



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

**«Μελέτη εντατικής κατάστασης
φερρομαγνητικών χαλύβων μέσω μαγνητικών
παραμέτρων»**

Μεταπτυχιακή Εργασία
Κωνσταντόπουλος Χρήστος

Επιβλέπων: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

**«Μελέτη εντατικής κατάστασης
φερρομαγνητικών χαλύβων μέσω μαγνητικών
παραμέτρων»**

Μεταπτυχιακή Εργασία
Κωνσταντόπουλος Χρήστος

Επιβλέπων: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 24/07/2015

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής(Υπογραφή)

.....Καθηγητής(Υπογραφή)

.....Καθηγητής(Υπογραφή)

Copyright © Κωνσταντόπουλος Χρήστος, 2015

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. Με αφορμή την ολοκλήρωση της, εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες στον κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη συνεχή καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας και για τη συμβολή του στην κατανόηση πολλών επιμέρους θεμάτων.

Στην δίδα Βουρνά Ξένια, Διπλωματούχο Φυσικό και Διδάκτορα του ΕΜΠ, η οποία συνέβαλε καταλυτικά στην αποπεράτωση της εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Σπύρο Αγγελόπουλο και Νεοκλή Χατζηγεωργίου Υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, οι οποίοι με βοήθησαν να κατανοήσω καλύτερα τη λειτουργία των αισθητήρων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία **LANDIS + GYR A.E.** που μας παραχώρησε χωρίς κανένα δισταγμό το υλικό προς εξέταση και στη συνέχεια την κατασκευή των yoke από την ίδια την εταιρία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είχε σαν σκοπό τη σχεδίαση ενός καινούργιου ηλεκτρομαγνήτη, με το πηνίο διέγερσης να βρίσκεται στη μεγάλη πλευρά του, και το πηνίο λήψης στο πέλμα του στελέχους, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μαγνητικής αποκρισημότητας και τη βελτίωση στη μέτρηση των μαγνητικών παραμέτρων. Μετά το σχεδιασμό του ηλεκτρομαγνήτη, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις στα ακόλουθα υλικά: NOES, GOES, AISI1008, AISI 4130, TRIP, DUPLEX, 316L, INCONEL, WASPALLOY.

Λέξεις κλειδιά: Μαγνητικές μετρήσεις, ηλεκτρομαγνήτες, μαγνητική αποκρισημότητα

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the design of a yoke – type electromagnet, in order to optimize the magnetic response and improve the reliability of the magnetic parameters to be measured. For this reason, the excitation coil has been wound on the horizontal part of the core, while the receiving coil on the vertical leg of the core. After the design and construction of the electromagnet, magnetic measurements were conducted considering the following materials: NOES, GOES, AISI1008, AISI 4130, TRIP, DUPLEX, 316L, INCONEL, WASPALLOY.

Key words: electromagnet, magnetic response, magnetic measurements

Περιεχόμενα

1	Χάλυβας.....	12
1.1	Γενικά.....	12
1.2	Ηλεκτρικός Χάλυβας.....	13
1.2.1	Εισαγωγή.....	13
1.2.2	Μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες.....	15
1.2.3	Ταξινόμηση.....	15
1.2.4	Κύρια κραματικά στοιχεία του ηλεκτρικού χάλυβα.....	16
2	ταξινόμηση μαγνητικων υλικων.....	17
2.1	Εισαγωγή.....	17
2.2	Διαμαγνητικά υλικά.....	18
2.3	Παραμαγνητικά υλικά.....	19
2.4	Σιδηρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	20
2.5	Αντισιδηρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	20
2.6	Φερομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	21
2.7	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	21
2.7.1	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	21
2.7.2	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ.....	21
2.7.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ.....	22
2.7.4	ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ.....	23
2.7.5	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.....	24
2.7.6	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE.....	24
2.8	ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ.....	24
3	Μαγνητικές περιοχές και Μαγνητικά τοιχώματα.....	26
3.1	Μαγνητικές περιοχές.....	26
3.2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ.....	27

3.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ.....	28
3.4	ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ.....	30
3.5	ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	30
4	Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	32
4.1.1	Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	33
5	σχεδιαση μαγνητικου αισθητηρα.....	35
5.1	ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ.....	35
5.2	ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΗ (ΥΟΚΕ)	35
5.3	ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ	37
5.3.1	Πηνίο διέγερσης.....	38
5.3.2	Πηνίο λήψης.....	38
5.4	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	39
5.5	ΜΕΤΡΗΣΙΜΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	40
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	41
6.1.1	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	41
6.1.2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	42
6.1.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ	42
6.1.4	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΙΚΡΟΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ	43
6.1.5	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ TRIP ΧΑΛΥΒΑ	44
6.1.6	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ DUPLEX ΧΑΛΥΒΑ	45
6.1.7	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΥ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	45
6.1.8	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ INCONEL.....	46
6.1.9	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ WASPALLOY	46

7	συμπερασματα	47
8	Βιβλιογραφία	48
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Προετοιμασια δειγματος για το χαρακτηρισμό μεσω τεχνικης EBSD.....	0
9.1	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	0
9.1.1	Κοπή δοκιμίων.....	0
9.1.2	Εγκιβωτισμός.....	0
9.1.3	Λείανση	0
9.1.4	Στίλβωση	1
9.1.5	Χημική προσβολή	1
9.2	ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD-ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD).....	1

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1-1: Ηλεκτρικός χάλυβας σε κουλούρες.....	16
Εικόνα 2-1: Μαγνητικός περιοδικός πίνακας	17
Εικόνα 2-2: Μαγνήτιση διαμαγνητικών υλικών.....	18
Εικόνα 2-3: Εσωτερικό και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα διαμαγνητικά υλικά καθώς και οι απεικόνιση των συμπληρωμένων υποστοιβάδων.	19
Εικόνα 2-4: Μαγνήτιση παραμαγνητικών υλικών.....	19
Εικόνα 2-5: Βρόχος Υστέρησης	23
Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές .Σε κάθε περιοχή, τα <i>spin</i> είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό.....	26
Εικόνα 3-2: Δομή τοιχώματος Bloch 180°	28
Εικόνα 3-3: Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90°	28
Εικόνα 3-4: Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (b) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμψής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (c) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (d)	29
Εικόνα 5-1: Διμερές διάγραμμα φάσεων Fe- Si.....	35
Εικόνα 5-2: Υπό εξέταση επιφάνεια μέσω της τεχνική EBSD.....	36
Εικόνα 5-3: Ταυτοποίηση φάσεων στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού αναφοράς μέσω της τεχνική EBSD.	36
Εικόνα 5-4: Προτιμητέος κρυσταλλογραφικός ιστός ανάπτυξης μέσω IPF.	37
Εικόνα 5-5: Πηνίο διέγερσης και λήψης.	38
Εικόνα 5-6: Ηλεκτρονική διάταξη.	39
Εικόνα 6-1: Μαγνητικό σήμα εξόδου του μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα.	41
Εικόνα 6-2: Μαγνητικό σήμα εξόδου του προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα. ...	42
Εικόνα 6-3: Μαγνητικό σήμα εξόδου του χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.	43
Εικόνα 6-4: Μαγνητικό σήμα εξόδου του μικροκραμματωμένου χάλυβα.	44
Εικόνα 6-5: Μαγνητικό σήμα εξόδου του TRIP χάλυβα.	44
Εικόνα 6-6: Μαγνητικό σήμα εξόδου του DUPLEX χάλυβα.	45

Εικόνα 6-7: Μαγνητικό σήμα εξόδου του ανοξείδωτου χάλυβα	45
Εικόνα 6-8: Μαγνητικό σήμα εξόδου του <i>INCONEL</i>	46
Εικόνα 6-9: Μαγνητικό σήμα εξόδου του <i>WASPALLOY</i>	46

1 ΧΑΛΥΒΑΣ

1.1 Γενικά

Οι Χάλυβες στη σημερινή εποχή αποτελούν πάνω από το 80% των βιομηχανικών κραμάτων. Αυτό βασικά οφείλεται τόσο στο χαμηλό τους κόστος όσο και στη σχετική ευκολία παραγωγής χαλύβων σε μεγάλες ποσότητες με ακριβείς προδιαγραφές. Οι χάλυβες παρουσιάζουν ένα ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων με αντοχές που κυμαίνονται από 200 έως και 5000 MPa. Άλλοι πρόσθετοι λόγοι για την υπεροχή των χαλύβων είναι οι εξής:

- a) Τα μεγάλα παγκόσμια αποθέματα μεταλλευμάτων (ο φλοιός της γης περιέχει ~ 4% Fe) που ανάγονται εύκολα στη μεταλλική κατάσταση σε συνδυασμό με τη δυνατότητα ανακύκλωσης του παλαιοσιδήρου (scrap).
- b) Το σημείο τήξεως του σιδήρου (1539 °C) επιτρέπει την θερμική ενεργοποίηση των εργασιών σε θερμοκρασίες ($T > 400^{\circ}\text{C}$) που επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα και ελέγχονται βιομηχανικά.
- c) Η αλλοτροπία του σιδήρου και οι μετασχηματισμοί φάσεων στους χάλυβες (π.χ. ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός) επιτρέπουν τον σχηματισμό μίας μεγάλης ποικιλίας μικροδομών που οδηγεί σε ένα αντίστοιχα μεγάλο εύρος μηχανικών ιδιοτήτων.

Ο χάλυβας είναι ίσως το πιο σύνθετο μεταλλικό κράμα. Η ευρεία εμπειρική γνώση που έχει συσσωρευτεί (από το 2000π.Χ. που χρησιμοποιείται) δεν έχει οδηγήσει σε πλήρη κατανόηση της δομής και της συμπεριφοράς του. Μόνον πρόσφατα (κατά τον 20^ο αιώνα) υπήρξε πρόοδος σε μία πιο επιστημονική προσέγγιση και ουσιαστικά κατανόηση των χαλύβων, γεγονός που αποδεικνύεται με την ανάπτυξη νέων χαλύβων (π.χ. ανοξειδώτοι και πυρίμαχοι χάλυβες) οι οποίοι ανταποκρίνονται σε ειδικές απαιτήσεις [3].

Ο Χάλυβας είναι κράμα σιδήρου- άνθρακα με περιεκτικότητα σε άνθρακα από 0.025% έως 2.1%κ.β., αλλά στην πράξη δεν χρησιμοποιούνται χάλυβες με περιεκτικότητα άνω του 1.2% και σπανιότερα μέχρι 1.5% [1]. Πέραν αυτών οι χάλυβες περιέχουν συνήθως μαγγάνιο και πυρίτιο σε μικρές αναλογίες. Αυτά έχουν προστεθεί για την αύξηση της αντοχής του σιδηρίτη, αλλά πέραν αυτού χρησίμευαν

σε κάποιο στάδιο της χαλυβοποίησης για την επεξεργασία του χάλυβα (το πυρίτιο για την αποξείδωση, το μαγγάνιο για την αποξείδωση και την αποθείωση) [2].

Πέραν αυτού, το θείο και ο φώσφορος είναι συνήθεις ακαθαρσίες, όπως και διάφορα αέρια σε διάλυση μέσα στον χάλυβα, οξυγόνο, άζωτο, υδρογόνο. Με την ένταση της ανακύκλωσης των πρώτων υλών ανευρίσκουμε επίσης σήμερα το νικέλιο, το χρώμιο, τον χαλκό, τον κασσίτερο, κλπ. ως ακαθαρσίες. Ένας τέτοιος χάλυβας θεωρείται κοινός, παρά τις προσμίξεις που περιέχει, διότι αυτές δεν προστέθηκαν εκουσίως, και επειδή εξ άλλου η επίδραση τους παραμένει αμελητέα εφ' όσον δεν υπερβαίνουν ορισμένα όρια περιεκτικότητας [2].

Σ' έναν κραματωμένο χάλυβα, πέραν των προηγουμένων, έχουν προστεθεί και κραματικά στοιχεία σε αναλογίες τέτοιες, ώστε να επηρεάζουν στην επιθυμητή κατεύθυνση ορισμένων ιδιοτήτων [2].

1.2 Ηλεκτρικός Χάλυβας

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους μη προσανατολισμένους ηλεκτρικούς χάλυβες και τους προσανατολισμένους ηλεκτρικούς χάλυβες.

1.2.1 Εισαγωγή

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι αναπόσπαστο κομμάτι της βάσης της ανάπτυξης που συνδέεται με την ανάπτυξη ηλεκτρικών εφαρμογών. Ο πυριτιούχος χάλυβας αναπτύχθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και σύντομα έγινε το κύριο υλικό για μεγάλους μετασχηματιστές, μηχανές και γεννήτριες. Οι βασικοί πυριτιούχοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε μαλακά μαγνητικά υλικά σε ηλεκτρικές συσκευές και μηχανές, και αξιολογούνται βάση των απωλειών όταν μαγνητίζονται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνολική παγκόσμια παραγωγή σε ηλεκτρικούς χάλυβες ανέρχεται στο 1% της συνολικής παραγωγής χαλύβων. Η Worldsteel Committee on economic studies, στις Βρυξέλλες αναφέρει ότι παγκόσμια παραγωγή ελασμάτων το 2008 ήταν 10.291.000 μετρικοί τόνοι και στην Ευρώπη 1.498.000 μετρικούς τόνους. Η παράγωγή του ηλεκτρικού χάλυβα διπλασιάστηκε μέσα σε μία δεκαετία.

Η δομή είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τον καθορισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων στα χαλύβδινα φύλλα. Ο προτιμητέος κρυσταλλογραφικός ιστός αποκρίνεται σε κυβική συμμετρία ιστού με κόκκους των οποίων τα επίπεδα

ολίσθησης είναι (001) και (110) παράλληλα στο διαμήκη άξονα διαμόρφωσης του φύλλου και ομοιογενή κατανομή γύρω από τη διεύθυνση [100]. Η Γκαουσιανή κατανομή του κρυσταλλογραφικού ιστού ανάπτυξης με πλήρη κατευθυντικότητα κρυσταλλογραφική των κόκκων στο ακόλουθο συνδυασμό επιπέδου και διεύθυνσης ανάπτυξης (110)[100] αποτελεί την αντιπροσωπευτικότερη προσέγγιση κρυσταλλογραφικής δομής των προσανατολισμένων πυριτιούχων χαλύβων.

Ο πυριτιούχος χάλυβας είναι θεμελιώδης για την οικονομία των ηλεκτρικών εφαρμογών, και συχνά ο καλύτερος συνδυασμός για μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απαιτούμενες ιδιότητες αυτού του χάλυβα είναι η υψηλή διαπερατότητα και επαγωγή, μικρές μαγνητικές απώλειες και μικρή μαγνητοσυστολή. Η υψηλή διαπερατότητα και επαγωγικότητα μειώνει το μέγεθος και το βάρος των τμημάτων όπου χρησιμοποιείται. Οι μικρές μαγνητικές απώλειες ελαττώνουν τη παραγωγή θερμότητα και κατανάλωση ενέργειας και η μικρή μαγνητοσυστολή μειώνει το θόρυβο (που εμφανίζεται σαν βουητό) στους μετασχηματιστές και στις μηχανές υψηλής χωρητικότητας.

Η βασική τεχνολογία για την παραγωγή μη προσανατολισμένων, πλήρως επεξεργαζόμενων ηλεκτρικών χαλύβων δεν έχει αλλάξει σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, η βασική χημεία είναι ίδια σε όρους των κυρίων κραματικών στοιχείων και τα βήματα επεξεργασίας είναι κυρίως τα ίδια. Ωστόσο οι απώλειες σε ένα χάλυβα με δοσμένη περιεκτικότητα σε Si και Al είναι σήμερα αρκετά μικρότερη συγκρινόμενη με τις προηγούμενες δεκαετίες. Επομένως οι παραγωγοί ηλεκτρικών χαλύβων έχουν κάνει κυρίως μόνο μικρές αλλαγές στη βασική χημεία που χρησιμοποιείται για τις περισσότερες εμπορικές τυποποιημένες ποιότητες. Παγκόσμια και Εθνικά πρότυπα καθορίζουν μόνο τις μέγιστες απώλειες (και συχνά ακόμη την ελάχιστη πόλωση/διαπερατότητα) και δεν έχει κατώτερο όριο απωλειών. Συνεπώς για δοσμένα πρότυπα όρια η διαφορά μεταξύ των μεγίστων εγκεκριμένων απωλειών και των πραγματικών απωλειών του υλικού έχουν σημαντική αύξηση με το πέρασμα του χρόνου.

Ο ηλεκτρικός χάλυβας είναι ένα εμπορικό προϊόν με τιμή αγοράς που προσδιορίζεται από τον βαθμό της περιγραφής. Από πλευράς του χρήστη, αυτή η ανάπτυξη έχει φέρει πλεονεκτήματα, αλλά έχει αυξήσει επίσης την ποικιλία στην αγορά αλλά και την αβεβαιότητα σε ποιο βαθμό είναι τυποποιημένο το προϊόν [4].

1.2.2 Μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες

Οι μη προσανατολισμένοι ηλεκτρικοί χάλυβες σε ελάσματα είναι φύλλα με διαμορφωμένα στο να έχουν ειδικές ιδιότητες και παράγονται από κράματα Fe-Si και Fe-Si-Al. Τα ελάσματα αυτά ενσωματώνονται σε ένα εύρο φάσμα εφαρμογών, από απλές οικιακές συσκευές μέχρι υβριδικές και “καθαρά” ηλεκτρικά οχήματα. Μελλοντικές προσπάθειες εστιάζονται στο έλεγχο των υπολειπόμενων στοιχείων του μετάλλου, βελτιώνοντας την θερμότητα και ψυχρή έλαση, καθώς επίσης και την ανάπτυξη της κρυσταλλογραφικής δομής, με σκοπό τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος [4].

1.2.3 Ταξινόμηση

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα, εμπορικά καλείται επίσης ως φύλλα χάλυβα, πυριτιούχος ηλεκτρικός χάλυβας, πυριτιούχος χάλυβας, είναι ειδικά επεξεργασμένο χαλύβδινο έλασμα ώστε να έχει συγκεκριμένες μαγνητικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται σε μορφή φύλλων λαμαρίνας, κυρίως σε κινητήρες, μετασχηματιστές και εναλλάκτες ανάλογα με τις ιδιότητές του.

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες ως προς την επίτευξη των μαγνητικών τους ιδιοτήτων:

- Πλήρη διαδικασία διαμόρφωσης, όπου αποστέλλεται στις καλύτερες συνθήκες, με συνεχόμενες ανοπήσεις και μερικές φορές και επικαλυμμένος. Έχει πιστοποιημένες μαγνητικές ιδιότητες που συμφωνούν με τα πρότυπα. Π.χ. EN 10106:2009
- Μερική-μη ολοκληρωμένη διαδικασία διαμόρφωσης, όπου δίνεται στον αγοραστή για την τελική ανοπήση και ανάπτυξη των μαγνητικών ιδιοτήτων.

Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας σε ελάσματα συχνά κατασκευάζεται με τη διαδικασία της ψυχρής έλασης με πάχος (0.35, 0.5, 0.65 και 1.00) mm και με συγκεκριμένη τιμή μεγίστων απωλειών σε W/kg. Ο μη προσανατολισμένος ηλεκτρικός χάλυβας παρέχεται είτε σε στοίβες στην περίπτωση που είναι φύλλα είτε σε κουλούρες όταν είναι σε λωρίδες [4].



Εικόνα 1-1: Ηλεκτρικός χάλυβας σε κουλούρες

1.2.4 Κύρια κραματικά στοιχεία του ηλεκτρικού χάλυβα

Οι χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

Μαγνητικά μαλακοί χάλυβες. Περιέχουν μεγάλο ποσοστό Si (4-5%) και έχουν τις εξής ιδιότητες: μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα και μικρές απώλειες ενέργειας από υστέρηση και δινορρέυματα. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών για ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες.

Μαγνητικά σκληροί χάλυβες. Τυπικοί μαγνητικοί σκληροί χάλυβες περιέχουν C (0,8-1,0%), Cr (0,6-0,9%), W (έως 6,0%), και Co (3,0 και 15%). Άλλα μαγνητικά υλικά με βάση τον σίδηρο, είναι κράματα Fe-Ni, Fe-Co και Fe-Co-Ni. Επίσης, τελευταία έχουν βελτιωθεί οι ιδιότητες τους με προσθήκες Al, Cu και Ti, όπως είναι το κράμα 57Fe-12Co-9Al-16Ni-5Cu-1Ti (κράμα Alnico). Παρουσιάζουν μεγάλο βρόχο υστέρησης και παραμένουσες μαγνητικές επαγωγές (B_r) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως μόνιμοι μαγνήτες [5].

2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ο καλύτερος τρόπος για να παρουσιάσουμε τα διαφορετικά είδη μαγνητισμού είναι να περιγράψουμε πώς τα μαγνητικά υλικά αποκρίνονται στην επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Η κύρια διάκριση είναι ότι σε κάποια υλικά δεν υπάρχει μια μοιόμορφη αλληλεπίδραση του των ατομικών μαγνητικών ροπών, ενώ σε άλλα υλικά η αλληλεπίδραση αυτή είναι ισχυρή. Υπάρχουν δύο τύποι μαγνητικών υλικών:

- Τα μαγνητικά υλικά τα οποία μαγνητίζονται μόνο όταν τους εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά.

αλκάλια		αμέταλλα																ευγενή αέρια																	
1 H	αλκαλικές γαίες	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110 110	111 111	112 112	Λανθανίδες						58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
Ακτινίδες			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																			

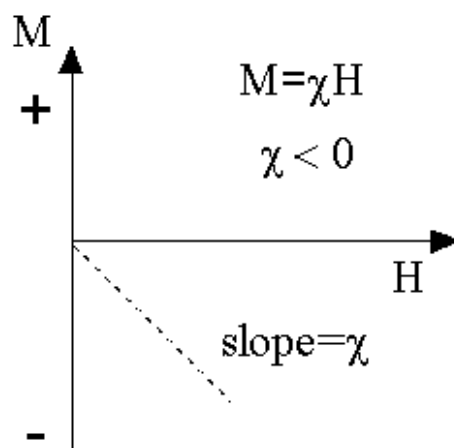
Κίτρινο	Σιδηρομαγνητικά σε θερμοκρασίες δωματίου
Πράσινο	Αναφέρονται ευρέως στα μαγνητικά μείγματα
Ροζ	Κάποιος σπουδαιότητας για το μαγνητισμό
Μπλε	Μικρής σπουδαιότητας για το μαγνητισμό
Γκρι	Λίγο ή καθόλου σημαντικά στο μαγνητισμό
Κόκκινο	Όχι μαγνητικά

Εικόνα 2-1: Τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα και η συμπεριφορά τους υπό την παρουσία μαγνητικού πεδίου

- Τα μαγνητικά που διατηρούν την μαγνητική τους κατάσταση ακόμα και κατά την απουσία εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (αυθόρμητη μαγνήτιση). Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά, αντισιδηρομαγνητικά και σιδηριμαγνητικά υλικά. Τα περισσότερα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικές εφαρμογές ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

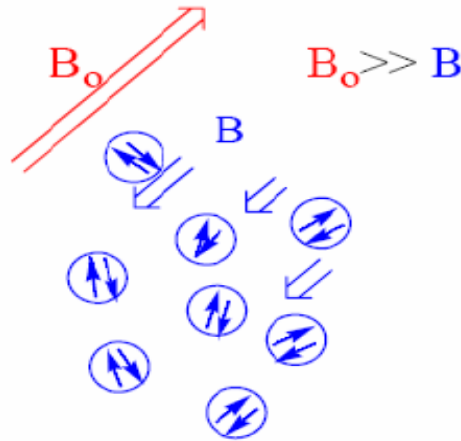
2.2 Διαμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή, της τάξης $\chi \approx -10^{-5}$. Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Όταν ένα διαμαγνητικό υλικό τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης M εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 2-2: Μαγνήτιση διαμαγνητικών υλικών

Στα διαμαγνητικά υλικά όλα τα ηλεκτρόνια είναι συζευγμένα, είναι δηλαδή όλες οι στιβάδες/υποστιβάδες συμπληρωμένες, έτσι όταν δεν υπάρχει εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο δεν υπάρχει και μόνιμη μαγνητική ροπή.

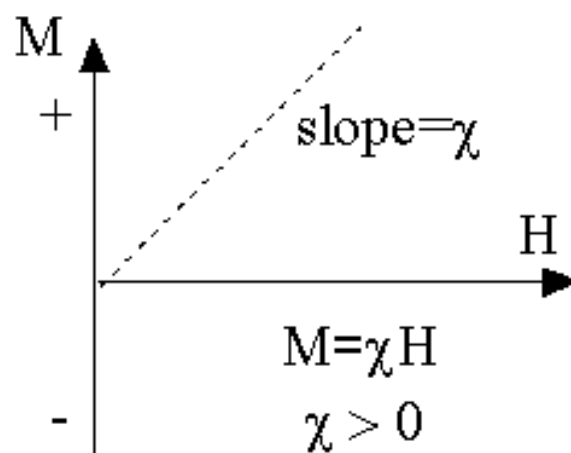


Εικόνα 2-3: Εσωτερικό και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα διαμαγνητικά υλικά καθώς και οι απεικόνιση των συμπληρωμένων υποστοιβάδων.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα διαμαγνητικά υλικά απωθούν το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και ότι υπό την απουσία μαγνητικού πεδίου δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες [6].

2.3 Παραμαγνητικά υλικά

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική και κυμαίνεται από 10^{-3} έως 10^{-5} , γεγονός που δεικνύει ότι τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται από το μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 2-4: Μαγνήτιση παραμαγνητικών υλικών

Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαίους προσανατολισμούς. Παρουσία μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής, αλλά

προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση M συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, και η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Οι παραμαγνητικές ιδιότητες οφείλονται στην ύπαρξη ασύζευκτων ηλεκτρονίων και έτσι τα παραμαγνητικά υλικά έχουν διπολική μαγνητική ροπή. Αν και υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια, οι μαγνητικές τους ροπές δεν αλληλεπιδρούν μαγνητικά και η συνολική μαγνήτιση, όπως και στα διαμαγνητικά υλικά, είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα παραμαγνητικά υλικά ελκύονται από το μαγνητικό πεδίο και δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν η επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου πάψει να υπάρχει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο [6].

2.4 Σιδηρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά

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

2.5 Αντισιδηρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να

έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, απουσία πεδίου εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν υπάρχει μαγνήτιση. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel T_n . Σε θερμοκρασίες πάνω από την T_n , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά [6].

2.6 Φερομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_c), παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_c , τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές, μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν διαφορετικό μέτρο, και έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι οι σιδηρίτες (Fe_3O_4) [6].

2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ

2.7.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού ως προς τις μαγνητικές του ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική του επαγωγή B ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου H σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του H (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης). Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες τιμές, απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου [6].

2.7.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο και να διατηρούν τη μαγνήτισή τους και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ικανότητα τους αυτή αποτελεί το

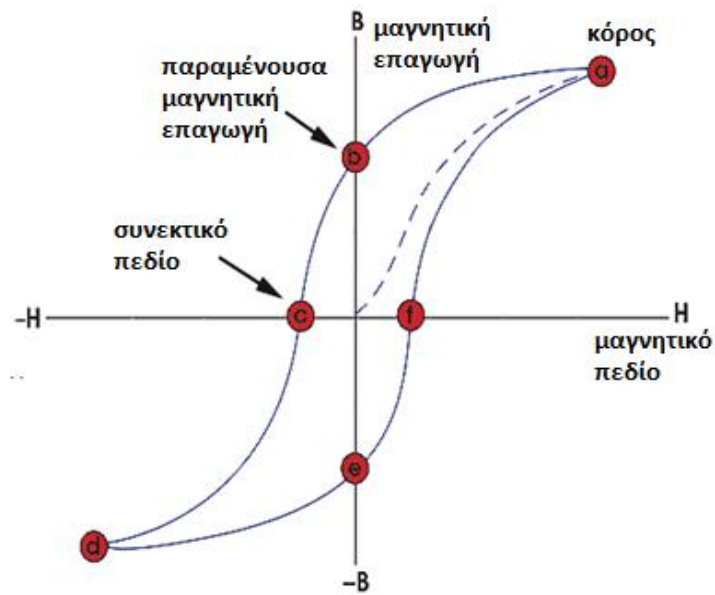
κύριο χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία αν και εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου παύουν να είναι μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνση αυτού [6].

2.7.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

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

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

Σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, η εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς την διεύθυνση του πεδίου (διακεκομμένη γραμμή της εικόνας 2-5.) Κατά την αύξηση του μαγνητικού πεδίου H σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Φτάνοντας στο σημείο a , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή B . Η τιμή της επαγωγής στο σημείο a είναι B_s (επαγωγή κόρου και κατά συνέπεια μαγνήτιση κόρου M_s) απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H , οπότε περαιτέρω αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζει καθόλου την μαγνήτιση M και κατά συνέπεια την μαγνητική επαγωγή B . Η μαγνήτιση κορεσμού M_s εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου.



Εικόνα 2-5: Βρόχος Υστέρησης

Στη συνέχεια, καθώς το H αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο a στο b . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η επαγωγή δεν είναι μηδέν αλλά έχει τιμή B_r . Στο σημείο b το υλικό έχει μετατραπεί σε μόνιμο μαγνήτη γιατί υπάρχει μαγνήτιση χωρίς εξωτερικό πεδίο H και η μαγνήτιση ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση M_r και κατ' επέκταση παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r .

Εφαρμόζοντας στο υλικό πεδίο που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο c μηδενίζεται ($B=0 \rightarrow$ κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης). Στο σημείο αυτό το μαγνητικό πεδίο έχει τιμή $-H_c$ και ονομάζεται συνεκτικό πεδίο.

Αυξάνοντας αρνητικά το πεδίο, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Ελαττώνοντας το εξωτερικό πεδίο η καμπύλη περνάει από το σημείο e (παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $-B_r$). Καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το σημείο f (συνεκτικό πεδίο H_c)

2.7.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H ,

προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς την διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο H , η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή M_0 . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολική ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου [6].

2.7.5 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικά πεδίου έντασης H_c . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του H στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης [6].

2.7.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie, εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραματικών [6].

2.8 ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά

υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

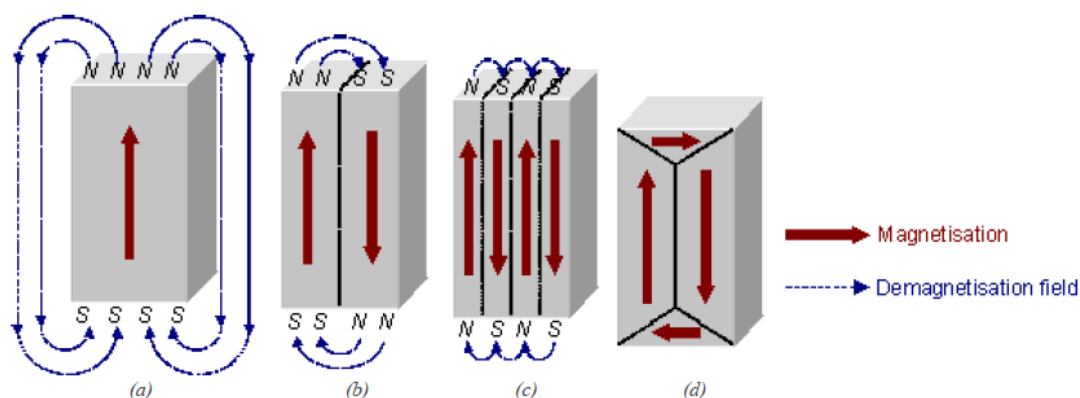
Τα σκληρά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές [6].

3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

3.1 Μαγνητικές περιοχές

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου αποτελείται από μαγνητικές περιοχές. Μια μαγνητική περιοχή (magnetic domain) χαρακτηρίζεται από spin μαγνητικές ροπές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και η ύπαρξη τους είναι απαίτηση για κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, καθώς ένα δείγμα μιας περιοχής έχει αυξημένη μαγνητοστατική ενέργεια. Το «σπάσιμο» της μαγνήτισης σε τοπικές περιοχές μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια. Στο σχήμα 3-1, δίνεται σχηματικά η εμφάνιση και ανάπτυξη των περιοχών σε ένα δείγμα που ενώ αρχικά έχει παραμένουσα μαγνήτιση και είναι κορεσμένο, απομαγνητίζεται.

Το δείγμα έχει μεγάλη μαγνητοστατική ενέργεια (a) που είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ελεύθερων μαγνητικών γραμμών οι οποίες εξέρχονται από την επιφάνεια του υλικού και προκαλούν τη δημιουργία εξωτερικού πεδίου απομαγνήτισης. Το πεδίο απομαγνήτισης αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα μαγνήτιση του υλικού. Η διαίρεση της μαγνήτισης σε δύο περιοχές (b), μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια κατά το ήμισυ, στο (c) κατά το ένα τέταρτο της αρχικής και ούτω καθεξής. Στο σχήμα (d) η μαγνητοστατική ενέργεια θα είναι θεωρητικά μηδενική αν δεν υπεισερχόταν ο παράγοντας της ανισοτροπίας και των γειτονικών περιοχών που έχουν διαφορά προσανατολισμού κατά 180° [6].

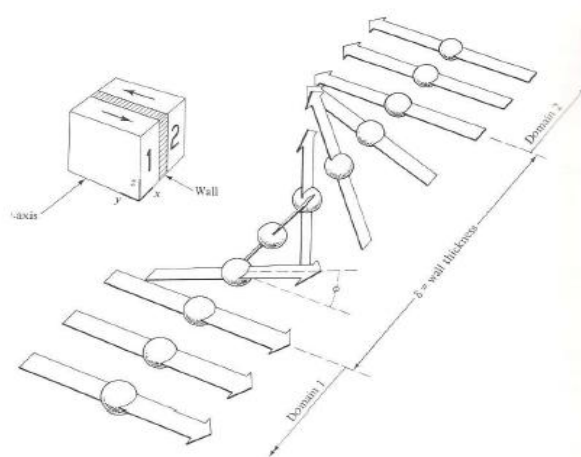


Εικόνα 3-1: Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές. Σε κάθε περιοχή, τα spin είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό

3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

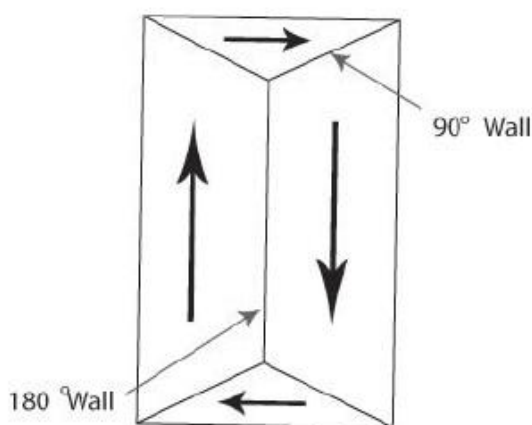
Τα μαγνητικά τοιχώματα αποτελούν τα χωρίσματα των μαγνητικών περιοχών, στις οποίες η μαγνήτιση έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Μέσα στο τοίχωμα, η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση από αυτή της μίας περιοχής στην άλλη. Τα τοιχώματα αυτά δεν είναι απείρως λεπτά αλλά έχουν ένα πεπερασμένο πλάτος. Το πάχος τους ουσιαστικά είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής (που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους) και την ενέργεια ανισοτροπίας (που απαιτεί την ύπαρξη ενός λεπτού τοιχώματος). Ένα στενό τοίχωμα δημιουργεί μεγάλες γωνίες για γειτονικά spin και η ενέργεια ανταλλαγής είναι μεγάλη, ενώ σε ένα ευρύ τοίχωμα, πολλά spin έχουν κατεύθυνση μακριά από τις διευθύνσεις εύκολης μαγνήτισης με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας ανισοτροπίας. Έτσι το πάχος ισοροπίας είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανισοτροπίας εντός του τοιχώματος.

Γενικά τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα 180° και σε μη- 180° , δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές. Τα τοιχώματα 180° συναντώνται σχεδόν σε όλα τα υλικά και διαφέρουν από όλα τα άλλα τοιχώματα στο ότι δεν επηρεάζονται από την επιβολή μηχανικής τάσης. Στα τοιχώματα αυτά οι διευθύνσεις της μαγνήτισης σε γειτονικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες και κατά συνέπεια οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών έχουν διευθύνσεις ισοδύναμων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Στην εικόνα 3-2 απεικονίζεται ένα τοίχωμα 180° που διαχωρίζει δύο περιοχές με μαγνήτιση σε αντίθετες διευθύνσεις. Αν η μαγνήτιση περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια του τοιχώματος, τότε το τοίχωμα καλείται τοίχωμα Bloch [6].



Εικόνα 3-2: Δομή τοιχώματος Bloch 180°

Στα υλικά που κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα, τα τοιχώματα μη- 180° είναι όλα 90° , έτσι ώστε οι διευθύνσεις των δίπολων σε γειτονικές μαγνητικές περιοχές να είναι ορθές γωνίες. Γι' αυτό στον σίδηρο που οι κύριοι άξονες είναι στις διευθύνσεις (100), τα μαγνητικά τοιχώματα ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (-100) είναι όλα 180° , ενώ αυτά που είναι ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (010) είναι τοιχώματα 90° . Συχνά όλα τα μη - 180° μαγνητικά τοιχώματα αναφέρονται εσφαλμένα ως τοιχώματα 90° για να τονίζεται η ευαισθησία που έχουν στην επιβολή μηχανικής τάσης σε σχέση με τα τοιχώματα 180° [6].



Εικόνα 3-3: Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90°

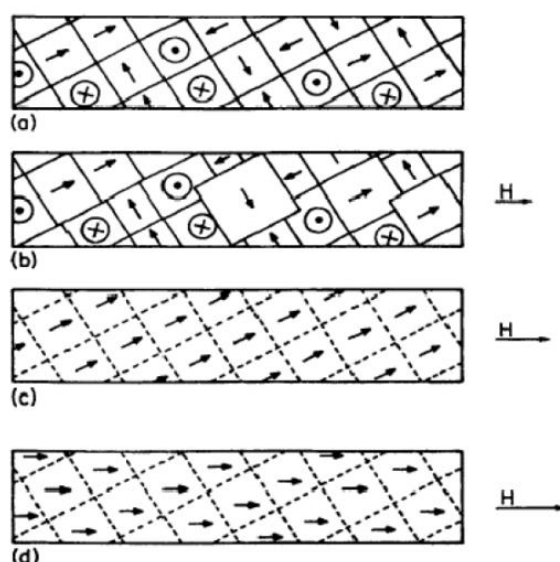
3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από μαγνητικές περιοχές ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μαγνήτισης

και στην κατάσταση απομαγνήτισης είναι η διαφορετική διάταξη και προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών. Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμοσθεί σε ένα μη μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό, οι μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} συναρτήσει του πεδίου \mathbf{H} παράγουν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης.

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

Η τελική επίδραση του πεδίου στις μαγνητικές περιοχές εμφανίζεται σε ισχυρά πεδία. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι μαγνητικές ροπές που έχουν σχηματίσει μικρή γωνία με το πεδίο), αρχίζουν με την περαιτέρω αύξηση του πεδίου να αποκλίνουν σταδιακά τείνοντας να ευθυγραμμιστούν απόλυτα με το πεδίο. Έτσι το υλικό αποκτά μία μόνο μαγνητική περιοχή [6].



Εικόνα 3-4: Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμψής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (γ) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (δ)

3.4 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ

Όταν όλες οι περιοχές έχουν προσανατολιστεί, με το διάνυσμα της αυθόρμητης μαγνήτισής τους παράλληλα στο πεδίο, το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μία μόνο μαγνητική περιοχή. Η κατάσταση αυτή αποκαλείται τεχνητή μαγνήτιση κόρου. Εάν το μαγνητικό πεδίο αυξηθεί πέρα από αυτή την τιμή, τότε παρατηρείται μία περαιτέρω, αργή, αύξηση της μαγνήτισης. Σε αυτό το σημείο οι ατομικές μαγνητικές ροπές, που δεν είναι τέλεια διατεταγμένες λόγω της θερμικής κίνησης, φθάνουν σε κατάσταση πλήρους διάταξης, με αποτέλεσμα την αύξηση της αυθόρμητης μαγνήτισης του υλικού. Η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους 0 K είναι ίση με τη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πέφτει το μηδέν καθώς προσεγγίζεται η θερμοκρασία Curie. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 K, οι μαγνητικές ροπές εκτελούν μία μεταπτωτική κίνηση γύρω από τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της θερμικής ενέργειας. Αυτή η κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα η αυθόρμητη μαγνήτιση να είναι μικρότερη από τη μαγνήτιση κορεσμού. Σε πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία οι μαγνητικές ροπές διατάσσονται πλήρως και η μαγνήτιση φθάνει τη μαγνήτιση κορεσμού [6].

3.5 ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

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

Η μετατόπιση ενός τοιχώματος εντός ενός κρυστάλλου επηρεάζεται από τις κρυσταλλικές ατέλειες, και τις προσμίξεις. Έτσι δεν είναι ομαλή και είναι, συνήθως, μη αντιστρεπτή εκτός από την περίπτωση που το υλικό είναι υψηλής καθαρότητας. Τα μαγνητικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επηρεάζονται από τις μη μαγνητικές προσμίξεις, τα εγκλείσματα, τρύπες και ρωγμές. Ένα έγκλεισμα για παράδειγμα που βρίσκεται σε μια περιοχή, μαγνητίζεται και δημιουργούνται σε αυτό βόρειος και νότιος πόλος. Αν το τοίχωμα έπρεπε να περάσει από μέσα από το έγκλεισμα, τότε η μαγνητοστατική ενέργεια θα ήταν μικρότερη, γεγονός που είναι

ενεργειακά προτιμότερο. Η μείωση της μαγνητοστατικής δυναμικής ενέργειας σημαίνει ότι απαιτείται πλέον μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθεί το τοίχωμα και να απομακρυνθεί από το έγκλεισμα. Έτσι μακροσκοπικά φαίνεται ότι οι προσμείξεις έλκουν τα τοιχώματα και καταφέρνουν να συγκρατούν κατά κάποιο τρόπο την κίνησή τους.

Επίσης, οι διαταραχές στον κρύσταλλο του υλικού δημιουργούν πεδία τοπικών τάσεων, τα οποία με τη σειρά τους αναπτύσσουν μία ανομοιογενή τάση μέσα στον όγκο του στερεού εμποδίζοντας έτσι την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Αυτό εξηγεί γιατί δοκίμια που έχουν υποστεί ψυχρή μηχανουργική κατεργασία εμφανίζουν υψηλότερο συνεκτικό πεδίο και μικρή αρχική επιδεκτικότητα σε σχέση με άλλα δοκίμια του ίδιου υλικού, τα οποία έχουν ανακτηθεί. Για την απομάκρυνση ενός τοιχώματος από μία διαταραχή, απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Το τοίχωμα συγκρατείται σε κάποιο σημείο από μία ατέλεια ή από μία πρόσμειξη και για να ελευθερωθεί απαιτείται η εφαρμογή ενός ισχυρότερου πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί, το τοίχωμα κινείται μέχρις ότου να δεσμευτεί από μία άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο αυξηθεί ακόμα παραπάνω και ούτω καθεξής [6].

4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Ως αισθητήρες ορίζονται οι συσκευές, οι οποίες λαμβάνουν ένα ερέθισμα και παράγουν ένα ηλεκτρικό σήμα (σήμα εξόδου)[7]. Η κατηγοριοποίησή 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[8]:

1. *Συνάρτηση μεταφοράς*: είναι η σχέση μεταξύ ερεθίσματος και σήματος εξόδου.
2. *Εναισθησία*: 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.

4.1.1 Μαγνητικοί Αισθητήρες

Μεγάλη κατηγορία αισθητήρων αποτελούν 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[7],[9]. 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 σιδηρομαγνητικού 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 βρόχου 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 [10].
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 φαινομένου 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[10].

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 υψηλότερης 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.

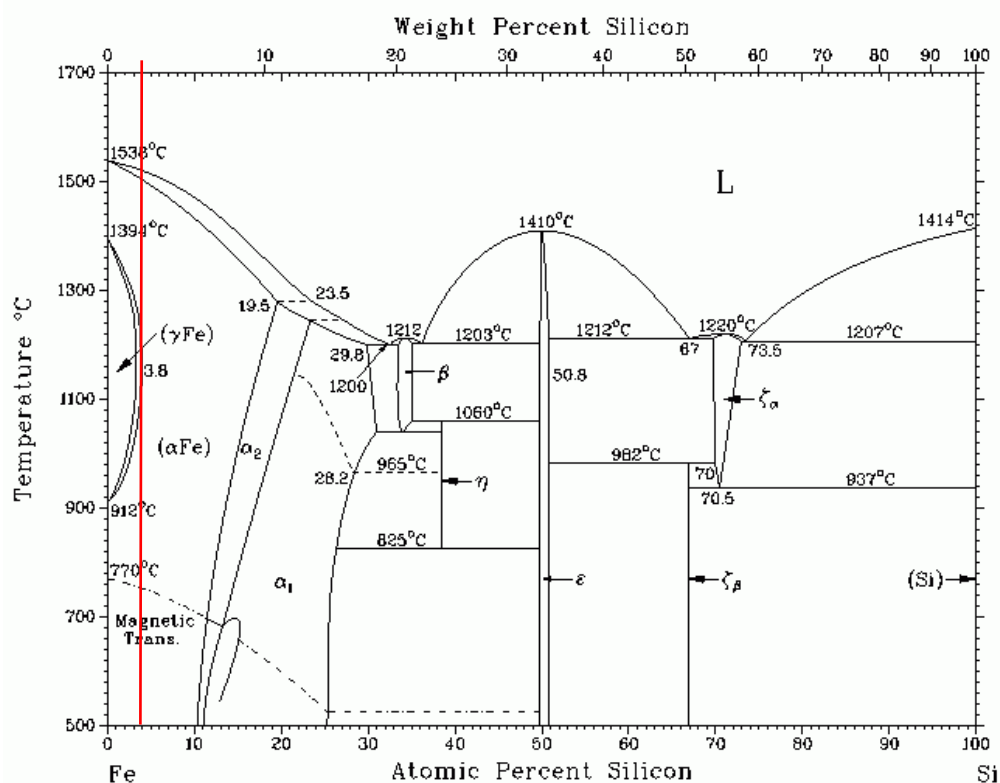
5 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

5.1 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

Τα βασικά μέρη του μαγνητικού αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ηλεκτρομαγνήτης, τα πηνία διέγερσης και λήψης και η ηλεκτρονική διάταξη επεξεργασίας του λαμβανόμενου σήματος. Το σήμα εξόδου στη συνέχεια απεικονίζεται σε ένα ψηφιακό παλμογράφο, ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες μαγνητικές παράμετροι.

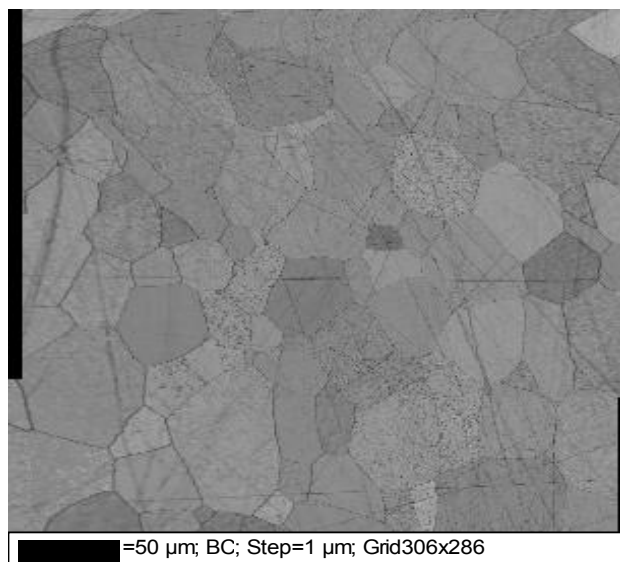
5.2 ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΗ (ΥΟΚΕ)

Το σύνολο του υπό εξέταση υλικού προήλθε εξ ολοκλήρου από την LADIS & GYR. Προμηθευτήκαμε μια κουλούρα ηλεκτρικού χάλυβα πάχους 0,5mm και όπως δόθηκε από τον προμηθευτή η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο ήταν 3wt%. Όπως φαίνεται και στο διμερές διάγραμμα φάσεων του Fe-Si, (Εικόνα 5-1) το υλικό στις συνήθεις θερμοκρασίες είναι μονοφασικό, αποτελείται από μια φερριτική μήτρα, και διατηρείται μονοφασικό σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος, μέχρι την τήξη του.



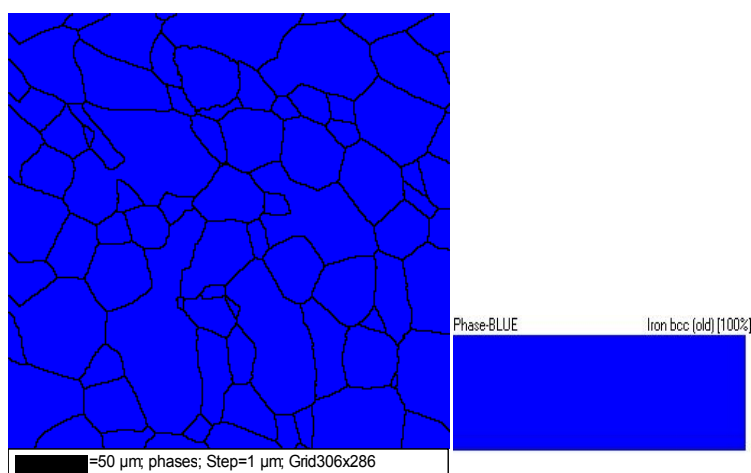
Εικόνα 5-1: Διμερές διάγραμμα φάσεων Fe- Si

Πραγματοποιήθηκε, με την χρήση της τεχνικής EBSD, η κρυσταλλογραφική χαρτογράφηση της επιφάνειας του δείγματος ηλεκτρικού χάλυβα που παρελήφθη (εικόνα 5-2).



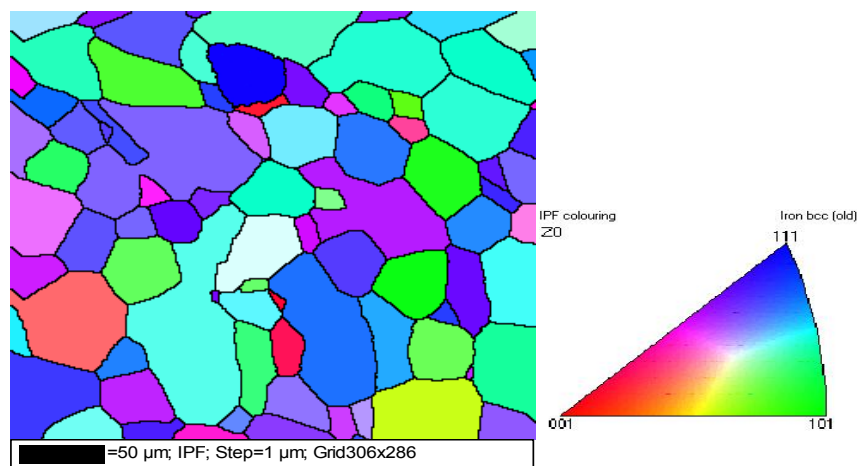
Εικόνα 5-2: Υπό εξέταση επιφάνεια μέσω της τεχνική EBSD.

Το πολυκρυσταλλικό υλικό επιβεβαιώνεται ότι είναι μονοφασικό, αποτελούμενο από κόκκους σιδηρίτη. Η ποσοστιαία κραματική συμμετοχή των κόκκων του σιδηρίτη ήταν 100%. Επίσης, η μονοφασικότητα της μήτρας, για τη συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε Si, επιβεβαιώνεται και από το διμερές διάγραμμα φάσεων αμοιβαίας διαλυτότητας Fe-Si (εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-3: Ταυτοποίηση φάσεων στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού αναφοράς μέσω της τεχνική EBSD.

Μέσω των ανάστροφων στερεογραφικών προβολών (inverted pole figures, IPF) παρατηρείται η ετεροτροπία στην ανάπτυξη των προτιμητέων κρυσταλλογραφικών ιστών ανάπτυξης σε διάφορα κρυσταλλογραφικά συστήματα (εικόνα 5-4). Ωστόσο η κατανομή του είναι πολύ κοντά στους εύκολους άξονες μαγνήτισης, όπως αυτό υπαγορεύει η κραμάτωση του υλικού με Si. Συγκεκριμένα, οι σιδηριτικοί κόκκοι αναπτύσσονται, ως επί το πλείστον, στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (001) και (101). Παρατηρούνται ωστόσο σχηματιζόμενοι κόκκοι στο επίπεδο (111).



Εικόνα 5-4: Προτιμητέος κρυσταλλογραφικός ιστός ανάπτυξης μέσω IPF.

5.3 ΠΗΝΙΟ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΛΗΨΗΣ

Κατά την μεταπτυχιακή αυτή εργασία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο τύποι ηλεκτρομαγνητών. Στον πρώτο τύπου το πέλμα του στελέχους του ηλεκτρομαγνήτη ήταν 10 mm x 12 mm όπως φαίνεται στην εικόνα 5-5α. Ο δεύτερος τύπος ηλεκτρομαγνήτη σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα του στελέχους του ηλεκτρομαγνήτη να είναι 10 mm x 1 mm όπως φαίνεται στην εικόνα 5-5β. Το συγκριτικό πλεονέκτημα του δεύτερου τύπου ως προς τον πρώτο ήταν ότι λόγω του μικρού εμβαδού του πέλματος του στελέχους, το οποίο εφάπτεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού, μειώνει την επίδραση και την εμφάνιση ισχυρών δινορευμάτων. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η αξιοπιστία της μέτρησης και βελτιώνεται σημαντικά η μαγνητική αποκρισημότητα.

5.3.1 Πηνίο διέγερσης

Στη μεγάλη πλευρά του ηλεκτρομαγνήτη τυλίχθηκαν 300 σπείρες χάλκινου σύρματος, διαμέτρου 0.1 mm, επικαλυμμένου με βερνίκι. Στο πηνίο αυτό εφαρμόστηκε εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα πλάτους 1V και συχνότητας 1 Hz.

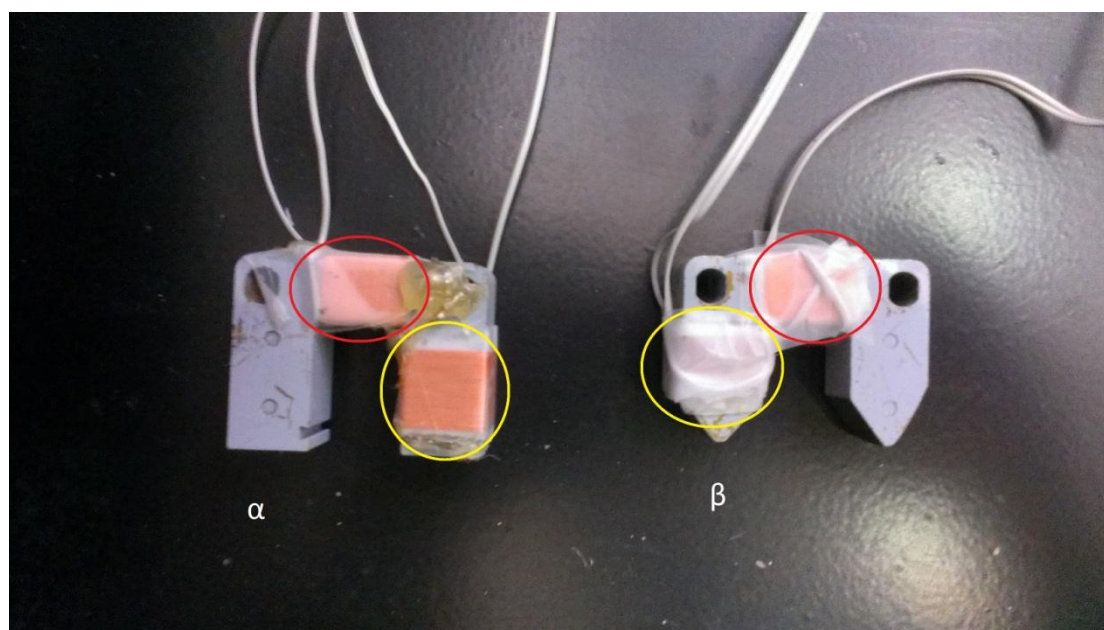
Στον δεύτερο ηλεκτρομαγνήτη διαφορετικής γεωμετρίας σε σχέση με τον πρώτο, τυλίχθηκαν στη μεγάλη πλευρά του ηλεκτρομαγνήτη 488 σπείρες χάλκινου σύρματος, διαμέτρου 0.1 mm, επικαλυμμένου με βερνίκι. Στο πηνίο αυτό εφαρμόστηκε και πάλι εναλλασσόμενο ημιτονικό σήμα πλάτους 1V και συχνότητας 1 Hz.

5.3.2 Πηνίο λήψης

Για τη μέτρηση του παραγόμενου σήματος κατασκευάστηκε ειδικό πηνίο από λεπτό σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1 mm, επικαλυμμένο με βερνίκι. Το πηνίο τυλίχθηκε χειροκίνητα στο ένα στέλεχος του ηλεκτρομαγνήτη και σχηματίστηκαν 350 σπείρες.

Και το δεύτερο πηνίο που κατασκευάστηκε για τον δεύτερο ηλεκτρομαγνήτη χρησιμοποιήθηκε χάλκινο σύρμα, διαμέτρου 0.1 mm, με βερνίκι και τυλίχθηκαν 475 σπείρες χειροκίνητα.

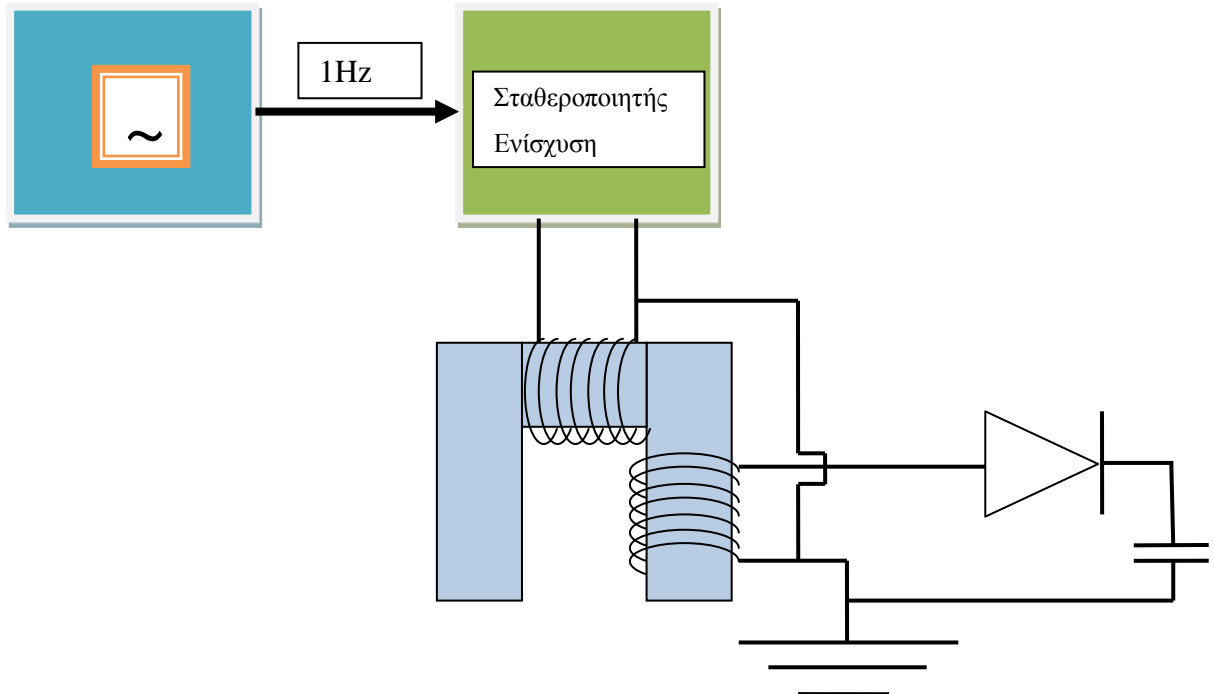
Η διάταξη των πηνίων διέγερσης και λήψης παρουσιάζεται στην εικόνα 5-5.



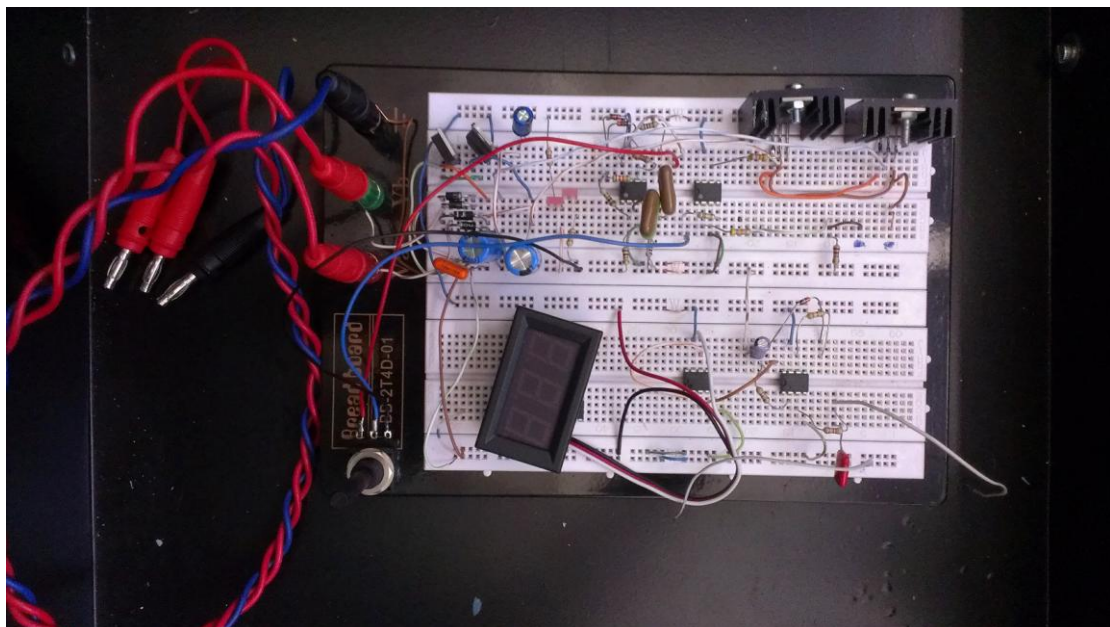
Εικόνα 5-5: Πηνία διέγερσης (κόκκινο χρώμα) και λήψης(κίτρινο χρώμα).

5.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η ηλεκτρονική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 5-6. Σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε στο ΤΕΙ Πειραιά, υπό την επίβλεψη του κ. Πρέκα.



Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρονικής διάταξης



Εικόνα 5-6: Ηλεκτρονική διάταξη.

5.5 ΜΕΤΡΗΣΙΜΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Αρχικά μετρήθηκε η τάση εξόδου των διατάξεων των πηνίων και στη συνέχεια αφαιρέθηκαν μεταξύ τους ώστε να είναι γνωστή η μαγνητική διαπερατότητα του ηλεκτρομαγνήτη. Οι μαγνητικές παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν το πλάτος του σήματος εξόδου που είναι ανάλογο με τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και το εύρος της κορυφής της κυματομορφής, που υποδηλώνει τη διάρκεια της μαγνήτισης και σχετίζεται με το συνεκτικό πεδίο.

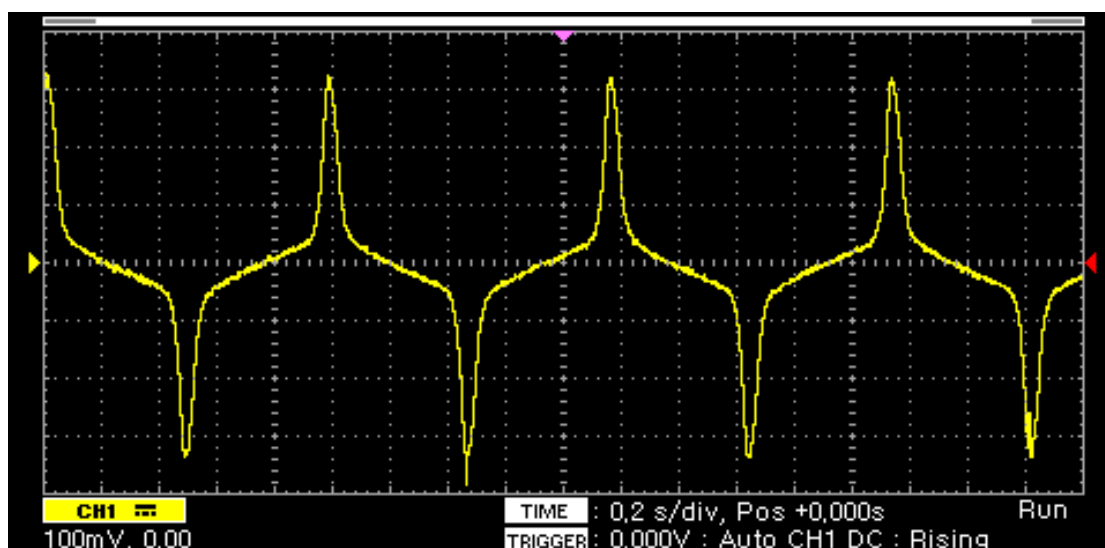
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία της διάταξης, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος μεταλλικών δοκιμών τα οποία είχαν ήδη μετρηθεί με τον υπάρχοντα μαγνητικό αισθητήρα του εργαστηρίου Μεταλλογνωσίας. Καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε κατά τη διάρκεια πολλαπλών μετρήσεων σε ένα δοκίμιο, να διατηρηθεί σταθερή η επαφή δείγματος -πηνίων.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια των εργαστηριακών δοκιμών ήταν από ηλεκτρικό χάλυβα (προσανατολισμένου και μη), κοινό ανθρακούχο υποευτηκτοειδή χάλυβα, μικροκραμματωμένο χάλυβα, χάλυβα τύπου TRIP και Duplex, ωστενιτικό ανοξείδωτο και υπερκράματα νικελίου.

6.1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Η παρουσία φερριτικής μήτρας στο χάλυβα, η οποία αποτελεί ένα μαλακό μαγνητικό υλικό ενισχύει σημαντικά τη μαγνητική απόκριση του υλικού και οδηγεί σε αυξημένες τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας (οξείες καμπάνες κυματομορφής). Η διαδικασία της μαγνήτισης είναι σύντομη και περιορίζεται μόνο από δομικά εμπόδια κατά την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, όπως τα όρια των κόκκων και η παρουσία διαταραχών. Η ευκολία στη μαγνήτιση του υλικού υποδηλώνει και τις χαμηλές τιμές συνεκτικού πεδίου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.

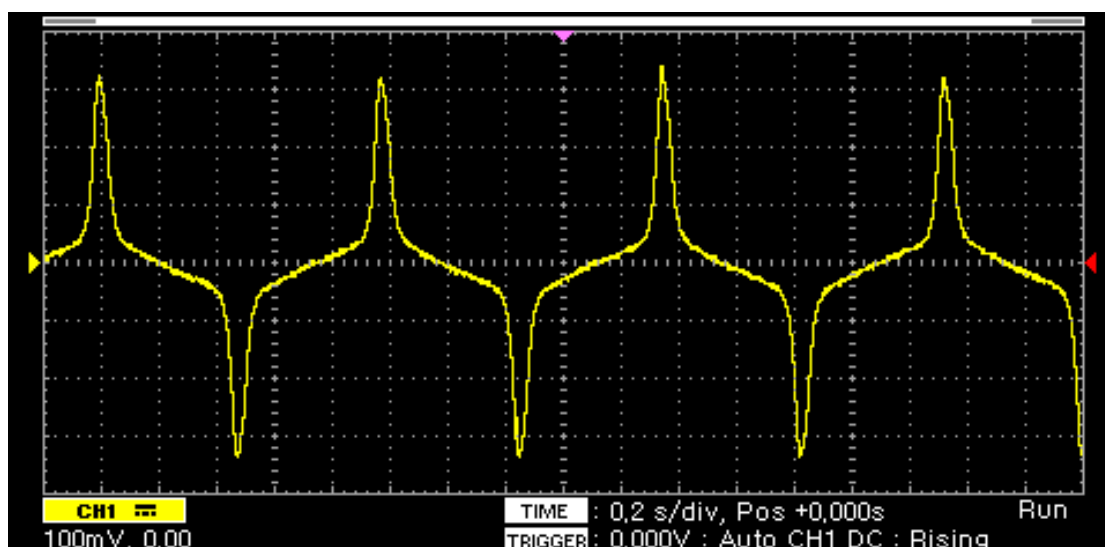


Εικόνα 6-1: Μαγνητικό σήμα εξόδου του μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα.

6.1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

Η μεγιστοποίηση της μαγνητική απόκρισης υποδηλώνει ότι η μέτρηση λαμβάνονταν στον εύκολο άξονα της μαγνήτισης και ότι το μαγνητικό πεδίο εφαρμόζονταν παράλληλα στον άξονα της έλασης, όπου και παρατηρείται αυξημένη συμμετοχή κόκκων σιδηρίτη με αναπτυσσόμενο κρυσταλλογραφικό ιστό Goss.

Η παρουσία σιδηριτικής μήτρας στο χάλυβα, η οποία αποτελεί ένα μαλακό μαγνητικό υλικό, ενισχύει σημαντικά τη μαγνητική απόκριση του υλικού και οδηγεί σε αυξημένες τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας (οξείες καμπάνες κυματομορφής). Η διαδικασία της μαγνήτισης είναι σύντομη και περιορίζεται μόνο από δομικά εμπόδια κατά την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, όπως τα όρια των κόκκων και η παρουσία διαταραχών. Η ευκολία στη μαγνήτιση του υλικού υποδηλώνει και τις χαμηλές τιμές συνεκτικού πεδίου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.



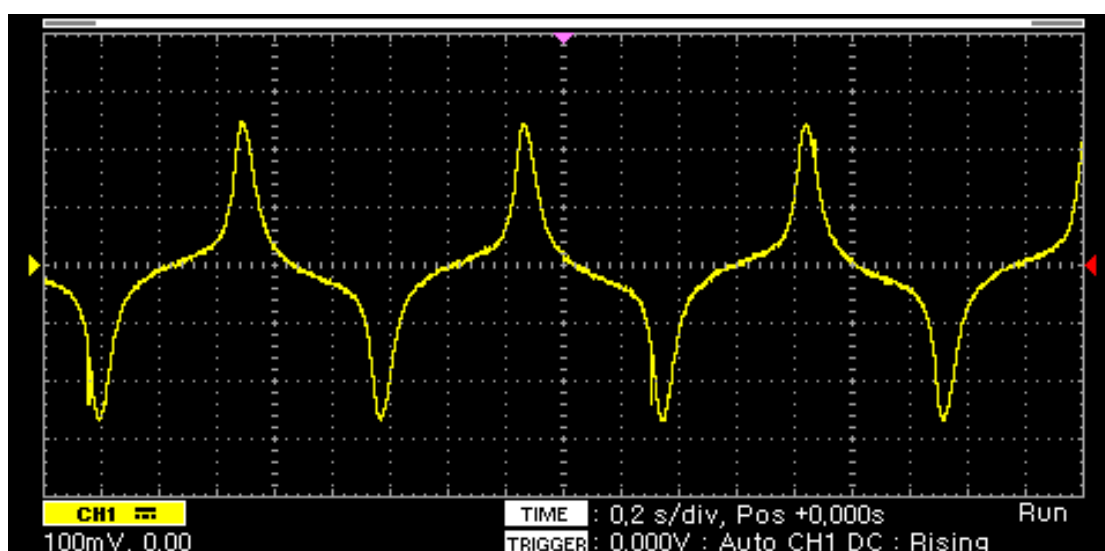
Εικόνα 6-2: Μαγνητικό σήμα εξόδου του προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα.

6.1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η σιδηριτοπερλιτική δομή του χάλυβα επηρεάζει την μαγνητική απόκριση του αισθητήρα. Ο περλίτης ως μικρογραφικό συστατικό αποτελείται από πλακίδια ευτηκτοειδούς σιδηρίτη και ευτηκτοειδούς σεμεντίτη. Ο ευτηκτοειδής σιδηρίτης είναι μαλακό μαγνητικό υλικό, ενώ το καρβίδιο του σεμεντίτη έχει αποδειχθεί ότι είναι

σκληρό μαγνητικό υλικό. Ως εκ τούτου, λειτουργεί ως σημείο αγκύρωσης κατά την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα να καθυστερεί η διαδικασία της μαγνήτισης (διεύρυνση της κορυφής).

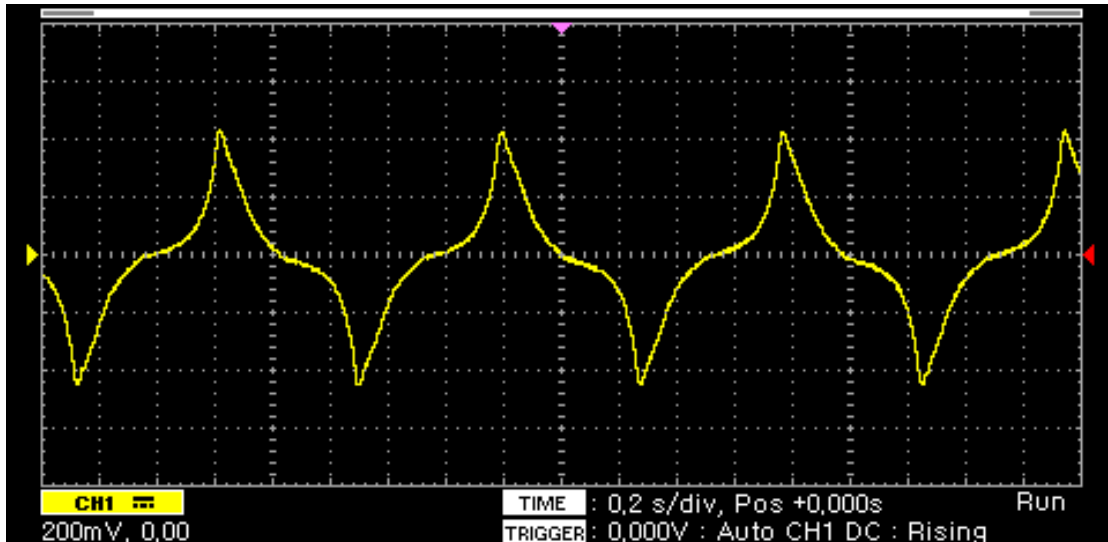
Η πτώση των τιμών του μαγνητικού σήματος, σε σχέση με εκείνη του ηλεκτρικού χάλυβα οφείλεται στον περιορισμό της ποσοστιαίας συμμετοχής μαλακότερων μαγνητικών φάσεων στη μήτρα του χάλυβα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 6-3: Μαγνητικό σήμα εξόδου του χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

6.1.4 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΙΚΡΟΚΡΑΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ

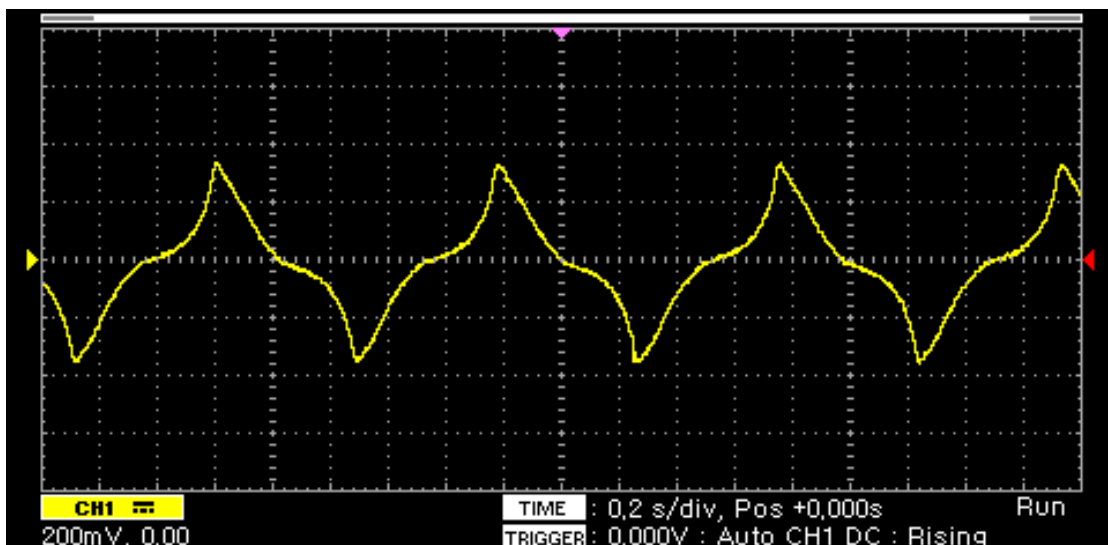
Η παρουσία περλιτικών και σιδηριτικών κόκκων στο υλικό μειώνει τη μαγνητική απόκριση του χάλυβα και καθυστερεί σημαντικά την ολοκλήρωση της μαγνήτισης. Η εμφάνιση ομάδων φάσεων καρβιδίων, ακόμα και υπομικροσκοπικών παρεμποδίζει την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων, στην υψηλές τιμές εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου επιβεβαιώνεται από τη διεύθυνση των κορυφών και την ομαλότερη μετάβαση από τις θετικές στις αρνητικές τιμές τάσεως εξόδου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 6-4: Μαγνητικό σήμα εξόδου του μικροκραμματωμένου χάλυβα.

6.1.5 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ TRIP ΧΑΛΥΒΑ

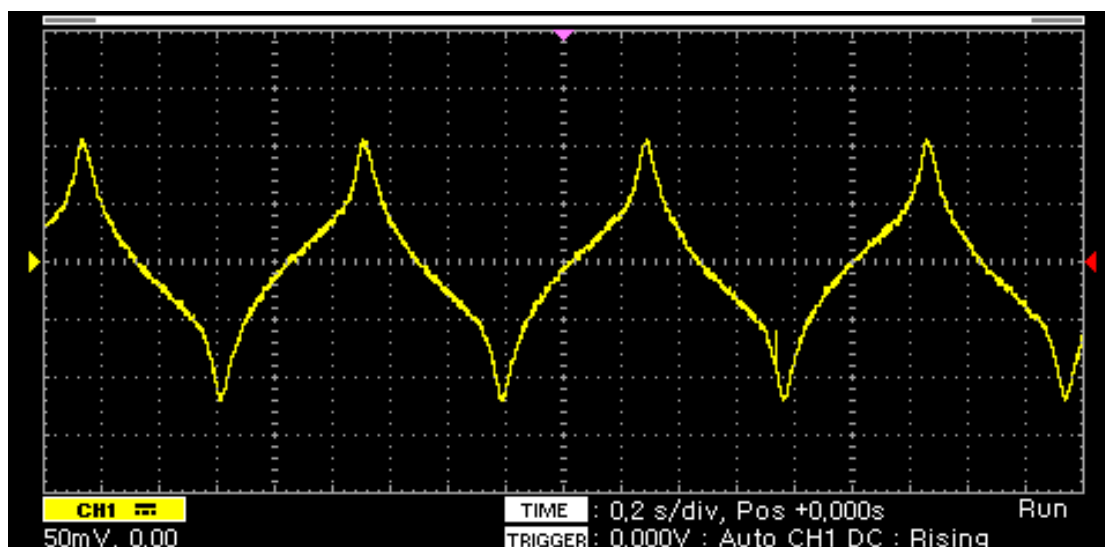
Η σύνθετη πολυφασική μικροδομή του χάλυβα TRIP περιγράφεται από την παρουσία σιδηρίτη, μαινιτικού σιδηρίτη και υπολειπόμενου ωστενίτη. Η παραμαγνητική φάση του υπολειπόμενου ωστενίτη μειώνει σημαντικά τις τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας, ενώ η παρουσία μαινιτικού σιδηρίτη, γωνιάδους μορφολογίας οδηγεί σε αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων των μαγνητικών τοιχωμάτων για να κινηθούν. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 6-5: Μαγνητικό σήμα εξόδου του TRIP χάλυβα.

6.1.6 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ DUPLEX ΧΑΛΥΒΑ

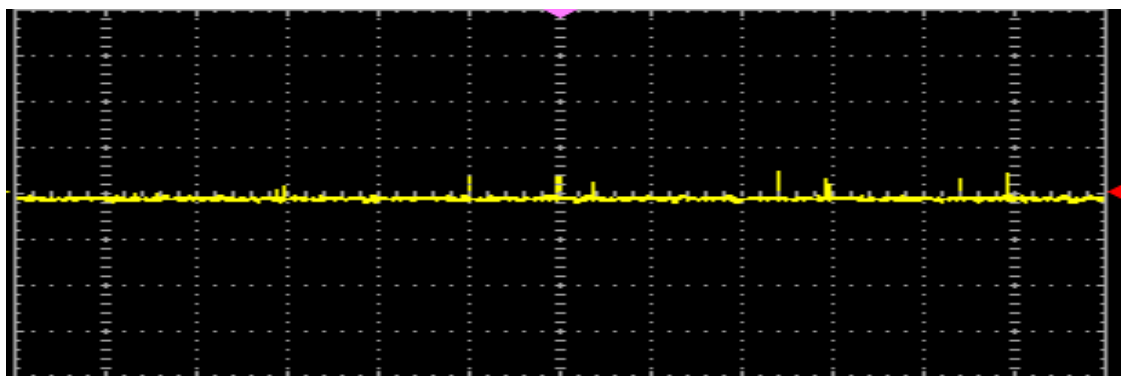
Ο διαμορφωμένος ιστός αποτελείται από κόκκους ωστενίτη και σιδηρίτη. Η αυξημένη ποσοστιαία συμμετοχή σε παραμαγνητική φάση, μειώνει σημαντικά τη μαγνητική μάζα στο χάλυβα με αποτέλεσμα να μειώνεται η κορυφή της κυματομορφής. Η δυσκολία στην περιστροφή των μαγνητικών διπόλων επιβεβαιώνεται από την ομαλότερη μετάβαση από τη θετική κορυφή στην αμέσως επόμενη αρνητική. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι σε άμεση συμφωνία και με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα.



Εικόνα 6-6: Μαγνητικό σήμα εξόδου του DUPLEX χάλυβα.

6.1.7 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΩΣΤΕΝΙΤΙΚΟΥ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

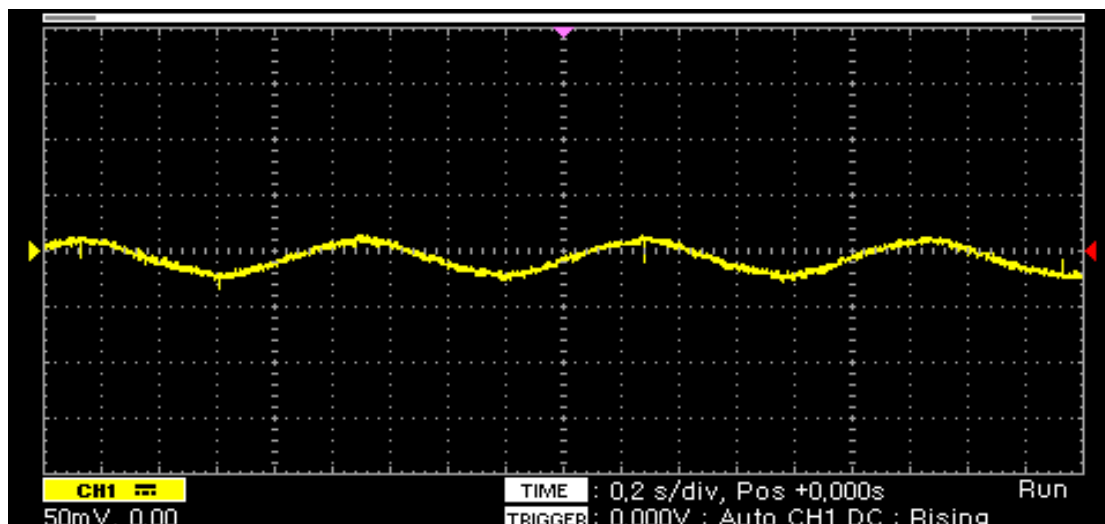
Η παραμαγνητική ωστενιτική μήτρα δεν επιτρέπει την ανάχνευση μαγνητικού σήματος στην έξοδο του αισθητήρα.



Εικόνα 6-7: Μαγνητικό σήμα εξόδου του ανοξείδωτου χάλυβα.

6.1.8 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ INCONEL

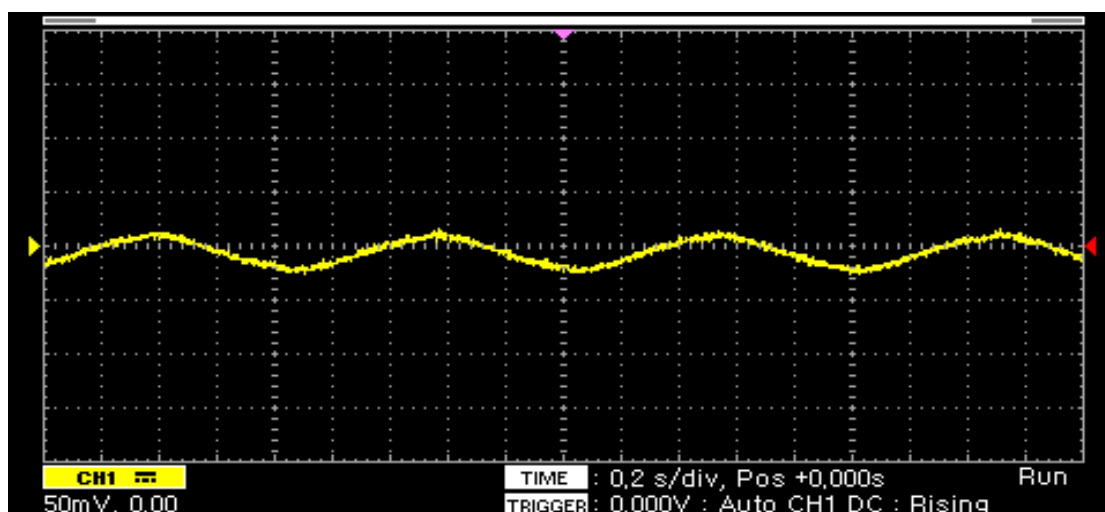
Το υπερκράμα νικελίου χαρακτηρίζεται από ωστενιτικού τύπου κόκκους και από ομάδες φάσεως καρβιδίων, που παρουσιάζουν διάφορες μορφολογίες. Επειδή κάποια εξ' αυτών είναι μαγνητικά (καρβίδια τύπου Fe_3C) εμφανίζεται στον ψηφιακό παλμογράφο μια ισχυρή μαγνητική δραστηριότητα.



Εικόνα 6-8: Μαγνητικό σήμα εξόδου του INCONEL

6.1.9 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ WASPALLOY

Το υλικό χαρακτηρίζεται από ωστενιτικού τύπου κόκκους και από ομάδες φάσεως καρβιδίων, που παρουσιάζουν διάφορες μορφολογίες. Επειδή κάποια εξ' αυτών είναι μαγνητικά (καρβίδια τύπου Fe_3C) εμφανίζεται στον ψηφιακό παλμογράφο μια ισχυρή μαγνητική δραστηριότητα.



Εικόνα 6-9: Μαγνητικό σήμα εξόδου του WASPALLOY

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έλλειψη θωράκισης στο πηνίο λήψης, σε συνδυασμό με την υψηλή ευαισθησία της διάταξης κάνει το πηνίο λήψης ιδιαίτερα ευαίσθητο στον εξωτερικό θόρυβο. Ωστόσο, η παρουσία περιβαλλοντικού θορύβου δεν εμπόδισε την παρατήρηση των κυματομορφών.

Οι τάσεις εξόδου διαφοροποιούνταν σημαντικά ανάμεσα στα εξεταζόμενα μεταλλικά δοκίμια, κυρίως λόγω των μικροδομικών αλλαγών, γεγονός που επιβεβαιώνονταν και από τις προϋπάρχουσες μαγνητικές μετρήσεις.

Αυτή η τεχνική μέτρησης της μαγνητικής απόκρισης των προς εξέταση υλικών με τις συγκεκριμένες παραμέτρους που επιλέχθηκαν (ημιτονοειδής διέγερση πλάτους 1 V και συχνότητας 1 Hz), από το συνολικό πάχος του υλικού. Το μέγιστο βάθος διείσδυσης είναι τα 500μm.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γ.Δ. Παπαδημητρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π., Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ (ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ); Αθήνα 1993;pp. 53
- [2] Γ.Δ. Παπαδημητρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π., Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα; Αθήνα 2000;pp.71
- [3] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία; Εκδόσεις Τζιόλα; Κεφ. 10;pp. 630-631
- [4] Darja Steiner Petrovic, Non-Oriented electrical steel sheets; *Materiali in tehnologije/ Materials and technology* 44 (2010)6; pp. 317-325
- [5]www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROYXA%20KRAMATAW.pdf
- [6] S.O. Kasap, Αρχες Ηλεκτρονικών υλικών και Διατάξεων, Εκδόσεις Παπασωτηρίου; pp.851-912
- [7] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications*, New York: Springer New York, 2010.
- [8] T. Kenny, «Sensor Fundamentals,» σε *Sensor Technology Handbook, Volume 1*, τόμ. 1, J. S. Wilson, Επιμ., Oxford, 2005, pp. 1-20.
- [9] P. Ripka, *Magnetic sensors and magnetometers*, Artech House, 2001.
- [10] T. Kenny, «Electromagnetism in Sensing,» σε *Sensor Technology Handbook, Volume 1*, Oxford, 2005, pp. 223-235.

9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD

9.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Πριν τη μελέτη ενός δοκιμίου πρέπει να ακολουθηθεί μια διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειάς του, η οποία σε πρώτη φάση εξαλείφει τις επιφανειακές ανωμαλίες και σε δεύτερη φάση αποκαλύπτει τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται το υλικό. Τα κύρια στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και η χημική προσβολή.

9.1.1 Κοπή δοκιμίων

Από την κουλούρα του υλικού κόπηκαν ορθογώνιες λωρίδες με πλάτος 20mm και μήκος 50mm. Η κοπή αυτή πραγματοποιήθηκε στο δισκοτόμο της σχόλης MMM, όπου κατά τη διάρκεια της κοπής το εκάστοτε δοκίμιο ψύχονταν ώστε να μην θερμανθεί.

9.1.2 Εγκιβωτισμός

Για τον εγκιβωτισμό των υπό εξέταση δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin UN-no:3082, ενώ ο σκληρυντής ήταν τύπου EpoFix Hardener UN-no:2259. Σύμφωνα με τις οδηγίες της Struers η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Για τη σωστή μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες σύριγγες που υπήρχαν μέσα στη συσκευασία και για την ανάμειξή του, το μίγμα αναδεύτηκε για 2min προσεκτικά για την αποφυγή σχηματισμού φυσαλίδων. Παράλληλα, τοποθετήθηκαν στο κέντρο πρότυπων κυλίνδρων της Struers τα δείγματα και στη συνέχεια συμπληρώθηκε με το μίγμα σκληρυντή - ρητίνης.

9.1.3 Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής, ενώ ταυτόχρονα κατά τη λείανση χρησιμοποιείται νερό, τόσο για την ψύξη του δοκιμίου, όσο και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής

πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in²). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην λείανση του δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί, καθώς χρειάζονταν να είναι ομοιόμορφη και όσο αυτό ήταν δυνατό, ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες. Σε κάθε στάδιο λείανσης, όπου αλλάζει το λειαντικό χαρτί, η λείανση πραγματοποιούνται σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση της προηγούμενης.

9.1.4 Στίλβωση

Τη λείανση ακολούθησε η στίλβωση των δειγμάτων με σκοπό την εξάλειψη των ιχνών (γραμμές) από τη μηχανική λείανση προκειμένου η επιφάνεια των δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των χαρτιών καρβιδίου του πυριτίου από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα αντίστοιχο κάθε φορά της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3μm και στη συνέχεια 1μm. Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος λιπαντικό για την ψύξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε τρεχούμενο νερό, καθαριζόνταν με βαμβάκι, στη συνέχεια με αιθανόλη και τέλος ξηραινόταν σε ρεύμα θερμού αέρα.

9.1.5 Χημική προσβολή

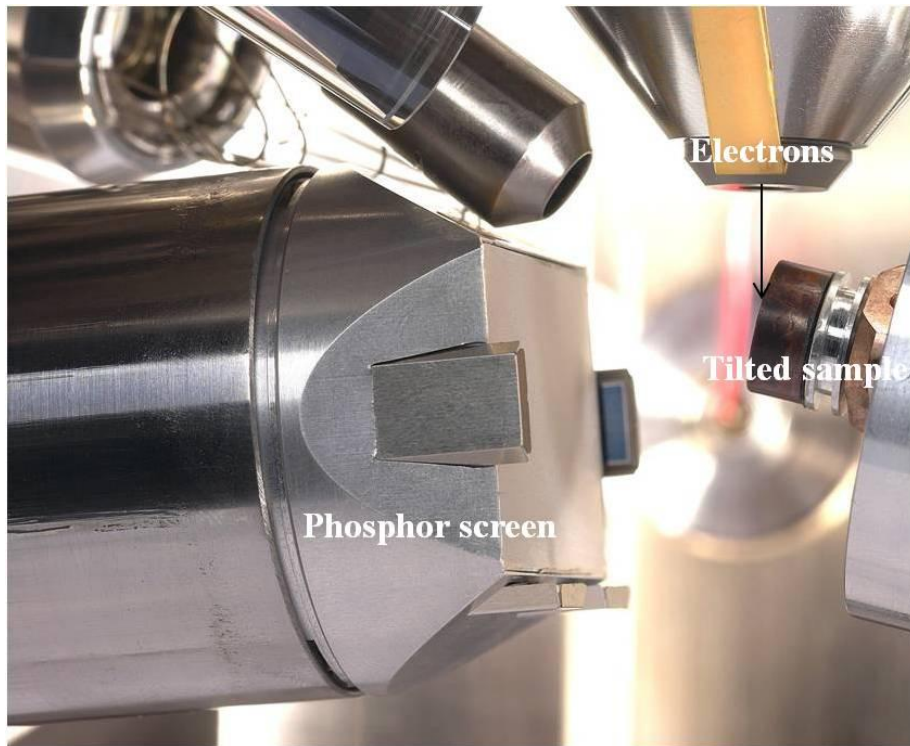
Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του υπό εξέταση πολυκρυσταλλικού υλικού, ώστε να είναι δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής του, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων στην επιφάνειά του και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους των κόκκων που το αποτελούν, είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων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

9.2 ΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΙΚΗΣ EBSD-ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD)

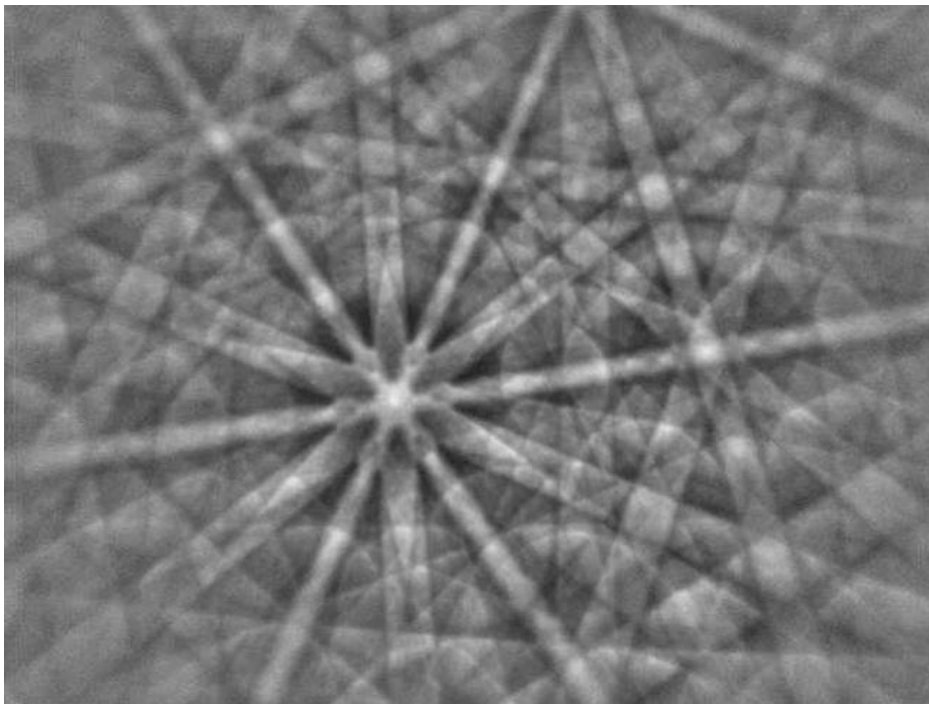
Η τεχνική αυτή αφορά στο προσδιορισμό προτιμητέων προσανατολισμών ανάπτυξης για οποιοδήποτε μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό υλικό. Χρησιμοποιείται για

τον εντοπισμό ιστού από μεταλλοτεχνική κατεργασία (texture), για τη μελέτη ελαττωμάτων της μικροδομής, την ταυτοποίηση φάσεων και το δομικό χαρακτηρισμό σε επίπεδο μικροκλίμακας, τη μορφολογία ορίων κοκκων, την παράμετρο αναντιστοιχίας μεταξύ μητρικών και δευτερευουσών φάσεων και την ποσοτικοποίηση μικροπαραμορφώσεων και υπολειπόμενων τάσεων. Συνήθως τα αποτελέσματα από τη μελέτη EBSD τίθενται υπό συνδυαστική μελέτη με αυτά της περιθλασιμετρίας ακτινών X (XRD).

Πειραματικά, μελέτη EBSD διεξάγεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εξοπλισμένο με κάμερα backscatter ηλεκτρονίων. Μια δέσμη ηλεκτρονίων κατευθύνεται στη περιοχή ενδιαφέροντος του κρυσταλλικού δείγματος που βρίσκεται υπό εξέταση σε κλίση 70 μοιρών. Ο μηχανισμός δημιουργίας ζωνών περίθλασης είναι περίπλοκος αλλά ακολουθεί μια δεδομένη αρχή. Τα άτομα στο υλικό συγκρούονται ανελαστικά με προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων και ένα ποσοστό ηλεκτρονίων με μικρή απώλεια ενέργειας απομακρύνεται ως μια δεύτερη πηγή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του δείγματος. Μερικά από αυτά τα ηλεκτρόνια προέρχονται από κρυσταλλικά επίπεδα σε γωνίες τέτοιες ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg: $n\lambda = 2d\sin\theta$. Έτσι δημιουργείται μια μορφολογία κώνων υψηλής γωνίας, οι οποίοι αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επίπεδα και συνεισφέρουν στη δημιουργία των Kikuchi bands. Τα Kikuchi bands παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το βαθμό παραμόρφωσης ενός υλικού, καθώς κατά τη παραμόρφωση η αναπτυσσόμενη πυκνότητα διαταραχών στον όγκο του κρυστάλλου δύναται να μεταβάλλει τις συνθήκες περίθλασης.



Εικόνα 9-1: Διάταξη για τη τεχνική EBSD εντός του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.



Εικόνα 9-2: Τυπικό EBSP για τον α σίδηρο

Μέσω της τεχνικής EBSD μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα γύρω από:

- Τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, μέσω σημειακής ανάλυσης (point analysis) και της κρυσταλλογραφικής χαρτογράφησης (crystal orientation mapping)
- Αναντιστοιχία γωνίας πλέγματος
- Κρυσταλλογραφικό ιστό. Οι ιστοί αυτοί διαχωρίζονται αυτόματα, υπολογίζεται ο κλασματικός όγκος συμμετοχής τους και προσδιορίζονται τοπολογικά οι περιοχές από τις οποίες προέρχονται.
- Μέγεθος κόκκων
- Ταυτοποίηση φάσεων κ.α.