

ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹

¹Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ζωγράφου, 15780, Αθήνα,
Ελλάδα

²Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τεχνολογικό εκπαιδευτικό Ίδρυμα στερεάς Ελλάδας, 34400, Ψαχνά
Ευβοίας, Ελλάδα

e-mail: xvourna@metal.ntua.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μαγνητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται ως εργαλείο μη-καταστροφικών ελέγχων και έχουν ως στόχο τον προσδιορισμό της εντατικής κατάστασης του υλικού και την πρόβλεψη της ύπαρξης μικροδομικών ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα. Για το λόγο αυτό, παρατίθεται αρχικά, το θεωρητικό υπόβαθρο της συσχέτισης του τασικού πεδίου με τη διαδικασία της μαγνήτισης και στη συνέχεια αναλύονται τρεις από τις βασικές μαγνητικές τεχνικές (μαγνητικός θόρυβος Barkhausen, ελάσσονες βρόχοι υστέρησης, μαγνητική διαπερατότητα), οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν την τιμή των παραμενουσών τάσεων τόσο στην επιφάνεια όσο και σε όλη τη μαγνητική μάζα ενός φερρομαγνητικού υλικού. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη της μαγνητικής συμπεριφοράς και τον προσδιορισμό των τιμών των μαγνητικών ιδιοτήτων, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή των ανωτέρω μαγνητικών τεχνικών, σε διάφορους τύπους φερρομαγνητικού χάλυβα. Τέλος, δίνονται τα αποτελέσματα των τεχνικών που αφορούν το δομικό και μικροδομικό χαρακτηρισμό των χαλύβων αυτών, ώστε να παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη συσχέτιση μαγνητικών ιδιοτήτων και εντατικής κατάστασης του υλικού.

Λέξεις-Κλειδιά: θόρυβος Barkhausen, ελάσσονες βρόχοι υστέρησης, μαγνητική διαπερατότητα, εντατική κατάσταση, μικροδομικός χαρακτηρισμός

Abstract

In the present research work, the magnetic techniques, which are used as a non-destructive evaluation tool, are presented. These techniques are aimed to determine the stress state of a material and to predict the crystal lattice defects. For this reason, the theoretical correlation of the stress state with the magnetization process is initially presented. Additionally, three of the basic magnetic techniques are cited (magnetic Barkhausen noise, minor hysteresis loops, magnetic permeability). The abovementioned techniques are used in order to determine the values of the residual stress along the surface of ferromagnetic materials. Different grades of ferromagnetic steels are examined and the results of these measurements are presented. Finally, the results of both the structural and the microstructural characterization of the steels are shown, in order to correlate the variations of the magnetic properties' values with the stress state of the examined material.

Keywords: Barkhausen noise, minor hysteresis loops, magnetic permeability, stress state, microstructural characterization

1. Εισαγωγή

Τα φερρομαγνητικά υλικά, όπως ο σίδηρος (Fe), όταν ψύχονται κάτω από τη θερμοκρασία Curie, διαχωρίζονται αυθόρμητα σε μικρές περιοχές, που χαρακτηρίζονται από τον ομότροπο προσανατολισμό των μαγνητικών τους διπόλων σε έναν συγκεκριμένο κρυσταλλογραφικό άξονα. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η μαγνητοελαστική ενέργειά τους. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται μαγνητικές περιοχές (magnetic domains) ενώ το όριο μεταξύ τους καλείται μαγνητικό τοίχωμα (magnetic boundary) [1–3].

Στο σίδηρο συγκεκριμένα μπορούν να παρατηρηθούν δύο τύποι μαγνητικών τοιχωμάτων: τα μαγνητικά τοιχώματα 180° (180° Bloch walls) και τα μαγνητικά τοιχώματα μη- 180° ή 90° (90° Bloch walls). Καθένα από τα μαγνητικά τοιχώματα χαρακτηρίζεται από το αντίστοιχο πάχος και ενέργεια: τα μαγνητικά τοιχώματα 180° είναι παχύτερα από αυτά των 90° και έχουν υψηλότερη ενέργεια, εμφανίζοντας παράλληλα μεγαλύτερη κινητικότητα και ευαισθησία στα εξωτερικά εφαρμοζόμενα μαγνητικά πεδία [4].

Όταν στο φερρομαγνητικό υλικό δεν επιβάλλεται μαγνητικό πεδίο, τα μαγνητικά δίπολα κάθε μαγνητικής περιοχής είναι τυχαία προσανατολισμένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η συνολική μαγνήτιση του υλικού να είναι μηδέν [3]. Εν αντιθέσει, όταν στο φερρομαγνητικό υλικό εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο, τότε τα μαγνητικά δίπολα τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα στο εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο [3]. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης του φερρομαγνητικού υλικού, οι συνεχείς αλλαγές του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προσδίδουν στα μαγνητικά τοιχώματα την απαραίτητη ενέργεια ώστε να είναι σε θέση να κινηθούν. Η κίνηση αυτή οδηγεί στη διεύθυνση των μαγνητικών περιοχών όπου το διάνυσμα της μαγνήτισής τους βρίσκεται κοντά στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Όταν το επιβαλλόμενο πεδίο δεν είναι παράλληλο σε κάποιον από τους εύκολους άξονες μαγνήτισης, π.χ. στον άξονα $\langle 100 \rangle$ για το Fe, τότε ο παραλληλισμός της μαγνήτισης που περιγράφει μια μαγνητική περιοχή, πραγματοποιείται, με την περιστροφή των μαγνητικών διπόλων στα υψηλά πεδία.

Η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων μέσα στον κρύσταλλο δεν είναι ανεμπόδιστη. Τα μαγνητικά τοιχώματα αλληλεπιδρούν με τις ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος του πολυκρυσταλλικού φερρομαγνητικού υλικού. Οι μικροδομικές ατέλειες (όρια των κόκκων, κατακρημνίσεις, διαταραχές) λειτουργούν ως εμπόδια στην κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων, με αποτέλεσμα να οδηγούν σε διακριτές αλλαγές της τοπικά εντοπισμένης μαγνήτισης (local magnetization state).

Έχει αναπτυχθεί μεγάλο ενδιαφέρον για τη χρήση της μέτρησης των αλλαγών της μαγνήτισης στον προσδιορισμό της εντατικής τους κατάστασης και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους [5]. Η θεωρητική προσέγγιση της επίδρασης των τάσεων δεν έχει πλήρως αποσαφηνιστεί, γεγονός το οποίο αποδεικνύεται από την παρουσία αντικρουόμενων αποτελεσμάτων και ερμηνειών [6–8]. Είναι γνωστό, ότι όταν εφαρμόζονται ελαστικές τάσεις σε ένα φερρομαγνητικό υλικό, τότε η διάταξη των μαγνητικών περιοχών μαγνητικών περιοχών αναβαθμίζεται ενεργειακά [2–3]. Μάλιστα, σε ένα θετικά μαγνητοσυστολικό υλικό, όπως είναι ο Fe για τα χαμηλά εξωτερικά εφαρμοζόμενα πεδία, η άσκηση εφελκυστικών ελαστικών τάσεων, προσανατολίζει τα μαγνητικά δίπολα των μαγνητικών περιοχών παράλληλα με τη διεύθυνση της τάσεως με αποτέλεσμα να αυξάνουν τη μαγνήτιση τους.

Σε αντίθεση με την εφαρμογή ελαστικών τάσεων, η άσκηση τάσεων με τιμές εντός της πλαστικής παραμόρφωσης, εισάγει μόνιμες παραμορφώσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα, οι οποίες έχουν διαφορετικές επιπτώσεις σε κάθε μία από τις μαγνητικές περιοχές. Όταν η τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης σε ένα επίπεδο ολίσθησης λάβει μια κρίσιμη τιμή (κρίσιμη διατρητική τάση ολίσθησης), τότε μετατοπίσεις του κρυσταλλικού πλέγματος, που είναι

Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ²T.E.I. Στερεάς Ελλάδος

Μέτρηση πλαστικής παραμόρφωσης σε χάλυβες με μαγνητικές τεχνικές

ακέραια πολλαπλάσια της ενδοατομικής απόστασης, δημιουργούν διαταραχές (dislocations) στη γεινιάζουσα περιοχή του επιπέδου ολίσθησης. Η ολίσθηση των επιπέδων διατηρείται με την κίνηση των διαταραχών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα και ενισχύεται καθώς οι διαταραχές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Η δημιουργία δομών διαταραχών με συνεπαγόμενες εσωτερικές τάσεις έχει μελετηθεί και σε πλαστικά παραμορφωμένα μαλακά μαγνητικά υλικά και αποδεικνύεται ότι συσχετίζονται με τις ιδιότητες του βρόχου υστέρησης [9–10]. Η μελέτη χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα C μετά από δύο είδη πλαστικής παραμόρφωσης (εφελκυσμός και ψυχρή έλαση) δείχνει ότι η μαγνητική σκλήρυνση εξελίσσεται περισσότερο έντονα στην περίπτωση του εφελκυσμού όπως φαίνεται από τη μεταβολή του συνεκτικού πεδίου και της παραμένουσας μαγνήτισης συναρτήσει της παραμόρφωσης [11].

Ο βασικός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την αύξηση του συνεκτικού πεδίου ταυτίζεται με την μαγνητοελαστική αλληλεπίδραση των διαταραχών (μεμονωμένες ή διασταυρωμένες) με τα μαγνητικά τοιχώματα, η οποία είναι μεγαλύτερη στην παρουσία τοιχωμάτων 90° σε σχέση με των 180° . Η αναλογία των δύο κατηγοριών τοιχωμάτων σε πλαστικά παραμορφωμένα υλικά εξαρτάται από την κατανομή των παραμένουσων τάσεων [12]. Στην περίπτωση του εφελκυσμού αναμένεται μια ισορροπημένη κατανομή παραμένουσων εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στον όγκο του υλικού ενώ σε αυτήν της έλασης αναμένεται μια μετάβαση από θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του δείγματος σε εφελκυστικές στο εσωτερικό του.

Η πτώση της παραμένουσας μαγνήτισης αποδίδεται στην περιστροφή μαγνητικών περιοχών σε άξονες εύκολης μαγνήτισης με προσανατολισμό κάθετο προς τη διεύθυνση της παραμόρφωσης, λόγω των τοπικών θλιπτικών τάσεων. Η παραμόρφωση σε ποσοστό 0,5% είναι το σημείο εκείνο πέρα από το οποίο δεν αλλάζει η αναλογία των τοιχωμάτων 90° με την αύξηση της παραμόρφωσης.

Η αρχική διαπερατότητα εξαρτάται από τον ολικό αριθμό των διαθέσιμων τοιχωμάτων 180° και όχι από την κατανομή τους, δηλαδή την κατανομή των παραμενουσών τάσεων, αρά δεν επηρεάζεται από τον τύπο της παραμόρφωσης.

Η στατιστική μελέτη της συμπεριφοράς των μαγνητικών περιοχών αναδεικνύει ευαίσθητες μαγνητικές ιδιότητες που μπορούν να πληροφορήσουν για τις εσωτερικές τάσεις στο υλικό. Το συνεκτικό πεδίο H_c π.χ έχει βρεθεί ότι για ορισμένα υλικά ανξάνεται ανάλογα με τη τετραγωνική ρίζα της πυκνότητας των διαταραχών ρ [5]. Πρόσφατα έχει προταθεί μια γενική θεώρηση της εξάρτησης της υστέρησης από τις τάσεις, τη θερμοκρασία και την διεύθυνση της μαγνήτισης που βασίζεται στο ενεργειακό μοντέλο του Hauser [13].

Εκτός από την αναγκαιότητα προσδιορισμού εσωτερικών ατελειών σε χάλυβες, η ανάγκη της εκτίμησης του εναπομείναντος χρόνου χρήσης τους σε διάφορες κατασκευές είναι επιτακτική. Τελικός στόχος είναι η επέκταση του χρόνου ζωής τους μέσα από ένα αποτελεσματικό και οικονομικό πρόγραμμα συντήρησής τους. Η λογική των προγραμμάτων επιθεώρησης τέτοιων χαλύβδινων κατασκευών πρέπει να σχετίζεται με την παρακολούθηση και καταγραφή της κατάστασης των χαλύβων που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχία και όχι τόσο με τον εντοπισμό μιας ατέλειας μετά τη δημιουργία της. Οι συμβατικές μη καταστρεπτικές μέθοδοι αδυνατούν να ανιχνεύσουν ατέλειες σε χάλυβες ελάχιστα πριν ή κατά την έναρξη της δημιουργίας τους, με βάση το ιστορικό της φόρτισής τους ή λόγω αλλαγών της μικροδομής τους. Κατά συνέπεια, η ανάγκη εύρεσης βελτιωμένων μη καταστροφικών ελέγχων για την έμμεση παρακολούθηση των μικροδομικών αλλαγών και καταγραφής του πεδίου παραμενουσών τάσεων, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση του βαθμού υποβάθμισης του χάλυβα υπό δοκιμή, είναι προφανής.

Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ²T.E.I. Στερεάς Ελλάδος

Μέτρηση πλαστικής παραμόρφωσης σε χάλυβες με μαγνητικές τεχνικές

2. Μεθοδολογία

Ο μαγνητικός μη καταστροφικός έλεγχος μπορεί να διενεργηθεί με διάταξη περιμετρικού πηνίου όπου τα πηνία διέγερσης και λήψης προσαρμόζονται πάνω στο δείγμα και με διατάξεις ηλεκτρομαγνήτη, όπου το πηνία διέγερσης είναι τυλιγμένα πάνω στον πυρήνα του ενώ το πηνίο λήψης προσαρμόζεται πάνω στο υπό εξέταση δείγμα ή στο ένα πόδι του ηλεκτρομαγνήτη. Η τεχνική του ηλεκτρομαγνήτη λόγω της καταλληλότητας και ευκολίας στη διεξαγωγή μη καταστροφικού ελέγχου χρησιμοποιείται συχνά [14], ωστόσο παραμένει υπό μελέτη η αβεβαιότητα στις μετρήσεις που οφείλεται στην κατάσταση της επαφής με το υπό εξέταση δείγμα.

Μια κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις μαγνητικές μετρήσεις είναι η μαγνητική ροή που διαρρέεται στις άκρες του ηλεκτρομαγνήτη [15]. Πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε χάλυβα χαμηλού άνθρακα διεγείροντας στο ίδιο παράθυρο τιμών πεδίου δοκίμια σε σχήμα φύλου και δακτυλιδιού (όπου το κύκλωμα δεν παρουσιάζει απώλειες) και παρατηρείται ότι για τιμές H_a μέχρι 500A/m τα αποτελέσματα συμπίπτουν, ενώ για τιμές 500-3000A/m σημειώνεται σε μικρό ποσοστό μη αντιστρεπτή κατάσταση μαγνήτισης των άκρων του ηλεκτρομαγνήτη με συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερο συνεκτικό πεδίο να ισορροπήσει το αντίθετο παραμένον πεδίο παραποιώντας τις πραγματικές τιμές H_c .

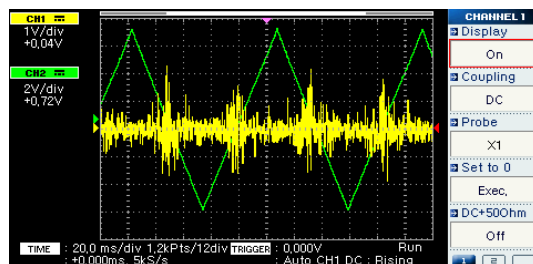
Η βελτιστοποίηση της διάταξης του ηλεκτρομαγνήτη με το πηνίο λήψης στο ένα του πόδι έχει μελετηθεί [16] και έχει δειχθεί ότι παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα με την προϋπόθεση ότι (α) μετράται άμεσα (με αισθητήρα πεδίου) το ενεργό πεδίο (effective field) $H_s(t)$ ως ανεξάρτητη μεταβλητή (β) ότι χρησιμοποιούνται δύο τέτοιοι αισθητήρες ώστε να είναι δυνατός, κατά προσέγγιση, ο υπολογισμός.

Ο μαγνητικός χαρακτηρισμός των υλικών θα πραγματοποιηθεί με τρεις τεχνικές: (1) μαγνητικός θόρυβος Barkhausen, (2) ελάχιστονες βρόχοι υστέρησης και (3) μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.1. Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν ηλεκτρομαγνήτη σε σχήμα Π, όπου στην μεγάλη του πλευρά είναι τυλιγμένο ένα πηνίο διέγερσης. Στο πηνίο αυτό εφαρμόζεται ένα τριγωνικό σήμα με συχνότητα 10 Hz και πλάτος παλμού από κορυφή σε κορυφή 14Volt. Με τον τρόπο αυτό διεγείρει με πεδίο το υπό εξέταση μαλακό φερρομαγνητικό υλικό.

Η μεταβολή του πεδίου (Εικόνα 1) λαμβάνεται από το πηνίο λήψης το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα ραβδόμορφο φερρίτη ανάμεσα στα πόδια του ηλεκτρομαγνήτη. Ο ραβδόμορφος φερρίτης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλεται κατ' ύψος και να προσαρμόζεται στην επιφάνεια του υπό εξέταση δείγματος.



Εικόνα 1: Ενδεικτική μέτρηση του MBN (κίτρινη κυματομορφή) σε σημείο της επιφάνειας του δείγματος αναφοράς.

Τα σήμα στο πηνίο λήψης, ενισχύεται και λαμβάνεται από μια κάρτα συλλογής δεδομένων. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων από κατάλληλο λογισμικό σε περιβάλλον LabView λαμβάνονται τρεις ενδείξεις:

- 1) Ο αριθμός των παλμών MBN πάνω από ένα κατώφλι δυναμικού (counts),
- 2) Η ενεργός τιμή του MBN (Root Mean Square value of MBN = V_1),
- 3) Η ένδειξη της ποιότητας επαφής του αισθητήρα με την επιφάνεια του δείγματος (V_2)

Ο θόρυβος Barkhausen παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις μικροδομικές αλλαγές, όπως τα εγκλείσματα, το μέγεθος και τα όρια των κόκκων [17], τις συστοιχίες διαταραχών [18] και τις εσωτερικές τάσεις μέσα στο υλικό λόγω μαγνητο-ελαστικής σύζευξης.

Οι ελαστικές εφελκυστικές τάσεις σε θετικά μαγνητοσυστολικά υλικά τείνουν να προσανατολίσουν τις μαγνητικές περιοχές στη διεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου προκαλώντας αύξηση της δραστηριότητας Barkhausen [19], ενώ σε θλιπτικές τάσεις προκαλεί μείωση αντίστοιχα [20].

Αντίθετα, η πλαστική παραμόρφωση εισάγει μόνιμες κρυσταλλικές παραμορφώσεις με διαφορετικές συνέπειες για κάθε τοπικό σχηματισμό των μαγνητικών περιοχών με αποτέλεσμα να αναφέρονται στη βιβλιογραφία διάφορα αποτελέσματα. Σε μερικές περιπτώσεις σημειώνεται διαρκής μείωση του θορύβου με την αύξηση της παραμόρφωσης [21] που αποδίδεται στην αλληλεπίδραση των περιοχών με τις διαταραχές. Σε άλλες μελέτες [22], παρατηρείται αρχικά μια αύξηση για μικρές τιμές πλαστικής παραμόρφωσης και στη συνέχεια μείωση.

2.2. Ελάσσονες βρόχοι υστέρησης

Η διάταξη είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη 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 είτε το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα. Έτσι το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον πυρήνα (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης του μαγνητικού κυκλώματος, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου πεδίου στο υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια (ημιτονοειδής) και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από (α) το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα, (β) πηνία διέγερσης και λήψης τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού.

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα ακόλουθα συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή: (α) Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter), (β) Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά $\pm 70V$, $\pm 6A$ της Kerco

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων.

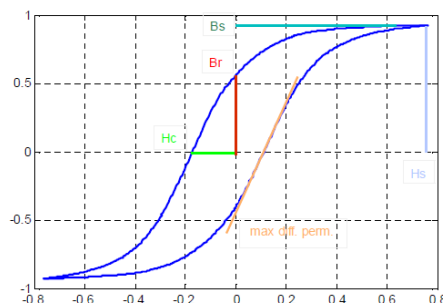
Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ²T.E.I. Στερεάς Ελλάδος

Μέτρηση πλαστικής παραμόρφωσης σε χάλυβες με μαγνητικές τεχνικές

Το σήμα διέγερσης δημιουργείται μέσω συνάρτησης από το Matlab με δυνατότητα επιλογής των επιθυμητών τιμών του πλάτους και της συχνότητας (από τον χρήστη) ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.

Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους. Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπερπερατό φιλτράρισμα των σημάτων και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (Εικόνα 2) προσδιορίζονται και οι παράμετροι των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού.



Εικόνα 2: Βρόχος υστέρησης .

Το λογισμικό διαθέτει υπορουτίνα με την οποία γίνεται η απομαγνήτιση του εκάστοτε δείγματος διεγείροντας το με ημιτονοειδές σήμα συνεχώς μειούμενου πλάτους. Τέλος το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποιημένων μετρήσεων με μεταβολή της συχνότητας ή του πλάτους του σήματος, με τη δυνατότητα πραγματοποίησης της απαραίτητης απομαγνήτισης σε κάθε βήμα ξεχωριστά.

2.3. Μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας

Η επιφανειακή μέτρηση μαγνητικής διαπερατότητας στηρίζεται στην τεχνική των μαγνητοελαστικών γραμμών καθυστέρησης και συγκεκριμένα σε ένα αισθητήρα που είναι αρκετά ευαίσθητος στην σύζευξη μαλακών μαγνητικών υλικών.

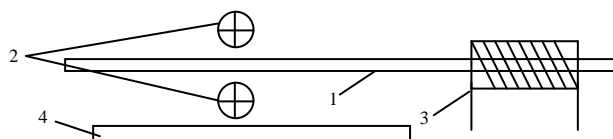
Η μετρητική διάταξη (Εικόνα 3) αποτελείται από δύο αγωγοί παλμικού ρεύματος είναι συμμετρικά τοποθετημένοι πάνω και κάτω από την μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης (MDL), η οποία είναι απαλλαγμένη από μηχανικές τάσεις. Παλμικό ρεύμα μεταδίδεται στην ίδια διεύθυνση και στους δύο αγωγούς. Στην απουσία κάποιου άλλου μαγνητικού σώματος στην γειτονιά της MDL, οι μαγνητικές ροές των δύο αγωγών αλληλοαναιρούνται και κατά συνέπεια η απουσία παλμικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα την μη δημιουργία ελαστικού κύματος, το οποίο με την σειρά του δεν δημιουργεί παλμική τάση εξόδου (στην πραγματικότητα ελαφρές διαφοροποιήσεις στην μαγνητική ροή και κυρίως στην γεωμετρία της διάταξης επιτρέπουν την δημιουργία χαμηλών παλμικών τάσεων εξόδου στα όρια της ενεργούς απόστασης ενεργοποίησης της MDL).

Αντίθετα, η παρουσία ενός φερρομαγνητικού υλικού είτε πάνω είτε κάτω από την διάταξη αγωγών – MDL θα επηρεάσει την μαγνητική συμμετρία. Αυτό οφείλεται στην μερική

Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ²T.E.I. Στερεάς Ελλάδος

Μέτρηση πλαστικής παραμόρφωσης σε χάλυβες με μαγνητικές τεχνικές

διαρροή μαγνητικών γραμμών που προέρχονται από τον αγωγό που βρίσκεται από την άλλη πλευρά της MDL (η οριακή συνθήκη της παρουσίας του αγωγού δεν επιτρέπει την έξοδο σημαντικής ποσότητας μαγνητικής ροής του άλλου αγωγού). Αυτή η ασυμμετρία δημιουργεί ένα ελαστικό κύμα που μεταδίδεται στην MDL και έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία παλμικής τάσης στα άκρα του πηνίου λήψης. Η ποσότητα της μαγνητικής διαρροής από την MDL προς το φερρομαγνητικό υλικό, και κατά συνέπεια η λαμβανόμενη τάση εξόδου V_o , εξαρτάται από την μαγνητική διαπερατότητα του φερρομαγνητικού υλικού, την απόσταση μεταξύ των αγωγών παλμικού ρεύματος, καθώς επίσης και την lift-off απόσταση μεταξύ MDL και φερρομαγνητικού υλικού.



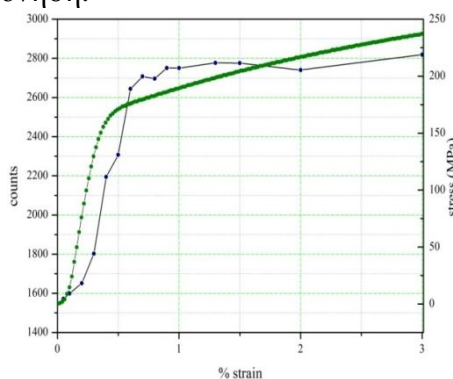
Εικόνα 3: Η προτεινόμενη συμμετρική διάταξη MDL - αγωγών: (1) MDL, (2) Παλμικοί αγωγοί ρεύματος, (3) Πηνίο λήψης, (4) Φερρομαγνητικό υλικό υπό δοκιμή.

3. Αποτελέσματα

Οι χάλυβες που έχουν μελετηθεί σε συνθήκες στατικής παραμόρφωσης, τόσο κατά την διάρκεια της επιβολής τάσης όσο και μετά, είναι: Armc0 (περιεκτικότητα σε $C < 400$ ppm), mild steel (περιεκτικότητα σε $400 \text{ ppm} < C < 1000$ ppm), TRIP, Duplex, Ηλεκτρικός Χάλυβας περιεκτικότητα σε $C < 100$ ppm)

3.1. Ενδεικτικές μετρήσεις μαγνητικού θορύβου Barkhausen

Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η μεταβολή του αριθμού των counts σε συνάρτηση με την παραμόρφωση (%) και την επιβαλλόμενη τάση (MPa), για δείγμα που υπόκειται σε δυναμική εφελκιστική καταπόνηση.



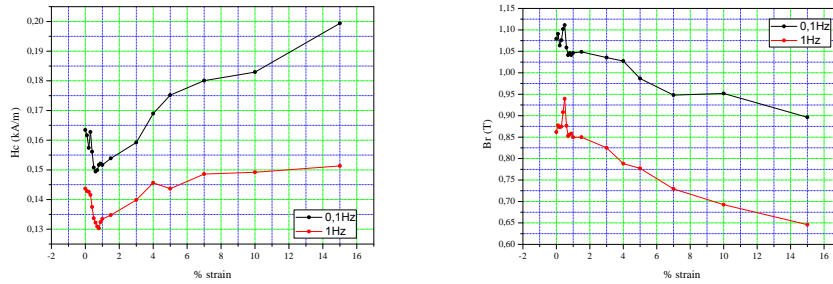
Εικόνα 4: Μεταβολή του αριθμού των counts και συναρτήσει της παραμόρφωσης (%) και της επιβαλλόμενης τάσης (MPa). Στην εικόνα απεικονίζεται και η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του φερρομαγνητικού δείγματος.

3.2. Ενδεικτικές μετρήσεις ελασσόνων βρόχων υστέρησης

Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η εξάρτηση του συνεκτικού πεδίου (H_c) και της παραμένουσας μαγνήτισης (B_r) ως συνάρτηση των παραμορφώσεων (%) που υφίσταται στο υλικό λόγω της άσκησης εφελκυστικών τάσεων. Οι μετρήσεις των τιμών μαγνητικών ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκαν για δύο συχνότητες διέγερσης 0.1 Hz και 1Hz.

Πολυξένη Βουρνά¹, Αφροδίτη Κτενά², Ευάγγελος Χριστοφόρου¹, ¹Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ²T.E.I. Στερεάς Ελλάδος

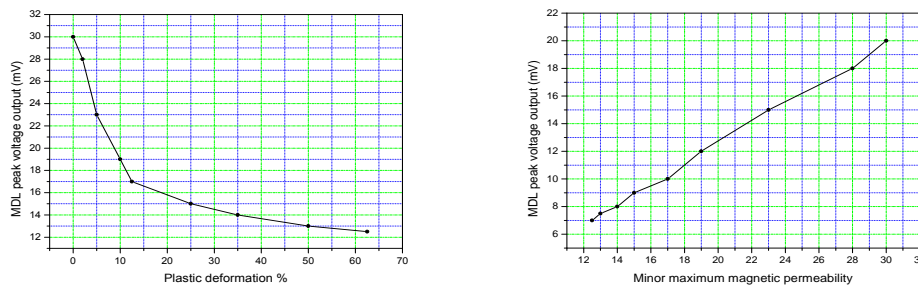
Μέτρηση πλαστικής παραμόρφωσης σε χάλυβες με μαγνητικές τεχνικές



Εικόνα 5: Το συνεκτικό πεδίο H_c και η παραμένουσα μαγνήτιση B_r σαν συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης (%) για τις συχνότητες 0.1 Hz και 1Hz.

3.3. Ενδεικτικές μετρήσεις μαγνητικής διαπερατότητας

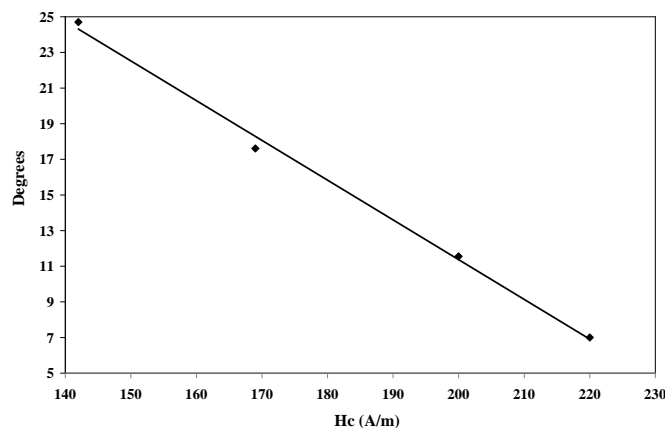
Η απόκριση της παλμικής τάσης εξόδου της MDL ως συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης και της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας απεικονίζονται στην Εικόνα 6.



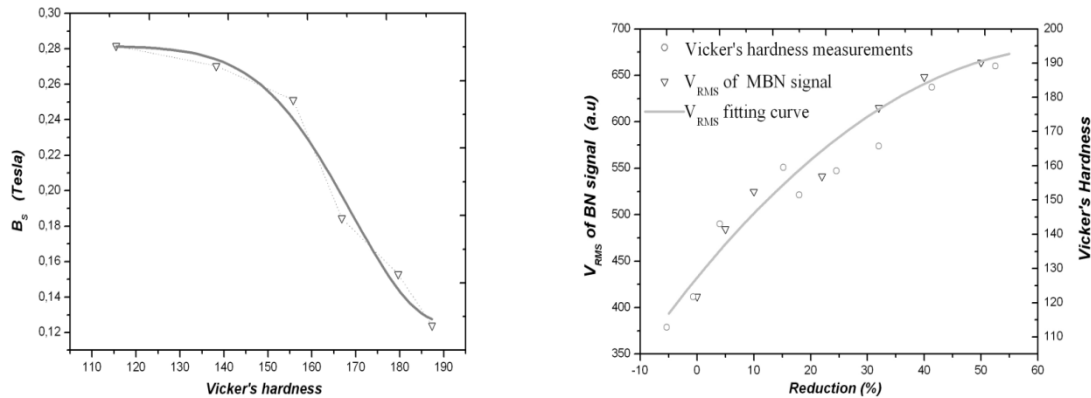
Εικόνα 6: Η απόκριση της παλμικής τάσης V_o της MDL συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης και της μαγνητικής διαπερατότητας.

3.4 Συσχέτιση με τη μικροδομή

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η συσχέτιση των μετρούμενων τιμών των μαγνητικών ιδιοτήτων με τη μικροδομή ή με κάποια μηχανική ιδιότητα των υπό εξέταση φερρομαγνητικών χαλύβων.



Εικόνα 7: Συσχέτιση της μέγιστης γωνίας αναντιστοιχίας πλέγματος και του συνεκτικού πεδίου σε δοκίμιο Armc0. Αυτή η γραμμική συσχέτιση επιτρέπει την μέτρηση της ανισοτροπίας του υλικού με μη καταστροφικό τρόπο.



Εικόνα 8: (α) Μαγνήτιση κορεσμού συναρτήσει της μηχανικής σκληρότητας δοκιμίου Armco και (β) Συσχέτιση του θορύβου BHN με την μέγιστη γωνία αποπροσανατολισμού της ανισοτροπίας και την σκληρότητα του δοκιμίου. Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα μέτρησης της γωνίας αναντιστοιχίας του κρυσταλλικού πλέγματος και σκληρότητας με τις δύο μαγνητικές τεχνικές.

4. Συμπεράσματα – Πρόταση

Οι οποιοσδήποτε μικροδομικές αλλαγές καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των μετρούμενων ελασσόνων βρόχων μαγνητικής υστέρησης, του θορύβου Barkhausen, και της επιφανειακής μαγνητικής επιδεκτικότητας. Ως εν τούτου, είναι ενδεχομένως δυνατή η συσχέτιση της μεταβολής των μαγνητικών ιδιοτήτων με την εντατική κατάσταση των κόκκων του μαγνητικού υλικού (παραμένουσες τάσεις) και κατά συνέπεια η έμμεση, μη καταστρεπτική και λιγότερο χρονοβόρα εποπτεία και αξιολόγηση της κατάστασης του υλικού.

5. Βιβλιογραφία

- [1] Bozorth R.M., "Ferromagnetism", 2003, IEEE Press.
- [2] Cullity B.D., "Introduction to Magnetic Material", 1972, Addison-Wesley.
- [3] Jiles D.C., "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials", 1998, Chapman & Hall.
- [4] Altpeter I., Dobmann G., Kröning M., Rabung M. and Szielasko S., "Micro-magnetic evaluation of micro residual stresses of the IInd and IIIrd order," NDT & E International, 42, pp. 283-290, 2009.
- [5] Kronmüller H. and Fähnle M., "Micromagnetism and Microstructure of Ferromagnetic Solid," Cambridge University Press, 2003.
- [6] Jiles D. C. and Atherton D. L., "Theory of the magnetization process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect," J. Phys. (D), 17, pp. 1265-1281, 1984.
- [7] Jiles D. C and Atherton D. L., "Theory of Ferromagnetic Hysteresis," J. Magn. Magn. Mater., 61, pp. 48-60, 1986.
- [8] Atherton D. L and Jiles D. C., "Effects of stress on magnetization," NDT&E Int., 19, pp. 15-19, 1986.
- [9] Qureshi A. H. and Chaudhary L. N., "Influence of plastic deformation on coercive field and initial susceptibility of Fe-3.25% Si alloys," J. Appl. Phys., 41, pp. 1042-1047, 1970.

- [10] Astie B., Degauque J., Porteseil J., et al., “Influence of the dislocation structures on the magnetic and magnetomechanical properties of high-purity iron,” *IEEE Trans. Magn.* 17, pp. 2929-2931, 1981.
- [11] M. K pferling, C. Appino, V. Basso, et al. Magnetic hysteresis in plastically deformed low-carbon steel laminations. *J Magn Magn Mat.* 2007;316:854-857
- [12] M. LoBue, V. Basso, F. Fiorillo. Effect of tensile and compressive stress on dynamic loop shapes and power losses of Fe-Si electrical steels. 1999;196-197:372-374
- [13] Hauser H., “Energetic model of ferromagnetic hysteresis,” *J. Appl. Phys.*, 96, pp. 2753-2758, 2004.
- [14] V rtesy G., I. M sz ros and I. Tom s. “Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement,” *J. Magn. Magn. Mater.*, 285, pp. 335–342, 2005.
- [15] Liu T., Takahashi S., Kikuchi H., et al., “Stray flux effects on the magnetic hysteresis parameters in NDE of low carbon steel,” *NDT&E Int.*, 39, pp. 277-281, 2006.
- [16] Stupakov O., Tom s I. and Kadlecov  J., “Optimization of single-yoke magnetic testing by surface fields measurement,” *J. Appl. Phys.*, 39, pp. 248-254, 2006.
- [17] Gatelier-Rothea C., Chicois J., Foug res R. and P. Fleischmann, “Characterisation of pure iron and (130 ppm) carbon–iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: study of the influence of stress and microstructure,” *Acta Mater.*, 14, pp. 4873–4882, 1998.
- [18] Scherpereel D. E., Kazmerski L. L and Allen C. W., “The magnetoelastic interaction of dislocations and ferromagnetic domain walls in iron and nickel,” *Metall. Trans.*, 1, pp. 517–524, 1970.
- [19] Dhar A., Jagadish C. and Atherton D. L., “Using the Barkhausen effect to determine the easy axis of magnetization in steels,” *Mater. Eval.*, 50, pp. 1139-1141, 1992.
- [20] Gardner C. G, Matzkanin G. A. and Davidson D. L., “The influence of mechanical stress on magnetization processes and Barkhausen jumps in ferromagnetic materials,” *J. Nondestructive Testing.* 3, pp. 131–169, 1971.
- [21] Karjalainen L. P. and Moilanen M., “Detection of plastic deformation during fatigue of mild steel by the measurement of Barkhausen noise,” *NDT&E Int.*, pp. 51–55, 1979.
- [22] Stefanita C. G., Atherton D.L. and Clapham L., “Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel,” *Acta Mater.*, 48, pp. 3545–3551, 2000.