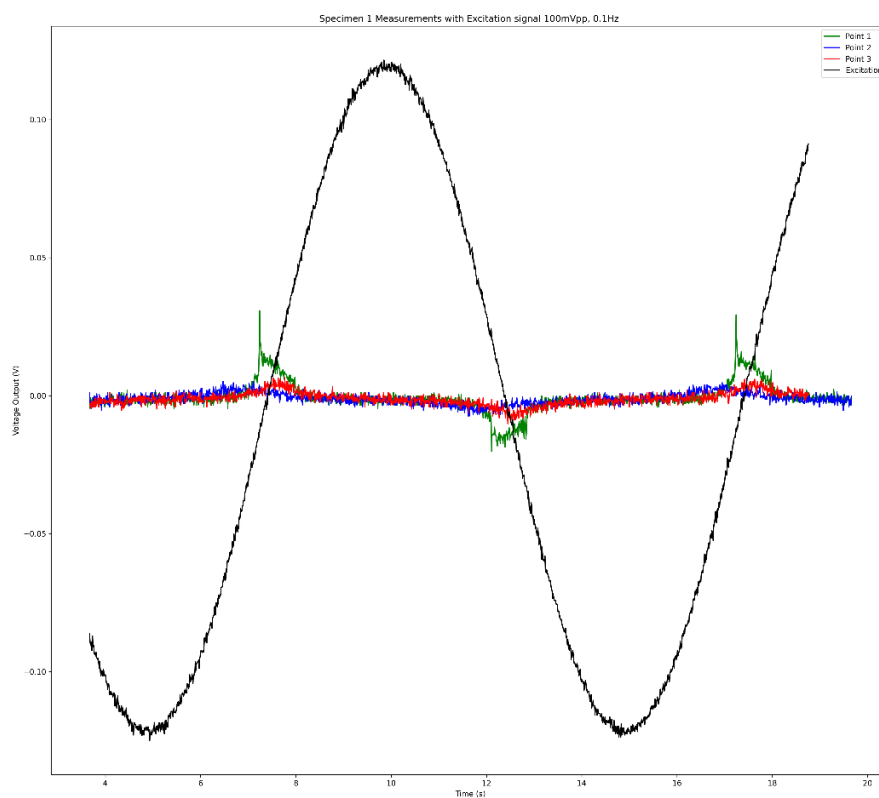
Συνολικά για το δείγμα 1 διενεργήθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία ενδιαφέροντος με τρεις διαφορετικές συνθήκες διέγερσης, των οποίων τα αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω. Σε όλες τις γραφικές παραστάσεις, με πράσινο επισημαίνονται οι μετρήσεις στο σημείο μέτρησης 1, με μπλε οι μετρήσεις στο σημείο 2, με κόκκινο οι μετρήσεις στο σημείο 3 και με μαύρο η διέγερση της εκάστοτε μέτρησης, πριν την ενίσχυσή της.



Εικόνα 40: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.



Εικόνα 41: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.



Εικόνα 42: Μετρήσεις δείγματος 1 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις από κορυφή σε κορυφή του πλάτους της επαγόμενης τάσης για το δείγμα 1.

	Δείγμα 1 Μέτρηση 1	Δείγμα 1 Μέτρηση 2	Δείγμα 1 Μέτρηση 3
f=1Hz	V _{pp} =340mV	V _{pp} =160mV	V _{pp} =100mV
f=0.5Hz	V _{pp} =320mV	V _{pp} =140mV	V _{pp} =100mV
f=0.1Hz	V _{pp} =40 mV	V _{pp} =10mV	V _{pp} =10mV

Πίνακας 1: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 1.

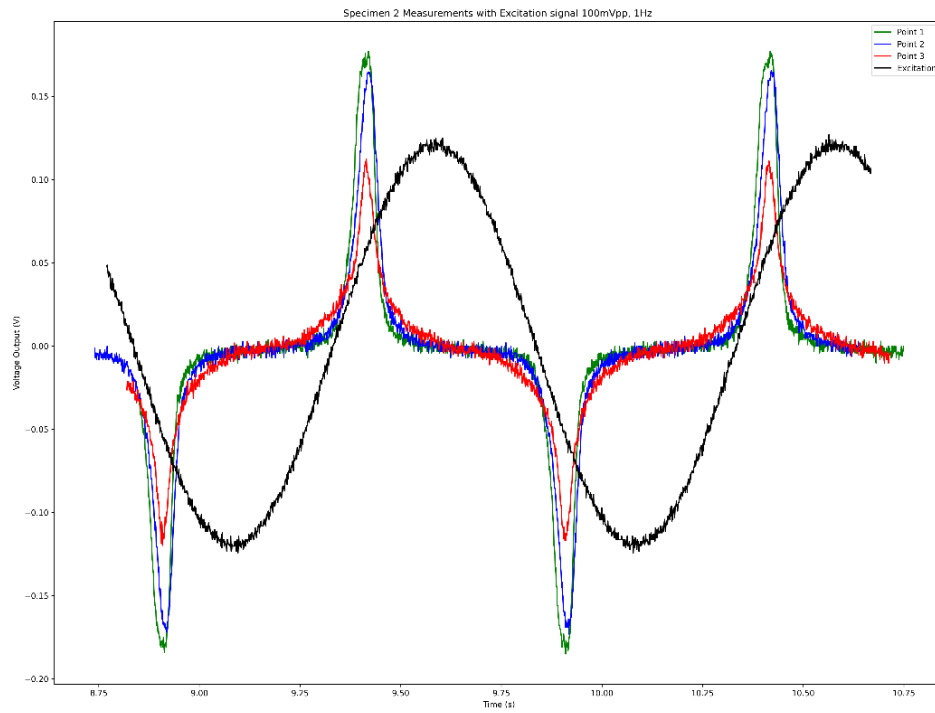
7.2. Μετρήσεις δείγματος 2

Για την μελέτη του δείγματος 2, λήφθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία, που περιγράφονται σε προηγούμενη ενότητα, όπως επισημαίνονται στην εικόνα (43).

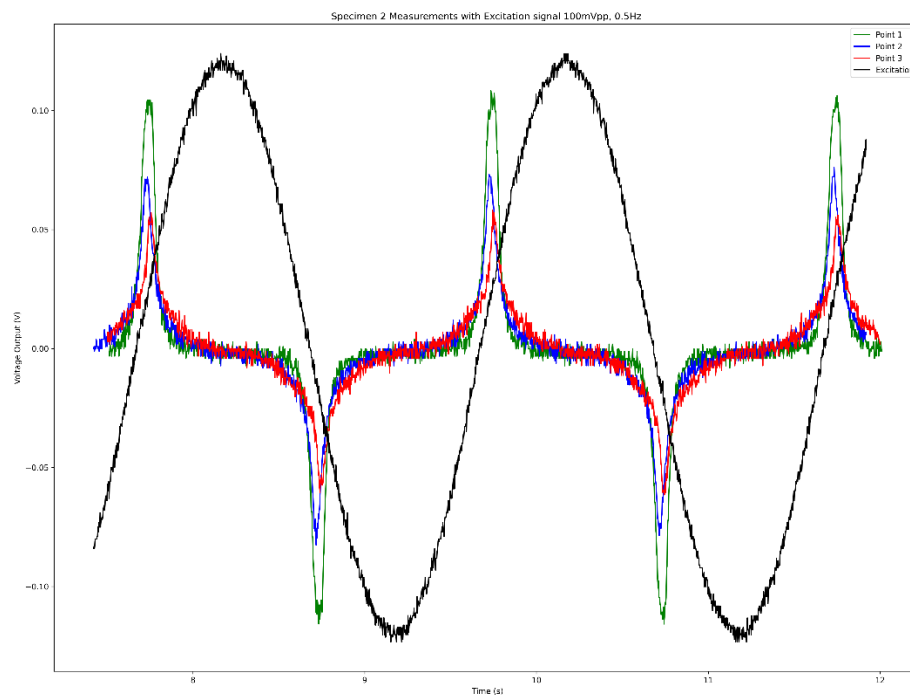


Εικόνα 43: Σημεία μετρήσεων δείγματος 1.

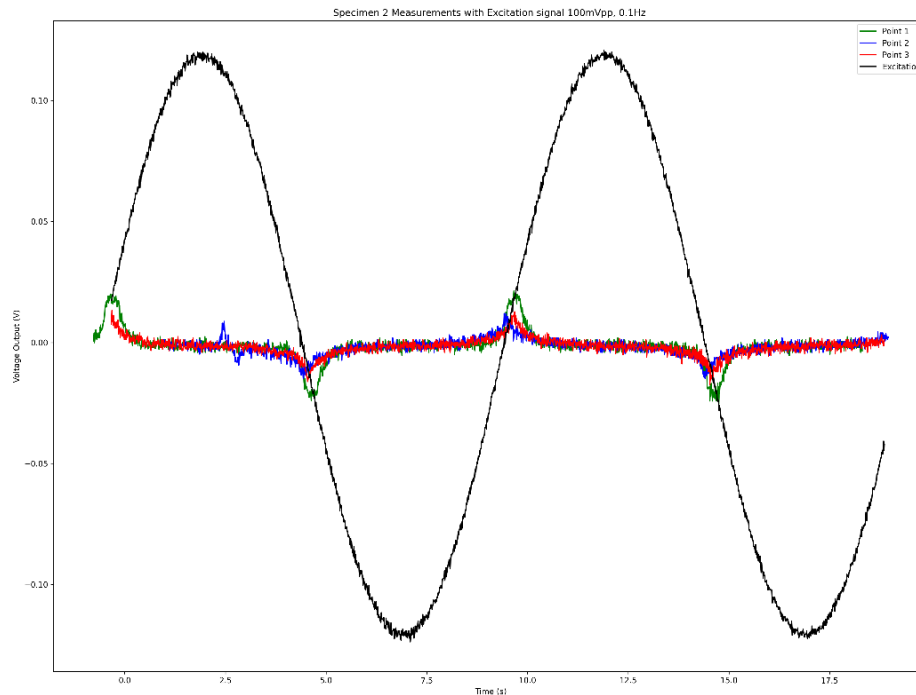
Συνολικά για το δείγμα 2 διενεργήθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία ενδιαφέροντος με τρεις διαφορετικές συνθήκες διέγερσης, των οποίων τα αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω. Σε όλες τις γραφικές παραστάσεις, με πράσινο επισημαίνονται οι μετρήσεις στο σημείο μέτρησης 1, με μπλε οι μετρήσεις στο σημείο 2, με κόκκινο οι μετρήσεις στο σημείο 3 και με μαύρο η διέγερση της εκάστοτε μέτρησης πριν την ενίσχυσή της.



Εικόνα 44: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.



Εικόνα 45: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.



Εικόνα 46: Μετρήσεις δείγματος 2 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις από κορυφή σε κορυφή του πλάτους της επαγόμενης τάσης για το δείγμα 2.

	Δείγμα 2 Μέτρηση 1	Δείγμα 2 Μέτρηση 2	Δείγμα 2 Μέτρηση 3
f=1Hz	Vpp=340mV	Vpp=320mV	Vpp=200mV
f=0.5Hz	Vpp=200mV	Vpp=140mV	Vpp=100mV
f=0.1Hz	Vpp=40mV	Vpp=20mV	Vpp=20mV

Πίνακας 2: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 2.

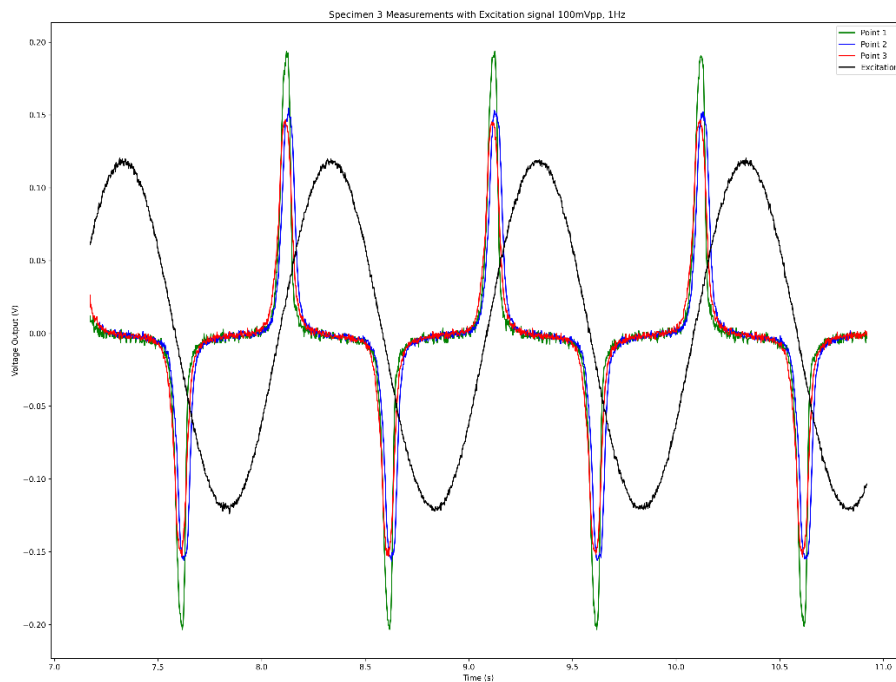
7.3. Μετρήσεις δείγματος 3

Για την μελέτη του δείγματος 2, λήφθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία, που περιγράφονται σε προηγούμενη ενότητα, όπως επισημαίνονται στην Εικόνα 47.

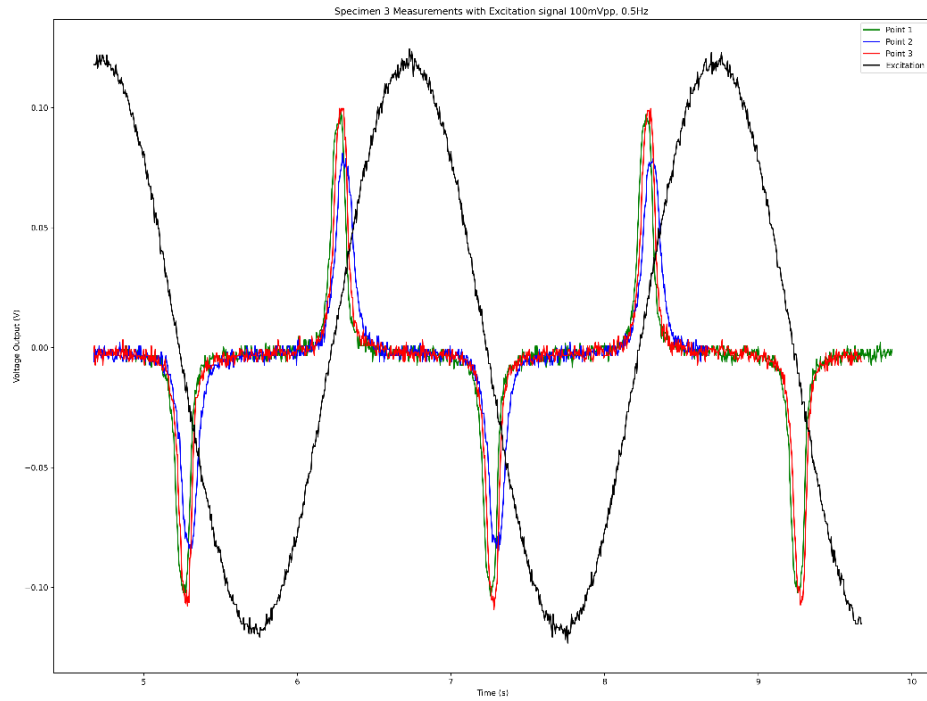


Εικόνα 47: Σημεία μετρήσεων δείγματος 3.

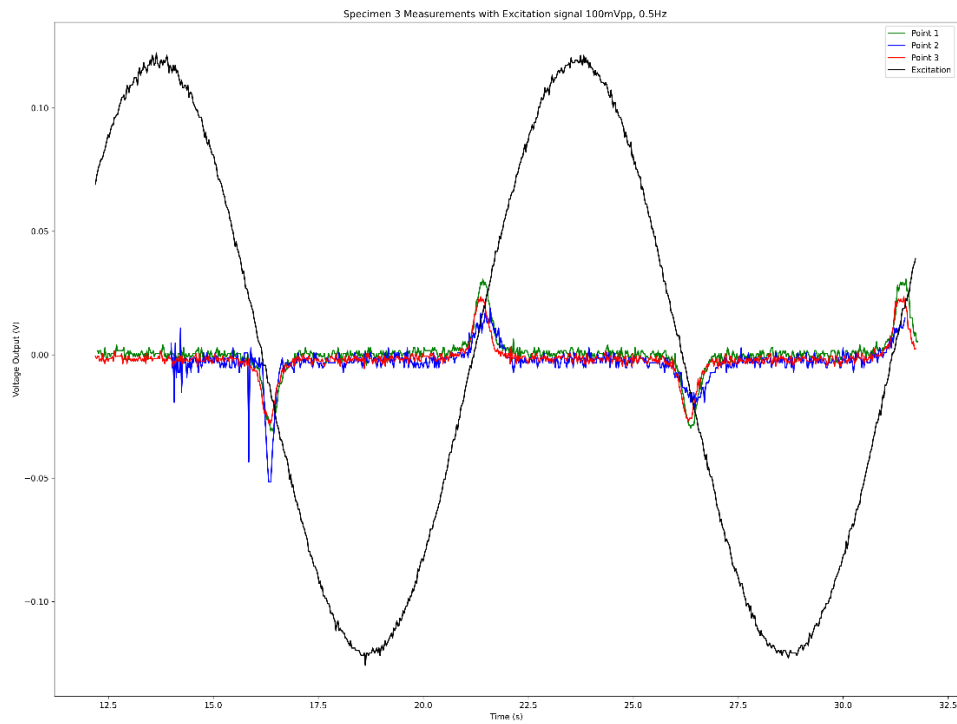
Συνολικά για το δείγμα 2 διενεργήθηκαν μετρήσεις στα τρία σημεία ενδιαφέροντος με τρεις διαφορετικές συνθήκες διέγερσης, των οποίων τα αποτελέσματα αναγράφονται παρακάτω. Σε όλες τις γραφικές παραστάσεις, με πράσινο επισημαίνονται οι μετρήσεις στο σημείο μέτρησης 1, με μπλε οι μετρήσεις στο σημείο 2, με κόκκινο οι μετρήσεις στο σημείο 3 και με μαύρο η διέγερση της εκάστοτε μέτρησης, πριν την ενίσχυσή της.



Εικόνα 48: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 1Hz.



Εικόνα 49: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 0.5Hz.



Εικόνα 50: Μετρήσεις δείγματος 3 για διέγερση 100mVpp και 0.1Hz.

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις από κορυφή σε κορυφή του πλάτους της επαγόμενης τάσης για το δείγμα 3.

	Δείγμα 3 Μέτρηση 1	Δείγμα 3 Μέτρηση 2	Δείγμα 3 Μέτρηση 2
$f=1\text{Hz}$	$V_{pp}=400\text{mV}$	$V_{pp}=300\text{mV}$	$V_{pp}=300\text{mV}$
$f=0.5\text{Hz}$	$V_{pp}=200\text{mV}$	$V_{pp}=200\text{mV}$	$V_{pp}=160\text{mV}$
$f=0.1\text{Hz}$	$V_{pp}=50\text{mV}$	$V_{pp}=40\text{mV}$	$V_{pp}=30\text{mV}$

Πίνακας 3: Μετρήσεις επαγόμενης τάσης δείγματος 3.

7.4. Αξιολόγηση Μετρήσεων

Για την ερμηνεία των παραπάνω μετρήσεων, αξιοσημείωτο είναι ότι ανά περίοδο, στα σημεία όπου μηδενίζει η κυματομορφή της διέγερσης, λόγω της εξίσωσης (5.5), θεωρούμε ότι είναι και τα σημεία «μηδενισμού» της μαγνητικής επαγωγής. Επομένως, βάσει της μορφής του βρόχου υστέρησης των φερρομαγνητικών υλικών, γίνεται αντιληπτό ότι αυτά τα σημεία αντιστοιχούν και στην παρουσία του συνεκτικού πεδίου κατά την διάρκεια του κύκλου μαγνήτισης.

Επιπλέον, εξίσου σημαντική για τον χαρακτηρισμό των πειραματικών αποτελεσμάτων, είναι η συσχέτιση της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας με τα σημεία όπου παρουσιάζεται το συνεκτικό πεδίο. Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2, η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, σε αυτά τα σημεία παρουσιάζει την μέγιστη τιμή της, επομένως για μεταβολές του πλάτους της τάσης, αναμένονται και μεταβολές στο μέτρο της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού.

Κατόπιν παρατήρησης των γραφικών παραστάσεων που εξήχθησαν από τις μετρήσεις κατά την διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών, εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Ξεκινώντας από τις μετρήσεις του δείγματος 3, το οποίο θεωρείται και ως σημείο αναφοράς λόγω των ελάχιστων επιφανειακών ατελειών, παρατηρείται η αναμενόμενη απόκριση της επαγόμενης τάσης.

- Οι μικρές αποκλίσεις στο πλάτος της επαγόμενης τάσης από τις μετρήσεις κατά μήκος του δείγματος 3, που παρατηρείται σε κάθε αλληλουχία παραμέτρων διέγερσης (Εικόνες 48-50), οφείλονται στις μικρές επιφανειακές ατέλειες λόγω της οξείδωσης του υλικού.
- Σε όλες τις μετρήσεις των δειγμάτων, παρατηρείται ότι η επαγόμενη τάση στα ίδια σημεία μέτρησης παρουσιάζει μικρότερο πλάτος όσο μειώνεται η συχνότητα της διέγερσης. Αυτή η μέτρηση αποτελεί επιβεβαίωση της θεωρητικής προσέγγισης που περιγράφεται στην εξίσωση (5.5).
- Σε κάθε μέτρηση των δειγμάτων 1 και 2, είναι αρκετά ευδιάκριτη η μείωση του πλάτους της επαγόμενης τάσης στο υλικό, όσο μετατοπίζεται η διάταξη των πηνίων προς περιοχές με εμφανείς ατέλειες και παραμένουσες τάσεις. Επομένως αυξάνεται και το μέτρο του συνεκτικού πεδίου του υλικού, και κατά συνέπεια η συνολική ένταση του επαγόμενου πεδίου
- Επιπλέον, η ραγδαία αύξηση της έντασης του πεδίου οδηγεί και στην μείωση του μέτρου της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, σύμφωνα και με την εξίσωση (5.6).

7.5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών σε ένα υλικό, κατόπιν κάποιας εξωτερικής διέγερσης, αυξάνεται το πλάτος της έντασης του συνεκτικού πεδίου και μειώνεται η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Αυτό αποτελεί μια επιβεβαίωση ότι όσο περισσότερες παραμένουσες τάσεις και ασυνέχειες υπάρχουν σε ένα υλικό, δηλαδή όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα και η δυσκολία στην κίνηση των μαγνητικών του τοιχωμάτων, φθίνει η ικανότητα μαγνήτισής του.

Επομένως οι παράμετροι που ορίζουν τον βρόχο υστέρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δείκτης για την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων εντός των υλικών υπό μελέτη.

7.6. Μελλοντική Εργασία

Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη, επιδέχεται βελτιώσεων, προκειμένου να βελτιωθεί η χρηστικότητά της αλλά και ο τρόπος που διεξάγεται το σύνολο των μετρήσεων.

Μια βασική βελτίωση, που ενδεχομένως να βελτιώσει την ποιότητα του τελικού σήματος, είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας ολοκληρωμένης πλακέτας, η οποία θα περιέχει και τις δυο κυκλωματικές διατάξεις διέγερσης και λήψης, καθώς και ένα απομονωμένο σύστημα σταθεροποίησης της τροφοδοσίας αυτών. Έτσι ελαχιστοποιείται η χρήση των εργαλείων του πάγκου που ελέγχουν την συσκευή, τα οποία εισάγουν παραπάνω θόρυβο στις τελικές μετρήσεις.

Η χρήση ενός κυκλώματος ολοκληρωτή σαν τελικό στάδιο στην λήψη των μετρήσεων, αποτελεί ένα ενισχυτικό βήμα στην κατανόηση των μετρούμενων μεγεθών καθώς έτσι εξάγεται η ακριβής μέτρηση του βρόχου υστέρησης κατά την διάρκεια του κάθε κύκλου μαγνήτισης. Έτσι δίνεται και η δυνατότητα για απόφαση περί των ενεργειακών αλλαγών στις ασυνέχειες, από τον υπολογισμό του εμβαδού του βρόχου.

Ο έλεγχος της διέγερσης καθώς και της διαδικασίας λήψης μετρήσεων θα μπορούσαν να συγκεντρώνονται από κάποιον μικροελεγκτή, ο οποίος ταυτόχρονα θα μπορούσε να ελέγχεται από τον υπολογιστή του εκάστοτε χρήστη. Κατά αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιείται η παρέμβαση στα κυκλωματικά στοιχεία της διάταξης, και επιτυγχάνεται η απλούστευση της διαδικασίας ελέγχου της διέγερσης και της λήψης.

Μια ακόμη βοηθητική προσθήκη, που μπορεί να βελτιστοποιήσει την ποιότητα των μετρήσεων, είναι η χρήση μιας διάταξης ανατροφοδότησης. Δηλαδή με την χρήση έτοιμων ψηφιακών μετρητικών διατάξεων, να λαμβάνονται μετρήσεις για το πεδίο οι οποίες κατόπιν επεξεργασίας θα συμβάλουν σε αυτοματοποιημένες διορθωτικές παρεμβάσεις στην διέγερση ή την λήψη.

Στην περίπτωση που όλα τα κυκλωματικά στοιχεία συνδυαστούν, μαζί με τα πηνία διέγερσης και λήψης εντός μιας φορητής συσκευής, δύναται να μειωθεί η πολυπλοκότητα και ο χρόνος που απαιτείται για την μέτρηση του κάθε δοκιμίου.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Purcell, Edward M. Electricity and Magnetism. Third edition, Cambridge University Press, 2013.
- [2] Jiles, David. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Third Edition. Taylor & Francis, 2015.
- [3] Tumanski, Slawomir. Handbook of Magnetic Measurements. 1st ed., CRC Press, 2016.
- [4] Zurek, Stan. “Magnetic Field Strength.” *Encyclopedia Magnetica*.
- [5] Spaldin, Nicola A. Magnetic Materials: Fundamentals and Applications. 2nd ed., Cambridge University Press, 2010.
- [6] Cullity, B. D., and C. D. Graham. Introduction to Magnetic Materials. John Wiley & Sons, 2011.
- [7] Lyu, Ruilin, et al. “A Novel Method for Reducing the Lift-Off Effect in Coercivity Measurement through Auxiliary Inductance Data.” *NDT*, vol. 1, no. 1, Dec. 2023, pp. 35–45.
- [8] O’Handley, Robert C. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. Wiley, 1999.
- [9] George, Sebastian. Amorphous Magnetic Materials: A Versatile Foundation for Tomorrow’s Applications. Acta Universitatis Upsaliensis, 2020.
- [10] Teweldemedhin, Z. S., et al. “Susceptibility, Measurements of Solids.” *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, edited by David Gubbins and Emilio Herrero-Bervera, Springer Netherlands, 2007, pp. 933–37.
- [11] Miller, Joel S. “Organic- and Molecule-Based Magnets.” *Pramana*, vol. 67, no. 1, July 2006, pp. 1–16.
- [12] Hubert, Alex. Magnetic Domains : The Analysis of Magnetic Microstructures. Springer, 1998.

- [13] Wang, Congyi, et al. "Research on Microstructure Characteristics of Welded Joint by Magneto-Optical Imaging Method." *Metals*, vol. 12, no. 2, Feb. 2022, p. 258.
- [14] Lavrijsen, Reinoud. Another Spin in the Wall: Domain Wall Dynamics in Perpendicularly Magnetized Devices. 2011. Eindhoven University of Technology.
- [15] Aharoni, Amikam. Introduction to the Theory of Ferromagnetism. Oxford : Clarendon Press ; New York : Oxford University Press, 1996.
- [16] Chetan Poudel. Inverted Linear Halbach Array for Separation of Magnetic Nanoparticles. Unpublished, 2014.
- [17] Hellier, Charles. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill, 2001.
- [18] Sung, H. W. F., and C. Rudowicz. "Physics behind the Magnetic Hysteresis Loop — a Survey of Misconceptions in Magnetism Literature." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 260, no. 1–2, Mar. 2003, pp. 250–60.
- [19] Gryś, Sławomir, and Mariusz Najgebauer. "An Attempt of Accuracy Assessment of the Hysteresis Loop and Power Loss in Magnetic Materials during Control Measurements." *Measurement*, 2021.
- [20] Bertotti, Giorgio. Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers. Academic Press, 1998.
- [21] Blitz, Jack. Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing. A. Hilger, 1991.
- [22] Workman, Gary L., and Patrick O. Moore, editors. Nondestructive Testing Handbook. 7: Ultrasonic Testing / Technical Editors: Gary L. Workman, Doron Kishon; Editor: Patrick O. Moore. 3rd ed., American Society for Nondestructive Testing, 2007.
- [23] Behnia, Behzad. Determining the Embrittlement Temperature of Asphalt Binders Using an Acoustic Emission Approach. 2010.
- [24] Kouí, M., et al. Μη καταστρεπτικές και φασματοσκοπικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών, [Undergraduate textbook] Kallipos, Open Academic Editions., 2015.

- [25] Segovia Ramírez, Isaac, et al. "Review on Additive Manufacturing and Non-Destructive Testing." *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 66, Feb. 2023, pp. 260–86.
- [26] García-Martín, Javier, et al. "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing." *Sensors*, vol. 11, no. 3, 2011, pp. 2525–65.
- [27] Höller, P. "Nondestructive Analysis of Structure and Stresses by Ultrasonic and Micromagnetic Methods." *Nondestructive Characterization of Materials II*, edited by Jean F. Bussière et al., Springer US, 1987, pp. 211–25.
- [28] Sablik, M. J., and B. Augustyniak. "Magnetic Methods of Nondestructive Evaluation." *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, edited by John G. Webster, 1st ed., Wiley, 1999.
- [29] Szielasko, Klaus, et al. "Minimalistic Devices and Sensors for Micromagnetic Materials Characterization." *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, Jan. 2013, pp. 101–04.
- [30] Santa-aho, Suvi, et al. "Barkhausen Noise Probes and Modelling: A Review." *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 38, no. 4, Sept. 2019, p. 94.
- [31] Hang, Cheng, et al. "A Method of Barkhausen Noise Feature Extraction Based on an Adaptive Threshold." *Applied Sciences*, vol. 9, no. 15, Jan. 2019, p. 2964.
- [32] Suliga, Maciej, et al. "Hysteresis Loop as the Indicator of Residual Stress in Drawn Wires." *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 29, no. 2, 2014, pp. 123–32.
- [33] Šternberk J, Kratochvílová E, Gemperle A, Faja V, Walder V. (November 1985). Dependence of characteristics of hysteresis loops on dislocation densities for low alloy Cr-Mo steel. *Czechoslovak Journal of Physics*, vol. 35(11), pp. 1259-1266
- [34] Lubitz K. (June 1974). Magnetic studies of the dislocation structure of iron single crystals deformed at 295 K. *Applied Physics*, vol. 4(1), pp. 51-61
- [35] Qureshi AH, Chaudhary LN. (1970). Influence of plastic deformation on coercive field and initial susceptibility of Fe-3.25% Si alloys. *Journal of Applied Physics*, vol. 41(3), pp. 1042-1043

- [36] Kronmüller, Helmut. "General Micromagnetic Theory and Applications." *Materials Science and Technology*, edited by R. W. Cahn et al., 1st ed., Wiley, 2019, pp. 1–43.
- [37] Perevertov, O. "Influence of the Residual Stress on the Magnetization Process in Mild Steel." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 4, Feb. 2007, pp.949–54.
- [38] Bozorth, R. M., and H. J. Williams. "Effect of Small Stresses on Magnetic Properties." *Reviews of Modern Physics*, vol. 17, no. 1, 1945, pp. 72–80.
- [39] Parakka, A., and D. C. Jiles. "Magneprobe: A Portable System for Non-Destructive Testing of Ferromagnetic Materials." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 140–144, 1995, pp. 1841–42.
- [40] Vourna, P., et al. "An Accurate Evaluation of the Residual Stress of Welded Electrical Steels with Magnetic Barkhausen Noise." *Measurement*, vol. 71, July 2015, pp. 31–45.
- [41] Stupakov, Alexandr, et al. "A System for Controllable Magnetic Measurements of Hysteresis and Barkhausen Noise." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 5, 2016, pp. 1087–97.
- [42] Zickler, Th. "Basic Design and Engineering of Normal-Conducting, Iron-Dominated Electromagnets." CERN-2010-004, 2009, pp. 65–102.
- [43] Yuan, Xin'an, et al. "Crack Identification and Quantification Methods under the Condition of Lift-off Effect Using Alternating Current Field Measurement Technique." *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 211, Apr. 2024, p. 111225.
- [44] Muljadi, et al. "Preparation and Characterization of 5wt.% Epoxy Resin Bonded Magnet NdFeB for Micro Generator Application." *Energy Procedia*, vol. 68, Apr. 2015, pp. 282–87.
- [45] Stupakov, Oleksandr, et al. "Optimization of Single-Yoke Magnetic Testing by Surface Fields Measurement." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, no. 2, Jan. 2006, pp. 248–54.
- [46] Sgobba, S. "Physics and Measurements of Magnetic Materials." CERN-2010-004, 2011, pp. 39–63.