



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Αισθητήρας για Παρακολούθηση Εντοπισμένης
Υπολειμματικής Τάσης σε Επιφάνειες Χάλυβα με Χρήση
της Τεχνικής των Μαγνητοσυστολικών Γραμμών
Καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεπίπας Π. Γεώργιος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Αισθητήρας για Παρακολούθηση Εντοπισμένης
Υπολειμματικής Τάσης σε Επιφάνειες Χάλυβα με Χρήση
της Τεχνικής των Μαγνητοσυστολικών Γραμμών
Καθυστέρησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεπίπας Π. Γεώργιος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Φεβρουαρίου 2020:

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Πάυλος Πέτρος Σωτηριάδης

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουαρίου 2020

(Υπογραφή)

.....

Copyright © ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π.ΛΕΠΠΑΣ , 2020.

**Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρακολούθηση της εντοπισμένης τάσης στην επιφάνεια και στον όγκο των μετάλλων, και ιδιαίτερα στον χάλυβα, είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση της υγείας των μεταλλικών κατασκευών. Οι υπολειμματικές τάσεις που συνήθως εισάγονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής, μπορεί να είναι επιθυμητές ή ανεπιθύμητες και μπορεί να ενισχύουν ή να μειώνουν την ποιότητα του χάλυβα ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες και την προβλεπόμενη χρήση.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία παρουσιάζεται ένας νέος τύπος αισθητήρα δύναμης, ο οποίος είναι σε θέση να παρακολουθεί τις εντοπισμένες υπολειμματικές τάσεις στις χαλύβδινες επιφάνειες. Η αρχή της λειτουργίας του προτεινόμενου αισθητήρα βασίζεται στην παρακολούθηση της δύναμης που ασκείται μεταξύ ενός μόνιμου μαγνήτη και του υπό δοκιμή χάλυβα, η οποία εξαρτάται από τη διαπερατότητα της επιφάνειας του χάλυβα, παρέχοντας μία μη-υστερητική απόκριση. Η απόκριση, η βαθμονόμηση και η απόδοση του αισθητήρα περιγράφονται ακολουθούμενες από μια συζήτηση σχετικά με τις εφαρμογές παρακολούθησης της υγείας του χάλυβα.

Αρχικά, καταδεικνύεται η απαραίτητη θεωρία των αντιστατών ανίχνευσης δύναμης - force sensitive resistors (FSR) και των μαγνητικών υλικών για να εξηγηθεί η λειτουργία αυτών των αισθητήρων αφής, καθώς και η έννοια της μαγνητοσυστολής και η δημιουργία ελαστικών παλμών που χρησιμοποιούνται στην τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης – magnetostrictive delay lines (MDL).

Μετά τη θεωρητική διαδικασία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τον αισθητήρα FSR, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και για να αντιμετωπιστούν οι ελλείψεις που αποκαλύφθηκαν, το εμπορικά διαθέσιμο FSR αντικαταστάθηκε από έναν αισθητήρα δύναμης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο ο οποίος είναι βασισμένος στις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL).

Τέλος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν από τον αισθητήρα δύναμης MDL παρουσιάζονται όπως προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία και εκτίθενται συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργικότητα του και τη μελλοντική εργασία που μπορεί να γίνει σχετικά με τη βελτίωση του.

Λέξεις Κλειδιά: Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης, Διαπερατότητα Επιφάνειας, Εντοπισμένη Υπολειμματική Τάση, Παρακολούθηση Τάσης, Χάλυβας

Abstract

Monitoring stresses on the surface and in the bulk of metals, and particularly steels, is essential in the field of health monitoring of metal structures. Residual stresses are usually introduced during manufacturing, may be desired or undesired, and may enhance or decrease the quality of the steel depending on the required properties and intended use.

In this thesis, a new type of force sensor is presented, able to monitor localized residual stresses on steel surfaces. The principle of operation of the proposed sensor is based on the monitoring of the force exerted between a permanent magnet and the under-test steel which is dependent on the surface permeability of the steel providing a non-hysteretic response. The sensor's response, calibration, and performance are described followed by a discussion concerning the applications for steel health monitoring.

Firstly, the necessary theory of force sensitive resistors and magnetic materials is demonstrated in order to explain the operation of these touch sensors and also the magnetostriction effect and the creation of elastic pulses used in the MDL technique.

After the theoretical process, measurements of the force sensitive resistor were taken and simulations took place. To address the shortcomings that were revealed, the commercially available FSR was replaced by a force sensor based on the magnetostrictive delay lines (MDL) technique.

Finally, the results of the measurements taken from the MDL force sensor are presented as they were derived from the experimental process and conclusions about functionality and future work are exhibited

Keywords: Magnetostrictive Delay Lines, Force Sensitive Resistors, Surface Permeability, Localized Residual Stress, Monitoring Stress, Steel

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πρωτότυπο και ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον διδάκτορα Σπύρο Αγγελόπουλο και τον υποψήφιο διδάκτορα Kaiiming Liang, χωρίς την καθοδήγηση και βοήθεια των οποίων δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Ευχαριστώ τον κύριο Παναγιώτη Τσαραμπάρη, και τον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Μπάνη για την πολύ χρήσιμη και ανιδιοτελή βοήθειά τους.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την στήριξη και την υπομονή τους κατά την περίοδο εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά και όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Θεωρητικό Μέρος	15
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Αισθητήρες και Μετατροπείς - Ορισμοί	15
1.2 Ταξινόμηση Αισθητήρων	16
1.3 Μαγνητικοί Αισθητήρες.....	17
1.4 Αισθητήρες αφής	18
2 Μη Καταστροφικός Έλεγχος.....	21
2.1 Γενικά περί Μη Καταστροφικού Ελέγχου	21
2.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου	22
2.3 Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Μέθοδοι.....	23
2.3.1 Μέθοδος Δινορρευμάτων	23
2.3.2 Μέθοδος Επιθεώρησης Μαγνητικών Σωματιδίων	25
3 Αντιστάτης Ανίχνευσης Δύναμης (FSR)	29
3.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή.....	29
3.2 Δομή, Λειτουργία και έλεγχος Λειτουργίας Ενός FSR.....	30
4 Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης.....	33
4.1 Μαγνητοσυστολή.....	33
4.2 Μαγνητικές Περιοχές	34
4.3 Περιστροφή Μαγνητικών Περιοχών	36
4.4 Βασική διάταξη MDL και λειτουργία της.....	38
4.5 Βασικές Ιδιότητες MDL	41
Πειραματικό Μέρος.....	43
5 Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία Αισθητήρα Δύναμης (FSR).....	43
5.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Διαθέσιμου FSR.....	43
5.2 Πειραματική Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία.....	45
6 Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία Νέου Αισθητήρα Ανίχνευσης Δύναμης που Βασίζεται στην Τεχνική MDL	51
6.1 Η Διάταξη του Αισθητήρα Δύναμης MDL.....	51
6.2 Το κύκλωμα Διέγερσης και Ανίχνευσης.....	54
6.3 Μέθοδος Προσδιορισμού της Εξάρτησης του Αισθητήρα από τη Διαπερατότητα του υπό Εξέταση Χάλυβα.....	56
7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....	65
8 Βιβλιογραφία.....	73

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1.1 Σχηματική διάταξη αισθητήρα	15
Σχήμα 1.3.1 Μαγνητόμετρο Fluxgate.....	18
Σχήμα 1.3.2 Ολοκληρωμένο αισθητήρα Hall (SS49E).....	18
Σχήμα 1.4.1 Πιεζοηλεκτρικά φιλμ.....	19
Σχήμα 2.3.2.1 Βασική αρχή της μεθόδου επιθεώρησης μαγνητικών σωματιδίων	26
Σχήμα 2.3.2.2 Δοκίμιο με επιφανειακές ρωγμές	26
Σχήμα 3.1.1 Τυπικό δείγμα ενός force sensitive resistor.....	26
Σχήμα 3.2.1 Δομή ενός force sensitive resistor	27
Σχήμα 3.2.2 Ενδεικτικό γράφημα μεταβολής αντίστασης συναρτήσει ασκούμενης δύναμης σε έναν force sensitive resistor	28
Σχήμα 3.2.3 Έλεγχος σωστής λειτουργίας ενός force sensitive resistor με πολύμετρο	29
Σχήμα 4.1.1 Επιμήκυνση υλικού λόγω εφαρμογής μαγνητικού πεδίου	32
Σχήμα 4.2.1 Ευθυγράμμιση μαγνητικών περιοχών σε σιδηρομαγνητικά υλικά λόγω επιβολής εξωτερικού πεδίου	34
Σχήμα 4.3.1 Μη αντιστρέψιμη περιστροφή	36
Σχήμα 4.3.2 Αντιστρέψιμη περιστροφή	36
Σχήμα 4.4.1 Βασική διάταξη MDL 1) πηνίο λήψης, 2) MDL, 3) πηνίο διέγερσης	37
Σχήμα 4.4.2 Η καμπύλη $\lambda(H)$ - μαγνητοσυστολή συναρτήσει του πεδίου H	38
Σχήμα 4.4.3 Δημιουργία, διάδοση και λήψη ελαστικού παλμού	40
Από σύντομο παλμό διέγερσης (αριστερά) και παρατεταμένο (δεξιά)	
Σχήμα 5.1.1 Τυπικά χαρακτηριστικά του διαθέσιμου FSR αισθητήριου στοιχείου (FSR 400 της Interlink Electronics)	45
Σχήμα 5.2.1 Πειραματική διάταξη FSR.....	47
Σχήμα 5.2.2 Κώδικας για Arduino που επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση αντίστασης FSR, αγωγιμότητας, τάσης και δύναμης που αισθάνεται ο αισθητήρας.	49
Σχήμα 5.2.3 Το σχήμα του αισθητήρα δύναμης: (α) Ο αισθητήρας δύναμης βρίσκεται μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό δοκιμή. (β) ο μόνιμος μαγνήτης βρίσκεται μεταξύ του αισθητήρα δύναμης και του χάλυβα υπό δοκιμή. . 50	
Σχήμα 5.2.4 Επιφανειακή σάρωση ενός μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα που αποδεικνύει την αστάθεια του αισθητήρα δύναμης.	51
Σχήμα 5.2.5 Η χρονική απόκριση του FSR.	51
Σχήμα 6.1.1 Ο αισθητήρας δύναμης-διαπερατότητας που βασίζεται στην αρχή των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL): (α) ο αισθητήρας δύναμης παρακολουθεί τις μεταβολές της διαπερατότητας ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται, που παρατηρούνται από τη μείωση της V_0 με την ασκούμενη δύναμη. (β) ο αισθητήρας παρακολουθεί τις μεταβολές της διαπερατότητας ως αποτέλεσμα των ανακλάσεων που δημιουργούνται στον όγκο όπου ο μόνιμος μαγνήτης πιέζει το MDL, που παρατηρούνται από τη V_0 του δεύτερου ανιχνευόμενου παλμού, που αντιστοιχεί στην ανάκλαση που αναφέρθηκε παραπάνω.	56
Σχήμα 6.2.1 Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος διέγερσης-ανίχνευσης.....	57
Σχήμα 6.2.2 Πλακέτα κυκλώματος διέγερσης-ανίχνευσης.....	58

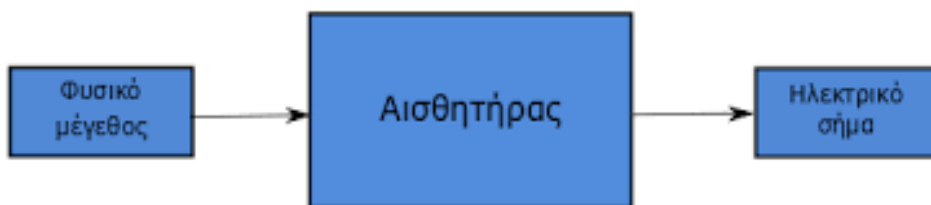
Σχήμα 6.3.1 Οι ρυθμίσεις μέτρησης διαπερατότητας: (α) ο βασικός δοκιμαστής διαπερατότητας με βάση την πρότυπη μέθοδο ενός φύλλου · (β) το δευτερεύον πρότυπο βασιζόμενο σε διάταξη Yoke που μαγνητίζει την επιφάνεια του χάλυβα υπό δοκιμή.....	61
Σχήμα 6.3.2 Η εξάρτηση διαπερατότητας από τρία φύλλα χάλυβα στο πεδίο διέγερσης.....	62
Σχήμα 6.3.3 Το σχηματικό και η φωτογραφία της βαθμονόμησης των αισθητήρων σε σχέση με τη διαπερατότητα του χάλυβα υπό δοκιμή, που καθορίζεται από το ρεύμα που μεταδίδεται στο πηνίο διέγερσης και παρακολουθείται από το δευτερεύον πηνίο του ηλεκτρομαγνητικού yoke μαλακού σιδήρου άνθρακα 7 ppm.....	63
Σχήμα 6.3.4 Η απόκριση του αισθητήρα του Σχήματος 6.1.1.α σε σχέση με τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα, για διάφορες εισόδους τάσης στον ηλεκτρομαγνητικό Yoke μαλακού σιδήρου άνθρακα σε σχήμα 7 ppm: α) 1 V, (b) 5V. (c) 8V. (d) 10v.	63
Σχήμα 6.3.5 Η απόκριση του αισθητήρα δύναμης με βάση την τεχνική MDL και για τα τρία δείγματα: (α) η απόκριση του αισθητήρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.α, (β) την απόκριση του αισθητήρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.β.	64
Σχήμα 6.3.6 Μια τυπική εξάρτηση ενός συγκολλημένου υπό δοκιμή χάλυβα: παρακολούθηση τάσεων και διαπερατότητας κατά μήκος της συγκόλλησης ενός χάλυβα AISI 1008. Η συμφωνία μεταξύ κατανομής στρες και διαπερατότητας είναι προφανής.....	66
Σχήμα 7.1.1 Ένας αισθητήρας ικανός να προσδιορίσει τη συνιστώσα διαπερατότητας στους άξονες X και Y: Η μαγνητική ροή μεταξύ των δύο μόνιμων μαγνητών είναι προσανατολισμένη στην κύρια κατεύθυνση. Έτσι, η δύναμη που ασκείται στο MDL εξαρτάται από τη διαπερατότητα κατά μήκος αυτής της κατεύθυνσης.....	70

Θεωρητικό Μέρος

1 Εισαγωγή

1.1 Αισθητήρες και Μετατροπείς - Ορισμοί

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τις έννοιες αισθητήρας και μετατροπέας τόσο στην ελληνική όσο και στην ξένη βιβλιογραφία. Στον ευρύτερο ορισμό, ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή, μια ενότητα, ένα μηχάνημα ή ένα υποσύστημα, σκοπός του οποίου είναι να ανιχνεύσει γεγονότα ή αλλαγές στο περιβάλλον του και να στείλει τις πληροφορίες σε άλλα ηλεκτρονικά μέσα, συχνά σε έναν επεξεργαστή ενός υπολογιστή. Ένας απλός ορισμός είναι ότι ως αισθητήρας μπορεί να οριστεί η διάταξη που μετατρέπει μία μη ηλεκτρική φυσική ή χημική ποσότητα συνήθως σε ηλεκτρικό σήμα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1.1 είτε σε μορφή τάσης, είτε σε μορφή ρεύματος.



Σχήμα 1.1.1 Σχηματική διάταξη αισθητήρα

Ο μετατροπέας από την άλλη, είναι μία διάταξη που απορροφά ενέργεια από ένα σύστημα και την μετατρέπει σε ενέργεια άλλης μορφής. Στα συστήματα μετρήσεων χρησιμοποιούνται εκείνοι οι μετατροπείς, οι οποίοι μετατρέπουν ενέργεια κάποιας μορφής σε ηλεκτρική και έτσι επιτρέπουν τη μέτρηση του μη

ηλεκτρικού μεγέθους. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να συγχέεται η έννοια του αισθητήρα με αυτή του μετατροπέα. Ένας μετατροπέας περιέχει στη δομή του έναν ή περισσότερους αισθητήρες. Επίσης οι μετατροπείς γενικά μετατρέπουν μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη χωρίς να είναι απαραίτητο ότι αυτή θα είναι ηλεκτρική [1].

1.2 Ταξινόμηση Αισθητήρων

Οι αισθητήρες μπορούν να ταξινομηθούν ποικιλοτρόπως. Μπορούν να χωριστούν σε ενεργούς και παθητικούς ανάλογα με την ανάγκη τους για διέγερση ή εξωτερική τροφοδοσία, ώστε να δίνουν απόκριση στην έξοδό τους. Επίσης, μπορούν να χωριστούν με βάση τη λειτουργία που επιτελούν (παραδείγματος χάρη μέτρηση της θερμοκρασίας, της πίεσης κ.λπ.) ή με βάση τη φυσική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους, σε αγώγιμους, ημιαγώγιμους, διηλεκτρικούς, μαγνητικούς ή υπεραγώγιμους. Ακόμα μπορούν να διακριθούν με βάση το πεδίο εφαρμογής τους, στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στην αυτοκίνηση, στην ιατρική, στην περιβαλλοντολογία, στο στρατό κ.λπ. Τέλος, οι αισθητήρες διαχωρίζονται σε απόλυτους και σχετικούς. Κριτήριο για αυτόν το διαχωρισμό αποτελεί η αναφορά της μέτρησής τους σε κάποια κλίμακα, δηλαδή, απόλυτος χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας του οποίου το σήμα παραγωγής αναφέρεται σε μία απόλυτη (ακριβή) φυσική κλίμακα που είναι ανεξάρτητη από τις συνθήκες μέτρησης (πχ μετρητής πίεσης με αναφορά το κενό). Σχετικός χαρακτηρίζεται ο αισθητήρας ο οποίος παράγει σήμα που αναφέρεται σε μία ειδική κλίμακα τιμών, όπως στην περίπτωση του μανομέτρου [2].

Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας που κατηγοριοποιείται με βάση τις ανθρώπινες αισθήσεις σε αισθητήρα αφής όπου προφανώς το σήμα είναι μηχανικό, καθώς και μία διάταξη που εκμεταλλεύεται το φαινόμενο των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης και άρα ανήκει στους μαγνητικούς αισθητήρες.

1.3 Μαγνητικοί Αισθητήρες

Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν δύο είδη αισθητήρων: μαγνητικοί αισθητήρες και αισθητήρες αφής. Όσον αφορά τους πρώτους, κατέχουν εξέχοντα ρόλο στις φυσικές μετρήσεις και βρίσκουν πολύ συχνή χρήση στη σύγχρονη τεχνολογία καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλών ειδών εφαρμογές, διότι μαγνητικά πεδία εμφανίζονται παντού γύρω μας. Τα κυριότερα μαγνητικά φαινόμενα στα οποία βασίζεται οι λειτουργία των μαγνητικών αισθητήρων είναι το φαινόμενο Hall, η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, η μαγνητοσυστολή, η μαγνητοεμπέδηση- magneto – impedance (MI) και η μαγνητοαντίσταση- magneto-resistance (MR).

Γενικά η μαγνητική δομή ενός μαγνητικού υλικού σε μία απλοποιημένη, μοντελοποιημένη μορφή μπορεί να προσομοιωθεί ως μία τοπογραφία περιοχών συγκεκριμένης μαγνητικής ροπής, τις λεγόμενες μαγνητικές περιοχές (magnetic domains), οι οριακές – μεταβατικές περιοχές των οποίων ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα. Με τον τρόπο αυτό, διακρίνονται δύο περιπτώσεις δυναμικής συμπεριφοράς των εν λόγω περιοχών: η δυναμική των μαγνητικών τοιχωμάτων και η δυναμική της περιστροφής των μαγνητικών περιοχών. Επίσης υπάρχουν μικροσκοπικά και μακροσκοπικά φαινόμενα που εξαρτώνται από τις παραπάνω διαδικασίες [3].

Εξαιτίας της απλής εφαρμογής τους, της εύκολης τοποθέτησής τους στο σημείο μέτρησης και της μεγάλης απόδοσής τους οι μαγνητικοί αισθητήρες έρχονται πρώτοι στη λίστα εφαρμογών σε συστήματα ελέγχου για τη μέτρηση δευτερευόντων μεγεθών όπως: της στάθμης, της ροής, της πίεσης κ.ά. Παρακάτω φαίνονται δύο μαγνητικοί αισθητήρες που συναντώνται σε μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 1.3.1 φαίνεται ένα μαγνητόμετρο Fluxgate το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στη μέτρηση μαγνητικών πεδίων λόγω της ικανοποιητικής ευαισθησίας που προσφέρει και στο Σχήμα 1.3.2 απεικονίζεται ένας εμπορικός αισθητήρας Hall (SS49E).



Σχήμα 1.3.1 Μαγνητόμετρο Fluxgate



Σχήμα 1.3.2 Ολοκληρωμένο αισθητήρα Hall (SS49E)

1.4 Αισθητήρες Αφής

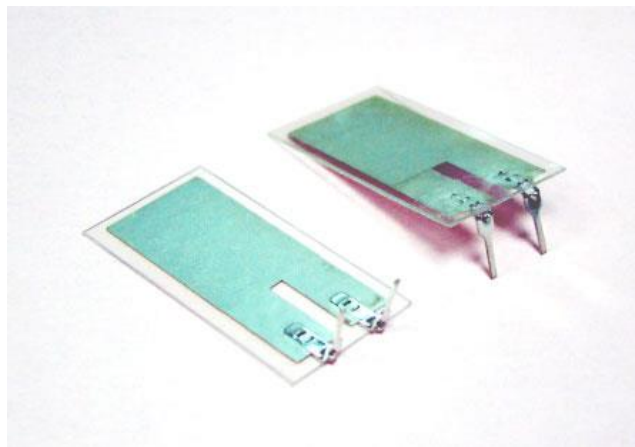
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συνεχής ανάπτυξη στην έρευνα που σχετίζεται με τη δημιουργία αισθητήρων που μετατρέπουν ερεθίσματα από το περιβάλλον αντίστοιχα με αυτά που δέχεται ένα ανθρώπινο δάκτυλο, σε ηλεκτρικά σήματα. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν μία ειδική κατηγορία μετατροπών δύναμης. Απώτερος σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι να επιτευχθεί η δημιουργία αίσθησης της αφής σε ένα ρομποτικό μηχανισμό.

Οι αισθητήρες αφής (tactile sensors) τοποθετούνται στο άκρο ενός τεχνητού χεριού. Όταν έρθουν σε επαφή με ένα αντικείμενο και ενώ τα δάκτυλα ασκούν πίεση στο τελευταίο, δίνουν πληροφορίες οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν είτε για την απεικόνιση του αντικειμένου είτε για την συγκράτηση και τον ασφαλή χειρισμό του. Μελλοντικά, χάρη σε αισθητήρες αφής ένα μηχανικό χέρι θα έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει εργασίες αντίστοιχες με αυτές του ανθρώπινου χεριού.

Αισθητήρες αφής χρησιμοποιούν σχεδόν όλοι οι άνθρωποι στην καθημερινότητά τους ενδεχομένως και χωρίς να το έχουν συνειδητοποιήσει, κάνοντας χρήση της οθόνης αφής στα κινητά τους ή ελέγχοντας την ένταση του ήχου σε κάποιο ηχοσύστημα. Επιπλέον χρησιμοποιούνται ευρέως στην ρομποτική καθώς επίσης σε εφαρμογές όπως:

- Δημιουργία τεχνητών μελών.
- Δημιουργία τεχνητού δέρματος.
- Εξέταση επιφάνειας αντικειμένου μέσω απεικόνισης του σχήματος του αντικειμένου.
- Μέτρηση επιφάνειας αντικειμένου.

Στο Σχήμα 1.4.1 παρουσιάζεται ένας από τους χαρακτηριστικότερους αισθητήρες αφής. Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών φιλμ (συνήθως PVDF) και από ένα συμπιεσμένο φιλμ διαχωρισμού. Το συμπιεσμένο φιλμ τοποθετείται ανάμεσα στα δύο πιεζοηλεκτρικά φιλμ ώστε να μεταφέρει την πίεση από το ένα φιλμ στο άλλο. Ανάλογα του βαθμού συμπίεσης του μεσαίου φιλμ καθορίζεται η ευαισθησία και το εύρος λειτουργίας του αισθητήρα. Τα αισθητήρια αυτά μπορούν να ανιχνεύσουν πίεση και στρέψη [4].



Σχήμα 1.4.1 Πιεζοηλεκτρικά φιλμ

2 Μη Καταστροφικός Έλεγχος

2.1 Γενικά Περί Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Τα υλικά και τα προϊόντα συχνά υφίστανται μια σειρά ελέγχων πριν από την παράδοσή τους στο χρήστη ώστε να πληρούν τις προσδοκίες και να παραμένουν αξιόπιστα για συγκεκριμένη χρονική περίοδο λειτουργίας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ότι οποιαδήποτε δοκιμή που γίνεται σε ένα προϊόν που θα χρησιμοποιηθεί για μελλοντική χρήση δεν θα υπονομεύσει την απόδοσή του. Κάθε τεχνική που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές υπό αυτές τις συνθήκες ονομάζεται Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ).

Σε ορισμένες περιπτώσεις η δοκιμή είναι υποχρεωτική όχι μόνο στο στάδιο της κατασκευής αλλά και σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της μελλοντικής λειτουργίας, όπως για παράδειγμα στις εξετάσεις κρίσιμων περιοχών σε δομές και εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη και σε εφαρμογές που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια, σε χημική επεξεργασία και σε εγκαταστάσεις καυσίμων ανοικτής θάλασσας. Αυτές οι δομές και τα εξαρτήματα μπορεί να υποβάλλονται σε συνθήκες εντόνων τάσεων, φθορών λόγω χρήσης και διάβρωσης. Συνεπώς, ελαττώματα ή ατέλειες όπως ρωγμές είναι πιθανό να σχηματιστούν και να αναπτυχθούν, συχνά με ραγδαία ταχύτητα, σε τέτοιο βαθμό που προκαλούν δυσλειτουργίες με ίσως καταστροφικές συνέπειες.

Συνολικά λοιπόν, οι κύριοι λόγοι για τη διεξαγωγή Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι οι παρακάτω:

- για να εξασφαλιστεί η ελευθερία από ελαττώματα που ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβη.
- για να διαπιστωθούν οι διαστάσεις ενός στοιχείου ή δομής.

- για τον προσδιορισμό ορισμένων φυσικών και δομικών ιδιοτήτων οποιωνδήποτε υλικών σε ένα προϊόν.

Ο ΜΚΕ μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά από ένα ή περισσότερα στάδια κατασκευής, για παράδειγμα στα μέταλλα κατά τη χύτευση, τη συγκόλληση, τη σφυρηλάτηση και τη μηχανική κατεργασία, καθώς επίσης και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας με σκοπό την αποφυγή βλάβης που προκαλείται από φαινόμενα όπως η ανάπτυξη ρωγμών και η διάβρωση. Η ανάγκη για ΜΚΕ πρέπει να εξεταστεί πολύ προσεκτικά και, για κρίσιμες εγκαταστάσεις, είναι αναγκαίες προκαταρκτικές έρευνες για την πρόβλεψη πιθανότητας εμφάνισης δομικών αλλαγών και ελαττωμάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε πιθανή αποτυχία. Τέλος, την ίδια στιγμή, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα περιβάλλοντα στα οποία ενδεχομένως να κληθούν να ανταποκριθούν τα εξαρτήματα της εγκατάστασης κατά τη λειτουργία, καθώς και οι πιθανότητες έκθεσής τους σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, σε ακραίες πιέσεις όπως για παράδειγμα αυτές που προκύπτουν από τους πολύ δυνατούς ανέμους και τον υψηλό κυματισμό, καθώς και σε διαβρωτικές και τοξικές ουσίες.

2.2 Μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Ο ΜΚΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μέταλλα και αμέταλλα και η μέθοδος δοκιμής που χρησιμοποιείται εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του υλικού και οι διαστάσεις του, το περιβάλλον, οι θέσεις που ενδιαφέρουν τη δομή ή το υπό εξέταση εξάρτημα, π.χ. εάν αναζητούνται εσωτερικά ή επιφανειακά ελαττώματα. Μία γενική ταξινόμηση των μεθόδων αυτών είναι η παρακάτω:

- ραδιολογικές μέθοδοι: ακτίνες Χ, ακτίνες Γ, δέσμες νετρονίων.
- ακουστικές και δονητικές μέθοδοι: υπέρηχοι και μετρήσεις μηχανικής σύνθετης αντίστασης.
- ηλεκτρικές και μαγνητικές μέθοδοι : δινορρεύματα, διαρροή μαγνητικής ροής (συμπεριλαμβανομένης της επιθεώρησης μαγνητικών σωματιδίων) και έλεγχοι με μικροκύματα.
- οπτικές έλεγχος : περίθλαση, ολογραφία, διείδυση χρωστικών ουσιών.

- Θερμικές μέθοδοι: υπέρυθη ακτινοβολία και θερμικά χρώματα.

Γενικά, συνήθως απαιτείται ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων μεθόδων για την πλήρη επιθεώρηση μίας δομής ή ενός εξαρτήματος [5].

2.3 Ηλεκτρικές και Μαγνητικές Μέθοδοι

Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών περιλαμβάνουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ηλεκτρική διαπερατότητα και τη μαγνητική διαπερατότητα και σχετίζονται με τις δομικές και μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Έτσι η δομή των κόκκων σε πολυκρυσταλλικά μέταλλα, η μηχανική αντοχή, η σκληρότητα και η παρουσία ελαττωμάτων και αλλοιώσεων μπορούν να εκτιμηθούν από τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών και μαγνητικών μεθόδων Μη Καταστροφικού Ελέγχου. Παρόλο που υπάρχουν και άλλες μέθοδοι για ηλεκτρικό και μαγνητικό έλεγχο, οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι αυτή των μαγνητικών σωματιδίων και η μέθοδος δινορρευμάτων. Παρακάτω θα εξηγηθούν περισσότερο οι δύο αυτές μέθοδοι.

2.3.1 Μέθοδος Δινορρευμάτων

Τα δινορρεύματα δημιουργούνται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενο ρεύμα σε έναν αγωγό, όπως το σύρμα χαλκού, αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο μέσα και γύρω από τον αγωγό. Αυτό το μαγνητικό πεδίο διευρύνεται καθώς η τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος μεγιστοποιείται και καταρρέει όταν το ρεύμα μειώνεται στο μηδέν. Εάν ένας άλλος ηλεκτρικός αγωγός έρθει σε στενή γειτνίαση με αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε ρεύμα θα προκληθεί σε αυτόν τον δεύτερο αγωγό. Τα δινορρεύματα προκαλούνται από ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν σε κυκλική διαδρομή. Παίρνουν την ονομασία τους από τις στροφές που σχηματίζονται όταν ένα υγρό ή ένα αέριο ρέει σε μια κυκλική διαδρομή γύρω από τα εμπόδια όταν οι συνθήκες είναι σωστές. Για να παραχθούν δινορρεύματα ώστε να πραγματοποιηθεί ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος, χρησιμοποιείται μία κατάλληλη

διάταξη (probe). Μέσα στο probe υπάρχει ένα μήκος ηλεκτρικού αγωγίμου υλικού το οποίο διαμορφώνεται σε ένα πηνίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.1 παρακάτω.



Σχήμα 2.3.1 Διάταξη για παραγωγή δινορρευμάτων

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου δινορρευμάτων ως εργαλείο ΜΚΕ είναι η ποικιλία των επιθεωρήσεων και των μετρήσεων που μπορούν να εκτελεστούν. Υπό τις κατάλληλες συνθήκες, τα δινορρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για:

- Ανίχνευση ρωγμών.
- Μετρήσεις πάχους υλικού.
- Μετρήσεις πάχους επίστρωσης.
- Μετρήσεις αγωγιμότητας για: αναγνώριση υλικού, ανίχνευση ζημιών από τη θερμότητα, παρακολούθηση θερμικής επεξεργασίας.

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου δινορρευμάτων είναι:

- Η ευαισθησία σε μικρές ρωγμές και άλλα ελαττώματα.
- Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι πολύ φορητός.
- Εντοπίζει ελαττώματα στην επιφάνεια αλλά και πλησίον της επιφάνειας.
- Η επιθεώρηση δίνει άμεσα αποτελέσματα.
- Απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία.
- Ο αισθητήρας δοκιμής δεν χρειάζεται να έρχεται σε επαφή με το υπό εξέταση δοκίμιο.

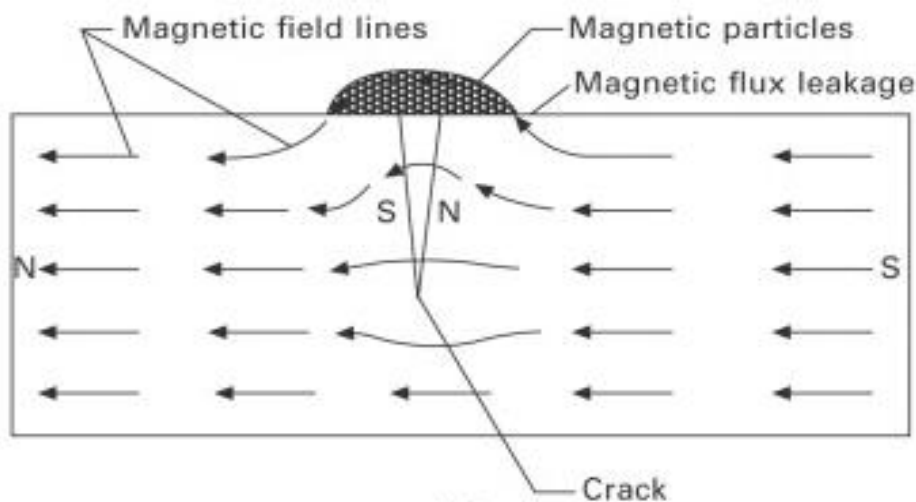
Τέλος, το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι με αυτή μπορούν να επιθεωρηθούν μόνο καλά αγωγίμα υλικά αν και γενικά μπορεί να εφαρμοστεί στη μέτρηση του πάχους σε ημιαγώγιμες επικαλύψεις όταν αυτές

βρίσκονται πάνω σε αγώγιμα υποστρώματα. Μερικοί άλλοι περιορισμοί της μεθόδου είναι:

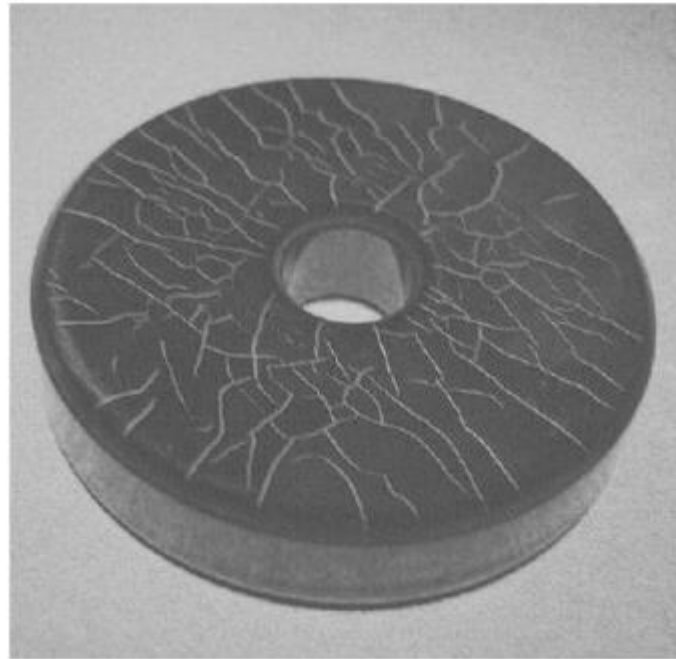
- Οι δεξιότητες και η απαιτούμενη κατάρτιση αυτού που διεξάγει την επιθεώρηση πρέπει να είναι πιο εκτεταμένες από άλλες τεχνικές.
- Το βάθος διεύθυνσης είναι περιορισμένο.
- Η επιφάνεια πρέπει να είναι προσβάσιμη στο probe.
- Η τραχύτητα της επιφάνειας μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις [6].

2.3.2 Μέθοδος Επιθεώρησης Μαγνητικών Σωματιδίων

Η επιθεώρηση μαγνητικών σωματιδίων είναι μία απλή μέθοδος ΜΚΕ που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ρωγμών στην επιφάνεια των σιδηρομαγνητικών υλικών όπως οι χάλυβες και τα κράματα με βάση το νικέλιο. Η διαδικασία επιθεώρησης αρχίζει με τη μαγνήτιση του δοκιμίου. Η επιφάνεια στη συνέχεια επικαλύπτεται με μικρά μαγνητικά σωματίδια, τα οποία είναι συνήθως ένα ξηρό ή υγρό εναιώρημα από ρινίσματα σιδήρου. Οι επιφανειακές ρωγμές ή οι κοιλότητες διάβρωσης δημιουργούν ένα πεδίο διαρροής στο μαγνητισμένο εξάρτημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.2.1. Τα μαγνητικά σωματίδια έλκονται από τη διαρροή και συνεπώς συσσωρεύονται στη ρωγμή. Αυτό το σύμπλεγμα σωματιδίων είναι πιο εύκολο να γίνει αντιληπτό με το μάτι από την πραγματική ρωγμή, και αυτή είναι η βάση για την επιθεώρηση μαγνητικών σωματιδίων. Στο Σχήμα 2.3.2.1 φαίνεται η βασική αρχή της μεθόδου επιθεώρησης μαγνητικών σωματιδίων.



Σχήμα 2.3.2.1 Βασική αρχή της μεθόδου επιθεώρησης μαγνητικών σωματιδίων



Σχήμα 2.3.2.2 Δοκίμο με επιφανειακές ρωγμές

Μερικά από τα μειονεκτήματα που συνδέονται με την επιθεώρηση με μαγνητικά σωματίδια είναι:

- χαμηλή ευαισθησία για ανίχνευση ρωγμών που εκτείνονται παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μικρή διαταραχή στο μαγνητικό πεδίο και είναι απίθανο να ανιχνευθεί η ρωγμή. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, η επιφάνεια επιθεώρησης μαγνητίζεται σε δύο κάθετες κατευθύνσεις. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές που χρησιμοποιούν μαγνητικά πεδία περιστροφής για να εξασφαλιστεί ότι μπορούν να ανιχνευθούν οι ρωγμές σε όλες τις κατευθύνσεις.
- τα υπολειπόμενα μαγνητικά πεδία που έχουν απομείνει μετά την ολοκλήρωση της επιθεώρησης ενδέχεται να επηρεάσουν τις επισκευές συγκόλλησης. Αυτά μπορούν να αφαιρεθούν με αργή «σάρωση» της επιφάνειας με ένα πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).
- δεν είναι δυνατή η ανίχνευση ατελειών σε μεγάλο βάθος.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα παρακάτω:

- ταχεία επιθεώρηση με άμεσα αποτελέσματα.

- οι ενδείξεις είναι ορατές στον επιθεωρητή απευθείας στην επιφάνεια του δείγματος.
- είναι δυνατό να επιθεωρηθούν τμήματα με ακανόνιστα σχήματα (εξωτερικές σφήνες, ράβδους σύνδεσης κ.λπ.).
- ο εξοπλισμός τέτοιου είδους ελέγχου είναι εξαιρετικά φορητός και χαμηλού κόστους [7].

3

Αντίστατης Ανίχνευσης Δύναμης (FSR)

3.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή

Οι αντιστάτες είναι ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα παθητικά εξαρτήματα στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα. Η αντίσταση μπορεί να οριστεί ως στοιχείο κυκλώματος που χρησιμοποιείται για τη μείωση της ροής ρεύματος σε κυκλώματα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αντιστάσεων που ταξινομούνται βάσει διαφόρων κριτηρίων, όπως αντιστάσεις σταθερής τιμής, μεταβλητές αντιστάσεις, αντιστάσεις σύρματος περιελίξεων, αντιστάσεις μεταλλικών ταινιών και ειδικές αντιστάσεις. Οι αντιστάσεις ειδικού σκοπού μπορούν να παρατίθενται ως αντιστάσεις που εξαρτώνται από το φως, αντιστάσεις ανίχνευσης δυνάμεων και ούτω καθεξής.

Ο αντιστάτης ανίχνευσης δύναμης (force sensitive resistor ή force sensing resistor) μπορεί να οριστεί ως ένας ειδικός τύπος αντιστάτη, η αντίσταση του οποίου μπορεί να μεταβάλλεται, μεταβάλλοντας τη δύναμη ή την πίεση που ασκείται σε αυτόν. Οι αισθητήρες FSR είναι κατασκευασμένοι από αγώγιμο πολυμερές το οποίο έχει την ιδιότητα να αλλάζει την αντίστασή του με βάση τη δύναμη που εφαρμόζεται στην επιφάνειά του. Ως εκ τούτου, ο αντιστάτης ανίχνευσης δύναμης είναι ένας συνδυασμός αντιστάσεων και τεχνολογίας αισθητήρων. Στο Σχήμα 3.1.1 απεικονίζεται ένας τυπικός FSR.

Η τεχνολογία των αντιστατών ανίχνευσης δυνάμεων επινοήθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1977 από τον Franklin Eventoff. Το 1985 ο Eventoff ίδρυσε τη Interlink Electronics, μια εταιρεία που βασίζεται στην αντίσταση ανίχνευσης δύναμης (FSR). Το 1987, ο Eventoff ήταν ο αποδέκτης του περίφημου διεθνούς βραβείου IR 100 για την ανάπτυξη του FSR.

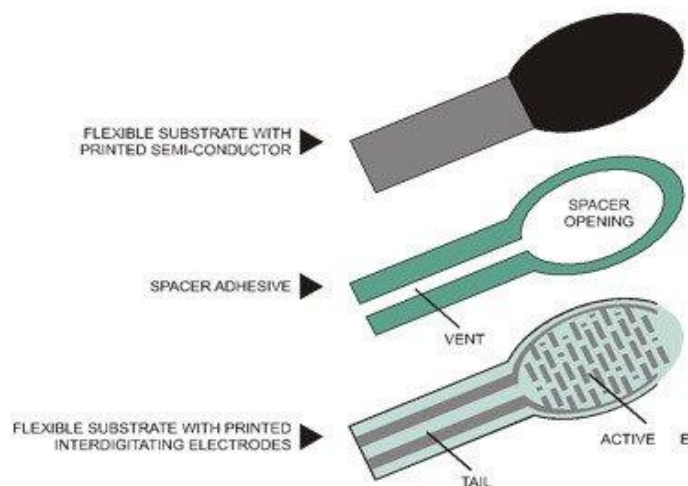
Στο Σχήμα 3.1.1 παρουσιάζεται μία αντίσταση ανίχνευσης δύναμης (FSR) .



Σχήμα 3.1.1 Τυπικό δείγμα μίας αντίστασης ανίχνευσης δύναμης

3.2 Δομή, Λειτουργία και Έλεγχος Λειτουργίας του FSR

Κατασκευαστικά, μία αντίσταση ανίχνευσης δύναμης αποτελείται από μία τυπωμένη αγώγιμη επιφάνεια, ένα διαχωριστικό υλικό, όπως σιλικόνη, και από ένα τυπωμένο φιλμ με αγώγιμες γραμμώσεις. Τόσο τα ηλεκτρικά αγώγιμα όσο και τα μη αγώγιμα σωματίδια υπάρχουν σε αυτό το τυπωμένο φιλμ. Αυτά τα σωματίδια έχουν γενικά μέγεθος υπομικρομέτρων τα οποία διαμορφώνονται έτσι, για μείωση της εξάρτησης από τη θερμοκρασία και επίσης για βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, αυξάνοντας την ανθεκτικότητα στην επιφάνεια. Στο Σχήμα 3.2.1 παρουσιάζεται η δομή μίας αντίστασης ανίχνευσης δύναμης [4].

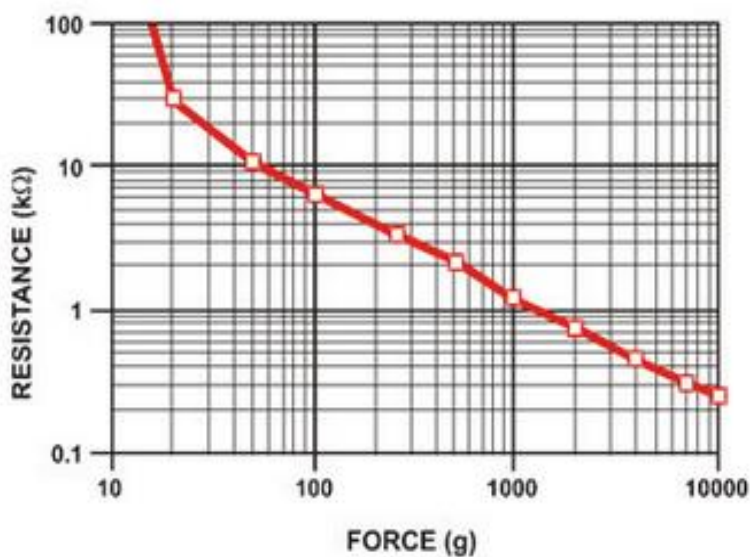


Σχήμα 3.2.1 Δομή μίας αντίστασης ανίχνευσης δύναμης

Εάν εφαρμοστεί δύναμη στην επιφάνεια της ταινίας ανίχνευσης, τότε τα σωματίδια αγγίζουν τα αγώγιμα ηλεκτρόδια και επομένως η αντίσταση της μεμβράνης αλλάζει. Υπάρχουν αρκετοί αισθητήρες που η λειτουργία τους στηρίζεται στην αντίσταση, αλλά οι αντιστάσεις ανίχνευσης δύναμης λειτουργούν ικανοποιητικά σε δύσκολα περιβάλλοντα και απαιτούν επίσης μια απλή διεπαφή σε σύγκριση με άλλους αισθητήρες με βάση την αντίσταση.

Παρόλο που υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων δύναμης, οι αντιστάσεις ανίχνευσης δύναμης έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως το λεπτό μέγεθος (λιγότερο από 0,5 mm), το πολύ χαμηλό κόστος και επίσης την καλή αντοχή. Το μόνο μειονέκτημα των αισθητήρων FSR είναι η χαμηλή ακρίβεια, καθώς θα υπάρξει περίπου 10% ή και περισσότερη διαφορά μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των θεωρητικών τιμών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αντίσταση ενός FSR αλλάζει καθώς εφαρμόζεται μεγαλύτερη πίεση. Όταν δεν υπάρχει πίεση, ο αισθητήρας έχει άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκύκλωμα), ενώ καθώς η πίεση αυξάνεται, η αντίσταση μειώνεται. Το γράφημα του Σχήματος 3.2.2 δείχνει περίπου την αντίσταση του αισθητήρα σε διαφορετικές μετρήσεις δύναμης.

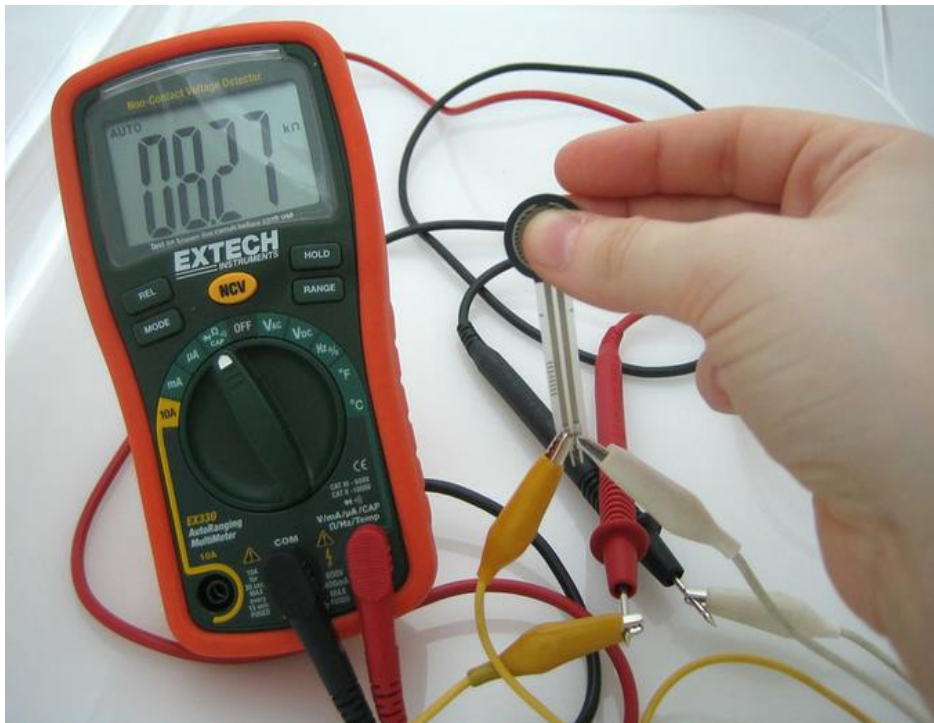


Σχήμα 3.2.2 Ενδεικτικό γράφημα μεταβολής αντίστασης συναρτήσει ασκούμενης δύναμης σε έναν FSR [4]

Στο σημείο αυτό θα τονιστούν δύο σημαντικές παρατηρήσεις:

- το γράφημα δεν είναι πραγματικά γραμμικό (είναι ένα λογαριθμικό / λογαριθμικό γράφημα) και σε ιδιαίτερα χαμηλές μετρήσεις δύναμης μεταβαίνει γρήγορα από άπειρο σε 100kΩ.
- η δύναμη δεν μετριέται σε γραμμάρια και αυτό που πραγματικά σημαίνουν είναι Newtons * 100!).

Ο ευκολότερος τρόπος για να διαπιστωθεί το αν και κατά πόσο ο αισθητήρας λειτουργεί σωστά ή όχι είναι να συνδεθεί ένα πολύμετρο σε λειτουργία μέτρησης αντίστασης στα δύο άκρα του αισθητήρα όπως στο Σχήμα 3.2.3 και να ελεγχθεί το πώς αλλάζει η αντίσταση. Επειδή η αντίσταση αλλάζει πολύ, ένας μετρητής αυτόματου καθορισμού συνήθως βοηθάει στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.2.3 Έλεγχος σωστής λειτουργίας ενός FSR με πολύμετρο

4 Μαγνητοσυστολικές Γραμμές Καθυστέρησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η βασική θεωρία της τεχνικής μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης -magnetostrictive delay lines (MDL), θα περιγραφεί η βασική διάταξη και η αρχή λειτουργίας της και τέλος θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης. Προτού όμως γίνει αυτό είναι απαραίτητο να επεξηγηθούν τρεις βασικές έννοιες, σημαντικές για την κατανόηση των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης.

4.1 Μαγνητοσυστολή

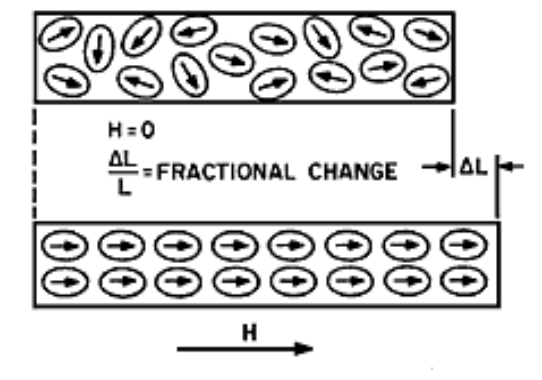
Η έννοια της συστολής είναι γενικά η κατάσταση του περιορισμού. Όταν ένα μαγνητικό πεδίο επιβάλλεται σε μία συγκεκριμένη κατηγορία μαγνητικών υλικών (μαγνητοσυστολικά), παρατηρείται αλλοίωση του σχήματος ή του μεγέθους του υλικού αυτού. Αυτή η ιδιότητα ορισμένων μαγνητικών υλικών είναι γνωστή ως μαγνητοσυστολή. Η αλλαγή της διάστασης των μαγνητικών υλικών κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης μπορεί να συνεχιστεί μέχρι να επιτευχθεί ο μαγνητικός κορεσμός του υλικού. Η μεταβολή του μήκους μιας σιδηρομαγνητικής ράβδου όταν εφαρμόστηκε πάνω της μαγνητικό πεδίο ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον James Joule το 1842 και είναι το γνωστό σε όλους φαινόμενο Joule. Αντίστροφα, εφαρμόζοντας μηχανική τάση και παραμορφώνοντας ελαστικά το υλικό κατά μια διεύθυνση, προκαλείται μαγνητικό πεδίο.

Ακολουθεί ο τυπικός ορισμός [8]: ένα μαγνητικό υλικό παρουσιάζει συστολή ή διαστολή κατά τον άξονα μαγνήτισης ως συνάρτηση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Μετριέται ως ποσοστό με τη σχέση:

$$\lambda = \frac{dl}{l_0}$$

όπου λ η μαγνητοσυστολή, dl η επιμήκυνση λόγω του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου και l_0 το αρχικό μήκος του υλικού όντας απομαγνητισμένο. Το dl μπορεί να έχει θετικές τιμές για διαστολικά υλικά ή αρνητικές για συστολικά.

Η μαγνητοσυστολή είναι συνάρτηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου $\lambda(H)$ και μπορεί να παρουσιάζει υστέρηση ή όχι ανάλογα με τη διαδικασία μαγνήτισης του υλικού. Ακόμα ορίζεται ως λ_s σταθερά υλικού, η τιμή της μαγνητοσυστολής κορεσμού και H_s η σταθερά έντασης πεδίου κορεσμού που την προκαλεί. Ο λόγος των δυο παραπάνω ορίζεται ως λ_e μετρούμενος σε $ppm \text{ Oe}^{-1}$ και αποτελεί δείκτη της ικανότητας του υλικού να δημιουργεί μαγνητοελαστικούς παλμούς, απαραίτητους στη τεχνική MDL. Στο Σχήμα 4.1.1 φαίνεται η επιμήκυνση του υλικού λόγω εφαρμογής μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 4.1.1 Επιμήκυνση υλικού λόγω εφαρμογής μαγνητικού πεδίου [25]

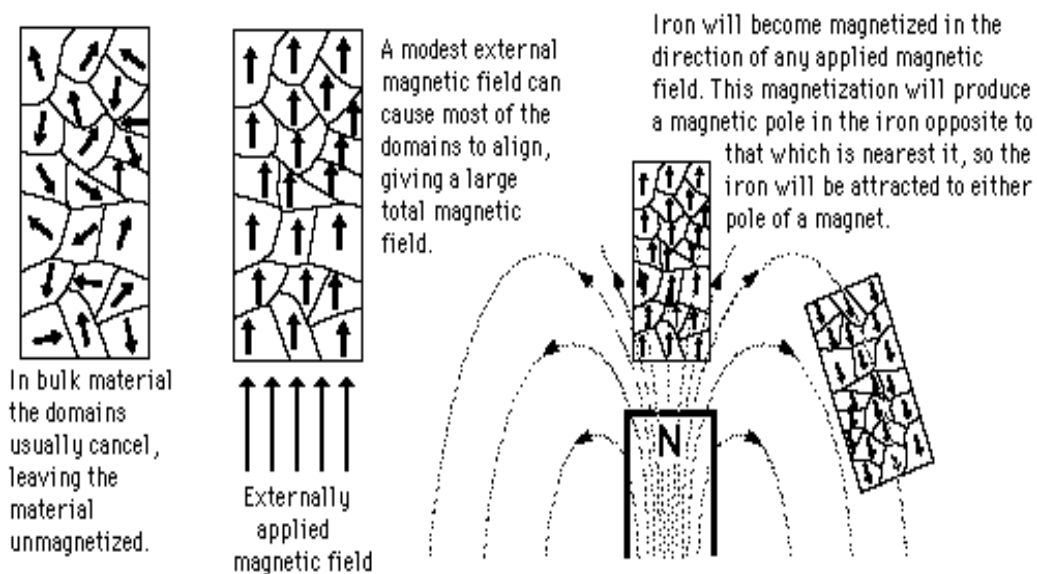
Τέλος, για να γίνει περισσότερο κατανοητή η έννοια της μαγνητοσυστολής και τα αίτια της στον αναγνώστη θα πρέπει να εξηγηθεί μία έννοια που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αυτή, η έννοια των μαγνητικών περιοχών. Στην επόμενη ενότητα γίνεται εισαγωγή στις μαγνητικές περιοχές, στον τρόπο που σχηματίζονται και στους μηχανισμούς συμπεριφοράς τους.

4.2 Μαγνητικές Περιοχές

Μια μαγνητική περιοχή είναι μια περιοχή μέσα σε ένα μαγνητικό υλικό στο οποίο η μαγνήτιση είναι σε ομοιόμορφη κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι οι μεμονωμένες μαγνητικές ροπές των ατόμων ευθυγραμμίζονται μεταξύ τους και

δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση. Όταν ψύχεται κάτω από μια θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie, η μαγνήτιση ενός όγκου σιδηρομαγνητικού υλικού χωρίζεται σε πολλές μικρές περιοχές που ονομάζονται μαγνητικές περιοχές. Ο μαγνητισμός σε κάθε περιοχή έχει ομοιόμορφη κατεύθυνση, αλλά η μαγνήτιση διαφορετικών τομέων μπορεί να δείχνει σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Η δομή της μαγνητικής περιοχής είναι υπεύθυνη για τη μαγνητική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών όπως ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο και τα κράματά τους και τα σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο φερρίτης. Οι περιοχές που χωρίζουν τις μαγνητικές περιοχές ονομάζονται μαγνητικά τοιχώματα, όπου ο μαγνήτιση περιστρέφεται συνεχτικά από την κατεύθυνση μιας περιοχής σε εκείνη της επόμενης περιοχής.

Οι μαγνητικές περιοχές σχηματίζονται σε υλικά που έχουν μαγνητική διάταξη δηλαδή, τα δίπολά τους ευθυγραμμίζονται λόγω της ανταλλαγής αλληλεπίδρασης. Αυτά είναι τα σιδηρομαγνητικά και αντισιδηρομαγνητικά υλικά. Παραμαγνητικά και διαμαγνητικά υλικά, στα οποία τα δίπολα ευθυγραμμίζονται σε απόκριση σε ένα εξωτερικό πεδίο αλλά δεν ευθυγραμμίζονται αυθόρμητα, δεν έχουν μαγνητικές περιοχές. Στο Σχήμα 4.2.1 φαίνεται καθαρά η ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών μεταξύ τους προς την ίδια κατεύθυνση όταν εφαρμοστεί σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό εξωτερικό πεδίο [9].



Σχήμα 4.2.1 Ευθυγράμμιση μαγνητικών περιοχών σε σιδηρομαγνητικά υλικά λόγω επιβολής εξωτερικού πεδίου [9]

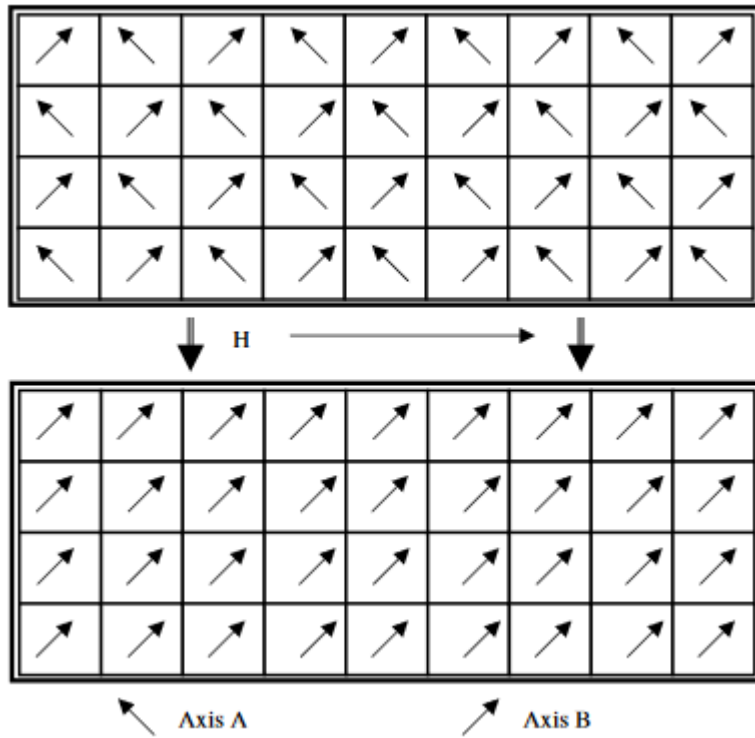
4.3 Περιστροφή Μαγνητικών Περιοχών

Η δυναμική μαγνητικών τοιχωμάτων (Domain Wall Dynamics) και η δυναμική περιστροφής περιοχών (Domain Rotation Dynamics) είναι οι δύο κύριοι μηχανισμοί των μαγνητικών περιοχών που αξιοποιούνται κατά τη σχεδίαση μαγνητικών αισθητήρων. Θα μας απασχολήσει περισσότερο η περιστροφή των περιοχών αφού η δημιουργία ελαστικών παλμών εξαρτάται κυρίως από αυτό το μηχανισμό.

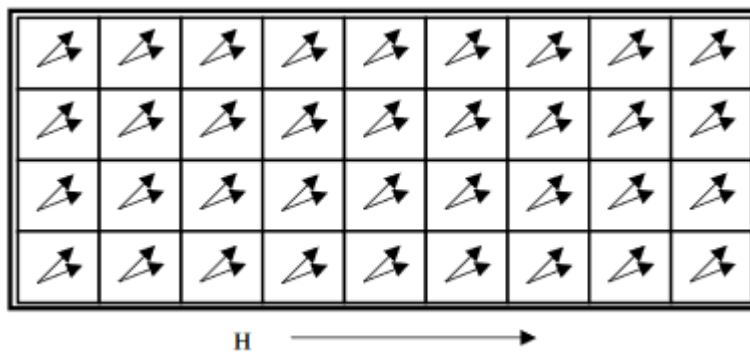
Στην τεχνική MDL ο κύριος μηχανισμός που χρησιμοποιείται είναι η δημιουργία ελαστικών παλμών. Το αίτιο της τελευταίας είναι η περιστροφή των μαγνητικών περιοχών, δηλαδή η περιστροφή των περιοχών ώστε οι μαγνητικές ροπές τους να προσανατολίζονται με την διεύθυνση του επιβαλλόμενου πεδίου.

Μία απαραίτητη έννοια που πρέπει να εξηγηθεί ώστε να γίνει κατανοητή η δημιουργία ελαστικών παλμών είναι αυτή του εύκολου άξονα (easy axis). Λόγω της ανισοτροπίας που παρουσιάζεται στα υλικά, εξαιτίας της κρυσταλλικής δομής τους, του σχήματος των κρυστάλλων και της ατελούς κατανομής των εσωτερικών τάσεων, προκύπτουν ευνοϊκότεροι άξονες μαγνήτισης, οι οποίοι αποκαλούνται εύκολοι.

Η δυναμική περιστροφή των μαγνητικών περιοχών έχει δύο ξεχωριστές περιοχές λειτουργίας, την μη αναστρέψιμη (έχει υστέρηση) και την αναστρέψιμη περιοχή (δεν έχει υστέρηση). Η μη αναστρέψιμη περιστροφή συμβαίνει όταν οι μαγνητικές περιοχές, προσανατολισμένες κατά μήκος ενός δεδομένου εύκολου άξονα A, επαναπροσανατολίζονται κατά μήκος ενός άλλου εύκολου άξονα B, πλησιέστερα στον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, λόγω της παρουσίας του πεδίου αυτού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.1 [10]. Η αντιστρέψιμη περιστροφή των μαγνητικών περιοχών λαμβάνει χώρα μετά τη διεξαγωγή της μη αναστρέψιμης περιστροφής. Δεδομένου ότι ο νέος εύκολος άξονας B, γενικά, δεν είναι ο ίδιος με τον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, τα μαγνητικά δίπολα περιστρέφονται αναστρέψιμα προς τον άξονα του εξωτερικού πεδίου H, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.2.



Σχήμα 4.3.1 Μη αντιστρέψιμη περιστροφή [10]

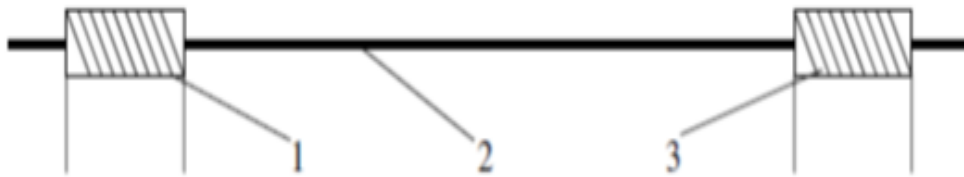


Σχήμα 4.3.2 Αντιστρέψιμη περιστροφή [10]

Οι δύο ειδών περιστροφές των περιοχών προκαλούν τη μαγνητοσυστολή, αφού το σχήμα των μαγνητικών δίπολων είναι ελλειψοειδές και όχι σφαιρικό και ο προσανατολισμός αυτών των δίπολων κατά τον άξονα μαγνήτισης προκαλεί τις αλλαγές στη γεωμετρία του υλικού όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.1.

4.4 Βασική διάταξη MDL και Λειτουργία της

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τεχνική MDL βασίζεται στη δημιουργία ελαστικών παλμών πάνω στον μαγνητοσυστολικό πυρήνα από μια διέγερση, οι οποίοι διαδίδονται κατά μήκος της γραμμής και λαμβάνονται με κάποια καθυστέρηση από ένα μέσο λήψης. Η πιο συνηθισμένη διάταξη περιέχει ένα πηνίο για τη διέγερση, ένα πηνίο για τη λήψη και έναν κάθετο προς τη γραμμή αγωγό (cross-section) ο οποίος συνδέει τα δύο πηνία μεταξύ τους. Σχηματικά η προαναφερθείσα διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.1.1 Βασική διάταξη MDL 1) πηνίο λήψης, 2) MDL, 3) πηνίο διέγερσης [10]

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν εναλλακτικές διατάξεις MDL όπως για παράδειγμα διάταξη με κάποιο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αντί για πηνίο λήψης ή μία διάταξη με δίσκο δινορρευμάτων [11] αντί για αγωγό. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι η απλούστερη και βασικότερη και είναι ιδανική για κατανόηση της τεχνικής MDL.

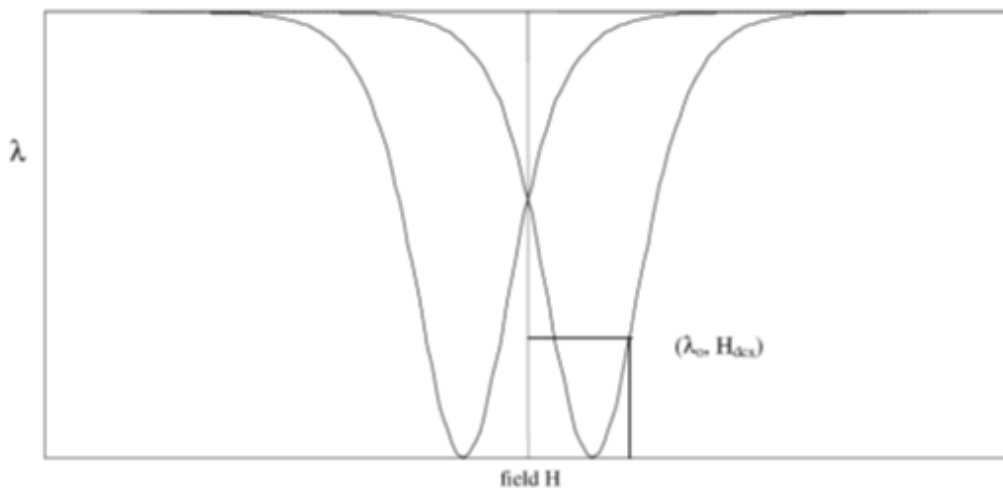
Όσον αφορά τη λειτουργία του MDL, μπορεί να χωριστεί σε τρία κομμάτια:

- διέγερση-μαγνητοσυστολικό φαινόμενο.
- διάδοση-ακουστικό φαινόμενο.
- λήψη-αντίστροφο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου.

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, όσον αφορά τη διέγερση, τα δίπολα των μαγνητικών περιοχών στα υλικά έχουν την τάση να προσανατολίζονται στη διεύθυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου, είτε σταθερού, είτε παλμικού. Η εφαρμογή ενός πεδίου πόλωσης ή ενός παλμικού πεδίου έχουν σαν αποτέλεσμα, αρχικά, τη δημιουργία των λεγόμενων αλμάτων Barkhausen, τα οποία συντελούν στη μη αντιστρέψιμη και υστερητική περιοχή της καμπύλης $\lambda(H)$ και στη συνέχεια μικρής

γωνίας περιστροφή των περιοχών που αποτελεί και το μη υστερητικό μέρος της καμπύλης.

Εφαρμόζοντας λοιπόν σταθερό πεδίο πόλωσης H_{DC} στο MDL θα παρατηρήσουμε μια στατική επιμήκυνση του υλικού $\delta\lambda_0$ που αντιστοιχεί στο σημείο του Σχήματος 4.4.2 (λ_0, H_{DC}). Εάν επιπρόσθετα εφαρμοστεί παλμικό πεδίο $H_e(t)$ στην ίδια περιοχή, θα παρατηρηθεί μια παρόμοια αλλά δυναμική επιμήκυνση του υλικού $\delta\lambda(t)$ που θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ελαστικού παλμού που διαδίδεται κατά μήκος του MDL. Αυτός ο παλμός προκύπτει ως το σύνολο των μικροπαραμορφώσεων (microstrains) στο ενεργό τμήμα του μαγνητοσυστολικού υλικού.



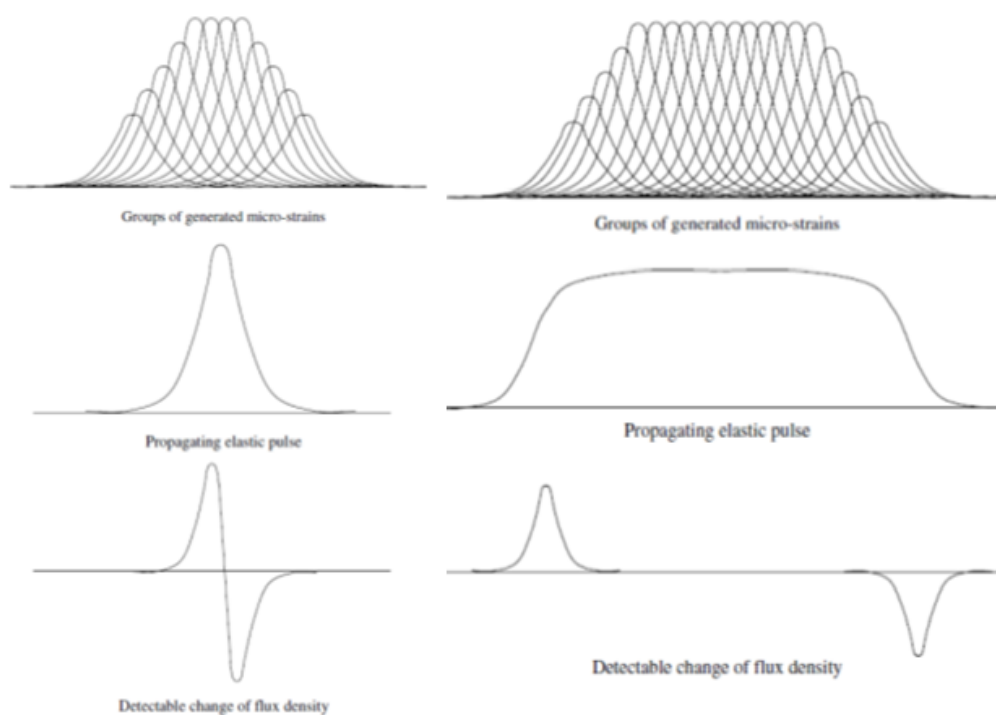
Σχήμα 4.4.2 Η καμπύλη $\lambda(H)$ - μαγνητοσυστολή συναρτήσει του πεδίου H [10]

Όσον αφορά τη διάδοση, γίνεται κυρίως με την μορφή διαμήκους κύματος λόγω της γεωμετρίας του ακουστικού κυματοδηγού και παρουσιάζει απόσβεση ανάλογη της απόστασης. Στα κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά η διάρκεια της διέγερσης είναι της τάξης των microseconds (μs) και έτσι το μήκος κύματος του διαδιδόμενου ελαστικού παλμού είναι κάποια millimeters (mm).

Τέλος, όσον αφορά τη λήψη, παρουσιάζεται το αντίστροφο του μαγνητοσυστολικού φαινομένου. Συγκεκριμένα, ο ελαστικός παλμός, κατά την πορεία του, αλλάζει τοπικά την διεύθυνση μαγνήτισης των διπόλων του υλικού, δεδομένου πως αυτό είναι τοπικά μαγνητιζόμενο. Στην περίπτωση άμορφων πυρήνων δεν χρειάζεται να υπάρξει επιπλέον πεδίο πόλωσης καθώς το μαγνητικό πεδίο της

γης επαρκεί για να προκαλέσει αρκετά ισχυρή μαγνητική ροή πόλωσης. Το στατιστικό άθροισμα των απειροελάχιστων αλλαγών του προσανατολισμού των δίπολων προκαλεί μακροσκοπική αλλαγή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του MDL. Αυτό είναι στην πραγματικότητα το αντίστροφο μαγνητοσυστολικό φαινόμενο. Τέλος στο πηνίο λήψης επάγεται τάση ανάλογη με την πρώτη παράγωγο της μαγνητικής ροής [10].

Στο Σχήμα 4.4.3 παρουσιάζεται συνολικά η λειτουργία του MDL, δηλαδή η δημιουργία, η διάδοση και η λήψη δύο ελαστικών παλμών, ενός σύντομου και ενός παρατεταμένου.



Σχήμα 4.4.3 Δημιουργία, διάδοση και λήψη ελαστικού παλμού
Από σύντομο παλμό διέγερσης (αριστερά) και παρατεταμένο (δεξιά) [10]

Οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης συνήθως αποτελούνται εξ ολοκλήρου από μαγνητοσυστολικό υλικό, τις περισσότερες φορές για λόγους ευκολίας. Ωστόσο αφού έχουμε μαγνητικό φαινόμενο μόνο στην περιοχή διέγερσης και λήψης, η περιοχή του κυματοδηγού μπορεί να είναι φτιαγμένη από μη μαγνητικό υλικό, για παράδειγμα γυαλί ή κάποιο κεραμικό [12].

4.5 Βασικές Ιδιότητες MDL

Ο χαρακτηρισμός των μαγνητοσυστολικών υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την κατανόηση των ιδιοτήτων, που παίζουν ρόλο σε κάθε εφαρμογή. Αυτό το απαραίτητο στάδιο, εξασφαλίζει ότι ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής, γίνεται κατάλληλη κατεργασία των υλικών κατά την παραγωγή, αλλά και μετά από αυτή. Οι ιδιότητες των μαγνητοσυστολικών υλικών που είναι κρίσιμες στον σχεδιασμό αισθητήριων διατάξεων MDL, είναι οι ακόλουθες [10]:

1. Ανομοιομορφία (Non-uniformity): Η ανομοιομορφία ορίζεται ως η διακύμανση της συνάρτησης ομοιομορφίας $V_o(x)$, δηλαδή της μέγιστης τάσης V_p που λαμβάνεται σε ένα πηνίο λήψης συναρτήσει της απόστασης ανάμεσα στην διέγερση και τη λήψη κάτω από τις ίδιες συνθήκες μαγνητικού πεδίου πόλωσης και παλμικού πεδίου. Στη βιβλιογραφία [13], η ανομοιομορφία έχει αναλυθεί εκτενώς και συμπεραίνεται πως οι μέθοδοι ανόπτησης (stress-current annealing) και κανονικοποίησης (normalization) εξαλείφουν τις τοπικές τάσεις, που δημιουργούνται κατά την παραγωγή και διορθώνουν τις διευθύνσεις των μαγνητικών περιοχών, οδηγώντας σε μείωση της ανομοιομορφίας του υλικού.
2. Φαινόμενο μαγνητικού πεδίου πόλωσης (Bias field Effect): Ορίζεται ως η εξάρτηση της τάσης εξόδου που λαμβάνεται σε ένα πηνίο λήψης, από ένα επιβαλλόμενο σταθερό μαγνητικό πεδίο κατά τη διεύθυνση του MDL. Αυτή η εξάρτηση αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ιδιότητα, καθώς ένα απρόσμενο εξωτερικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει έντονα την απόκριση του αισθητήρα. Ακόμα ορίζει σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον στο οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας τέτοιος αισθητήρας, ανάλογα με την παρουσία μαγνητικών πεδίων ή όχι. Η παραπάνω εξάρτηση έχει μελετηθεί στο παρελθόν και μέθοδοι για την αποφυγή αυτού του φαινομένου περιλαμβάνουν την μαγνητική μόνωση του αισθητήρα ή τη σχεδίαση του υλικού προβλέποντας τα εξωτερικά πεδία [14].
3. Καθυστέρηση απόκρισης (Response delay): Ως καθυστέρηση απόκρισης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή διέγερσης και δημιουργίας του ελαστικού παλμού, έως τη στιγμή λήψης και αποθήκευσής του. Αυτός ο χρόνος εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα διάδοσης του παλμού μέσα στο υλικό και συσχετίζεται

τόσο με τις τεχνικές κατασκευής των μαγνητοσυστολικών πυρήνων όσο και με το φαινόμενο πεδίου πόλωσης [15].

4. Υστέρηση: Η υστέρηση που παρουσιάζουν τα MDL είναι ένα μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο περιγράφεται ως η διαφορά της τάσης εξόδου $V_o(I_e)$ που παρατηρείται όταν αυξάνεται το παλμικό ρεύμα διέγερσης I_e έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Τα άμορφα υλικά που χρησιμοποιούνται ως γραμμές καθυστέρησης παρουσιάζουν πολύ μικρή υστέρηση κατά τη δυναμική/παλμική διέγερση. Ειδικά όταν λειτουργούν κοντά στην περιοχή κορεσμού, η υστέρηση είναι μηδενική.
5. Ανάλυση: Ανάλυση καλείται η μικρότερη απόσταση δυο κοντινών σημείων πάνω σε μια γραμμή καθυστέρησης, που όταν διεγερθούν μπορούν να προκαλέσουν διακριτούς παλμούς στη λήψη. Έρευνες έχουν δείξει πως σε κλασικά μαγνητοσυστολικά υλικά η ανάλυση φτάνει τα 80mm ενώ σε άμορφα υλικά μετά από κατάλληλη επεξεργασία με τεχνικές ανόπτησης, μπορεί να φτάσει το 1mm.
6. Πλάτος παλμού διέγερσης και απόκριση συχνότητας: Το πλάτος της τάσης εξόδου στη λήψη παρουσιάζει επίσης εξάρτηση με τη διάρκεια και το εύρος της συχνότητας διέγερσης [16].
7. Ανακλάσεις: Παρουσιάζονται ανακλάσεις όταν ο ελαστικός παλμός φτάνει στο τέλος του κυματοδηγού, πράγμα που μειώνει την ευαισθησία και την ανάλυση των γραμμών καθυστέρησης. Η εξάλειψή τους επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο τερματισμό των γραμμών και σχεδίαση της γεωμετρίας της διάταξης.

Πειραματικό Μέρος

5

Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία Αισθητήρα

Δύναμης (FSR)

Η συσχέτιση μεταξύ υπολειμματικών τάσεων και διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας (στο υπόλοιπο του κειμένου, θα αναφέρεται ως διαπερατότητα για λόγους απλότητας), έχει καθιερωθεί στο παρελθόν. Έχει συναχθεί το συμπέρασμα ότι η εξάρτηση της διαπερατότητας της επιφάνειας ή του συνόλου του υλικού, είναι μία μονοτονική λειτουργία, επιτρέποντας επίπεδα αβεβαιότητας της τάξης του 1% [17].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κύρια ιδέα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία είναι η ανάπτυξη ενός αισθητήρα για τη μέτρηση της δύναμης μεταξύ ενός μόνιμου μαγνήτη και του υπό δοκιμή χάλυβα και η συσχέτιση αυτής της δύναμης απευθείας με την εντοπισμένη διαπερατότητα του χάλυβα στην περιοχή που επηρεάζεται από τον μόνιμο μαγνήτη. Αυτή η δύναμη είναι της τάξεως των 5-10 N. Επομένως, οι αισθητήρες δύναμης που λειτουργούν εντός αυτού του εύρους μπορούν να είναι κατάλληλοι για την παρακολούθηση αυτής της δύναμης.

5.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Διαθέσιμου FSR

Το εμπορικά διαθέσιμο FSR αισθητήριο στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την ανάπτυξη αισθητήρα για την παρακολούθηση εντοπισμένων υπολειμματικών τάσεων σε επιφάνειες χάλυβα, ήταν το FSR400, κατασκευασμένο από την εταιρία Interlink Electronics. Κάποια από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φαίνονται στο Σχήμα 5.1.1 που ακολουθεί. Οι προδιαγραφές προέρχονται από

μετρήσεις που έχουν ληφθεί στα 10 Newton και δίδονται ως μία τυπική απόκλιση / μέση τιμή, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Επίσης η σχέση μεταβολής αντίστασης συναρτήσει ασκούμενης δύναμης φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2.

Device Characteristics

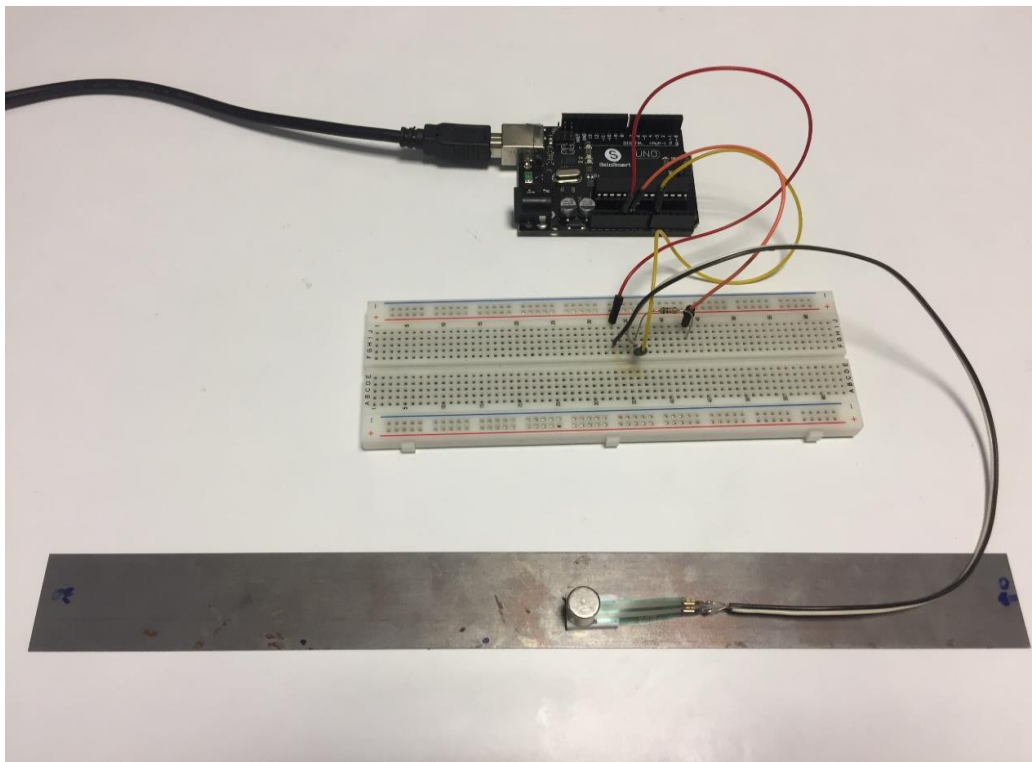
Feature	Condition	Value*	Notes
Actuation Force		0.1 Newtons	
Force Sensitivity Range		0.1 - 10.0 ² Newtons	
Force Repeatability ³	(Single part)	± 2%	
Force Resolution ³		continuous	
Force Repeatability ³	(Part to Part)	±6%	
Non-Actuated Resistance		10M W	
Size		7.62mm diameter	
Thickness Range		0.2 - 1.25 mm	
Stand-Off Resistance		>10M ohms	Unloaded, unbent
Switch Travel	(Typical)	0.05 mm	Depends on design
Hysteresis ³		+10%	$(R_{F+} - R_{F-})/R_{F+}$
Device Rise Time		<3 microseconds	measured w/steel ball
Long Term Drift		<5% per log ₁₀ (time)	35 days test, 1kg load
Temp Operating Range	(Recommended)	-30 - +70 °C	
Number of Actuations	(Life time)	10 Million tested	Without failure

Σχήμα 5.1.1 Τυπικά χαρακτηριστικά του διαθέσιμου FSR αισθητήριου στοιχείου (FSR 400 της Interlink Electronics) [18]

Όσον αφορά το μέγεθός του, ο τυπικός αισθητήρας FSR400 είναι ένας αισθητήρας διαμέτρου 7,62mm. Από αυτά, η ενεργή του περιοχή είναι τα 5,08mm. Τέλος το ονομαστικό του πάχος είναι 0,35mm [18].

5.2 Πειραματική Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία

Όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία, ένας εύκολος τρόπος σύνδεσης ενός FSR είναι η συνδεσμολογία διαιρέτη τάσης. Συνεπώς, χρησιμοποιείται μια γνωστή τάση τροφοδοσίας και μια γνωστή αντίσταση. Στη συνέχεια, το σημείο μεταξύ της σταθερής αντίστασης και της μεταβλητής αντιστάσεως του FSR συνδέεται με την αναλογική είσοδο μιας πλακέτας μικροελεγκτή, όπως ενός Arduino, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή μετρήσεων με ιδιαίτερα απλό τρόπο (ένας από τους κύριους λόγους που αρχικά δοκιμάστηκε ο FSR ήταν η απλότητα της συνδεσμολογίας του και της συνολικής ρύθμισής του). Για την συγκεκριμένη συνδεσμολογία χρησιμοποιήθηκε ως σταθερή (pull-down) αντίσταση μία αντίσταση 10kΩ και η τιμή τάσης εισήχθη στο Αναλογικό Pin 0 του Arduino. Στο Σχήμα 5.2.1 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη για την εξαγωγή τιμών υπολειμματικών τάσεων σε χάλυβες.



Σχήμα 5.2.1 Πειραματική διάταξη FSR

Χρησιμοποιώντας τον κώδικα που φαίνεται στο Σχήμα 5.2.2, ταυτόχρονες μετρήσεις αντίστασης, αγωγιμότητας τάσης και αισθητής δύναμης έγιναν διαθέσιμες

για την μέτρηση της υπολειμματικής εντοπισμένης τάσης των διαθέσιμων χαλύβων για εξέταση.

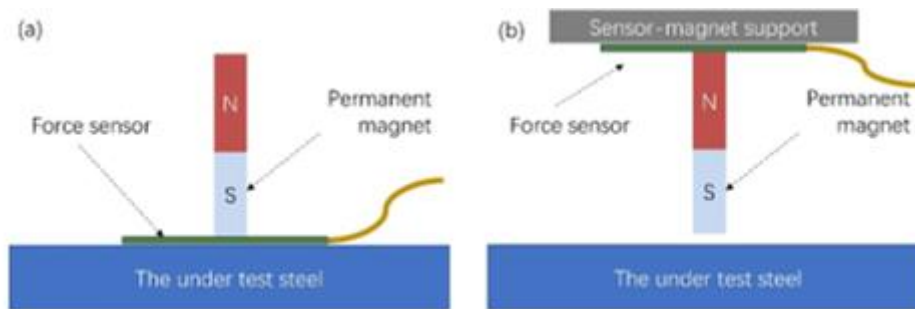
Όσον αφορά την πειραματική διάταξη του FSR και του υπό εξέταση χάλυβα αυτή καθαυτή, γνωρίζουμε ότι η δύναμη μπορεί να μετρηθεί με τη στερéωση του συγκροτήματος αισθητήρα δύναμης - μόνιμου μαγνήτη σε ανθεκτικό στήριγμα, επιτρέποντας τον ακριβή έλεγχο της απόστασης μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα που υπόκειται σε δοκιμές, προκειμένου να αποφευχθούν τα φαινόμενα ανύψωσης (lift-off effects). Έτσι, ο αισθητήρας δύναμης που είναι προσαρτημένος στο μαγνήτη μπορεί να ανιχνεύσει τη μαγνητική δύναμη μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό εξέταση. Όλα αυτά υπό την προϋπόθεση ότι η έξοδος του αισθητήρα δύναμης σχετίζεται μονοτονικά με την εντοπισμένη διαπερατότητα του χάλυβα υπό δοκιμή. Στη συνέχεια, η έξοδος συσχετίζεται επίσης με τις εντοπισμένες υπολειμματικές τάσεις του χάλυβα. Το σχήμα του αισθητήριου στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.3.α. Μια παρόμοια διάταξη μπορεί να εφαρμοστεί με την ανάρτηση της διάταξης του αισθητήρα δύναμης - μόνιμου μαγνήτη από την ισχυρή υποστήριξη, διατηρώντας την απόσταση μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του υπό δοκιμή χάλυβα που ελέγχεται (βλ. Σχήμα 5.2.3.β.) Το πλεονέκτημα της διάταξης αισθητήρα του πρώτου σχήματος είναι η σταθερή ανύψωση του συγκροτήματος αισθητήρα δύναμης - μόνιμου μαγνήτη από τον υπό δοκιμή χάλυβα, με το μειονέκτημα της επαφής μεταξύ του αισθητήρα και του χάλυβα υπό δοκιμή. Το πλεονέκτημα της διάταξης του αισθητήρα του δεύτερου σχήματος είναι η χωρίς επαφή παρακολούθηση της δύναμης, με την ανύψωση να είναι ένα πιθανό ζήτημα. Και στους δύο αισθητήρες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.3, ένας αισθητήρας μετατόπισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της θέσης του συγκροτήματος αισθητήρα δύναμης - μόνιμου μαγνήτη και για την παρακολούθηση της κλίσης της δύναμης.

```

1.  /* FSR testing sketch.
2.
3.  Connect one end of FSR to power, the other end to Analog 0.
4.  Then connect one end of a 10K resistor from Analog 0 to ground
5.
6.  For more information see www.ladyada.net/learn/sensors/fsr.html */
7.
8.  int fsrPin = 0;      // the FSR and 10K pulldown are connected to a0
9.  int fsrReading;     // the analog reading from the FSR resistor divider
10. int fsrVoltage;     // the analog reading converted to voltage
11. unsigned long fsrResistance; // The voltage converted to resistance, can be very big
    so make "long"
12. unsigned long fsrConductance;
13. long fsrForce;     // Finally, the resistance converted to force
14.
15. void setup(void) {
16.   Serial.begin(9600); // We'll send debugging information via the Serial monitor
17. }
18.
19. void loop(void) {
20.   fsrReading = analogRead(fsrPin);
21.   Serial.print("Analog reading = ");
22.   Serial.println(fsrReading);
23.
24.   // analog voltage reading ranges from about 0 to 1023 which maps to 0V to 5V (=
    5000mV)
25.   fsrVoltage = map(fsrReading, 0, 1023, 0, 5000);
26.   Serial.print("Voltage reading in mV = ");
27.   Serial.println(fsrVoltage);
28.
29.   if (fsrVoltage == 0) {
30.     Serial.println("No pressure");
31.   } else {
32.     // The voltage = Vcc * R / (R + FSR) where R = 10K and Vcc = 5V
33.     // so FSR = ((Vcc - V) * R) / V      yay math!
34.     fsrResistance = 5000 - fsrVoltage; // fsrVoltage is in millivolts so 5V =
    5000mV
35.     fsrResistance *= 10000;           // 10K resistor
36.     fsrResistance /= fsrVoltage;
37.     Serial.print("FSR resistance in ohms = ");
38.     Serial.println(fsrResistance);
39.
40.     fsrConductance = 1000000;        // we measure in micromhos so
41.     fsrConductance /= fsrResistance;
42.     Serial.print("Conductance in microMhos: ");
43.     Serial.println(fsrConductance);
44.
45.     // Use the two FSR guide graphs to approximate the force
46.     if (fsrConductance <= 1000) {
47.       fsrForce = fsrConductance / 80;
48.       Serial.print("Force in Newtons: ");
49.       Serial.println(fsrForce);
50.     } else {
51.       fsrForce = fsrConductance - 1000;
52.       fsrForce /= 30;
53.       Serial.print("Force in Newtons: ");
54.       Serial.println(fsrForce);
55.     }
56.   }
57.   Serial.println("-----");
58.   delay(1000);
59. }

```

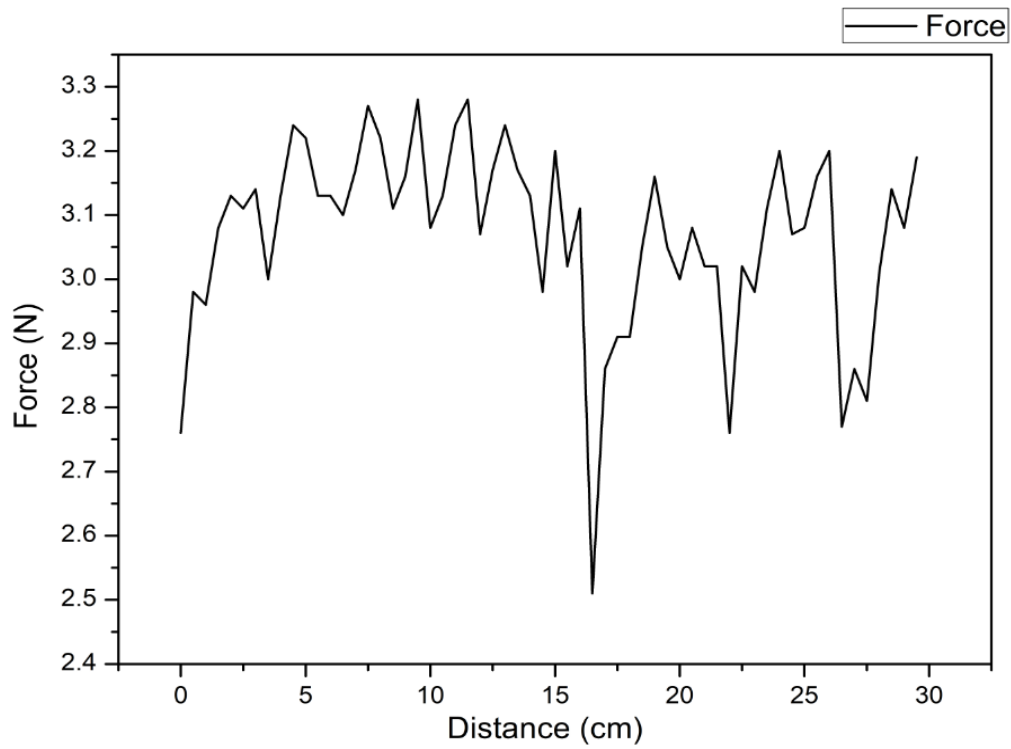
Σχήμα 5.2.2 Κώδικας για Arduino που επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση αντίστασης FSR, αγωγιμότητας, τάσης και δύναμης που λαμβάνει ο αισθητήρας. [24]



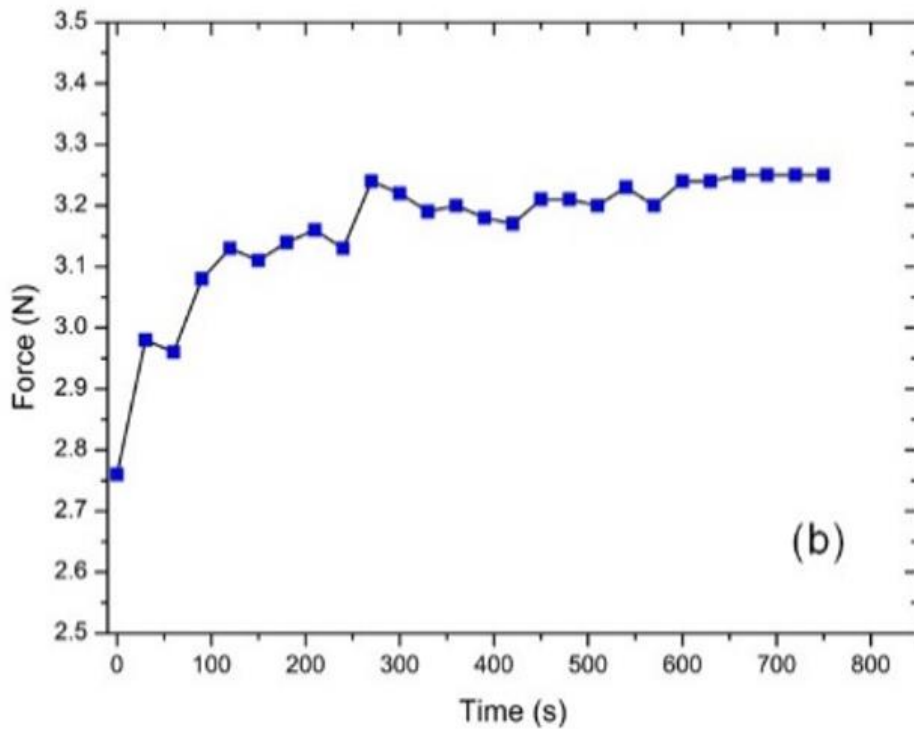
Σχήμα 5.2.3 Το σχήμα του αισθητήρα δύναμης: (α) Ο αισθητήρας δύναμης βρίσκεται μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό δοκιμή. (β) Ο μόνιμος μαγνήτης βρίσκεται μεταξύ του αισθητήρα δύναμης και του χάλυβα υπό δοκιμή. [26]

Ακολούθησαν μετρήσεις σε δοκίμια χάλυβα διαθέσιμα στο εργαστήριο για την διαπίστωση και εξακρίβωση της λειτουργίας του αισθητήρα με βάση την αναμενόμενη απόκριση από τη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, όταν ο αισθητήρας χρησιμοποιήθηκε για τη σάρωση της επιφάνειας ενός μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα ο οποίος, με βάση τον μαγνητικό και δομικό χαρακτηρισμό του υλικού, ενώ αναμενόταν να δώσει μια μάλλον ομοιογενή απόκριση, η απόκριση του αισθητήρα δύναμης απέιχε πολύ από τα αναμενόμενα αποτελέσματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.4. Αυτό αποδεικνύει ότι η σταθερότητα στις μετρήσεις του αισθητήρα δύναμης δεν είναι στα επιθυμητά επίπεδα.

Ακόμα λόγω της σχετικά μικρής εμβέλειας δύναμης του αισθητήρα FSR και έπειτα από μοντελοποίηση του πειράματος με το πρόγραμμα ANSYS, η απόσταση μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό δοκιμή αυξήθηκε σκόπιμα χρησιμοποιώντας κεραμικό ορθογώνιο τεμάχιο ανάμεσά τους, για να μειωθεί η δύναμη που ασκείται μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα. Ωστόσο, η απόκριση χρόνου του FSR, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.5., είναι της τάξης αρκετών εκατοντάδων δευτερολέπτων, καθιστώντας έτσι τη χρήση του αισθητήρα μη πρακτική για γρήγορες μετρήσεις.



Σχήμα 5.2.4 Επιφανειακή σάρωση ενός μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα που αποδεικνύει την αστάθεια του αισθητήρα δύναμης. [26]



Σχήμα 5.2.5 Η χρονική απόκριση του FSR. [26]

Συμπερασματικά, λόγω των δύο παραπάνω λόγων (της έλλειψης σταθερότητας και της υστέρησης στην απόκριση του FSR υπήρξε επιτακτική η ανάγκη για εξέταση εναλλακτικών λύσεων ως προς τον αισθητήρα για τη συνέχιση της εργασίας. Άλλοι τύποι παρόμοιων αισθητήρων δύναμης, όπως οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, δεν εφαρμόστηκαν για παρόμοιους λόγους: η χρονική απόκριση δεν επιτρέπει μια ταχεία διαδικασία παρακολούθησης. Στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η λύση που βρέθηκε στο πρόβλημα καθώς και το πώς ξεπεράστηκαν τα προβλήματα που προέκυψαν με τη χρήση του FSR και έπρεπε να εξαλειφθούν.

6

Διάταξη και Πειραματική Διαδικασία Νέου Αισθητήρα Ανίχνευσης Δύναμης που Βασίζεται στην Τεχνική MDL

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων και ελλείψεων και την παροχή μιας απόδειξης αρχής για την προτεινόμενη μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου με βάση τη μαγνητική δύναμη, ο εμπορικά διαθέσιμος αισθητήρας FSR αντικαταστάθηκε από έναν άλλο τύπο ανίχνευσης μαγνητικής δύναμης: τις μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστερήσεις (MDL) [19]. Η τεχνική MDL επιλέχθηκε για την εφαρμογή του νέου αισθητήρα ανίχνευσης δύναμης, λόγω της εξειδίκευσης του Εργαστηρίου στην τεχνική αυτή.

6.1 Η Διάταξη του Αισθητήρα Δύναμης MDL

Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής MDL βασίζεται στη χρήση ενός πηνίου διέγερσης που είναι σταθερό σε δεδομένο όγκο γύρω από μια μαγνητοσυστολική ταινία με ομοιόμορφη διατομή, η οποία λειτουργεί ως ακουστικός κυματοδηγός. Το παλμικό ρεύμα μεταδίδεται μέσω του πηνίου διέγερσης και συνεπώς παράγεται ένα παλμικό μαγνητικό πεδίο κατά μήκος του MDL σε όγκο περίπου ίσο με τον όγκο του MDL, που περικλείεται από το πηνίο διέγερσης. Κατά συνέπεια δημιουργείται μια παλμική μικροτάση λόγω της επίδρασης της μαγνητοσυστολής εντός αυτού του όγκου. Η μικροτάση αυτή διαδίδεται και στις δύο κατευθύνσεις του MDL ως κύμα Lamb.

Καθώς η τάση λόγω του παλμού διαδίδεται εντός του όγκου του MDL, προκαλεί μεταβολές της παλμικής μαγνητικής ροής μέσα σε αυτό, λόγω του αντιστρόφου της μαγνητοσυστολής. Ένα πηνίο λήψης τοποθετημένο σε απόσταση αρκετά μεγάλη από το πηνίο διέγερσης, για να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ της διέγερσης και του σήματος ανίχνευσης, μπορεί να ανιχνεύσει τη διαδιδόμενη παλμική μικροτάση με τη μορφή της παλμικής τάσης εξόδου, ανάλογη προς την πρώτη παράγωγο της μεταβολής της μαγνητικής ροής εντός του όγκου του πηνίου λήψης.

Πρακτικά, η απόσταση μεταξύ της διέγερσης και του πηνίου λήψης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη χρονική διάρκεια t της παλμικής τάσης εξόδου πολλαπλασιασμένης με τη ταχύτητα ήχου u του MDL. Λαμβάνοντας υπόψη ότι t και u είναι 14 μ s και 5km/s αντίστοιχα, η απόσταση μεταξύ της διέγερσης και του πηνίου λήψης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 70mm. Το πλάτος κορυφής της εξόδου παλμικής τάσης, V_o , χρησιμοποιείται ως έξοδος του MDL.

Δύο τύποι αισθητήρων δύναμης MDL έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν. Συγκεκριμένα, ένας αισθητήρας δύναμης που βασίζεται στην παραμόρφωση της διαδιδόμενης μικροτάσης και την επακόλουθη μείωση της τάσης εξόδου V_o από τη δύναμη που ασκείται στο MDL μεταξύ των πηνίων διέγερσης και λήψης [19] και ένας ψηφιοποιητής δυνάμεων βασισμένο στην ακουστική ανάκλαση που παράγεται μέσα στο MDL όταν η δύναμη εφαρμόζεται σε ένα σημείο του MDL έξω από τους όγκους που περικλείονται από τα πηνία διέγερσης και λήψης [20]. Σημειώνεται ότι η απόκριση και των δύο αισθητήρων είναι εκθετική σε σχέση με την εφαρμοζόμενη δύναμη. Οι αισθητήρες δύναμης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία για να παρακολουθήσουν τη δύναμη που εξαρτάται από το υπολειπόμενη τάση και, κατά συνέπεια, τη διαπερατότητα, βασίζονται σε αυτά τα δύο σχέδια MDL.

Ο αισθητήρας επιφανειακής διαπερατότητας βασιζόμενος στις μετρήσεις δυνάμεως και η αρχή του ψηφιοποιητή δύναμης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.

Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη, ως βάση του αισθητήρα τοποθετείται μια πλάκα αλουμινίου, η οποία μπορεί να έρχεται σε επαφή με τον υπό δοκιμή χάλυβα, ώστε να παρέχεται η απαραίτητη απόσταση μεταξύ αυτού και του μόνιμου μαγνήτη, σύμφωνα με το εύρος της δύναμης του MDL.

Μετά από πειραματικές δοκιμές με διαφορετικά πάχη της μη μαγνητικής πλάκας, εξήχθη το συμπέρασμα ότι 3-5 mm πάχους αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε για μια διατομή διαμέτρου 5x5 mm² του μόνιμου μαγνήτη και χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα πάχους ~1mm, είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δυνάμεων μεταξύ μαγνήτη και χάλυβα εντός της περιοχής των δύο αισθητήρων, δηλαδή ~5-10 N.

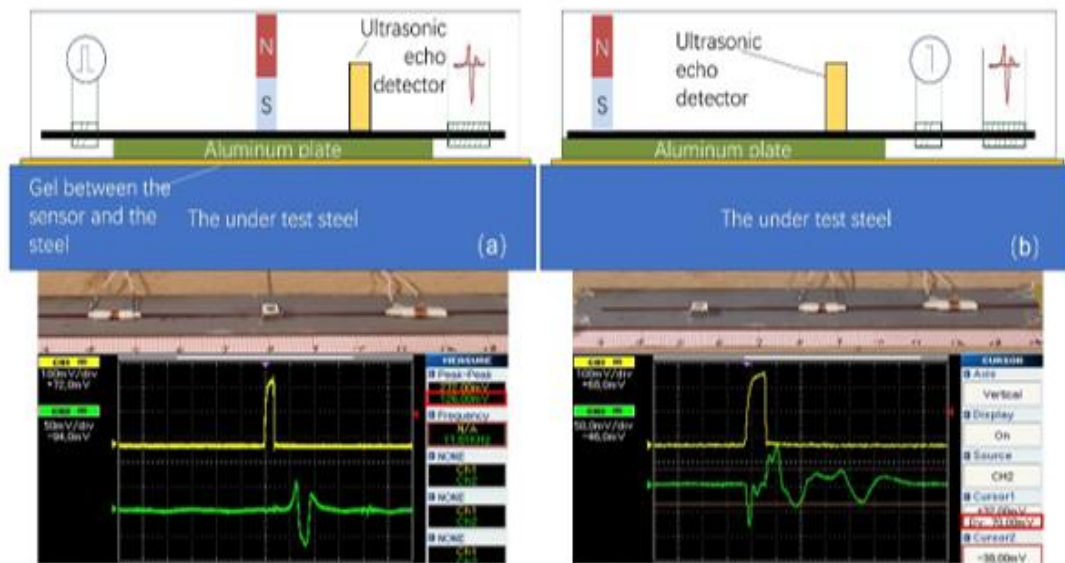
Μια άμορφη μαγνητοσυστολική ταινία $Fe_{78}Si_7B_{15}$ είναι κολλημένη από τη μία πλευρά με ακρυλική κόλλα στην πλάκα αλουμινίου, που χρησιμεύει ως MDL, καθώς η μονόπλευρη κόλληση του MDL επιτρέπει τη διάδοση της ελαστικής μικροτάσης. Για πρακτικούς, ενδεικτικούς και όχι αποκλειστικούς λόγους, το πλάτος, το μήκος και το πάχος της ταινίας είναι 6mm, 100mm και 25μm αντίστοιχα. Πάνω στην ταινία ένας μόνιμος μαγνήτης Nd-Fe μήκους 10mm ορθογωνικής διατομής $5 \times 5 \text{ mm}^2$ κολλάται με ακρυλική κόλλα στη μέση της άμορφης ταινίας, σχηματίζοντας έτσι τον αισθητήρα δύναμης (Σχήμα 6.1.1.α) ή στο ένα άκρο του, σχηματίζοντας τον ψηφιοποιητή δύναμης (Σχήμα 6.1.1.β).

Και στα δύο αισθητήρια στοιχεία, το πηνίο διέγερσης μήκους 0,5mm, κατασκευασμένο από 10 περιελίξεις εμαγιέ σύρματος Cu διαμέτρου 0,2mm, τοποθετείται στο ένα ελεύθερο άκρο της ταινίας. Στην περίπτωση του αισθητήρα δύναμης (Σχήμα 6.1.1.α), το πηνίο λήψης των 300 περιελίξεων και 2mm μήκους κατασκευασμένο από εμαγιέ σύρμα Cu διαμέτρου 0,05mm τοποθετείται στο άλλο άκρο της ταινίας, ενώ στην περίπτωση του ψηφιοποιητή δύναμης (Σχήμα 6.1.1.β), τοποθετείται σε απόσταση 30mm από το μόνιμο μαγνήτη ή 70mm από το πηνίο διέγερσης. Και στους δύο αισθητήρες, το στοιχείο ανίχνευσης είναι μια ενιαία κατασκευή μόνιμου μαγνήτη-ταινίας-αλουμινίου.

Πριν από τη λειτουργία του αισθητήρα, ένα παλμικό ρεύμα μιας προκαθορισμένης τιμής διαδίδεται στο πηνίο διέγερσης και η μέγιστη τάση εξόδου V_o για τους δύο αισθητήρες παρακολουθείται ως τιμή αναφοράς.

Καθώς το αισθητήριο συνδέεται με την επιφάνεια του υπό εξέταση χάλυβα, το ηλεκτρονικό κύκλωμα αρχίζει να καταγράφει την έξοδο τάσης που αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό δοκιμή. Για την περίπτωση του αισθητήρα δύναμης (Σχήμα 6.1.1.α), η τάση εξόδου από κορυφή σε κορυφή V_o μειώνεται με την εφαρμοζόμενη δύναμη ή με την εντοπισμένη διαπερατότητα του υπό εξέταση χάλυβα, επειδή οι ελαστικές ανακλάσεις που δημιουργούνται στην περιοχή της εξασκούμενης δύναμης, οδηγούν σε μείωση του ελαστικού κύματος που συλλέγεται από το πηνίο λήψης, η οποία είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης. Για την περίπτωση του ψηφιοποιητή δύναμης (Σχήμα 6.1.1.β), η κορυφή της τάσης εξόδου V_o στο σημείο ανακλάσεως που αντιστοιχεί στη

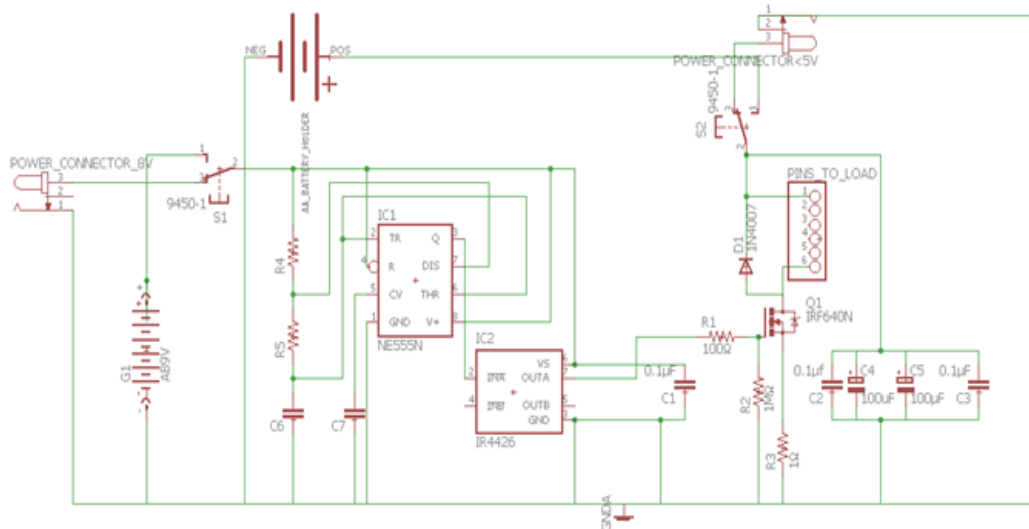
θέση του μόνιμου μαγνήτη αυξάνει με την εφαρμοζόμενη δύναμη στον υπό εξέταση χάλυβα ή με την εντοπισμένη διαπερατότητα του υπό εξέταση χάλυβα.



Σχήμα 6.1.1 Ο αισθητήρας δύναμης-διαπερατότητας που βασίζεται στην αρχή των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης (MDL): (α) ο αισθητήρας δύναμης παρακολουθεί τις μεταβολές της διαπερατότητας ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται, που παρατηρούνται από τη μείωση της V_o με την ασκούμενη δύναμη. (β) ο αισθητήρας παρακολουθεί τις μεταβολές της διαπερατότητας ως αποτέλεσμα των ανακλάσεων που δημιουργούνται στον όγκο όπου ο μόνιμος μαγνήτης πιέζει το MDL, που παρατηρούνται από τη V_o του δεύτερου ανιχνευόμενου παλμού, που αντιστοιχεί στην ανάκλαση που αναφέρθηκε παραπάνω. [26]

6.2 Το Κύκλωμα Διέγερσης και Ανίχνευσης

Το κύκλωμα διέγερσης και ανίχνευσης των διαδιδόμενων παλμών μικροτάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.1 (σηματικά). Είναι φορητό, υπό την έννοια ότι ο έλεγχος του παλμού διέγερσης (control) γίνεται από ταλαντωτή σε μορφή ολοκληρωμένου και απαιτεί μόνο DC τροφοδοσία χαμηλής τάσης $\leq 9V$ που μπορεί να παρέχεται και μέσω μπαταρίας. Το κύκλωμα αποτελείται από δύο μέρη, το πρώτο μέρος είναι το κύκλωμα ελέγχου (control circuit) και το δεύτερο είναι το διακοπτικό κύκλωμα (switching circuit).

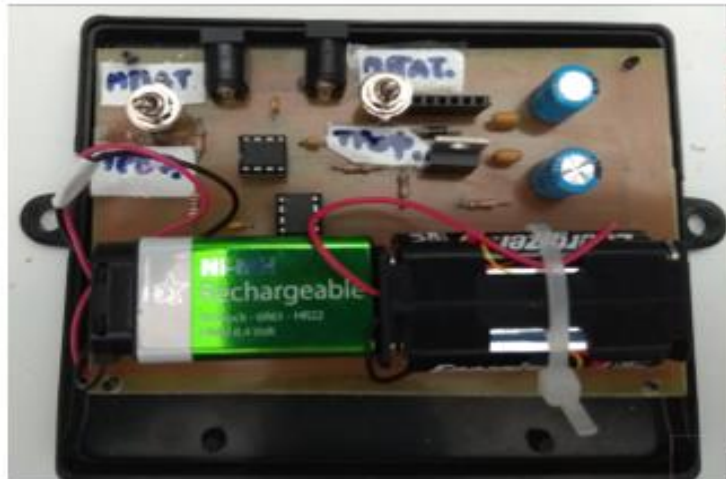


Σχήμα 6.2.1 Σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος διέγερσης-ανίχνευσης [27]

Ο πυρήνας του κυκλώματος ελέγχου είναι το ολοκληρωμένο NE555 που λειτουργεί ως ταλαντωτής με συγκεκριμένο κύκλο λειτουργίας (duty cycle) και συχνότητα που ορίζονται από τα στοιχεία R4, R5 και C6. Η έξοδός του είναι συνδεδεμένη με την είσοδο του IR4426, ενός low side MOSFET driver, που όπως μαρτυρά το όνομά του οδηγεί το τρανζίστορ. Το διακοπτικό κύκλωμα αποτελείται από: το IRF640N σε λειτουργία διακόπτη, με τις αντιστάσεις πύλης του (R1, R2), το φορτίο στην πλευρά της τροφοδοσίας παράλληλο με δίοδο (επάνω), και μια αντίσταση αναφοράς (R3) προς τη γείωση (κάτω). Τέλος, παράλληλα σε όλο τον κλάδο υπάρχει μια συστοιχία πυκνωτών (C2, C3, C4, C5). Η τάση τροφοδοσίας του κυκλώματος ελέγχου είναι $\leq 9V$ και η τροφοδοσία του διακοπτικού κυκλώματος είναι $\leq 5V$. Τέλος, στο σχέδιο υπάρχουν δυο διακόπτες οι οποίοι επιτρέπουν την επιλογή τροφοδοσίας από μπαταρία ή από εργαστηριακό τροφοδοτικό.

Ουσιαστικά, το κύκλωμα διέγερσης είναι ένα υψηλού εύρους ζώνης MOSFET ισχύος, ικανό να παρέχει παλμικό ρεύμα από 0,1A έως 30A, με διάρκεια 1-2 μs και 1ms περίοδο. Το πραγματικό εύρος ρεύματος είναι σταθερό στα 8A, αρκετό για να παράγει παλμική τάση εξόδου V_o , της τάξης των 100mV στην έξοδο του πηνίου λήψης. Το σήμα εξόδου του πηνίου λήψης οδηγείται σε τελεστικό ενισχυτή κέρδους από 400-1000 και έπειτα σε έναν peak holder buffer, οδηγούμενο σε ψηφιοποιητή

στα 12bit, με το ρολόι στα 30kHz. Η πλακέτα με τα ηλεκτρονικά που δημιουργήθηκε σύμφωνα με το σχέδιο του Σχήματος 6.2.1, φαίνεται στο Σχήμα 6.2.2. [27]



Σχήμα 6.2.2 Πλακέτα κυκλώματος διέγερσης-ανίχνευσης [27]

6.3 Μέθοδος Προσδιορισμού της Εξάρτησης του Αισθητήρα από τη Διαπερατότητα του υπό Εξέταση Χάλυβα

Προηγούμενες εργασίες πάνω στο θέμα έχουν ήδη δείξει ότι η παρακολούθηση της εντοπισμένης τάσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παρακολούθησης της εντοπισμένης διαπερατότητας του χάλυβα υπό δοκιμή [17,21,22]. Σε αυτή την εργασία, φαίνεται ότι αντί ενός αισθητήρα διαπερατότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας δύναμης για την αποφυγή των μειονεκτημάτων ενός αισθητήρα διαπερατότητας τύπου Yoke που θα ήταν μια κατάλληλη λύση για βιομηχανική χρήση.

Η απόκριση των αισθητήριων στοιχείων των Σχημάτων 6.1.1.α και 6.1.1.1.b οφείλεται στη δύναμη που ασκείται από τον μόνιμο μαγνήτη στο MDL. Η δύναμη, και συνεπώς η κορυφή της τάσης εξόδου, εξαρτάται από την εντοπισμένη διαπερατότητα του χάλυβα υπό δοκιμή. Ως εκ τούτου, είναι προτιμότερη η βαθμονόμηση του αισθητήρα απευθείας με τη διαπερατότητα του υπό εξέταση χάλυβα.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μέθοδος προσδιορισμού της εξάρτησης του αισθητήρα από τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα, έχοντας ρυθμίσει

χειροκίνητα την ανύψωση του αισθητήρα. Έχουν δοκιμαστεί τρεις διαφορετικοί τύποι χάλυβα, δηλαδή προσανατολισμένος χάλυβας με πάχος 0,35mm (OES), μη προσανατολισμένος χάλυβας πάχους 0,25mm (NOES) και χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα πάχους 0,5mm (LCS). Ο σχεδιασμός του αισθητήρα επιτρέπει την ίδια εξάρτηση από τη διαπερατότητα για διάφορους τύπους χαλύβων, υπό την προϋπόθεση ότι η εντοπισμένη διαπερατότητα και το πάχος τους θεωρείται ότι είναι ταυτόσημα μεγέθη.

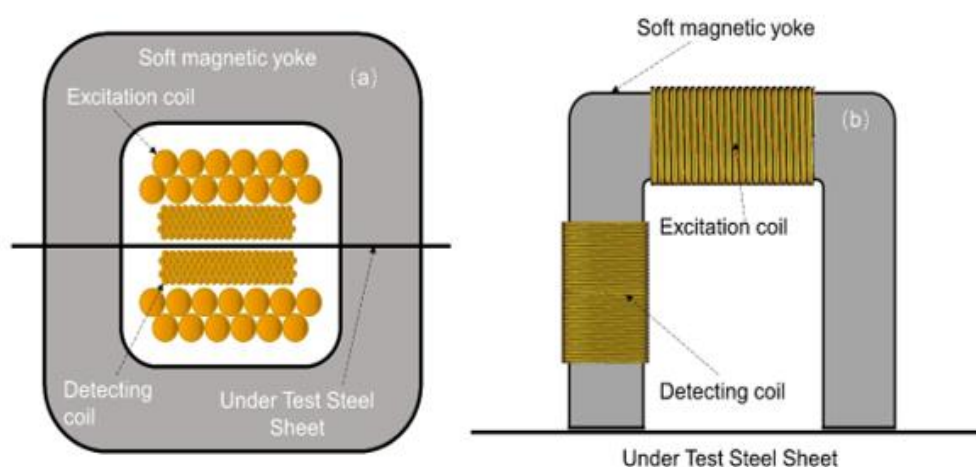
Η βαθμονόμηση του αισθητήρα σε σχέση με τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα διεξήχθη με τον ακόλουθο τρόπο:

1. Προσδιορισμός της εξάρτησης της διαπερατότητας από το πεδίο του υπό δοκιμή χάλυβα με χρήση πρωτεύοντος προτύπου.
2. Βαθμονόμηση ενός προτύπου μεταφοράς
3. Βαθμονόμηση της εξάρτησης αισθητήρα από τη διαπερατότητα χρησιμοποιώντας ένα δευτερεύον πρότυπο μεταφοράς.

Αναλυτικότερα, αρχικά, ο προσδιορισμός της διαπερατότητας του υπό δοκιμή χάλυβα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πρωτεύον πρότυπο που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο [23]. Η συσκευή βασίζεται στην τυποποιημένη ρύθμιση ενός φύλλου (single sheet tester). Αποτελείται από δύο συζευγμένα πηνία (πρωτεύον και δευτερεύον) που περιβάλλουν τον υπό εξέταση χάλυβα και ένα ζεύγος συμμετρικών μαλακών μαγνητικών yokes (τμημάτων ηλεκτρικού χάλυβα σε σχήμα «Π») συνδεδεμένων σε κάθε πλευρά του υπό δοκιμή χάλυβα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.1.α.

Για την διέγερση χρησιμοποιήθηκε το εξωτερικό πηνίο με 100 περιελίξεις, μήκους 100mm, κατασκευασμένο από εμαγιέ σύρμα χαλκού διαμέτρου 1mm, ενώ το εσωτερικό με 2000 περιελίξεις, μήκους 70mm, κατασκευασμένο από εμαγιέ σύρμα χαλκού διαμέτρου 0.1mm, χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση της τάσης εξόδου και την παρακολούθηση. Το ζεύγος μαλακών μαγνητικών yokes χρησιμοποιήθηκε για να παράσχει ένα κλειστό μαγνητικό βρόχο σύμφωνα με την τυπική διαδικασία δοκιμής ενός φύλλου υλικού. Η διαπερατότητα προσδιορίστηκε παρακολουθώντας την τάση εξόδου από κορυφή σε κορυφή του δευτερεύοντος πηνίου του Σχήματος 6.3.1.α.

Μετά τον προσδιορισμό της διαπερατότητας του υπό εξέταση χάλυβα από το single sheet tester πρότυπο, ένα τυποποιημένο όργανο μεταφοράς (Σχήμα 6.3.1.β) βαθμονομήθηκε έναντι της διαπερατότητας των υπό δοκιμή χαλύβων, δηλαδή για τον προσδιορισμό της ποσότητας ρεύματος που απαιτείται να δοθεί στο πηνίο διέγερσης για τη δημιουργία του απαιτούμενου πεδίου. Το όργανο αυτό αποτελείται από ένα yoke με πηνίο μήκους 50mm, κατασκευασμένο από 100 περιελίξεις σύρματος χαλκού διαμέτρου 1mm και από ένα πηνίο λήψης μήκους 50mm, κατασκευασμένο από 1000 περιελίξεις σύρματος χαλκού διαμέτρου 0.1mm.



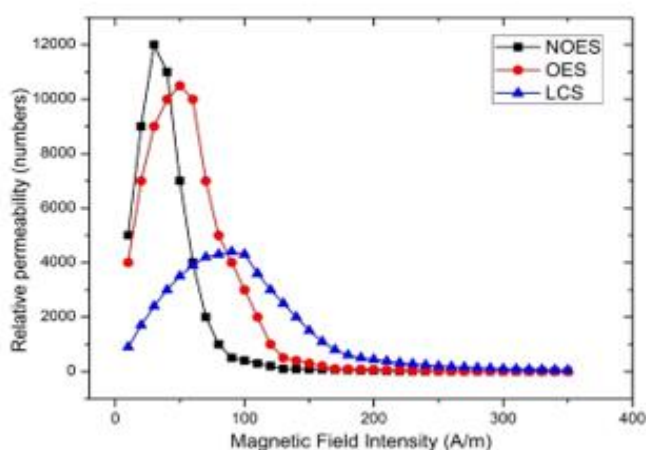
Σχήμα 6.3.1 Οι διατάξεις μέτρησης διαπερατότητας: (α) το βασικό αισθητήριο διαπερατότητας με βάση την πρότυπη μέθοδο ενός φύλλου. (β) το δευτερεύον πρότυπο βασιζόμενο σε διάταξη με yoke που μαγνητίζει την επιφάνεια του χάλυβα υπό δοκιμή. [26]

Και οι δύο διατάξεις οργάνων χρησιμοποίησαν το ίδιο κύκλωμα διέγερσης και ανίχνευσης. Ένας ενισχυτής ρεύματος από τον εξοπλισμό χρησιμοποιήθηκε για να παράγει το ημιτονοειδές ή τριγωνικό ρεύμα διέγερσης με συχνότητα από 0,1Hz έως 1Hz και ρεύμα από 0,1A έως 30A, με ελάχιστο βήμα ρεύματος 0,1A. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκε συχνότητα 0,1Hz προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα δινορρευμάτων και να παρακολουθηθεί η εσωτερική διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα, ενώ το πλάτος του ρεύματος άλλαζε από 0,1A σε 15A με βήμα 0,1A για τη μέτρηση του βρόχου διαπερατότητας. Το κύκλωμα ανίχνευσης τάσης βασίστηκε σε ενισχυτή εύρους ζώνης υψηλής συχνότητας με κέρδος 400, έναν ακολουθητή και έναν ψηφιακό παλμογράφο Agilent με εύρους ζώνης 1GHz. Δεν

χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής lock-in λόγω της χαμηλής συχνότητας διέγερσης, με αποτέλεσμα να υπάρχει αμελητέο σφάλμα φάσης.

Με τον τρόπο αυτό, η εξάρτηση της εξόδου από κορυφή σε κορυφή από τα πηνία λήψης, που είναι ανάλογη της παραγώγου της μαγνητικής διαπερατότητας του χάλυβα για το διαδιδόμενο ρεύμα, ως συνάρτηση του πεδίου διέγερσης H , παρείχε την εξάρτηση $\mu(H)$. Αντί για τον υπολογισμό της απόκρισης της διαπερατότητας, η έξοδος τάσης συγκρίθηκε με τις τιμές διαπερατότητας ενός 0.25 NOES με γνωστή εξάρτηση διαπερατότητας ακολουθώντας την κλασική μέθοδο τυπικής μεταφοράς.

Τα τρία δοκίμια χάλυβα μετρήθηκαν αρχικά με τον αισθητήρα ενός φύλλου υλικού. Έπειτα, μετρήθηκαν με το πρότυπο μεταφοράς. Και στις δύο περιπτώσεις, τα αποτελέσματα ήταν ίδια, με αβεβαιότητα μέτρησης της τάξης του 0,01% για τον πρώτο αισθητήρα και μικρότερη από 0,1% για το πρότυπο μεταφοράς (Σχήμα 6.3.2).

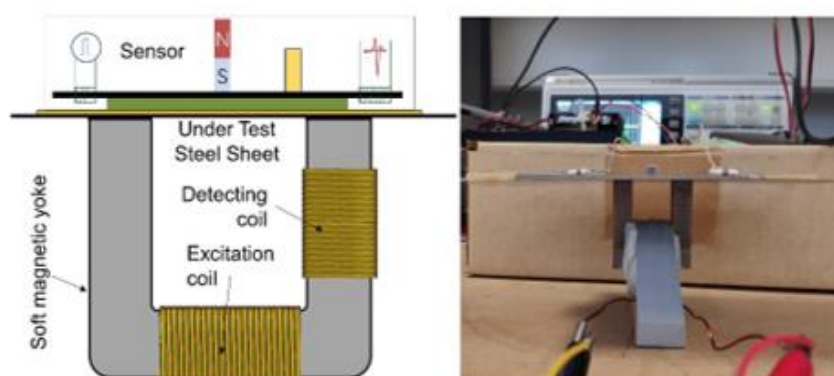


Σχήμα 6.3.2 Η εξάρτηση διαπερατότητας από τρία φύλλα χάλυβα στο πεδίο διέγερσης. [26]

Μετά τη βαθμονόμηση του οργάνου μεταφοράς, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση των αισθητήρων, προσδιορίζοντας την εξάρτηση του πλάτους κορυφής της τάσης εξόδου V_o , επί της διαπερατότητας του χαλύβδινου φύλλου υπό δοκιμή, που ελέγχεται από το ρεύμα διέγερσης με το πρότυπο μεταφοράς. Μια σχηματική απεικόνιση αυτής της διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3.3. Το όργανο μεταφοράς, δηλαδή το yoke σχήματος «Π», τοποθετήθηκε στη μία πλευρά του υπό δοκιμή χάλυβα, ενώ ο αισθητήρας δύναμης στην άλλη. Το ρεύμα διέγερσης συχνότητας 0,1Hz στο πηνίο διέγερσης του yoke κυμαίνεται από 0,1-15 A, με βήμα

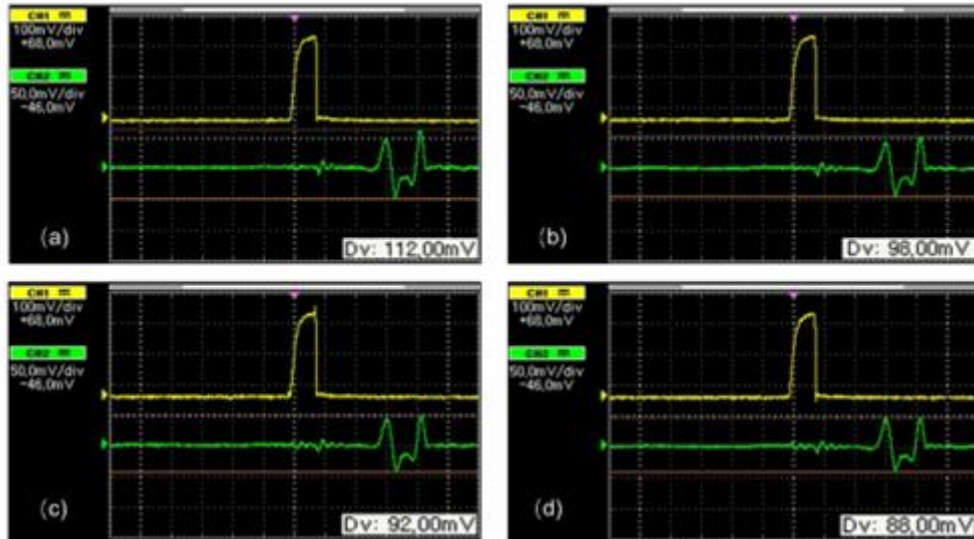
0,1A, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται διαφορετικές τιμές διαπερατότητας, που προσδιορίζονται από το πηνίο ανίχνευσης και συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς που λαμβάνονται κατά την διάρκεια του σταδίου βαθμονόμησης.

Οι τιμές διαπερατότητας, όπως μετρήθηκαν από το πηνίο ανίχνευσης του οργάνου μεταφοράς, χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στον αισθητήρα δύναμης, ενώ η μέγιστη τάση εξόδου του πηνίου λήψης του αισθητήρα δύναμης, V_o , ήταν η έξοδος του.



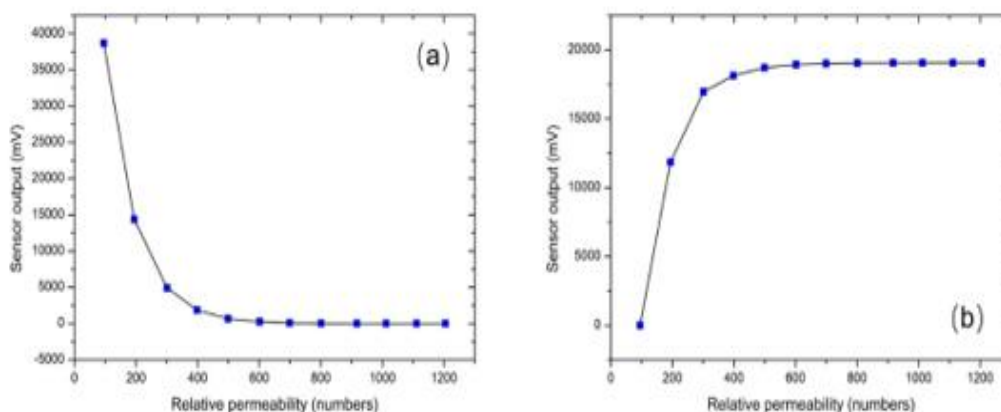
Σχήμα 6.3.3 Το σχηματικό και η φωτογραφία της βαθμονόμησης των αισθητήρων σε σχέση με τη διαπερατότητα του χάλυβα υπό δοκιμή, που καθορίζεται από το ρεύμα που μεταδίδεται στο πηνίο διέγερσης και παρακολουθείται από το δευτερεύον πηνίο του yoke. [26]

Το Σχήμα 6.3.4 δείχνει την απόκριση του αισθητήρα σε σχέση με τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα για διάφορα επίπεδα τάσης διέγερσης. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τον μόνιμο μαγνήτη θεωρείται ως αντιστάθμιση.



Σχήμα 6.3.4 Η απόκριση του αισθητήρα του Σχήματος 6.1.1.α σε σχέση με τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα, για διάφορες εισόδους τάσης στο γκοκέ: α) 1 V, (b) 5V, (c) 8V, (d) 10v. [26]

Το Σχήμα 6.3.5 απεικονίζει την απόκριση του αισθητήρα δύναμης που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.α επί της διαπερατότητας των τριών υπό δοκιμή φύλλων. Η απόκριση του αισθητήρα δύναμης σε σχέση με την παρακολουθούμενη διαπερατότητα από τα τρία δοκίμια χάλυβα ήταν ίδια, με αβεβαιότητα 1%. Ομοίως, η απόκριση του αισθητήρα δύναμης που απεικονίζεται στην εικόνα 6.1.1.β απεικονίζεται στην εικόνα 6.3.5.β και για τους τρεις διαφορετικούς τύπους χάλυβα υπό εξέταση. Και πάλι, η απόκριση όλων των χαλύβων ήταν πανομοιότυπη, με αβεβαιότητα 0,5%.



Σχήμα 6.3.5 Η απόκριση του αισθητήρα δύναμης με βάση την τεχνική MDL και για τα τρία δείγματα: (α) η απόκριση του αισθητήρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.α, (β) η απόκριση του αισθητήρα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.1.β. [26]

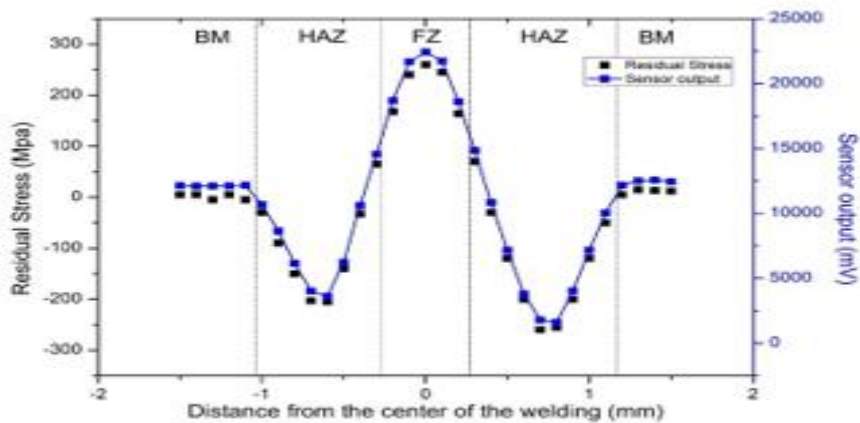
Ωστόσο, η συσχέτιση της διαπερατότητας κάθε χάλυβα δεν είναι η ίδια για τον προσδιορισμό της τάσης, αλλά εξαρτάται από την ειδική καμπύλη βαθμονόμησης μαγνητικής τάσης (MASC) [17]. Η υστέρηση του αισθητήρα δύναμης ήταν αμελητέα όπως αναμενόταν, λόγω της αμελητέας υστέρησης του MSE και του ψηφιοποιητή δύναμης.

Μετά τη βαθμονόμηση της εξάρτησης του αισθητήρα δύναμης σε σχέση με τη διαπερατότητα κάθε δείγματος, η διαδικασία παρακολούθησης τάσεων χρησιμοποιώντας την τεχνική MASC πραγματοποιήθηκε σε φύλλα χάλυβα με τάσεις. Οι τιμές της διαπερατότητας συσχετίζονται με τις υπολειμματικές τάσεις σε δεδομένες περιοχές της επιφάνειας των μη προσανατολισμένων ηλεκτρικών χαλύβων (NOES) και συγκολλημένων δοκιμών AISI 1008, χρησιμοποιώντας τις καμπύλες MASC κάθε υλικού. Η κατανομή τάσεων σε αυτά τα δοκίμια έγινε με αυτογενή συγκόλληση με τη χρήση είτε μεθόδου συγκόλλησης Plasma είτε TIG ή επαγωγικής θέρμανσης, προκειμένου να μην προστεθεί νέο υλικό σε αυτές. Το εύρος τάσεων για το κάθε υλικό, που αφορά τη ζώνη σύντηξης (FZ), τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα (HAZ) και το υλικό βάσης (BM), είναι γνωστό από προηγούμενες μετρήσεις. Οι δοκιμές XRD-BB (X-Ray Diffraction Bragg-Brentano) εκτελούνται επιλεκτικά σε δεδομένα σημεία των δοκιμών κατά μήκος της συγκόλλησης, επικυρώνοντας τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μέσω μετρήσεων διαπερατότητας [17].

Σε αυτή την εργασία, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για αυτές τις μετρήσεις ήταν η ακόλουθη: πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις διαπερατότητας από τον αισθητήρα του Σχήματος 6.1.1.α στα σημεία όπου είχαν διεξαχθεί οι μετρήσεις τάσης με XRD-BB. Ο αισθητήρας μετακινήθηκε με το χέρι στην αρχή του δοκιμίου χάλυβα, γνωρίζοντας τη θέση του μέσου του αισθητήρα με αβεβαιότητα $\pm 0,1\text{mm}$. Μία τυπική εξάρτηση της απόκρισης του αισθητήρα δύναμης του Σχήματος 6.1.1.α και της τάσης στα ίδια σημεία κατά μήκος της συγκόλλησης απεικονίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 6.3.6 για το δοκίμιο AISI 1008. Η συμφωνία μεταξύ της μαγνητικής

διαπερατότητας και της τάσης είναι εμφανής. Η απόκλιση από τις μέσες τιμές έδωσε αβεβαιότητα της τάξης του 2% με επίπεδο εμπιστοσύνης 95,6%. Αυτά τα αποτελέσματα επιτρέπουν τη χρήση του αισθητήρα δύναμης σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Ακολούθως, μελετήθηκε η επίδραση του περιβάλλοντος μαγνητικού πεδίου: χρησιμοποιήθηκαν ράβδοι ηλεκτρομαγνήτη από μαλακό σίδηρο για την εφαρμογή μαγνητικού πεδίου έως 100 μΤ κοντά στο αισθητήριο στοιχείο σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις. Οι αλλαγές στην έξοδο του αισθητήρα δεν ανιχνεύθηκαν από τον αισθητήρα και τον ψηφιοποιητή. Αυτό, όπως αναφέρθηκε ήδη, μπορεί να αποδοθεί στην δύναμη του μαγνητικού πεδίου από τον μόνιμο μαγνήτη και στη μικρή απόσταση μεταξύ του μόνιμου μαγνήτη και του χάλυβα υπό εξέταση.



Σχήμα 6.3.6 Μια τυπική εξάρτηση των τάσεων ενός συγκολλημένου χάλυβα και της διαπερατότητας κατά μήκος της συγκόλλησης. Η συμφωνία μεταξύ κατανομής τάσεων και διαπερατότητας είναι προφανής. [26]

Η επαναληψιμότητα της απόκρισης του αισθητήρα οφείλεται κυρίως στην αμελητέα υστέρηση των αισθητήρων: η μέτρηση σε κάθε σημείο δεν αλλάζει όταν ο αισθητήρας μετακινείται εμπρός και πίσω. Εκτός αυτού, η σχετικά μεγάλου πάχους πλάκα αλουμινίου δεν επιτρέπει μεταβολές στις κλίσεις του αισθητήρα ώστε να αλλάξει η διείσδυση της μαγνητικής ροής στον χάλυβα, διατηρώντας έτσι την ασκούμενη δύναμη μεταξύ των δύο μαγνητικών υλικών.

Η απόκριση χρόνου του αισθητήρα εξαρτάται ουσιαστικά από την περίοδο του παλμικού ρεύματος διέγερσης που μεταδίδεται στο πηνίο διέγερσης, συν τον χρόνο

που απαιτείται για τη σταθεροποίηση της ροής εντός του χάλυβα υπό δοκιμή και τον χρόνο που απαιτείται για την προετοιμασία και τη μετάδοση του σήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η περίοδος του παλμικού ρεύματος είναι 1ms και το γεγονός ότι ο χρόνος για τη σταθεροποίηση της ροής και την επεξεργασία και τη μετάδοση σήματος είναι πολύ μικρότερος από άλλο ένα 1ms, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο χρόνος απόκρισης είναι της τάξης των 4ms.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το μέγεθος του στοιχείου ανίχνευσης είναι της τάξεως των $5 \times 5 \text{ mm}^2$, ο αισθητήρας μπορεί να παρακολουθεί την τάση κάθε 4mm, με κάθε μέτρηση να διαρκεί 4ms. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ταχύτητα παρακολούθησης τάσεων μπορεί να φθάσει τα $4/4 \text{ mm/ms}$ ή 1 m/s , η οποία θεωρείται ότι είναι μια γρήγορη μέτρηση. Η μεγέθυνση ή η μείωση της διατομής του μόνιμου μαγνήτη αλλάζει την ταχύτητα παρακολούθησης τάσεων: Η μείωση της διατομής του μόνιμου μαγνήτη σε ένα ελάχιστο $1 \times 1 \text{ mm}^2$ μειώνει τη μέγιστη ταχύτητα παρακολούθησης τάσης σε $0,25 \text{ m/s}$ ενώ η βελτίωση της χωρικής ανάλυσης σε 1 mm^2 αυξάνοντας ταυτόχρονα την εγκάρσια διατομή του μόνιμου μαγνήτη (και αντίστοιχα το πλάτος της άμορφης μαγνητοσυστολικής ταινίας ανίχνευσης σε ένα βιομηχανικά διαθέσιμο μέγιστο της τάξεως των 25mm) αυξάνει τη μέγιστη ταχύτητα παρακολούθησης στα 6 m/s εις βάρος της χωρικής ανάλυσης, η οποία μειώνεται σε $25 \times 25 = 625 \text{ mm}^2$.

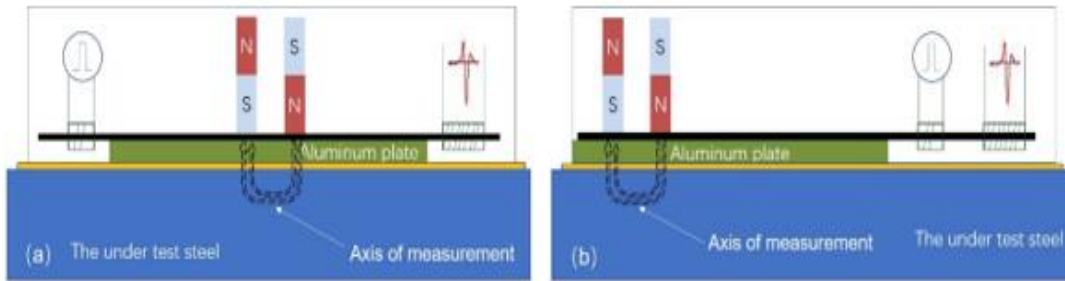
7

Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Ο προσανατολισμός του μόνιμου μαγνήτη (εκτός της κατακόρυφης θέσης) κατά τη στιγμή της κόλλησης ή τοποθέτησής του πάνω στο MDL σε σχέση με τον υπό εξέταση χάλυβα θα μπορούσε να προκαλέσει αβεβαιότητες στη μέτρηση των υπολειπόμενων τάσεων. Εντούτοις, υπό τον όρο ότι οποιοσδήποτε οριζόντιος προσανατολισμός του μόνιμου μαγνήτη είναι σταθερός σε δεδομένη γωνία, η απόκριση του αισθητήρα μετά την εκτέλεση των βημάτων βαθμονόμησης που αναφέρονται παραπάνω θα ακολουθήσει μια δεδομένη εξάρτηση της εξόδου του αισθητήρα από τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα. Αυτό στην πραγματικότητα υποδηλώνει την υποχρεωτική βαθμονόμηση κάθε αισθητήρα πριν από τη χρήση, με βάση ένα πρότυπο δοκίμιο χάλυβα γνωστής μαγνητικής διαπερατότητας, το οποίο θα πρέπει να συνοδεύει τον αισθητήρα.

Ένα άλλο ζήτημα είναι η δυνατότητα παρακολούθησης των εντοπισμένων χωρικών συνιστωσών της διαπερατότητας και επομένως των εντοπισμένων συνιστωσών τάσης. Ο αισθητήρας που αναπτύχθηκε είναι σε θέση να παρακολουθεί τη μέση εντοπισμένη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα που οριοθετείται από το yoke. Για να παρασχεθούν οι συνιστώσες διαπερατότητας και συνεπώς οι συνιστώσες τάσης του χάλυβα υπό δοκιμή, απαιτούνται τα αισθητήρια στοιχεία που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.1.1. Σύμφωνα με αυτή τη διάταξη, δύο μόνιμοι μαγνήτες, παράλληλοι μεταξύ τους, τίθενται σε αντίθετες κατευθύνσεις, κάθετα ως προς την επιφάνεια του MDL. Η απόστασή τους πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέπει μια οριζόντια διείσδυση της μαγνητικής τους ροής στην επιφάνεια του υπό δοκιμή χάλυβα. Επίσης, μπορεί να τοποθετηθεί μία μαλακή μαγνητική ράβδος στις ελεύθερες επιφάνειές τους, ώστε να επιτρέπει το κλείσιμο της μαγνητικής ροής. Αν και η μοντελοποίηση αυτής της διάταξης είναι κάπως περίπλοκη, προκαταρκτικά

πειραματικά αποτελέσματα στις μετρήσεις στην επιφάνεια του υπό δοκιμή χάλυβα απεικονίζουν ανισότροπη εξάρτηση της απόκρισης του αισθητήρα για διάφορες γωνίες μέτρησης, όταν η απόσταση των δύο μόνιμων μαγνητών είναι μεγαλύτερη από το μήκος.



Σχήμα 7.1.1 Ένας αισθητήρας ικανός να προσδιορίσει τη συνιστώσα διαπερατότητας στους άξονες X και Y: Η μαγνητική ροή μεταξύ των δύο μόνιμων μαγνητών είναι προσανατολισμένη στην κύρια κατεύθυνση. Έτσι, η δύναμη που ασκείται στο MDL εξαρτάται από τη διαπερατότητα κατά μήκος αυτής της κατεύθυνσης. [26]

Ένα συγκεκριμένο στοιχείο που χρειάζεται ο αισθητήρας για τη λειτουργία του είναι ένα αυτοματοποιημένο όχημα για την εκτέλεση αυτοματοποιημένων μετρήσεων. Το όχημα θα πρέπει να αποτελείται από τέσσερις τροχούς, επιτρέποντας τη μετακίνηση σε επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες για την παρακολούθηση τάσεων σε βασικά υλικά, συγκολλήσεις και ζώνες που επηρεάζονται από τη θερμότητα. Το όχημα θα πρέπει να μπορεί να τροφοδοτηθεί από ένα καλώδιο τροφοδοσίας και να φιλοξενήσει τον απαραίτητο αισθητήρα υπερήχων μέτρησης του πάχους και έναν μαγνητικό περιστρεφόμενο κωδικοποιητή. Είναι προτιμότερο το αλουμινένιο του σασί να βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του χάλυβα που δεν υπόκειται σε δοκιμή. Διαφορετικά, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανύψωση και να υπολογίζεται στις μετρήσεις καθώς επηρεάζει την αβεβαιότητα, την υστέρηση και το χρόνο απόκρισης.

Εάν ολόκληρος ο αισθητήρας ανυψώνεται κατά κάποια mm από την επιφάνεια υπό δοκιμή, τότε η ποσότητα της δύναμης αλλάζει δραστικά, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες μέτρησης. Εκτός αυτού, μπορούν να εισαχθούν στο σύστημα μέτρησης γεωμετρικές αβεβαιότητες, ανοίγοντας το δρόμο έτσι για

πιθανά προβλήματα αβεβαιότητας. Ωστόσο, η χρονική απόκριση δεν φαίνεται να επηρεάζεται σοβαρά από μια τέτοια αλλαγή στην ανύψωση.

Όσον αφορά ορισμένες μη συμβατικές περιπτώσεις παρακολούθησης εντοπισμένης τάσης, όπου το αυτοματοποιημένο όχημα δεν πρέπει να είναι οριζόντια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαγνητικοί τροχοί ή μαγνητικοί μάντες (magnetic caterpillar tracks) για να επιτευχθεί αυτοματοποιημένη διαδικασία παρακολούθησης της καταπόνησης. Σε περίπτωση που απαιτείται αυτόνομο σύστημα παρακολούθησης της τάσης, το αυτόνομο όχημα παρακολούθησης θα πρέπει να φέρει πάνω του ηλεκτρικούς κινητήρες, μπαταρίες και, ενδεχομένως, συστήματα συλλογής ενέργειας.

Συμπερασματικά λοιπόν, ένας αισθητήρας βασισμένος στην τεχνική των μαγνητοσυστολικών γραμμών καθυστέρησης, ικανός να παρακολουθεί τη δύναμη που ασκείται μεταξύ ενός μόνιμου μαγνήτη και ενός υπό δοκιμή χάλυβα παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία. Η δύναμη εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υπό δοκιμή χάλυβα και συνεπώς από τις εντοπισμένες υπολειμματικές τάσεις, ακολουθώντας την τεχνική MASC. Η αβεβαιότητα που επιτυγχάνεται είναι κάτω από 2%, ενώ η χωρική ανάλυση μπορεί να κυμαίνεται από 1mm έως 25mm, ανάλογα με την επιθυμητή ταχύτητα παρακολούθησης. Ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της τάσης στις κρίσιμες κατασκευές από χάλυβα, την παραγωγή χάλυβα καθώς και κατά την κατασκευή. Η μελλοντική εργασία πρέπει να αφιερωθεί στη βελτιστοποίησή μέσω της παραμετρικής μελέτης και του μοντέλου απόκρισης του αισθητήρα.

Οι εφαρμογές του αισθητήρα δύναμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Η πρώτη εφαρμογή είναι επίπεδες και οιονεί επίπεδες επιφάνειες και μεταλλικές κατασκευές. Τα σκάφη πλοίων και οι συγκολλημένες περιοχές τους σε ναυπηγεία και σημεία συντήρησης είναι μία από τις πιθανές εφαρμογές του αισθητήρα δύναμης. Σε αυτή την περίπτωση, οι μαγνητικοί τροχοί ή οι τροχιές είναι απαραίτητες.

Εφαρμογή σε στρογγυλές επιφάνειες, όπως σωληνώσεις και δοχεία, είναι δυνατή με αυτόν τον τύπο αισθητήρα, υπό την προϋπόθεση ότι η γεωμετρία (δηλαδή η διάμετρος του αγωγού) επιτρέπει τον εσωτερικό έλεγχο. Λαμβάνοντας υπόψη την χρήση μιας άμορφης ταινίας μήκους ~100 mm (ή τουλάχιστον 70mm), ο σχεδιασμός του αισθητήρα και η συσκευασία των ηλεκτρονικών του πρέπει να είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης της κίνησης του, με ιδιαίτερη προσοχή στους κινητήριους μηχανισμούς, όπως οι μαγνητικοί τροχοί.

Ένα πήκτωμα (gel) μπορεί να τοποθετηθεί ως μια διεπιφάνεια μεταξύ του υποστηρίγματος του αισθητήρα και του χάλυβα υπό δοκιμή, προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή υπολειμματικών επιφανειακών τάσεων λόγω της φθοράς μεταξύ του αισθητήρα και της επιφάνειας του χάλυβα. Ένας ανιχνευτής πάχους υπερήχων μπορεί να τοποθετηθεί στην κορυφή του στηρίγματος του αισθητήρα για να παρακολουθεί τις ανακλάσεις από το κάτω μέρος του αισθητήρα και το κάτω μέρος του υπό δοκιμή χάλυβα. Μόλις υπάρχει επαφή μεταξύ του πηκτώματος και του χάλυβα, εκτός από τις πρώτες ανακλάσεις από το στηρίγμα του αισθητήρα, θα εμφανιστεί μια δεύτερη ανάκλαση από το κάτω μέρος του υπό εξέταση χάλυβα, ορίζοντας μηδενική ανύψωση μεταξύ του στηρίγματος του αισθητήρα και του υπό δοκιμή χάλυβα. Η διαδοχική-αυξητική θέση του αισθητήρα μπορεί να ελέγχεται μέσω ενός γραμμικού ή κυκλικού κωδικοποιητή ή ενός αισθητήρα μετατόπισης. Η καταγραφή της εξόδου αρχίζει αφού ο αισθητήρας υπερήχων ανιχνεύσει τη δεύτερη ανάκλαση από τον πυθμένα του υπό δοκιμή χάλυβα, πιστοποιώντας ότι το αισθητήριο στοιχείο είναι σε επαφή με τον υπό δοκιμή χάλυβα. Η τάση από κορυφή σε κορυφή, μαζί με τις πληροφορίες από τον περιστρεφόμενο κωδικοποιητή αποθηκεύονται και μπορούν να μεταδοθούν σε έναν υπολογιστή.

Η κύρια προβλεπόμενη εφαρμογή στις γραμμές παραγωγής αφορά την κατασκευή φύλλων από χάλυβα, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών ψυχρής και θερμής έλασης. Για αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση, απαιτείται μια συστοιχία αισθητήρων δύναμης για την παράλληλη παρακολούθηση μιας γραμμής παραγωγής μεταβλητού πλάτους και μεταβλητής ταχύτητας. Σε τέτοιες γραμμές παραγωγής, αφού αποφασισθεί η επιθυμητή χωρική ανάλυση σε σχέση με την ταχύτητα παραγωγής, είναι εφικτές δύο ή τρεις συστοιχίες αισθητήρων δύναμης για μία

διαδικασία παρακολούθησης τάσεως μίας απλής γραμμής ώστε να υπάρχει η δυνατότητα διασταύρωσης. Το κόστος αυτού του αισθητήρα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ASIC, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμιστή σήματος και του μικροελεγκτή, για χαμηλότερο κόστος ηλεκτρονικών. Εκτός αυτού, οι μηχανισμοί του αισθητήρα, συμπεριλαμβανομένων των ταινιών, του αλουμινίου αμαξώματος και της συσκευασίας, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν όσον αφορά το κόστος παραγωγής και κατασκευής, εφαρμόζοντας υβριδικές τεχνολογίες κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών παρασκευής προσθέτων.

Για την εφαρμογή αυτή δεν απαιτείται ένα όχημα παρακολούθησης και αυτόνομη διαδικασία: ο αισθητήρας παραμένει στη θέση του και ο κατασκευασμένος χάλυβας κινείται, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τον έλεγχο παρακολούθησης τάσης είναι πρακτικά το μεταδιδόμενο ηλεκτρικό σήμα για τη δημιουργία των μικροτάσεων σε κάθε μεμονωμένο αισθητήρα.

Έστω ότι κάθε μεμονωμένος αισθητήρας απαιτεί παλμικό ρεύμα 10A με κύκλο λειτουργίας 2:1000 (ή 20mA κατά μέσο όρο) με μέγιστη αντίσταση 10 Ω και άρα η συνολική απαιτούμενη ενέργεια θα είναι 20mVA ανά αισθητήρα. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη, για παράδειγμα, ελάχιστη χωρική ανάλυση 625mm² (που αντιστοιχεί σε μέγιστο πλάτος άμορφης μαγνητοσυστολής ταινίας 25mm, ορθογώνια διατομή του μόνιμου μαγνήτη 25x25 mm² και ελάχιστη αντίστοιχη χωρική ανάλυση 25x25 mm²) για μια γραμμή παραγωγής 600mm, που αντιστοιχεί σε μια τυπική γραμμή παραγωγής χαλύβδινων φύλλων, θα χρειαζόνταν 25 αισθητήρες για να σχηματίσουν μια συστοιχία. Ως εκ τούτου, απαιτούνται 100 αισθητήρες που αντιστοιχούν σε 2VA απαιτούμενης ισχύος για το σύνολο του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, εάν απαιτείται χωρική διακριτική ικανότητα 1mm² (στην άλλη ακραία περίπτωση της βέλτιστης χωρικής διακριτικής ικανότητας 1x1 mm²) στην ίδια γραμμή παραγωγής, απαιτούνται τουλάχιστον 600 αισθητήρια στοιχεία για έναν έλεγχο γραμμής. Προκειμένου να βελτιωθεί η ταχύτητα παρακολούθησης των εντοπισμένων τάσεων, μπορεί να χρειαστούν συνολικά 3000 έως 5000 αισθητήρες, απαιτώντας έτσι περίπου 100VA συνολικά, το οποίο είναι ακόμα αρκετά προσιτό για μια γραμμή παραγωγής ενός συστήματος ποιοτικού ελέγχου.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή μπορεί να είναι οι μεταφορές, με έμφαση στους σιδηρόδρομους και τα πλοία. Και στα δύο συστήματα, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην προστασία και την ασφάλεια των δύο μέσω μεταφοράς παρακολουθώντας την κατανομή τάσεων στις σιδηροδρομικές τροχιές και στη γάστρα του πλοίου, αντίστοιχα. Και οι δύο ανάγκες παρακολούθησης απαιτούνται επί του παρόντος από τις σιδηροδρομικές και τις ναυτιλιακές εταιρείες, αντίστοιχα. Σε αντίθεση με τις γραμμές παραγωγής, η λειτουργία αυτών των αισθητήρων και στις δύο εφαρμογές θα πρέπει να πραγματοποιείται με αυτόνομο τρόπο.

Στους σιδηροδρόμους, αυτό είναι εφικτό με την αξιοποίηση της κατακόρυφης μετατόπισης των σιδηροδρομικών γραμμών κατά την διέλευση αμαξοστοιχίας, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των cm, επιτρέποντας τη μαγνητική συγκομιδή λόγω της κατακόρυφης κίνησης κραδασμών ενός μόνιμου μαγνήτη που βρίσκεται μέσα σε ένα πηνίο κατακόρυφο στη σιδηροδρομική σιδηροτροχιά κοντά στην σιδηροδρομική διασύνδεση. Η συγκομιδή ενέργειας σε κάθε τομή των σιδηροτροχιών, όπου υπάρχει κάποια ανάγκη παρακολούθησης καταπόνησης, μπορεί να είναι της τάξης των πολλών mW, επιτρέποντας έτσι την αυτόνομη παρακολούθηση της τάσης.

Ομοίως, σε πλοία βαθέων υδάτων, αυτός ο τύπος παρακολούθησης απαιτείται για περίπου 180 σημεία φροντίδας του σκάφους. Για ένα τέτοιο πλοίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια παρόμοια τεχνολογία συγκομιδής, εκμεταλλευόμενη την κάθετη, πλευρική και εμπρός-πίσθια κίνηση του πλοίου. Σε κάθε περίπτωση, και στα δύο συστήματα μεταφοράς, μπορεί να αναπτυχθεί ένα δίκτυο αισθητήρων βασισμένο σε αυτόν τον αισθητήρα, ικανό να παρέχει τη διαχείριση δεδομένων και να ενημερώνει όλους τους εμπλεκόμενους φορείς για την παρακολούθηση της υγείας είτε των σιδηροδρόμων είτε των πλοίων.

Άλλες εφαρμογές μπορούν επίσης να καθοριστούν, απαιτώντας τη βελτίωση του ίδιου του αισθητήρα καθώς και των συστημάτων που λειτουργούν γύρω του. Ένα παράδειγμα είναι η περίπτωση των άνευ ραφής χαλύβδινων σωλήνων στους εναλλάκτες θερμότητας, όπου απαιτείται παρακολούθηση τάσεων σε κάθε τμήμα του εναλλάκτη θερμότητας, προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες ρωγμές και

βλάβες που απαιτούν διακοπή της γραμμής παραγωγής για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Μια άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι η φθορά των κατασκευών ενός χάλυβα από ωστενίτη, όπου ο μη μαγνητικός ωστενίτης, πριν από την αποτυχία του, εμφανίζει μετασχηματισμό φάσης σε μαρτενσίτη, που είναι μαγνητικός. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οποιαδήποτε μαγνητική απόκριση από τον ωστενίτη, ανιχνεύσιμη από τον αισθητήρα δύναμης, μεταφράζεται στην επικείμενη αποτυχία, απαιτώντας επείγουσα συντήρηση.

8 Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Καλαϊτζάκης, *Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες*. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2010.
- [2] E. Hecceg, *Handbook of measurement and control : an authoritative treatise on the theory and application of the LVDT*, Rev. ed. Pennsauken New Jersey: Schaevitz Engineering, 1976.
- [3] D. Jiles, *Introduction to magnetism and magnetic materials*. .
- [4] Κ. ΙΠ. Κ. ΚΑΤΕΒΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, *ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ*. ΤΖΙΟΛΑ, 2018.
- [5] J. Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*, vol. 3. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997.
- [6] M. Burrows, 'A theory of eddy-current flow detection', PhD Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1964.
- [7] *Magnetic Particle Testing And Inspection Engineering Essay*. UKEssays, 2013.
- [8] E. Hristoforou and A. Ktena, 'Magnetostriction and magnetostrictive materials for sensing applications', *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 316, no. 2 SPEC. ISS., pp. 372–378, 2007, doi: 10.1016/j.jmmm.2007.03.025.
- [9] M. B. M, *The Feynman Lectures on Physics Vol II Electromagnetism and Matter*. Basic Books, 1964.
- [10] E. Hristoforou, 'Magnetostrictive delay lines: Engineering theory and sensing applications', *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/2/201.
- [11] E. Hristoforou, 'New position sensor based on the magnetostrictive delay line principle', in *Sensor Letters*, 2009, vol. 7, pp. 303–309, doi: 10.1166/sl.2009.1071.
- [12] E. Hristoforou, C. Tsomokou, H. Chiriac, M. Neagu, and V. Nagacevschi, 'Improving the magnetostrictive delay line resolution', *Sens. Actuators Phys.*, vol. 59, no. 1–3, pp. 84–88, 1997, doi: 10.1016/S0924-4247(97)80152-5.
- [13] E. Hristoforou and R. E. Reilly, 'Nonuniformity in amorphous ribbon delay lines after stress and current annealing', *J. Appl. Phys.*, vol. 69, no. 8, pp. 5008–5010, 1991, doi: 10.1063/1.348157.
- [14] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, and I. Darie, 'On the bias field dependence of FeSiB wire delay lines response', *Sens. Actuators Phys.*, vol. 59, no. 1–3, pp. 75–78, 1997, doi: 10.1016/S0924-4247(97)80150-1.
- [15] H. Chiriac, E. Hristoforou, M. Neagu, I. Darie, and F. Barariu, 'Dependence of the sound velocity in Fe_{77.5}Si_{7.5}B₁₅ amorphous wires on the magnetic bias field', *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 157–158, pp. 229–230, 1996, doi: 10.1016/0304-8853(95)01041-6.
- [16] E. Hristoforou, H. Chiriac, and M. Neagu, 'Pulse width effect on magnetostrictive amorphous ribbons and wires', *Phys. Status Solidi A*, vol. 143, no. 2, pp. 391–397, 1994, doi: 10.1002/pssa.2211430225.
- [17] P. Vourna, A. Ktena, P. E. Tsakiridis, and E. Hristoforou, 'An accurate evaluation of the residual stress of welded electrical steels with magnetic Barkhausen

- noise', *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 71, pp. 31–45, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.04.007.
- [18] 'FSR 400 Data Sheet Figure 1-Typical Force Curve Industry Segments Interlink Electronics-Sensor Technologies FSR 400 Series Round Force Sensing Resistor'.
- [19] E. Hristoforou and R. E. Reilly, 'Force Sensors Based on Distortion in Delay Line', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 4, pp. 1974–1977, 1992, doi: 10.1109/20.144756.
- [20] E. Hristoforou and R. E. Reilly, 'A digitizer based on reflections in delay lines', *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 8, pp. 4577–4580, 1991, doi: 10.1063/1.349093.
- [21] P. Vourna, E. Hristoforou, A. Ktena, P. Svec, and E. Mangiorou, 'Dependence of Magnetic Permeability on Residual Stresses in Welded Steels', *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 4, Apr. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2016.2628025.
- [22] P. Vourna, A. Ktena, P. E. Tsakiridis, and E. Hristoforou, 'A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels', *NDT E Int.*, vol. 71, pp. 33–42, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2014.09.011.
- [23] 'Standard Guide for Measuring Power Frequency Magnetic Properties of Flat-Rolled Electrical Steels Using Small Single Sheet Testers 1', doi: 10.1520/A1036-04R09.
- <https://learn.adafruit.com/force-sensitive-resistor-fsr/using-an-fsr?fbclid=IwAR2t3VXGI2Nbd5grnp8ps3ZKtsvPSHeAwnIeuszQSuw60S7Md7XIG7gNOIs>
- [24] Danny Nosonowitz, 'Force Sensitive Resistor (FSR)', 2018.
- [25] C. Materiali Intelligenti E Biomimetici, 'Magneto-rheological & Magneto-strictive Materials', 2018.
- [26] K. Liang *et al.*, 'Sensor to Monitor Localized Stresses on Steel Surfaces Using the Magnetostrictive Delay Line Technique', *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4797, Nov. 2019, doi: 10.3390/s19214797.
- [27] Κορδαλής Χρήστος, 'Διατάξεις αισθητήρων θέσης βασισμένες σε μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης', Διπλωματική Εργασία.