

ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΡΟΧΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΥ ΜΑΓΝΗΤΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Α. Κτενά¹, Ε. Χριστοφόρου²

¹Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Χαλκίδας

²Εργαστήριο Μεταλλογνώσις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

e-mail: eh@metal.ntua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια νέα τεχνική μέτρησης του βρόχου μαγνήτισης και του βρόχου μαγνητοελαστικότητας καθώς επίσης και της χωρικής κατανομής των σε μαγνητικά υλικά. Η μέθοδος στηρίζεται στην αρχή των μαγνητοελαστικών γραμμών καθυστέρησης και εφαρμόζεται σε υλικά που έχουν συντελεστή μαγνητοσυστολής άνω του 1 ppm, δηλαδή πρακτικά σε όλους τους φερρομαγνητικούς χάλυβες. Η μέθοδος είναι επαγωγική και είναι σε θέση να μετρήσει την dc απόκριση του βρόχου υστέρησης και μαγνητοελαστικότητας. Επίσης μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο ποιοτικού ελέγχου στην παραγωγή άμορφων μαγνητικών ταινιών και ινών για χρήση σε αισθητήρες.

Λέξεις-Κλειδιά: Βρόχος μαγνήτισης, βρόχος μαγνητοελαστικότητας, άμορφες μαγνητικές ταινίες, άμορφες μαγνητικές ίνες

Abstract

In this work a new hysteresis loop and magnetostriction loop measurement technique is presented together with its application on the spatial variation of magnetic macroscopic parameters. The technique is based on the magnetostrictive delay line operating principle and is applicable on magnetic materials with magnetostriction constant higher than 1ppm, which practically includes all ferromagnetic steels. The measurement technique though inductive is able measure the dc hysteresis and magnetostriction loops. It may also prove to be a valuable tool in the quality control of the production of amorphous ribbons and wires used in sensing applications.

Keywords: Hysteresis loop, magnetoelasticity loop, amorphous magnetic ribbons, amorphous magnetic wires

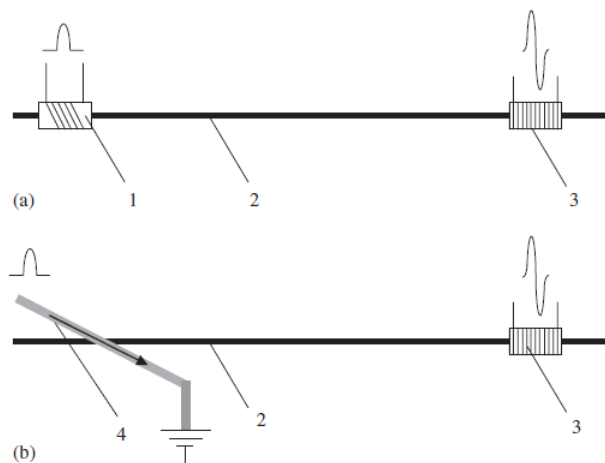
1. Εισαγωγή

Ο νόμος του Faraday έχει βρει πληθώρα εφαρμογών στη μαγνητομετρία, όπως στο πολύ δημοφιλές μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (VSM) [1] που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις βρόχων υστέρησης: στα άκρα στατικών πηνίων λήψης επάγεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη λόγω της μεταβλητής στο χρόνο μαγνητικής ροής που οφείλεται στη μικρού πλάτους ημιτονοειδή δόνηση του δείγματος μέσα σε ένα ομογενές DC μαγνητικό πεδίο. Το αποτέλεσμα είναι η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής $B(t)$ μέσα στα πηνία λήψης η οποία επάγει έναν παλμό τάσης στα άκρα τους που εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής dB/dt και τα χαρακτηριστικά των πηνίων λήψης. Το πλάτος του παλμού εξαρτάται μόνο από την μαγνήτιση του δείγματος η οποία με τη σειρά της εξαρτάται μόνο από το μαγνητικό πεδίο DC που παράγουν οι ηλεκτρομαγνήτες του οργάνου. Το VSM

παραμένει η πιο διαδεδομένη διάταξη για τη μέτρηση του DC βρόχου υστέρησης, το οποίο όμως έχει υψηλό κόστος. Εναλλακτικά, για τον χαρακτηρισμό των μακροσκοπικών μαγνητικών ιδιοτήτων χρησιμοποιούνται τεχνικές AC μαγνητομετρικές οι οποίες επίσης βασίζονται στον Νόμο του Faraday. Ένα πηνίο διέγερσης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός AC μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του όπου τοποθετείται το δείγμα γύρω από το οποίο βρίσκεται ένα πηνίο λήψης. Η τάση που επάγεται στα άκρα του πηνίου λήψης λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής είναι ανάλογη της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας του δείγματος η ολοκλήρωση της οποίας δίνει την μαγνητική επαγωγή $B(H)$ του δείγματος [2]. Οι τεχνικές αυτές είναι υλοποιούνται εύκολα και με χαμηλό κόστος αλλά δεν μπορούν να κάνουν μέτρηση DC. Όσο μειώνεται η συχνότητα, μειώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) και άρα αυξάνεται η αβεβαιότητα της μέτρησης. Ωστόσο, μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε συχνότητες αρκετά χαμηλές, όπως 0.1 Hz.

Από την άλλη η μέτρηση του βρόχου της μαγνητοελαστικότητας γίνεται με διάφορους τρόπους, άμεσους και έμμεσους [3]. Στην πρώτη κατηγορία απαντώνται οι μετρήσεις με χρήση πιεζοαντιστάσεων (strain gauges), η πιο απλή στην εφαρμογή της μέθοδος και κατάλληλη για κρυσταλλικά κυρίως υλικά, με χωρητικούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι οι πιο ευαίσθητοι, και με συμβαλλόμετρα. Το μειονέκτημα των παραπάνω τεχνικών είναι ότι το δείγμα χρειάζεται ειδική προετοιμασία πριν την μέτρηση. Έμμεσες μέθοδοι μέτρησης της μαγνητοσυστολής είναι η μέθοδος Becker-Kersten και η μέθοδος SAMR (Small angle magnetization rotation), η οποία είναι κατάλληλη για μαλακές ταινίες.

Η τεχνική που παρουσιάζεται εδώ χρησιμοποιεί μια διάταξη που βασίζεται στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL) [4] και επιτρέπει τη μέτρηση τόσο του DC βρόχου υστέρησης όσο και του βρόχου μαγνητοελαστικότητας. Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται επίσης στον Νόμο του Faraday, αλλά στην περίπτωση αυτή η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική επαγωγή δεν οφείλεται στη δόνηση του δείγματος αλλά σε μια διαδιδόμενη μικροπαραμόρφωση.



Σχήμα 1. Δύο απλές διατάξεις μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL):

(α) Διάταξη πηνίου διέγερσης και λήψης (β) αγωγός παλμικού ρεύματος διέγερσης και πηνίο λήψης. (1) Πηνίο διέγερσης, (2) MDL, (3) πηνίο λήψης και (4) αγωγός παλμικού ρεύματος διέγερσης.

Η διάταξη μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL) αποτελείται από τη 'γραμμή', πχ μια ταινία από μαγνητοσυστολικό υλικό, το πηνίο διέγερσης (Σχήμα 1α) ή τον αγωγό παλμικού ρεύματος (Σχήμα 1β), το οποίο δημιουργεί ένα πεδίο παλμικής διέγερσης $H_e(t)$ μέσα στην MDL κι ένα πηνίο λήψης. Το πεδίο διέγερσης προκαλεί μια

παλμική μικροπαραμόρφωση λ λόγω του φαινομένου της μαγνητοσυστολής. Επειδή το υλικό της MDL έχει σχήμα κυλίνδρου ή ταινίας, λειτουργεί σαν ακουστικός κυματοδηγός επιτρέποντας τη διάδοση της μικροπαραμόρφωσης κατά μήκος του μαγνητοσυστολικού στοιχείου ως διαμήκη ακουστικού παλμού. Καθώς η μικροπαραμόρφωση φτάνει στην περιοχή του πηνίου λήψης, λόγω του αντιστρόφου μαγνητοσυστολικού φαινομένου, επάγεται μια παλμική τάση στα άκρα του η οποία είναι ανάλογη της πρώτης παραγώγου της μικροπαραμόρφωσης, $V=d\lambda/dt$. Τόσο η δημιουργία όσο και η ανίχνευση της παλμικής μικροπαραμόρφωσης είναι δυνατή και επαναλήψιμη λόγω της παρουσίας πεδίων πόλωσης στο σημείο δημιουργίας του ακουστικού παλμού και στην περιοχή του πηνίου λήψης, H_{oe} και H_{or} , αντίστοιχα, τα οποία προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα σε μια δεδομένη κατεύθυνση και επιτρέπουν τον έλεγχο της διαδικασίας.

2. Θεωρητική επεξεργασία

Είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι επειδή η μικροπαραμόρφωση λ διαδίδεται ως μετωπικό ακουστικό κύμα, χωρίς διάχυση και δευτερογενή φαινόμενα, φτάνει στην περιοχή του πηνίου λήψης χωρίς απώλειες όπου δημιουργεί μηχανικές τάσεις σ , οι οποίες επιδρούν στην τοπική μαγνήτιση ως ενεργό μαγνητικό πεδίο. Σε απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, το ενεργό πεδίο τάσεων που οφείλεται στην παραμόρφωση λ , στην περίπτωση ιστροπικής μαγνητοσυστολής, δίνεται από τη σχέση:

$$H_{\sigma} = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial M} \right)_{\sigma} \quad (1)$$

Όταν οι μεταβολές στις μηχανικές τάσεις και τη μαγνητοσυστολή είναι μικρές και αντιστρεπτές, η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της μεταβολής της μαγνήτισης $\mu_0 M$ με την τάση σ , και της μεταβολής της παραμόρφωσης λ με το πεδίο μαγνήτισης H , δίνεται από την σχέση

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial H} \right)_{\sigma} \sim \left(\mu_0 \frac{\partial M}{\partial \sigma} \right)_H \quad (2)$$

Η μεταβολή της μαγνήτισης για δεδομένο εφαρμοζόμενο πεδίο H και τάση σ δίνεται από τη σχέση

$$dM_{\sigma,H} = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial M} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right) \quad (3)$$

Η μεταβολή της μαγνήτισης dM οφείλεται στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο H και το ενεργό πεδίο τάσεων H_{σ} που προκαλείται από την διαδιδόμενη μικροπαραμόρφωση.

Στη διάταξή μας, το εφαρμοζόμενο πεδίο στο σημείο λήψης είναι το πεδίο πόλωσης, H_{or} . Το πεδίο τάσεων εξαρτάται από το πεδίο διέγερσης που προκάλεσε η διαδιδόμενη μικροπαραμόρφωση. Το πεδίο διέγερσης $H_e(t)$ είναι το παλμικό πεδίο $H(t)$ σε συνδυασμό με το DC πεδίο πόλωσης στο σημείο διέγερσης:

$$H_e(t) = H(t) + H_{oe} \quad (4)$$

Η τάση V που ανιχνεύεται στα άκρα του πηνίου λήψης είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνήτισης, $dM_{\sigma,H}$, στο σημείο λήψης για το δεδομένο πεδίο πόλωσης και το πεδίο τάσεων :

$$V \propto dM_{\sigma,H} = \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial M} \right) \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right) \quad (5)$$

Υπάρχουν συνεπώς τρεις παράμετροι ελέγχου: το παλμικό πεδίο διέγερσης $H(t)$, το DC πεδίο πόλωσης στο σημείο διέγερσης, H_{oe} , και το DC πεδίο πόλωσης στο σημείο λήψης, H_{or} .

2.1 Βρόχος υστέρησης $M(H) - H(t)$ και H_{oe} σταθερά, μεταβλητό H_{or}

Η μεταβολή της τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης V εξαρτάται μόνο από το H_{or} . Επειδή οι συνθήκες διέγερσης δεν αλλάζουν, το ενεργό πεδίο τάσεων θεωρείται σταθερό, οι μηχανικές τάσεις στην περιοχή του πηνίου λήψης δεν μεταβάλλονται και άρα η συνεισφορά τους στην τάση εξόδου, μέσω του αντιστρόφου φαινομένου της μαγνητοσυστολής, είναι σταθερή. Από τις σχέσεις (1) και (5) προκύπτει:

$$V(H_{or}) \propto H_{or} \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right) \quad (6)$$

Συνεπώς, η τάση εξόδου V είναι ανάλογη της μαγνητικής διαπερατότητας χ του υλικού της MDL για δεδομένο πεδίο τάσεων. Η μαγνήτιση M συναρτήσεως του DC πεδίου πόλωσης H_{or} υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της τάσης $V(H_{or})$.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μετρηθεί ο DC βρόχος υστέρησης ενός μαγνητικού υλικού σε μορφή ταινίας ή ίνας. Η προτεινόμενη διάταξη λειτουργεί σαν μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος (VSM) με τη διαφορά ότι δε δονείται το δείγμα αλλά τα μαγνητικά δίπολα που βρίσκονται μέσα στο πηνίο λήψης.

2.2 Βρόχος DC μαγνητοελαστικότητας $\lambda(H) - H(t)$ και H_{or} σταθερά, μεταβλητό H_{oe}

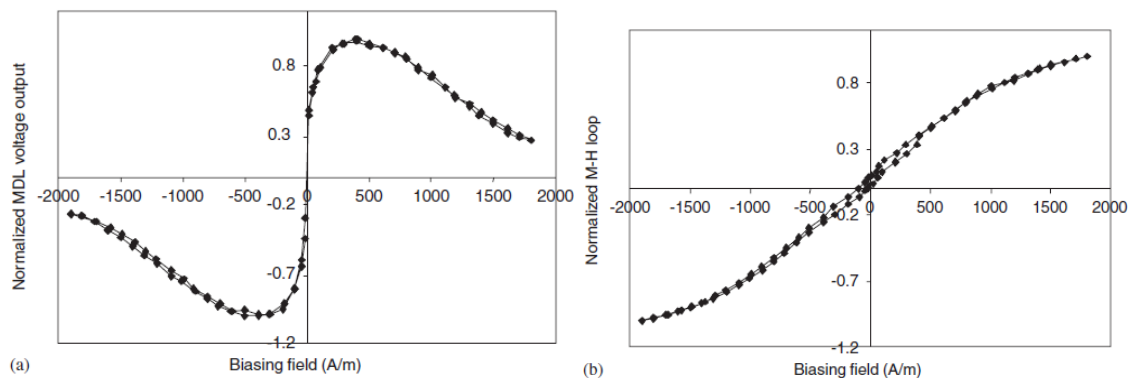
Στην περίπτωση αυτή, η τάση εξόδου V αλλάζει μόνο εξαιτίας του πεδίου πόλωσης στο σημείο διέγερσης, H_{oe} , το οποίο επηρεάζει το ενεργό πεδίο τάσεων στο σημείο λήψης, H_{or} : Από τη σχέση (5)

$$(7)$$

Η μεταβολή του πεδίου πόλωσης H_{oe} μεταβάλλει τα επίπεδα της μαγνητικής πόλωσης στο σημείο διέγερσης. Εξαιτίας του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, επηρεάζεται το μέγεθος της προκαλούμενης διαδιδόμενης μικροπαραμόρφωσης λ , η οποία όταν φτάνει στο σημείο λήψης, λόγω του αντιστρόφου φαινομένου της μαγνητοσυστολής, καθορίζει την επαγόμενη τάση στο πηνίο λήψης, εφόσον όλα τα υπόλοιπα μεγέθη παραμένουν σταθερά.

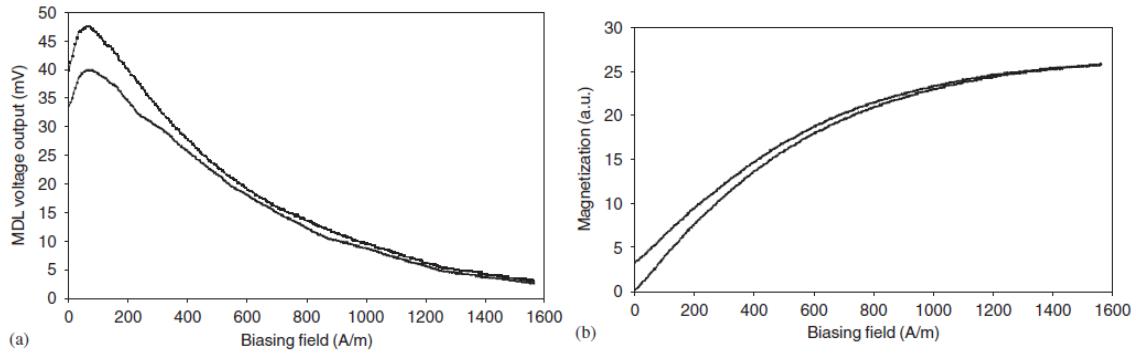
3. Αποτελέσματα

Με σταθερά τα πεδία H_e και H_{oe} και μεταβάλλοντας μόνο το H_{or} , η μέγιστη τάση εξόδου V_0 δίνεται από την εξίσωση (6). Οι καμπύλες $\chi(H)$ και $M(H)$ προκύπτουν από την κανονικοποίηση της V_0 και του ολοκληρώματός της και τη διακρίβωση της διάταξης MDL με πρότυπη ίνα Ni. Τα Σχήματα 2 και 3 δείχνουν την τάση εξόδου V_0 , ανάλογη της επιδεκτικότητας, και τη μαγνήτιση συναρτήσεως του επιβαλλόμενου πεδίου πόλωσης, H_{or} , για δείγμα ίνας $Fe_{78}Si_7B_{15}$ μετά από αποτατική ανόπτηση μηχανικής τάσης και ρεύματος (Σχήμα 2) και ταινίας $Fe_{78}Si_7B_{15}$ μετά από θερμική ανόπτηση (Σχήμα 3).

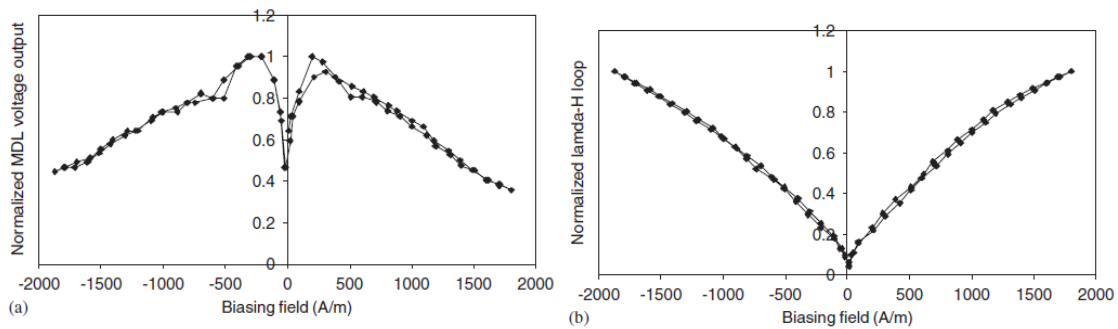


Σχήμα 2. Επιδεκτικότητα (α) και βρόχος μαγνήτισης (β) ίνας $Fe_{78}Si_7B_{15}$ μετά από αποτατική ανόπτηση μηχανικής τάσης και ρεύματος.

Με σταθερά τα πεδία H_e και H_{or} και μεταβάλλοντας μόνο το H_{oe} , η μέγιστη τάση εξόδου V_0 δίνεται από την εξίσωση (7). Μετά από κανονικοποίηση της V_0 και του ολοκληρώματός της και τη διακρίβωση της διάταξης MDL με πρότυπη ίνα Ni, προκύπτουν οι καμπύλες $V_0(H)$ και $\lambda(H)$. Το Σχήμα 4 δείχνει (α) την τάση εξόδου V_0 και (β) το ολοκλήρωμά της που αντιστοιχεί στη DC μαγνητοελαστικότητα λ συναρτήσει του επιβαλλόμενου πεδίου πόλωσης, H_{oe} , για άμορφη ίνα $Fe_{78}Si_7B_{15}$ (όπως χυτεύθηκε).



Σχήμα 3. Επιδεκτικότητα (α) και βρόχος μαγνήτισης (β) ταινίας $Fe_{78}Si_7B_{15}$ μετά από θερμική ανόπτηση.



Σχήμα 4. Τάση εξόδου V_0 (α) και $\lambda(H)$ (β) για άμορφη ίνα $Fe_{78}Si_7B_{15}$ (όπως χυτεύθηκε).

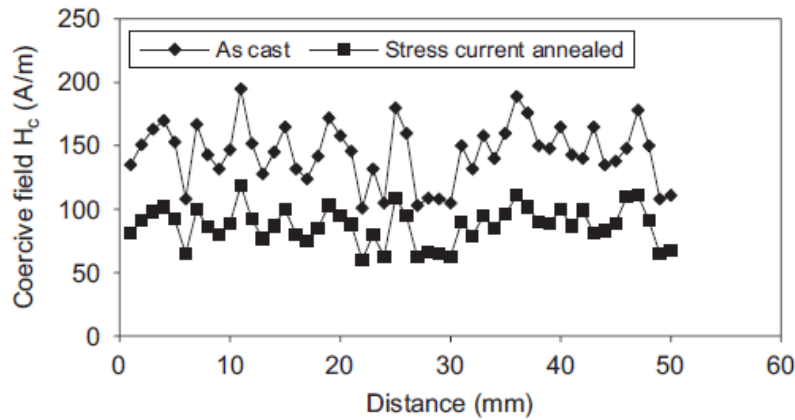
4. Εφαρμογή

Η μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον μη καταστροφικό έλεγχο ταινιών και ινών κατά την παραγωγή τους προκειμένου να προσδιοριστεί η ομοιομορφία τους και η καταλληλότητά τους σε εφαρμογές αισθητήρων [5]. Για την επίδειξη των δυνατοτήτων της τεχνικής αυτής στον ποιοτικό έλεγχο, μετρήθηκαν οι βρόχοι $M(H)$ και $\lambda(H)$ κατά μήκος ταινίας Fe-Si-B, πριν και μετά από αποτατική ανόπτηση μηχανικής τάσης και ρεύματος, με παραμετρικό έλεγχο πεδίου, συχνότητας, θερμοκρασίας και μηχανικής τάσης.

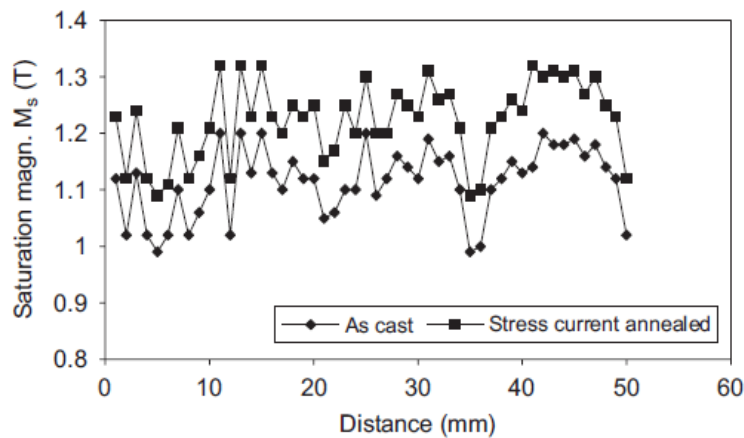
Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ομοιομορφίας σχεδιάστηκε έτσι ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση των μαγνητικών και μαγνητοελαστικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θέσης κατά μήκος μιας ταινίας και να επιτρέπει την θέρμανση με ρεύμα (σύμφωνα με το φαινόμενο Joule) και εφαρμογή μηχανικής τάσης στο μετρούμενο υλικό ώστε να είναι δυνατή η in-situ εφαρμογή αποτατικής ανόπτησης με μηχανική τάση και ρεύμα [4]. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι άμορφη ταινία $Fe_{78}Si_7B_{15}$, πλάτους 1mm και πάχους 25 mm η οποία συναντάται σε πληθώρα αισθητηριακών εφαρμογών. Οι συνθήκες αποτατικής ανόπτησης με μηχανική τάση και ρεύματος αναφέρονται σε DC ρεύμα 600mA για 1 min υπό 450MPa εφελκυσμό κατά μήκος του υλικού. Οι βρόχοι $M(H)$ και $\lambda(H)$ συναρτήσει της θέσης μετρήθηκαν σε βήματα του 1mm.

Τα Σχήματα 5 και 6 δείχνουν την ομοιομορφία του συνεκτικού πεδίου H_c και της μαγνήτισης κόρου M_s κατά μήκος της ταινίας, όπως χυτεύθηκε και μετά από ανόπτηση. Η

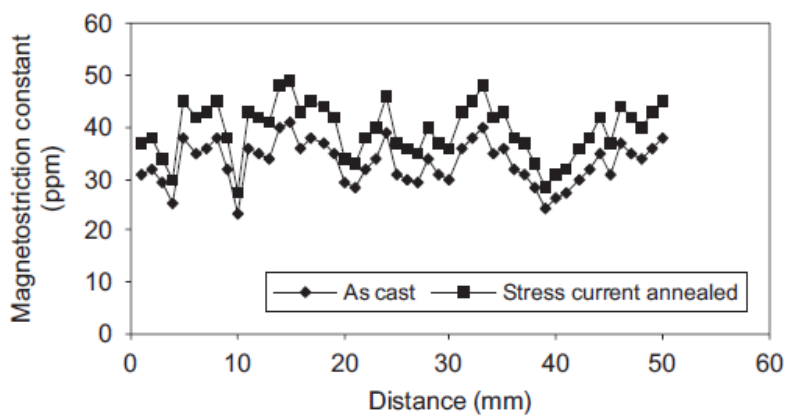
μέση τιμή του συνεκτικού πεδίου H_c σε μορφή as cast ήταν 140 A/m με τυπική απόκλιση 23 A/m. Μετά την ανόπτηση μειώθηκε σε 85 A/m με τυπική απόκλιση 10 A/m. Η μέση τιμή της μαγνήτισης κόρου M_s σε μορφή as cast ήταν 1.1 T με τυπική απόκλιση 60mT. Μετά την ανόπτηση η μέση τιμή αυξήθηκε και η τυπική απόκλιση μειώθηκε. Η ανόπτηση οδηγεί σε πιο μαλακό μαγνητικά και ομοιόμορφο υλικό, γεγονός που εξηγεί και τα αποτελέσματα αυτά [6].



Σχήμα 5. Το συνεκτικό πεδίο H_c κατά μήκος της ταινίας $Fe_{78}Si_7B_{15}$, όπως χυτεύθηκε και μετά από ανόπτηση



Σχήμα 6. Η μαγνήτιση κόρου M_s κατά μήκος της ταινίας $Fe_{78}Si_7B_{15}$, όπως χυτεύθηκε και μετά από ανόπτηση



Σχήμα 7. Η μαγνητοσυστολική σταθερά λ κατά μήκος της ταινίας $Fe_{78}Si_7B_{15}$, όπως χυτεύθηκε και μετά από ανόπτηση

Το Σχήμα 7 δείχνει την ομοιομορφία της $\lambda(H)$ κατά μήκος της ταινίας, σε μορφή όπως χυτεύθηκε και μετά την ανόπτηση. Η μέση τιμή της μαγνητοσυστολικής σταθεράς σε μορφή όπως χυτεύθηκε ήταν 33 ppm με τυπική απόκλιση 4 ppm η οποία βελτιώθηκε με 40 ppm με την ίδια τυπική απόκλιση μετά την ανόπτηση.

Ας σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις ομοιομορφίας διατηρούν το σχήμα τους μετά την ανόπτηση. Αυτό οφείλεται στο ότι η ανόπτηση γίνεται *in situ* και έτσι τα μετρούμενα σημεία είναι ακριβώς τα ίδια πριν και μετά τη μέτρηση.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Foner, Versatile and Sensitive vibrating-sample magnetometer, Rev. Sc Instr. 30: 548-557, 1959
- [2] T. Kulik, HT Savage, A. Hernando, A high performance hysteresis loop tracer, Journal of Applied Physics 73: 6855-6857, 1993
- [3] Polak, C., Thesis, TU Wien, 1992
- [4] E. Hristoforou, "Magnetostrictive Delay Lines: Engineering Theory and Sensing Applications", Review Article, Meas. Sci. & Technol., 14, p. R15-R47, 2003.
- [5] E. Hristoforou, R.E. Reilly, J. Appl. Phys. 69 (1991) 5008
- [6] P. Gorria, V.M. Prida, M. Tejedor, B. Hernando, M.L. Sanchez, Phys. B-Condens. Matter 299 (2001) 215