



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Δ. ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Δ. ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 04/02/2014

Ε. Χριστοφόρου, Καθηγητής,(Υπογραφή)

Γ. Φούρλαρης, Καθηγητής,(Υπογραφή)

Α. Τσετσέκου, Αν. Καθηγήτρια,(Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2014

Copyright © Ασημακόπουλος Κωνσταντίνος

Με επιφύλαξη παντός νόμιμου δικαιώματος. All rights reserved.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την πολύτιμη βοήθειά του.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Φούρλαρη και την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. Αθηνά Τσετσέκου, μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Ευχαριστώ επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες κα. Ξένια Βουρνά και κ. Δημήτριο Κοσσυβάκη για τη βοήθεια τους και την υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Νεοκλή Χατζηγεωργίου για την βοήθεια του στη χρήση του ORCAD, τη λιθογραφία και τους αναλογικούς ενισχυτές.

Ευχαριστώ τους γονείς μου Διονύση και Στέλλα για την αμέριστη βοήθεια και κατανόηση τους.

Τέλος, ευχαριστώ την κα. Αναστασία Αλεξανδράτου για τη βοήθεια, και την κατανόηση που έδειξε όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Εικόνων	8
Κατάλογος Διαγραμμάτων	10
ΣΥΝΟΨΗ.....	11
ABSTRACT	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	15
2.1 Μαγνητισμός	15
2.1.1 Προέλευση του μαγνητισμού.....	15
2.1.2 Μαγνητισμός στα υλικά.....	18
Διαμαγνητικά Υλικά	18
Παραμαγνητικά Υλικά	18
Σιδηρομαγνητικά.....	19
Αντισιδηρομαγνητικά Υλικά	20
Σιδηριμαγνητικά Υλικά	21
2.1.3 Σιδηρομαγνητισμός.....	22
Προέλευση σιδηρομαγνητισμού - Μαγνητικές Περιοχές.....	22
Μαγνήτιση σε πολυκρυσταλλικούς χάλυβες.....	24
Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία	24
Μαγνητική συστολή.....	25
2.1.4 Εμπόδιση κίνησης μαγνητικών τοιχωμάτων από κέντρα συγκράτησης..	26
Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen	26
2.2 Αισθητήρες.....	28

2.2.1 Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	31
3.1 Σχεδιασμός αισθητήρα	31
3.1.1 Όρια συχνοτήτων προς λήψη, επεξεργασία και καταγραφή.....	31
3.1.2 Τύπος πηνίου λήψης	32
3.1.3 Κυματομορφή διέγερσης.....	33
3.2 Διάταξη αισθητήρα	33
3.3 Ηλεκτρομηχανικό μέρος αισθητήρα	35
3.3.1 Πηνίο λήψης	35
3.3.2 Πηνίο διέγερσης.....	36
3.4 Ηλεκτρονικό μέρος αισθητήρα	37
3.4.1 Γεννήτρια συχνοτήτων	37
3.4.2 Χαμηλοπερατό φίλτρο	40
3.4.3 Ενισχυτής ισχύος.....	42
3.4.4 Προενισχυτής σήματος	43
3.4.5 Φίλτρο συχνοτήτων	46
3.4.6 Τελική ενίσχυση και καταγραφή	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	51
4.1 Μετρήσεις	51
4.1.1 Ηλεκτρικός χάλυβας	53
4.1.2 Κοινός (ανθρακούχος) υποευθηκτοειδής χάλυβας.....	56
4.1.3 Ηλεκτρικός χάλυβας με συγκόλληση	59
4.1.4 Χάλυβας TRIP.....	61

4.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα.....	64
4.3 Μελλοντική εργασία.....	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	72
Ηλεκτρικοί Χάλυβες.....	72
Κοινοί υποευτηκτοειδείς χάλυβες.....	73
Χάλυβες TRIP.....	74

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 - Βρόγχος υστέρησης υλικού.....	20
Εικόνα 2 - Εγκιβωτισμένο πηνίο λήψης	35
Εικόνα 3 - Πηνίο διέγερσης. Τα Π1, Π2 είναι τα πηνία διέγερσης ενώ το Π3 είναι το πηνίο μέτρησης μαγνητικής ροής.	36
Εικόνα 4 - Σχέδιο κυκλώματος γεννήτριας συχνοτήτων. Το JP1 είναι η σύνδεση με τον μικροεπεξεργαστή, το JP2 η έξοδος του σήματος και το JP5 η σύνδεση της τροφοδοσίας.....	38
Εικόνα 5 - Τελική πλακέτα γεννήτριας συχνοτήτων. Σημειώνονται τα JP1, JP2 και JP5.....	39
Εικόνα 6 - Ηλεκτρικό κύκλωμα χαμηλοπερατού φίλτρου.	41
Εικόνα 7 - Ηλεκτρικό κύκλωμα ενισχυτή ισχύος.	42
Εικόνα 8 - Τελική διάταξη χαμηλοπερατού φίλτρου και ενισχυτή ισχύος. Φαίνονται η είσοδος και η έξοδος.	43
Εικόνα 9 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος προενισχυτή. Το JP1 είναι η είσοδος από το πηνίο λήψης, το JP2 η έξοδος και το JP3 η τροφοδοσία.	45
Εικόνα 10 - Τελική κατασκευή προενισχυτή σήματος. Φαίνονται τα JP1, JP2 και JP3.	45
Εικόνα 11 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος χαμηλοπερατού φίλτρου.	48
Εικόνα 12 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος υψιπερατού φίλτρου.	48
Εικόνα 13 - Τελική πλακέτα ζωνοπερατού φίλτρου.	49
Εικόνα 14 - Τελικός ενισχυτής. Στο SL1 είναι η είσοδος από το φίλτρο και στο SL2 η έξοδος προς τον παλμογράφο	50
Εικόνα 15 - Εικόνα μέτρησης από παλμογράφο.	52
Εικόνα 16 - Δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα.....	53

Εικόνα 17 - Μέτρηση σε ηλεκτρικό χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 1.....	54
Εικόνα 18 - Μέτρηση σε ηλεκτρικό χάλυβα κάθετα στο δοκίμιο παράλληλα με τη διεύθυνση 2.....	55
Εικόνα 19 - Δοκίμιο υποευτηκτοειδή χάλυβα.....	56
Εικόνα 20 - Μέτρηση στο δοκίμιο υποευτηκτοειδούς χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 1.....	57
Εικόνα 21 - Δοκίμιο υποευτηκτοειδούς χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 2.....	58
Εικόνα 22 - Συγκολλημένος ηλεκτρικός χάλυβας.....	59
Εικόνα 23 - Μέτρηση σε δοκίμιο συγκολλημένου ηλεκτρικού χάλυβα, πάνω στη συγκόλληση και κατά μήκος αυτής.....	60
Εικόνα 24 - Δοκίμιο χάλυβα TRIP.....	61
Εικόνα 25 - Μέτρηση σε δοκίμιο χάλυβα TRIP παράλληλα στη διεύθυνση 1.	62
Εικόνα 26 - Μέτρηση σε δοκίμιο χάλυβα TRIP παράλληλα στη διεύθυνση 2.	63

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 - Τελική διάταξη διέγερσης.....	34
Διάγραμμα 2 - Τελική διάταξη λήψης.....	34
Διάγραμμα 3 - Συχνοτική απόκριση χαμηλοπερατού φίλτρου. Η τάση εισόδου είναι 1V.....	41
Διάγραμμα 4 - Συχνοτική απόκριση συστήματος προενισχυτή - φίλτρου. Η τάση εισόδου είναι 100 nV.....	47
Διάγραμμα 5 – Λεπτομέρεια από το Διάγραμμα 4. Απεικονίζεται η περιοχή 0-20 kHz.	47

ΣΥΝΟΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αισθητήρα μη καταστροφικού ελέγχου χαλύβδινων αντικειμένων. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί το φαινόμενο Barkhausen προκειμένου να παρέχει μια εκτίμηση της αρτιότητας του αντικειμένου που μελετάται. Αναλύεται θεωρητικά το φαινόμενο, και στη συνέχεια παρουσιάζεται η σχεδίαση και η κατασκευή της ολοκληρωμένης διάταξης. Σε κάθε βήμα παρουσιάζονται τα σχέδια των κατασκευασμένων ηλεκτρονικών διατάξεων και όπου υπήρξαν, τα αποτελέσματα προσομοιώσεων σε ειδικό λογισμικό ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στο τέλος, παρουσιάζονται μετρήσεις σε δοκίμια χάλυβα, οι οποίες επιβεβαιώνουν την λειτουργία του αισθητήρα.

ABSTRACT

This thesis presents the design and development of a non-destructive evaluation sensor. The sensor utilizes Barkhausen noise in order to provide an assessment of the integrity of the object being tested. The theoretical explanation of the phenomenon is given in the beginning, followed by the design and construction of the final apparatus. At each step, full schematics of the constructed electrical circuits are given and, wherever possible, the results of the circuit simulations. Finally, experimental measurements of steel samples are presented, that verify the sensor's correct operation.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΤΟΧΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και κατασκευή ενός ολοκληρωμένου αισθητήρα για το μη καταστροφικό έλεγχο χαλύβδινων αντικειμένων βασισμένο στο θόρυβο Barkhausen. Σε αντίθεση με προηγούμενες εργασίες (πχ [1], [2], [3]), από την αρχή τέθηκε ως σχεδιαστική απαίτηση να επιτευχθεί το μικρότερο δυνατό μέγεθος σε συνδυασμό με μικρό χρηματικό κόστος και υψηλή ακρίβεια. Ταυτόχρονα, δόθηκε σημασία στο να υπάρχει το μεγαλύτερο δυνατό εύρος παραμετροποίησης της λειτουργίας της συσκευής και της μέτρησης.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος είναι απαραίτητος πλέον στην παραγωγή αλλά κυρίως στη συντήρηση προϊόντων και κατασκευών, επιτρέποντας την εξακρίβωση της κατάστασης του ελεγχόμενου αντικειμένου χωρίς την καταστροφή του. Η σημασία του αυτή εκδηλώνεται στην ύπαρξη πληθώρας μεθόδων, κάθε μία για συγκεκριμένη χρήση (π.χ. ο έλεγχος με χρήση υπερήχων για τον εντοπισμό εγκλεισμάτων και διακένων στη μάζα του υλικού και ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό επιφανειακών ατελειών). Οι περισσότερες εκ των μεθόδων που χρησιμοποιούνται ανιχνεύουν ήδη υπάρχουσες ατέλειες στο υλικό και όχι περιοχές, οι οποίες λόγω συσσωρευμένων τάσεων θα αστοχήσουν μελλοντικά κατά την εφαρμογή και τη χρήση του υλικού. Ο μη καταστροφικός έλεγχος με χρήση του θορύβου Barkhausen επιτρέπει τον έλεγχο υλικών και τον προσδιορισμό της ύπαρξης και κατεύθυνσης τάσεων στο υλικό. Επιτρέπει γρήγορο έλεγχο των δοκιμών χωρίς να απαιτείται ειδική προετοιμασία της επιφάνειας αυτών [4].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά, στο κεφάλαιο 2, γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή στο μαγνητισμό και στα μαγνητικά υλικά, καθώς επίσης και στην προέλευση του θορύβου Barkhausen. Επιπρόσθετα, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα και αναφέρονται οι διάφοροι τύποι μαγνητικών αισθητήρων.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3, αναλύεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή του αισθητήρα ενώ αναφέρονται και δικαιολογούνται οποιεσδήποτε σχεδιαστικές

επιλογές έγιναν, οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργία του αισθητήρα.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και μελετώνται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε γνωστά δοκίμια, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η λειτουργία του αισθητήρα. Τέλος, προτείνονται πιθανές βελτιώσεις για μελλοντική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Μαγνητισμός

2.1.1 Προέλευση του μαγνητισμού

Η εξήγηση της προέλευσης του μαγνητισμού της ύλης απαιτεί χρήση εννοιών τόσο της κβαντομηχανικής όσο και του ηλεκτρομαγνητισμού, καθότι στηρίζεται στην έννοια της μαγνητικής διπολικής ροπής του ατόμου και των ηλεκτρονίων.

Ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο βρίσκεται σε τροχιά γύρω από ένα άτομο, μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργεί ένα βρόχο ρεύματος γύρω από αυτό. Ισχύει ότι το ρεύμα I που διαρρέει το βρόχο ισούται με το φορτίο που τον διαρρέει στη μονάδα χρόνου και άρα, εφόσον T είναι η περίοδος περιστροφής του ηλεκτρονίου και $-e$ το φορτίο του, ισχύει ότι:

$$I = -\frac{e}{T}$$

Η επιφάνεια του βρόχου που διαγράφει το ηλεκτρόνιο (θεωρώντας ότι η τροχιά του είναι κυκλική και βρίσκεται σε επίπεδο) είναι ίση με το εμβαδόν κύκλου, ακτίνας ίσης με την απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα του ατόμου.

Από τον ηλεκτρομαγνητισμό είναι γνωστό ότι η μαγνητική διπολική ροπή ρεύματος σε βρόχο είναι διανυσματικό μέγεθος με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του βρόχου και μέτρο που δίνεται από την σχέση:

$$\mu = I \cdot A$$

όπου μ είναι η μαγνητική ροπή, I το ρεύμα που διαρρέει το βρόχο και A η επιφάνεια του.

Επομένως, για ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε τροχιά ακτίνας r γύρω από ένα άτομο, η τροχιακή διπολική μαγνητική ροπή $\mu_{\text{τροχ}}$ δίνεται από τον τύπο:

$$\mu_{\text{τροχ}} = I \cdot (\pi \cdot r^2) = -\frac{e \cdot (\pi \cdot r^2)}{T}$$

Ισχύει όμως ότι $T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$. Συνεπώς, η παραπάνω εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\mu_{τροχ} = -\frac{e \cdot r^2 \cdot \omega}{2}$$

Γενικά, στην κυκλική κίνηση, η γραμμική ταχύτητα του σώματος συνδέεται με τη γωνιακή μέσω της σχέσης: $u = \omega \cdot r$. Οπότε αν η μάζα του ηλεκτρονίου είναι m_e , και η τροχιακή στροφορμή αυτού είναι L τότε:

$$L = (m_e \cdot v) \cdot r = (m_e \cdot \omega) \cdot r^2$$

Η τροχιακή μαγνητική διπολική ροπή ηλεκτρονίου ισούται τελικά με:

$$\mu_{τροχ} = -\frac{e \cdot L}{2 \cdot m_e}$$

Πέρα από την περιστροφή του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του ατόμου, το ηλεκτρόνιο περιστρέφεται και γύρω από τον εαυτό του, παρουσιάζοντας μια εσωτερική στροφορμή (ιδιοστροφορμή ή spin). Με την ίδια μέθοδο όπως και για την τροχιακή διπολική μαγνητική ροπή αποδεικνύεται ότι το μέτρο της διπολικής μαγνητικής ροπής spin είναι ίσο με:

$$\mu_{spin} = -\frac{e \cdot S}{m_e}$$

όπου S είναι η εσωτερική στροφορμή του ηλεκτρονίου.

Η συνολική μαγνητική ροπή του ατόμου δεν μπορεί να υπολογιστεί ωστόσο με απλή άθροιση των δύο μαγνητικών ροπών, καθώς και οι δύο μαγνητικές ροπές αποτελούν διανυσματικά μεγέθη, ενώ πρέπει, επίσης, να τονιστεί ότι η συνολική διπολική μαγνητική ροπή του ατόμου, εξαρτάται από την τροχιακή κίνηση και το spin όλων των ηλεκτρονίων.

Παρ' όλ' αυτά, η ανάλυση της προέλευσης του μαγνητισμού στο άτομο, διευκολύνεται από το γεγονός ότι οι πλήρως συμπληρωμένες υποστοιβάδες δε συνεισφέρουν καθόλου στη συνολική μαγνητική ροπή του ατόμου. Αποδεικνύεται ότι, εφόσον το διάνυσμα L είναι χωροκβαντισμένο, μέσω του μαγνητικού κβαντικού αριθμού m_l , σε μία πλήρως

συμπληρωμένη υποστοιβάδα, όλες οι τιμές του m_l θα είναι κατειλημμένες. Έτσι, για κάθε ηλεκτρόνιο θα υπάρχει ένα άλλο ηλεκτρόνιο στην ίδια υποστοιβάδα με ίση και αντίθετη μαγνητική ροπή. Αντίστοιχα και για το S [5], [6].

2.1.2 Μαγνητισμός στα υλικά

Η επίδραση εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου σε υλικό εξαρτάται από το είδος αυτού. Τα διάφορα υλικά κατηγοριοποιούνται σε 5 κατηγορίες, τα διαμαγνητικά, τα παραμαγνητικά, τα σιδηρομαγνητικά, τα αντισιδηρομαγνητικά και τα σιδηριμαγνητικά, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Διαμαγνητικά Υλικά

Διαμαγνητικά είναι τα υλικά, τα οποία έχουν πλήρως συμπληρωμένες τις στοιβάδες και τις υποστοιβάδες των ατόμων τους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τα άτομά τους έχουν μηδενική μαγνητική ροπή. Η εφαρμογή εξωτερικού πεδίου προκαλεί την επαγωγή μαγνητικής ροής μέσα στο υλικό, η οποία αναιρεί την αλλαγή που προκαλείται από το εξωτερικό πεδίο. Τα διαμαγνητικά υλικά έχουν αρνητική και πολύ μικρή μαγνητική επιδεκτικότητα, της τάξης του 10^{-5} [7]. Συνέπεια της ηλεκτρονιακής διάταξής τους, τα διαμαγνητικά υλικά, έχουν την τάση να απωθούν οποιοδήποτε εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο [6]. Παραδείγματα τέτοιων υλικών αποτελούν οι ομοιοπολικοί κρύσταλλοι, μερικοί ιοντικοί κρύσταλλοι, τα στοιχεία Cu, Ag, Al κ.ά. Οι υπεραγωγοί είναι τέλειοι διαμαγνήτες, απωθώντας πλήρως από τη μάζα τους, κάθε εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο με ένταση πεδίου μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή. Έχουν μαγνητική διαπερατότητα ίση με -1 [6], [7].

Παραμαγνητικά Υλικά

Παραμαγνητικά, είναι τα υλικά, τα οποία έχουν μη συμπληρωμένες στοιβάδες στα άτομά τους. Λόγω αυτής της ηλεκτρονιακής δομής, είναι δυνατό να αλλάξει η κατεύθυνση του spin των ασύζευκτων ηλεκτρονίων [6]. Με εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, μια αδύναμη μαγνήτιση από επαγωγή παράγεται παράλληλα στο πεδίο, έχοντας διεύθυνση προς περιοχές με ισχυρότερο πεδίο. Η μαγνήτιση αυτή είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου πεδίου και είναι πάντοτε θετική. Χωρίς εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές ροπές αποκτούν τυχαίες διευθύνσεις

λόγω θερμικής διέγερσης. Τα παραμαγνητικά υλικά έχουν θετική μαγνητική επιδεκτικότητα, κυμαινόμενη από 10^{-3} έως 10^{-5} , η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας (νόμος Curie – Weiss) [6]. Κλασσικό παράδειγμα παραμαγνητικών υλικών είναι τα αέρια, στα οποία η συμπεριφορά παραμαγνητικού υλικού οφείλεται στις τυχαίες συγκρούσεις των μορίων που προσδίδουν τυχαίο προσανατολισμό στις ροπές αυτών. Επίσης, παραμαγνητικά είναι και ορισμένα μέταλλα, π.χ. το μαγνήσιο, όπου η παραμαγνητική συμπεριφορά τους οφείλεται σε ευθυγράμμιση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας του μετάλλου και ονομάζεται παραμαγνητισμός spin Pauli [6].

Σιδηρομαγνητικά

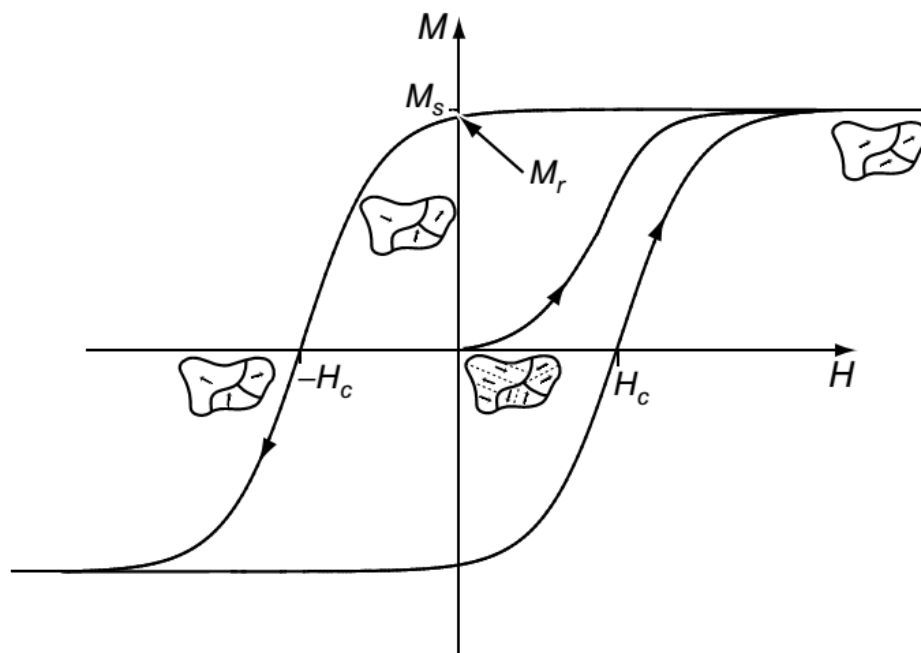
Σιδηρομαγνητικά ονομάζονται τα υλικά, η μάζα των οποίων διαχωρίζεται, λόγω αλληλεπίδρασης ανταλλαγής, σε μόνιμα μαγνητισμένες περιοχές (magnetic domains). Η μαγνήτιση της κάθε περιοχής είναι διαφορετικά προσανατολισμένη σε σχέση με τις γειτονικές τις περιοχές και προέρχεται από τα spin των ασύζευκτων ηλεκτρονίων των μη πληρωμένων στοιβάδων, τα οποία ευθυγραμμίζονται παράλληλα μεταξύ τους λόγω ισχυρής αλληλεπίδρασης ανταλλαγής. Η ευθυγράμμιση αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα τα σιδηρομαγνητικά υλικά να παρουσιάζουν μια θερμοκρασία Curie (T_c), πάνω από την οποία γίνονται παραμαγνητικά [6], [7].

Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στο υλικό οδηγεί στην αλλαγή των μαγνητικών περιοχών και στη σταδιακή ευθυγράμμισή τους. Περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου οδηγεί σε μεγαλύτερη αλλαγή και για μία συγκεκριμένη τιμή πεδίου, ανάλογη του υλικού, η μαγνήτιση του υλικού φτάνει στον κόρο.

Η μεταβολή των μαγνητικών περιοχών οδηγεί σε συνολική μαγνήτιση του υλικού, η οποία παραμένει και μετά την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου ελαφρά μειωμένη. Για να αφαιρεθεί πλήρως η μαγνήτιση, πρέπει να εφαρμοστεί εξωτερικό πεδίο διαφορετικής φοράς μέχρις ότου η συνολική μαγνήτιση του υλικού γίνει μηδέν και άρα το υλικό απομαγνητιστεί. Και στις δύο περιπτώσεις η διαδικασία γίνεται μη γραμμικά και από διαφορετική διαδρομή στο διάγραμμα πεδίου – μαγνήτισης. Η συμπεριφορά

αυτή ονομάζεται υστέρηση και η διαδρομή που ακολουθεί το υλικό στο διάγραμμα πεδίου – μαγνήτισης κατά τον κύκλο μαγνήτισης – απομαγνήτισης ονομάζεται βρόγχος υστέρησης και απεικονίζεται στην Εικόνα 1.

Η μαγνητική επιδεκτικότητα των υλικών αυτών είναι θετική και παίρνει μεγάλες τιμές ή ακόμα και απειρίζεται [6].



Εικόνα 1 - Βρόγχος υστέρησης υλικού.¹

Αντισιδηρομαγνητικά Υλικά

Η συμπεριφορά των αντισιδηρομαγνητικών υλικών είναι στενά συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία Néel (T_N). Κάτω αυτής τα spins των ηλεκτρονίων σε γειτονικές θέσεις διατάσσονται αντιπαράλληλα και αλληλοαναιρούνται, λόγω αλληλεπίδρασης ανταλλαγής. Ως αποτέλεσμα της δομής αυτής, τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά δεν έχουν

¹ Πηγή: Coey, M., "Magnetism and Magnetic Materials", (2009), Cambridge University Press, σελ. 8

παραμένουσα μαγνήτιση, ενώ κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το υλικό παρουσιάζει αντίσταση στη μαγνήτιση. Η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι ανάλογη της θερμοκρασίας [7].

Σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας Néel, τα spins των ηλεκτρονίων αποκτούν τυχαία κατεύθυνση και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό.

Γενικά, τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν μικρή, θετική μαγνητική επιδεκτικότητα [6].

Σιδηριμαγνητικά Υλικά

Σιδηριμαγνητικά ονομάζονται τα υλικά, των οποίων το κρυσταλλικό πλέγμα μπορεί να χωριστεί νοητά σε υποπλέγματα, καθένα από τα οποία αποτελείται από διαφορετικά στοιχεία ή ιόντα. Τα άτομα του κάθε υποπλέγματος έχουν αντιπαράλληλη μαγνητική ροπή σε σχέση με τα άτομα του άλλου υποπλέγματος. Ωστόσο, επειδή τα μέτρα των μαγνητικών ροπών είναι άνισα μεταξύ τους, το ένα υποπλέγμα υπερισχύει του άλλου και συνολικά το υλικό αποκτά ακαριαία μια μαγνήτιση, με αποτέλεσμα η μακροσκοπική μαγνητική συμπεριφορά του υλικού να ομοιάζει με αυτή των σιδηρομαγνητών. Αυτή η κρυσταλλική τους διάταξη διατηρείται μέχρι μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_c). Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σταδιακή διαταραχή της διάταξης των spin ενός σιδηριμαγνητικού υλικού και τελικά, μετά την T_c , η μαγνητική ροπή του κάθε ατόμου ενός σιδηριμαγνητικού υλικού αποκτά τυχαίο προσανατολισμό και συνολικά το υλικό παρουσιάζει παραμαγνητική συμπεριφορά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σιδηριμαγνητικού υλικού είναι οι φερρίτες (Fe_3O_4) [8], [9].

2.1.3 Σιδηρομαγνητισμός

Προέλευση σιδηρομαγνητισμού - Μαγνητικές Περιοχές

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, λόγω αλληλεπίδρασης ανταλλαγής μεταξύ των ατόμων, σχηματίζονται μέσα στο υλικό περιοχές, όπου όλες οι μαγνητικές ροπές λόγω spin έχουν την ίδια κατεύθυνση και άρα η μαγνητική ροπή της περιοχής προσανατολίζεται προς την ίδια κατεύθυνση. Με το σχηματισμό πολλαπλών μαγνητικών περιοχών με αντίθετες μαγνητικές ροπές, η συνολική μαγνήτιση του υλικού είναι ίση με μηδέν. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές (περιοχές Weiss)** και η μαγνήτισή τους είναι συνήθως παράλληλη προς τις διευθύνσεις, κατά τις οποίες μεγιστοποιείται η επίδραση της ενέργειας ανταλλαγής (εύκολες διευθύνσεις).

Στο μαγνητικό πεδίο αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια, η οποία ονομάζεται μαγνητοστατική ενέργεια. Κάθε κόκκος του σιδηρομαγνητικού υλικού δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, οι γραμμές του οποίου βρίσκονται εκτός της μάζας του και κατά συνέπεια, αυξάνεται η μαγνητοστατική του ενέργεια. Για να μειωθεί αυτή, σχηματίζονται μέσα στον κόκκο περιοχές με αντίθετη μεταξύ τους μαγνητική ροπή (γωνία 180°), με αποτέλεσμα οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου να μειώνονται εκτός του κόκκου και να παραμένουν μόνο στα άκρα και άρα τελικά να μειώνεται η μαγνητοστατική ενέργεια. Προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω η μαγνητοστατική ενέργεια, σχηματίζονται στα όρια του κόκκου, όπου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο προς το εξωτερικό αυτού, περιοχές των οποίων η μαγνητική ροπή βρίσκεται σε γωνία 90° σε σχέση με τις αρχικές περιοχές και οι οποίες ονομάζονται **περιοχές εγκλεισμού**.

Στα όρια μεταξύ διαφορετικών μαγνητικών περιοχών, τα spin των ηλεκτρονίων των ατόμων αλλάζουν σταδιακά κατεύθυνση. Τα όρια μεταξύ των περιοχών όπου συμβαίνει αυτό, ονομάζονται **μαγνητικά τοιχώματα ή τοιχώματα Bloch**. Η δημιουργία τοιχώματος οδηγεί σε μικρή αύξηση της συνολικής ενέργειας ενός κόκκου, καθότι απαιτείται προσφορά ενέργειας για την περιστροφή των spin των μαγνητικών ροπών [6]. Η ταυτόχρονη όμως μείωση της μαγνητοστατικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα η συνολική δυναμική ενέργεια του κόκκου να μειώνεται. Η ανάπτυξη νέων

μαγνητικών περιοχών συνεχίζεται αυθόρμητα μέχρις ότου η προσθήκη νέου μαγνητικού τοιχώματος να οδηγήσει σε αύξηση της ενέργειας του υλικού.

Το πάχος των μαγνητικών τοιχωμάτων εξαρτάται από τη μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό, τόσο μεγαλύτερη η ενεργειακή διαφορά του τοιχώματος από το κύριο σώμα της περιοχής. Στο σίδηρο είναι περίπου 0.1μm.

Με εφαρμογή εξωτερικού πεδίου το υλικό μαγνητίζεται. Κατά τη μαγνήτιση, αρχικά, τα μαγνητικά τοιχώματα στους κόκκους μετακινούνται και οι μαγνητικές περιοχές μεταβάλλονται. Βαθμιαία, και καθώς το πεδίο αυξάνεται, οι μαγνητικές περιοχές, των οποίων η διεύθυνση της μαγνητικής ροπής είναι μερικώς ή πλήρως παράλληλη με τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου, ενώνονται. Η μετακίνηση των τοιχωμάτων είναι αρχικά προσωρινή, ενώ η περαιτέρω αύξηση του πεδίου οδηγεί σε μη αναστρέψιμη μεταβολή. Επιπρόσθετα, οι μαγνητικές περιοχές στον κάθε κόκκο ενοποιούνται σε μία, έχοντας προσανατολισμό προς μια από τις εύκολες διευθύνσεις του κάθε κόκκου. Τέλος, η μια πλέον μαγνητική περιοχή του κόκκου, προσανατολίζεται παράλληλα με το εξωτερικό πεδίο οπότε φτάνει ο κάθε κόκκος και άρα όλο το υλικό στον κόρο. Περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν επιφέρει καμία αλλαγή στο υλικό. Γενικά πρώτα μετακινούνται και μεταβάλλονται οι περιοχές παράλληλα προς τις εύκολες διευθύνσεις του κρυστάλλου που έχουν τη μικρότερη απόκλιση από το εξωτερικό πεδίο και στο τέλος γίνεται η μεταβολή των περιοχών προς τις δύσκολες κρυσταλλικές διευθύνσεις [5].

Μείωση ή ακόμα και μηδενισμός του εξωτερικού πεδίου δε σημαίνει και μηδενική μαγνήτιση. Αντίθετα, η μαγνητική περιοχή σε κάθε κόκκο αλλάζει προσανατολισμό προς μία από τις εύκολες διευθύνσεις και σε μερικές περιπτώσεις σχηματίζονται μέσα στον κόκκο μικρότερες περιοχές. Τελικά, το υλικό έχει μια μόνιμη μαγνήτιση, μικρότερη από τη μαγνήτιση στον κόρο, που ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση.

Με εφαρμογή πάλι εξωτερικού πεδίου, αλλά αντίθετης φοράς, η συνολική μαγνήτιση του υλικού σταδιακά μειώνεται, εξαιτίας της δημιουργίας νέων μαγνητικών περιοχών στους κόκκους του υλικού. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι τον μηδενισμό της

μαγνήτισης του υλικού οπότε και το υλικό απομαγνητίζεται. Το πεδίο που πρέπει να εφαρμοστεί για να απομαγνητιστεί το υλικό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο [7], [6].

Μαγνήτιση σε πολυκρυσταλλικούς χάλυβες

Οι χάλυβες ανήκουν στην κατηγορία των σιδηρομαγνητικών υλικών. Η μικροδομή τους αποτελείται από πολλούς κόκκους (κρυστάλλους) διαφορετικού μεγέθους και προσανατολισμού, ανάλογα με το είδος του χάλυβα και τις κατεργασίες που έχει υποστεί. Όταν ο χάλυβας είναι μη μαγνητισμένος, κάθε κόκκος παρουσιάζει μαγνητικές περιοχές, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, καθώς και από τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών γειτονικών κόκκων. Συγκεκριμένα, εάν το μέγεθος του κόκκου είναι μικρότερο από 0.1 μm , τότε αυτός περιέχει μόνο μία μαγνητική περιοχή, ενώ αν είναι μεγαλύτερο περιλαμβάνει περισσότερες. Η συνολική διάταξη των μαγνητικών περιοχών διάφορων κόκκων είναι τέτοια, ώστε το υλικό να παρουσιάζει μηδενική μαγνήτιση, εφόσον δεν έχει μαγνητιστεί προηγουμένως.

Μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία

Τα μαγνητικά υλικά εμφανίζουν το φαινόμενο της μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας, λόγω του οποίου οι μαγνητικές τους ιδιότητες διαφοροποιούνται ανάλογα με την κρυσταλλική διεύθυνση του υλικού. Μελετώντας τον προσανατολισμό των *spin* μιας περιοχής του υλικού, παρατηρείται ότι αυτά τείνουν να στραφούν παράλληλα προς συγκεκριμένες κρυσταλλικές διευθύνσεις. Αυτές οι κρυσταλλικές διευθύνσεις ονομάζονται εύκολες κρυσταλλικές διευθύνσεις.

Η τάση των *spin* να παραλληλίζονται ευκολότερα προς αυτές τις διευθύνσεις, κατά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, προκαλεί κορεσμό του υλικού σε μικρότερες τιμές εξωτερικού πεδίου, όταν το πεδίο είναι παράλληλο προς μία από τις εύκολες διευθύνσεις, σε σχέση με τις τιμές πεδίου όταν αυτό εφαρμόζεται με διαφορετικό προσανατολισμό. Η διαφορά αυτή μεταξύ των απαιτούμενων πεδίων ώστε να επιτευχθεί κορεσμός του υλικού, μεταφράζεται σε μεγαλύτερη απαιτούμενη ενέργεια.

Η επιπλέον ενέργεια ονομάζεται ενέργεια μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας και εξαρτάται από το υλικό και τη διεύθυνση εφαρμογής του πεδίου σε σχέση με τις κρυσταλλικές διευθύνσεις αυτού.

Στο σίδηρο εύκολες κρυσταλλικές διευθύνσεις είναι οι έξι διευθύνσεις [100], οι οποίες αντιστοιχούν στις ακμές της κυβικής μοναδιαίας κυψελίδας [5], [6], [7].

Μαγνητική συστολή

Το 1842 ο Joule παρατήρησε ότι το μήκος μίας ράβδου από σίδηρο μεταβαλλόταν, όταν αυτή μαγνητιζόταν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητική συστολή και πιστεύεται ότι οφείλεται στη μεταβολή του spin των ηλεκτρονίων σθένους στους σιδηρομαγνήτες [6].

Η εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε σιδηρομαγνητικό υλικό προκαλεί τη μεταβολή των ατομικών spin στο υλικό, έτσι ώστε να προσανατολιστούν προς το πεδίο. Καθότι τα τροχιακά είναι συνδεδεμένα με τα spin, όταν τα δεύτερα μεταβάλλονται, ταυτόχρονα μεταβάλλονται και τα τροχιακά ώστε να διατηρηθεί η στροφορμή. Τέλος, η μεταβολή των τροχιακών επηρεάζει τους διατομικούς δεσμούς και συνεπώς τις διατομικές αποστάσεις και τελικά το μήκος του υλικού. Η μεταβολή αυτή δεν επηρεάζει τον όγκο του υλικού καθώς διαστολή σε μία διάσταση συνοδεύεται από ταυτόχρονη συστολή στις υπόλοιπες διαστάσεις και αντίστροφα.

Ο λόγος της μεταβολής μιας διάστασης προς το αρχικό μέγεθος αυτής, ονομάζεται σταθερά μαγνητικής παραμόρφωσης και συμβολίζεται με λ . Εξαρτάται από τη διεύθυνση εφαρμογής του πεδίου σε σχέση με τις κρυσταλλικές διευθύνσεις και είναι θετική για επιμήκυνση και αρνητική για συστολή. Για εφαρμογή πεδίου παράλληλα προς μια από τις εύκολες κρυσταλλικές διευθύνσεις, η σταθερά λ είναι θετική πάντοτε [6].

2.1.4 Εμπόδιση κίνησης μαγνητικών τοιχωμάτων από κέντρα συγκράτησης

Κατά την εφαρμογή συνεχώς μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου παρατηρείται στα σιδηρομαγνητικά υλικά, μη συνεχής μεταβολή της μαγνήτισης του υλικού, αλλά μεταβολή της μαγνήτισης με μικρά άλματα. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ύπαρξη σημείων στη μάζα του υλικού που ονομάζονται **κέντρα αγκύρωσης** και τα οποία εμποδίζουν τη μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Για να ξεπεραστεί ένα κέντρο συγκράτησης, απαιτείται να προσφερθεί μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο οπότε και το μαγνητικό τοίχωμα ξεπερνά το κέντρο απότομα και μη αναστρέψιμα και συνεχίζει την κίνησή του. Κέντρα αγκύρωσης είναι τα όρια κόκκων, τα εγκλείσματα, τα διάκενα και γενικά κάθε ανομοιογένεια του κρυσταλλικού πλέγματος. Η μεταβολή της μαγνήτισης επηρεάζεται επίσης από τις παραμένουσες τάσεις του υλικού, οι οποίες καθορίζουν τη διάταξη των μαγνητικών περιοχών και τη μαγνητική ανισοτροπία αυτού.

Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

Η απότομη μετακίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων οδηγεί σε απότομη μεταβολή της μαγνήτισης του υλικού. Χρησιμοποιώντας ένα ευαίσθητο πηνίο στο υλικό είναι δυνατόν η μεταβολή αυτή να ανιχνευθεί και καταγραφεί, ονομάζεται δε θόρυβος Barkhausen από τον ήχο που παράγεται αν ο ανιχνευτής συνδεθεί σε μεγάφωνο, όπως δηλαδή έγινε την πρώτη φορά όπου και ανιχνεύθηκε το φαινόμενο.

Με τη στατιστική ανάλυση του παραγόμενου από το πηνίο σήματος καθίσταται δυνατή η μελέτη της κατάστασης του υλικού. Ειδικότερα είναι δυνατός ο εντοπισμός αλλαγών στη συγκέντρωση μικροκρυσταλλικών ατελειών καθότι αύξηση αυτών οδηγεί σε αύξηση των κέντρων συγκράτησης και άρα των απότομων μεταβολών της μαγνήτισης («άλματα» μαγνητικών τοιχωμάτων).

Με αλλαγή της διεύθυνσης μέτρησης μπορούν επίσης να ανιχνευθούν ελαστικές τάσεις και πλαστικές παραμορφώσεις. Εφαρμογή ελαστικής τάσης οδηγεί σε μεταβολή των εύκολων διευθύνσεων, οι οποίες παραλληλίζονται με τον άξονα της εφαρμοζόμενης

τάσης. Σύμφωνα με τους Caró-Sánchez et al. ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen παράγεται κυρίως από τη μετακίνηση τοιχωμάτων 180° και είναι ανάλογος του αριθμού τους. Αναφέρουν επίσης ότι οι εφαρμοζόμενες τάσεις αυξάνουν τον αριθμό των τοιχωμάτων 180° που είναι μαγνητικά προσανατολισμένα προς τη διεύθυνση εφαρμογής της τάσης. Μετρώντας το θόρυβο Barkhausen σε ένα σημείο σε διαφορετικές διευθύνσεις, είναι δυνατό να προσδιοριστεί η ύπαρξη ή όχι τάσεων στο υλικό, και να εκτιμηθεί το μέγεθος και η διεύθυνσή τους [6], [10], [11].

2.2 Αισθητήρες

Ως αισθητήρες ορίζονται οι συσκευές, οι οποίες λαμβάνουν ένα ερέθισμα και παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα (σήμα εξόδου) [12]. Η κατηγοριοποίηση τους γίνεται βάσει του ερεθίσματος στο οποίο αντιδρούν και το οποίο συνήθως είναι ένα φυσικό φαινόμενο. Οι αισθητήρες που προορίζονται για τα ίδια ερεθίσματα διαφοροποιούνται μεταξύ τους βάσει των ακόλουθων κυριότερων χαρακτηριστικών τους [13]:

1. *Συνάρτηση μεταφοράς*: είναι η σχέση μεταξύ ερεθίσματος και σήματος εξόδου.
2. *Ευαισθησία*: είναι ο λόγος μιας μικρής αλλαγής στο σήμα εξόδου προς μια μικρή αλλαγή στο ερέθισμα. Μπορεί να εκφραστεί ως η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς.
3. *Δυναμικό εύρος*: το εύρος του ερεθίσματος για το οποίο ο αισθητήρας λειτουργεί. Τιμές εκτός αυτού οδηγούν σε μεγάλη ανακρίβεια ή ακόμα και πλήρως λανθασμένο σήμα εξόδου.
4. *Ακρίβεια ή αβεβαιότητα*: ορίζεται συνήθως ως το μεγαλύτερο δυνατό σφάλμα μεταξύ του μετρούμενου σήματος εξόδου και του αναμενόμενου.
5. *Υστέρηση*: το φαινόμενο που εμφανίζεται σε ορισμένους αισθητήρες κατά το οποίο επαναλαμβανόμενη εφαρμογή και αφαίρεση του ίδιου ερεθίσματος δε δίνει το ίδιο σήμα εξόδου.
6. *Μη-γραμμικότητα (ή Γραμμικότητα)*: η μέγιστη απόκλιση από μία γραμμική συνάρτηση μεταφοράς στο δυναμικό εύρος του αισθητήρα.
7. *Θόρυβος*: η μεταβολή του σήματος εξόδου η οποία δεν προέρχεται από αντίστοιχη μεταβολή του ερεθίσματος του αισθητήρα, αλλά από ατέλειες της κατασκευής, από τα υλικά κατασκευής και από το περιβάλλον.
8. *Ανάλυση*: η ανάλυση του αισθητήρα ορίζεται ως η μικρότερη ανιχνεύσιμη μεταβολή στο ερέθισμα.
9. *Εύρος ζώνης*: ονομάζεται το εύρος συχνοτήτων στη μεταβολή του ερεθίσματος που μπορεί να ανιχνευθεί από τον αισθητήρα.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αισθητήρα είναι ένα θερμόμετρο. Υπάρχουν επίσης αισθητήρες που ανιχνεύουν αλλαγές στην επιτάχυνση, στη γωνία κ.ά.

2.2.1 Μαγνητικοί Αισθητήρες

Μεγάλη κατηγορία αισθητήρων αποτελούν οι εκείνοι, η λειτουργία των οποίων βασίζεται σε μαγνητικά φαινόμενα, δηλαδή οι μαγνητικοί αισθητήρες. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές και παράδειγμα αυτών είναι οι αισθητήρες θέσης. Οι κυριότεροι αισθητήρες που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι οι ακόλουθοι [12], [14]. Διαχωρίζονται ανάλογα με το φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η λειτουργία τους.

1. *Επαγωγικοί Αισθητήρες*: βασίζονται στο φαινόμενο της επαγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε πηνίο από μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αποτελούνται από πηνίο και κατάλληλες διατάξεις για ανάγνωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα αυτού, η οποία αποτελεί και το σήμα εξόδου. Υπάρχει περίπτωση το πηνίο να έχει και πυρήνα, ο οποίος μπορεί να κινείται ή να είναι ακίνητος, ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις.
2. *Αισθητήρες Fluxgate*: βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής σε συνδυασμό με την υστέρηση σιδηρομαγνητικού υλικού. Αποτελούνται από πυρήνα φερρομαγνητικού υλικού στον οποίο εφαρμόζεται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο από πηνίο περιελιγμένο γύρω του. Το πεδίο αυτό, περιοδικά οδηγεί το υλικό του πυρήνα στην περιοχή κορεσμού του βρόγχου υστέρησής του αλλάζοντας τη μαγνητική του διαπερατότητα. Η εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου μεταβάλλει το διάγραμμα υστέρησης του υλικού και προκαλεί μεταβολή στο σήμα εξόδου δευτερεύοντος πηνίου περιελιγμένου γύρω από τον πυρήνα [15]
3. *Αισθητήρες Μαγνητοαντίστασης*: βασίζονται στο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης, δηλαδή της αλλαγής της ηλεκτρικής αντίστασης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, κατά την εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, λόγω της ανισοτροπικής σκέδασης ασύζευκτων ηλεκτρονίων στη στοιβάδα ηλεκτρονίων αγωγιμότητας.
4. *Αισθητήρες φαινόμενου Hall*: βασίζονται στην επενέργεια της δύναμης Lorentz πάνω σε ηλεκτρόνια που κινούνται σε αγωγό ηλεκτρικού ρεύματος, όταν αυτός

βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο. Η δύναμη αυτή προκαλεί αλλαγή της πορείας των ηλεκτρονίων στον αγωγό και δημιουργία διαφοράς δυναμικού στα άκρα του αγωγού, τα οποία είναι κάθετα στη ροή του ρεύματος. Η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου [15].

5. *Μαγνητο-οπτικοί αισθητήρες*: βασίζονται κυρίως στο φαινόμενο Faraday, κατά το οποίο το επίπεδο πόλωσης γραμμικά πολωμένου φωτός περιστρέφεται, όταν αυτό διασχίζει μέσο που είναι τοποθετημένο σε μαγνητικό πεδίο παράλληλο με τη διεύθυνση διάδοσης του φωτός. Η μεταβολή αυτή είναι ανάλογη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.
6. *Μαγνητόμετρα Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού*: βασίζονται στο ότι τα πρωτόνια σε ένα πυρήνα ατόμου μπορούν να θεωρηθούν ως μαγνητικά δίπολα. Με την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου σε ένα υδρογονοανθρακούχο υγρό οι μαγνητικές τους ροπές ευθυγραμμίζονται με αυτό. Κατά την αφαίρεση του, οι μαγνητικές ροπές των πρωτονίων τείνουν να ευθυγραμμιστούν με οποιοδήποτε μαγνητικό πεδίο υπάρχει στο περιβάλλον του υγρού. Η ευθυγράμμιση αυτή οδηγεί σε κίνηση της μαγνητικής ροπής spin τους σε κύκλο με ακτίνα ανάλογη της ισχύος του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η κυκλική αυτή κίνηση παράγει εναλλασσόμενο σήμα στον αισθητήρα με συχνότητα ανάλογη της ακτίνας και άρα του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου.
7. *SQUID*: πρόκειται για αισθητήρες υψηλότατης ακριβείας που βασίζονται στην δημιουργία ρεύματος σε υπεραγωγό λόγω εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, και η ανίχνευση του ρεύματος αυτού γίνεται με τη χρήση του φαινόμενου σήραγγας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Σχεδιασμός αισθητήρα

Πριν ξεκινήσει η κατασκευή του αισθητήρα απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων με τις οποίες θα γίνει η μέτρηση καθώς επίσης και των παραμέτρων που είναι σχετικές με τη λειτουργία αυτού.

Πρωταρχικός στόχος ήταν η διάταξη να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος και να είναι φορητή χωρίς όμως να μειώνεται η ακρίβεια των μετρήσεων. Επιλέχθηκε επίσης η διάταξη να αποτελείται από το πηνίο λήψης εντός του πηνίου διέγερσης, όπως προτείνεται από την ASM [4]. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο να χρησιμοποιηθούν οικονομικές διατάξεις και ηλεκτρονικά κυκλώματα με μεγάλη διαθεσιμότητα στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

3.1.1 Όρια συχνοτήτων προς λήψη, επεξεργασία και καταγραφή

Η επιλογή του εύρους συχνοτήτων παίζει καθοριστικό ρόλο στο συνολικό σχεδιασμό του τμήματος λήψης σήματος του αισθητήρα. Το ανώτερο κυρίως αλλά και το κατώτερο όριο λήψης επηρεάζουν άμεσα το σχεδιασμό των διατάξεων αλλά και του πηνίου λήψης. Οι διαφορές μεταξύ των διαφόρων τύπων διατάξεων είναι σημαντικές από άποψη σχεδιασμού και κόστους, καθιστώντας απαραίτητο τον προσδιορισμό του απαιτούμενου εύρους συχνοτήτων προς καταγραφή. Ορίστηκε ως ανώτερη συχνότητα λήψης το 1 MHz και ως κατώτερη συχνότητα λήψης τα 7 kHz. Η επιλογή του κατώτερου ορίου έγινε έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Ειδικότερα, οι Stupakov et al. χρησιμοποιούν ως κατώτερη συχνότητα τα 2 kHz, καθότι μετρήσεις τους έδειξαν ότι ιδιαίτερα οι αρμονικές της τροφοδοσίας από το δίκτυο ηλεκτρισμού ήταν στην περιοχή 1-3 kHz, ενώ οι S. White et al. χρησιμοποιούν 3 kHz [16], [17]. Με την επιλογή να χρησιμοποιηθεί συχνότητα 7 kHz ως κατώτερη συχνότητα, διατηρούνται οι συχνότητες της περιοχής των 10 kHz, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη μέτρηση και την ανάλυση του

θορύβου Barkhausen, σύμφωνα με τους Stupakov et al. Ταυτόχρονα, έτσι επιτυγχάνεται η πλήρης αποκοπή όλων των συχνοτήτων κάτω των 5 kHz [16].

Το ανώτερο όριο αποκοπής επιλέχθηκε αρκετά υψηλότερα από ότι αναφέρεται βιβλιογραφικά (για παράδειγμα οι J. Anglada Rivera et al. χρησιμοποιούν 200 kHz ενώ οι J. Caro-Sanchez et al χρησιμοποιούν 100 kHz [10], [18]), ώστε να παρέχει μεγαλύτερο εύρος τιμών και να επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή της αισθητήριας διάταξης στο μέλλον.

3.1.2 Τύπος πηνίου λήψης

Ανάλογα με την προοριζόμενη χρήση του αισθητήρα υπάρχουν δύο συνήθως χρησιμοποιούμενοι τύποι πηνίων. Στον πρώτο τύπο, η περιέλιξη του πηνίου πραγματοποιείται γύρω από το δείγμα, οπότε γίνεται λήψη σήματος περιμετρικά του δείγματος από όλη τη μάζα αυτού. Στο δεύτερο τύπο, το πηνίο τυλίγεται γύρω από πυρήνα αποτελούμενο είτε από αέρα, είτε από κάποιο υλικό και γίνεται λήψη του επιφανειακού θορύβου Barkhausen [6], [16] - [18]. Η πρώτη διάταξη συνηθίζεται να εφαρμόζεται σε εργαστηριακό περιβάλλον, ενώ η δεύτερη σε βιομηχανικό και ειδικότερα σε μη καταστροφικούς ελέγχους υλικών και βιομηχανικών προϊόντων. Επιλέχθηκε η δεύτερη διάταξη, λόγω της φορητότητάς της, της ικανότητας ελέγχου δοκιμίων ανεξαρτήτως σχήματος και της ακρίβειάς της στις θέσεις ύπαρξης ατελειών.

Πειραματικά έγινε προσπάθεια χρήσης μαγνητικών κεφαλών από διάφορες συσκευές προκειμένου να μελετηθεί η πιθανότητα χρήσης αυτών στη θέση του πηνίου λήψης. Μελετήθηκαν κεφαλές ανάγνωσης και εγγραφής από μονάδα δισκετών υπολογιστή από τις οποίες όμως δεν κατέστη δυνατό να παραχθεί κυματομορφή που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του θορύβου Barkhausen. Επιπρόσθετα, μελετήθηκαν κεφαλές από διάφορα μοντέλα συσκευών αναπαραγωγής ηχητικών κασετών, οι οποίες όμως δε λειτουργούσαν σε όλο το επιλεγμένο προς δειγματοληψία εύρος συχνοτήτων.

3.1.3 Κυματομορφή διέγερσης

Η κυματομορφή διέγερσης μπορεί να πάρει δύο μορφές: ημιτονοειδής και τριγωνική. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κυματομορφή αλλάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Χρησιμοποιήθηκε τριγωνική κυματομορφή διέγερσης για την οποία ισχύει ότι:

$$\frac{dI}{dt} = \text{σταθερό}$$

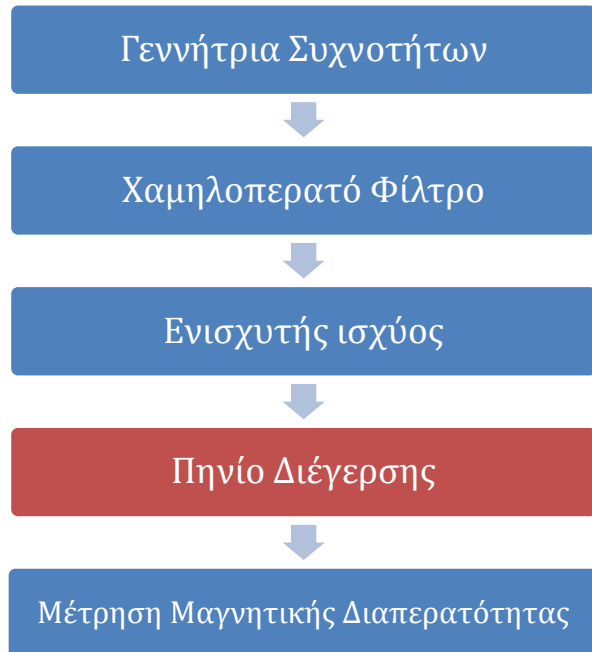
όπου I το ρεύμα στο πηνίο διέγερσης και t ο χρόνος.

Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο είναι τότε ανάλογο του ρεύματος, οπότε η μεταβολή του είναι σταθερή [3], [19], [20].

Η συχνότητα της κυματομορφής της διέγερσης παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη μέτρηση, διότι το βάθος διείσδυσης επηρεάζεται από αυτή λόγω του επιδερμικού φαινομένου, με τις μεγαλύτερες συχνότητες να μειώνουν σημαντικά το βάθος διείσδυσης. Αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλές συχνότητες διέγερσης, ακόμα και κάτω του 1 Hz, ώστε οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού να μην επηρεάζουν τη μέτρηση και αυτή να εξαρτάται αποκλειστικά από το θόρυβο Barkhausen.

3.2 Διάταξη αισθητήρα

Ο αισθητήρας που κατασκευάστηκε αποτελείται από μία διάταξη διέγερσης του προς εξέταση δείγματος και μία διάταξη ανίχνευσης, ενίσχυσης και καταγραφής του δημιουργούμενου σήματος. Στο Διάγραμμα 1 απεικονίζεται η τελική διάταξη διέγερσης και στο Διάγραμμα 2 η τελική διάταξη λήψης. Στα διαγράμματα αυτά με μπλε πλαίσιο συμβολίζεται το ηλεκτρονικό μέρος και με κόκκινο πλαίσιο το ηλεκτρομηχανικό μέρος.



Διάγραμμα 1 - Τελική διάταξη διέγερσης



Διάγραμμα 2 - Τελική διάταξη λήψης

3.3 Ηλεκτρομηχανικό μέρος αισθητήρα

3.3.1 Πηνίο λήψης

Για τη μέτρηση του παραγόμενου σήματος κατασκευάστηκε ειδικό πηνίο από λεπτό σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.05 mm, επικαλυμμένο με βερνίκι. Το πηνίο τυλίχθηκε στο χέρι πάνω σε γυάλινη πιπέτα μικρής διαμέτρου με τη βοήθεια πλαστικών οδηγών και σχηματίστηκαν 1340 σπείρες. Η τελική διάμετρος του πηνίου ήταν 1 cm και το πάχος του 0.4 cm. Στη συνέχεια, το πηνίο εγκιβωτίστηκε σε ρητίνη για να αυξηθεί η μηχανική του αντοχή.

Το πηνίο επιλέχθηκε να κατασκευαστεί χωρίς πυρήνα (με πυρήνα αέρα). Η επιλογή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα ότι, μετά την αφαίρεση της απόκρισης Bode του πηνίου, οι παραγόμενες κυματομορφές επηρεάζονται μόνο από το θόρυβο Barkhausen του υλικού και όχι από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα. Το πηνίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



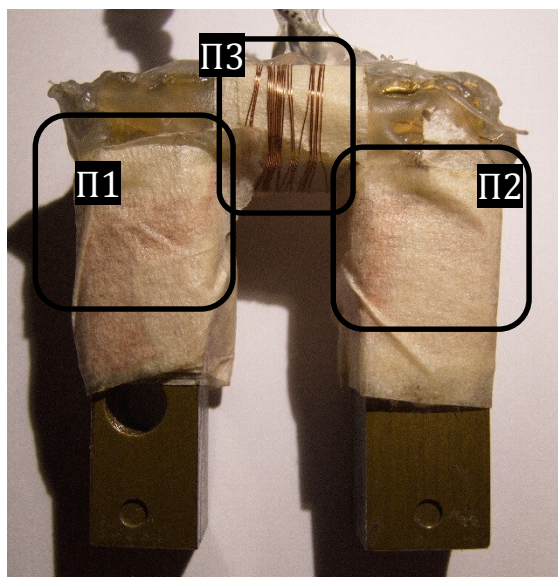
Εικόνα 2 - Εγκιβωτισμένο πηνίο λήψης

Η έλλειψη πυρήνα οδηγεί σε μείωση της τάσης του παραγόμενου σήματος στα άκρα του πηνίου, και σε υποβιβασμό της ευαισθησίας του [16]. Για να αντισταθμιστεί ο υποβιβασμός αυτός, τυλίχθηκαν πολλές σπείρες στο πηνίο και προστέθηκε ένα στάδιο προενίσχυσης, μεγάλης ευαισθησίας, αμέσως μετά το πηνίο.

3.3.2 Πηνίο διέγερσης

Το πηνίο διέγερσης αποτελείται από ένα πυρήνα σχήματος «Π», κατασκευασμένου από λεπτά φύλλα κράματος σιδήρου - πυριτίου με προσανατολισμένους κόκκους (ηλεκτρικός χάλυβας). Στο κάθε ένα από τα δύο άκρα τυλίχθηκαν 160 σπείρες χάλκινου σύρματος, διαμέτρου 0.3 mm, επικαλυμμένου με βερνίκι. Τα άκρα των δύο πηνίων που κατασκευάστηκαν με αυτόν τον τρόπο, ενώθηκαν εν σειρά, έτσι ώστε το παραγόμενο στο κάθε πηνίο, μαγνητικό πεδίο να έχει αντίθετη κατεύθυνση και τελικά το συνολικό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από αυτά, να κυκλοφορεί μεταξύ τους μέσω του πυρήνα.

Πάνω στον πυρήνα, στο χώρο μεταξύ των δύο πηνίων τυλίχτηκε ένα τρίτο πηνίο αποτελούμενο από 20 σπείρες ίδιου σύρματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας μέσω της μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Η μέτρηση αυτή επηρεάζεται άμεσα από το υλικό, το οποίο ελέγχεται και από την επαφή του με το πηνίο διέγερσης, οπότε χρησιμοποιήθηκε ως ένδειξη της ποιότητας της επαφής του πηνίου διέγερσης με το δείγμα και άρα της ποιότητας της μέτρησης.



Εικόνα 3 - Πηνίο διέγερσης. Τα Π1, Π2 είναι τα πηνία διέγερσης ενώ το Π3 είναι το πηνίο μέτρησης μαγνητικής ροής.

3.4 Ηλεκτρονικό μέρος αισθητήρα

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που αποτελούν μέρος του αισθητήρα σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με γνώμονα την επίτευξη ακρίβειας στις μετρήσεις και το χαμηλό κόστος. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση κατά το σχεδιασμό, ούτως ώστε τα ηλεκτρονικά κυκλώματα των διαφόρων σταδίων λειτουργίας του αισθητήρα να είναι τοποθετημένα κατά ομάδες σε διαφορετικές πλακέτες. Με αυτό τον τρόπο είναι εύκολο να γίνουν αλλαγές και βελτιώσεις στη λειτουργία του κάθε μέρους του αισθητήρα χωριστά, ενώ είναι εύκολη και η επιδιόρθωση οποιουδήποτε προβλήματος προκύψει κατά τη λειτουργία του.

Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα καθώς και οι τυπωμένες πλακέτες αυτών σχεδιάστηκαν αρχικά σε υπολογιστή με το πρόγραμμα EAGLE της εταιρείας Cadsoft, και όπου κρίθηκε απαραίτητο, έγινε προσομοίωση της συμπεριφοράς τους με τη χρήση του προγράμματος PSPICE. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν οι τυπωμένες πλακέτες με χρήση τεχνικών οπτικής λιθογραφίας με υπεριώδη ακτινοβολία.

Κάθε πλακέτα που κατασκευάστηκε έχει δική της σύνδεση τροφοδοσίας και γείωσης με τις απαραίτητες διατάξεις ομαλοποίησης και φιλτραρίσματος της τροφοδοσίας, χρησιμοποιώντας κεραμικούς πυκνωτές και πυκνωτές τανταλίου σε παράλληλη σύνδεση.

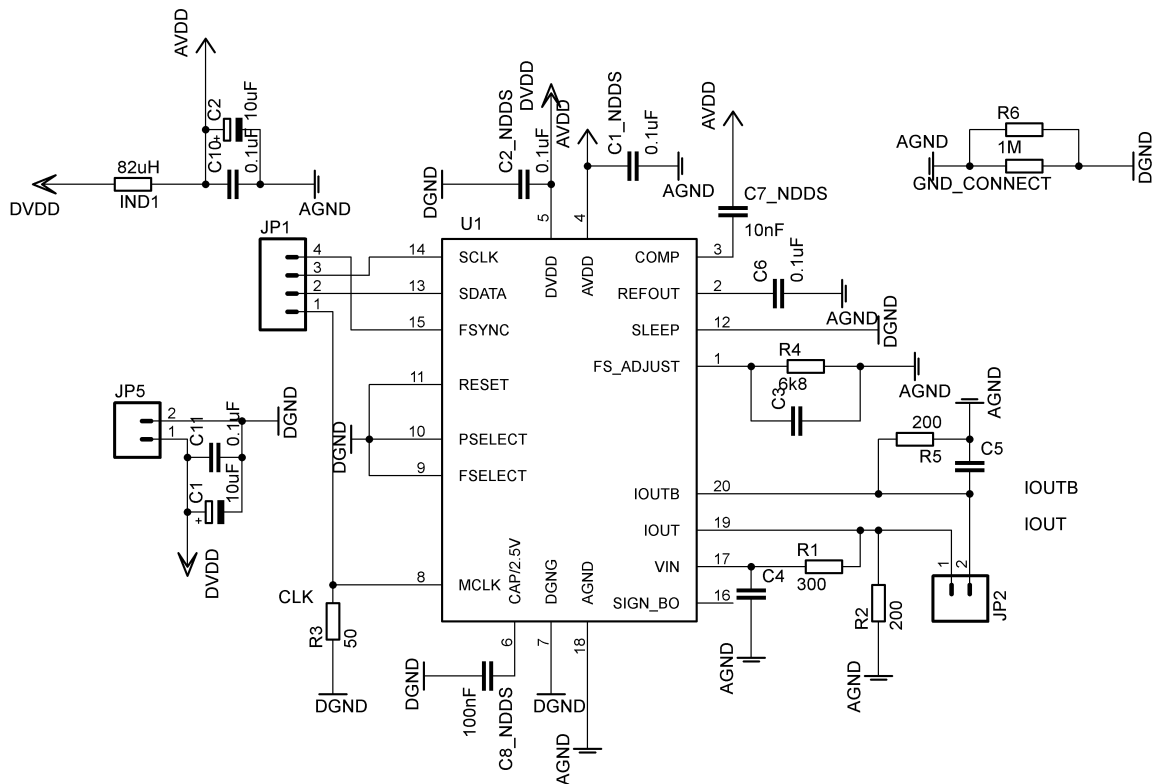
3.4.1 Γεννήτρια συχνοτήτων

Προκειμένου να παραχθεί η απαραίτητη κυματομορφή για τη διέγερση του δείγματος και την παραγωγή θορύβου Barkhausen, κατασκευάστηκε γεννήτρια συχνοτήτων βασισμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα AD9834 της εταιρείας Analog Devices. Πρόκειται για μία ολοκληρωμένη γεννήτρια ημιτονοειδών, τριγωνικών και παλμικών κυματομορφών που βασίζεται στη ψηφιακή σύνθεση κυμάτων. Έχει ικανοποιητική ανάλυση (24-bit ανάλυση στη ρύθμιση της παραγόμενης συχνότητας) και σημαντική ακρίβεια παραγόμενης κυματομορφής. Χρησιμοποιήθηκε η προτεινόμενη από τον κατασκευαστή συνδεσμολογία, ενώ

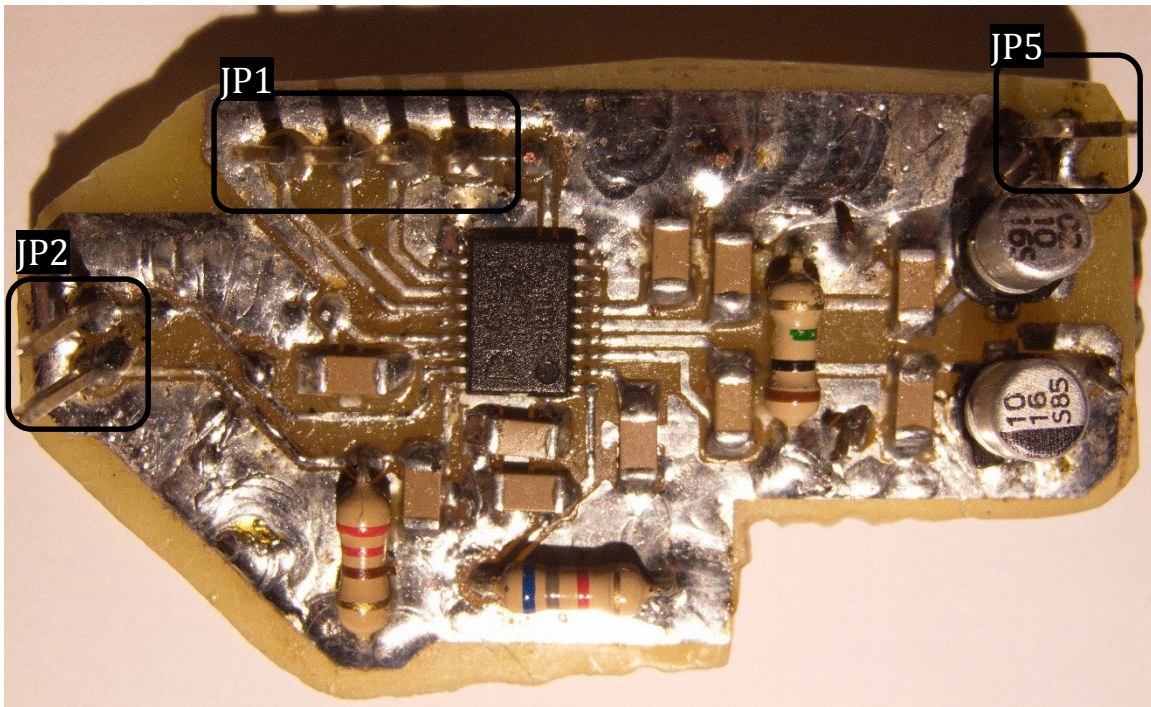
κατά το σχεδιασμό η πλακέτα χωρίστηκε σε αναλογικές και ψηφιακές περιοχές με ξεχωριστή γείωση και τροφοδοσία όπως προτείνεται από τον κατασκευαστή [21].

Για την απαραίτητη ρύθμιση της γεννήτριας σε κάθε εκκίνηση του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε κατάλληλα προγραμματισμένος μικροεπεξεργαστής.

Το κύκλωμα που σχεδιάστηκε για τη γεννήτρια συχνοτήτων φαίνεται στην Εικόνα 4 και στην Εικόνα 5 φαίνεται η τελική πλακέτα που κατασκευάστηκε.



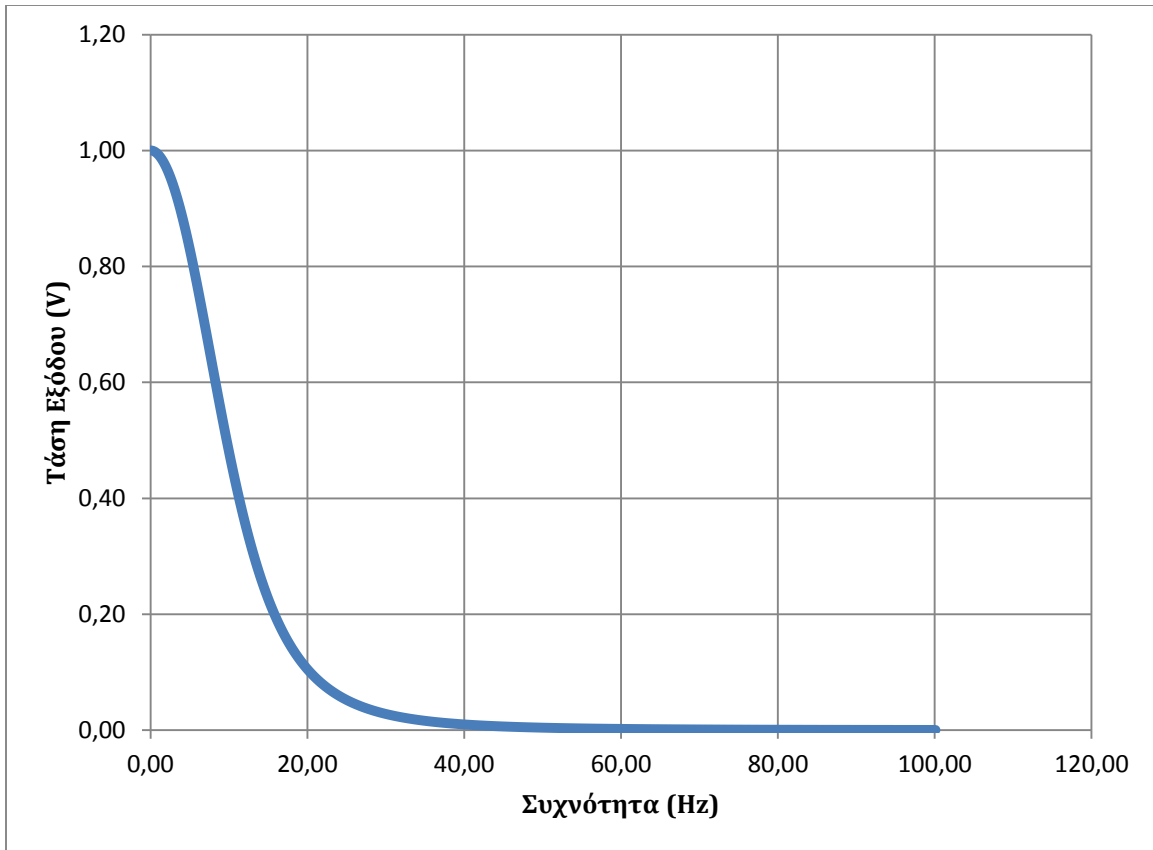
Εικόνα 4 - Σχέδιο κυκλώματος γεννήτριας συχνοτήτων. Το JP1 είναι η σύνδεση με τον μικροεπεξεργαστή, το JP2 η έξοδος του σήματος και το JP5 η σύνδεση της τροφοδοσίας.



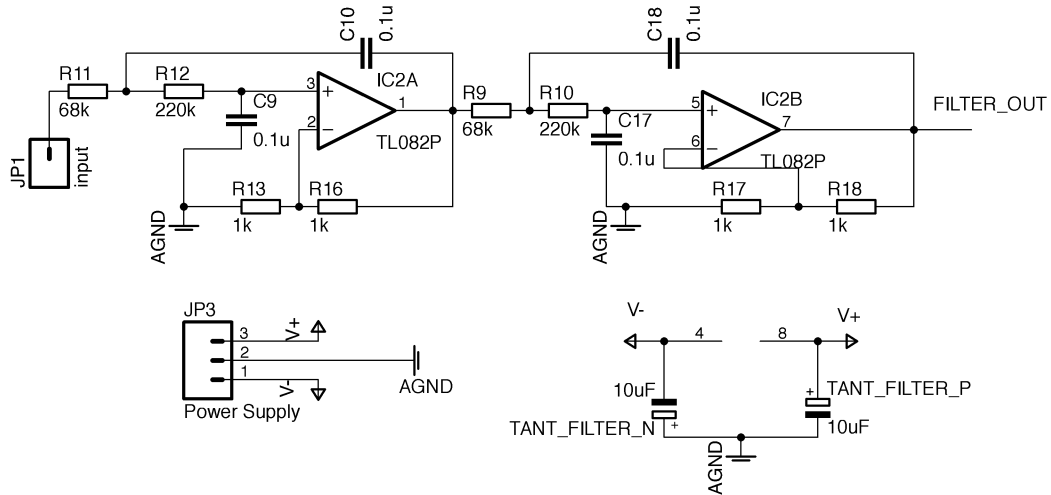
Εικόνα 5 - Τελική πλακέτα γεννήτριας συχνότητων. Σημειώνονται τα JP1, JP2 και JP5.

3.4.2 Χαμηλοπερατό φίλτρο

Στην έξοδο της γεννήτριας παρατηρήθηκε η ύπαρξη υψίσυχνου σήματος χαμηλής έντασης, λόγω του τρόπου σύνθεσης της κυματομορφής καθώς και της μικρής απόστασης μεταξύ των γραμμών που μεταφέρουν ψηφιακά σήματα και των γραμμών που μεταφέρουν αναλογικό σήμα από την έξοδο της γεννήτριας. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στο παραγόμενο σήμα και τελικά στη μέτρηση, σχεδιάστηκε διάταξη χαμηλοπερατού φίλτρου με μικρή ενίσχυση, βασισμένο στον τελεστικό ενισχυτή TL-082 της εταιρείας Texas Instruments και στο σχέδιο που έδινε ο ίδιος ο κατασκευαστής [22]. Ο συγκεκριμένος ενισχυτής επιλέχθηκε για τη σημαντική ακρίβεια που προσφέρει, ιδιαίτερα σε μικρά σήματα. Επίσης, χάρη στις εισόδους JFET που διαθέτει, επηρεάζει ελάχιστα το σήμα στην είσοδό του. Το φίλτρο που σχεδιάστηκε ήταν 4^{ης} τάξης. Έγινε προσομοίωση του τελικού κυκλώματος με το πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων PSPICE, μέσω της οποίας δημιουργήθηκε το διάγραμμα της συχνοτικής απόκρισης του φίλτρου. Το τελικό κύκλωμα και το διάγραμμα της συχνοτικής απόκρισης αυτού, παρουσιάζονται παρακάτω.



Διάγραμμα 3 - Συχνωτική απόκριση χαμηλοπερατού φίλτρου. Η τάση εισόδου είναι 1V.



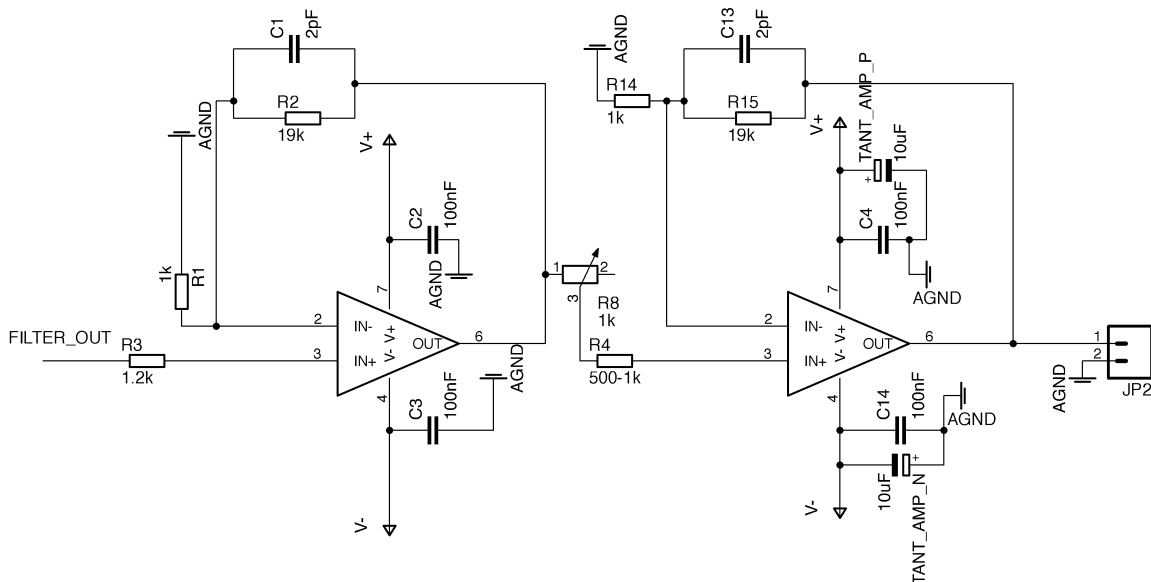
Εικόνα 6 - Ηλεκτρικό κύκλωμα χαμηλοπερατού φίλτρου.

3.4.3 Ενισχυτής ισχύος

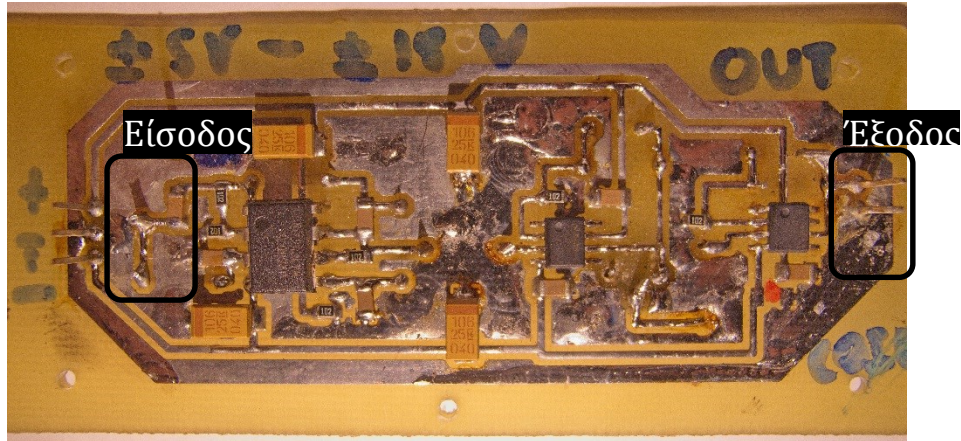
Το παραγόμενο από τη γεννήτρια συχνοτήτων σήμα, είναι της τάξης των $\pm 250\text{mV}$ από κορυφή σε κορυφή. Απαιτείται δηλαδή σημαντική ενίσχυση, ώστε να χρησιμοποιηθεί το σήμα για τη δημιουργία του πεδίου διέγερσης. Η έξοδος του φίλτρου, οδηγήθηκε στον ενισχυτή ισχύος. Ο ενισχυτής ισχύος αποτελείται από δύο στάδια ενίσχυσης, με ενίσχυση του σήματος 10 φορές στο κάθε στάδιο και άρα συνολική ενίσχυση του σήματος 100 φορές σε σχέση με το αρχικό. Το κάθε στάδιο αποτελείται από ένα τελεστικό ενισχυτή ισχύος LM7171A της εταιρείας Texas Instruments. Ο ενισχυτής αυτός επιλέχθηκε καθώς μπορεί να παράγει ρεύματα μέχρι 200mA στην έξοδο του, έχει μεγάλη ακρίβεια σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων, μπορεί να λειτουργεί με τροφοδοσία $\pm 5\text{V}$ ή $\pm 15\text{V}$ και τέλος, έχει μικρό κόστος [23].

Επιλέχθηκε το χαμηλοπερατό φίλτρο και ο ενισχυτής ισχύος να τοποθετηθούν σε κοινή πλακέτα και μάλιστα ιδιαίτερα κοντά μεταξύ τους με κοινή τροφοδοσία, ούτως ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια της παραγόμενης κυματομορφής.

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται το κύκλωμα του ενισχυτή ισχύος, και στην Εικόνα 8 φαίνεται η τελική διάταξη που κατασκευάστηκε.



Εικόνα 7 - Ηλεκτρικό κύκλωμα ενισχυτή ισχύος.



Εικόνα 8 - Τελική διάταξη χαμηλοπερατού φίλτρου και ενισχυτή ισχύος. Φαίνονται η είσοδος και η έξοδος.

3.4.4 Προενισχυτής σήματος

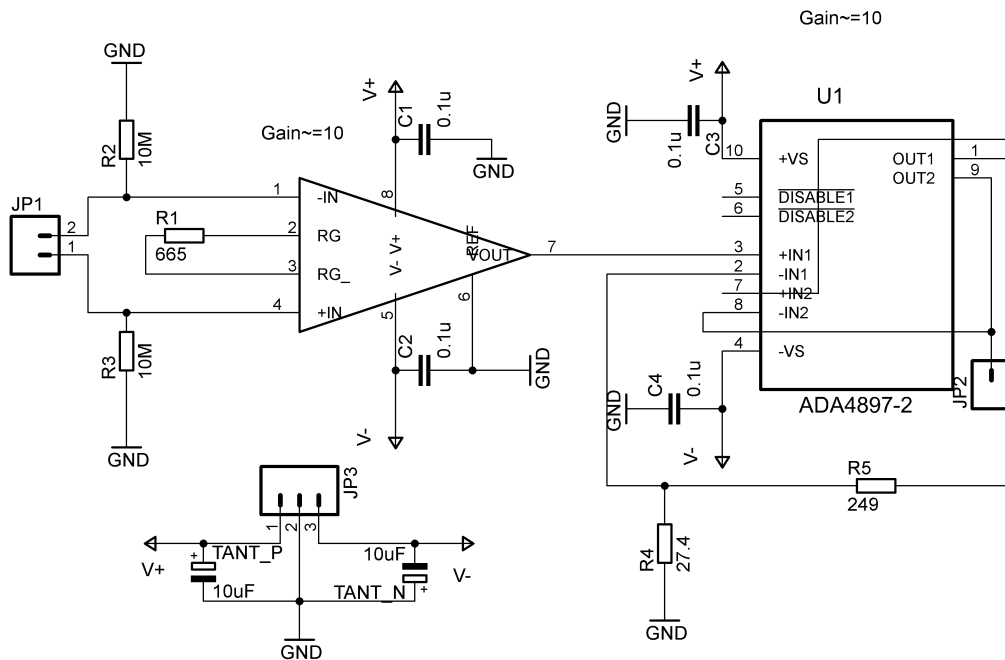
Λόγω της έλλειψης πυρήνα στο πηνίο λήψης, το παραγόμενο σήμα είναι πολύ μικρό, της τάξης των 100 nV από κορυφή σε κορυφή. Προκειμένου να μπορεί να ανιχνευθεί στη συνέχεια, απαιτείται σημαντική ενίσχυσή του και μάλιστα, για να μειωθεί η επίδραση εξωτερικού θορύβου, απαιτείται ένα στάδιο της ενίσχυσης αυτής να γίνει όσο πιο κοντά γίνεται στο πηνίο λήψης. Δημιουργείται, λοιπόν, η ανάγκη για ξεχωριστό στάδιο προενίσχυσης.

Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστικός ενισχυτής (instrumentation amplifier), ώστε να ενισχυθεί αρχικά το σήμα του πηνίου περίπου κατά 10 φορές και ταυτόχρονα, λόγω του τρόπου λειτουργίας του ενισχυτή, να ενισχύεται μόνο η διαφορά τάσης μεταξύ των δύο πόλων του πηνίου.

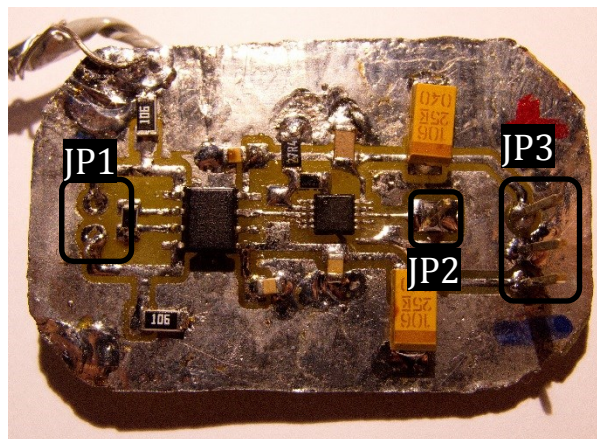
Επιλέχθηκε ο ενισχυτής AD8429 της εταιρείας Analog Devices, λόγω του πολύ χαμηλού θορύβου που εισάγει στο σήμα στην είσοδο ($1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), της υψηλής απόρριψης κοινού σήματος και της ευκολίας επιλογής του βαθμού ενίσχυσης. Επιλέχθηκε να λειτουργήσει σε ενίσχυση περίπου 10 φορές, διότι αν η ενίσχυση είναι 100 φορές, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, μειώνεται ο βαθμός ενίσχυσης για σήματα συχνότητας άνω των 300 kHz [24].

Η ενίσχυση σε αυτό το στάδιο κατά 10 φορές, παράγει σήμα της τάξης του 1 μV από κορυφή σε κορυφή, και άρα πολύ ευαίσθητο σε εξωτερικό θόρυβο. Επιλέχθηκε να προστεθεί ένα δεύτερο στάδιο ενίσχυσης αμέσως μετά, ώστε να προστατευτεί περαιτέρω το σήμα. Στο δεύτερο αυτό στάδιο χρησιμοποιήθηκε ένας τελεστικός ενισχυτής ADA4897-2, επίσης της εταιρείας Analog Devices. Ο συγκεκριμένος ενισχυτής έχει πολύ χαμηλό θόρυβο και πολύ καλή συχνοτική απόκριση. Οι τιμές των αντιστάσεων επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή ώστε ο ενισχυτής του δεύτερου σταδίου να ενισχύει το σήμα 10 φορές με αποτέλεσμα, η συνολική ενίσχυση του προ ενισχυτή να είναι 100 φορές. Λόγω διαθεσιμότητας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση αυτού με δύο ενισχυτές σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ο δεύτερος ενισχυτής ρυθμίστηκε απλά ως τελεστικός ενισχυτής μοναδιαίας ενίσχυσης [25].

Οι δυο αυτοί ενισχυτές τοποθετήθηκαν σε κοινή πλακέτα και με μικρή απόσταση μεταξύ τους για να ελαχιστοποιηθεί η παραμόρφωση του σήματος που ενισχύεται. Στην Εικόνα 9 εμφανίζεται το τελικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε και τέλος, στην Εικόνα 10 η κατασκευασμένη πλακέτα.



Εικόνα 9 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος προενισχυτή. Το JP1 είναι η είσοδος από το πηνίο λήψης, το JP2 η έξοδος και το JP3 η τροφοδοσία.



Εικόνα 10 - Τελική κατασκευή προενισχυτή σήματος. Φαίνονται τα JP1, JP2 και JP3.

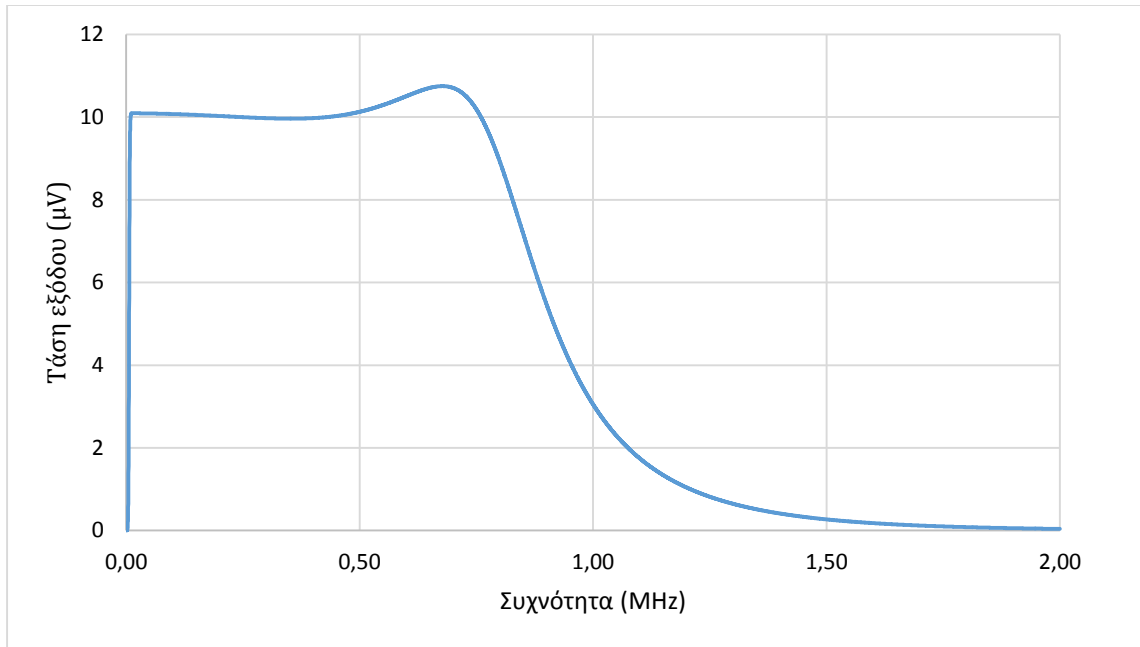
3.4.5 Φίλτρο συχνοτήτων

Η υψηλή ευαισθησία της αισθητήριας διάταξης έχει ως συνέπεια την ύπαρξη σημαντικού ποσού συχνοτικού περιεχομένου άσχετου με το θόρυβο Barkhausen. Για να διευκολυνθεί η μετέπειτα ανάλυση και να γίνει πιο ξεκάθαρη η ύπαρξη καθώς επίσης και η μορφή αυτού, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο συχνοτήτων στην έξοδο του προενισχυτή. Το φίλτρο είναι ζωνοπερατό και αποτελείται από δύο επιμέρους φίλτρα:

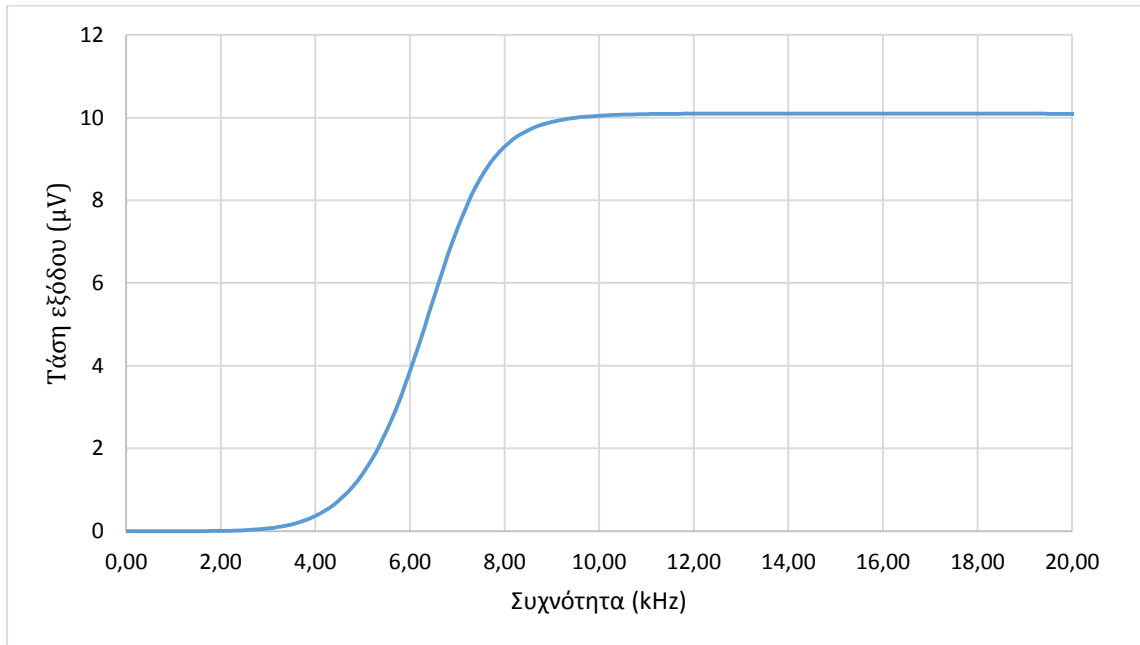
- Ένα χαμηλοπερατό φίλτρο 8^{ης} τάξης, τοπολογίας Sallen – Key με συχνότητα αποκοπής το 1 MHz.
- Ένα υψιπερατό φίλτρο 6^{ης} τάξης, τοπολογίας Sallen – Key με συχνότητα αποκοπής τα 7 kHz.

Οι συχνότητες αποκοπής των φίλτρων επιλέχθηκαν έτσι, ώστε το υψιπερατό φίλτρο να αποκόπει το θόρυβο από το περιβάλλον και τη συχνότητα μαγνήτισης, καθώς επίσης και τις αρμονικές τους, ενώ το χαμηλοπερατό να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις σχεδιασμού του αισθητήρα. Στην Εικόνα 11 εμφανίζεται το κύκλωμα του χαμηλοπερατού φίλτρου, στην Εικόνα 12 το κύκλωμα του υψιπερατού φίλτρου και τέλος στο Διάγραμμα 4 και στο Διάγραμμα 5 εμφανίζεται η συχνοτική απόκριση του συστήματος προενισχυτής – φίλτρο όπως υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος PSPICE. Οι τιμές των αντιστάσεων και πυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν θεωρητικά, μέσω της επίλυσης των κανονικοποιημένων πολωνύμων του Butterworth για τις αντίστοιχες τάξεις φίλτρων και στη συνέχεια, τα αποτελέσματα βελτιστοποιήθηκαν με χρήση του προγράμματος PSPICE [26].

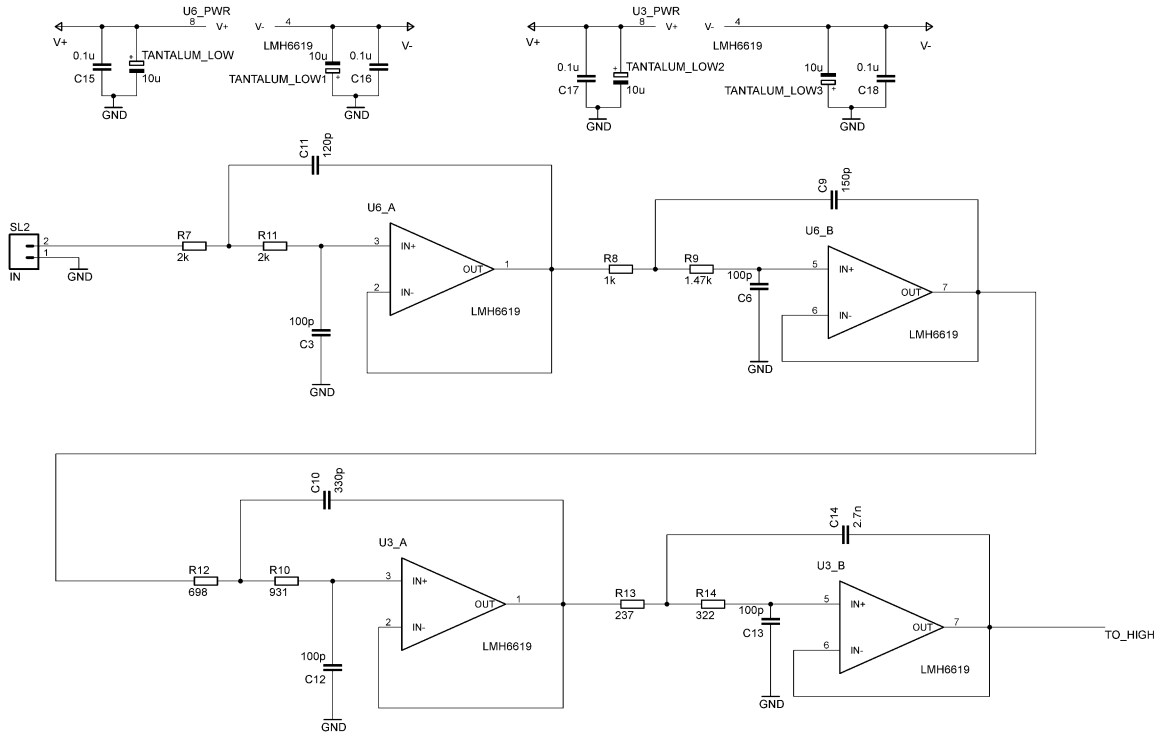
Οι τελεστικοί ενισχυτές που χρησιμοποιήθηκαν, ανήκουν στην οικογένεια LMH6618 και LMH6619 της εταιρείας Texas Instruments. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή τους, είναι ειδικά σχεδιασμένα για χρήση σε ενεργά φίλτρα, έχουν μεγάλο εύρος ζώνης οπότε δεν επηρεάζουν τις υψηλότερες συχνότητες και έχουν πολύ χαμηλό θόρυβο εισόδου και εξόδου [27].



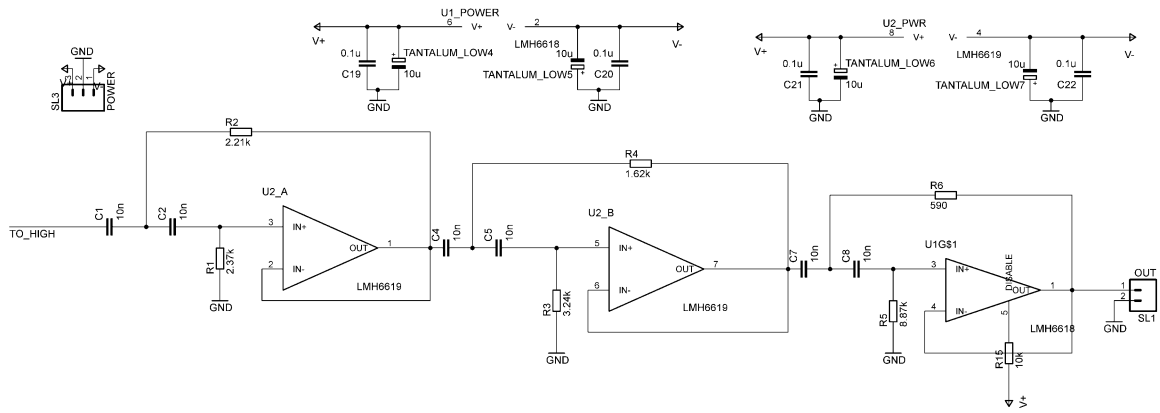
Διάγραμμα 4 - Συχνотική απόκριση συστήματος προενισχυτή - φίλτρου. Η τάση εισόδου είναι 100 nV



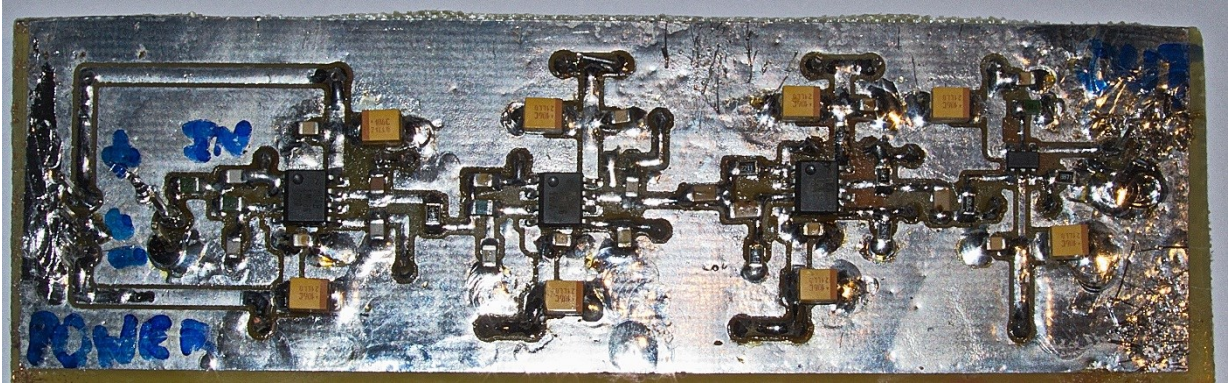
Διάγραμμα 5 - Λεπτομέρεια από το Διάγραμμα 4. Απεικονίζεται η περιοχή 0-20 kHz.



Εικόνα 11 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος χαμηλοπερατού φίλτρου.



Εικόνα 12 - Σχέδιο ηλεκτρικού κυκλώματος υψηροπερατού φίλτρου.



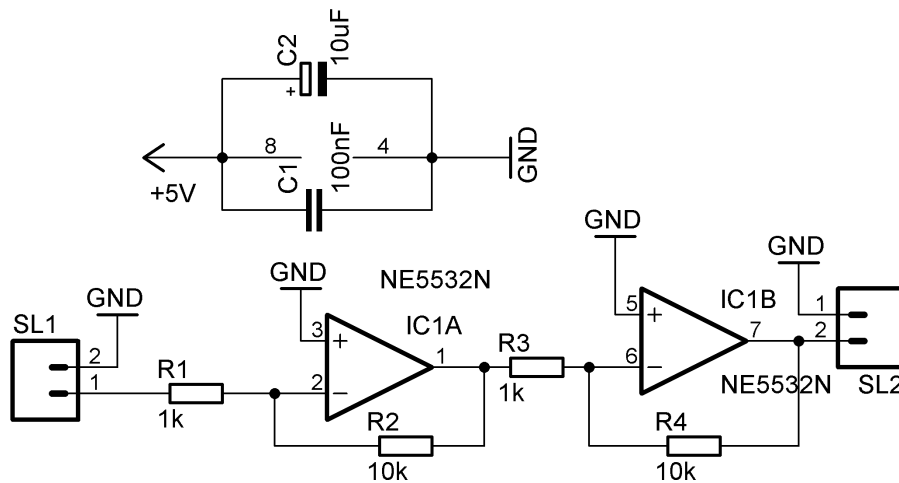
Εικόνα 13 - Τελική πλακέτα ζωνοπερατού φίλτρου.

3.4.6 Τελική ενίσχυση και καταγραφή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σήμα από το πηνίο λήψης είναι πολύ χαμηλό της τάξης των 100 nV. Μετά την ενίσχυση από τον προενισχυτή (100 φορές) είναι της τάξης των 10 μ V. Απαιτείται δηλαδή περαιτέρω ενίσχυση πριν την καταγραφή τουλάχιστον άλλες 100 φορές, ώστε να είναι το σήμα της τάξης του 1mV και να υπερिσχύσει του περιβάλλοντος θορύβου.

Χρησιμοποιήθηκε ο ενισχυτής NE5532 της εταιρείας Texas Instruments λόγω του χαμηλού κόστους του, του σχετικά χαμηλού θορύβου του, και του ικανοποιητικού εύρους ζώνης του [28].

Αν και σχεδιάστηκε κύκλωμα για τον τελικό ενισχυτή το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 14, δεν κατασκευάστηκε τυπωμένη πλακέτα για αυτόν, καθότι θεωρήθηκε ότι ο ενισχυτής αυτός διαφοροποιείται ανάλογα της μεθόδου που γίνεται η καταγραφή. Σε περίπτωση που αυτή γίνεται με χρήση παλμογράφου, όπως έγινε στην παρούσα εργασία, είναι ικανοποιητικός αλλά σε περίπτωση χρήσης ψηφιοποιητή απαιτείται να αυξηθεί η ενίσχυση του.



Εικόνα 14 - Τελικός ενισχυτής. Στο SL1 είναι η είσοδος από το φίλτρο και στο SL2 η έξοδος προς τον παλμογράφο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

4.1 Μετρήσεις

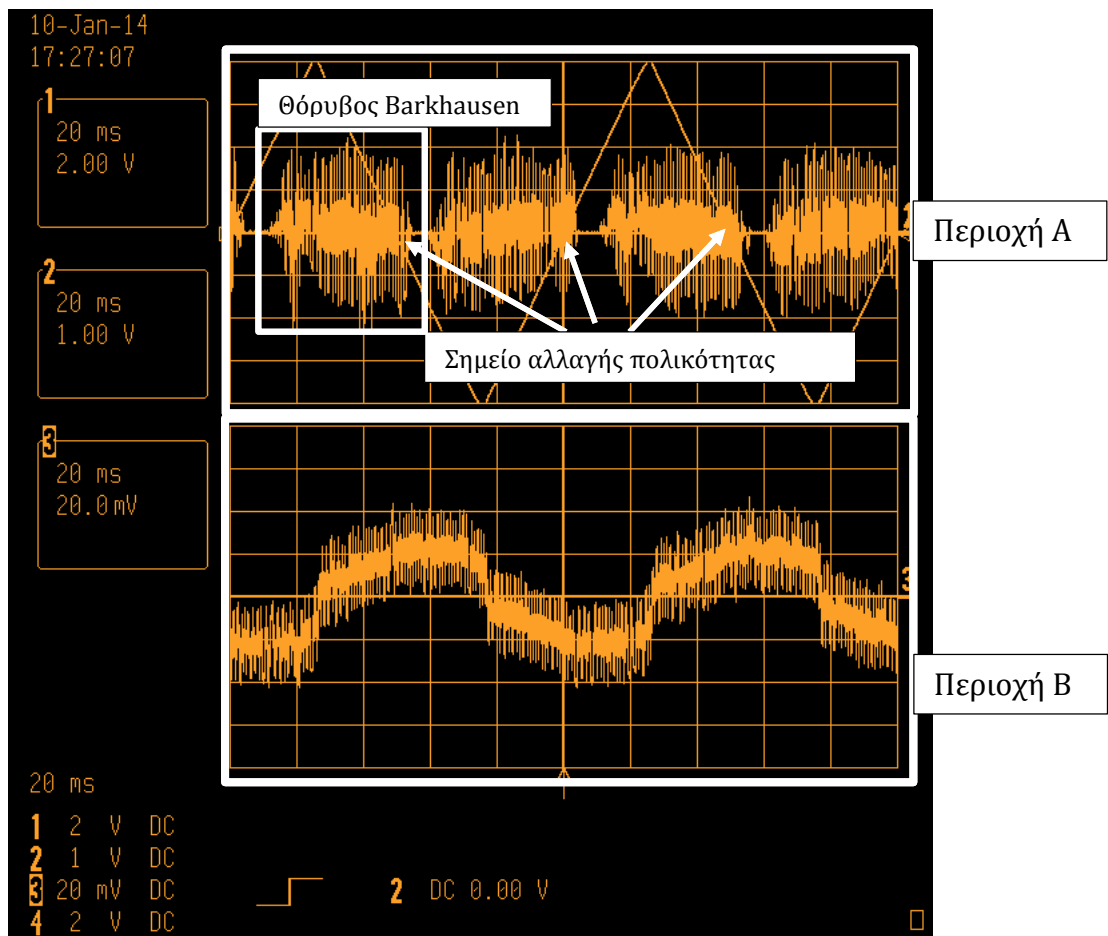
Προκειμένου να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία της διάταξης, χρησιμοποιήθηκε αυτή για να γίνει έλεγχος δοκιμίων, ήδη μετρημένων με εμπορική συσκευή. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικούς τύπους χάλυβα. Το κάθε δοκίμιο μετρήθηκε σε δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους για να εντοπιστεί οποιαδήποτε αλλαγή στη μέτρηση που προκύπτει από τις εύκολες κρυσταλλικές διευθύνσεις και να προσδιοριστούν οποιεσδήποτε τάσεις υπάρχουν σε αυτό, όπως για παράδειγμα εκείνες που οφείλονται σε έλαση ή συγκόλληση.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια των εργαστηριακών δοκιμών ήταν τμήματα από ηλεκτρικό χάλυβα, κοινό (ανθρακούχο) υποευτηκτοειδή χάλυβα, ηλεκτρικό χάλυβα στον οποίο είχε γίνει συγκόλληση και τέλος χάλυβα τύπου TRIP. Τα δείγματα και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε κατά τη διάρκεια πολλαπλών μετρήσεων σε ένα δοκίμιο, να διατηρηθεί σταθερή η μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας, δηλαδή να είναι σταθερή η επαφή δείγματος -πηνίων.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παλμογράφου LeCroy 9314L και αποθηκεύτηκαν με τη χρήση ειδικού λογισμικού του κατασκευαστή. Στις εικόνες που προέκυψαν εμφανίζονται τα τρία κανάλια της κάθε μέτρησης χωρισμένα σε δύο περιοχές μαζί με τις ρυθμίσεις τους. Στην Εικόνα 15 εμφανίζεται μία χαρακτηριστική εικόνα που παράχθηκε από το λογισμικό του παλμογράφου. Χωρίζεται σε δύο περιοχές με την άνω περιοχή (περιοχή A) να χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του σήματος διέγερσης (τρίγωνο) και του σήματος εξόδου από το φίλτρο συχνοτήτων. Η κάτω περιοχή (περιοχή B) χρησιμοποιείται για την

απεικόνιση του σήματος που προέρχεται από το πηνίο μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας.



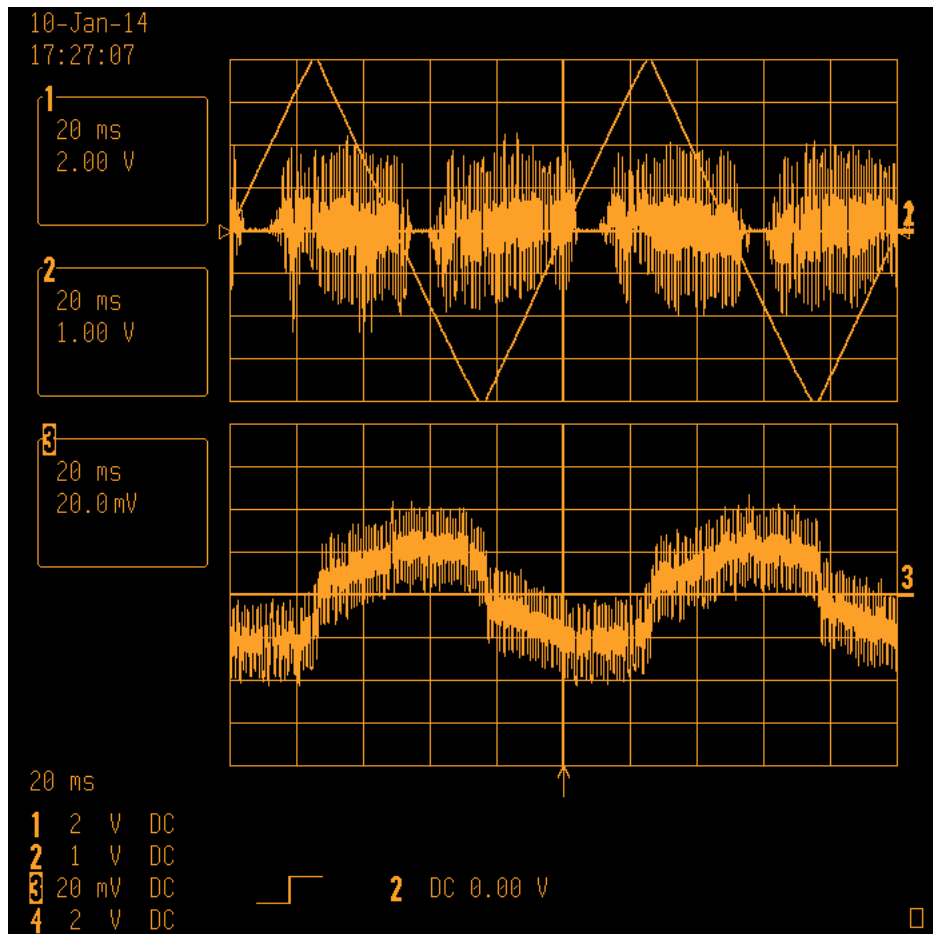
Εικόνα 15 - Εικόνα μέτρησης από παλμογράφο.

4.1.1 Ηλεκτρικός χάλυβας



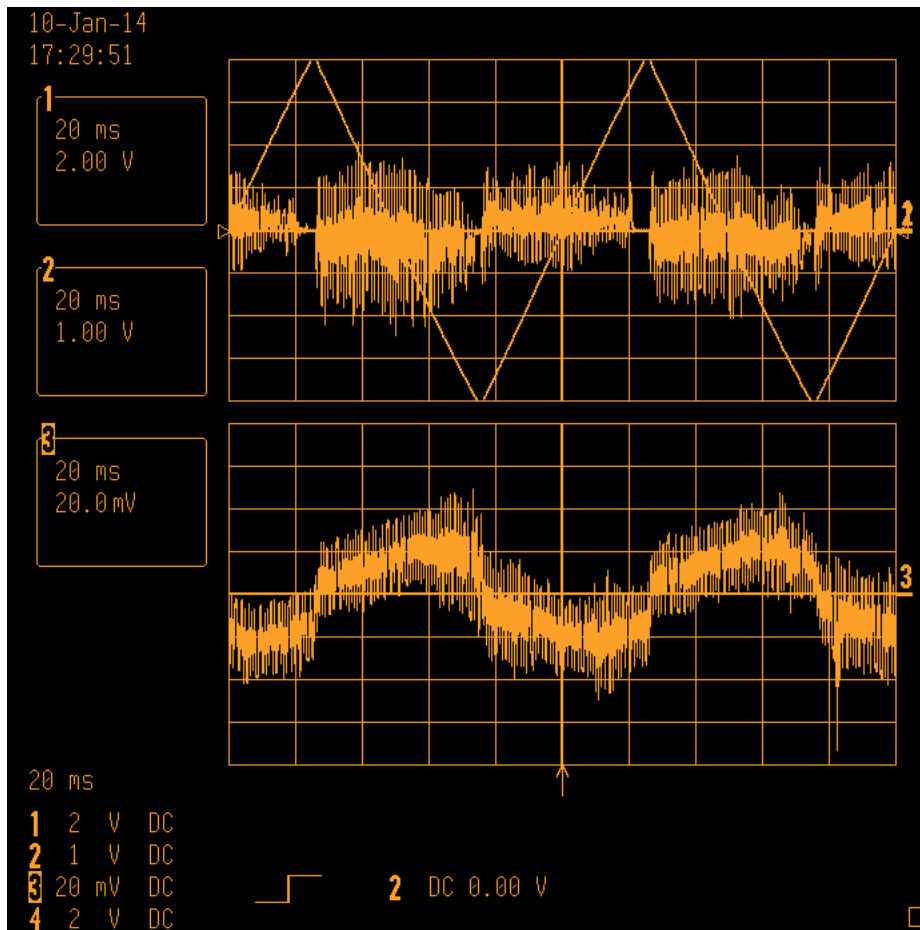
Εικόνα 16 - Δείγμα ηλεκτρικού χάλυβα

Πρόκειται για ηλεκτρικό χάλυβα, με μη προσανατολισμένους φερριτικούς κόκκους σε έναν άξονα μαγνήτισης στην επιφάνεια του (non grain oriented electrical steel). Είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (C: 0.008% wt), με κύριο κραματικό στοιχείο το πυρίτιο (Si: 2.18% wt). Η διεύθυνση της έλασης είναι η διεύθυνση 1, όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 17 - Μέτρηση σε ηλεκτρικό χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 1.

Εμφανίστηκε σημαντική μεταβολή στην κυματομορφή της μαγνητικής διαπερατότητας. Η μεγάλη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας που προκαλεί το δείγμα υποδηλώνει την καλή ποιότητα της σύζευξης δείγματος – πηνίου. Εμφανίζεται θόρυβος στο σήμα εισόδου από το πηνίο λήψης, τις στιγμές κατά τις οποίες γίνεται αλλαγή πολικότητας του πεδίου στο πηνίο διέγερσης.



Εικόνα 18 - Μέτρηση σε ηλεκτρικό χάλυβα κάθετα στο δοκίμιο παράλληλα με τη διεύθυνση 2.

Στη μέτρηση παράλληλα με τη διεύθυνση 2 υπήρξε και πάλι εμφάνιση αντίστοιχου σήματος με τη μέτρηση παράλληλα στη διεύθυνση 1. Το εμφανιζόμενο σήμα όμως, είναι εμφανώς μειωμένο σε σχέση με το προηγούμενο και λιγότερα ξεκάθαρο. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η διεύθυνση έλασης ήταν παράλληλα στην διεύθυνση 1 καθώς επίσης και του γεγονότος ότι ο θόρυβος επικεντρώθηκε στα σημεία αλλαγής πολικότητας, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για μαγνητικό θόρυβο Barkhausen.

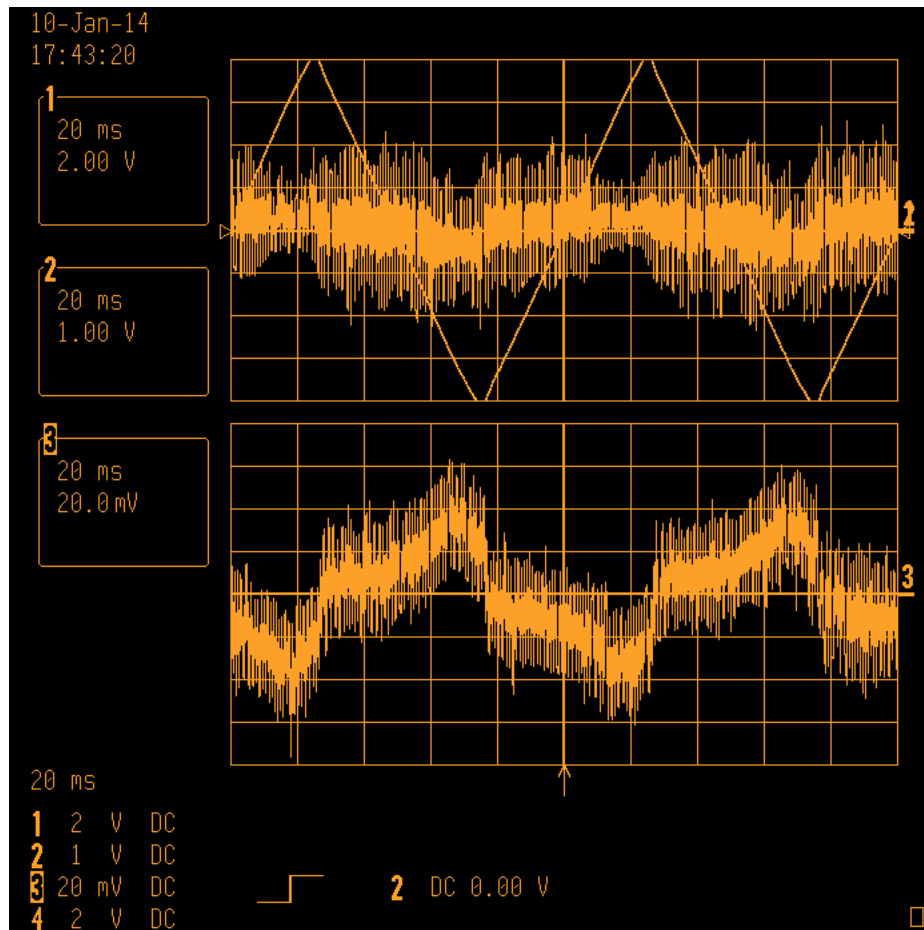
4.1.2 Κοινός (ανθρακούχος) υποευτηκτοειδής χάλυβας



Εικόνα 19 - Δοκίμιο υποευτηκτοειδή χάλυβα

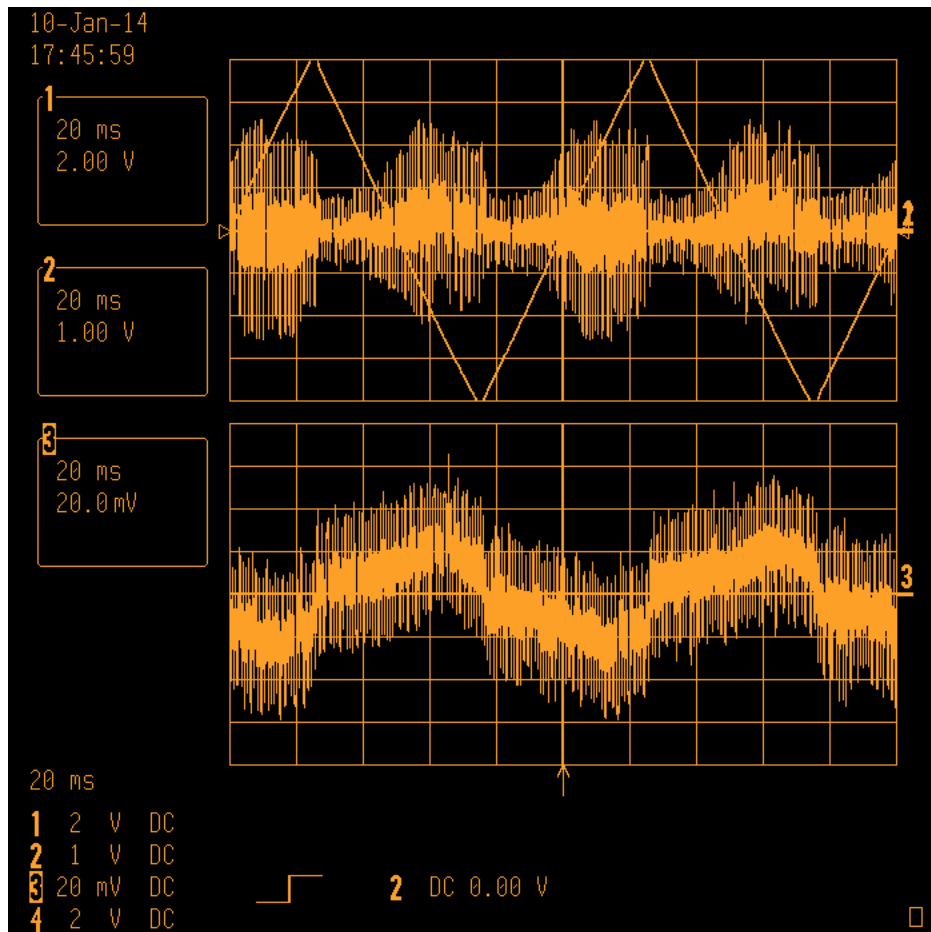
Πρόκειται για κοινό (ανθρακούχο) υποευτηκτοειδή χάλυβα τύπου St 37 (κατά DIN) που δεν έχει υποστεί θερμική κατεργασία. Σύμφωνα με το ASM Metals Handbook Volume 1 πρόκειται για χάλυβα αντίστοιχου τύπου με τον χάλυβα τύπου SAE 1013 ο οποίος έχει την ακόλουθη χημική σύσταση (w/w):

- C: ~0.17%
- Si: -
- Mn: 0.2-0.5%
- P: 0.04%
- S: 0.04%



Εικόνα 20 - Μέτρηση στο δοκίμιο υποευθηκτοειδούς χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 1.

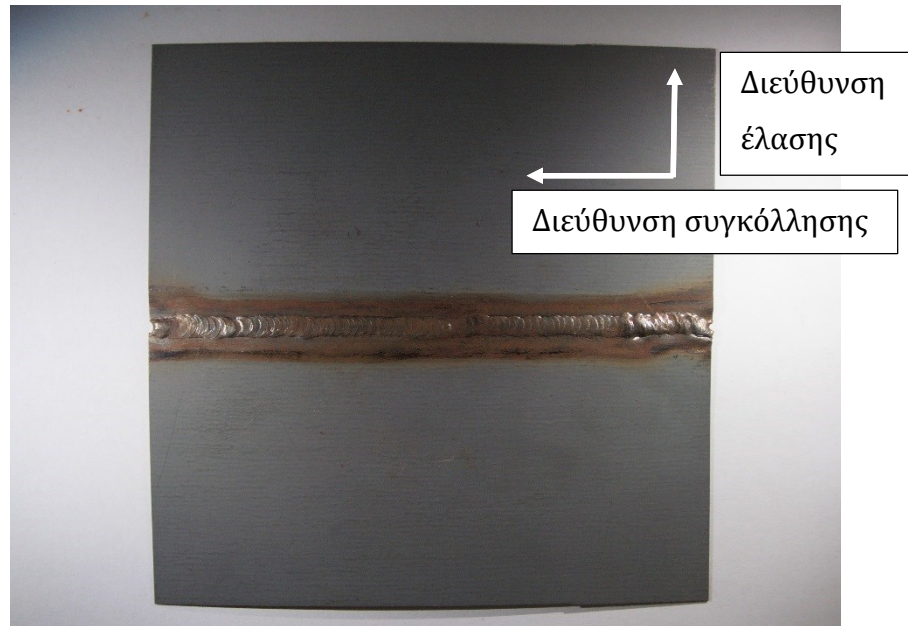
Στο δείγμα αυτό παρατηρήθηκε έντονη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας κατά την επαφή του με το πηνίο. Διατηρώντας την κυματομορφή της μαγνητικής διαπερατότητας σταθερή (κρατώντας το πηνίο ακίνητο σε σχέση με το δείγμα και φροντίζοντας ουσιαστικά τη διατήρηση τις επαφής αυτών σταθερής) μετρήθηκε το δείγμα σε δύο διευθύνσεις. Το αποτέλεσμα της πρώτης μέτρησης, παράλληλα στη διεύθυνση 1 εμφανίζεται εδώ. Αν και υπάρχει μικρή αύξηση του θορύβου στην περιοχή αλλαγής πολικότητας, η ύπαρξη περιβαλλοντικού θορύβου καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ακριβή μέτρηση.



Εικόνα 21 - Δοκίμο υποευθηκτοειδούς χάλυβα παράλληλα με τη διεύθυνση 2.

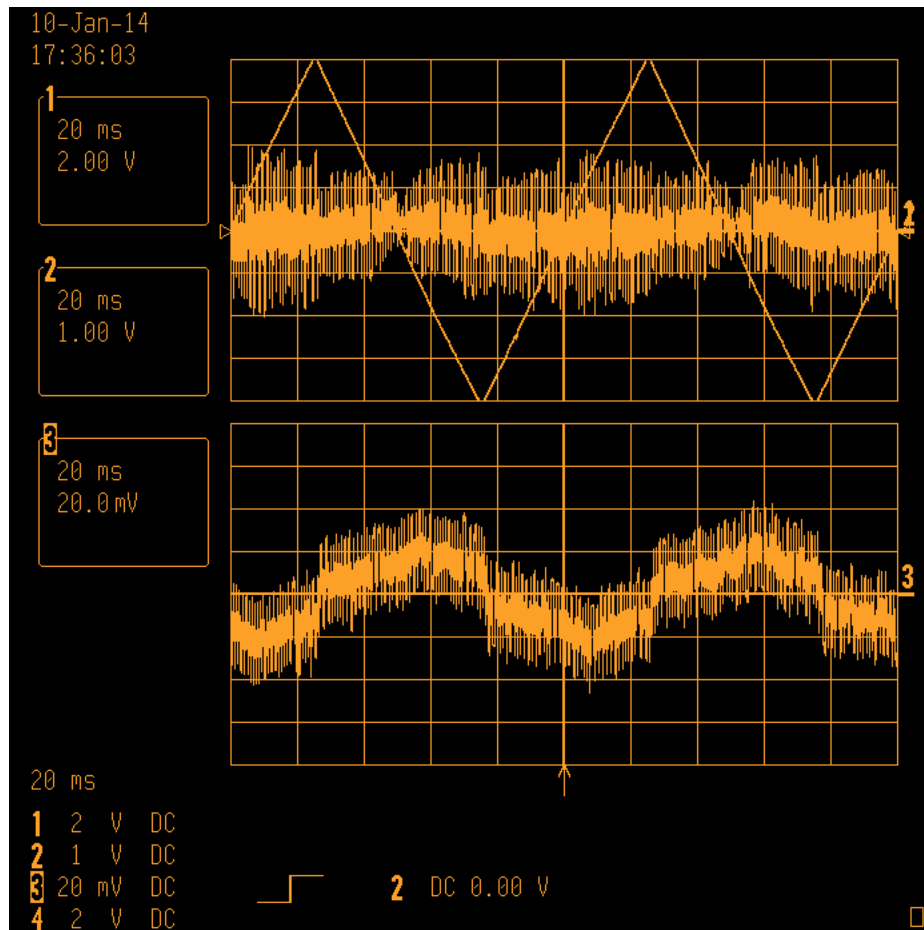
Κατά τη δεύτερη μέτρηση το δείγμα μετρήθηκε κάθετα στην προηγούμενη διεύθυνση. Παράλληλα στη διεύθυνση 2 παρατηρήθηκε σημαντική μεγέθυνση του θορύβου και μάλιστα ιδιαίτερα στα σημεία αλλαγής πολικότητας του πηνίου διέγερσης. Η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί σε θόρυβο Barkhausen. Εφόσον ισχύει αυτό, συνεπάγεται ότι είτε η διεύθυνση 2 είναι είτε μια εύκολη μαγνητική διεύθυνση, είτε διεύθυνση στην οποία έχουν εφαρμοστεί τάσεις κατά την κατασκευή του δοκιμίου. Παρατηρείται επίσης σημαντική αύξηση θορύβου στη μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας, γεγονός το οποίο συνηγορεί στην εκτίμηση αυτή.

4.1.3 Ηλεκτρικός χάλυβας με συγκόλληση



Εικόνα 22 - Συγκολλημένος ηλεκτρικός χάλυβας

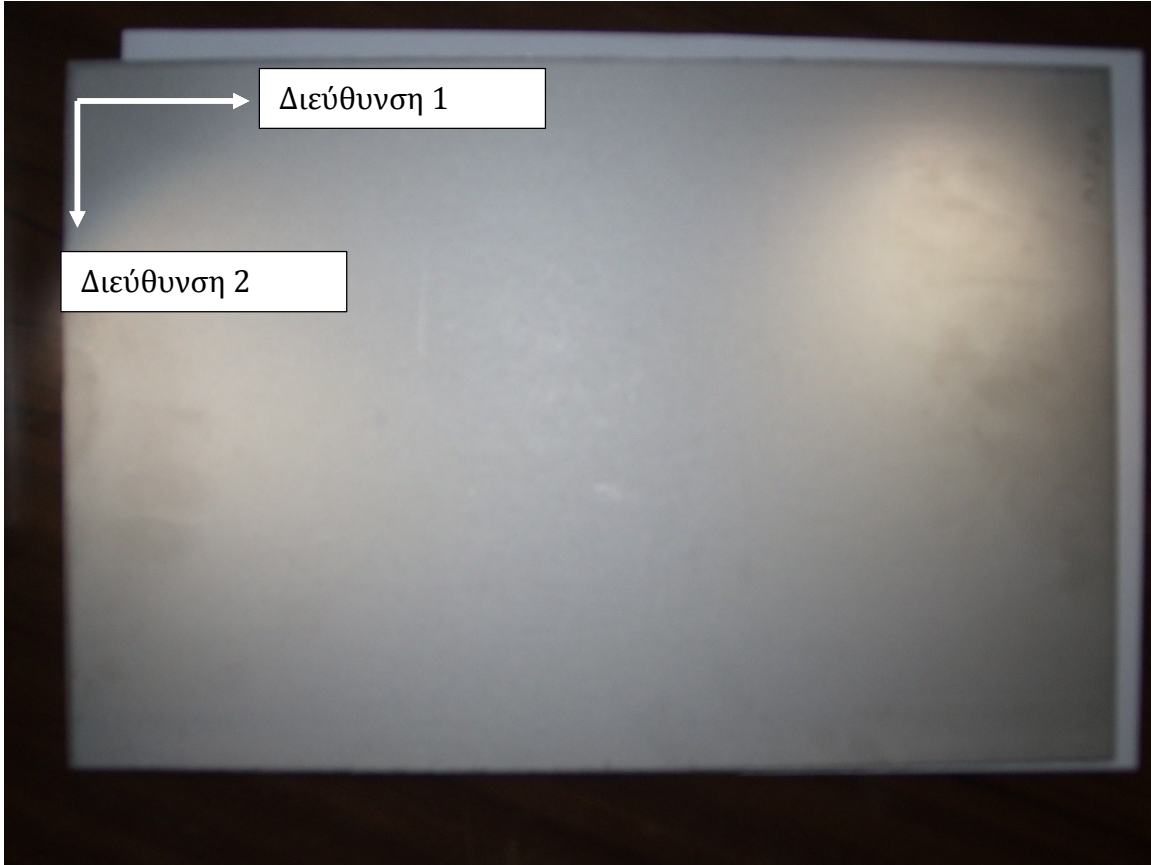
Πρόκειται για ελάσματα ηλεκτρικού χάλυβα, ίδιου τύπου και χημικής σύστασης με το πρώτο δοκίμιο, τα οποία συγκολλήθηκαν με τη χρήση της μεθόδου TIG χωρίς μέταλλο προσθήκης. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 22 η διεύθυνση της συγκόλλησης είναι κάθετη στη διεύθυνση της έλασης.



Εικόνα 23 - Μέτρηση σε δοκίμιο συγκολλημένου ηλεκτρικού χάλυβα, πάνω στη συγκόλληση και κατά μήκος αυτής.

Εμφανίστηκε σημαντικός θόρυβος καθ' όλη την περίοδο της κυματομορφής διέγερσης. Κάτι τέτοιο αντιστοιχεί σε σημαντικές τάσεις και ύπαρξη κέντρων συγκράτησης στην περιοχή, γεγονός που δικαιολογείται από την ύπαρξη της συγκόλλησης. Επειδή η συγκόλληση έγινε κάθετα στη διεύθυνση έλασης, η επίδραση των τάσεων λόγω της έλασης στη μέτρηση είναι μειωμένη.

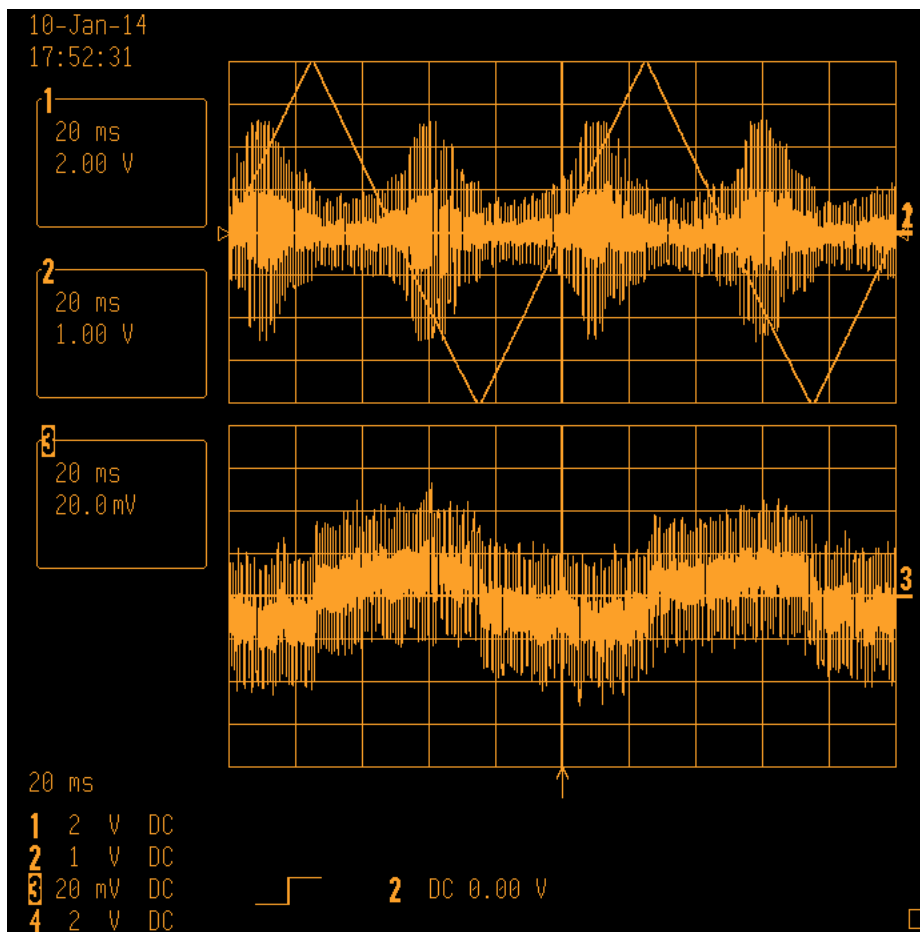
4.1.4 Χάλυβας TRIP



Εικόνα 24 - Δοκίμιο χάλυβα TRIP.

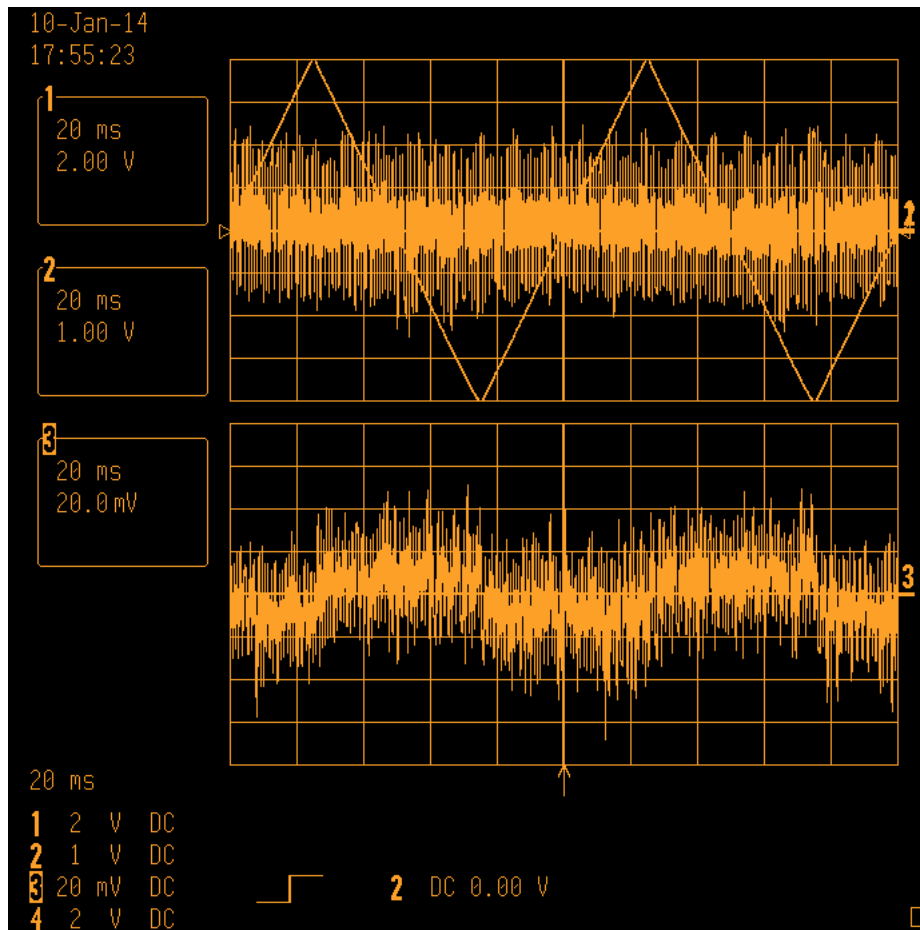
Πρόκειται για χάλυβα τύπου TRIP στον οποίο έχει γίνει έλαση παράλληλα στη διεύθυνση 1. Η χημική σύστασή του κατά βάρος δίνεται παρακάτω:

- C: 0.195%
- Mn: 1.64%
- Si: 1.58%



Εικόνα 25 - Μέτρηση σε δοκίμιο χάλυβα TRIP παράλληλα στη διεύθυνση 1.

Στο δείγμα αυτό υπήρξε η μικρότερη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας κατά την επαφή του με τον αισθητήρα και ταυτόχρονα σημαντικός θόρυβος. Κατά τη μέτρηση παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στο θόρυβο σε περιοχές κοντά στην αλλαγή πολικότητας του πηνίου διέγερσης. Η αύξηση αυτή εξηγείται εφόσον συνυπολογίσει κανείς την ύπαρξη αυξημένων παραμενουσών τάσεων, οι οποίες οδηγούν σε αύξηση του θορύβου Barkhausen.



Εικόνα 26 - Μέτρηση σε δοκίμιο χάλυβα TRIP παράλληλα στη διεύθυνση 2.

Επαναλαμβάνοντας τη μέτρηση στο ίδιο σημείο αλλά σε διεύθυνση κάθετη με προηγουμένως γίνεται εμφανής η έλλειψη θορύβου Barkhausen αλλά και η αύξηση θορύβου σε όλη την κυματομορφή διέγερσης.

4.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Σε όλες τις μετρήσεις ήταν έντονη η παρουσία θορύβου από το περιβάλλον, ο οποίος εκδηλώθηκε ως υψίσυχο σήμα τόσο στο πηνίο λήψης όσο και στο πηνίο μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας. Η ύπαρξή του όμως δεν εμπόδισε την παρατήρηση των κυματομορφών. Παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση στις λαμβανόμενες κυματομορφές από δοκίμιο σε δοκίμιο και κυρίως μεταξύ διαφορετικών κατευθύνσεων στο ίδιο δείγμα.

Κατά τη μέτρηση των δοκιμίων, οι λαμβανόμενες μετρήσεις από τον αισθητήρα μεταβάλλονταν με τον αναμενόμενο τρόπο ανάλογα με το δείγμα και τη διεύθυνση μέτρησης και επιβεβαιώνουν ότι το λαμβανόμενο σήμα είναι πράγματι μαγνητικός θόρυβος Barkhausen.

Η έλλειψη θωράκισης στο πηνίο λήψης, σε συνδυασμό με την υψηλή ευαισθησία της διάταξης κάνει το πηνίο λήψης ιδιαίτερα ευαίσθητο στον εξωτερικό θόρυβο. Ειδικά κατά τη μέτρηση του χάλυβα TRIP, ο θόρυβος Barkhausen περιβάλλεται από θόρυβο υψηλής συχνότητας.

4.3 Μελλοντική εργασία

Τα θέματα για μελλοντική εργασία αφορούν κυρίως στη βελτίωση του αισθητήρα και τη μετατροπή αυτού σε πλήρως φορητή, αυτοματοποιημένη συσκευή.

Η βελτίωση του αισθητήρα περιλαμβάνει:

- Βελτίωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για αυξημένη ευαισθησία
Με τη χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων υψηλότερου κόστους μπορεί να αυξηθεί σημαντικά η ακρίβεια των μετρήσεων.
- Χρήση ψηφιακού φίλτρου βασισμένου σε DSP (Digital Signal Processing) για την αποκοπή ανεπιθύμητων συχνοτήτων.
- Το σήμα από το πηνίο διέγερσης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας μπορεί να ανατροφοδοτηθεί στη διάταξη του ενισχυτή ισχύος, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για μείωση των σφαλμάτων της μέτρησης, οφειλόμενα σε μεταβολές στη μαγνητική σύζευξη δείγματος – πηνίου [1], [16], [29]. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της χρήσης αισθητήρων βασισμένων στο φαινόμενο Hall.
- Τέλος, σημαντική βελτίωση στη λειτουργία του αισθητήρα θα επέφερε η μετατροπή του ενισχυτή ισχύος ούτως ώστε να επιτρέπει τη ρύθμιση του πλάτους της διέγερσης. Κάτι τέτοιο θα επέτρεπε τη λειτουργία του αισθητήρα και για υλικά με πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα.

Η μετατροπή σε ολοκληρωμένη και φορητή συσκευή περιλαμβάνει:

- Την ενοποίηση των πολλαπλών κυκλωμάτων και σμίκρυνση αυτών με χρήση μικρότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μείωση των αποστάσεων μεταξύ τους και με τη βιομηχανική κατασκευή των τυπωμένων πλακετών.
- Την ενσωμάτωση μικροεπεξεργαστή για να γίνεται η επεξεργασία δεδομένων στη συσκευή και να παράγονται άμεσα αποτελέσματα, δίχως τη χρήση παλμογράφου. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός απαιτείται η προσθήκη ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ψηφιοποίησης και απεικόνισης

σήματος και μπαταρίες. Με αυτές τις αλλαγές θα μπορούσε η διάταξη να λειτουργήσει σαν ανεξάρτητη συσκευή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. Hartmann, A. J. Moses και T. Meydan, «A System for Measurement of AC Barkhausen Noise in Electrical Steels,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Τόμ. 254 από 2254-255, pp. 318-320, 2003.
- [2] H. V. Patel, S. Zurek, T. Meydan, D. C. Jiles και L. Li, «A new adaptive automated feedback system for Barkhausen signal measurement,» *Sensors and Actuators A: Physical*, τόμ. 129, αρ. 1-2, pp. 112-117, 24 May 2006.
- [3] V. E. Iordache, E. Hug και N. Buiron, «Magnetic behaviour versus tensile deformation mechanisms in a non-oriented Fe-(3 wt.%)Si steel,» *Materials Science and Engineering: A*, τόμ. 359, αρ. 1-2, pp. 62-74, 25 October 2003.
- [4] ASM International, σε *ASM Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASM International, 2002, pp. 327-332.
- [5] K. Yosida, *Theory of Magnetism* (Springer Series in Solid-State Sciences), Springer, 1998.
- [6] S. Kasap, *Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών Και Διατάξεων*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2004.
- [7] C. - G. Stefanita, *From Bulk To Nano - The Many Sides of Magnetism*, Springer, 2008.
- [8] N. Hamilton, «The Small-Signal Frequency Response of Ferrites,» *High Frequency Electronics*, pp. 36-52, June 2011.
- [9] F. R. de Boer και K. H. J. Buschow, *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, New York: Kluwer Academic Publishers, 2004.

- [10] J. Capó-Sánchez, J. Pérez-Benitez και L. Padovese, «Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise,» *NDT & E International*, τόμ. 40, αρ. 2, pp. 168-172, March 2007.
- [11] N. Kasai, H. Koshino, K. Sekine, H. Kihira και M. Takahashi, «Study on the Effect of Elastic Stress and Microstructure of Low Carbon Steels on Barkhausen Noise,» *Journal of Nondestructive Evaluation*, τόμ. 32, αρ. 3, pp. 277-285, September 2013.
- [12] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications*, New York: Springer New York, 2010.
- [13] T. Kenny, «Sensor Fundamentals,» σε *Sensor Technology Handbook, Volume 1*, τόμ. 1, J. S. Wilson, Επιμ., Oxford, 2005, pp. 1-20.
- [14] P. Ripka, *Magnetic sensors and magnetometers*, Artech House, 2001.
- [15] T. Kenny, «Electromagnetism in Sensing,» σε *Sensor Technology Handbook, Volume 1*, Oxford, 2005, pp. 223-235.
- [16] O. Stupakov, J. Pal'a, T. Takagi και T. Uchimoto, «Governing conditions of repeatable Barkhausen noise response,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 321, αρ. 18, pp. 2956-2962, September 2009.
- [17] S. White, T. Krause και L. Clapham, «Quantitative analysis of surface barkhausen noise measurements,» σε *AIP Conference Proceedings 975*, 2008.
- [18] J. Anglada-Rivera, L. R. Padovese και J. Capó-Sánchez, «Magnetic Barkhausen Noise and Hysteresis Loop in Commercial Carbon Steel: Influence of Applied Tensile Stress and Grain Size,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 231, pp. 299-306, 2001.
- [19] D. M. Stewart, K. J. Stevens και A. B. Kaiser, «Magnetic Barkhausen Noise Analysis of Stress in Steel,» *Current Applied Physics*, τόμ. 4, pp. 308-311, 2004.

- [20] O. Stupakov, J. Pal'a, V. Yurchenko, I. Tomáš και J. Bydžovský, «Measurement of Barkhausen noise and its correlation with magnetic permeability,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, τόμ. 320, αρ. 3-4, pp. 204-209, February 2008.
- [21] Analog Devices, «AD9834 datasheet and product info,» 02 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD9834.pdf. [Πρόσβαση 09 06 2013].
- [22] Texas Instruments, «Operational Amplifier (Op Amp) - General Purpose Amplifier - TL082 - TI.com,» 24 1 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/tl082>. [Πρόσβαση 25 1 2014].
- [23] Texas Instruments, «Operational Amplifier (Op Amp) - High Speed Amplifier (>=50MHz) - LM7171 - TI.com,» 2013 5 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/lm7171>. [Πρόσβαση 15 07 2013].
- [24] Analog Devices, «AD8429 datasheet and product info | 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Low Noise Instrumentation Amplifier | Instrumentation Amplifiers | Analog Devices,» 05 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8429.pdf. [Πρόσβαση 01 07 2013].
- [25] Analog Devices, «ADA4897-2 datasheet and product info | 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$, Low Power Operational Amplifier | High Speed Rail-to-Rail Amplifiers | Analog Devices,» 04 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4896-2_4897-1_4897-2.PDF. [Πρόσβαση 16 08 2013].
- [26] W.-K. Chen, Επιμ., *Passive, Active and Digital Filters*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2009.
- [27] Texas Instruments, «Operational Amplifier (Op Amp) - High Speed Amplifier (>=50MHz) - LMH6618 - TI.com,» 8 2 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available:

<http://www.ti.com/lit/gpn/lmh6618>. [Πρόσβαση 01 November 2013].

- [28] Texas Instruments, «Operational Amplifier (Op Amp) - General Purpose Amplifier - NE5532 - TI.com,» 14 April 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ti.com/lit/gpn/ne5532>. [Πρόσβαση 20 12 2013].
- [29] O. Stupakov, «System for Controllable Magnetic Measurement with Direct Field Determination,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 631-636, 2012.
- [30] Γ. Δ. Χρυσουλάκης και Δ. Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*, Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008.
- [31] W. H. Beaty και D. G. Fink , *Standard Handbook for Electrical Engineers*, New York: McGraw-Hill, 2013.
- [32] Π. Λ. Κοκκωνίδης, «Σχέση Μικροδομής-Ιδιοτήτων σε χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity) αυξημένης πλαστικότητας κατά την παραμόρφωση,» ΕΜΠ, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Αθήνα, 2012.
- [33] E. Girault, P. Jacques, P. Harlet, K. Mols, J. Van Humbeeck, E. Aernoudt και F. Delannay, «Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels,» *Materials Characterization*, τόμ. 40, αρ. 2, pp. 111-118, 1998.
- [34] E. Hristoforou, «Magnetic Effects in Physical Sensor Design and Development,» *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, τόμ. Vol. 4, pp. 245-260, June 2002.
- [35] E. P. Furlani, *Permanent Magnet and Electromechanical Devices: Materials, Analysis, and Applications*, New York: Academic Press, 2001.
- [36] G. Durin, A. Magni και G. Bertotti, «Measurements of the Barkhausen effect in

FeCoB amorphous alloys,» *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 299-301, 1996.

[37] W. D. J. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ηλεκτρικοί Χάλυβες

Πρόκειται για κράματα σιδήρου – πυριτίου (Fe-Si) με 2-4% w/w πυρίτιο και πολύ χαμηλό άνθρακα (συνήθως της τάξης του 0.005% w/w, που είναι το βέλτιστο αλλά και χαμηλότερο), τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε μετασχηματιστές ηλεκτρικού ρεύματος. Η προσθήκη πυριτίου στους ηλεκτρικούς χάλυβες εξυπηρετεί σε [30]:

1. Αύξηση της ειδικής αντίστασης του χάλυβα. Μειώνονται έτσι οι απώλειες ενέργειας εξαιτίας δινορρευμάτων καθότι η μεγαλύτερη αντίσταση εμποδίζει τη δημιουργία αυτών.
2. Μείωση των απωλειών του βρόγχου υστέρησης καθώς μειώνεται η μαγνητική ανισοτροπία και αυξάνεται η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.
3. Μείωση της μαγνητικής συστολής και του θορύβου του μετασχηματιστή.

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες παράγονται σε δύο μορφές. Η πρώτη μορφή αποτελείται από προσανατολισμένους κόκκους στη μάζα του υλικού. Χαρακτηριστικό της είναι η έντονη κατευθυντικότητα που παρουσιάζουν οι μαγνητικές ιδιότητες του χάλυβα.

Αντίθετα, η δεύτερη μορφή αποτελείται από μη προσανατολισμένους κόκκους στη μάζα του υλικού. Χαρακτηριστικό της είναι η ομοιομορφία των μαγνητικών ιδιοτήτων σε κάθε κατεύθυνση μέσα στο υλικό.

Και οι δύο μορφές ηλεκτρικού χάλυβα απαιτούν ανόπτηση κατά το τελικό στάδιο παραγωγής τους. Ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία που θα ακολουθηθεί στη συνέχεια, διατίθενται σε πλήρως επεξεργασμένους και σε ημιεπεξεργασμένους. Οι πλήρως επεξεργασμένοι είναι έτοιμοι προς χρήση και απαιτούν μόνο ανόπτηση σε περίπτωση που η παραγωγική διαδικασία του τελικού προϊόντος εισάγει τάσεις.

Αντίθετα, οι ημιεπεξεργασμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες απαιτούν προσεκτική ανόπτηση για να αναπτύξουν πλήρως τις μαγνητικές τους ιδιότητες. Η ανόπτηση

συμβάλλει στην απανθράκωση, η οποία απαιτείται για τη μείωση του ποσοστού του άνθρακα από 0.05% w/w σε 0.005% w/w ή και περισσότερο. Επιπρόσθετα, συμβάλλει στη μεγέθυνση των κόκκων και στην εξάλειψη των τάσεων που έχουν προκύψει από την κατασκευή τους [31].

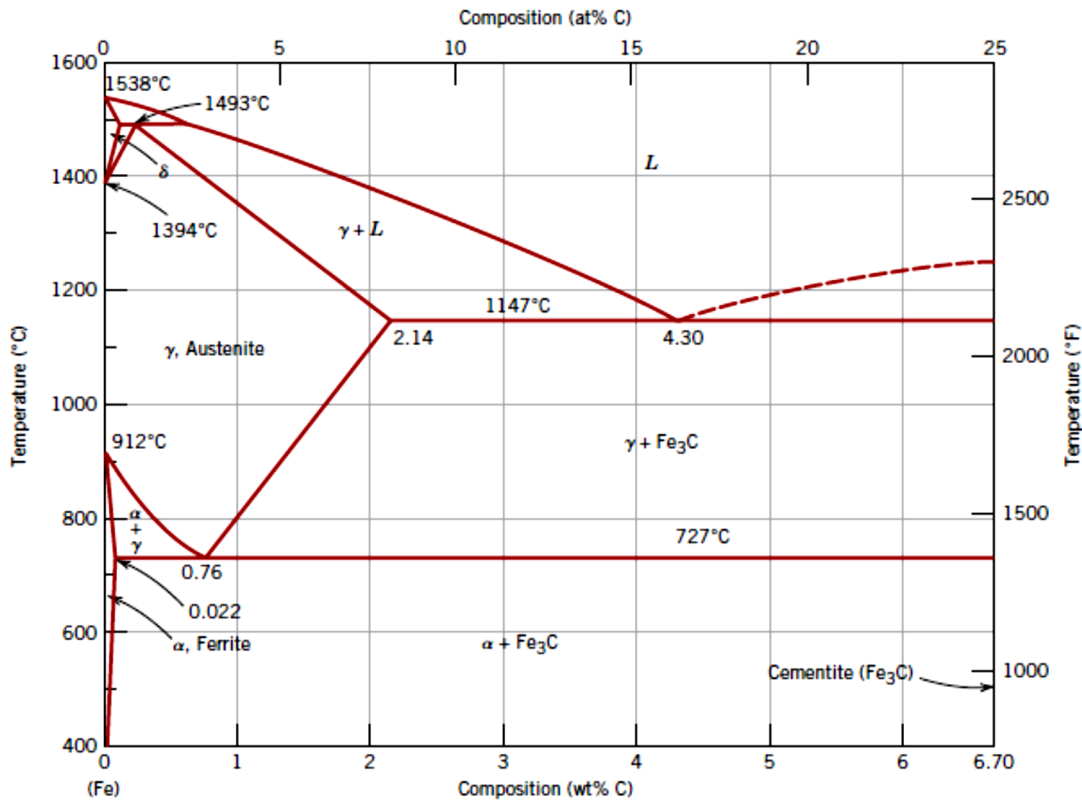
Κοινοί υποευτηκτοειδείς χάλυβες

Οι κοινοί (ή ανθρακούχοι) χάλυβες είναι κράματα σιδήρου-άνθρακα, τα οποία περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας Fe-Fe₃C (διάγραμμα Α) και δεν περιέχουν κραματικά στοιχεία σε ποσοστό μεγαλύτερο από 1-1.5%, με εξαίρεση τον άνθρακα. Συνήθως σε αυτούς απαντώνται μικρά ποσοστά Mn, Si, τα οποία προστίθενται κατά το στάδιο της δευτερογενούς μεταλλουργίας, καθώς επίσης και ακαθαρσίες, όπως S, P. Απαντώνται επίσης Cu, Ni, Cr κ.ά., η παρουσία των οποίων οφείλεται στη χρήση scrap ως κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή του χάλυβα.

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διαχωρίζονται σε χάλυβες χαμηλού (<0.30% w/w C), μέτριου (0.30-0.60% w/w C) και υψηλού (0.60-1% w/w C) άνθρακα. Στην πράξη το ποσοστό του άνθρακα στους χάλυβες δεν υπερβαίνει το 1% w/w.

Στο διάγραμμα Fe-Fe₃C Η περιοχή που αντιστοιχεί στους χάλυβες, διαχωρίζεται στις ακόλουθες τρεις υπο-περιοχές:

- Υποευτηκτοειδής περιοχή, δηλαδή για περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.022% w/w έως 0.8% w/w. Η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη.
- Ευτηκτοειδής περιοχή, δηλαδή για 0.8% w/w άνθρακα. Η μικροδομή είναι πλήρως περλιτική.
- Υπερευτηκτοειδής περιοχή, για περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.8% w/w έως 1% w/w. Η μικροδομή ενός υπερευτηκτοειδούς χάλυβα αποτελείται από προευτηκτοειδή σεμεντίτη και περλίτη [30].



Διάγραμμα Α - Μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου - σεμεντίτη²

Χάλυβες TRIP

Πρόκειται για χάλυβες χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα η μικροδομή των οποίων αποτελείται από πολλαπλές φάσεις. Συγκεκριμένα, η μικροδομή τους αποτελείται από μια φερριτική μήτρα με νησίδες υπολειπόμενου ωστενίτη, μπαινίτη ενώ μερικές φορές ανιχνεύεται και μαρτενσίτης [32], [33].

Σε περίπτωση παραμόρφωσης υφίστανται το φαινόμενο TRIP (Transformation Induced Plasticity), κατά το οποίο ο θερμοδυναμικά ασταθής υπολειπόμενος

² Πηγή: William D. Callister Jr., Materials Science and Engineering: An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ωστενίτης μετατρέπεται στο θερμοδυναμικά σταθερότερο μαρτενσίτη. Οι χάλυβες TRIP χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ισορροπία αντοχής-ολκιμότητας και μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία ως δομικά στοιχεία του σκελετού του αυτοκινήτου, συνεισφέροντας στη βελτίωση της παθητικής ασφάλειας αυτού.

Η παραγωγή τους περιλαμβάνει απαραίτητα έλαση (είτε θερμή, είτε ψυχρή) και στη συνέχεια κάποια θερμική κατεργασία, η οποία εξαρτάται κάθε φορά από το είδος της έλασης [32].