ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΣΕ ΑΝΟΠΤΗΜΕΝΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΧΑΛΥΒΕΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

Ε. Μαγγιώρου[1], Π. Βουρνά[1], Α. Κτενά[2] και Ε. Χριστοφόρου[1]
[1]Εργαστήριο Φυσικής Μεταλλουργίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου, 15780, Αθήνα, Ελλάδα
[2]Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τεχνολογικό εκπαιδευτικό Ίδρυμα στερεάς Ελλάδας, 34400, Ψαχνά Ευβοίας, Ελλάδα
e-mail: mangiorou.eleni@gmail.com

Περίληψη

Ο όρος «ανισοτροπία» εκφράζει την κατευθυντική εξάρτηση των ιδιοτήτων ενός υλικού. Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία σχετίζεται με τη διακύμανση των τιμών των μαγνητικών ιδιοτήτων, ως προς τον κάθε κρυσταλλογραφικό άξονα αναφοράς και ορίζεται ως πυκνότητα ενέργειας μη-ομότροπης συμπεριφοράς. Στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι τεχνικές του δομικού χαρακτηρισμού EBSD και του προσδιορισμού της μαγνητικής διαπερατότητας, ως προς ένα προεπιλεγμένο κρυσταλλογραφικό ιστό ανάπτυξης. Οι ανωτέρω τεχνικές εφαρμόζονται σε ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα, τα οποία παρουσιάζουν κυμαινόμενες τιμές παραμενουσών τάσεων. Τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων σχετίζονται άμεσα με τις διακυμάνσεις της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας και των παραμενουσών τάσεων, ενώ τα αποτελέσματα του EBSD συμβάλουν στην περαιτέρω επικύρωση των μαγνητικών μετρήσεων. Συνεπώς η τεχνική της μαγνητικής διαπερατότητας καθίστανται ελπιδοφόρα ως μια μη-καταστροφική τεχνική και άμεση τεχνική για την εκτίμηση της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας σε ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα.

Λέξεις-Κλειδιά: μαγνητική διαπερατότητα, εντατική κατάσταση, μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία

Abstract

Anisotropy is the directional dependence of a material's properties. Magnetocrystalline anisotropy is defined as the variation of magnetic properties of a material from one crystallographic direction to another. This paper presents a combination of two types of method targeted to estimate the values of the magnetocrystalline energy in annealed electrical steel samples. The later were characterized by different residual stress values. In order to correlate the magnetocrystalline energy with the residual stress values, the indirect magnetic testing carried out by magnetic permeability was associated with the direct structural investigation by Electron Back-Scattering Diffraction (EBSD) experiment. The results determined from the angular magnetic measurements and predicted from EBSD microtexture data show a relatively good concordance. The study of magnetic anisotropy using EBSD is expected to contribute more understanding of the connection of

magnetocrystalline energy with magnetic permeability measurements and residual stress state in ferromagnetic annealed electrical steels.

Keywords: magnetic permeability, stress state, magnetocrystallic anisotropy

1. Εισαγωγή

Τα φερρομαγνητικά υλικά, όπως ο σίδηρος, όταν ψύχονται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, υποδιαιρείται αυθόρμητα σε πεπερασμένου πλήθους μαγνητικές περιοχές ώστε να ελαχιστοποιήσουν τη μαγνητοστατική ενέργειά τους. Κάθε μαγνητική περιοχή χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο μαγνητικών διπόλων, των οποίων οι μαγνητικές ροπές είναι ομότροπα προσανατολισμένες σε ένα κρυσταλλογραφικό άξονα. Το όριο μεταξύ δύο γειτονικών μαγνητικών περιοχών ονομάζεται μαγνητικό τοίχωμα [1-6].

Εν τη απουσία εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των μαγνητικών ροπών κάθε μαγνητικής περιοχής, η συνολική μαγνήτιση του φερρομαγνητικού υλικού είναι μηδέν και κάθε μαγνητική περιοχή να χαρακτηρίζεται από διαφορετική μαγνητική ροπή.

Όταν σε ένα φερρομαγνητικό υλικό εφαρμοστεί εξωτερικά μαγνητικό πεδίο, τα μαγνητικά δίπολα των μαγνητικών περιοχών τείνουν να προσανατολιστούν στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο [3]. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης, το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στα μαγνητικά τοιχώματα, θέτοντάς τα σε κίνηση. Η κίνηση αυτή των μαγνητικών τοιχωμάτων οδηγεί στην διεύρυνση των μαγνητικών περιοχών των οποίων η μαγνητική διπολική ροπή είναι προσανατολισμένη παράλληλα ή κοντά στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο.

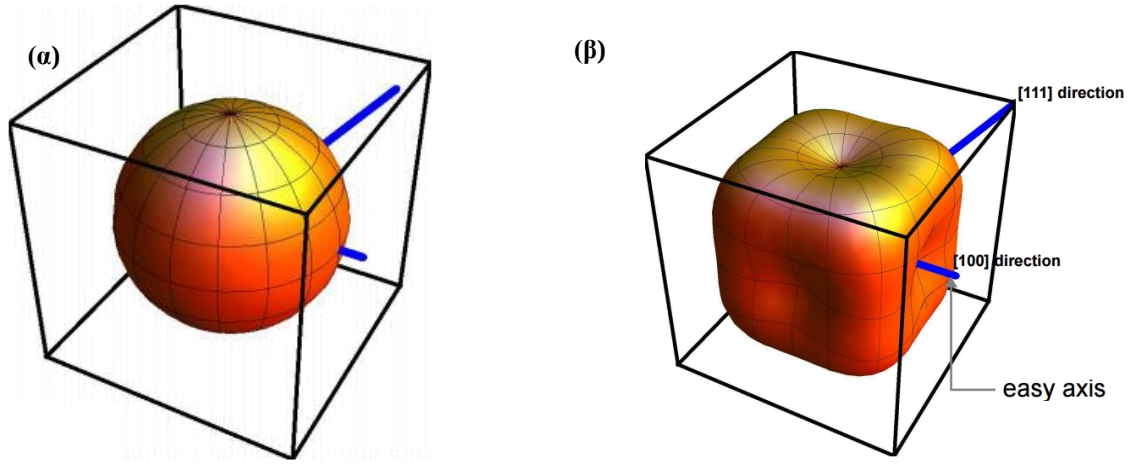
Κατά την κίνησή τους τα μαγνητικά τοιχώματα αλληλοεπιδρούν με τις μικροδομικές ατέλειες του πολυκρυσταλλικού μαγνητικού υλικού. Δομικές ατέλειες όπως τα όρια των κόκκων, κατακρημνίσεις, διαταραχές δρουν ως εμπόδια ή αλλιώς ως σημεία αγκύρωσης στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Συνεπώς, η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων πραγματοποιείται με ασυνεχή τρόπο και συνοδεύεται από ξαφνικές διακυμάνσεις της χωρικής μαγνητικής κατάστασης.

Είναι γνωστό ότι, η παρουσία τασικού πεδίου, το οποίο είτε εφαρμόζεται εξωτερικά είτε παρουσιάζεται ενδογενώς σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, προκαλεί μεταβολές στη μορφολογία και την κατανομή των κόκκων του. Επιπλέον, οι παραμορφώσεις του κρυσταλλικού πλέγματος συμβάλουν στη μεταβολή των μικροδομικών χαρακτηριστικών του σιδηρομαγνητικού υλικού [7-10]. Οι δομικές αυτές αλλαγές σχετίζονται άμεσα με την ανακατανομή των μαγνητικών περιοχών, καθώς τα μικροδομικά χαρακτηριστικά του υλικού επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο την κίνηση των διαταραχών υπό την επίδραση δυναμικών και στατικών μηχανικών καταπονήσεων και των Bloch μαγνητικών τοιχωμάτων υπό την επίδραση μαγνητικών φορτίσεων [11].

Η απόκριση ενός αμαγνήτιστου φερρομαγνητικού υλικού σ' ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από το βρόγχο υστέρησης. Η απεικόνιση της υστερητικής συμπεριφοράς του περιγράφει φαινόμενα, όπως την πυρήνωση μαγνητικών περιοχών, την κίνηση μαγνητικών τοιχωμάτων και τη συναφή περιστροφή μαγνητικών διπόλων [1-6].

Συνεπώς, το μαγνητικό σήμα περιέχει σημαντικές πληροφορίες για τις ενδογενείς ιδιότητες των εκάστοτε εξεταζόμενων φερρομαγνητικών υλικών [11], καθιστώντας την τεχνική μέτρησης του μαγνητικού σήματος μια σημαντική μέθοδο των μη-καταστροφικών

ελέγχων για την αξιολόγηση και μελέτη μεταλλουργικών, μικροδομικών, μηχανικών και μικρομαγνητικών παραμέτρων σε φερρομαγνητικούς χάλυβες.
Ο όρος «ανισοτροπία» εκφράζει την κατευθυντική εξάρτηση των ιδιοτήτων ενός υλικού. Η μαγνητοκρυσταλλική ανισοτροπία σχετίζεται με τη διακύμανση των τιμών των μαγνητικών ιδιοτήτων, ως προς τον κάθε κρυσταλλογραφικό άξονα αναφοράς και ορίζεται ως πυκνότητα ενέργειας μη-ομότροπης συμπεριφοράς. Τα σιδηρομανητικά υλικά τείνουν να παραλληλίζουν της μαγνητικές τους ροπές παράλληλα στον εύκολο άξονα μαγνήτισης, ώστε να ελαχιστοποιήσουν την μαγνητοκρυσταλλική ενέργειά τους (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: (α) Ισότροπο και (β) ανισότροπο υλικό.

Στην παρούσα εργασία προσδιορίστηκε η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια σε ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα, τα οποία παρουσιάζουν κυμαινόμενες τιμές παραμενουσών τάσεων. Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιούνται οι τεχνικές του δομικού χαρακτηρισμού EBSD και του προσδιορισμού της μαγνητικής διαπερατότητας, ως προς ένα προεπιλεγμένο κρυσταλλογραφικό ιστό ανάπτυξης.

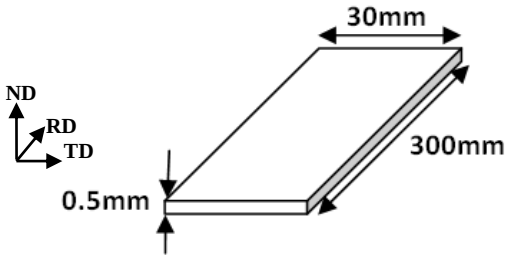
2. Μεθοδολογία

Το υπό εξέταση υλικό ήταν κοινός εμπορικός ηλεκτρικός χάλυβας. Η χημική σύστασή τους φαίνεται στον Πίνακα 1, ενώ οι διαστάσεις των δειγμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

Πίνακας 1: Κατά βάρος (wt%) χημική σύσταση ηλεκτρικού χάλυβα.

Si	Al	Mn	C	P	S	Fe
2.18	0.35	0.12	0.0018	0.00009	0.00005	Balance

Δύο δείγματα από το αρχικό δοκίμιο του ηλεκτρικού χάλυβα υπέστησαν ανόπτηση στους 400 ^{o}C και στους 750 ^{o}C αντίστοιχα και στη συνέχεια αποψύχθηκαν στον αέρα. Ακολούθως, στα ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα, τα οποία προετοιμάστηκαν κατάλληλα, πραγματοποιήθηκε δομικός χαρακτηρισμός με την τεχνική EBSD. Οι λειτουργικές συνθήκες για την EBSD ανάλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

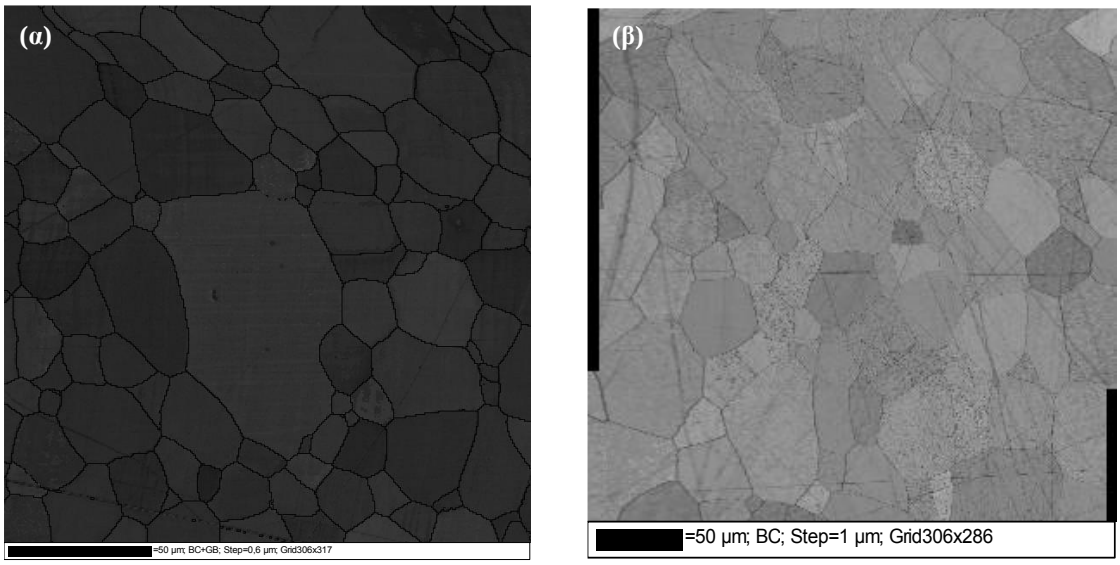


Σχήμα 2: Διαστάσεις δείγματος αναφοράς.

Πίνακας 2: Παράμετροι λειτουργίας για το δομικό χαρακτηρισμό μέσω της τεχνικής EBSD.

Accelerating Voltage (kV)	25
Specimen tilt (º)	70
Scan step size (μm)	0.08 - 0.2
Scan grid	hexagonal

Οι επιλεχθείσες επιφάνειες της κρυσταλλογραφικής χαρτογράφησης με την χρήση της τεχνικής EBSD παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3**:** Επιλεχθείσες επιφάνειες κρυσταλλογραφικής χαρτογράφησης, μέσω της τεχνική EBSD για τα ανοπτημένα δείγματα στους (α) 400 ºC και (β) 750 ºC αντίστοιχα.

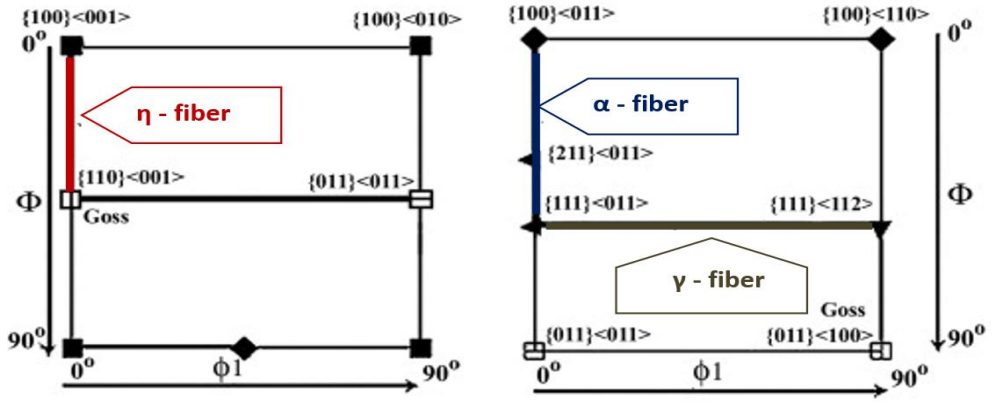
Στη συνέχεια, μέσω του CHANEL 5 λογισμικού πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από την κρυσταλλογραφική χαρτογράφηση των υπό εξέταση επιφανειών. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής ήταν ο προσδιορισμός των προτιμητέων κρυσταλλογραφικών ιστών ανάπτυξης των κόκκων με τη χρήση της Orientation Distribution Function (ODF), με βάση τις τρεις γωνίες περιστροφής Euler και των ανάστροφων στερεογραφικών προβολών (inverted pole figure, IPF) [12-13]. Οι αντιπροσωπευτικότεροι ιστοί ανάπτυξης για τον ηλεκτρικό χάλυβα είναι οι η-, α- και γ- (Σχήμα 4) [13].

Ο προσδιορισμός του προσανατολισμού των προτιμητέων κρυσταλλογραφικών ιστών ανάπτυξης, πραγματοποιείται μέσω της αναπαράστασής τους στο δισδιάστατο χώρο Euler. Για το λόγο αυτό, ο τρισδιάστατος χώρος Euler (Σχήμα 5(α)) υποδιαιρείται σε μικρότερες παράλληλες και ισαπέχουσες περιοχές, κατά τη διεύθυνση που ορίζεται από τη γωνία φ_2 (Σχήμα 5(β)). Οι περιοχές αυτές με τη σειρά τους ορίζουν ένα δίκτυο (grid) κατανομών του προσανατολισμού των κρυσταλλογραφικών επιπέδων σε συγκεκριμένες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις, το οποίο ονομάζεται συνάρτηση κατανομής προσανατολισμών (Orientation Distribution Function, ODF) (Σχήμα 5(γ)).
Η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια μιας προτιμητέας διεύθυνσης προσανατολισμού (g), με συνάρτηση κατανομής της f(g) ορίζεται για κάθε διεύθυνση (θ, φ) από την εξίσωση:

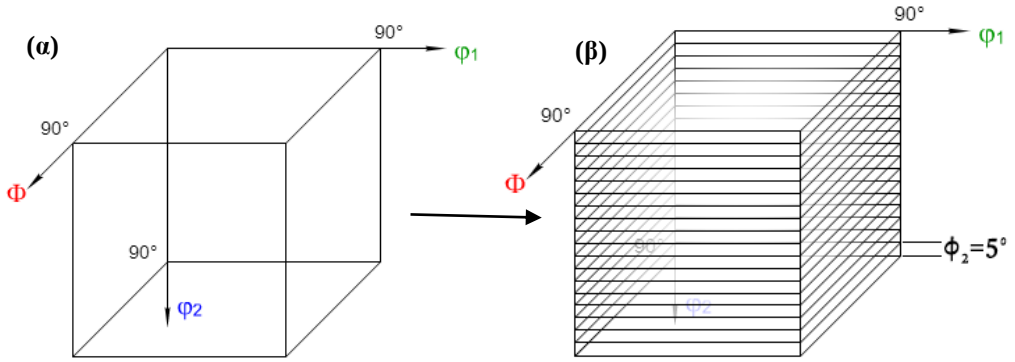
$$\overline{E}(\theta,\varphi) = \oint_{ES} E(\theta,\varphi,g) f(g) dg \qquad (1)$$

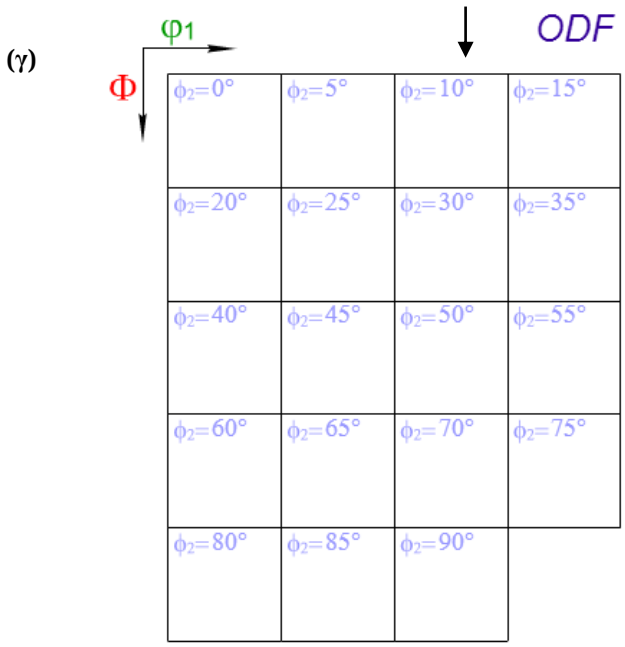
Η μαγνητοκρυσταλλική ενέργεια της συγκεκριμένης E(θ,φ,g) εκφράζεται από την εξίσωση:

$$E(\theta,\varphi,g) = K_1(\alpha_{g1}^2\alpha_{g2}^2 + \alpha_{g2}^2\alpha_{g3}^2 + \alpha_{g3}^2\alpha_{g1}^2) + K_2\alpha_{g1}^2\alpha_{g2}^2\alpha_{g3}^2 \qquad (2)$$



Σχήμα 4: Οι κυριότεροι κρυσταλλογραφικοί ιστοί ανάπτυξης για τον ηλεκτρικό χάλυβα για (α) φ_2=0° και (β) φ_2=45°.





Σχήμα 5: (α) Τρισδιάστατος και (β) δισδιάστατος χώρος Euler και (γ) η συνάρτηση κατανομής των προσανατολισμών του κρυσταλλογραφικού ιστού (ODF).

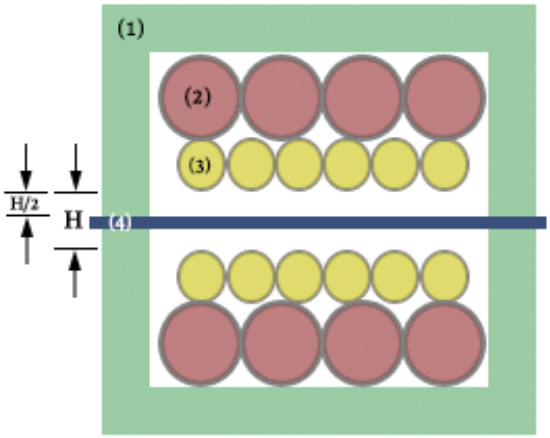
Στα ανοπτημένα δείγματα πραγματοποιήθηκαν και γωνιακές μετρήσεις μαγνητικής διαπερατότητας, με στόχο την αξιολόγηση της μακροσκοπικής μαγνητικής ανισοτροπίας που τα χαρακτηρίζει και τη συσχέτιση αυτών με το μικροτασικό πεδίο παραμορφώσεων. Ο προσδιορισμός του μακροσκοπικού εύκολου άξονα μαγνήτισης και η μελέτη της ανισοτροπίας πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πολικών διαγραμμάτων.

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων του βρόχου υστέρησης και της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας στα ανοπτημένα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος, που διαθέτει το εργαστήριο Μεταλλογνωσίας. Η αρχή λειτουργίας της διάταξης στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό, ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα (Σχήμα 6). Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας διάταξης είναι, πρώτον ότι το μαγνητικό πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον ηλεκτρομαγνήτη να αποτελεί το μέσο σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος. Δεύτερον, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στο προς εξέταση υλικό είναι ακριβέστερος, καθώς οποιοδήποτε συστηματικό σφάλμα στη μέτρηση σχετίζεται με το συντελεστή απομαγνήτισης. Τρίτον, το σήμα διέγερσης δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

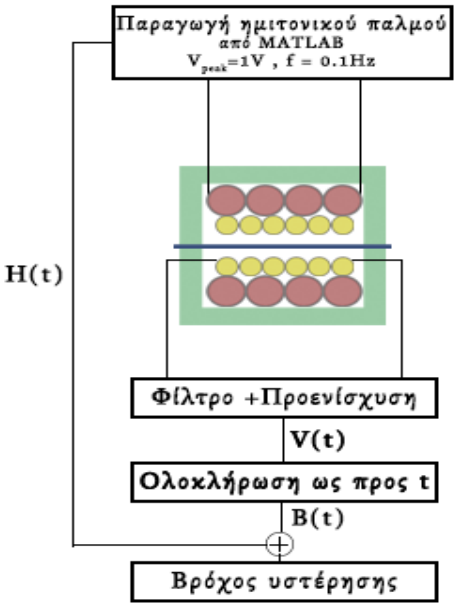
Η συνολική μετρητική διάταξη αποτελείται από τρία μέρη: (1) το σύστημα διέγερσης, (2) το μαγνητικό αισθητήρα και (3) το σύστημα επεξεργασίας του μαγνητικού σήματος που συλλέχθηκε (Σχήμα 7).

Το ημιτονικό σήμα διέγερσης δημιουργήθηκε από τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης MATLAB. Μέσω μιας κατάλληλα διαμορφωμένης πλατφόρμας αλληλεπίδρασης (graphical user interface, GUI) δόθηκε η δυνατότητα επιλογής των επιθυμητών τιμών του πλάτους και της συχνότητας του σήματος διέγερσης. Τόσο το μαγνητικό σήμα διέγερσης, όσο και η μαγνητική απόκριση λήψης λαμβάνονταν από μια κάρτα συλλογής δεδομένων,

η οποία έστελνε τα δεδομένα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονταν, απεικονίζονταν και αναλύονταν με τη χρήση ενός λογισμικού, που είχε αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB. Το λαμβανόμενο σήμα από το πηνίο λήψης φιλτράρονταν μέσω ενός ψηφιακού υψιπερατό φίλτρου. Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως προς το πεδίο αναπαριστούσε τις μεταβολές της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης. Αντίστοιχα, ολοκληρώνοντας την τάση εξόδου ως προς το χρόνο και με βάση τη γραφική παράσταση των τιμών που λαμβάνονταν ως προς το επιβαλλόμενο πεδίο, προέκυπτε ο βρόχος υστέρησης.
Η διάταξη δεν βαθμονομήθηκε με τη βοήθεια υλικών αναφοράς, για τα οποία οι ιδιότητές τους είναι γνωστές και πιστοποιημένες. Για το λόγο αυτό, οι άξονες στις γραφικές παραστάσεις δεν περιγράφονταν από τις μονάδες μέτρησης των αντίστοιχων μετρούμενων μεγεθών.
Για τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η συχνότητα διέγερσης προκαθορίστηκε στα 0,1 Hz και το πλάτος του σήματος διέγερσης στο 1 V, ώστε να επιτευχθεί μαγνητικός κορεσμός των υλικών που αναλύονται.
Ο δυναμικός συντονιστικός έλεγχος του πειράματος πραγματοποιήθηκε μέσω τριών γραφημάτων: της διέγερσης, της λήψης και του βρόχου υστέρησης. Από τον τελικό βρόχο υστέρησης προσδιορίζονταν και οι παράμετροι, των οποίων η μεταβολή διακυμαίνονταν και απέδιδε πληροφορίες για τη δυναμική κατάσταση της παραμορφωτικής βαθμίδας του υπό μελέτη υλικού. Επίσης, η μορφή του βρόχου της τάσεως εξόδου ως προς το μαγνητικό πεδίο, που σύμφωνα με την εξίσωση ήταν ανάλογη με τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας, ως προς το πεδίο, και έδινε σημαντικές πληροφορίες για το σιδηρομαγνητικό υλικό. Μάλιστα, η σχετικά χαμηλή συχνότητα διέγερσης (0,1 Hz) δεν επέτρεπε τη δημιουργία δινορευμάτων στο υλικό. Τα επιφανειακά αυτά ρεύματα χαρακτηρίζονται ως μια απορρυθμιστική παρεμβολή, καθώς δύναται να προκαλέσουν αλλοίωση του μαγνητικού βρόχου υστέρησης, λόγω της ανομοιογένειας του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου στο δείγμα.



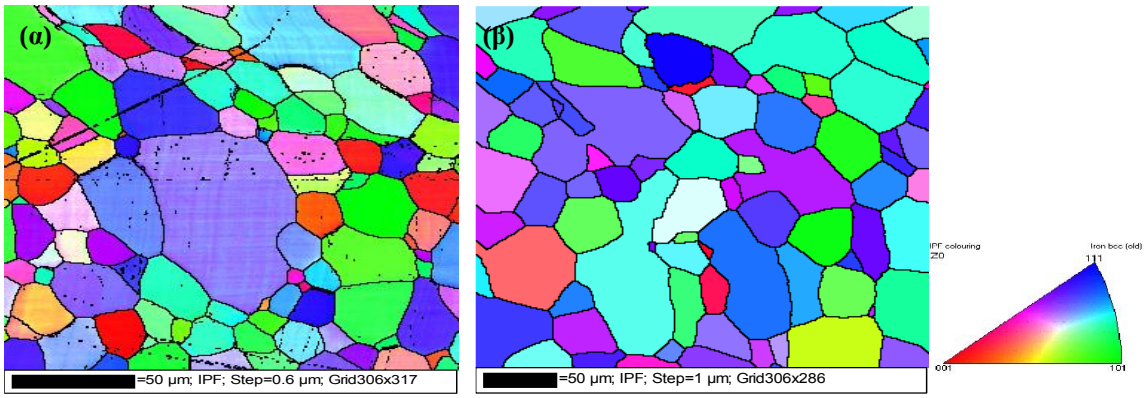
Σχήμα 6: Απεικόνιση σε κάθετη τομή της διάταξης του μαγνητικού AC υστερησιογράφου για τη μέτρηση των βρόχων υστέρησης όπου (1) οι ηλεκτρομαγνήτες (ηλεκτρικός χάλυβας), (2) το πηνίο διέγερσης από χάλκινο σύρμα με διάμετρο 0,5 mm, (3) το πηνίο λήψης από χάλκινο σύρμα διαμέτρου 0.2 mm και (4) το εξεταζόμενο σιδηρομαγνητικό υλικό [14-15].



Σχήμα 7: Γενική αναπαράσταση της διάταξης μαγνητικού αισθητήρα για τη μέτρηση των βρόχων υστέρησης.

3. Συμπεράσματα – Πρόταση

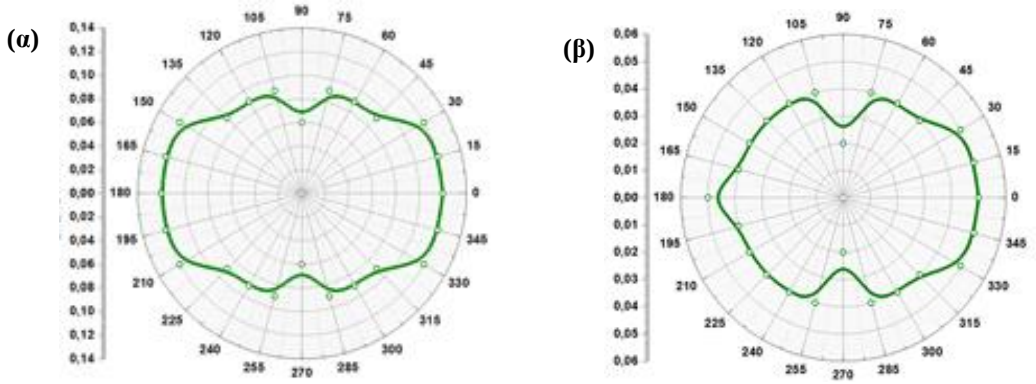
Μέσω ανάστροφων στερεογραφικών προβολών (Σχήμα 8) παρατηρείται έντονη διακύμανση της χρωματικής απεικόνισης των προτιμητέων κρυσταλλογραφικών ιστών ανάπτυξης, στην επιφάνεια κρυσταλλογραφικής χαρτογράφησης. Συγκεκριμένα, οι φερριτικοί κόκκοι του ανοπτημένου ηλεκτρικού χάλυβα στους 400 ^{o}C, αναπτύσσονται, ως επί τω πλείστων, στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα (001) και (101). Παρατηρούνται ωστόσο σχηματιζόμενοι κόκκοι στο επίπεδο (111). Η ανάπτυξη των φερριτικών κόκκων σε διάφορα κρυσταλλογραφικά συστήματα στο ανοπτημένο ηλεκτρικό χάλυβα στους 750 ^{o}C, διατηρείται ισχυρά ετερότροπη. Οι κόκκοι σχηματίζονται, ως επί το πλείστων, στο επίπεδο (111), ενώ παρατηρείται και ύπαρξη κόκκων κοντά στα (001) και (101) επίπεδα.



Σχήμα 8: Προσδιορισμός του προτιμητέου κρυσταλλογραφικού ιστού ανάπτυξης, μέσω ανάστροφων στερεογραφικών προβολών, στα ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα, στους (α) 400 ^{o}C και (β) 750 ^{o}C.

Στο Σχήμα 9 παριστάνεται με πράσινη συνεχή γραμμή η μεταβολή της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας στους προτιμητέους κρυσταλλογραφικούς ιστούς

ανάπτυξης των δύο αντοπτημένων δειγμάτων. Στις διάφορες γωνίες αναπαρίσταται σημειακά και η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας.



Σχήμα 9: Μεταβολή της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας (συνεχής καμπύλη) και της μαγνητικής διαπερατότητας (κύκλοι) στα ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα, στους (α) 400 ^{o}C και (β) 750 ^{o}C.

Από την υπέρθεση των αποτελεσμάτων στα πολικά διαγράμματα είναι εμφανής η ομότροπη συμπεριφορά της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας και της μαγνητικής διαπερατότητας. Η παρουσία ελάσσονων εύκολων αξόνων μαγνήτισης, που αποτυπώνεται στην έντονη διακύμανση των τιμών, δηλώνει το αυξημένο ποσοστό ανάπτυξης πολλών τέτοιων δικτύων, τα οποία δε λαμβάνονται υπόψη στον τελικό προσδιορισμό του μακροσκοπικού εύκολου άξονα μαγνήτισης [16-25]. Η αποτατική ανόπτηση που λαμβάνει χώρα στους 400 ^{o}C και η επανακρυστάλλωση στους 750 ^{o}C συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση των παραμενουσών τάσεων ως προς το υλικό αναφοράς και στην συμμετρικότητα των πολικών διαγραμμάτων.
Συνεπώς, τα αποτελέσματα του EBSD συμβάλουν στην περαιτέρω επικύρωση των μαγνητικών μετρήσεων. Συνεπώς, η τεχνική της μαγνητικής διαπερατότητας καθίστανται ελπιδοφόρα ως μια μη-καταστροφική τεχνική και άμεση τεχνική για την εκτίμηση της μαγνητοκρυσταλλικής ενέργειας σε ανοπτημένα δείγματα ηλεκτρικού χάλυβα.

4. Βιβλιογραφία

[1] Cullity B.D. and Graham C.D. “Introduction to Magnetic Material”, 1972, Addison-Wesley.
[2] Jiles D.C. “Introduction to Magnetism and Magnetic Materials”, 1998, Chapman and Hall
[3] Kasap S.O. “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων”, 2002, Παπασωτηρίου.
[4] Chikazumi S. “Physics of Ferromagnetism” 1997, Oxford University Press Inc.
[5] O’ Handley R.C. “Modern Magnetic Materials, Principles and Applications”, 2002, Wiley & Sons Inc.
[6] Aharoni A. “Introduction to the Theory of the Ferromagnetism”, 1997, Clarendon Press.
[7] Παπαδημητρίου Γ.Δ. “Φυσική μεταλλουργία σιδήρου και χάλυβα”, 2000, Σημειώσεις ΕΜΠ.
[8] Παπαδημητρίου Γ.Δ. “Γενική μεταλλογνωσία ΙΙ- Τα κράματα”, 2000, Σημειώσεις ΕΜΠ.

[9] Χαϊδεμενόπουλος Γ. (2007). “Φυσική μεταλλουργία”, 2007, Τζιόλα.
[10] Χρυσουλάκης Γ. και Παντελής Δ. “Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών”, 1996, Παπασωτηρίου.
[11] Χριστοφόρου Ε. “Ηλεκτρονικά Υλικά”, 2001, Εκδόσεις ΕΜΠ
[12] Oxford CHNNEL 5 USER MANUAL
[13] Schwartz A.J., Kumar M., Adams B.L. and Field D. “Electron Backscatter Diffraction in Materials Science”, 2009, Springer.
[14] Vourna P., Hervoches C., Vrána M., Ktena A. and Hristoforou E. “Correlation of Magnetic Properties and Residual Stress Distribution Monitored by X-ray & Neutron Diffraction in Welded AISI 1008 Steel Sheets”, IEEE Transaction on Magnetics, 51, 2015.
[15] Vourna P., Ktena A., Tsakiridis .PE. and Hristoforou E. “A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels”, NDT & E International, 71, p.p. 33-42, 2015.
[16] Landgraf F.J.G., Emura M., Teixeira J.C., de Campos M.F. and Muranaka CS. “Anisotropy of the magnetic losses components in semi-processed electrical steels”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, p.p. 380-381, 1999.
[17] Capó-Sánchez J., Pérez-Benitez J. and Padovese L.R. “Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise”, NDT & E International, 40, p.p. 168-172, 2007.
[18] de Campos M.F., Campos M.A., Landgraf F.J.G. and Padovese L.R. “Anisotropy study of grain oriented steels with Magnetic Barkhausen Noise”, Joint European Magnetic Symposia - JEMS 2010, 23-28 August 2010, Krakow, Poland.
[19] Stupakov O., Uchimoto T. and Takagi T. “Magnetic anisotropy of plastically deformed low-carbon steel”, Journal of Physics D: Applied Physics, 43, art. no. 195003-1 – 7, 2010.
[20] Mandal K., Corey A., Loukas M.E., Weyman P., Eichenberger J. and Atherton D.L. “The effects of defect depth and bending stress on magnetic Barkhausen noise and flux-leakage signals”, Journal of Physics D: Applied Physics, 30, p.p. 1976-1983, 1997.
[21] Mandal K., Dufour D., Krause T.W., Atherton D.L. “Investigations of magnetic flux leakage and magnetic Barkhausen noise signals from pipeline steel”, Journal of Physics D Applied Physics, 30, p.p. 962-973, 1997.
[22] Fryskowski B. “Experimental evaluation of magnetic anisotropy in electrical steel sheets”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320, p.p. 515-522, 2008.
[23] Espina-Hernández J.H., Pérez-Benítez J.A., Caleyo F., Baudin T., Helbert A.L. and Hallen J.M. “Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals”, Journal of Physics D: Applied Physics, 46, p.p. 1-5, 2013
[24] Yashiki H. and Kaneko T. “Effect of hot-band annealing on anisotropy of magnetic properties in low-Si semi-processed electrical steels”, Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 112, p.p. 200-202, 1992.
[25] Jagadish C., Clapham L. and Atherton D.L. “Orientation effects of anisotropy, stress, excitation, bias and residual fields on Barkhausen noise generation in pipeline steel”, Journal of Physics D: Applied Physics, 23, p.p. 443-448, 1990.