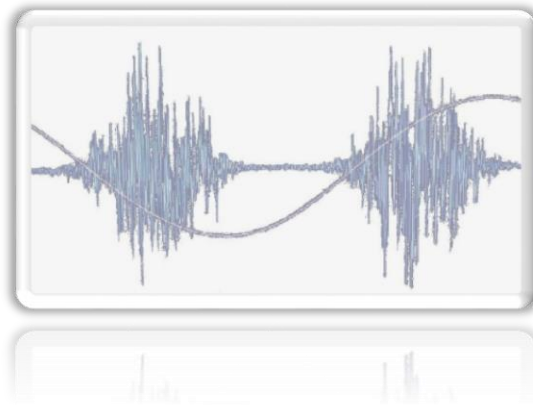




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Δ.Π.Μ.Σ. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen



Αγγελόπουλος Σπυρίδων

Μεταπτυχιακή Εργασία

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

Αθήνα 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Ανάπτυξη
μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen

Αγγελόπουλος Σπυρίδων
Μεταπτυχιακή Εργασία

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

Αθήνα 2014

Περίληψη

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία περιγράφεται η ανάπτυξη ενός μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen. Το φαινόμενο Barkhausen χρησιμοποιείται ως μία μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου για την ανίχνευση ατελειών και για την καταγραφή των ιδιοτήτων των εξεταζόμενων υλικών. Αρχικά, παρουσιάζονται οι μαγνητικοί αισθητήρες, τα χαρακτηριστικά τους και τα είδη τους. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι συνήθεις μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου, οι κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών, αλλά και τα είδη των συνήθων ατελειών που συναντώνται. Επίσης, αναλύεται το φαινόμενο Barkhausen σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο. Στο πειραματικό μέρος της Εργασίας παρουσιάζεται η σχεδίαση του αισθητήρα και των απαραίτητων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και περιγράφονται τα βήματα για την ανάπτυξή τους. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία της διεξαγωγής μετρήσεων, τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Abstract

This thesis describes the development of a magnetic Barkhausen sensor. The Barkhausen effect is used as a method of Non-Destructive Testing in order to detect defects and to measure the properties of the tested materials. Firstly, we present the magnetic sensors, their characteristics and their categories. The common methods of Non-Destructive Testing, the categories and characteristics of magnetic materials and the common types of defects are also presented. Furthermore, we analyze the Barkhausen effect in theoretical and experimental level. In the experimental part of this thesis, we present the design of the sensor and its electronics and we describe the steps for their development. Finally, we present the process of conducting measurements, the results and the conclusions.

Εισαγωγή - Ευχαριστίες

Το φαινόμενο Barkhausen αποτελεί μια μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου των υλικών, με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών και την ανίχνευση τυχόν ατελειών στη δομή των μαγνητικών υλικών. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου και περιγράφεται η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός μαγνητικού αισθητήρα που βασίζεται στη συγκεκριμένη μέθοδο. Εκτός από τον ίδιο τον αισθητήρα, αναλύεται και η κατασκευή των αναγκαίων ηλεκτρονικών μερών, που έχουν ως σκοπό την ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος και την εξάλειψη του περιβαλλοντικού θορύβου από αυτό.

Προτού ξεκινήσει η κατασκευή των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μέσω της εφαρμογής OrCAD PSpice, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στις σχετικές παραγράφους. Η σχεδίαση των πλακετών των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων έγινε με χρήση της εφαρμογής CadSoft EAGLE. Τέλος, τα σχήματα στα οποία δεν υπάρχει σχετική αναφορά έχουν παραχθεί μέσω της εφαρμογής Trimble Sketchup.

Στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιείται μια εισαγωγή στους μαγνητικούς αισθητήρες, μέσω της περιγραφής των χαρακτηριστικών μεγεθών τους και των υλικών κατασκευής τους. Επίσης, παρουσιάζονται τα κυριότερα είδη μαγνητικών αισθητήρων, συνοδευόμενα από μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών τους.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος ως μέθοδος εύρεσης των χαρακτηριστικών και των ατελειών των υλικών και περιγράφονται οι συνήθεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται.

Στο Κεφάλαιο 3 παρατίθενται οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται τα μαγνητικά υλικά, η δομή τους και η συμπεριφορά τους κατά τη μαγνήτιση. Ακόμη, επεξηγείται ο τρόπος αξιοποίησης της καμπύλης μαγνήτισης και του βρόχου

υστέρησης για την εξεύρεση πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τη συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα είδη των ατελειών που συναντώνται και σχετίζονται με τη δομή των υλικών. Σκοπός των μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι η εύρεση τέτοιων ατελειών που δημιουργούνται από τη φθορά ή καταπόνηση των υλικών.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου Barkhausen. Περιγράφονται οι συνήθεις διατάξεις που χρησιμοποιούνται, ο τρόπος διεξαγωγής των μετρήσεων, οι πληροφορίες που μπορούν να προκύψουν και οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη μέθοδος.

Το Κεφάλαιο 6 αποτελεί το πειραματικό μέρος της Εργασίας. Περιλαμβάνει το σχεδιασμό του μαγνητικού αισθητήρα, καθώς και την παρουσίαση του σήματος διέγερσης, του εύρους συχνοτήτων και των ηλεκτρονικών μερών που επελέγησαν. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του ηλεκτρομαγνήτη και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την τέλεση αυτής της Εργασίας και παρέχονται υποδείξεις για την περαιτέρω ανάπτυξη του συγκεκριμένου μαγνητικού αισθητήρα και της συνολικής διάταξης.

Για την ολοκλήρωση αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για τη βοήθεια και συμπαράστασή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε ώστε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ευχαριστώ, επίσης, την υποψήφια Διδάκτορα κ. Πολυξένη Βουρνά για την καθοδήγηση, τη βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές της κατά την τέλεση της Εργασίας.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω τον κ. Νεοκλή Χατζηγεωργίου, τον κ. Κωνσταντίνο Ασημακόπουλο και τον κ. Δημήτριο Κοσσυβάκη για τις συμβουλές, τη

βοήθεια και τις υποδείξεις τους κατά την ανάπτυξη του αισθητήρα και των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ομάδα του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας και Συγκολλήσεων της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. για τη συνεργασία τους κατά την εκπόνηση της Εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract	iii
Εισαγωγή - Ευχαριστίες.....	v
Περιεχόμενα	ix
1 Μαγνητικοί αισθητήρες.....	1
1.1 Εισαγωγή στους αισθητήρες	1
1.1.1 Ορισμός και κατηγορίες αισθητήρων.....	1
1.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη αισθητήρων.....	2
1.2 Εισαγωγή στους μαγνητικούς αισθητήρες.....	5
1.3 Υλικά κατασκευής μαγνητικών αισθητήρων	5
1.3.1 Ημιαγωγοί.....	5
1.3.2 Μαλακά μαγνητικά υλικά.....	6
1.3.3 Σκληρά μαγνητικά υλικά.....	8
1.4 Είδη μαγνητικών αισθητήρων	9
1.4.1 Αισθητήρες Hall	9
1.4.2 Αισθητήρες πύλης ροής (Flux-gate).....	12
1.4.3 Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης.....	12
1.4.4 Αισθητήρες GMR.....	13
1.4.5 Αισθητήρες LVDT	14
1.4.6 Αισθητήρες MDL.....	15
1.4.7 Αισθητήρες SQUID	17
1.4.8 Μαγνητοοπτικοί αισθητήρες.....	18
1.4.9 Πίνακας σύγκρισης των μαγνητικών αισθητήρων.....	20

2	Μη Καταστροφικός Έλεγχος Υλικών	21
2.1	Εισαγωγή.....	21
2.2	Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου	22
2.2.1	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)	22
2.2.2	Φασματοσκοπία Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD)	23
2.2.3	Έλεγχος με Υπερήχους	24
2.2.4	Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά.....	25
2.2.5	Έλεγχος με δινορρεύματα.....	26
2.2.6	Μαγνητικός έλεγχος	27
3	Μαγνητικά υλικά.....	29
3.1	Εισαγωγή.....	29
3.2	Διαμαγνητικά υλικά	31
3.3	Παραμαγνητικά υλικά	32
3.4	Σιδηρομαγνητικά υλικά	33
3.5	Αντισιδηρομαγνητικά υλικά	35
3.6	Σιδηριμαγνητικά υλικά	35
3.7	Θερμοκρασία Curie.....	36
3.8	Καμπύλη μαγνήτισης	36
3.9	Βρόχος υστέρησης	38
4	Είδη ατελειών.....	41
4.1	Εισαγωγή.....	41
4.2	Σημειακές ατέλειες	42
4.2.1	Κενή θέση.....	42
4.2.2	Παρεμβολή.....	43
4.2.3	Προσμίξεις.....	44
4.2.4	Αντικατάσταση.....	44
4.2.5	Διαπλεγματικές ατέλειες	45
4.3	Γραμμικές ατέλειες	45
4.3.1	Διαταραχή ακμής	46

4.3.2	Ελικοειδής διαταραχή.....	46
4.4	Διεπιφανειακές ατέλειες.....	47
4.4.1	Ατέλειες ορίων κόκκων.....	48
4.4.2	Διδυμίες.....	48
4.4.3	Σφάλματα επιστοιβάσης.....	48
4.4.4	Διαταραχές δάσους.....	49
4.5	Ατέλειες όγκου.....	49
4.5.1	Κατακρημνίσματα.....	50
4.5.2	Εγκλείσματα.....	50
5	Φαινόμενο Barkhausen.....	51
5.1	Εισαγωγή.....	51
5.2	Θεωρητικό υπόβαθρο.....	52
5.3	Διατάξεις μέτρησης Θορύβου Barkhausen.....	54
5.3.1	Γενικά στοιχεία.....	54
5.3.2	Διάταξη μονού ηλεκτρομαγνήτη.....	55
5.3.3	Επιδερμικό φαινόμενο.....	56
5.3.4	Διάταξη διπλού ηλεκτρομαγνήτη.....	58
5.3.5	Διάταξη περιστροφικού αισθητήρα Barkhausen.....	59
5.4	Επεξεργασία των μετρήσεων.....	60
5.5	Χαρακτηρισμός υλικών με τη μέθοδο Barkhausen.....	62
5.6	Εφαρμογές της μεθόδου Barkhausen.....	65
5.6.1	Ανίχνευση παραμορφώσεων.....	65
5.6.2	Παρακολούθηση κόπωσης υλικών.....	67
5.6.3	Έλεγχος του εσωτερικού των υλικών.....	68
5.6.4	Εντοπισμός φθορών λείανσης.....	69
6	Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen.....	71
6.1	Σχεδιασμός μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen.....	71
6.1.1	Συνολική διάταξη αισθητήρα.....	71
6.1.2	Επιλογή τύπου διάταξης.....	72

6.2	Σήμα διέγερσης.....	73
6.3	Εύρος συχνοτήτων	74
6.4	Σχεδιασμός ενίσχυσης και φίλτρων	74
6.4.1	Προενισχυτής.....	75
6.4.2	Διαχωρισμός σήματος.....	76
6.4.3	Ολοπερατό φίλτρο.....	77
6.4.4	Χαμηλοπερατό φίλτρο	78
6.4.5	Υψηλοπερατό φίλτρο.....	79
6.4.6	Συνολικό κύκλωμα – Προσομοίωση	79
6.5	Κατασκευή αισθητήρα μονού ηλεκτρομαγνήτη	82
6.6	Ηλεκτρονικό κύκλωμα ενίσχυσης και φίλτρων	84
6.6.1	Γενικά.....	84
6.6.2	Επιλογή προενισχυτή.....	84
6.6.3	Επιλογή ενισχυτή φίλτρων.....	86
6.6.4	Σχεδίαση των ηλεκτρονικών πλακετών	87
6.6.5	Κατασκευή ηλεκτρονικών πλακετών.....	91
6.7	Σύνδεση των ηλεκτρονικών πλακετών	93
6.8	Διεξαγωγή των μετρήσεων	96
7	Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία	99
8	Βιβλιογραφία.....	101

1 Μαγνητικοί αισθητήρες

1.1 Εισαγωγή στους αισθητήρες

1.1.1 Ορισμός και κατηγορίες αισθητήρων

Ως αισθητήρες ορίζονται οι διατάξεις που είναι ικανές να μετατρέψουν μια φυσική ποσότητα-ιδιότητα σε ένα μετρήσιμο μέγεθος. Γενικά, οι αισθητήρες περιλαμβάνουν όλες τις διατάξεις που μπορούν να αντιληφθούν ένα σήμα εισόδου και να αντιδράσουν ανάλογα, παράγοντας ένα σήμα εξόδου [1]. Συνήθως, η έξοδος ενός αισθητήρα είναι ένα ηλεκτρικό σήμα, ώστε να είναι πιο εύκολη η περαιτέρω εκμετάλλευσή του, μέσω της μέτρησης, απεικόνισης ή μετατροπής του.

Οι αισθητήρες διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος του μεγέθους που είναι ικανοί να αντιληφθούν. Έτσι, κατηγοριοποιούνται στους μηχανικούς, χημικούς, μαγνητικούς και θερμικούς αισθητήρες, καθώς και τους αισθητήρες ακτινοβολίας [2]. Οι μηχανικοί ή φυσικοί αισθητήρες μπορούν να αντιληφθούν πίεση, μετατόπιση, ηλεκτρικό φορτίο, μάζα ή και χρόνο. Αντίστοιχα, οι χημικοί αισθητήρες αντιλαμβάνονται χημικά μεγέθη, όπως είναι η υγρασία και η χημική σύσταση ενός υγρού ή αερίου. Ομοίως, οι μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν το μαγνητικό πεδίο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης, βασιζόμενοι στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Ακόμη, χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία μαγνητικών συσκευών, όπως είναι οι μαγνητικές κεφαλές ενός σκληρού δίσκου υπολογιστή. Οι

Θερμικοί αισθητήρες μετρούν τις θερμοκρασιακές μεταβολές, όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους. Φυσικά, τέτοιοι αισθητήρες συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος συσκευών, τόσο για καθημερινή χρήση, όσο και για εξειδικευμένες και πολύ ακριβείς μετρήσεις. Τέλος, οι αισθητήρες ακτινοβολίας μπορούν να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται από διάφορες πηγές. Οι οπτικοί αισθητήρες ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, αφού αντιλαμβάνονται την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του φωτός και την μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα.

Ως αισθητήρες, μπορεί να χαρακτηριστούν μέρη του σώματός μας, όπως τα μάτια και τα αυτιά, έως και τα ευαίσθητα όργανα κατεύθυνσης ενός αεροπλάνου. Γενικά, οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται σε αισθητήρες μεταφορών, ενέργειας, περιβάλλοντος, ασφαλείας, καθώς και σε αισθητήρες οικιακών, βιομηχανικών, ιατρικών και στρατιωτικών εφαρμογών [3].

Ανάλογα με το είδος της επιθυμητής μέτρησης και των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν, πρέπει να γίνει και η κατάλληλη επιλογή του υλικού του αισθητήρα. Τα υλικά αυτά ποικίλουν και ανήκουν κυρίως στις κατηγορίες των διηλεκτρικών, ημιαγώγιμων, αγωγίμων, υπεραγώγιμων, μαγνητικών, ραδιενεργών και βιολογικών υλικών [4]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου υλικού είναι η επιθυμητή ευαισθησία του παραγόμενου αισθητήρα, η καταλληλότητα και αντοχή του υλικού στις συνθήκες που θα διεξαχθούν οι μετρήσεις και φυσικά, το κόστος και ο τρόπος κατασκευής του.

1.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη αισθητήρων

Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα για μια εργασία γίνεται βάσει κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών που τον εκφράζουν. Τα βασικότερα από αυτά είναι η

ευαισθησία, το εύρος, η επαναληψιμότητα, η ανάλυση, η ακρίβεια, τα σφάλματα των παραγόμενων μετρήσεων, η γραμμικότητα, η υστέρηση και ο χρόνος απόκρισης [5].

Η ευαισθησία εκφράζει το ελάχιστο σήμα εισόδου που είναι δυνατόν να γίνει αντιληπτό από έναν αισθητήρα. Ανάλογα με τον αισθητήρα, συνήθως μετράται το ελάχιστο σήμα εισόδου που απαιτείται για να παραχθεί ένα τυπικό για τη συγκεκριμένη περίπτωση σήμα εξόδου.

Το εύρος μετρήσεων περιλαμβάνει το διάστημα μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής που είναι δυνατόν να μετρηθεί με το συγκεκριμένο αισθητήρα. Αυτό το μέγεθος εκφράζει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα προσαρμογής του αισθητήρα σε διαφορετικές μετρήσεις. Ένας ιδανικός αισθητήρας πρέπει να λαμβάνει ακριβείς μετρήσεις για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος σημάτων εισόδου.

Με τον όρο της επαναληψιμότητας χαρακτηρίζεται η ικανότητα του αισθητήρα να αναπαράγει το ίδιο σήμα εξόδου κατά τις επαναλήψεις της ίδιας μέτρησης, υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι αποκλίσεις στις τιμές ενός αισθητήρα πρέπει να βρίσκονται εντός κάποιων ορίων και βεβαίως να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες.

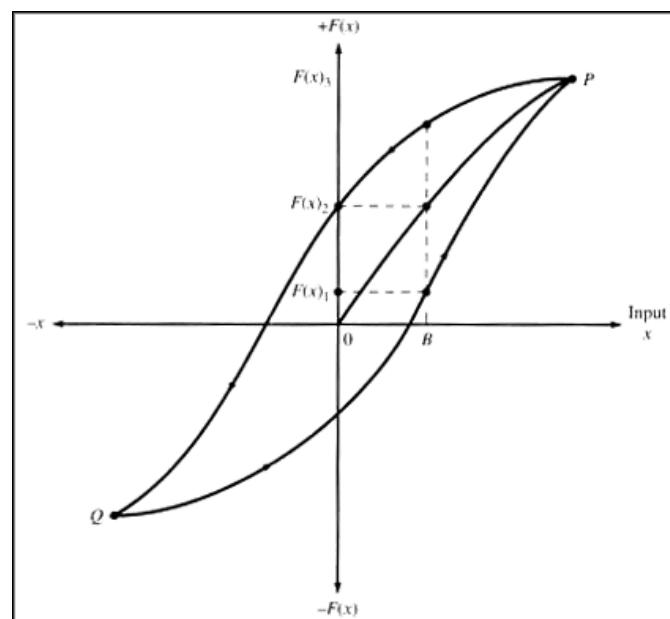
Η ανάλυση εκφράζει την ελάχιστη διαφοροποίηση του σήματος εισόδου που μπορεί να καταγράψει ένας αισθητήρας. Συνήθως, μετράται ως λόγος των δύο σημάτων ή ως απόλυτη τιμή.

Η ακρίβεια είναι η μέγιστη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής. Μετράται βάσει μιας πρότυπης τιμής και εκφράζεται ως ποσοστό επιτυχίας αυτής.

Το σφάλμα μέτρησης ορίζεται από τη διαφορά κατά απόλυτη τιμή μεταξύ της τιμής που εμφανίζεται στην έξοδο του αισθητήρα και της πραγματικής. Για τη μέτρηση του σφάλματος μπορεί να επιλεγεί μηδενικό σήμα εισόδου και να μετρηθεί η διαφορά του από την τιμή που αντιλαμβάνεται ο αισθητήρας.

Η γραμμικότητα εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να διατηρεί σταθερά τα χαρακτηριστικά του, παρά τις μεταβολές που μπορεί να τον επηρεάσουν. Μετράται ως ποσοστό, αλλά μπορεί και να απεικονιστεί ως καμπύλη, για σύγκριση με την ιδανική καμπύλη μετρήσεων.

Παρόμοιο μέγεθος με τη γραμμικότητα είναι και η υστέρηση. Ένας αισθητήρας πρέπει να προσαρμόζεται στις διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν λόγω του περιβάλλοντος και του εύρους των μετρήσεων, αλλά και να είναι ικανός να καταγράψει παρόμοιες μετρήσεις, παρά τις διαφοροποιήσεις στην κατεύθυνση των μετρήσεων. Η συνήθης παρουσίαση της υστέρησης γίνεται μέσω του λεγόμενου βρόχου υστέρησης, από τον οποίο μπορούν να εξαχθούν πολλά συμπεράσματα για τη φύση και την ποιότητα ενός αισθητήρα.



Εικόνα 1.1: Βρόχος υστέρησης αισθητήρα [6]

Τέλος, ο χρόνος απόκρισης εκφράζει την ικανότητα του αισθητήρα να εμφανίζει στην έξοδό του όσο το δυνατόν πιο γρήγορα τις αλλαγές που προκύπτουν στο σήμα

εισόδου. Συνήθως, το μέγεθος παρουσιάζεται και σε αυτήν την περίπτωση μέσω καμπύλης.

1.2 Εισαγωγή στους μαγνητικούς αισθητήρες

Οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να αντιληφθούν το μαγνητικό πεδίο, είτε αυτό προέρχεται από τη Γη, είτε από κάποια άλλη πηγή. Για παράδειγμα, η αναλογική πυξίδα αποτελεί έναν απλό μαγνητικό αισθητήρα που μπορεί να αντιλαμβάνεται το μαγνητικό πεδίο. Άλλοι αισθητήρες προσφέρουν και τη δυνατότητα μέτρησης της έντασης ενός μαγνητικού πεδίου, εκτός από την ικανότητα ανίχνευσής του. Τα υλικά κατασκευής και το κόστος ποικίλλουν, με αντίστοιχες επιπτώσεις στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου αισθητήρα. Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιείται ένας μαγνητικός αισθητήρας καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος. Τέτοιοι αισθητήρες συναντώνται σε καταναλωτικές συσκευές καθημερινής χρήσης, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, στις μεταφορές, στην Ιατρική, στη βιομηχανία και σε στρατιωτικές εφαρμογές.

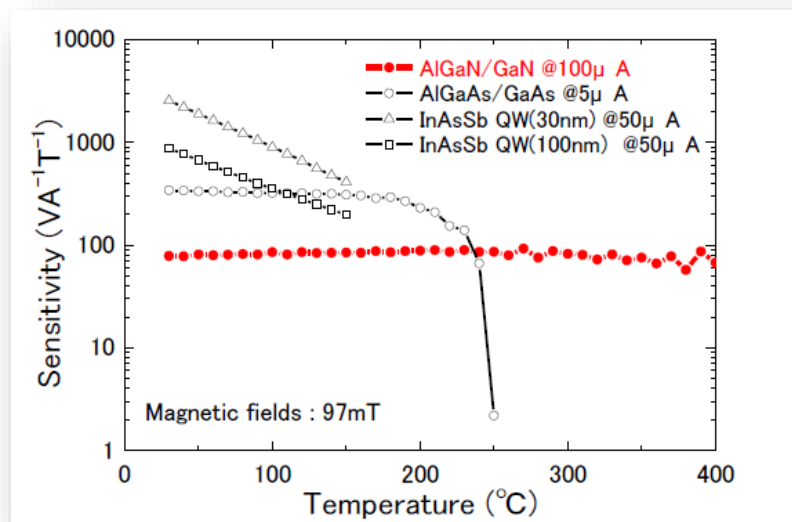
1.3 Υλικά κατασκευής μαγνητικών αισθητήρων

1.3.1 Ημιαγωγοί

Ημιαγωγός ονομάζεται ένα υλικό το οποίο παρουσιάζει αγωγιμότητα υπό συγκεκριμένες συνθήκες και προϋποθέσεις. Οι πολύ διαδεδομένοι αισθητήρες Hall, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο, κατασκευάζονται

χρησιμοποιώντας ημιαγωγικά υλικά, όπως είναι το πυρίτιο (Si). Άλλο υλικό που επιλέγεται είναι το GaAs, ενώ με υλικά όπως τα InSb και InAs μπορούν να κατασκευαστούν μαγνητικοί αισθητήρες με υψηλότερη ευαισθησία.

Οι συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας τέτοιων αισθητήρων κυμαίνονται από τους -100°C έως τους 100°C . Παρ' όλα αυτά, έχουν κατασκευαστεί και αισθητήρες των οποίων η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από -270°C έως 300°C χρησιμοποιώντας το InSb [7], καθώς και αισθητήρες AlGaIn/GaN με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 400°C [8].



Εικόνα 1.2: Εξάρτηση της ευαισθησίας από τη θερμοκρασία για διάφορα ημιαγωγικά υλικά [8]

1.3.2 Μαλακά μαγνητικά υλικά

Μαλακά ονομάζονται τα μαγνητικά υλικά των οποίων οι δημιουργούμενοι μαγνήτες μπορούν να μαγνητιστούν και να απομαγνητιστούν εύκολα. Έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, ενώ οι ενεργειακές τους απώλειες είναι πολύ μικρές.

Αυτή τους η ιδιότητα τα κάνει ιδανικά για την κατασκευή μετασχηματιστών και κινητήρων, στους οποίους είναι απαραίτητη η γρήγορη μεταβολή της μαγνήτισης, με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ενέργειας.

Η κλειστή καμπύλη που διαμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά ενός μαγνητικού υλικού, ονομάζεται βρόχος υστέρησης. Το εμβαδόν της περιοχής που περικλείει ένας βρόχος υστέρησης εκφράζει την απώλεια μαγνητικής ενέργειας ανά κύκλο μαγνητισμού και απομαγνητισμού. Ο βρόχος υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι πολύ στενός, επιβεβαιώνοντας, έτσι, τις περιορισμένες ενεργειακές απώλειες, αλλά και τη μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα. Επίσης, η κλίση της καμπύλης είναι μεγάλη, κάτι που αποδεικνύει την υψηλή μαγνητική διαπερατότητα.

Οι μαγνητικοί αισθητήρες που βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, οι αισθητήρες flux-gate και άλλοι, κατασκευάζονται από μαλακά μαγνητικά κράματα κρυσταλλικών ή άμορφων υλικών. Υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι ο καθαρός σίδηρος, ο χάλυβας και κράματα νικελίου-σιδήρου (Permalloy). Επίσης, εάν χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ημιαγώγιμα υλικά, μπορούν να προκύψουν αισθητήρες Hall μεγάλης ευαισθησίας. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας μπορούν να φτάσουν και τους 600° C, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μεγάλο εύρος τιμών προς ανίχνευση.

Αυτά τα μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται και σε μορφή λεπτών υμενίων. Κατασκευάζονται με τις μεθόδους sputtering, επιμετάλλωσης, ή εναπόθεσης με laser. Οι αισθητήρες AMR (ανισοτροπικής μαγνητοαντίστασης) παράγονται έχοντας ως βάση κράματα μαλακών μαγνητικών υλικών με τη μέθοδο sputtering, παρέχοντας 100 φορές καλύτερη ανάλυση από τους αισθητήρες Hall, έχοντας ίδιο μέγεθος και ίδια κατανάλωση με αυτούς [9].

1.3.3 Σκληρά μαγνητικά υλικά

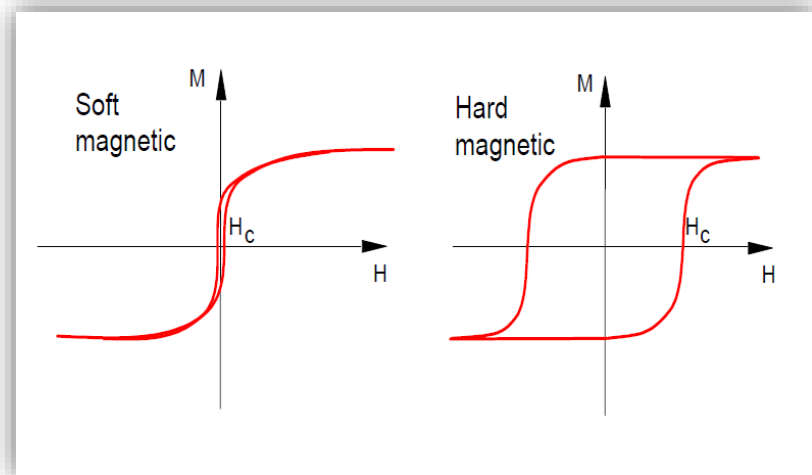
Αντίθετα με τα μαλακά μαγνητικά υλικά, οι μαγνήτες που δημιουργούνται από σκληρά μαγνητικά υλικά μπορούν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Αποτελούν τους μόνιμους μαγνήτες και αποτελούν ιδανική λύση για χρήση σε συσκευές αποθήκευσης που βασίζονται στη μαγνήτιση, όπως είναι οι σκληροί δίσκοι των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Ο βρόχος υστέρησης των σκληρών μαγνητικών υλικών έχει μεγαλύτερο εμβαδόν από το βρόχο υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών, συνεπώς και περισσότερες απώλειες ενέργειας. Η κλίση της καμπύλης είναι μικρότερη, κάτι που δηλώνει πως η μαγνητική τους διαπερατότητα είναι επίσης μικρότερη για μικρές τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου. Όμως, το μεγάλο πλάτος του βρόχου υστέρησης επιβεβαιώνει την παραμένουσα μαγνήτιση του υλικού, καθώς και την απαίτηση για μεγαλύτερες τιμές συνεκτικού πεδίου.

Σε αυτά τα υλικά ανήκουν οι σκληροί φερριτες που έχουν χαμηλό κόστος και χαμηλή μαγνητική ροή, τα κράματα Al, Ni, Co που έχουν μέτριο κόστος, μέτρια μαγνητική ροή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες ($> 200^{\circ}\text{C}$), το NdFeB με μέτριο κόστος, υψηλή μαγνητική ροή, αλλά χαμηλότερες θερμοκρασίες χρήσης ($< 150^{\circ}\text{C}$) και το SmCo με υψηλό κόστος, υψηλή μαγνητική ροή υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, αλλά και υψηλή ψαθυρότητα [10].

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σπανιότερα στους μαγνητικούς αισθητήρες, κάτι που οφείλεται κυρίως στη βασική τους ιδιότητα, δηλαδή στο ότι απομαγνητίζονται δύσκολα και μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό σημαίνει πως ο χρόνος απόκρισης ενός αισθητήρα κατασκευασμένου από σκληρό μαγνητικό υλικό θα ήταν πολύ μεγαλύτερος. Συνήθως, τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ως πηγές μαγνητικού πεδίου ή ως βοηθήματα για τη βαθμονόμηση άλλων μαγνητικών αισθητήρων, λόγω των ισχυρών και μόνιμων

μαγνητικών πεδίων που είναι ικανά να προσφέρουν. Έτσι, μπορούν να αποτελέσουν την πηγή ενός μαγνητικού πεδίου που θα λαμβάνει ένας αισθητήρας, προσφέροντάς του σταθερή μαγνητική ροή. Με αυτόν τον τρόπο, όταν κάτι τοποθετηθεί ανάμεσα στο μόνιμο μαγνήτη και στον αισθητήρα, αυτός μπορεί να ανιχνευθεί τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 1.3: Σύγκριση του βρόχου υστέρησης μαλακού (soft) και σκληρού (hard) μαγνητικού υλικού [11]

1.4 Είδη μαγνητικών αισθητήρων

1.4.1 Αισθητήρες Hall

Οι πιο διαδεδομένοι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου είναι οι αισθητήρες Hall. Λόγω του χαμηλού τους κόστους και του μικρού τους μεγέθους, έγιναν γρήγορα κατάλληλοι για ενσωμάτωση στα αυτοκίνητα, αλλά και σε πολλές καταναλωτικές συσκευές, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα.

Η λειτουργία των αισθητήρων Hall βασίζεται στο ομώνυμο φαινόμενο. Το φαινόμενο Hall ανακαλύφθηκε από τον E. H. Hall το 1879 [12]. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό που διαρρέεται από ρεύμα, τότε αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού που είναι κάθετη στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο και ονομάζεται τάση Hall. Συνεπώς, ένας αισθητήρας Hall μπορεί να ανιχνεύσει μαγνητικά πεδία, θέση, καθώς και μετατόπιση αντικειμένων.

Ως γνωστόν, η δύναμη ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε ένα μαγνητικό πεδίο δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}\mathbf{B} \quad (1.1)$$

όπου $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, \mathbf{v} η ταχύτητά του και \mathbf{B} το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Εάν τοποθετήσουμε μια πλάκα η οποία διαρρέεται από ρεύμα και είναι κατασκευασμένη από αγώγιμο ή ημιαγώγιμο υλικό, μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο και συνδέσουμε τα άκρα της σε ένα βολτόμετρο, θα παρατηρήσουμε ότι λόγω αυτού του μαγνητικού πεδίου θα δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού στα δύο άκρα της. Αυτή είναι η λεγόμενη τάση Hall και οφείλεται στη μετακίνηση των ηλεκτρονίων, λόγω της δύναμης που δέχονται από το μαγνητικό πεδίο.

Για σταθερή θερμοκρασία, η τάση Hall δίνεται από τον τύπο:

$$V_H = hIB \sin a \quad (1.2)$$

όπου a είναι η γωνία μεταξύ του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου και της πλάκας, I το ρεύμα που τη διαρρέει και h ένας συντελεστής ευαισθησίας, του οποίου η τιμή εξαρτάται από το υλικό της πλάκας, τη γεωμετρία της και τη θερμοκρασία.

Η συνολική ευαισθησία εξαρτάται από το συντελεστή Hall, ο οποίος δίνεται από τον τύπο:

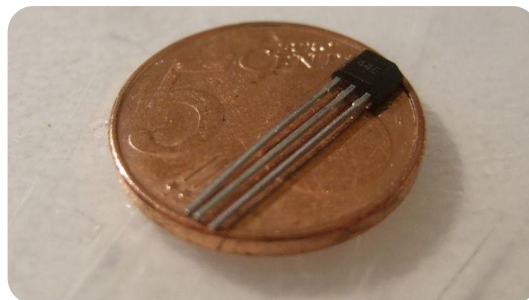
$$H = \frac{1}{Ncq} \quad (1.3)$$

όπου N είναι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου και c η ταχύτητα του φωτός [1].

Τυπικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα Hall είναι:

Παρεχόμενο ρεύμα	4 - 8 mA
Παρεχόμενη τάση	3 - 6.5 V
Ρεύμα εξόδου	1.5 mA
Τάση εξόδου	0.8 - 4.2 V
Ευαισθησία	1.8 mV/G
Χρόνος απόκρισης	3 μ s

Ως υλικό κατασκευής ενός αισθητήρα Hall συνήθως χρησιμοποιείται το πυρίτιο. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα InSb, InAs, Ge και GaAs. Οι αισθητήρες Hall κατασκευάζονται είτε ως αυτόνομοι, είτε ως ενσωματωμένοι σε άλλες διατάξεις. Η ενσωμάτωση μπορεί να γίνει κατά το στάδιο της παρασκευής, ώστε να τοποθετηθούν σε κάποιο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Ως αισθητήρες είναι ευαίσθητοι στις τάσεις που δέχονται, αλλά και στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.



Εικόνα 1.4: Το μέγεθος ενός αισθητήρα Hall [13]

1.4.2 Αισθητήρες πύλης ροής (Flux-gate)

Οι αισθητήρες πύλης ροής χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες εγγύτητας, ως αισθητήρες προσδιορισμού θέσης και ταχύτητας, αλλά και σε όργανα πλοήγησης ή μέτρησης μαγνητικού πεδίου. Κατασκευάζονται από υλικά με μη γραμμικό βρόχο υστέρησης, όπως είναι ο χάλυβας.

Ένας αισθητήρας πύλης ροής αποτελείται από δύο πηνία με φερρομαγνητικό πυρήνα. Το ένα αποτελεί το πηνίο διέγερσης και το άλλο το πηνίο λήψης. Εναλλασσόμενο ρεύμα διέρχεται από το πηνίο διέγερσης, δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Έτσι, το ρεύμα επάγεται και στο πηνίο λήψης. Μέσω αυτού του πηνίου καταγράφονται οι τιμές και οι αλλαγές της φάσης του ρεύματος. Κάθε αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο, καταγράφεται ως αλλαγή σε αυτές τις τιμές. Όταν δεν ασκείται κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι τιμές που λαμβάνονται από το πηνίο λήψης πρέπει να είναι οι αναμενόμενες. Αν σε αυτό επιδράσει κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, τότε οι μετρήσεις που θα καταγραφούν θα είναι διαφορετικές. Από την ανάλυση αυτών, μπορεί να προκύψει η πυκνότητα και ο προσανατολισμός των δυναμικών γραμμών ροής. Η κλίμακα ευαισθησίας είναι από 1μG έως 100G.

1.4.3 Αισθητήρες μαγνητοαντίστασης

Σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, αν εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα υλικό από το οποίο διέρχεται ρεύμα, τότε παρατηρείται μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση αυτού του υλικού. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι κράματα νικελίου και σιδήρου, σε μορφή λεπτών υμενίων. Η αντίσταση μειώνεται όταν η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου απομακρύνεται από τη διεύθυνση του ρεύματος που διαρρέει το υλικό. Η τιμή της αντίστασης εξαρτάται

από το τετράγωνο του συνημιτόνου της μεταξύ τους γωνίας. Συνεπώς, η μέγιστη τιμή της αντίστασης προκύπτει όταν η διεύθυνση μαγνήτισης είναι παράλληλη στο υλικό, ενώ η ελάχιστη τιμή προκύπτει όταν το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο σε αυτό.

Η ηλεκτρική αντίσταση του υλικού αυξάνεται λόγω της μαγνήτισης των διπόλων του. Όταν τα μαγνητικά δίπολα διαταχθούν κάθετα στη φορά του ρεύματος, προκαλούνται σκεδάσεις των ηλεκτρονίων, με συνέπεια τη μείωση της κινητικότητάς τους και τελικά, την αύξηση της αντίστασης του υλικού.

Οι αισθητήρες μαγνητοαντίστασης συνήθως ενσωματώνονται σε ηλεκτρονικά κυκλώματα ως διατάξεις τεσσάρων αισθητήρων σε γέφυρα Wheatstone. Τοποθετούνται σε ρομποτικές διατάξεις, αλλά και σε μεταφορικά μέσα, κυρίως ως αισθητήρες προσανατολισμού [14]. Επίσης, έχουν γίνει και κάποιες προσπάθειες ώστε να ενσωματωθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα για την ανίχνευση βιομορίων, με σκοπό την αντικατάσταση της χρήσης μεθόδων φθορισμού σε διαγνωστικές εξετάσεις. Αντί των φθοριζουσών ουσιών, δοκιμάστηκε η εισαγωγή καταλλήλων μαγνητικών νανοσωματιδίων, τα οποία είναι ικανά να ανιχνεύονται από τους αισθητήρες μαγνητοαντίστασης και να παράγουν κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα [15].

1.4.4 Αισθητήρες GMR

Οι αισθητήρες GMR (**G**iant **M**agneto**R**esistance) ή γιγάντιας μαγνητοαντίστασης έχουν τις ίδιες αρχές λειτουργίας με τους απλούς αισθητήρες μαγνητοαντίστασης. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης που παρουσιάζουν είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των αισθητήρων μαγνητοαντίστασης και μπορεί να φτάσει έως και 10% ή 20%.

Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται από δομές λεπτών υμενίων κατασκευασμένων από φερρομαγνητικά υλικά, ανάμεσα στα οποία τοποθετείται ένα

υπέρλεπτο αγώγιμο, αλλά μη μαγνητικό στρώμα, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από χαλκό. Ο χαλκός, αν και αγώγιμο υλικό, σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζει μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση, λόγω του πολύ μικρού πάχους του και συνεπώς της αυξημένης σκέδασης των ηλεκτρονίων που συντελείται σε αυτόν. Μεταξύ των φερρομαγνητικών υμενίων πραγματοποιείται αντι-φερρομαγνητική σύζευξη, παρατηρείται, δηλαδή, αντίθετος προσανατολισμός των μαγνητικών τους διπόλων. Όμως, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου κατάλληλης διεύθυνσης, η σύζευξη παύει να ισχύει και τα μαγνητικά δίπολα διατάσσονται σύμφωνα με αυτό, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ανίχνευση του συγκεκριμένου μαγνητικού πεδίου.

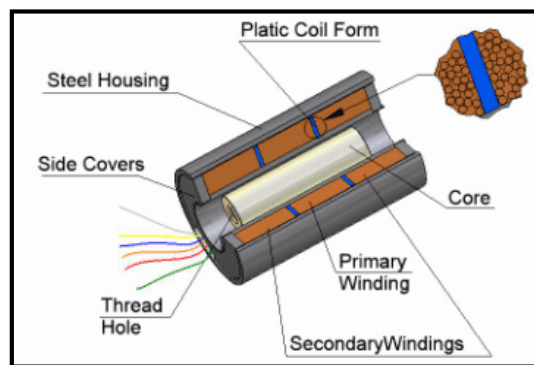
Τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε κεφαλές ανάγνωσης πληροφορίας σε μαγνητικά μέσα αποθήκευσης, σε διατάξεις μνήμης τυχαίας προσπέλασης, καθώς και σε βιοαισθητήρες. Η ανακάλυψη των αισθητήρων GMR οδήγησε στην απονομή του βραβείου Nobel στους ερευνητές Albert Fert και Peter Grünberg το 2007 [16].

1.4.5 Αισθητήρες LVDT

Ένας αισθητήρας LVDT (**L**inear **V**ariable **D**ifferential **T**ransformer – Γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής) μπορεί να μετρήσει τη γραμμική μετατόπιση ενός υλικού.

Αποτελείται από ένα πρωτεύον πηνίο, το οποίο τροφοδοτείται με ημιτονοειδές σήμα σταθερού πλάτους και δύο δευτερεύοντα πηνία, στα οποία επάγεται εναλλασσόμενο ρεύμα. Στο εσωτερικό του πρωτεύοντος πηνίου και χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτό, τοποθετείται ένας φερρομαγνητικός πυρήνας. Όταν ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο του αισθητήρα, η συνολική τάση εξόδου είναι μηδενική, αφού τα σήματα των δευτερευόντων πηνίων και του πρωτεύοντος αλληλοαναιρούνται.

Όταν ο πυρήνας μετακινηθεί από το κέντρο, τότε η μαγνητική ροή αλλάζει και παράγεται ένα σήμα εξόδου. Η παραγόμενη τάση στην έξοδο είναι ανάλογη της μετατόπισης. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί η μετακίνηση του φερρομαγνητικού πυρήνα, αλλά και να εντοπιστεί η κατεύθυνση της κίνησής του, που προκύπτει από τη γωνία φάσης μεταξύ της τάσης εισόδου και εξόδου.



Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση ενός αισθητήρα LVDT [17]

Οι αισθητήρες LVDT δεν προκαλούν φθορές, αφού δεν έρχονται σε επαφή με το υπό εξέταση υλικό. Η υστέρηση είναι αμελητέα, ενώ δεν επηρεάζονται πολύ από το θόρυβο του περιβάλλοντος και από άλλες παρεμβολές. Εκτός από αμιγείς εφαρμογές μετατόπισης, οι αισθητήρες LVDT χρησιμοποιούνται και σε διατάξεις εφελκυσμού, σε αισθητήρες θερμοκρασίας, δύναμης, πίεσης και ταχύτητας.

1.4.6 Αισθητήρες MDL

Οι αισθητήρες MDL (**M**agnetostrictive **D**elay **L**ines – Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης) βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοσυστολής. Σύμφωνα με αυτό,

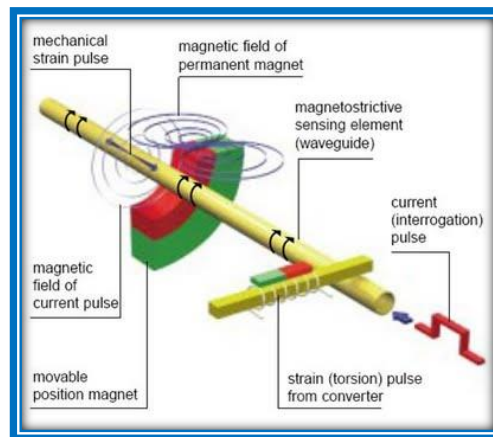
το μέγεθος των φερρομαγνητικών υλικών μεταβάλλεται όταν ένα μαγνητικό πεδίο ασκηθεί σε αυτά. Η μαγνητοσυστολή δίδεται ως κλασματική μεταβολή από τον τύπο:

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.4)$$

όπου L είναι το μετρούμενο μέγεθος του υλικού και ΔL η διαφορά μεταξύ του μετά της μαγνήτισης μεγέθους και του αρχικού.

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής βασίζεται στη δομή των φερρομαγνητικών υλικών. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα τοιχώματα των μαγνητικών περιοχών στο εσωτερικό του υλικού μετακινούνται, ώστε να διαταχθούν καταλλήλως, προκαλώντας αλλαγές στις διαστάσεις του.

Για την κατασκευή των αισθητήρων MDL χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, καθώς και τα κράματά τους. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν συνήθως τη μορφή σύρματος, ώστε να είναι ευκολότερη η καταγραφή των αλλαγών των διαστάσεών τους. Το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα με τη μορφή παλμών και συνεπώς λειτουργεί ως κυματοδηγός. Ένας μαγνήτης θέσης που είναι προσαρτημένος σε κάποιο μηχανικό ή υδραυλικό σύστημα κίνησης, μετακινείται γύρω από τον κυματοδηγό. Αρχικά, αποστέλλεται ένας παλμός στον κυματοδηγό για να προσδιοριστεί η θέση του μαγνήτη και ταυτόχρονα ξεκινά η χρονομέτρηση. Ο παλμός δημιουργεί ένα κύμα που διαδίδεται μέσω του κυματοδηγού. Όταν το κύμα φτάσει στο τέλος, η χρονομέτρηση σταματά. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης μεταξύ του μαγνήτη θέσης και του φερρομαγνητικού υλικού, γνωρίζοντας τη χρονική διάρκεια της μετακίνησης και πως η ταχύτητά της είναι ίση με την ταχύτητα του ήχου.



Εικόνα 1.6: Η διάταξη ενός αισθητήρα MDL [18]

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας θέσης δεν φθείρεται, αλλά και δεν προκαλεί φθορές στο εξεταζόμενο υλικό, αφού δεν έρχεται σε επαφή με αυτό. Επίσης, το μήκος του εξεταζόμενου υλικού μπορεί να είναι μεγάλο, ακόμα και 60 m, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές [19]. Έτσι, οι αισθητήρες MDL χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτοκινήτων και γενικότερα σε μέρη μηχανών, όπως είναι οι υδραυλικοί κύλινδροι, ώστε να παρακολουθείται και να ελέγχεται η θέση τους και συνεπώς η λειτουργία τους.

1.4.7 Αισθητήρες SQUID

Οι αισθητήρες που έχουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία είναι οι αισθητήρες SQUID. Με αυτούς τους αισθητήρες είναι δυνατή η ανίχνευση μαγνητικών πεδίων εντάσεως μερικών nanoTesla [20].

Όπως δηλώνουν και τα αρχικά της ονομασίας τους (**S**uperconducting **Q**uantum **I**nterference **D**evice), τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των συγκεκριμένων αισθητήρων είναι υπεραγώγιμα. Υπεραγώγιμα ονομάζονται τα υλικά

των οποίων η ηλεκτρική αντίσταση πρακτικά μηδενίζεται όταν βρεθούν σε θερμοκρασία χαμηλότερη κάποιας κρίσιμης τιμής. Οι αισθητήρες SQUID, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους LTS και τους HTS. Οι Low Temperature (LTS) αισθητήρες λειτουργούν σε θερμοκρασίες -270°C και κατασκευάζονται από νιόβιο ή κράματα μολύβδου και χρυσού. Για τη λειτουργία τους απαιτείται ψύξη με υγρό ήλιο, κάτι που τους καθιστά πιο δύσχρηστους. Αντιθέτως, οι High Temperature (HTS) αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες έως και περίπου -130°C . Κατασκευάζονται από YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και ψύχονται με υγρό άζωτο, το οποίο είναι πιο εύχρηστο σε σχέση με το υγρό ήλιο και έχει χαμηλότερο κόστος.

Η λειτουργία τους βασίζεται στο κβαντικό φαινόμενο της σήραγγας Josephson, σύμφωνα με το οποίο ένα ρεύμα μπορεί να διαπεράσει ένα υπέρλεπτο μη υπεραγωγίμο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ ενός ζεύγους υπεραγωγίμων υλικών. Όταν οι αισθητήρες αυτοί ψυχθούν στην κατάλληλη θερμοκρασία, δημιουργείται μια σταθερή μαγνητική ροή. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, η ροή αυτή αλλάζει στιγμιαία, με ταυτόχρονη απώλεια ενέργειας. Μετρώντας αυτήν την ενέργεια, υπολογίζεται η τιμή του μαγνητικού πεδίου.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας τους, αλλά και των εξειδικευμένων συνθηκών εργαστηρίου που απαιτεί η λειτουργία τους, οι αισθητήρες SQUID δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε καταναλωτικά προϊόντα, αλλά κυρίως σε ερευνητικά εργαστήρια (μικροσκόπιο SQUID [21]) και στη Βιοϊατρική (MRI [22]).

1.4.8 Μαγνητοοπτικοί αισθητήρες

Οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες βασίζονται στο φαινόμενο Faraday, σύμφωνα με το οποίο το μαγνητικό πεδίο που επιδρά σε ένα υλικό είναι ικανό να τροποποιήσει

τις οπτικές του ιδιότητες. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός, όταν αυτό διέρχεται από ένα μαγνητοοπτικό μέσο. Η γωνία στροφής της πόλωσης δίνεται από τον τύπο [23]:

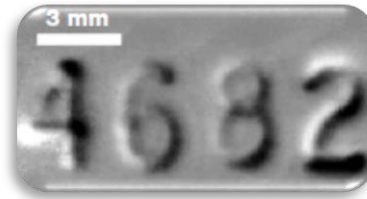
$$\beta = V \cdot d \cdot B \quad (1.5)$$

όπου V είναι η λεγόμενη σταθερά Verdet που εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός και το δείκτη διάθλασης του συγκεκριμένου υλικού, d είναι η απόσταση που διανύει το φως μέσα στο μαγνητοοπτικό μέσο και B είναι η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, γνωρίζοντας την παραπάνω γωνία είναι δυνατός ο υπολογισμός της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μαγνητοοπτικών αισθητήρων είναι κυρίως κρυσταλλικά. Συχνά χρησιμοποιούμενοι κρύσταλλοι είναι οι TGG (Terbium Gallium Garnet), CdMnTe και CdMnHgTe. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά Verdet ενός υλικού, τόσο πιο ακριβή αποτελέσματα προκύπτουν από τον αισθητήρα.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αισθητήρες, οι μαγνητοοπτικοί αισθητήρες δεν βασίζονται σε ηλεκτρικά φαινόμενα, αλλά σε οπτικά. Εκτός από την ανίχνευση του μαγνητικού πεδίου, είναι δυνατή και η ψηφιακή απεικόνισή του μέσω καταλλήλου λογισμικού σε πραγματικό χρόνο. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως μέσα ανάλυσης και χαρακτηρισμού άλλων μαγνητικών προϊόντων, όπως είναι οι μόνιμοι μαγνήτες, τα κράματα χάλυβα, οι μαγνητικές κάρτες και οι μαγνητικοί κωδικοποιητές. Μία, επίσης, ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι η χρήση των μαγνητοοπτικών αισθητήρων από εργαστήρια, σε περιπτώσεις ανάγκης ανάκτησης κατεστραμμένης πληροφορίας από μεταλλικά αντικείμενα ή μαγνητικά μέσα. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η ανάκτηση του εντυπωμένου αριθμού πλαισίου ενός οχήματος ή του σειριακού αριθμού ενός όπλου, ακόμη και αν αυτός έχει αφαιρεθεί μέσω λείανσης. Ο μαγνητοοπτικός αισθητήρας αντιλαμβάνεται τις παραμορφώσεις στη δομή του

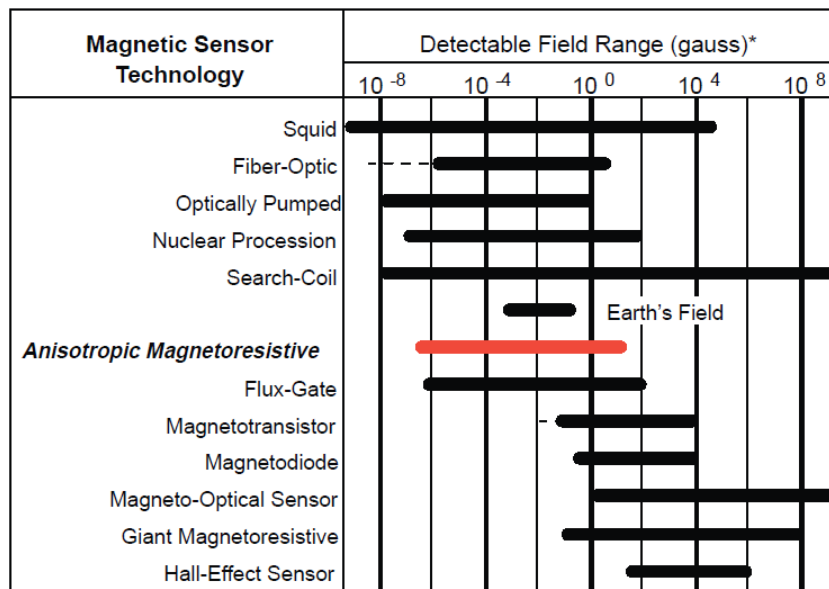
μαγνητικού υλικού που είχε αρχικά προκαλέσει η εγχάραξη και τις απεικονίζει μέσω κατάλληλου λογισμικού.



Εικόνα 1.7: Αναπαράσταση μέσω μαγνητικού αισθητήρα ενός σειριακού αριθμού που είχε αφαιρεθεί [23]

1.4.9 Πίνακας σύγκρισης των μαγνητικών αισθητήρων

Στον παρακάτω πίνακα απαριθμούνται οι διάφορες τεχνολογίες μαγνητικών αισθητήρων και προσδιορίζεται η ευαισθησία του καθενός στα μαγνητικά πεδία.



Εικόνα 1.8: Σύγκριση μαγνητικών αισθητήρων [24]

2 Μη Καταστροφικός Έλεγχος Υλικών

2.1 Εισαγωγή

Ως «Μη Καταστροφικός Έλεγχος» (**Non Destructive Testing – NDT**) ορίζεται το σύνολο των μεθόδων ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα υλικό με σκοπό την εξακρίβωση της ποιότητάς του, χωρίς να προκληθούν φθορές σε αυτό. Περιλαμβάνεται, δηλαδή, ο εντοπισμός ατελειών, ανομοιογενειών και λοιπών σφαλμάτων που είναι δυνατόν να έχουν δημιουργηθεί σε αυτό, καθώς και η μελέτη των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του.

Ο οπτικός ή και ακουστικός έλεγχος από τον άνθρωπο είναι συχνά αρκετός για την επιφανειακή εξέταση ενός δοκιμίου και τον εντοπισμό σοβαρών εμφανών σφαλμάτων. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις δεν επαρκεί, καθώς απαιτείται πιο διεξοδικός έλεγχος σφαλμάτων, για την ανίχνευση των οποίων είναι απαραίτητο να μελετηθεί το εξεταζόμενο υλικό σε δομικό επίπεδο. Για αυτόν το σκοπό έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που, αν και δεν προκαλούν φθορές στο υπό εξέταση υλικό, αναδεικνύουν τις ατέλειες και τα χαρακτηριστικά του που δεν γίνονται αντιληπτά στον άνθρωπο με διαφορετικό τρόπο.

Το βασικό πλεονέκτημα του Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι η αποφυγή πρόκλησης μονίμων μεταβολών στο εξεταζόμενο υλικό. Επομένως, είναι δυνατή η επί τόπου μελέτη υλικών, χωρίς, δηλαδή, να είναι απαραίτητη η μετακίνησή τους σε

εργαστηριακό περιβάλλον. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνότερα βασίζονται στο μαγνητισμό, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στους υπερήχους, στην οπτική, στην ακουστική και στη ραδιογραφία. Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος συναντάται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις βιομηχανικές μονάδες, τα παραγόμενα προϊόντα, τις κτιριακές εγκαταστάσεις, τα μεταφορικά μέσα, τους αγωγούς διανομής και τα οδικά δίκτυα.

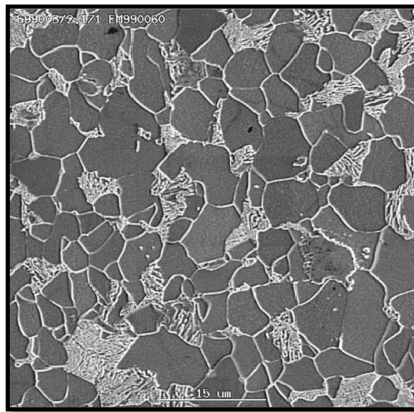
2.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου

2.2.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy – SEM) αποτελεί μια μέθοδο ελέγχου που επιτρέπει την παρατήρηση υλικών με μεγάλη μεγέθυνση και διακριτική ικανότητα. Σε αντίθεση με το αναλογικό οπτικό μικροσκόπιο, η αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης βασίζεται στην εκπομπή και λήψη ηλεκτρονίων, αντί των φωτονίων.

Η εκπομπή ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση αυτών με τα δομικά άτομα του δοκιμίου. Η ενέργεια που μεταφέρουν τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια οδηγούν στην εκπομπή ακτίνων Χ, καθώς και δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του υλικού, τα οποία λαμβάνονται και πάλι από το μικροσκόπιο. Μέσω μιας εστιασμένης δέσμης εκπομπής και λήψης, είναι δυνατή η σάρωση όλης της επιθυμητής επιφάνειας με μεγάλη ανάλυση. Στη συνέχεια, μελετώντας τα χαρακτηριστικά των ληφθέντων ηλεκτρονίων, όπως είναι η ενέργειά τους και η γωνία κατά την οποία ελήφθησαν, μπορεί να δημιουργηθεί μια τριδιάστατη απεικόνιση της μορφολογίας της επιφάνειας του υλικού.

Μια επίσης σημαντική διαφορά των ηλεκτρονικών μικροσκοπιών σάρωσης σε σχέση με τα οπτικά μικροσκόπια, είναι το γεγονός ότι γίνεται δυνατή η μελέτη και συμπαγών αδιαφανών υλικών, αφού δεν γίνεται χρήση της διέλευσης του φωτός για την παρατήρηση. Η μεγέθυνση των σύγχρονων ηλεκτρονικών μικροσκοπιών σάρωσης μπορεί να φτάσει και τις 500.000 φορές, ενώ η ανάλυση μπορεί να είναι ακόμη και μικρότερη από 1 nm.



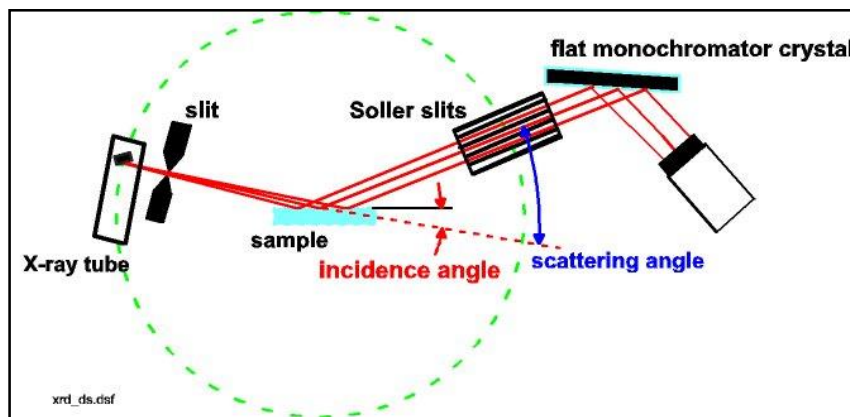
Εικόνα 2.1: Απεικόνιση επιφάνειας χάλυβα μέσω της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης [25]

2.2.2 Φασματοσκοπία Περίθλασης Ακτίνων Χ (XRD)

Με τη φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων Χ (**X – Ray Diffraction** - XRD) είναι δυνατός ο έλεγχος και χαρακτηρισμός ενός μεγάλου φάσματος κρυσταλλικών υλικών, όπως είναι τα μέταλλα, τα πολυμερή, τα οργανικά και τα κεραμικά. Προσφέρει σημαντική διακριτική ικανότητα, ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της δομής ενός υλικού και η μέτρηση των ενδοατομικών αποστάσεων στο κρυσταλλικό του πλέγμα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή μιας εστιασμένης δέσμης ακτίνων Χ στο δείγμα, με καθορισμένη γωνία πρόσπτωσης. Ανάλογα με την

κρυσταλλική δομή του υλικού, θα υπάρξουν και διαφορετικοί τρόποι περίθλασης των ακτίνων. Με περιστροφή του δοκιμίου, λαμβάνονται νέα δεδομένα για διαφορετικές περιθλώμενες ακτίνες. Συνεπώς, από τη συλλογή και καταγραφή της έντασης και της γωνίας των περιθλώμενων ακτίνων, προκύπτουν συμπεράσματα για την ταυτότητα, τα χαρακτηριστικά και τις ατέλειες του εξεταζόμενου δείγματος.



Εικόνα 2.2: Διάταξη Φασματοσκοπίας Περίθλασης Ακτίνων X [26]

Οι ακτίνες X, έχοντας μικρότερο μήκος κύματος από τις ακτίνες φωτός, προσφέρουν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Ως μέθοδος, η φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X χρησιμοποιείται στον χαρακτηρισμό υλικών, στη Γεωλογία, στη Βιολογία, στη Μικροηλεκτρονική και στη βιομηχανία.

2.2.3 Έλεγχος με Υπερήχους

Ο Έλεγχος με Υπερήχους (Ultrasonic Testing) βασίζεται στην εκπομπή ενός ηχητικού κύματος υψηλής συχνότητας, το οποίο αποστέλλεται στο εξεταζόμενο

υλικό. Τα ηχητικά κύματα διαπερνούν το υλικό και συλλέγονται κατά την έξοδό τους. Μελετώντας το χρονικό διάστημα που πέρασε για τη διέλευση των υπερηχητικών κυμάτων, καθώς και την ενέργεια που αυτά είχαν κατά την έξοδο, προκύπτουν συμπεράσματα για τη δομή του υλικού, τα χαρακτηριστικά του και την ύπαρξη ατελειών.

Η συγκεκριμένη μέθοδος υπερτερεί στο μεγάλο βάθος διείσδυσης για το οποίο είναι ικανή να εξαγάγει αποτελέσματα. Έτσι, δημιουργείται μια συνολική εικόνα της κατάστασης του υλικού. Από την άλλη πλευρά, δεν είναι εύκολη η χρήση σε πολύ λεπτά δοκίμια, καθώς και η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων με μία μόνο μέτρηση. Για παράδειγμα, ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία ανίχνευσης γραμμικών ατελειών που είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης των ηχητικών κυμάτων.

Ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, εφαρμόζεται σε μεταλλικά, πολυμερή, ακόμη και ξύλινα υλικά με σκοπό την ανίχνευση ατελειών στην επιφάνεια ή και στο εσωτερικό τους. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εργαλείο μέτρησης του πάχους ενός υλικού, βάσει της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων σε αυτό.

2.2.4 Έλεγχος με διεισδυτικά υγρά

Ο έλεγχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί σε υλικά στα οποία υπάρχουν εμφανείς ατέλειες. Επιλέγεται κάποιο υγρό διαφορετικού χρώματος από αυτό του υλικού, το οποίο διεισδύει στις ρωγμές του με σκοπό την ανάδειξή τους. Αναλόγως του μεγέθους του υπό εξέταση υλικού και της ατέλειάς του, επιλέγεται και ο τρόπος διείσδυσης του υγρού. Η διείσδυση μπορεί να γίνει είτε με σύριγγα, είτε με εμβάπτιση όλου του δοκιμίου στο υγρό. Με αυτήν τη μέθοδο προκύπτει πληρέστερη εικόνα της έκτασης της ατέλειας, ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε ατέλειες που είναι ορατές στην επιφάνεια του υλικού και έχουν αρκετό μέγεθος, ώστε να είναι δυνατή η διείσδυση του υγρού. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος υλικών, με προφανή εξαίρεση τα πορώδη υλικά. Το κόστος και ο απαιτούμενος χρόνος της εφαρμογής είναι μικρός και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να γίνει επί τόπου έλεγχος, χωρίς χρήση εξειδικευμένων εργαλείων και μηχανημάτων. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία ανίχνευσης εσωτερικών ή και γενικά μη ορατών ατελειών.

2.2.5 Έλεγχος με δινορρέυματα

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτείται εναλλασσόμενο ρεύμα που διαπερνά ένα πηνίο, παράγοντας μαγνητικό πεδίο. Εάν τοποθετηθεί κοντά ένα αγώγιμο υλικό, δημιουργείται ροή που επάγεται σε αυτό. Τα ρεύματα αυτά που βρίσκονται σε κλειστούς βρόχους ονομάζονται δινορρέυματα (eddy currents). Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτά μπορεί να αναλυθεί, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού και των ατελειών του.

Ο έλεγχος με δινορρέυματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αγώγιμα υλικά, ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου, αλλά και ως μέθοδος χαρακτηρισμού υλικών για τον προσδιορισμό της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας, της μαγνητικής διαπερατότητας και του πάχους τους. Οι ατέλειες που είναι δυνατόν να εντοπιστούν πρέπει να βρίσκονται στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Η ανίχνευση γίνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η άμεση επαφή με το δοκίμιο, αλλά και χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται εμπειρία για την κατανόηση των αποτελεσμάτων και την απομόνωση των περιβαλλοντικών θορύβων.

2.2.6 Μαγνητικός έλεγχος

Χρησιμοποιείται σε φερρομαγνητικά υλικά, στα οποία εφαρμόζεται ένα μαγνητικό πεδίο. Από τη μελέτη του σήματος που δημιουργείται, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά του υλικού και για τη δομή του, αφού οι ατέλειές του δημιουργούν μεταβολές στη μαγνητική ροή.

Με αυτήν τη μέθοδο μπορούν να ανιχνευθούν ατέλειες στην επιφάνεια του υλικού ή και σε περιοχές κοντά σε αυτήν. Δεν απαιτείται ιδιαίτερη προετοιμασία του δοκιμίου και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και με χαμηλό κόστος. Βέβαια, ως μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου περιορίζεται στα φερρομαγνητικά υλικά με σχετικά λείες επιφάνειες, κατά προτίμηση χωρίς βαφή ή άλλες επικαλύψεις.

3 Μαγνητικά υλικά

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday σχετικά με τη μαγνητική επαγωγή, τα ηλεκτρόνια ενός υλικού επηρεάζονται όταν αυτό βρεθεί υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Αναλόγως της ατομικής δομής του υλικού, η συμπεριφορά των ηλεκτρονίων του μπορεί να ποικίλλει.

Τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται τόσο γύρω από τον πυρήνα των ατόμων, όσο και γύρω από τον εαυτό τους, εκτελώντας μια κίνηση που ονομάζεται ιδιοστροφορμή (spin). Με αυτές τους τις κινήσεις αποκτούν τη λεγόμενη μαγνητική ροπή, η οποία εκφράζει διανυσματικά την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Όταν τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας ενός ατόμου, δηλαδή τα ηλεκτρόνια σθένους, αποτελούν ζεύγη με αντίθετη τιμή spin, τότε τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται αλληλοεξουδετερώνονται. Ομοίως, όταν υπάρχουν μονήρη ηλεκτρόνια στα άτομα ενός υλικού, αυτά αλληλεπιδρούν με άλλα μονήρη και δημιουργούν ενώσεις, των οποίων οι μαγνητικές ροπές είναι και πάλι μηδενικές. Σε κάθε άλλη περίπτωση, τα ασύζευκτα ηλεκτρόνια εμφανίζουν μαγνητικές ροπές, αντιδρώντας στα εξωτερικά μαγνητικά πεδία που τους ασκούνται και δημιουργώντας τα λεγόμενα μαγνητικά δίπολα.

Αν θεωρήσουμε έναν επίπεδο βρόχο ηλεκτρικού ρεύματος, η μαγνητική ροπή μ δίνεται από τον τύπο:

$$\mu = I a \quad (3.1)$$

όπου I είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος και \mathbf{a} το κάθετο στο επίπεδο του βρόχου διάνυσμα, με μέτρο ίσο με το εμβαδόν του βρόχου.

Η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου ονομάζεται μαγνήτιση \mathbf{M} και εκφράζεται ως:

$$\mathbf{M} = \frac{d\boldsymbol{\mu}}{dV} \quad (3.2)$$

Επίσης, το μαγνητικό πεδίο ή μαγνητική διεγέρση \mathbf{H} δίδεται από τον τύπο:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (3.3)$$

όπου μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού που ισούται με $4\pi \cdot 10^{-7}$ Weber/A·m και \mathbf{B} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στην ύλη.

Στην περίπτωση των γραμμικών ιστροπικών υλικών, η ένταση του μαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu_a \mathbf{H} \quad (3.4)$$

όπου μ_r είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ενός υλικού, η οποία περιγράφει τη μαγνητική του συμπεριφορά και μ_a είναι η λεγόμενη απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα.

Με αντικατάσταση της σχέσης (3.4) στη σχέση (3.3), έχουμε:

$$\mathbf{M} = (\mu_r - 1) \mathbf{H} \quad (3.5)$$

Η διαφορά $\mu_r - 1$ ονομάζεται μαγνητική επιδεκτικότητα χ , οπότε αντικαθιστώντας έχουμε:

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (3.6)$$

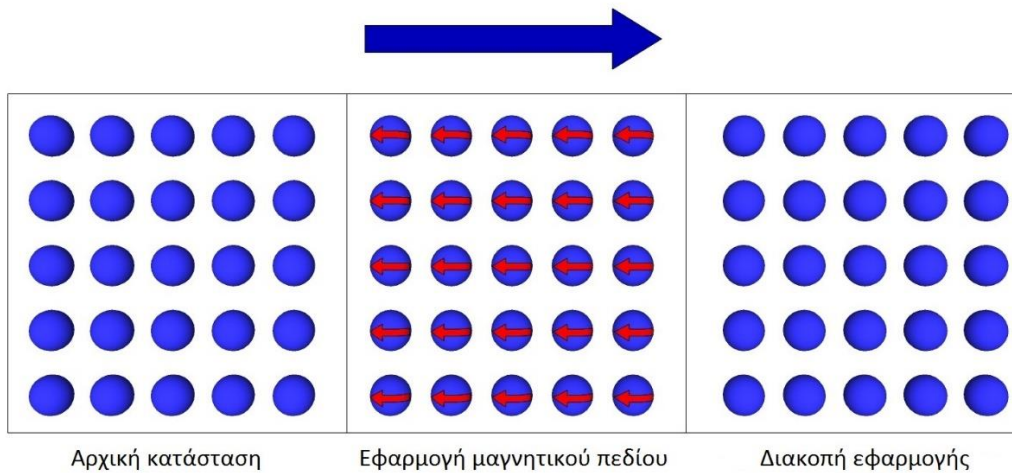
$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (3.7)$$

Τα υλικά των οποίων η τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι μεγαλύτερη του μηδενός, ονομάζονται παραμαγνητικά. Αντίθετα, τα υλικά με μαγνητική επιδεκτικότητα μικρότερη του μηδενός ονομάζονται διαμαγνητικά. Τέλος, τα υλικά με μεγάλη θετική τιμή μαγνητικής επιδεκτικότητας, λέγονται σιδηρομαγνητικά.

3.2 Διαμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά, έχοντας αρνητική μαγνητική επιδεκτικότητα, αντιδρούν ασθενώς στην επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου και μόνο κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του. Σε αυτά, όλα τα ηλεκτρόνια των ατόμων τους είναι σε ζεύγη, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται διάνυσμα μαγνητικής ροπής. Κατά το χρονικό διάστημα της εφαρμογής ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου σε αυτά, εμφανίζουν μια ασθενή μαγνητική ροπή, το διάνυσμα της οποίας έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του εφαρμοζόμενου πεδίου.

Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας αυτών των υλικών είναι λίγο μικρότερη της μονάδας, ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μικρότερη από την ένταση που θα είχε κατά τη διάδοση στο κενό. Λόγω της ασθενούς επίδρασής του, ο διαμαγνητισμός δεν είναι εμφανής σε όλες τις περιπτώσεις. Εάν σε ένα υλικό υπάρχουν ισχυρότερες μορφές μαγνητισμού, αυτός επικαλύπτεται. Επομένως, γίνεται αντιληπτός μόνο σε υλικά στα οποία αυτές απουσιάζουν. Σε αυτή την κατηγορία υλικών ανήκουν τα περισσότερα στοιχεία, όπως είναι τα ευγενή αέρια, το πυρίτιο, ο χαλκός, ο άργυρος και ο χρυσός.



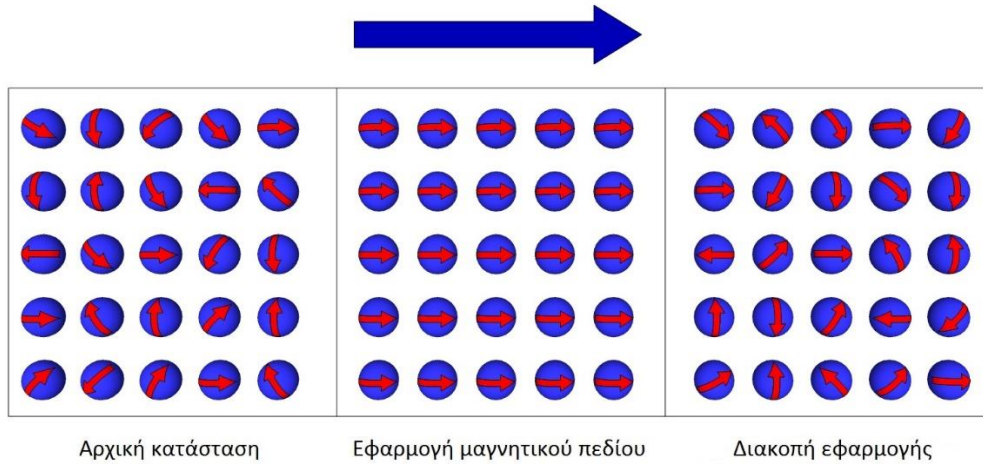
Εικόνα 3.1: Συμπεριφορά διαμαγνητικών υλικών κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

3.3 Παραμαγνητικά υλικά

Στα παραμαγνητικά υλικά, η τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας είναι θετική, αλλά πολύ μικρή. Επίσης, η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας. Υπό την επίδραση ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, τα μαγνητικά δίπολα των υλικών αυτών προσανατολίζονται σύμφωνα με την κατεύθυνσή του, εμφανίζοντας μαγνητικές ροπές με μικρό, όμως, μέτρο. Όπως και στα διαμαγνητικά υλικά, μετά τη διακοπή της εφαρμογής του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές ιδιότητες εξαλείφονται.

Απουσία μαγνητικού πεδίου, οι διευθύνσεις των διανυσμάτων των μαγνητικών ροπών είναι τυχαίες. Αποτέλεσμα μιας τέτοιας διάταξης είναι η αδυναμία δημιουργίας μιας συνολικής μαγνήτισης. Στη δομή των παραμαγνητικών υλικών υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια σθένους. Τα μαγνητικά δίπολα που υπάρχουν μπορούν να διατάσσονται και να προσανατολίζονται ελεύθερα. Με την επιβολή ενός μαγνητικού πεδίου, τα δίπολα αυτά προσανατολίζονται στη διεύθυνσή του,

αυξάνοντας έτσι και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Σε αυτή την κατηγορία υλικών ανήκει το τιτάνιο, η πλατίνα, το αλουμίνιο και άλλα.



Εικόνα 3.2: Συμπεριφορά παραμαγνητικών υλικών κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

3.4 Σιδηρομαγνητικά υλικά

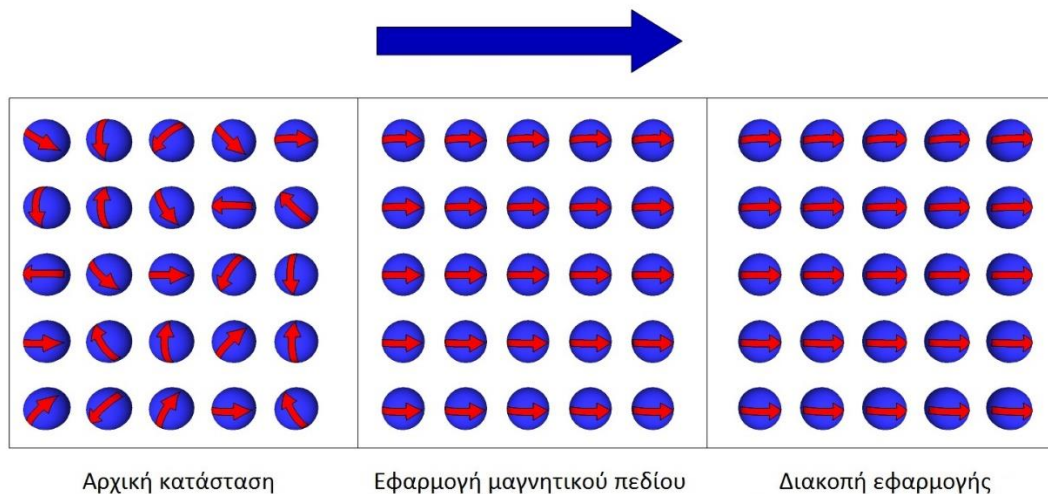
Τα υλικά των δύο προηγούμενων κατηγοριών δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες μετά τη διακοπή της εφαρμογής ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αντιθέτως, τα σιδηρομαγνητικά ή αλλιώς φερρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν μόνιμη μαγνήτιση με μεγάλες τιμές, ακόμη και χωρίς την επιβολή εξωτερικού πεδίου. Χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι ο σίδηρος, το νικέλιο και το κοβάλτιο, καθώς και μερικές σπάνιες γαίες. Η μαγνητική επιδεκτικότητα αυτών των υλικών έχει μεγάλες θετικές τιμές που φτάνουν την τιμή 10^6 .

Στο εσωτερικό αυτών των υλικών υπάρχουν οι λεγόμενες μαγνητικές περιοχές. Αυτές αποτελούν τμήματα εντός των κόκκων του υλικού, τα οποία διαχωρίζονται με όρια που ονομάζονται τοιχώματα. Στις μαγνητικές περιοχές, τα μαγνητικά δίπολα προσανατολίζονται σύμφωνα με τη κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Πριν από τη

μαγνήτιση των υλικών, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών είναι τυχαία προσανατολισμένα. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, αυτά προσανατολίζονται κατάλληλα, εμφανίζοντας ισχυρή μαγνήτιση.

Κατά την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές περιοχές με μαγνητικά δίπολα προσανατολισμένα σύμφωνα με την κατεύθυνσή του, αρχίζουν να επεκτείνονται, προκαλώντας αντίστοιχη συρρίκνωση των υπόλοιπων περιοχών. Με τη συνέχιση της εφαρμογής του μαγνητικού πεδίου, συντελείται περιστροφή όλων των μαγνητικών περιοχών, ώστε να προσανατολιστούν καταλλήλως. Όταν έχουν προσανατολιστεί όλες οι μαγνητικές περιοχές, το υλικό παρουσιάζει τη μέγιστη δυνατή μαγνήτιση.

Η μέγιστη τιμή της μαγνήτισης ονομάζεται μαγνήτιση κόρου και εκφράζει τη μαγνήτιση που προκύπτει εάν όλα τα μαγνητικά δίπολα προσανατολιστούν προς την ίδια κατεύθυνση. Η τιμή της προκύπτει από το γινόμενο της μαγνητικής ροπής του καθενός ατόμου επί του αριθμού των ατόμων που βρίσκονται στη συγκεκριμένη περιοχή [27].



Εικόνα 3.3: Συμπεριφορά σιδηρομαγνητικών υλικών κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου

3.5 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν συμπεριφορά αντίθετη με αυτή των σιδηρομαγνητικών. Συγκεκριμένα, παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, δημιουργούνται συζεύξεις μαγνητικών ροπών γειτονικών ατόμων με αντιπαράλληλη διευσθέτηση. Τελικά, οι μαγνητικές ροπές αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα η συνολική μαγνητική ροπή αυτών των υλικών να είναι μηδενική. Σε αυτή την κατηγορία υλικών ανήκει το χρώμιο, το μαγγάνιο και τα οξείδια του νικελίου και του μαγγανίου.

3.6 Σιδηριμαγνητικά υλικά

Σύμφωνα με το φαινόμενο του σιδηριμαγνητισμού, μέρος των μαγνητικών ροπών ενός υλικού προσανατολίζεται αντιπαράλληλα του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Το μέγεθος αυτών των ροπών ποικίλει, λόγω των διαφόρων ιόντων στα οποία εμφανίζονται. Συνεπώς, η συνολική μαγνητική ροπή είναι διάφορη του μηδενός. Τα σιδηριμαγνητικά υλικά έχουν χαμηλότερες τιμές κόρου σε σχέση με τις τιμές των σιδηρομαγνητικών υλικών. Τα πιο χαρακτηριστικά σιδηριμαγνητικά υλικά είναι οι φερρίτες, οι οποίοι ανήκουν στα κεραμικά υλικά. Συνδυάζοντας τις ιδιότητές τους με αυτές των ηλεκτρικών μονωτών, τα σιδηριμαγνητικά υλικά βρίσκουν συχνά εφαρμογή σε μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων.

3.7 Θερμοκρασία Curie

Η συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών επηρεάζεται και από τη θερμοκρασία. Με την αύξησή της, αυξάνεται και η κινητική ενέργεια των ατόμων. Έτσι, γίνεται πιο δύσκολη η ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών που υπό κανονικές συνθήκες θα προσανατολιζόνταν καταλλήλως. Συνεπώς, οι τιμές της μαγνήτισης δεν είναι σταθερές για όλες τις θερμοκρασίες. Το μέγιστο της μαγνήτισης κόρου εντοπίζεται στη θερμοκρασία 0 K, στην οποία ελαχιστοποιούνται οι θερμικές ταλαντώσεις.

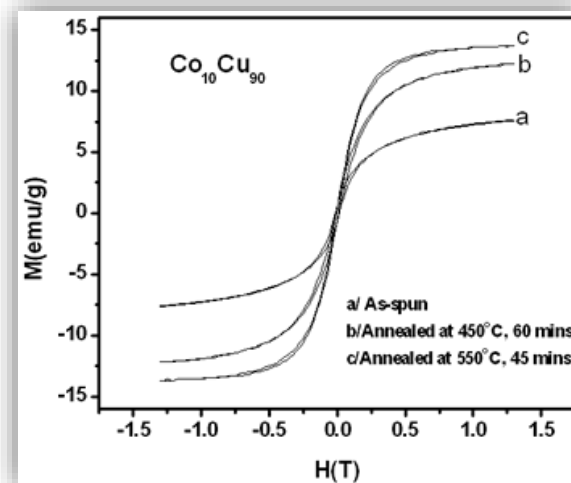
Ορίζεται μια κρίσιμη θερμοκρασιακή τιμή που ονομάζεται θερμοκρασία Curie T_c και αποτελεί την τιμή της θερμοκρασίας για την οποία η μαγνήτιση κόρου μηδενίζεται. Επομένως, τα σιδηρομαγνητικά και τα σιδηριμαγνητικά υλικά μετατρέπονται σε παραμαγνητικά για τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες αυτής της κρίσιμης θερμοκρασίας Curie. Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις σύζευξης, οι οποίες εξουδετερώνονται. Η απώλεια των μαγνητικών ιδιοτήτων είναι αναστρέψιμη, το οποίο σημαίνει ότι μετά την ψύξη των μαγνητικών υλικών, αυτά γίνονται ξανά σιδηρομαγνητικά ή σιδηριμαγνητικά.

Στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών εμφανίζεται, επίσης, μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Néel T_N . Με την υπέρβαση αυτής της θερμοκρασίας, συντελείται απώλεια των μαγνητικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών, τα οποία γίνονται παραμαγνητικά.

3.8 Καμπύλη μαγνήτισης

Για τη μελέτη και το χαρακτηρισμό των μαγνητικών υλικών, χρησιμοποιούνται κάποιες καμπύλες που παρέχουν πληροφορίες για την επίδραση του μαγνητικού

πεδίου σε αυτά. Για υλικά που μαγνητίζονται ενώ ήταν απομαγνητισμένα, δημιουργείται η λεγόμενη καμπύλη αρχικής μαγνήτισης. Αυτή η καμπύλη εκφράζει τη γραφική παράσταση της συνάρτησης της σχέσης της έντασης του μαγνητικού πεδίου H και της μαγνήτισης M .



Εικόνα 3.4: Καμπύλες μαγνήτισης δειγμάτων $Co_{10}Cu_{90}$ για διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης [28]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, αρχικά, για μηδενική τιμή έντασης μαγνητικού πεδίου, η τιμή της μαγνήτισης είναι επίσης μηδενική. Αυτό είναι επόμενο, αφού ο προσανατολισμός των συνισταμένων ροπών των μαγνητικών περιοχών του υλικού είναι τυχαίος. Με την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτιση του υλικού αρχίζει να αυξάνεται, αφού οι μαγνητικές ροπές ξεκινούν να προσανατολίζονται καταλλήλως. Ανάλογα με τη μαγνητική επιδεκτικότητα του κάθε υλικού, η κλίση της καμπύλης είναι διαφορετική, κάτι που εκφράζει τη δυσκολία που συναντάται στη μαγνήτιση και συνεπώς στην περιστροφή των μαγνητικών περιοχών.

Η σχέση μαγνήτισης και μαγνητικού πεδίου δεν είναι γραμμική, κάτι που επίσης οφείλεται στον αρχικά τυχαίο προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών. Για μικρές τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, η προσαρμογή του προσανατολισμού των

μαγνητικών ροπών δεν επιτυγχάνεται, παρά μόνο για μαγνητικές ροπές που έχουν ήδη κατεύθυνση παραπλήσια με αυτή του μαγνητικού πεδίου. Για μεγαλύτερες τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, η κλίση της καμπύλης αυξάνεται, αφού πλέον είναι δυνατή η αλλαγή του προσανατολισμού όλο και περισσότερων μαγνητικών περιοχών που αρχικά είχαν μεγαλύτερη απόκλιση στην κατεύθυνσή τους, σε σχέση με την κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Στο τέλος, απομένουν οι μαγνητικές περιοχές των οποίων ο προσανατολισμός έχει σημαντική απόκλιση σε σχέση με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Για την περιστροφή αυτών των περιοχών απαιτείται αυξημένη ένταση μαγνητικού πεδίου. Αυτό γίνεται εμφανές γραφικά στις καμπύλες μαγνήτισης στο τμήμα του οποίου η κλίση αρχίζει και πάλι να μειώνεται, παρά την περεταίρω αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Αφού ολοκληρωθεί η περιστροφή και των παραπάνω περιοχών, έχει πλέον ευθυγραμμιστεί το σύνολό τους με την κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Συνεπώς, η τιμή της μαγνήτισης έχει μεγιστοποιηθεί και έχει φτάσει την τιμή της μαγνήτισης κόρου για το συγκεκριμένο υλικό. Η αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου δεν επιφέρει καμιά περεταίρω αλλαγή στη μαγνήτιση, κάτι που εκφράζεται από το τμήμα της καμπύλης του οποίου η κλίση τείνει να μηδενιστεί.

3.9 Βρόχος υστέρησης

Εκτός από την καμπύλη αρχικής μαγνήτισης, ο χαρακτηρισμός ενός υλικού περιλαμβάνει και τη μελέτη των χαρακτηριστικών του κατά τις μεταβολές της έντασης του παρεχόμενου μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφεται ο βρόχος υστέρησης ενός υλικού, ο οποίος εκφράζει τη «διαδρομή» που θα

ακολουθήσει η καμπύλη της μαγνήτισης, όταν το μαγνητικό πεδίο ελαττώνεται και τελικά αντιστρέφεται.

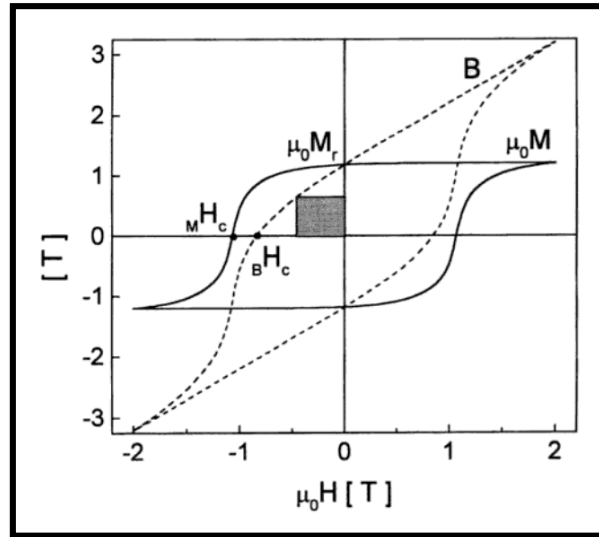
Ο βρόχος υστέρησης ονομάστηκε έτσι λόγω του ότι η μείωση της έντασης του παρεχόμενου μαγνητικού πεδίου δεν επιφέρει μείωση της μαγνήτισης του υλικού με όμοιο ρυθμό, αλλά με μικρότερο. Δηλαδή, η μαγνήτιση υστερεί σε σχέση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Μάλιστα, όταν η ένταση του παρεχόμενου μαγνητικού πεδίου μηδενιστεί, ένα μέρος της μαγνήτισης παραμένει στο υλικό. Αυτό το μέγεθος ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση και εκφράζει τη μαγνήτιση που έχει ένα υλικό ακόμα και όταν δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο σε αυτό.

Η ύπαρξη της παραμένουσας μαγνήτισης βασίζεται στο μηχανισμό με τον οποίο περιστρέφονται οι μαγνητικές περιοχές. Όταν το παρεχόμενο μαγνητικό πεδίο αντιστρέφεται, η όλη διαδικασία περιστροφής και ευθυγράμμισης των μαγνητικών ροπών ξεκινάει εκ νέου. Επομένως, πρώτα ευθυγραμμίζονται οι ευνοϊκότερα προσανατολισμένες μαγνητικές περιοχές στη νέα κατεύθυνση του πεδίου και στη συνέχεια οι υπόλοιπες, με τα μαγνητικά τοιχώματα, όμως, να αντιστέκονται σε αυτές τις μεταβολές. Όταν το μαγνητικό πεδίο που επιβάλλεται γίνει μηδενικό, ένα μέρος των μαγνητικών ροπών θα έχει παραμείνει ευθυγραμμισμένο στην προηγούμενη κατεύθυνση, δικαιολογώντας ένα αντίστοιχο ποσό μαγνήτισης.

Για την απομαγνήτιση του υλικού, πρέπει να συνεχιστεί η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου, με κατεύθυνση αντίθετη της αρχικής. Το συγκεκριμένο πεδίο ονομάζεται συνεκτικό και συμβολίζεται με H_c . Εάν η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξηθεί περαιτέρω, η μαγνήτιση του υλικού φτάνει σε μια νέα τιμή μαγνήτισης κόρου, έχοντας, φυσικά, αντίθετη κατεύθυνση από την αρχική.

Με νέα αλλαγή της κατεύθυνσης του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, δημιουργείται ένας νέος βρόχος, συμμετρικός του αρχικού, που καταλήγει στην προηγούμενη τιμή της μαγνήτισης κόρου. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η

δημιουργία μιας κλειστής καμπύλης, η οποία αποτελεί το βρόχο υστέρησης του υλικού [29].



Εικόνα 3.5: Βρόχος υστέρησης $B(H)$ και $M(H)$ μαγνητικού υλικού [30]

4 Είδη ατελειών

4.1 Εισαγωγή

Σε όλα τα μαγνητικά υλικά εμφανίζονται ατέλειες. Οι ατέλειες μπορεί να εντοπίζονται σε ατομικό επίπεδο, χωρίς να είναι ορατές στον άνθρωπο, αλλά μπορεί να υπάρχουν και στην επιφάνεια του υλικού με μεγαλύτερες διαστάσεις, με αποτέλεσμα να γίνονται πιο εύκολα αντιληπτές. Σε κάθε περίπτωση, αναλόγως της χρήσης του υλικού και των απαιτούμενων προδιαγραφών του, τίθενται όρια για τα οποία οι ατέλειες συγκεκριμένων μορφών μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές. Φυσικά, σκοπός είναι η προσαρμογή της μεθόδου παρασκευής και των χαρακτηριστικών των υλικών, ώστε οι ατέλειες που υπάρχουν ή θα προκύψουν στο μέλλον να είναι οι λιγότερες δυνατές.

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για την κατεργασία των μαγνητικών υλικών και γενικότερα των μετάλλων είναι πιθανό να προκαλέσουν μεταβολές στη χημική και φυσική τους σύσταση. Επομένως, είναι πιθανό να προκύψουν υλικά με ατέλειες και ανομοιογένειες. Εάν αυτές δεν βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων και δεν γίνουν άμεσα αντιληπτές, μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία νέων σφαλμάτων στα επόμενα στάδια της παραγωγής, ή και κατά τη χρήση των υλικών στις διάφορες εφαρμογές.

Ανάλογα με το είδος, το μέγεθος και την προέλευσή τους, οι ατέλειες ομαδοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες. Οι ατέλειες μπορεί να είναι σημειακές, γραμμικές, ή διεπιφανειακές. Για τον προσδιορισμό τους, συνήθως απαιτείται η γνώση των διαστάσεων, της θέσης και του προσανατολισμού τους.

Γενικά, οι ατέλειες επηρεάζουν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ενός υλικού και καθορίζουν τη συμπεριφορά του. Ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται αυξημένη ακρίβεια, είναι απαραίτητη η εύρεση των ατελειών και η ελαχιστοποίησή τους.

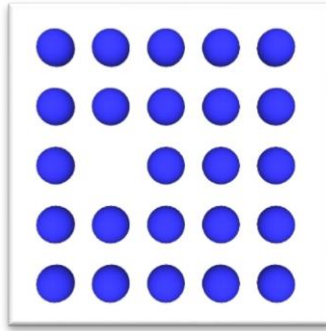
4.2 Σημειακές ατέλειες

4.2.1 Κενή θέση

Οι σημειακές ατέλειες περιλαμβάνουν τις ατέλειες στη διάταξη των ατόμων στο πλέγμα ενός υλικού. Μία συνήθη ατέλεια αποτελεί η απουσία ενός ατόμου από μία θέση του πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργείται μία κενή θέση. Σε όλα τα υλικά υπάρχουν ατέλειες αυτής της μορφής. Στην περίπτωση των μετάλλων, περίπου μία στις 10000 ατομικές θέσεις είναι κενή. Επίσης, κενές θέσεις μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα υλικό με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Μάλιστα, ο αριθμός των κενών θέσεων αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον τύπο:

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right) \quad (4.1)$$

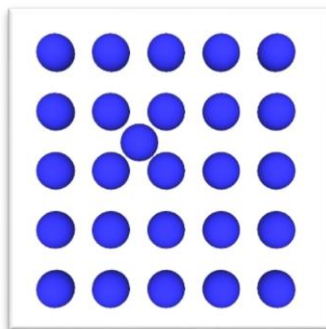
όπου N_v είναι ο αριθμός των κενών θέσεων, N ο συνολικός αριθμός των θέσεων, Q_v η ενέργεια που απαιτείται για το σχηματισμό μιας κενής θέσης, k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία σε Kelvin [31].



Εικόνα 4.1: Ύπαρξη κενής θέσης στο ατομικό πλέγμα

4.2.2 Παρεμβολή

Μία διαφορετική ατέλεια θέσης είναι η παρεμβολή. Σύμφωνα με αυτήν, ένα άτομο καταλαμβάνει μια διαπλεγματική θέση, δηλαδή τοποθετείται στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των ατομικών θέσεων. Πολλές φορές, η διατομική απόσταση είναι μικρότερη της διαμέτρου των ατόμων του υλικού, με αποτέλεσμα τα άτομα που παρεμβάλλονται να προκαλούν σημαντικές παραμορφώσεις στο ατομικό πλέγμα. Ως μορφή ατέλειας, η παρεμβολή συμβαίνει σπανιότερα σε σχέση με τις ατέλειες κενών θέσεων.



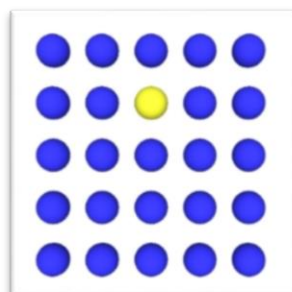
Εικόνα 4.2: Ύπαρξη ατόμου παρεμβολής στο ατομικό πλέγμα

4.2.3 Προσμίξεις

Εκτός από τις ατέλειες που οφείλονται στην παρουσία ή απουσία ατόμου στο ατομικό πλέγμα, υπάρχουν και ατέλειες που οφείλονται στην ύπαρξη ατόμων άλλων υλικών εντός του πλέγματος. Οι λεγόμενες προσμίξεις αποτελούν, επίσης, σημειακές ατέλειες και επηρεάζουν την καθαρότητα ενός υλικού και συνεπώς τα χαρακτηριστικά του. Σε όλα τα υλικά εμφανίζονται προσμίξεις, αλλά συνήθως σε βαθμό που δεν επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική τους δομή. Βέβαια, υπάρχει και η περίπτωση των προσμίξεων που έχουν τοποθετηθεί εκούσια, ώστε να τροποποιηθούν κάποιες από τις ιδιότητες ενός υλικού, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των κραμάτων.

4.2.4 Αντικατάσταση

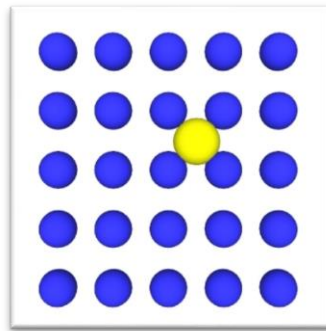
Εάν κατά την πρόσμιξη πραγματοποιηθεί αντικατάσταση των ατόμων του υλικού με τα νέα άτομα, τότε υφίσταται η ατέλεια αντικατάστασης. Αναλόγως του βαθμού διαλυτότητας των προσμίξεων, της σχέσης του μεγέθους των ατόμων των δύο υλικών και της δομής τους, εξαρτάται και η συμπεριφορά των προσμίξεων, κατά τη διάλυσή τους σε ένα υλικό.



Εικόνα 4.3: Ύπαρξη ατέλειας αντικατάστασης στο ατομικό πλέγμα

4.2.5 Διαπλεγματικές ατέλειες

Όταν τα άτομα των προσμίξεων καταλαμβάνουν θέσεις μεταξύ των ατόμων του πλέγματος, οι ατέλειες ονομάζονται διαπλεγματικές. Όπως και στην περίπτωση των ατελειών παρεμβολής, εάν το μέγεθος των ατόμων της πρόσμιξης είναι μεγαλύτερο της ενδοατομικής απόστασης, δημιουργούνται παραμορφώσεις στο ατομικό πλέγμα του υλικού.



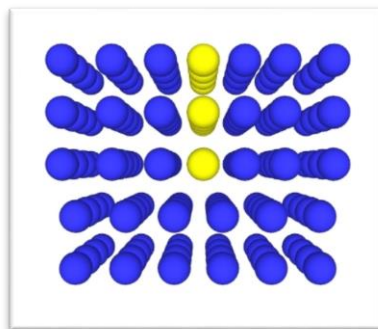
Εικόνα 4.4: Ύπαρξη διαπλεγματικής ατέλειας στο ατομικό πλέγμα

4.3 Γραμμικές ατέλειες

Οι γραμμικές ατέλειες ή διαταραχές, όπως αλλιώς ονομάζονται, αποτελούν τις ατέλειες που συμβαίνουν στο πλέγμα ενός υλικού, λόγω προβληματικής ευθυγράμμισης των ατόμων σε αυτό.

4.3.1 Διαταραχή ακμής

Μία μορφή γραμμικής ατέλειας αποτελούν οι διαταραχές ακμής. Αυτές έχουν παρόμοια μορφή με τις ατέλειες παρεμβολής. Ένα ημιεπίπεδο ατόμων παρεμβάλλεται στο ατομικό πλέγμα, με συνέπεια την παραμόρφωση αυτού. Έτσι, τα άτομα των γραμμών που βρίσκονται κοντά στο ημιεπίπεδο που παρεμβάλλεται, συμπιέζονται λιγότερο ή περισσότερο, αναλόγως της απόστασης.

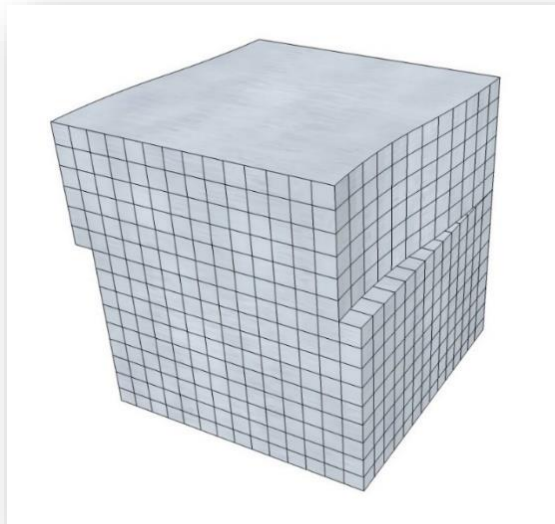


Εικόνα 4.5: Διαταραχή ακμής στο ατομικό πλέγμα

4.3.2 Ελικοειδής διαταραχή

Μία, επίσης, γραμμική ατέλεια αποτελεί η ελικοειδής διαταραχή ή διαταραχή κοχλία, όπως αλλιώς ονομάζεται. Αιτία της εμφάνισης αυτής της διαταραχής είναι η καταπόνηση του υλικού, μέσω της άσκησης διατμητικών τάσεων σε αυτό. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μετατόπιση ενός τμήματος του υλικού από την αρχική του θέση, δημιουργώντας παραμόρφωση στο πλέγμα. Η απόσταση κατά την οποία μετακινείται το συγκεκριμένο τμήμα του υλικού εξαρτάται, προφανώς, από το μέτρο και την κατεύθυνση της τάσης που ασκείται σε αυτό. Το διάνυσμα που εκφράζει αυτή την τάση, ονομάζεται διάνυσμα Burgers. Η ελικοειδής διαταραχή συνδυάζεται με τη

διαταραχή ακμής, δημιουργώντας τις λεγόμενες μικτές διαταραχές, οι οποίες είναι και οι πιο συνηθισμένες.



Εικόνα 4.6: Ύπαρξη ελικοειδούς διαταραχής στο ατομικό πλέγμα

4.4 Διεπιφανειακές ατέλειες

Οι διεπιφανειακές ατέλειες εμφανίζονται στα όρια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές δομές. Ένα τέτοιο όριο είναι και η εξωτερική επιφάνεια ενός υλικού, η οποία έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον. Εκ των πραγμάτων, τα άτομα που αποτελούν την επιφάνεια ενός υλικού έχουν μικρότερο αριθμό δεσμών με τα γειτονικά τους άτομα, οπότε έχουν και υψηλότερη ενέργεια. Σε αυτές τις περιοχές τείνουν να εμφανίζονται οι επιφανειακές ατέλειες.

4.4.1 Ατέλειες ορίων κόκκων

Στις διεπιφανειακές ατέλειες ανήκουν και οι ατέλειες που δημιουργούνται στα όρια των κόκκων, δηλαδή σε περιοχές με διαφορετικό προσανατολισμό. Μια τέτοια ατέλεια είναι μικρότερης ή μεγαλύτερης σημασίας, ανάλογα με τη γωνία απόκλισης μεταξύ των γειτονικών κόκκων. Όπως και στις επιφανειακές ατέλειες, ομοίως και στα όρια των κόκκων, υπάρχει αύξηση της ενέργειας, ενώ σε αυτές τις περιοχές διεισδύουν και άτομα των προσμίξεων. Γενικά, στα όρια των κόκκων διενεργούν ισχυρές συνεκτικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα να μην υφίσταται σημαντική παραμόρφωση του υλικού.

4.4.2 Διδυμίες

Μία άλλη μορφή διεπιφανειακών ατελειών αποτελούν οι διδυμίες, δηλαδή η διάταξη κατά την οποία δημιουργείται μια συμμετρική όμοια περιοχή, με άτομα σε κατοπτρικές θέσεις. Στις διδυμίες, τα άτομα μετατοπίζονται κατά κάποια απόσταση και αλλάζουν τον προσανατολισμό τους, ώστε οι γειτονικές περιοχές του υλικού να είναι ανά δύο συμμετρικές. Οι πιθανοί λόγοι αυτής της συμπεριφοράς είναι η άσκηση μηχανικών τάσεων στο υλικό, η ανόπτηση του υλικού, ή η αλλαγή της φάσης του.

4.4.3 Σφάλματα επιστοιίβασης

Επίσης, στις επιφανειακές ατέλειες ανήκουν τα σφάλματα επιστοιίβασης. Αυτά συμβαίνουν όταν η διαδοχή των επιπέδων της δομής ενός υλικού γίνεται

λανθασμένα, κάτι που οφείλεται είτε σε ατέλειες διδυμιών, είτε στην αφαίρεση, συνένωση, ή μετατόπιση γειτονικών επιπέδων.

4.4.4 Διαταραχές δάσους

Η πορεία των ατελειών που ανήκουν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες, συχνά διασταυρώνεται με άλλες μορφές ατελειών, καθώς αυτές διαδίδονται σε ένα πλεγματοειδές επίπεδο. Η περαιτέρω διάδοση αυτών των διαταραχών οδηγεί στη εκ νέου διασταύρωση με άλλες διαταραχές που διαδίδονται στα πλεγματοειδή επίπεδα και ούτω καθ' εξής. Αυτό το είδος διαταραχής ονομάζεται διαταραχή δάσους (forest dislocation), λόγω της δενδροειδούς μορφής του και εξαρτάται από το ρυθμό διάδοσης των διαταραχών και τη γεωμετρία των υλικών.

4.5 Ατέλειες όγκου

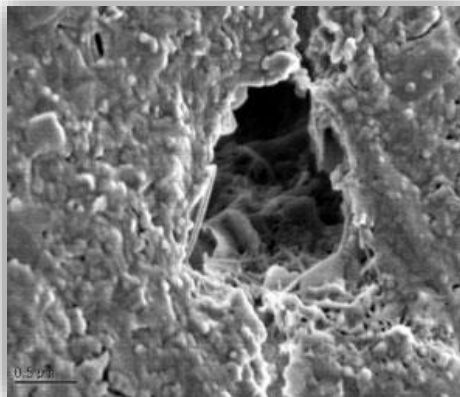
Στις ατέλειες όγκου περιλαμβάνονται, προφανώς, οι ατέλειες που έχουν 3 διαστάσεις και συναντώνται όταν ένα μέρος του όγκου του πλέγματος ενός υλικού αντικαθίσταται από ένα άλλο. Αυτό το είδος ατελειών εκτείνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ατελειών.

4.5.1 Κατακρημνίσματα

Ως μορφή ατέλειας όγκου θεωρούνται τα κατακρημνίσματα. Αυτά αποτελούν ενώσεις μεταξύ του μετάλλου και του κράματος ή άλλων προσμίξεων. Οι ενώσεις αυτές εντάσσονται στο κρυσταλλικό πλέγμα, είτε έχοντας πλεγματική ή ημιπλεγματική συνέχεια, είτε όχι. Ανήκουν στις σοβαρές και μη επιθυμητές ατέλειες, αφού συντελούν στη δημιουργία αταξίας στη δομή του πλέγματος.

4.5.2 Εγκλείσματα

Εκτός από τα κατακρημνίσματα, στις ατέλειες όγκου ανήκουν και τα εγκλείσματα, δηλαδή ανεπιθύμητες προσμίξεις και ακαθαρσίες στο υλικό που δημιουργούνται, κυρίως, κατά την αλλαγή της φάσης του. Άλλα είδη ατελειών όγκου θεωρούνται οι πόροι και οι ρωγμές, δηλαδή η απουσία μέρους του κρυσταλλικού πλέγματος και η διακοπή της συνέχειάς του, αντίστοιχα.



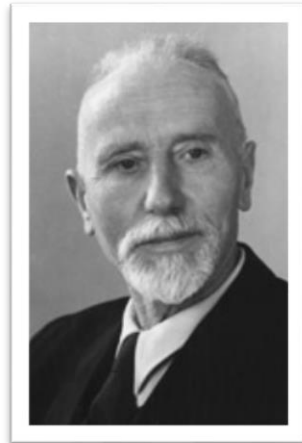
Εικόνα 4.7: Ύπαρξη ατέλειας όγκου στο υλικό [32]

5 Φαινόμενο Barkhausen

5.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο Barkhausen ανακαλύφθηκε το 1919 από τον Γερμανό Φυσικό Heinrich Barkhausen [33], όταν αυτός τύλιξε ένα σύρμα σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, το οποίο συνέδεσε στη συνέχεια με ένα ηχείο. Όταν επιβλήθηκε σε αυτό το δοκίμιο μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, ακούστηκε ένας ήχος από το συνδεδεμένο ηχείο. Συνεπώς, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όταν ένα φερρομαγνητικό υλικό βρεθεί υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, παράγεται ένα σήμα που οφείλεται στη μετακίνηση των μαγνητικών του περιοχών και στην περιστροφή των μαγνητικών διπόλων κατά τη διάρκεια του προσανατολισμού τους στο εξωτερικό πεδίο. Ως ήχος, το σήμα αυτό μοιάζει με στατικό θόρυβο, κάτι που οδήγησε στην ονομασία του «θόρυβος Barkhausen».

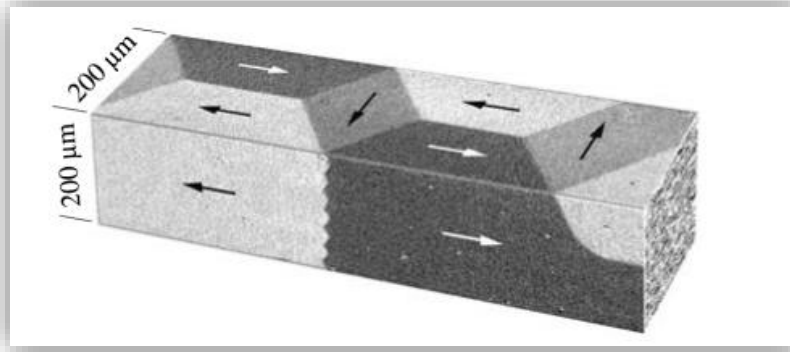
Το φαινόμενο Barkhausen χρησιμοποιείται σε μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου υλικών, αφού ο θόρυβος Barkhausen που παράγεται, συνδέεται με τη δομή του εξεταζόμενου υλικού και βοηθάει στην καταγραφή των ιδιοτήτων του και τον προσδιορισμό πιθανών ατελειών του.



Εικόνα 5.1: Ο Heinrich Barkhausen [34]

5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα μαγνητικά υλικά αποτελούνται από τις λεγόμενες μαγνητικές περιοχές, που χαρακτηρίζονται από ένα ομόρροπο διάνυσμα μαγνήτισης. Υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, το διάνυσμα της μαγνήτισης των περιοχών αυτών περιστρέφεται, έτσι ώστε ο τελικός προσανατολισμός του να ταυτίζεται με την κατεύθυνση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα όρια των μαγνητικών περιοχών ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα. Το διάνυσμα της μαγνήτισης μιας μαγνητικής περιοχής μπορεί να αλλάζει το μέγεθός της μέσω της μετακίνησης αυτών των τοιχωμάτων. Βέβαια, για να διατηρείται το συνολικό μέγεθος του όγκου σταθερό, η αύξηση μιας μαγνητικής περιοχής προϋποθέτει τη μείωση μιας γειτονικής περιοχής. Τελικά, ένα υλικό θεωρείται μαγνητισμένο όταν τα διανύσματα της μαγνήτισης που περιγράφουν κάθε μαγνητική περιοχή έχουν προσανατολιστεί στη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 5.2: Οι μαγνητικές περιοχές σε ένα τμήμα σιδήρου [35]

Για την ανίχνευση του μαγνητικού θορύβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πηνίο, τυλιγμένο γύρω από το μαλακό μαγνητικό υλικό. Με αυτόν τον τρόπο, οι μετακινήσεις των μαγνητικών περιοχών γίνονται αντιληπτές ως ηλεκτρικό σήμα. Μάλιστα, παρατηρήθηκε ότι η διαδικασία μαγνήτισης δεν γίνεται με συνεχή τρόπο. Τα σήματα που καταγράφονται είναι απότομα και ασυνεχή, γι' αυτό και η μετακίνηση καθιερώθηκε να θεωρείται ότι αποτελείται από απότομα άλματα, τα οποία ονομάστηκαν άλματα Barkhausen. Συνήθως, μετά την ολοκλήρωση της καταγραφής του συνόλου των ηλεκτρικών παλμών, το σήμα ενισχύεται, διαχωρίζεται από περιβαλλοντικούς θορύβους και οδηγεί στη δημιουργία του τελικού σήματος του θορύβου Barkhausen.

Ο ήχος του θορύβου Barkhausen αποτελεί μια εύκολα αντιληπτή από τον άνθρωπο απόδειξη του ομώνυμου φαινομένου. Ο θόρυβος αυτός διαφοροποιείται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υλικού που εξετάζεται, όπως είναι το βάθος, η αγωγιμότητα και η διαπερατότητά του. Απλώς, τυγχάνει η συχνότητα κατά την οποία εκτελούνται τα άλματα Barkhausen, να βρίσκεται εντός του εύρους των ανιχνεύσιμων από το ανθρώπινο αυτί συχνοτήτων (περίπου 20 Hz - 20 kHz [36]).

Αιτία της μεταβολής του σήματος του θορύβου Barkhausen για ένα συγκεκριμένο υλικό, είναι η επίδραση που έχουν οι ατέλειες και γενικότερα οι διαφοροποιήσεις της

δομής του υλικού αυτού. Όταν οι μαγνητικές περιοχές συναντήσουν κάποιο εμπόδιο κατά τη μετακίνησή τους, όπως είναι οι προσμίξεις, οι πόροι ή οι ρωγμές, επιβραδύνουν, αλλάζοντας ταυτόχρονα τη μαγνητική ροή και συνεπώς το τελικό σήμα που λαμβάνεται. Μέσω της ανάλυσης του σήματος του θορύβου Barkhausen, μπορούν, επίσης, να εξαχθούν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες ενός υλικού, καθώς και για τη συμπεριφορά του όταν βρίσκεται υπό την επίδραση τάσεων, αποτελώντας, έτσι, μια χρήσιμη μέθοδο Μη Καταστροφικού Ελέγχου υλικών.

5.3 Διατάξεις μέτρησης θορύβου Barkhausen

5.3.1 Γενικά στοιχεία

Τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την καταγραφή και μέτρηση του σήματος του θορύβου Barkhausen είναι τα πηνία διέγερσης και λήψης, μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και μια συσκευή απόδοσης του ηλεκτρικού σήματος, όπως είναι ένα ηχείο, ένας παλμογράφος ή μια κάρτα ψηφιοποίησης.

Το πηνίο διέγερσης ή πρωτεύον πηνίο, όπως αλλιώς ονομάζεται, συνδέεται με τη γεννήτρια, η οποία παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής συχνότητας με τιμές που ποικίλουν και μπορεί για παράδειγμα να είναι 0.005 Hz [37], 55 Hz [38], ή και μεγαλύτερες. Το σήμα διέγερσης είναι συνήθως ημιτονοειδούς [39], [40], [41], ή τριγωνικής μορφής [42], [43], [44], [45], [46] και οδηγείται στο πηνίο που τυλίγεται στον ηλεκτρομαγνήτη, με σκοπό τη δημιουργία του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου.

Το πηνίο λήψης ή δευτερεύον πηνίο έχει ως σκοπό τη λήψη του ηλεκτρικού σήματος που έχει δημιουργηθεί στο εξεταζόμενο υλικό, λόγω του φαινομένου

Barkhausen. Αναλόγως του είδους της επιθυμητής μέτρησης, το πηνίο λήψης μπορεί είτε να τυλιχθεί γύρω από το υλικό, είτε να τοποθετηθεί σε πολύ μικρή απόσταση ή και σε επαφή με αυτό. Στην πρώτη περίπτωση είναι δυνατή η μελέτη του συνόλου του δείγματος, ενώ στη δεύτερη γίνεται καταγραφή του σήματος που προέρχεται κυρίως από την επιφάνεια του υλικού. Το σήμα που λαμβάνεται έχει συνήθως μικρό πλάτος, οπότε οδηγείται πρώτα σε κάποιον ενισχυτή. Στη συνέχεια, μεταφέρεται στην επιθυμητή συσκευή. Εκτός από το συνήθη τρόπο απεικόνισης μέσω ενός παλμογράφου, το σήμα μπορεί να ψηφιοποιηθεί και να αναλυθεί καταλλήλως, μέσω κάποιου λογισμικού επεξεργασίας ηλεκτρονικού υπολογιστή.

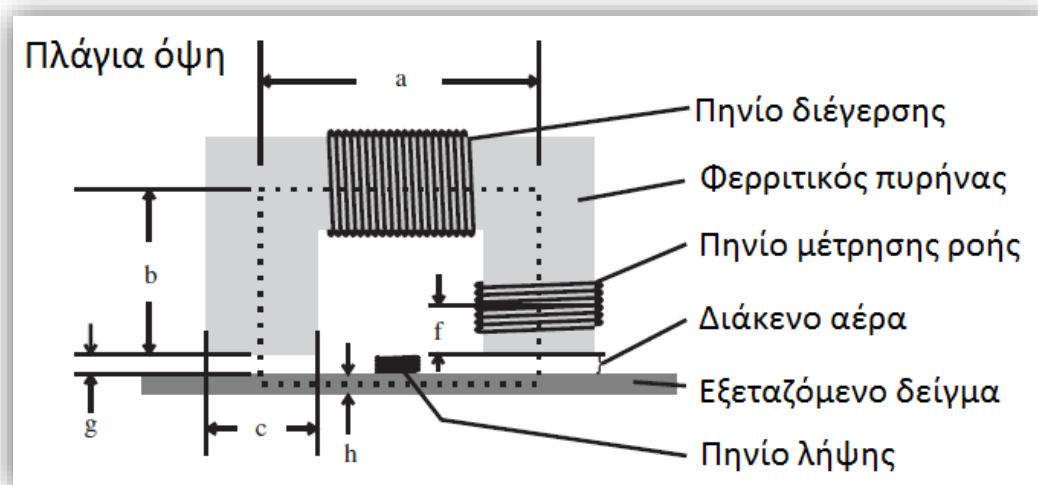
Ανάλογα με τη διάταξη και τη χρήση της, είναι πολύ πιθανό να επιλεγεί η προσθήκη κατάλληλων φίλτρων, τα οποία θα επιτρέπουν τη διέλευση σήματος ενός συγκεκριμένου εύρος συχνοτήτων, ώστε να αποκοπούν τα σήματα ανεπιθύμητων συχνοτήτων που οφείλονται σε περιβαλλοντικούς θορύβους και όχι στο φαινόμενο Barkhausen. Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι είτε απευθείας ζωνοπερατά, είτε συνδυασμός υψιπερατών και χαμηλοπερατών φίλτρων [47], [48], [49], [50], [51].

Τελικά, οι τιμές που συλλέγονται και καταγράφονται είναι συνήθως τρεις. Η ενεργός τιμή του σήματος Barkhausen (V_{RMS}), ο αριθμός των παλμών που υπερέβησαν μία συγκεκριμένη οριακή τιμή (counts) και η μαγνητική διαπερατότητα (μ).

5.3.2 Διάταξη μονού ηλεκτρομαγνήτη

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται ποικίλλουν ως προς το σχήμα και τον τρόπο τοποθέτησης των πηνίων διέγερσης και λήψης. Εκτός από την άμεση τοποθέτηση των πηνίων πάνω στο δείγμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, μία διάταξη που χρησιμοποιείται συχνά περιλαμβάνει την τοποθέτηση των πηνίων σε

ηλεκτρομαγνήτη σχήματος «Π». Η διάταξη αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως διάταξη μονού ηλεκτρομαγνήτη (single yoke) [52], [53], [54], [55]. Σε μια τέτοια διάταξη, το πηνίο διέγερσης τυλίγεται, συνήθως, στο οριζόντιο μέρος του ηλεκτρομαγνήτη και το πηνίο λήψης σε κάποια από τις δύο βάσεις του ή τοποθετείται στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ αυτών. Επιπροσθέτως, μπορούν να τοποθετηθούν και άλλα πηνία για τη διεξαγωγή επιπλέον μετρήσεων, όπως για τη μέτρηση της μαγνητικής ροής. Ο πυρήνας σε σχήμα «Π» στον οποίο τυλίγονται τα πηνία είναι κατασκευασμένος από κάποιο φερρομαγνητικό υλικό, με συνηθέστερη επιλογή το κράμα Fe-Si [43], [49], [56].



Εικόνα 5.3: Μορφή διάταξης «μονού ηλεκτρομαγνήτη» (Τροποποίηση από [51])

5.3.3 Επιδερμικό φαινόμενο

Η προαναφερθείσα διάταξη έχει το πλεονέκτημα της εύκολης τοποθέτησής της στις περισσότερες επιφάνειες, με σκοπό την επί τόπου διεξαγωγή ελέγχων και μετρήσεων, ακόμη και σε δείγματα μεγάλου μεγέθους. Όμως, η διάδοση του

εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στους μεταλλικούς αγωγούς επηρεάζεται από το λεγόμενο «επιδερμικό φαινόμενο».

Σύμφωνα με αυτό, καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται σε έναν αγωγό και στη συγκεκριμένη περίπτωση στο εξεταζόμενο υλικό, δημιουργείται ένα νέο μαγνητικό πεδίο, με φορά αντίθετη του αρχικού. Επομένως, το αρχικό μαγνητικό πεδίο μπορεί να διαδίδεται στο εσωτερικό του δοκιμίου, αλλά ταυτόχρονα επηρεάζεται από το νέο και αντίθετο μαγνητικό πεδίο. Στην επιφάνεια του υλικού όπου το αρχικό μαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό, η επίδραση του δευτέρου είναι μικρή. Όμως, η ένταση του πρώτου μειώνεται στο εσωτερικό του υλικού και τελικά μηδενίζεται, με αποτέλεσμα να μην συντελείται διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Το βάθος για το οποίο είναι δυνατή η διάδοσή του χωρίς σημαντικές απώλειες, ονομάζεται βάθος διείσδυσης και δίδεται από τον τύπο:

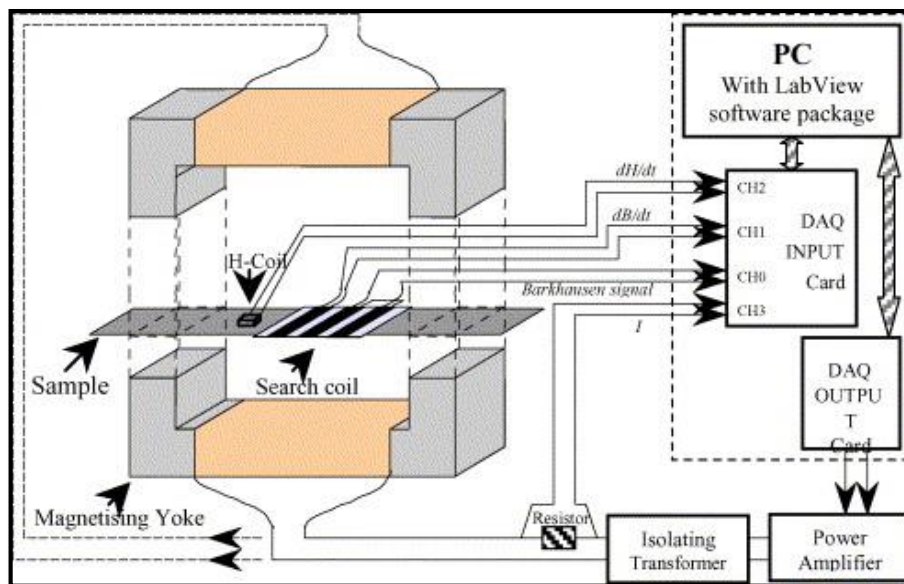
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}} = \sqrt{\frac{Z}{\sigma Z \pi f \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma\pi f \mu}} \quad (5.1)$$

όπου σ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, μ η μαγνητική διαπερατότητα, f η συχνότητα διέγερσης και $\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα.

Παρατηρούμε ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα και η συχνότητα διέγερσης είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου του επιδερμικού βάθους. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να αυξήσουμε το βάθος διείσδυσης για ένα συγκεκριμένο υλικό, μειώνοντας τη συχνότητα του σήματος διέγερσης, εάν αυτό είναι εφικτό και επιθυμητό.

5.3.4 Διάταξη διπλού ηλεκτρομαγνήτη

Εάν η αύξηση του βάθους διείσδυσης δεν επαρκεί για τον επαρκή έλεγχο ενός υλικού με μια διάταξη μονού ηλεκτρομαγνήτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παραλλαγή της παραπάνω διάταξης. Αυτή περιλαμβάνει έναν ακόμη ηλεκτρομαγνήτη, τοποθετημένο αντιδιαμετρικά του πρώτου και ονομάζεται διάταξη «διπλού ηλεκτρομαγνήτη» [57], [58], [59], [60], [61]. Μια τέτοια διάταξη μειονεκτεί στον τρόπο χρήσης της, αφού απαιτείται η τοποθέτηση ενός σχετικά λεπτού δοκιμίου ενδιάμεσα των δύο ηλεκτρομαγνητών, κάτι που μπορεί να μην είναι δυνατόν πάντοτε να πραγματοποιηθεί. Ωστόσο, το πλεονέκτημά της είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης και από τις δύο πλευρές του υπό εξέταση δοκιμίου. Συνεπώς, το βάθος διείσδυσης πρακτικά διπλασιάζεται, αφού επιτυγχάνεται η ανίχνευση ατελειών οι οποίες δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τη διεξαγωγή των μετρήσεων μόνο στη μία πλευρά του δοκιμίου, στην οποία το βάθος διείσδυσης θα είχε εξαντληθεί.

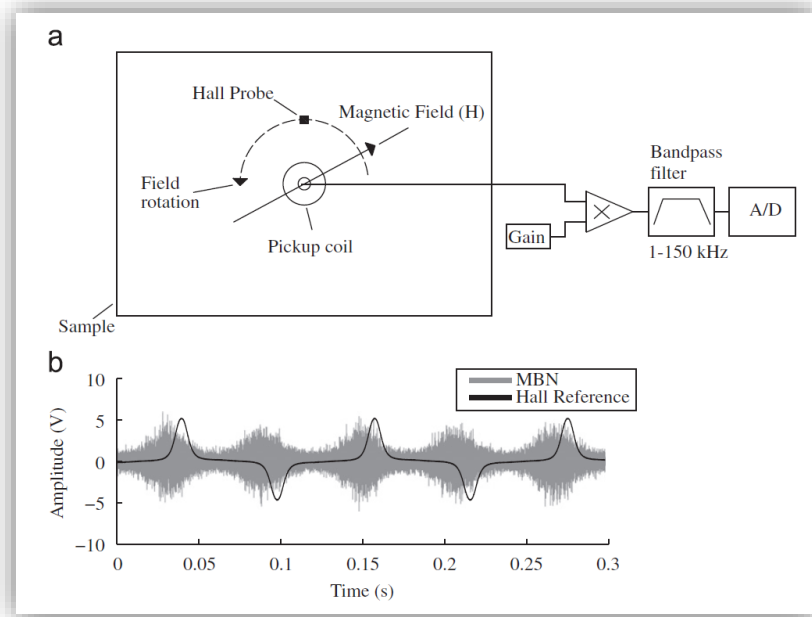


Εικόνα 5.4: Μορφή διάταξης «διπλού ηλεκτρομαγνήτη» [61]

5.3.5 Διάταξη περιστροφικού αισθητήρα Barkhausen

Στις δύο παραπάνω διατάξεις, το υπό εξέταση υλικό γίνεται μέσο διάδοσης της μαγνητικής ροής. Έτσι, οι ατέλειες του υλικού γίνονται αντιληπτές λόγω των μεταβολών του σήματος εξόδου. Ωστόσο, εάν κάποια ατέλεια είναι παράλληλη στη φορά της διάδοσης της μαγνητικής ροής, οι πιθανότητες ανίχνευσής της μειώνονται σημαντικά. Επίσης, πρακτικά όλα τα υλικά είναι ανισότροπα. Χαρακτηριστικό αυτών των υλικών είναι η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων τους ανά κατεύθυνση, κάτι που σημαίνει ότι είναι αναγκαία η πραγματοποίηση πολλαπλών μετρήσεων, ώστε να καλυφθεί το εύρος των επιθυμητών κατευθύνσεων.

Αυτές οι περιπτώσεις καταδεικνύουν την ανάγκη για χρήση μιας διαφορετικής διάταξης αισθητήρα Barkhausen, η οποία ονομάζεται «Συνεχής περιστροφικός αισθητήρας Barkhausen» [62]. Σε μια τέτοια διάταξη, ένα πηνίο λήψης τοποθετείται πάνω στο υλικό, ενώ αντί του πηνίου διέγερσης χρησιμοποιούνται δύο μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου, αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι από ένα φερρομαγνητικό πυρήνα. Αυτή η διάταξη περιστρέφεται με σταθερή συχνότητα, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο ένα συνεχές μαγνητικό πεδίο. Τοποθετώντας, επίσης, έναν αισθητήρα Hall, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης της διάταξης και συνεπώς των γωνιών κατά τις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις επί του δείγματος. Συνεπώς, από την ανάλυση του σήματος εξόδου μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για την ανισοτροπία ενός υλικού, καθώς και να ανακαλυφθούν οι διευθύνσεις για τις οποίες βελτιώνεται και μεγιστοποιείται η μαγνητική του διαπερατότητα.



Εικόνα 5.5: (α) Η διάταξη ενός συνεχούς περιστροφικού αισθητήρα Barkhausen
(β) Ένα τυπικό σήμα εξόδου [62]

5.4 Επεξεργασία των μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε στις πρώτες παραγράφους του κεφαλαίου, από τις μετρήσεις μέσω μιας διάταξης Barkhausen μπορούν να προκύψουν οι τιμές διαφόρων μεγεθών, αναλόγως των αισθητήρων που έχουν συμπεριληφθεί. Οι συνήθεις διατάξεις περιλαμβάνουν την μέτρηση τριών, κυρίως, μεγεθών: Της ενεργού τιμής του σήματος (V_{RMS}), του πλήθους των κορυφών της κυματομορφής που υπερβαίνουν κάποια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή (counts) και της μαγνητικής διαπερατότητας.

Η ενεργός τιμή δίδεται από τον τύπο:

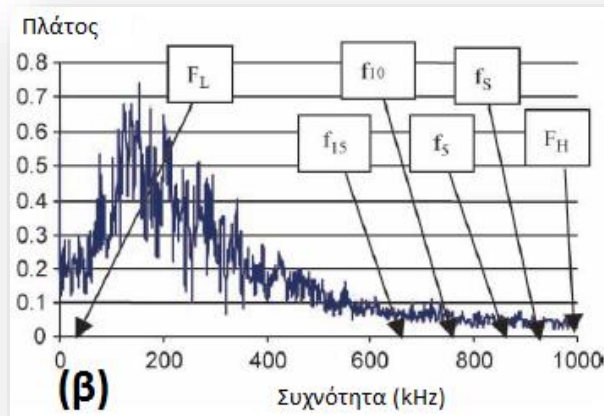
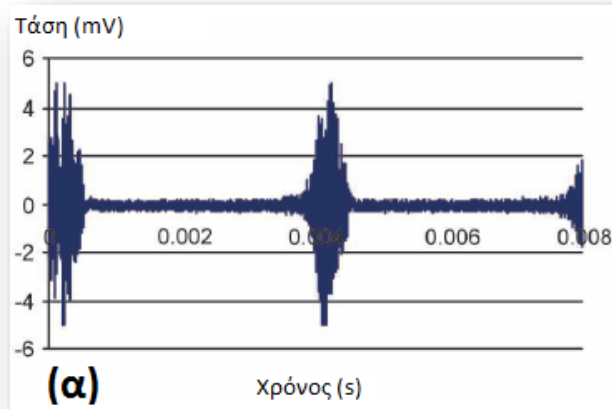
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (5.2)$$

όπου N είναι το πλήθος των δεδομένων που προκύπτουν από τη δειγματοληψία και x_i είναι η τιμή (τάσης στη συγκεκριμένη περίπτωση), κατά την i -οστή μέτρηση.

Η δεύτερη τιμή, δηλαδή ο αριθμός των παλμών, έχει μεγάλη σημασία, καθώς υποδηλώνει το πλήθος των πραγματικών αλμάτων Barkhausen. Συχνά, ο θόρυβος του περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει τις τιμές που καταγράφει ο αισθητήρας Barkhausen. Θέτοντας, όμως, ένα όριο τάσης, μπορούμε να διαχωρίσουμε αυτόν τον περιβαλλοντικό θόρυβο από τις τιμές τάσης που οφείλονται πράγματι στο φαινόμενο Barkhausen.

Τέλος, μετρώντας τη μαγνητική διαπερατότητα, γίνεται έλεγχος της επαρκούς επαφής του εξεταζόμενου δείγματος με την αισθητήρια διάταξη, καθώς και χαρακτηρισμός των μαγνητικών του ιδιοτήτων.

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει μια «τυποποίηση» του μαγνητικού θορύβου του υλικού, ώστε αυτός να αποτελεί την ταυτότητά του. Το σύνολο των χαρακτηριστικών μεγεθών του μαγνητικού θορύβου Barkhausen που χαρακτηρίζουν ένα υλικό ως προς ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται «μαγνητικός φάκελος Barkhausen» (**M**agnetic **B**arkhausen **E**nvelope – MBE). Καταγράφοντας και στη συνέχεια συγκρίνοντας κάποια χαρακτηριστικά του σήματος μιας μέτρησης, όπως είναι η θέση των κορυφών και το πλάτος, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για τα μαγνητικά χαρακτηριστικά ενός υλικού. Μάλιστα, εάν αυτό το σήμα συγκριθεί με σήμα που προέρχεται από παλαιότερη καταγραφή ή από κάποια βάση δεδομένων, γίνεται δυνατή και η ανίχνευση των ατελειών ενός υλικού. Για την καταγραφή και παρουσίαση του σήματος που αποτελεί το μαγνητικό φάκελο ενός δείγματος χρησιμοποιούνται δύο τρόποι απεικόνισης: Το διάγραμμα της τάσης συναρτήσει του χρόνου και το διάγραμμα του πλάτους συναρτήσει της συχνότητας.



Εικόνα 5.6: Απεικόνιση του μαγνητικού φακέλου Barkhausen του ίδιου υλικού με 2 τρόπους [63]

(α): Συνάρτηση Πλάτους – Χρόνου,

(β): Συνάρτηση Πλάτους – Συχνότητας

5.5 Χαρακτηρισμός υλικών με τη μέθοδο Barkhausen

Με την εφαρμογή των μεθόδων που βασίζονται στο φαινόμενο Barkhausen είναι δυνατή η αναγνώριση, ο χαρακτηρισμός και η μελέτη των μαγνητικών υλικών. Μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις διαφόρων ειδών, ώστε να υπολογιστούν

χαρακτηριστικά μεγέθη και ιδιότητες αυτών των υλικών. Η μελέτη μπορεί να περιλαμβάνει το μικροδομικό χαρακτηρισμό τους και συγκεκριμένα τον υπολογισμό του μέσου μεγέθους των κόκκων, τον προσδιορισμό των φάσεων και των μικροδομικών συστατικών των υλικών, καθώς και την ανίχνευση πιθανών ατελειών στην επιφάνειά τους.

Η αύξηση του μέσου μεγέθους των κόκκων δημιουργεί αύξηση του πλήθους των αλμάτων Barkhausen, τα οποία όμως έχουν μικρότερο πλάτος. Αυτό οφείλεται στην αντίστοιχη αύξηση των μαγνητικών περιοχών και των τοιχωμάτων τους. Η αύξηση αυτή οδηγεί και στην αύξηση των πιθανοτήτων σκέδασης των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του υλικού και συνεπώς, στη δημιουργία περισσότερων αλμάτων Barkhausen. Το δεύτερο χαρακτηριστικό που είναι δυνατόν να μελετηθεί μέσω του φαινομένου Barkhausen είναι η ύπαρξη φερρίτη, περλίτη και μαρτενσίτη σε ένα υλικό [64], [65]. Οι τιμές και η θέση των κορυφών, καθώς και η ενεργός τιμή της τάσης, είναι δυνατόν να συσχετιστούν με τις φάσεις για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, η σύσταση του δείγματος και συγκεκριμένα η περιεκτικότητά του σε άνθρακα δημιουργεί αύξηση στον αριθμό των αλμάτων Barkhausen, αφού αυτή συνδέεται με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων. Όμως, δεν υπάρχει ο ίδιος βαθμός βεβαιότητας των συμπερασμάτων σε σχέση με τα προηγούμενα χαρακτηριστικά μικροδομής, καθώς μερικές πειραματικές μετρήσεις που έχουν διεξαχθεί οδήγησαν σε ποικίλα και ασαφή αποτελέσματα για το εάν υπάρχει άμεση σύνδεση του θορύβου Barkhausen με την περιεκτικότητα σε άνθρακα [66].

Εκτός από τα μικροδομικά χαρακτηριστικά, ο θόρυβος Barkhausen παρέχει έναν τρόπο μελέτης της σκληρότητας ενός μαγνητικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της σκληρότητας του υλικού εμφανίζεται ως μείωση της ενεργού τιμής της τάσης, αλλά και των κορυφών του σήματος του θορύβου Barkhausen. Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί πως αυτά τα μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους [67].

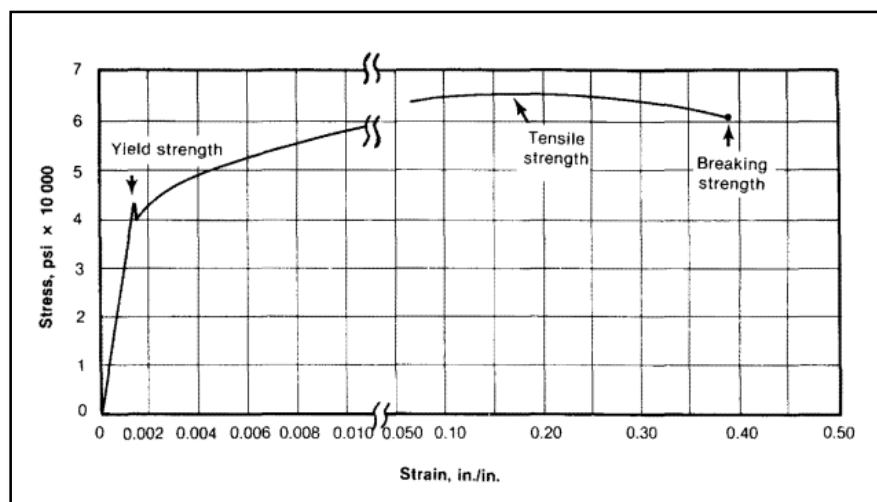
Τέλος, οι μετρήσεις με μία διάταξη Barkhausen μπορούν να διεξαχθούν ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζονται επιθυμητές τάσεις στο εξεταζόμενο υλικό. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο έλεγχος αντοχής των υλικών υπό πραγματικές συνθήκες καταπόνησης, αλλά και η εύρεση των παραμενουσών τάσεων που εντοπίζονται στο υλικό, όταν πλέον δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις σε αυτό. Εκτός από την περίπτωση της εξωτερικής επιβολής δυνάμεων, η ύπαρξη των παραμενουσών τάσεων μπορεί οφείλεται και στον τρόπο παρασκευής του υλικού. Οι παραμορφώσεις και η θερμική κατεργασία που τυχόν υφίσταται δημιουργούν επίσης παραμένουσες τάσεις, οι οποίες πιθανώς να οδηγήσουν σε μελλοντική αστοχία του υλικού.

Το σήμα του θορύβου Barkhausen, τόσο ως πλάτος της τάσης εξόδου, αλλά και ως ενεργός τιμή της τάσης, συνδέεται γραμμικά με την παραμόρφωση του υλικού [68]. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι σε ένα θετικά μαγνητοσυστολικό υλικό, όπως ο σίδηρος, ο εφελκυσμός αυξάνει το σήμα του θορύβου Barkhausen, ενώ η θλιπτική καταπόνηση το μειώνει [69], [70]. Όμως, το σήμα του θορύβου Barkhausen αρχίζει να μειώνεται και στην περίπτωση του εφελκυσμού, αν υπάρξει υπέρβαση κάποιας κρίσιμης τιμής. Για την καλύτερη κατανόηση της μεταβολής του σήματος και για την καταγραφή μετρήσεων σε υλικά με αυξημένη ανισοτροπία, οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται για διαφορετικές τιμές γωνιών και ασκούμενων τάσεων, ενώ πραγματοποιείται και βαθμονόμηση της διάταξης, ανάλογα με τον τύπο του εξεταζόμενου υλικού.

5.6 Εφαρμογές της μεθόδου Barkhausen

5.6.1 Ανίχνευση παραμορφώσεων

Οι δυνάμεις που μπορεί να ασκηθούν σε ένα υλικό δημιουργούν παραμένουσες τάσεις. Έτσι, είναι πιθανή η μεταβολή των διαστάσεών του, ως προς το μήκος και το πλάτος του, ανάλογα με τον τρόπο και την κατεύθυνση της άσκησης των δυνάμεων. Αναλόγως του υλικού, οι δυνάμεις που ασκούνται μπορεί να προκαλέσουν προσωρινές ή μόνιμες παραμορφώσεις, αλλά και τη θραύση του. Η αντοχή ενός υλικού κατά την άσκηση τάσεων σε αυτό δίδεται από τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης.

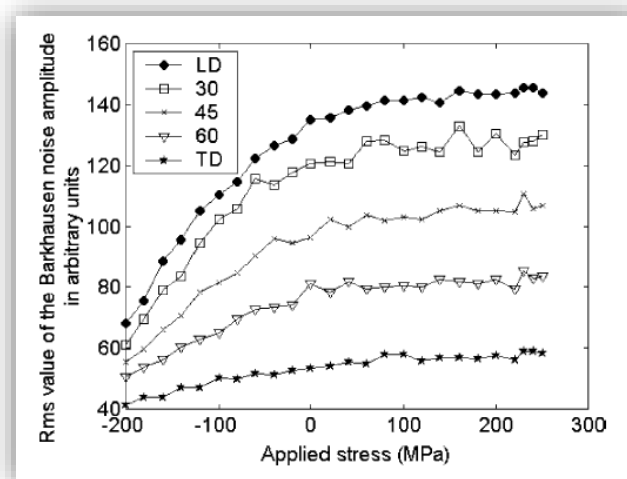


Εικόνα 5.7: Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του σιδήρου

Σε μια τέτοια καμπύλη διαμορφώνονται δύο περιοχές: η ελαστική και η πλαστική. Εάν η παραμόρφωση που δημιουργείται σε ένα υλικό παραμείνει στην ελαστική περιοχή, τότε αυτό θα επανέλθει στην αρχική του μορφή μετά το τέλος της άσκησης

της εξωτερικής τάσης. Αντίθετα, εάν ασκηθούν ισχυρότερες τάσεις με αποτέλεσμα το υλικό να μεταβεί στην πλαστική περιοχή της καμπύλης, η παραμόρφωσή του θα παραμείνει ως μόνιμη. Όταν το υλικό μεταβαίνει από την ελαστική κατάσταση στην πλαστική, δημιουργείται ο λεγόμενος λαιμός (neck), παρατηρείται, δηλαδή, μη αντιστρεπτή στένωση του υλικού, λόγω της δύναμης που δέχεται. Το μέτρο της τάσης που είναι ικανό να προκαλέσει τη θραύση του υλικού, προκύπτει από το σημείο στο οποίο σταματά η καμπύλη.

Μέσω του φαινομένου Barkhausen και της μελέτης του σήματος που προκύπτει από την εξέταση ενός υλικού, είναι δυνατός ο καθορισμός του βαθμού παραμόρφωσης ενός υλικού, τόσο στην ελαστική, όσο και στην πλαστική περιοχή. Όπως προκύπτει από τις μετρήσεις, το σήμα του θορύβου Barkhausen αυξάνεται κατά την εφαρμογή εφελκυστικής παραμόρφωσης, ενώ μειώνεται όταν οι δυνάμεις που ασκούνται είναι θλιπτικές [71], [72], εφόσον το υπό εξέταση υλικό είναι θετικά μαγνητοσυστολικό. Αυτό οφείλεται στην αναδιάταξη των μαγνητικών περιοχών του υλικού και στην αλλαγή του μεγέθους και του προσανατολισμού τους, κάτι που οφείλεται στην αλλαγή του σχήματος του υλικού.

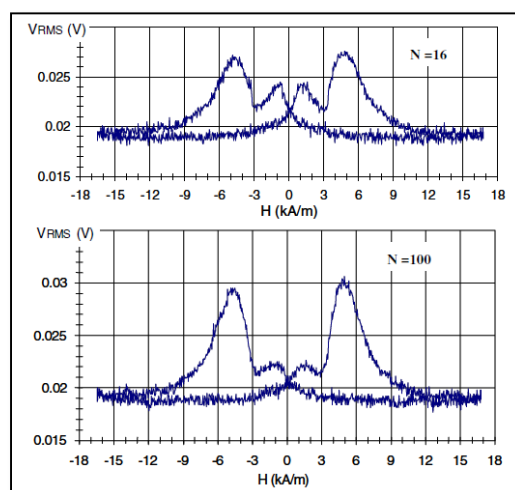


Εικόνα 5.8: Το σήμα του θορύβου Barkhausen συναρτήσει της τάσης για διάφορες γωνίες [72]

5.6.2 Παρακολούθηση κόπωσης υλικών

Η κόπωση των υλικών είναι μια σημαντική αιτία αστοχίας. Ο λόγος εμφάνισης της κόπωσης είναι η επαναλαμβανόμενη άσκηση τάσεων σε ένα υλικό, με αποτέλεσμα την κυκλική φόρτισή του. Η μελέτη της κόπωσης χωρίζεται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο μεταβάλλεται η μικροδομή του υλικού. Στο δεύτερο στάδιο δημιουργούνται ρηγματώσεις και τελικά, στο τρίτο στάδιο, επέρχεται η θραύση του υλικού. Η κόπωση ενός υλικού εξαρτάται τόσο από τη δομή και τα χαρακτηριστικά του ίδιου του υλικού, όσο και από το ρυθμό, τη μορφή και το μέτρο των φορτίων που ασκούνται σε αυτό.

Μέσω του θορύβου Barkhausen είναι δυνατός ο προσδιορισμός του σταδίου κόπωσης στο οποίο έχει επέλθει ένα υλικό. Πιο συγκεκριμένα, εάν ένα υλικό βρίσκεται στο πρώτο στάδιο κόπωσης, παρατηρείται αύξηση του σήματος Barkhausen. Κατά το δεύτερο στάδιο το σήμα αυτό μειώνεται, ενώ τελικά αυξάνεται και πάλι στο τρίτο στάδιο [73], [74]. Λόγω της πολυπλοκότητας των αιτιών της κόπωσης, αλλά και της ανισοτροπίας των υλικών, η παραπάνω εξάρτηση του σήματος Barkhausen από την κόπωση δεν είναι πάντοτε η ίδια, αλλά διαφέρει αναλόγως του υλικού, καθώς και του τρόπου και της κατεύθυνσης των μετρήσεων.

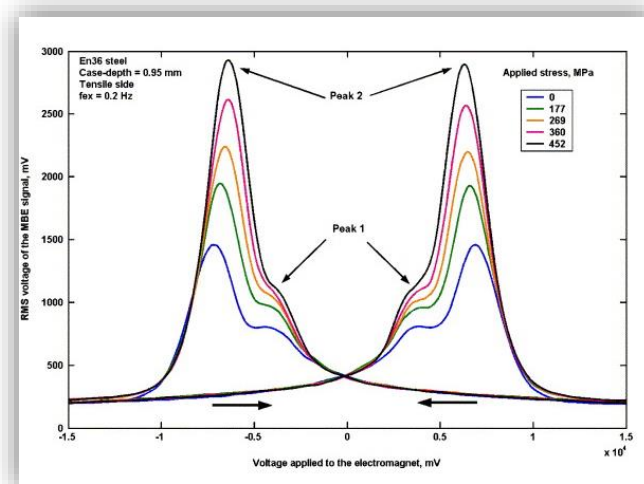


Εικόνα 5.9: Σήμα του θορύβου Barkhausen μετά από 16 και 100 κύκλους φόρτωσης [74]

5.6.3 Έλεγχος του εσωτερικού των υλικών

Εκτός από τον επιφανειακό έλεγχο ενός υλικού, ο οποίος είναι ευκολότερος σε πολλές περιπτώσεις, συχνά απαιτείται η αξιολόγηση του εσωτερικού του υλικού. Με τις τεχνικές κατεργασίας των μετάλλων, όπως είναι η επαγωγική σκλήρυνση και η ενανθράκωση, τροποποιούνται οι μηχανικές και χημικές ιδιότητες των υλικών, τόσο στην επιφάνειά τους, όσο και σε ορισμένο βάθος από αυτήν.

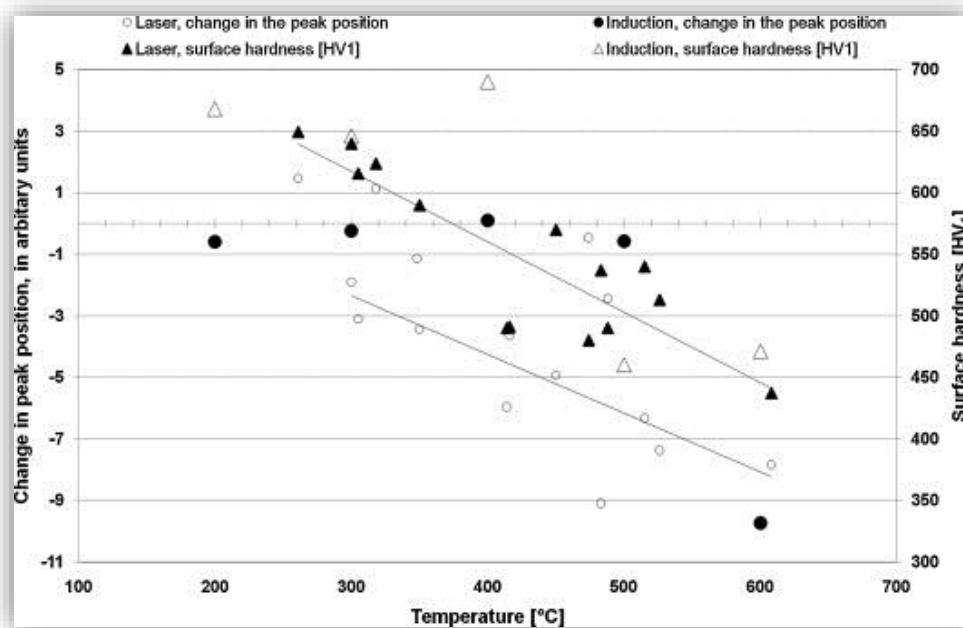
Μέσω του σήματος Barkhausen είναι δυνατή η εύρεση και ο υπολογισμός αυτού του βάθους. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι το πλάτος του σήματος, αλλά και η ενεργός τιμή του, μειώνονται με την αύξηση του βάθους [75]. Για την εύρεση του βάθους για το οποίο έχει επιτευχθεί η σκλήρυνση του υλικού, χρησιμοποιούνται δύο κορυφές του σήματος Barkhausen, με την πρώτη να αντιστοιχεί στο εσωτερικό που δεν έχει επηρεαστεί και τη δεύτερη στο επιφανειακό τμήμα που έχει υποστεί τη σκλήρυνση [76], [77], [78]. Για τις παραπάνω μετρήσεις χρησιμοποιούνται χαμηλές συχνότητες διέγερσης, ώστε να αυξάνεται το βάθος διείσδυσης.



Εικόνα 5.10: Εύρεση του βάθους βάσει των κορυφών του σήματος Barkhausen [76]

5.6.4 Εντοπισμός φθορών λείανσης

Η λείανση ενός μετάλλου αφαιρεί μέρος του υλικού και αυξάνει τη θερμοκρασία της επιφάνειάς του. Έτσι, μπορεί να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του, αλλά και να προκαλέσει φθορές σε αυτό. Το πλάτος του σήματος Barkhausen μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό τέτοιων φθορών σε ένα υλικό. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εφαρμογή, σε αυτή την περίπτωση προτιμάται η χρήση υψηλών συχνοτήτων διέγερσης, αφού αυτές προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα στην ανίχνευση των φθορών. Για τη δοκιμή της ικανότητας των αισθητήρων, συχνά χρησιμοποιούνται lasers, με σκοπό την πρόκληση τεχνητών φθορών στα δείγματα και συνεπώς την καλύτερη βαθμονόμηση των διατάξεων [79], [80].



Εικόνα 5.11: Θέση των κορυφών του σήματος Barkhausen και της σκληρότητας του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας του [80]

6 Ανάπτυξη μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen

6.1 Σχεδιασμός μαγνητικού αισθητήρα Barkhausen

6.1.1 Συνολική διάταξη αισθητήρα

Ο αισθητήρας που αναπτύχθηκε αποτελεί μια διάταξη εργαστηρίου, συνοδευόμενη από τον απαραίτητο εργαστηριακό εξοπλισμό, με σκοπό τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων.

Στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια συχνοτήτων, η οποία είναι υπεύθυνη για την κατάλληλη διαμόρφωση και παροχή του σήματος διέγερσης. Το σήμα που δημιουργείται, οδηγείται στο πηνίο διέγερσης που έχει περιελιχθεί στη μεγάλη πλευρά ενός ηλεκτρομαγνήτη. Εξαιτίας και της υψηλής τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του ηλεκτρομαγνήτη, η εφαρμογή εναλλασσόμενου σήματος στο πηνίο διέγερσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μαγνητικής ροής. Τα στελέχη του ηλεκτρομαγνήτη τοποθετούνται στην επιφάνεια του εκάστοτε εξεταζόμενου δείγματος, το οποίο διαρρέεται από την ίδια μαγνητική ροή.

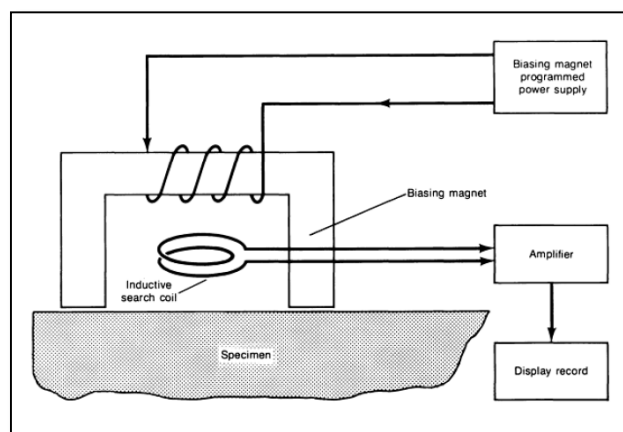
Στη συνέχεια, η μεταβολή της μαγνητικής ροής λαμβάνεται από ένα πηνίο λήψης και οδηγείται σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, έχοντας μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρικό σήμα. Στο ηλεκτρικό κύκλωμα, το σήμα ενισχύεται και αποκόπτονται από αυτό οι ανεπιθύμητες συχνότητες που εκφράζουν τον περιβαλλοντικό θόρυβο.

Τελικά, το σήμα αυτό οδηγείται σε έναν παλμογράφο, όπου απεικονίζεται και αποθηκεύεται για περαιτέρω επεξεργασία.

6.1.2 Επιλογή τύπου διάταξης

Για τη λήψη του σήματος Barkhausen επιλέχθηκε η διάταξη αισθητήρα μονού ηλεκτρομαγνήτη, όπως αυτή έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο τύπος αυτής της διάταξης, όπως προτείνεται από την American Society for Materials (ASM) [81], περιλαμβάνει ένα πηνίο διέγερσης που έχει τυλιχθεί σε έναν ηλεκτρομαγνήτη σχήματος «Π» και ένα πηνίο λήψης.

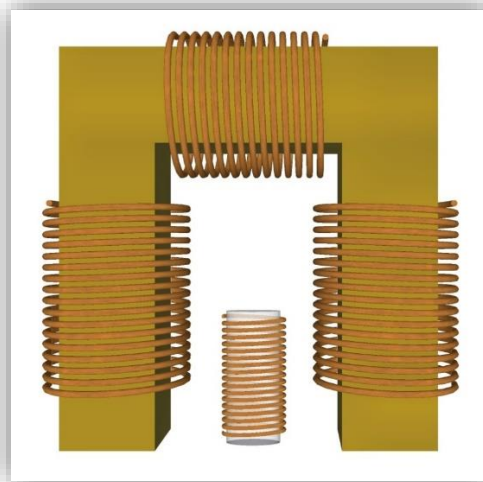
Το πηνίο διέγερσης τοποθετήθηκε στην οριζόντια πλευρά του ηλεκτρομαγνήτη, ενώ το πηνίο λήψης μεταξύ των δύο παράλληλων πλευρών του ηλεκτρομαγνήτη. Σε αντίθεση με τις διατάξεις στις οποίες το εξεταζόμενο υλικό αποτελεί τον πυρήνα του πηνίου λήψης, η τοποθέτησή του με αυτόν τον τρόπο καθιστά ευκολότερη τη μέτρηση σε μεγαλύτερο εύρος επιφανειών διαφορετικής γεωμετρίας.



Εικόνα 6.1: Διάταξη αισθητήρα Barkhausen κατά την ASM [81]

Εκτός από το πηνίο διέγερσης και το πηνίο λήψης, τοποθετήθηκαν δύο, ακόμη, πηνία στις δύο παράλληλες πλευρές του ηλεκτρομαγνήτη, τα οποία μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για περεταίρω μελλοντικές μετρήσεις. Η περιέλιξη των δύο πηνίων έγινε σύμφωνα με τον «κανόνα του δεξιού χεριού», με τέτοιο τρόπο ώστε τα διανύσματα της μαγνητικής ροής που θα προκύψουν να είναι αντίρροπα ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Συνεπώς, η μαγνητική ροή διέρχεται από τον ηλεκτρομαγνήτη και καταλήγει στο εξεταζόμενο υλικό.



Εικόνα 6.2: Η διάταξη που επιλέχθηκε

6.2 Σήμα διέγερσης

Το σήμα διέγερσης που επελέγη είναι το τριγωνικό. Η μορφή αυτού του σήματος βοηθάει στη μελέτη του σήματος Barkhausen. Η απότομη αλλαγή από τη φάση αύξησης στη φάση μείωσης του σήματος και αντίστροφα, αλλά και ο σταθερός λόγος της μεταβολής του ρεύματος ως προς το χρόνο οδηγεί στην εμφάνιση των αλμάτων Barkhausen και στη δημιουργία ενός σταθερά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Το πλάτος του σήματος διέγερσης της γεννήτριας μπορεί να κυμαίνεται από μερικά mV έως και αρκετά V, ανάλογα με τα υλικά, την απόδοση των πηνίων και την ενίσχυση του σήματος που θα ακολουθήσει μέσω ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

6.3 Εύρος συχνοτήτων

Για την απεικόνιση του πραγματικού σήματος Barkhausen είναι απαραίτητη η εξάλειψη του θορύβου που προκύπτει κατά την καταγραφή του σήματος και οφείλεται σε εξωτερικές παρεμβολές από το περιβάλλον, στο θόρυβο των ηλεκτρονικών μερών, αλλά και στις αρμονικές συχνότητες του παρεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος.

Η αποκοπή των συχνοτήτων είναι δυνατή μέσω της χρήσης κατάλληλων φίλτρων. Το εύρος συχνοτήτων που επελέγη είναι 100 Hz – 100 kHz. Ένα τέτοιο εύρος θεωρείται σύνηθες σε διατάξεις αισθητήρων Barkhausen [82], [83], [84], καθώς αποκόπτει ικανοποιητικά τις ανεπιθύμητες συχνότητες. Κυρίως η συχνότητα των 100 kHz, χρησιμοποιείται ευρέως σε αισθητήρες Barkhausen [39], [40], [41], [42], [61], [85], [86], [87], καθώς δεν αποκόπτει πληροφορίες που θα ήταν χρήσιμες για τη μελέτη του εξεταζόμενου υλικού. Ομοίως, η συχνότητα των 100 Hz επελέγη έτσι ώστε να αποκόπτονται οι χαμηλότερες συχνότητες που θα επηρεάζονταν από το θόρυβο του δικτύου παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος, χωρίς όμως να αποκόπτονται και οι πληροφορίες που προκύπτουν από τις πλησιέστερες σε αυτές συχνότητες.

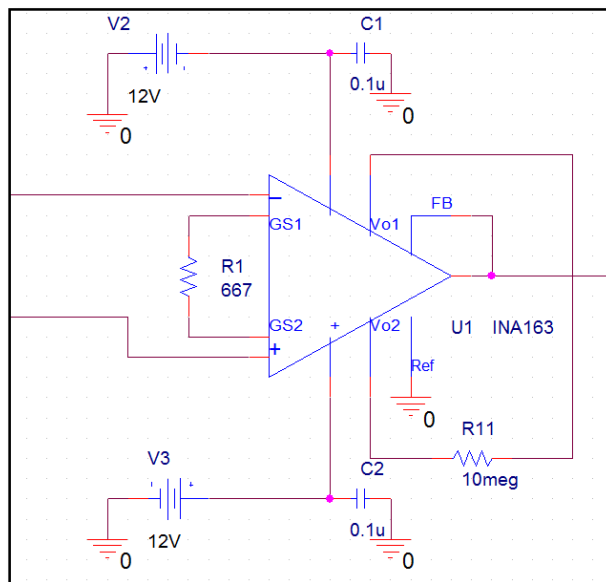
6.4 Σχεδιασμός ενίσχυσης και φίλτρων

Εκτός από το καθορισμό του εύρους συχνοτήτων, κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση του σήματος που προκύπτει από το πηνίο λήψης, λόγω του χαμηλού πλάτους του. Για αυτό το σκοπό, σχεδιάστηκε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που παρεμβάλλεται μεταξύ του πηνίου λήψης και του παλμογράφου.

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει έναν προενισχυτή, ένα ολοπερατό φίλτρο, ένα χαμηλοπερατό φίλτρο και ένα υψιπερατό φίλτρο.

6.4.1 Προενισχυτής

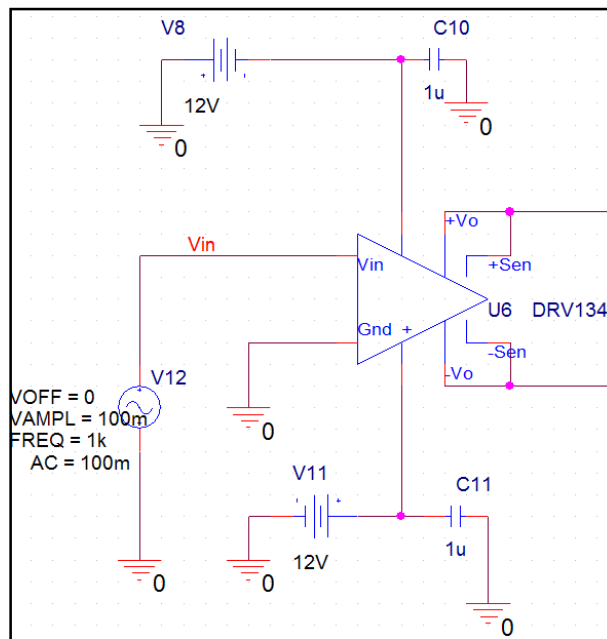
Σκοπός του προενισχυτή είναι η λήψη του αρχικού σήματος και η ενίσχυσή του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση κρίθηκε κατάλληλη η ενίσχυση του σήματος κατά 10 βαθμίδες από τον συγκεκριμένο ενισχυτή, ώστε να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα ο θόρυβος που δημιουργείται. Ο προσδιορισμός των βαθμίδων ενίσχυσης πραγματοποιείται μέσω της σύνδεσης μιας αντίστασης στις κατάλληλες υποδοχές του ενισχυτή. Το στάδιο της ενίσχυσης κρίνεται αναγκαίο, καθώς το πλάτος του σήματος του πηνίου λήψης είναι πολύ χαμηλό, πράγμα που δυσχεραίνει την περαιτέρω αξιοποίησή του.



Εικόνα 6.3: Κύκλωμα προενίσχυσης

6.4.2 Διαχωρισμός σήματος

Το σήμα που προέρχεται από τη γεννήτρια συχνοτήτων δεν είναι κατάλληλο για σήμα εισόδου του προενισχυτή, καθώς απαιτείται η ταυτόχρονη εισαγωγή θετικού και αρνητικού σήματος ίδιου πλάτους στις αντίστοιχες εισόδους του. Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ακόμη ενισχυτή, του οποίου σκοπός είναι ο διαχωρισμός του σήματος που δέχεται σε θετικό και αρνητικό και η κατανομή του στις αντίστοιχες εξόδους του.

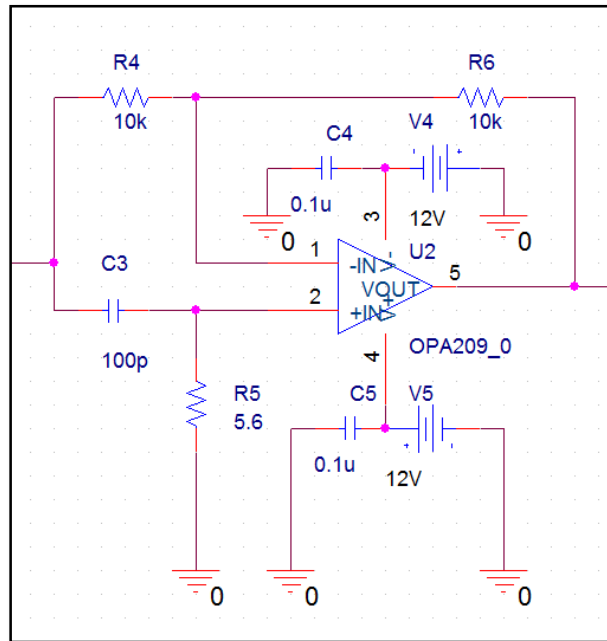


Εικόνα 6.4: Κύκλωμα διαχωρισμού σήματος

6.4.3 Ολοπερατό φίλτρο

Το ολοπερατό φίλτρο, σε αντίθεση με τα δύο επόμενα φίλτρα, δεν αποκόπτει τις συχνότητες. Παρ' όλα αυτά, λειτουργεί ως αντισταθμιστής φάσης. Συγκεκριμένα, μετατοπίζει τη φάση του εναλλασσόμενου σήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζει τις μεταβολές που προκύπτουν σε αυτήν από τη διαφοροποίηση της συχνότητας του σήματος.

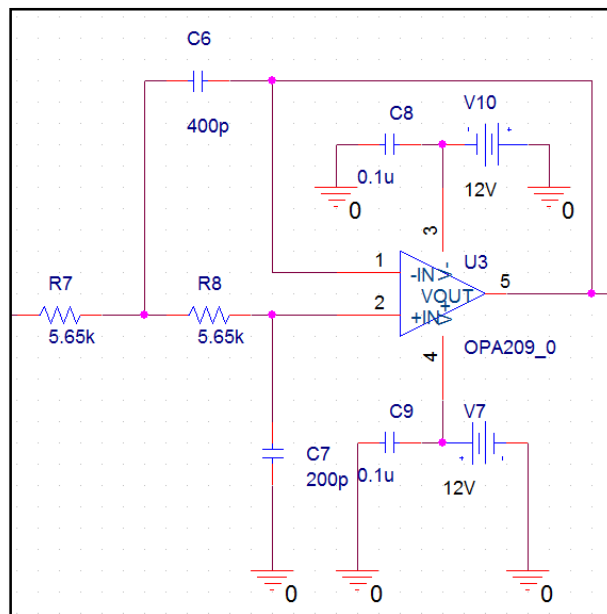
Για την υλοποίησή του χρησιμοποιήθηκε ένας τελεστικός ενισχυτής, με την κατάλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών και αντιστάσεων.



Εικόνα 6.5: Σχεδίαση ολοπερατού φίλτρου

6.4.4 Χαμηλοπερατό φίλτρο

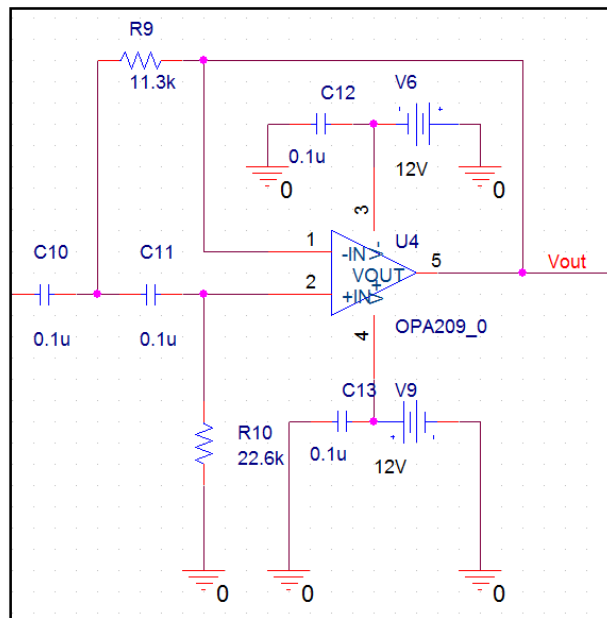
Το χαμηλοπερατό φίλτρο έχει ως σκοπό την αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων και συνεπώς τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων. Για τη σχεδίαση του χαμηλοπερατού φίλτρου ορίστηκε η συχνότητα αποκοπής των 100 kHz, βάσει της οποίας υπολογίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών του. Και σε αυτό το φίλτρο χρησιμοποιήθηκε ένας τελεστικός ενισχυτής. Επελέγη η κατασκευή φίλτρου Butterworth με τοπολογία Sallen-Key αντί του φίλτρου Chebyshev που έχει πιο γρήγορη απόκριση, επειδή η απόκριση του φίλτρου Butterworth δεν εμφανίζει διαταραχές (ripple effect).



Εικόνα 6.6: Σχεδίαση χαμηλοπερατού φίλτρου

6.4.5 Υψιπερατό φίλτρο

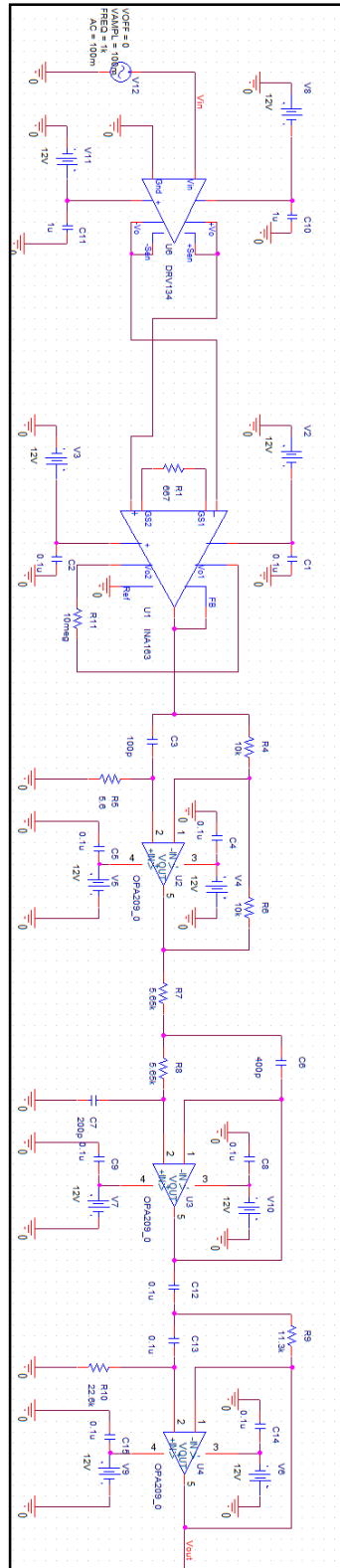
Το υψιπερατό φίλτρο σχεδιάστηκε με σκοπό την αποκοπή των συχνοτήτων που είναι μικρότερες των 100 Hz. Σύμφωνα με αυτή τη συχνότητα αποκοπής υπολογίστηκαν οι τιμές των αντιστάσεων και των πυκνωτών του, ενώ προστέθηκε ο ίδιος τελεστικός ενισχυτής. Για τη σχεδιάσή του, όπως και στην περίπτωση του χαμηλοπερατού φίλτρου, επελέγη το φίλτρο Butterworth με τοπολογία Sallen-Key.



Εικόνα 6.7: Σχεδίαση υψιπερατού φίλτρου

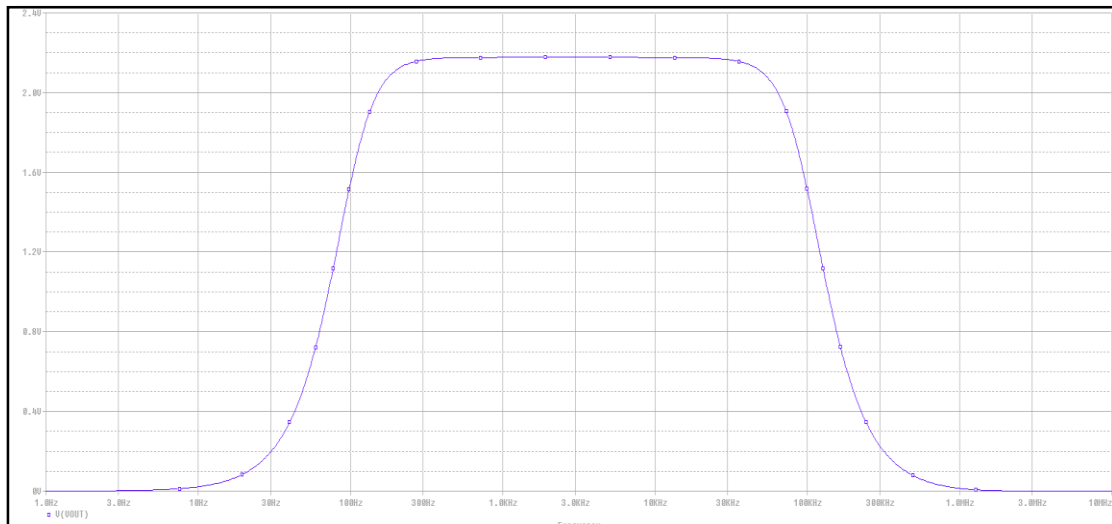
6.4.6 Συνολικό κύκλωμα – Προσομοίωση

Η συνολική εικόνα του κυκλώματος, όπως αυτό σχεδιάστηκε στο λογισμικό OrCAD PSpice, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 6.8: Ηλεκτρικό κύκλωμα ενίσχυσης και φίλτρων

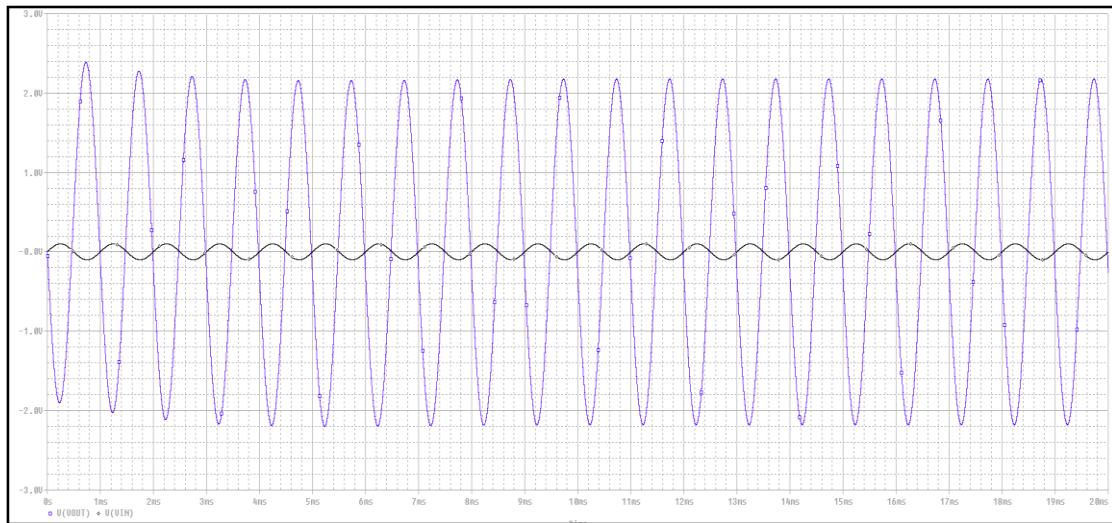
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις διαφόρων μεγεθών μέσω της εφαρμογής OrCAD PSpice, ώστε να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του παραπάνω κυκλώματος. Αρχικά, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του πλάτους του σήματος εξόδου του κυκλώματος συναρτήσει της συχνότητας.



Εικόνα 6.9: Πλάτος εξόδου συναρτήσει της συχνότητας

Διαπιστώνουμε ότι το πλάτος του σήματος έχει αυξηθεί κατά 20 περίπου φορές συνολικά, ενώ το εύρος συχνοτήτων για το οποίο συμβαίνει αυτό είναι από 100 Hz έως 100 kHz, όπως είναι επιθυμητό. Επίσης, λόγω των φίλτρων Butterworth, δεν εμφανίζονται ανεπιθύμητες διαταραχές στην καμπύλη.

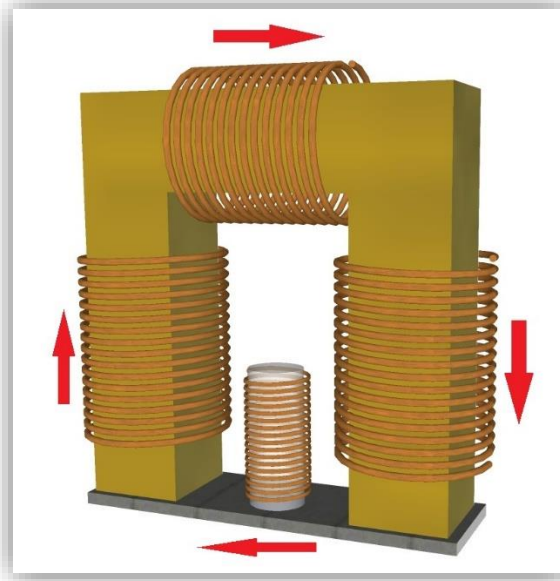
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προσομοίωση του σήματος της γεννήτριας και της τελικής εξόδου του κυκλώματος για ημιτονοειδή είσοδο, συναρτήσει του χρόνου. Και σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται η αύξηση του σήματος εξόδου σε σχέση με το σήμα της γεννήτριας, καθώς και η μεταβολή της φάσης του τελικού σήματος κατά 180° λόγω του ολοπερατού φίλτρου.



Εικόνα 6.10: Προσομοίωση σήματος εισόδου και σήματος εξόδου συναρτήσεως του χρόνου

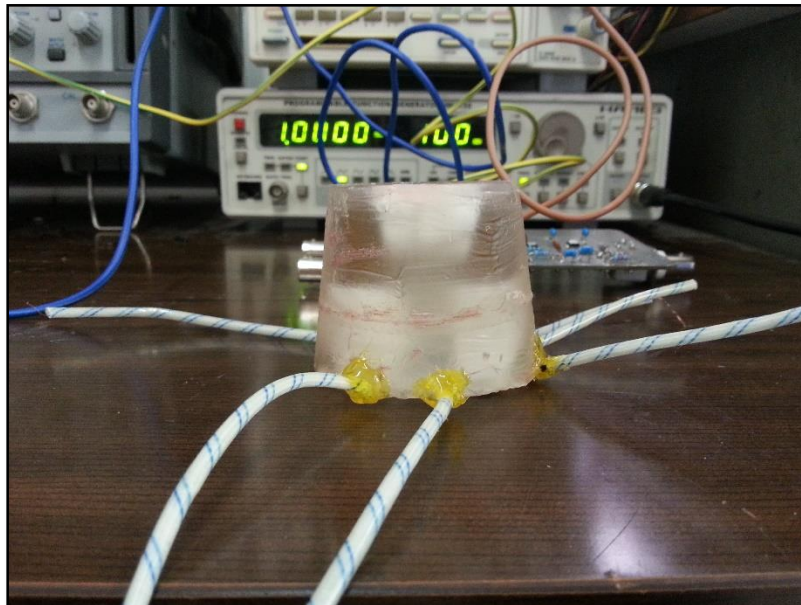
6.5 Κατασκευή αισθητήρα μονού ηλεκτρομαγνήτη

Για την κατασκευή του αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε πυρήνας ηλεκτρικού χάλυβα σχήματος «Π», στο σώμα του οποίου τυλίχθηκαν τρία πηνία. Τα δύο όμοια πηνία σύρματος $\varnothing 0.2$ mm τοποθετήθηκαν στις δύο παράλληλες πλευρές του ηλεκτρομαγνήτη, αποτελούμενα από 250 περιελίξεις το καθένα. Όπως αναφέρθηκε, ο τρόπος περιέλιξης ήταν τέτοιος ώστε η μαγνητική ροή να διαρρέει τον πυρήνα και να καταλήγει στο εξεταζόμενο δείγμα. Στην οριζόντια πλευρά του ηλεκτρομαγνήτη τοποθετήθηκε το πηνίο διέγερσης, αποτελούμενο από σύρμα διαμέτρου $\varnothing 0.5$ mm και 160 περιελίξεων. Τέλος, για την κατασκευή του πηνίου λήψης χρησιμοποιήθηκε πολυμερικός πυρήνας γύρω από τον οποίο τυλίχθηκε σύρμα διαμέτρου $\varnothing 0.02$ mm και 450 περιελίξεων. Οι παραπάνω τιμές επελέγησαν ύστερα από βιβλιογραφική έρευνα.



Εικόνα 6.11: Τοποθέτηση του ηλεκτρομαγνήτη στο δείγμα. Τα βέλη υποδηλώνουν την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής

Τελικά, ολόκληρο το σύστημα εγκιβωτίστηκε σε ρητίνη, ώστε να αποτελεί μια συμπαγή κατασκευή, μονωμένη από εξωτερικούς θορύβους και φθορές.



Εικόνα 6.12: Η τελική μορφή του αισθητήρα

6.6 Ηλεκτρονικό κύκλωμα ενίσχυσης και φίλτρων

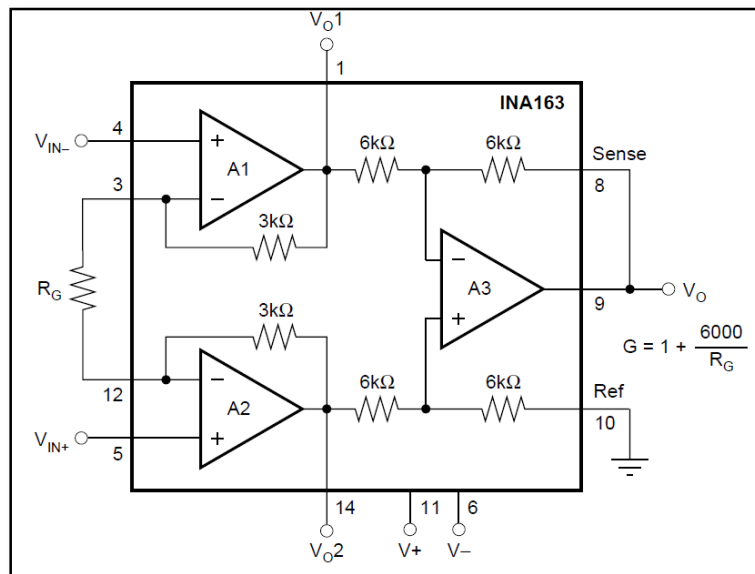
6.6.1 Γενικά

Η κατασκευή του ηλεκτρονικού κυκλώματος που περιλαμβάνει τα φίλτρα και την ενίσχυση του σήματος που προέρχεται από το πηνίο λήψης, απαιτεί την επιλογή των κατάλληλων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, τη σχεδίαση και εκτύπωση της ηλεκτρονικής πλακέτας και τέλος, την συναρμολόγηση και ολοκλήρωση του ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Η επιλογή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων έγινε με κύριο κριτήριο τα χαμηλά επίπεδα θορύβου. Επειδή το πλάτος του σήματος που προκύπτει στο πηνίο λήψης είναι αρκετά μικρό, είναι απαραίτητη η εξάλειψη όσο το δυνατόν περισσότερου θορύβου που προέρχεται από εξωτερικές πηγές, αλλά και από τα ίδια τα ηλεκτρονικά μέρη του κυκλώματος, ώστε αυτός να μην επηρεάζει τις μετρήσεις.

6.6.2 Επιλογή προενισχυτή

Στην περίπτωση του σταδίου της ενίσχυσης του σήματος, επελέγη ο ενισχυτής INA163 (Instrumentation Amplifier) της εταιρείας Texas Instruments. Σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του ενισχυτή είναι τα χαμηλά επίπεδα θορύβου και παραμόρφωσης ($1nV/\sqrt{Hz}$). Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοσίας του με ένα αρκετά μεγάλο εύρος τάσεων ($\pm 4.5V$ έως $\pm 18V$) [88].



Εικόνα 6.13: Εσωτερική δομή και απολήξεις του ενισχυτή INA163 [88]

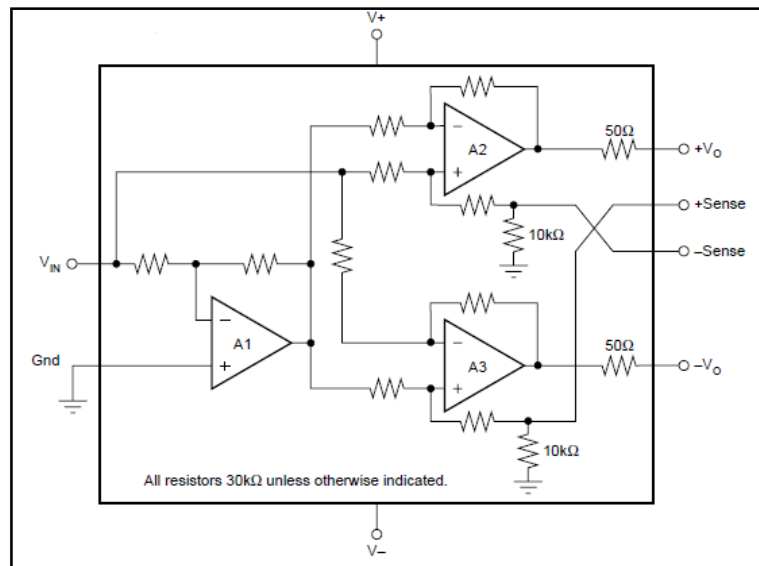
Η επιλογή του κέρδους ενίσχυσης του συγκεκριμένου ενισχυτή μεταβάλλεται από την τοποθέτηση κατάλληλης αντίστασης μεταξύ των υποδοχών 3 και 12. Η τιμή του κέρδους προκύπτει από τον τύπο:

$$G = 1 + \frac{6000}{R_G} \quad (6.1)$$

Η τιμή του κέρδους που επιλέχθηκε είναι $G = 10$, λόγω του θορύβου που είναι δυνατόν να προκληθεί για μεγαλύτερες τιμές κέρδους στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Η τιμή της R_G που προκύπτει από τον παραπάνω τύπο είναι περίπου 667 (666.6666...) Ω . Λόγω αδυναμίας εύρεσης της συγκεκριμένης τιμής αντίστασης στο εμπόριο, προτιμήθηκε η σύνδεση δύο παράλληλων αντιστάσεων 1 $k\Omega$ και 2 $k\Omega$, των οποίων η ολική αντίσταση που προκύπτει είναι επίσης 667 Ω .

Ο διαχωρισμός του σήματος εισόδου σε θετικό και αρνητικό ίσου πλάτους επετεύχθη με το διαφορικό ενισχυτή DRV134 της Texas Instruments. Ο συγκεκριμένος ενισχυτής χρησιμοποιείται κατ' εξοχήν για το διαχωρισμό και την

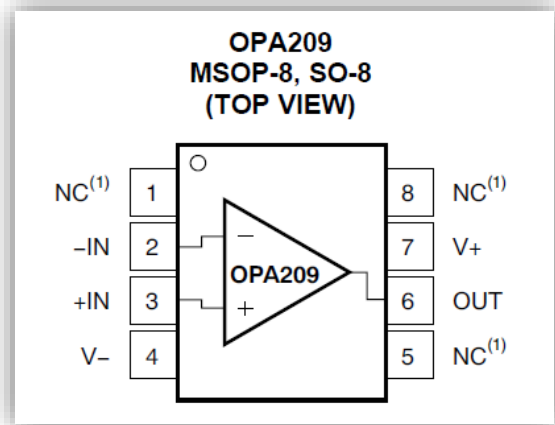
ισοκατανομή του σήματος εισόδου, παρέχοντας μία θετική και μία αρνητική έξοδο. Το εύρος συχνοτήτων του είναι 1.5 MHz και το εύρος τροφοδοσίας του $\pm 4.5 - \pm 18$ V [89].



Εικόνα 6.14: Διαμόρφωση του ενισχυτή DRV134 [89]

6.6.3 Επιλογή ενισχυτή φίλτρων

Για την ανάπτυξη του σταδίου των φίλτρων, επελέγη και σε αυτήν την περίπτωση ένας τελεστικός ενισχυτής με χαμηλά επίπεδα θορύβου, ο OPA209 της Texas Instruments. Χαρακτηριστικά αυτού του ενισχυτή είναι ο χαμηλός θόρυβος ($2.2nV / \sqrt{Hz}$) και το μεγάλο εύρος συχνοτήτων στο οποίο λειτουργεί (18 MHz) [90].

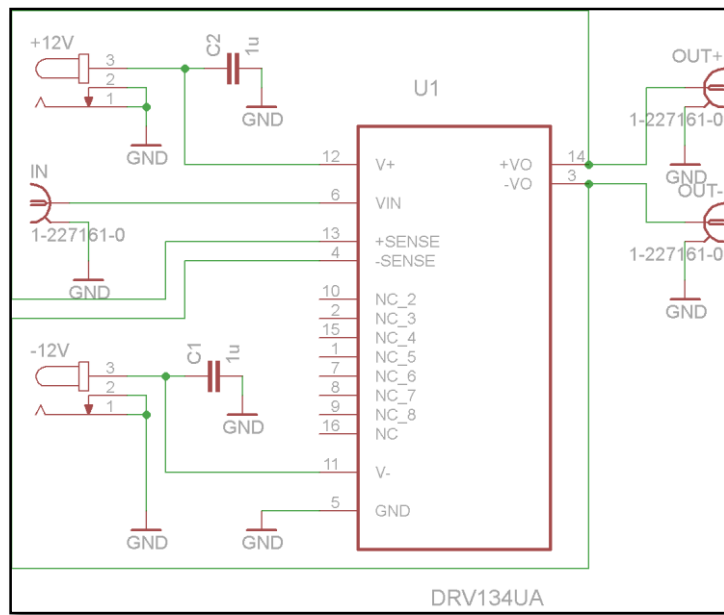


Εικόνα 6.15: Διαμόρφωση του εσωτερικού του OPA209 [90]

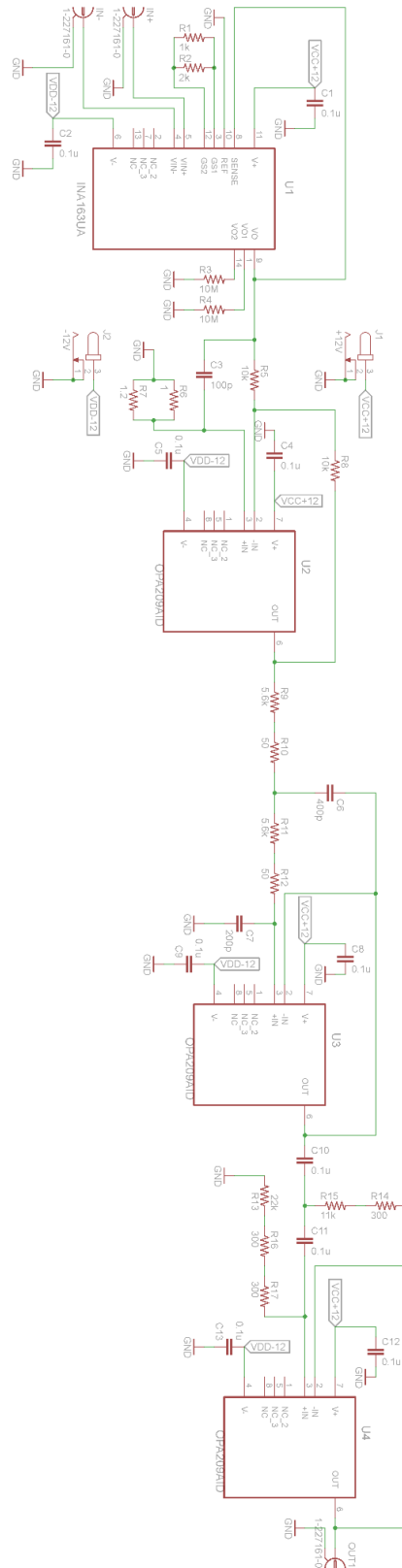
Για την κατασκευή του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος απαιτήθηκαν 3 τελεστικοί ενισχυτές OPA209. Καθένας από αυτούς χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του ολοπερατού, του χαμηλοπερατού και του υψιπερατού φίλτρου.

6.6.4 Σχεδίαση των ηλεκτρονικών πλακετών

Για τη σχεδίαση των ηλεκτρονικών πλακετών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EAGLE της εταιρείας CADSoft. Για την εισαγωγή των παραπάνω ενισχυτών σε αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα ακριβή μοντέλα που παρέχονται σε ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες, ώστε να είναι καθορισμένες οι εξωτερικές τους διαστάσεις και οι απολήξεις τους. Στη συνέχεια, εισήχθησαν οι τύποι των υποδοχέων, των αντιστάσεων και των πυκνωτών που επελέγησαν για να τοποθετηθούν στις πλακέτες. Κατασκευάστηκαν δύο ξεχωριστές πλακέτες. Στην πρώτη περιλαμβάνεται το ηλεκτρονικό κύκλωμα του διαχωρισμού του σήματος, ενώ στη δεύτερη ο προενισχυτής και τα φίλτρα.

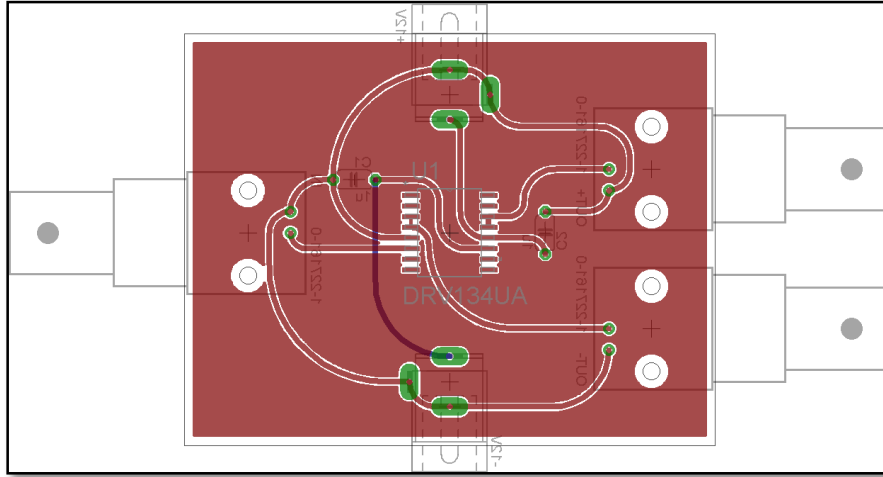


Εικόνα 6.16: Διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος διαχωρισμού σήματος

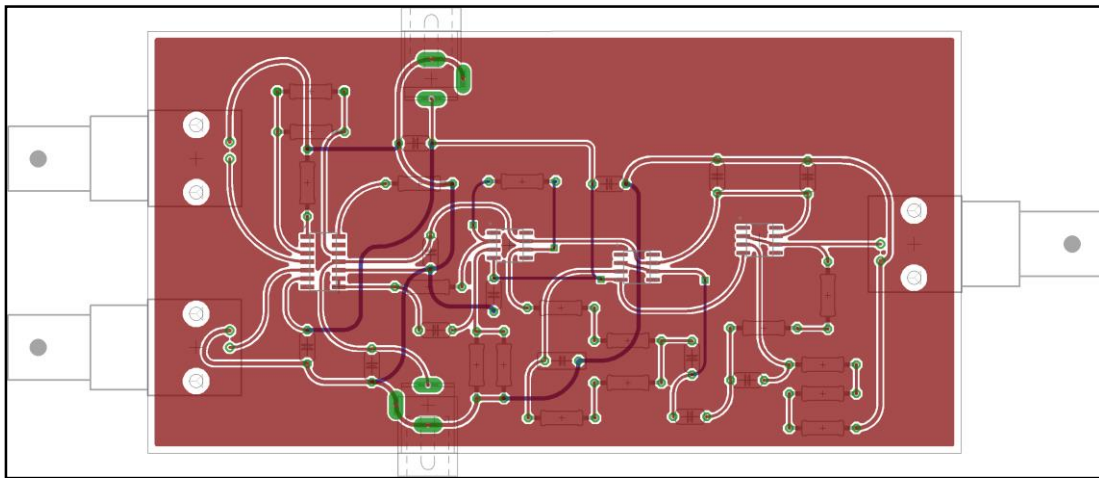


Εικόνα 6.17: Διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος προενισχυτή και φίλτρων

Τέλος, σχεδιάστηκε η τοποθέτηση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στις πλακέτες, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή σχέση απόδοσης και μεγέθους.



Εικόνα 6.18: Σχεδίαση πλακέτας διαχωρισμού σήματος



Εικόνα 6.19: Σχεδίαση πλακέτας προενίσχυσης και φίλτρων

6.6.5 Κατασκευή ηλεκτρονικών πλακετών

Για την κατασκευή της κάθε ηλεκτρονικής πλακέτας χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο παραπάνω σχεδιάγραμμα, το οποίο εκτυπώθηκε σε φύλλο διαφάνειας. Έπειτα, εντός ενός «σκοτεινού θαλάμου», τοποθετήθηκε στην επιφάνεια μιας φωτοευαίσθητης πλακέτας, η οποία στη συνέχεια εκτέθηκε σε υπεριώδη ακτινοβολία. Η έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων φωτοευαίσθητων περιοχών, δηλαδή των περιοχών που δεν καλύπτονται από το εκτυπωμένο σχέδιο.

Όταν ολοκληρώθηκε η διαδικασία της έκθεσης σε υπεριώδη ακτινοβολία, η διαφάνεια αφαιρέθηκε και η πλακέτα τοποθετήθηκε σε διάλυμα καυστικής σόδας, ώστε να αποκαλυφθεί το ηλεκτρονικό κύκλωμα.

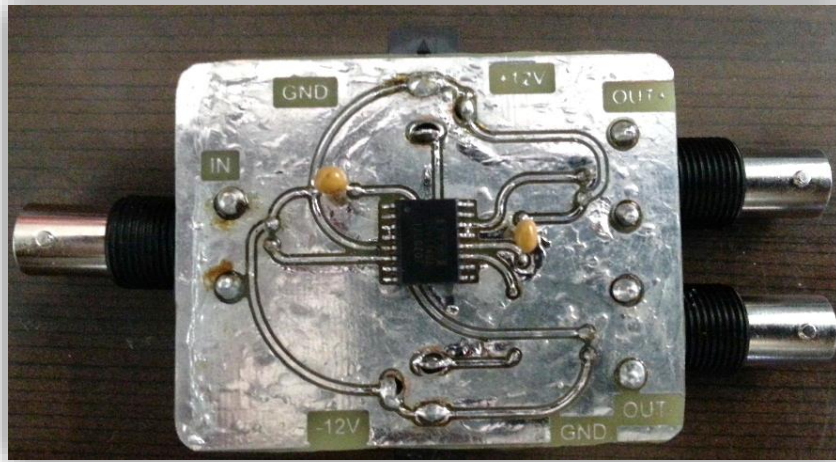
Το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση της κατασκευής της ηλεκτρονικής πλακέτας ήταν η αποχάλκωση. Αυτή πραγματοποιήθηκε με εμβάπτιση της πλακέτας σε διάλυμα χλωριδίου σιδήρου, ώστε να αφαιρεθεί το περιττό στρώμα του χαλκού.

Στη συνέχεια, ολόκληρη η επιφάνεια των πλακετών καλύφθηκε με τήγμα σύρματος συγκόλλησης ηλεκτρονικών (καλάι), με σκοπό την προστασία τους από την οξείδωση. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε ακριβής κοπή, λείανση και διάνοιξη των οπών, ώστε να τοποθετηθούν τα κατάλληλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα στην κάθε πλακέτα.

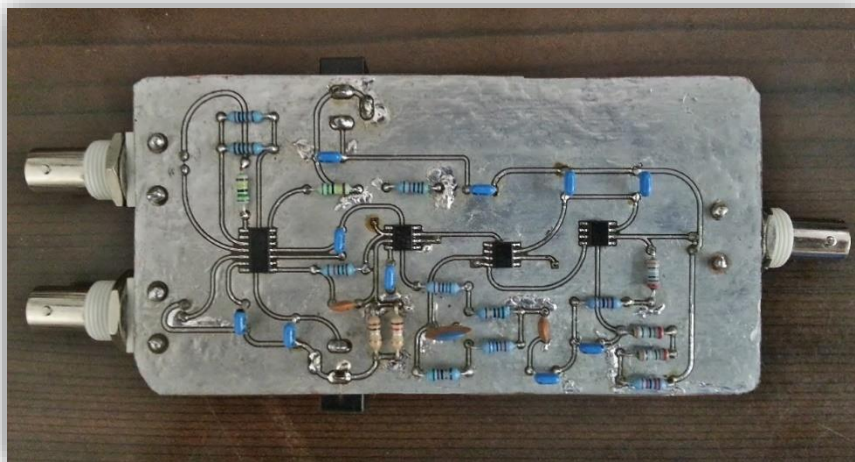
Οι πυκνωτές που επελέγησαν είναι μη ηλεκτρολυτικοί κεραμικοί πυκνωτές, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα πολικότητας. Οι αντιστάσεις είναι τύπου 0207/10, ο οποίος είναι ευρέως διαδεδομένος. Οι ενισχυτές έχουν τη μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (IC) και είναι τύπου SMD (surface-mount devices), οπότε συγκολλήθηκαν επάνω στην επιφάνεια των πλακετών. Τέλος, για τη σύνδεση της τροφοδοσίας των ενισχυτών των κυκλωμάτων, τοποθετήθηκαν οι υποδοχείς SPC4077 συνεχούς τροφοδοσίας διάστασης 2mm, ενώ για τις εισόδους και εξόδους των

σημάτων χρησιμοποιήθηκαν υποδοχείς τύπου BNC, με σκοπό την ιδανική σύνδεση με τις υπόλοιπες εργαστηριακές συσκευές.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των πλακετών πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος με χρήση στερεοσκοπίου, αλλά και έλεγχος με ψηφιακό πολύμετρο, για την ανίχνευση τυχόν βραχυκυκλωμάτων και την επαλήθευση της ικανοποιητικής σύνδεσης των διαφόρων εξαρτημάτων.



Εικόνα 6.20: Τελική μορφή ηλεκτρονικής πλακέτας διαχωρισμού του σήματος



Εικόνα 6.21: Τελική μορφή ηλεκτρονικής πλακέτας προενίσχυσης και φίλτρων

6.7 Σύνδεση των ηλεκτρονικών πλακετών

Αρχικά, οι ηλεκτρονικές πλακέτες συνδέθηκαν με ένα τροφοδοτικό (EZ Digital GP-1305TP), το οποίο παρείχε την απαραίτητη συνεχή τάση για τη λειτουργία των ενισχυτών των κυκλωμάτων. Στο συγκεκριμένο τροφοδοτικό συνδέθηκαν οι υποδοχές της θετικής και αρνητικής συνεχούς τροφοδοσίας των κυκλωμάτων, καθώς και η γείωση.



Εικόνα 6.22: Το τροφοδοτικό που χρησιμοποιήθηκε [91]

Για τη δημιουργία του σήματος εισόδου χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια σήματος (Hameg HM8130). Η συγκεκριμένη γεννήτρια σήματος παρέχει τη δυνατότητα επιλογής της μορφής του παραγόμενου σήματος, καθώς και του καθορισμού του πλάτους και της συχνότητάς του.



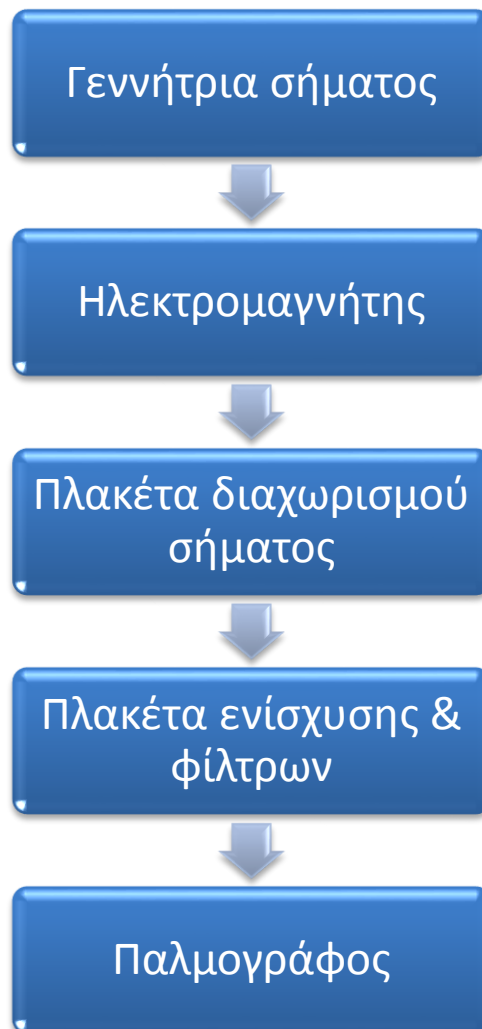
Εικόνα 6.23: Η γεννήτρια σήματος που χρησιμοποιήθηκε [92]

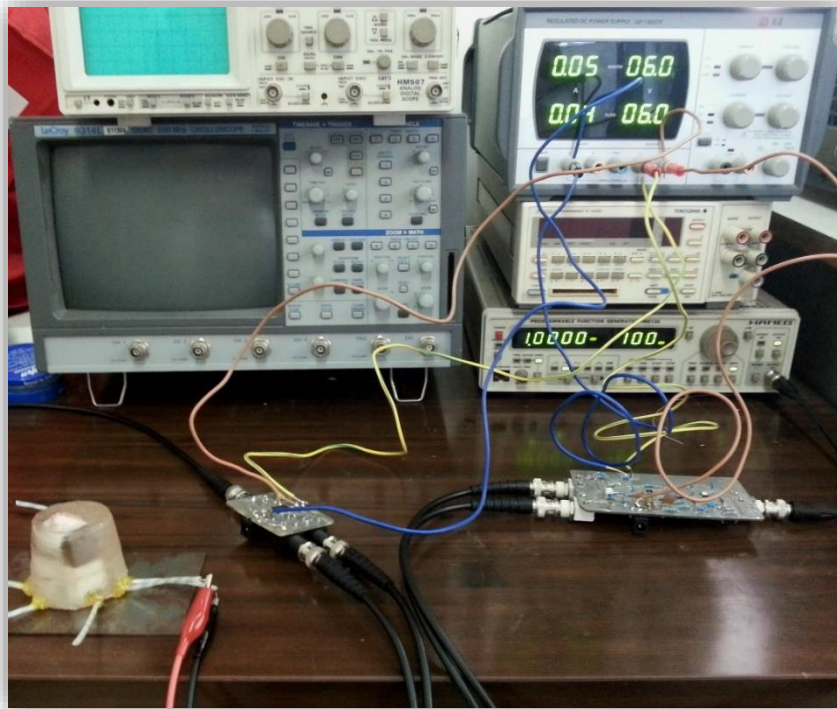
Για την απεικόνιση του τελικού σήματος χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος EZ Digital DS-1510, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής του σήματος σε εξωτερικά μέσα αποθήκευσης για περαιτέρω ανάλυση.



Εικόνα 6.24: Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε [93]

Η σύνδεση όλων των μερών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:

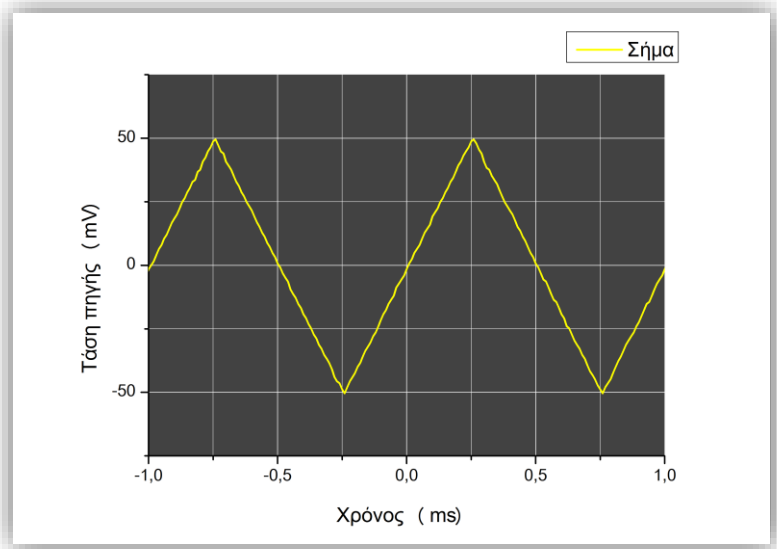




Εικόνα 6.25: Η συνολική εικόνα της διάταξης

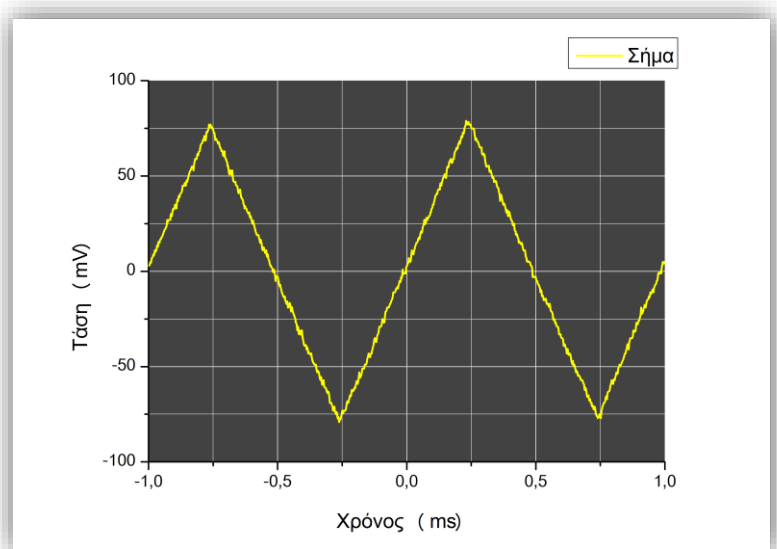
6.8 Διεξαγωγή των μετρήσεων

Προτού πραγματοποιηθούν μετρήσεις με χρήση του αισθητήρα που κατασκευάστηκε, ελέγχθηκαν οι ηλεκτρονικές πλακέτες και ο ηλεκτρομαγνήτης για να διαπιστωθεί η ορθή λειτουργία τους. Αρχικά, συνδέθηκε απευθείας η γεννήτρια σήματος με τον παλμογράφο, θέτοντας τριγωνικό σήμα συχνότητας 1 kHz και πλάτους 100 mV από κορυφή σε κορυφή.



Εικόνα 6.26: Παρουσίαση του σήματος της γεννήτριας

Στη συνέχεια, συνδέθηκε στη γεννήτρια σήματος η ηλεκτρονική πλακέτα διαχωρισμού του σήματος, της οποίας η μία έξοδος οδηγήθηκε στον παλμογράφο.

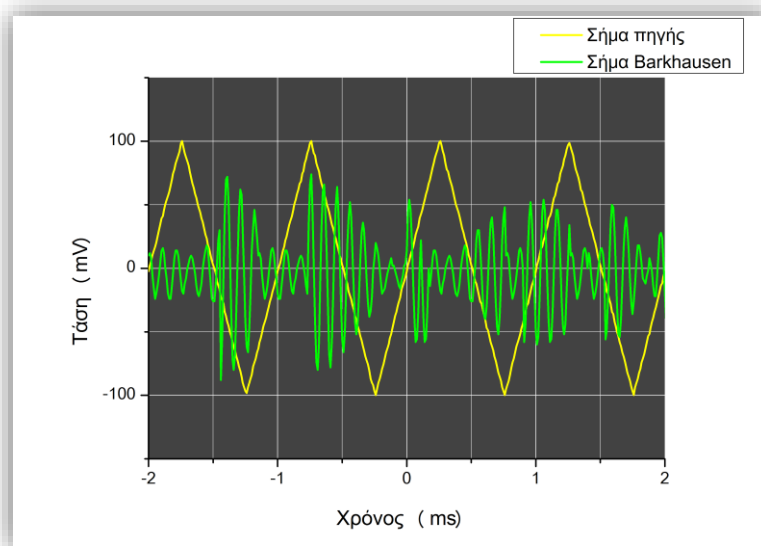


Εικόνα 6.27: Σήμα στην έξοδο της πλακέτας διαχωρισμού του σήματος

Παρατηρούμε ότι για το ίδιο σήμα διατηρείται η μορφή του τριγωνικού παλμού, όπως και η συχνότητα, ενώ το πλάτος έχει αυξηθεί περίπου κατά 60 mV, κάτι που

οφείλεται στα χαρακτηριστικά κέρδους του διαφορικού ενισχυτή του ηλεκτρονικού κυκλώματος.

Τελικά, με την προσθήκη του συνόλου της διάταξης και τη δοκιμή του αισθητήρα σε χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (low carbon steel) και συγκεκριμένα ποιότητας AISI 1008, προέκυψε το παρακάτω σήμα.



Εικόνα 6.28: Σήμα πηγής και θορύβου Barkhausen

Σε αυτό το σχήμα απεικονίζεται το σήμα της τροφοδοσίας στο πηνίο διέγερσης και το φιλτραρισμένο σήμα λήψης του αισθητήρα, όπως αυτό διαμορφώθηκε μετά την έξοδό του από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Το συγκεκριμένο σήμα έχει τη μορφή του σήματος θορύβου Barkhausen. Ο συνδυασμός του ισχυρού περιβαλλοντικού θορύβου και του χαμηλού πλάτους του σήματος έκανε αρκετά δύσκολη την παρατήρηση του εν λόγω σήματος. Άλλωστε, η συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα δεν παρέχει υψηλές τιμές μαγνητικού θορύβου. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με την περαιτέρω βελτίωση των φίλτρων και της ενίσχυσης του σήματος, μέσω των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

7 Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι είναι εφικτή η κατασκευή ενός αισθητήρα Barkhausen και των απαραίτητων ηλεκτρονικών μερών του με αρκετά χαμηλό κόστος. Βασικό μειονέκτημα αποτελούν τα υψηλά επίπεδα θορύβου που παρατηρούνται κατά τις μετρήσεις. Η εργασία με σήματα πλάτους μερικών mV δυσχεραίνει περισσότερο τη λήψη σαφών αποτελεσμάτων, καθώς σε μερικές περιπτώσεις ο περιβαλλοντικός θόρυβος μπορεί να είναι ισχυρότερος των σημάτων που λαμβάνονται. Σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση του θορύβου έχουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται. Επομένως, η ενίσχυση του σήματος κρίνεται απαραίτητη, καθώς και η χρήση φίλτρων για την αποκοπή του θορύβου.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρατηρείται ότι υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί πλάτους, συχνότητας και μορφής του σήματος διέγερσης, αλλά και εύρους συχνοτήτων προς αποκοπή. Συνεπώς, είναι επιθυμητή η περαιτέρω έρευνα και οι δοκιμές διαφορετικών συνδυασμών σήματος διέγερσης και φίλτρων, ώστε να μελετηθούν τα αποτελέσματά τους και οι βέλτιστες τιμές για κάθε εφαρμογή.

Για την εξάλειψη μεγαλύτερου μέρους του περιβαλλοντικού θορύβου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικότερα φίλτρα, αλλά και να επιχειρηθεί η περαιτέρω ενίσχυση του σήματος. Γενικά, η ενίσχυση του σήματος οδηγεί επίσης στην αύξηση του θορύβου που προκύπτει από τα ίδια τα ηλεκτρονικά. Η επιλογή των

ηλεκτρονικών μερών της συγκεκριμένης διάταξης έγινε με γνώμονα την προσθήκη του λιγότερου δυνατού θορύβου στο κύκλωμα. Ως μελλοντική εργασία θα ήταν επιθυμητή η προσθήκη ηλεκτρονικών υψηλότερου κόστους που θα επιτρέπουν σημαντικότερη ενίσχυση του σήματος, διατηρώντας το θόρυβο σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Επίσης, κρίνεται αναγκαία η βιομηχανοποιημένη κατασκευή των ηλεκτρονικών πλακετών, ώστε η απόδοση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων να είναι η καλύτερη δυνατή και να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα από ατέλειες κατά την κατασκευή της πλακέτας ή κατά τη συγκόλληση των ηλεκτρονικών σε αυτήν.

Η διάταξη που αναπτύχθηκε αποτελεί μια εργαστηριακή διάταξη. Παρόλο που ο αισθητήρας και οι ηλεκτρονικές πλακέτες είναι αρκετά μικρές σε μέγεθος, η λειτουργία τους απαιτεί τη χρήση εργαστηριακών συσκευών για τη δημιουργία του σήματος διέγερσης, την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και την απεικόνιση-καταγραφή του τελικού σήματος. Η ανάπτυξη νέων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για τη δημιουργία του σήματος διέγερσης και για την καταγραφή του, καθώς και η χρήση μπαταριών για την τροφοδοσία, μπορούν να βοηθήσουν στη δημιουργία μιας φορητής συσκευής. Η περεταίρω μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών πλακετών μπορεί να γίνει, επίσης, εφικτή μέσω της κατάλληλης αξιοποίησης του χώρου και χρήσης SMD ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμη η ψηφιοποίηση του τελικού σήματος, με σκοπό την άμεση επεξεργασία του μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, αλλά και την αυτοματοποίηση της διαδικασίας λήψης των μετρήσεων.

8 Βιβλιογραφία

- [1] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2010.
- [2] D. Patranabi, *Sensors and Transducers*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.
- [3] J. Vetelino, *Introduction to sensors*. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [4] P. T. Moseley and J. Crocker, *Sensor Materials*. CRC Press, 1996.
- [5] “Sensor Terminology - Developer Zone - National Instruments.” [Online]. Available: <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/227>.
- [6] J. J. Carr, *Sensors and circuits: sensors, transducers, and supporting circuits for electronic instrumentation, measurement, and control*. Englewood Cliffs, N.J.: PTR Prentice Hall, 1993.
- [7] J. Jankowski, S. El-Ahmar, and M. Oszwaldowski, “Hall Sensors for Extreme Temperatures,” *Sensors (Basel)*, vol. 11, no. 1, pp. 876–885, Jan. 2011.
- [8] S. Koide, H. Takahashi, A. Abderrahmane, I. Shibasaki, and A. Sandhu, “High Temperature Hall sensors using AlGaIn/GaN HEMT Structures,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 352, no. 1, p. 012009, Mar. 2012.
- [9] S. Tumanski, *Thin Film Magnetoresistive Sensors*. CRC Press, 2001.
- [10] “Sensor Applications for Magnetic Materials | Sensors.” [Online]. Available: <http://www.sensormag.com/sensors/electric-magnetic/sensor-applications-magnetic-materials-899>.

- [11] “Allgemeines - properties of mag mat.pdf.” .
- [12] E. H. Hall, “On a New Action of the Magnet on Electric Currents,” *American Journal of Mathematics*, vol. 2, no. 3, pp. 287–292, 1879.
- [13] “Hall Effect Switch « Anthony VH.” [Online]. Available: <http://www.anthonvvh.com/2013/03/24/hall-effect-switch/>.
- [14] M. J. Caruso, “Applications of magnetic sensors for low cost compass systems,” in *Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000*, 2000, pp. 177–184.
- [15] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso, and F. Cardoso, “Magnetoresistive sensors,” *J. Phys.: Condens. Matter*, vol. 19, no. 16, p. 165221, Apr. 2007.
- [16] “The Nobel Prize in Physics 2007.” [Online]. Available: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/.
- [17] “Singer-Instruments - Introduction to LVDT - Basic Principles.” [Online]. Available: <http://www.singer-instruments.com/products/tutorials/lvdt/introduction>.
- [18] “How Magnetostrictive Sensor works.” [Online]. Available: <http://sensors-actuators-info.blogspot.gr/2009/08/magnetostriction-is-property-of.html>.
- [19] S. C. Mukhopadhyay and R. Y.-M. Huang, *Sensors: Advancements in Modeling, Design Issues, Fabrication and Practical Applications*. Springer, 2008.
- [20] D. Drung, C. . Assmann, J. Beyer, A. Kirste, M. Peters, F. Ruede, and T. Schurig, “Highly Sensitive and Easy-to-Use SQUID Sensors,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 699–704, 2007.
- [21] Y. Nakatani, T. Hayashi, Y. Miyato, and H. Itozaki, “Laser SQUID Microscope for the Evaluation of Solar Cell,” *Physics Procedia*, vol. 36, pp. 394–399, 2012.

- [22] M. Espy, A. Matlashov, and P. Volegov, "SQUID-detected ultra-low field MRI," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 228, pp. 1–15, 2013.
- [23] M. Koschny and M. Lindner, "Magneto-Optical Sensors Accurately Analyze Magnetic Field Distribution of Magnetic Materials," *Advanced Materials & Processes*, vol. 170, no. 2, p. 13, Feb. 2012.
- [24] M. J. Caruso and L. S. Withanawasam, "Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors," p. 13.
- [25] R. G. I. Leferink and W. M. M. Huijbregts, "Nitrate stress corrosion cracking in waste heat recovery boilers," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 49, no. 2, pp. 118–126, 2002.
- [26] "GID - Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, HZDR." [Online]. Available: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=11644&pNid=0>.
- [27] Ε. Χριστοφόρου, *Αισθητήρες*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2011.
- [28] C. B. X. Nghi Nguyen Hoang, "The Influence of Heat Treatment on Magnetoresistance Effect in Granular Cu- Co Alloys Prepared by Rapid Quenching," *AZojomo (Journal of Materials Online)*, vol. 1, no. 10.2240/azojomo0149, pp. 1–7, 2005.
- [29] Ε. Χριστοφόρου, *Διδακτικές Σημειώσεις στο Μάθημα «Ηλεκτρονικά Υλικά»*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2001.
- [30] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Gulf Professional Publishing, 1998.
- [31] W. D. Callister and Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

-
- [32] “Crystal Defects - Bulk Defects.” [Online]. Available: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/bulk_defects.htm.
- [33] H. Barkhausen, “Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen,” *Physische Zeitschrift*, vol. 20, p. 401, 1919.
- [34] “TUD - UA - Nachlässe und persönliche Dokumentationen (Vorlässe) A - Z.” [Online]. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/zentrale_einrichtungen/ua/navpoints/archiv/bestaende/nachlaesse.
- [35] A. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*. Springer, 1998.
- [36] “Sensitivity of Human Ear.” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/earsens.html>.
- [37] “Use of Barkhausen effect in Measurement of Residual Stresses in Steel after Heat Treatment and Grinding.” [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn780/idn780.htm>.
- [38] X. Kleber and S. P. Barroso, “Investigation of shot-peened austenitic stainless steel 304L by means of magnetic Barkhausen noise,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 21–22, pp. 6046–6052, 2010.
- [39] J. Capó-Sánchez, M. Alberteris Campos, and L. R. Padovese, “Magnetic Barkhausen measurements for evaluating the formation of Lüders bands in carbon steel,” *NDT & E International*, vol. 40, no. 7, pp. 520–524, 2007.

- [40] J. A. Pérez-Benitez, J. Capó-Sánchez, and L. R. Padovese, “Long-range field effects on magnetic Barkhausen noise,” *Phys. Rev. B*, vol. 76, no. 2, p. 024406, 2007.
- [41] J. C.-S. J. A. Pérez-Benitez, “Characterization of angular dependence of macroscopic magnetic properties in ASTM 36 steel using magnetic Barkhausen noise,” *Ndt & E International - NDT E INT*, vol. 40, no. 4, pp. 284–288, 2007.
- [42] M. Blaow, J. T. Evans, and B. A. Shaw, “The effect of microstructure and applied stress on magnetic Barkhausen emission in induction hardened steel,” *J Mater Sci*, vol. 42, no. 12, pp. 4364–4371, Jun. 2007.
- [43] O. Stupakov, J. Pal’a, I. Tomáš, J. Bydžovský, and V. Novák, “Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 462, no. 1–2, pp. 351–354, 2007.
- [44] E. Puppini, E. Pinotti, and M. Brenna, “Barkhausen noise in variable thickness amorphous finemet films,” *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 6, p. 063903, Mar. 2007.
- [45] H. K. T. Liu, “Comprehensive analysis of Barkhausen noise properties in the cold rolled mild steel,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials - J MAGN MAGN MATER*, vol. 310, no. 2, 2007.
- [46] M. Blaow, J. T. Evans, and B. A. Shaw, “Effect of hardness and composition gradients on Barkhausen emission in case hardened steel,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 303, no. 1, pp. 153–159, Aug. 2006.
- [47] K. Davut and C. H. Gür, “Monitoring the Microstructural Changes During Tempering of Quenched SAE 5140 steel by Magnetic Barkhausen Noise,” *J Nondestruct Eval*, vol. 26, no. 2–4, pp. 107–113, Dec. 2007.

- [48] A. Bahadur, A. Mitra, B. R. Kumar, and S. Palit Sagar, "Evaluation and Correlation of Residual Stress Measurement in Steel," *J Nondestruct Eval*, vol. 26, no. 2–4, pp. 47–55, Dec. 2007.
- [49] P. J. S. I. Mészáros, "Complex magnetic and microstructural investigation of duplex stainless steel," *NDT & E International*, no. 7, pp. 517–521, 2005.
- [50] M. F. de Campos, M. A. Campos, F. J. G. Landgraf, and L. R. Padovese, "Anisotropy study of grain oriented steels with Magnetic Barkhausen Noise," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 303, no. 1, p. 012020, Jul. 2011.
- [51] S. White, T. Krause, and L. Clapham, "Control of flux in magnetic circuits for Barkhausen noise measurements," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 11, p. 3501, Nov. 2007.
- [52] A. Ktena, E. Hristoforou, G. J. L. Gerhardt, F. P. Missell, F. J. G. Landgraf, D. L. Rodrigues Jr., and M. Alberteris-Campos, "Barkhausen noise as a microstructure characterization tool," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 435, pp. 109–112, 2014.
- [53] J. Capó Sánchez, M. F. de Campos, and L. R. Padovese, "Magnetic Barkhausen emission in lightly deformed AISI 1070 steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, no. 1, pp. 11–14, 2012.
- [54] E. F. Monlevade, M. F. De Campos, F. A. Franco, J. Capo-Sanchez, H. Goldenstein, and L. R. Padovese, "Magnetic Barkhausen Noise in Quenched Carburized Nickel-Steels," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1465–1468, Apr. 2012.
- [55] O. Stupakov, H. Kikuchi, T. Liu, and T. Takagi, "Applicability of local magnetic measurements," *Measurement*, vol. 42, no. 5, pp. 706–710, 2009.

- [56] O. Stupakov, O. Perevertov, I. Tomáš, and B. Skrbek, "Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, no. 12, pp. 1692–1697, 2011.
- [57] A. J. Moses, "AC Barkhausen Noise in electrical steels: Influence of sensing technique on interpretation of measurements" *Journal of Electrical Engineering*, vol. 57, pp. 3–8, 2006.
- [58] J. Pal'a and J. Bydžovský, "Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel," *Measurement*, vol. 46, no. 2, pp. 866–870, 2013.
- [59] H. Wang, C. Li, T. Zhu, B. Cai, G. Huo, and N. Mohamed, "Effect of Ball Scribing on Magnetic Barkhausen Noise of Grain-oriented Electrical Steel," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 29, no. 7, pp. 673–677, 2013.
- [60] O. Stupakov, "System for controllable magnetic measurement with direct field determination," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, no. 4, pp. 631–636, 2012.
- [61] H. V. Patel, S. Zurek, T. Meydan, D. C. Jiles, and L. Li, "A new adaptive automated feedback system for Barkhausen signal measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 129, no. 1–2, pp. 112–117, 2006.
- [62] M. Caldas-Morgan and L. R. Padovese, "Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method," *NDT & E International*, vol. 45, no. 1, pp. 148–155, 2012.
- [63] S. Desvaux, M. Duquennoy, J. Gualandri, M. Ouaftouh, and M. Ourak, "Evaluation of residual stress profiles using the Barkhausen noise effect to verify high performance aerospace bearings," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 20, no. 1, pp. 9–24, 2005.

-
- [64] M. Kaplan, C. H. Gür, and M. Erdogan, "Characterization of Dual-Phase Steels Using Magnetic Barkhausen Noise Technique," *J Nondestruct Eval*, vol. 26, no. 2–4, pp. 79–87, Dec. 2007.
- [65] X. Kleber, A. Hug-Amalric, and J. Merlin, "Evaluation of the Proportion of Phases and Mechanical Strength of Two-Phase Steels Using Barkhausen Noise Measurements: Application to Commercial Dual-Phase Steel," *Metall and Mat Trans A*, vol. 39, no. 6, pp. 1308–1318, Jun. 2008.
- [66] K. M. Koo, D. H. L. Ng, and C. C. H. Lo, "Characterization of pearlite grains in plain carbon steel by Barkhausen emission," in *Magnetics Conference, 2002. INTERMAG Europe 2002. Digest of Technical Papers. 2002 IEEE International*, 2002, p. BV6–.
- [67] D. O'Sullivan, M. Cotterell, D. A. Tanner, and I. Mészáros, "Characterisation of ferritic stainless steel by Barkhausen techniques," *NDT & E International*, vol. 37, no. 6, pp. 489–496, 2004.
- [68] O. Kypris, I. C. Nlebedim, and D. C. Jiles, "Experimental Verification of the Linear Relationship Between Stress and the Reciprocal of the Peak Barkhausen Voltage in ASTM A36 Steel," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4148–4151, Jul. 2013.
- [69] L. Mierczak, D. C. Jiles, and G. Fantoni, "A New Method for Evaluation of Mechanical Stress Using the Reciprocal Amplitude of Magnetic Barkhausen Noise," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 2, pp. 459–465, 2011.
- [70] O. Kypris, I. C. Nlebedim, and D. C. Jiles, "A model for the Barkhausen frequency spectrum as a function of applied stress," *Journal of Applied Physics*, vol. 115, no. 8, pp. 083906–083906–5, 2014.

-
- [71] P. Haušild, K. Kolařík, and M. Karlík, "Characterization of strain-induced martensitic transformation in A301 stainless steel by Barkhausen noise measurement," *Materials & Design*, vol. 44, pp. 548–554, 2013.
- [72] M. Lindgren and T. Lepistö, "On the stress vs. Barkhausen noise relation in a duplex stainless steel," *NDT & E International*, vol. 37, no. 5, pp. 403–410, 2004.
- [73] M. Lindgren and T. Lepistö, "Effect of cyclic deformation on Barkhausen noise in a mild steel," *NDT & E International*, vol. 36, no. 6, pp. 401–409, 2003.
- [74] A. Vincent, L. Pasco, M. Morin, X. Kleber, and M. Delnondedieu, "Magnetic Barkhausen noise from strain-induced martensite during low cycle fatigue of 304L austenitic stainless steel," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 17, pp. 4579–4591, 2005.
- [75] D. M. Vaidhianathasamy and D. B. Shaw, "Testing of case depth in case carburized gear steels using magnetic barkhausen emission technique," 2004.
- [76] V. Moorthy, B. A. Shaw, and P. Hopkins, "Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 299, no. 2, pp. 362–375, 2006.
- [77] V. Moorthy, B. A. Shaw, P. Mountford, and P. Hopkins, "Magnetic Barkhausen emission technique for evaluation of residual stress alteration by grinding in case-carburised En36 steel," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 19, pp. 4997–5006, 2005.
- [78] V. Moorthy, B. A. Shaw, and S. Day, "Evaluation of applied and residual stresses in case-carburised En36 steel subjected to bending using the magnetic Barkhausen emission technique," *Acta Materialia*, vol. 52, no. 7, pp. 1927–1936, 2004.

- [79] S. Santa-aho, M. Vippola, A. Sorsa, M. Lindgren, J. Latokartano, K. Leiviskä, and T. Lepistö, "Optimized laser processing of calibration blocks for grinding burn detection with Barkhausen noise," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 11, pp. 2282–2293, 2012.
- [80] S. Santa-aho, M. Vippola, A. Sorsa, J. Latokartano, M. Lindgren, K. Leiviskä, and T. Lepistö, "Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 2, pp. 408–416, 2012.
- [81] A. S. M. International, *Nondestructive Evaluation and Quality Control. Metals Handbook Ninth Edition: Volume 17*, 9th edition. Metals Park, Ohio: ASM International, 1989.
- [82] J. Pal'a, O. Stupakov, J. Bydžovský, I. Tomáš, and V. Novák, "Magnetic behaviour of low-carbon steel in parallel and perpendicular directions to tensile deformation," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 310, no. 1, pp. 57–62, 2007.
- [83] O. Stupakov, O. Perevertov, V. Stoyka, and R. Wood, "Correlation Between Hysteresis and Barkhausen Noise Parameters of Electrical Steels," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 517–520, 2010.
- [84] J. A. Pérez-Benítez, J. H. Espina-Hernández, P. Martínez-Ortiz, A. F. Chávez-González, and J. M. de la Rosa, "Analysis of the influence of some magnetizing parameters on magnetic Barkhausen noise using a microscopic model," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 347, pp. 51–60, 2013.
- [85] J. Capó-Sánchez, J. Pérez-Benitez, and L. R. Padovese, "Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise," *NDT & E International*, vol. 40, no. 2, pp. 168–172, 2007.

- [86] M. Blaow, J. T. Evans, and B. A. Shaw, "Magnetic Barkhausen noise: the influence of microstructure and deformation in bending," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 2, pp. 279–287, 2005.
- [87] J. C. Sánchez, E. Huallpa, P. Farina, L. R. Padovese, and H. Goldenstein, "Magnetic and spontaneous Barkhausen noise techniques used in investigation of a martensitic transformation," *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 8, p. 083916, Oct. 2011.
- [88] "INA163 | Single Supply | Instrumentation Amplifier | Description & parametrics." [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/ina163>.
- [89] "DRV134 | Professional Audio Line Driver | Line Driver / Receiver | Description & parametrics." [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/drv134>.
- [90] "OPA209 | Precision Amplifier | Operational Amplifier (Op Amp) | Technical documents." [Online]. Available: <http://www.ti.com/product/OPA209/technicaldocuments>.
- [91] "Regulated DC Power Supply - EZ Digital Co., Ltd.," *EC21, Global B2B Marketplace - Connecting Global Buyers with Manufacturers, Suppliers, Exporters worldwide*. [Online]. Available: http://ezdgt.en.ec21.com/Regulated_DC_Power_Supply--2139281_303064.html.
- [92] "HAMEG: Manuals." [Online]. Available: http://www.hameg.com/manuals.0.html?&no_cache=1.
- [93] "Oscilloscope - EZ Digital Co., Ltd.," *EC21, Global B2B Marketplace - Connecting Global Buyers with Manufacturers, Suppliers, Exporters worldwide*. [Online]. Available: http://ezdgt.en.ec21.com/Oscilloscope--302908_2139370.html.