

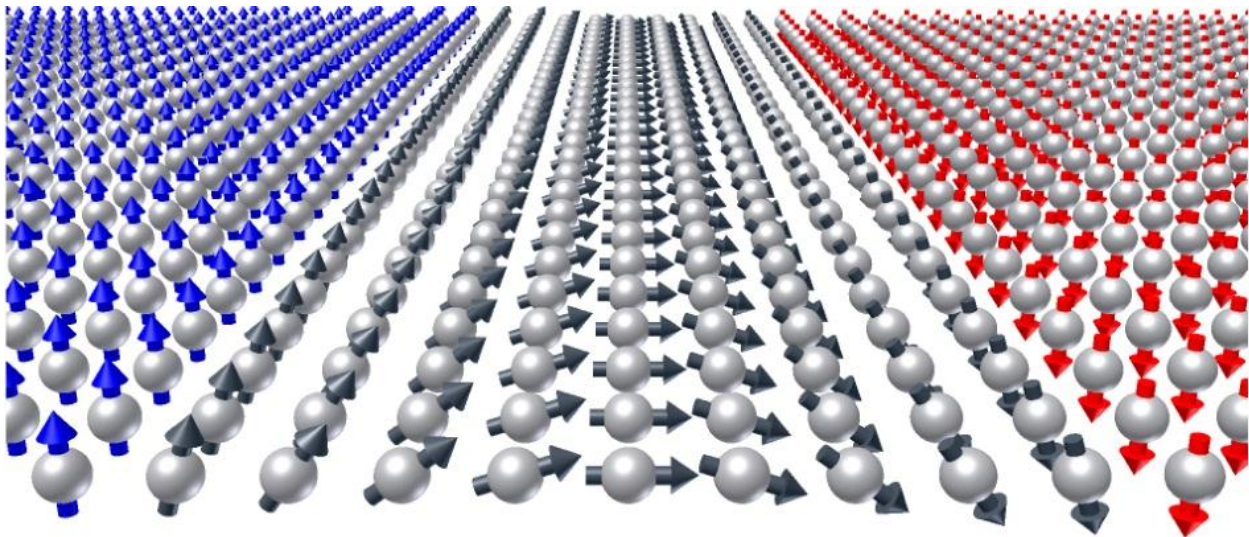


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

“ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ”

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ  
ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ ΣΕ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ  
ΧΑΛΥΒΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΝΘΡΑΚΑ



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑ: ΚΟΥΛΗ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΙΣΑΒΕΤ

ΑΜ: 02113111

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος, Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούνιος 2015

...Αφιερωμένη στην οικογένειά μου,  
που δεν έπαψε ποτέ να πιστεύει σε μένα  
και μου έμαθε να μην τα παρατάω...  
Σας ευχαριστώ που είστε πάντα δίπλα μου!

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ευάγγελου Χριστοφόρου, στα πλαίσια απόκτησης Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στον τομέα του Αυτοματισμού μέσω του Δ.Π.Μ.Σ. «Συστήματα Αυτοματισμού».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της μεταπτυχιακής μου εργασίας για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο άτομό μου, αναθέτοντάς μου την επιμέλεια των πειραμάτων και της συγγραφής της παρούσας εργασίας με θέμα «Προσδιορισμός παραμενουσων τασεων με μαγνητικες μεθοδους μη καταστροφικων ελεγχων σε συγκολλημενο χαλυβα χαμηλης περιεκτικότητας σε ανθρακα».

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το εργαστηριακό προσωπικό της ομάδας Ηλεκτρονικών και Μαγνητικών Υλικών και ιδιαιτέρως την Υποψήφια Διδάκτορα Βουρνά Πολυξένη για την αμέριστη βοήθειά της κατά τη διάρκεια διεκπεραίωσης της παρούσας εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στην εταιρεία VETA S.A. και ιδιαιτέρως στον κ. Σέττο Παντελή για την προθυμοποίηση του και την ευγενική χορηγία των δειγμάτων που εξετάστηκαν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου (Καθηγητής Μετ.-Μεταλ. Μηχανικών), κ. Νικόλαο Θεοδώρου (Καθηγητής Ηλ. Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών) και κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη (Λέκτορας Ηλ. Μηχ. & Μηχ. Υπολογιστών) για τη συμβολή τους στη διεκπεραίωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται από μία εισαγωγή και δύο διακριτά μέρη: ένα θεωρητικό και ένα πειραματικό.

Στην εισαγωγή γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του μαγνητισμού και των συναφών φαινομένων, ώστε να γίνει ευκολότερα κατανοητός ο σκοπός διεξαγωγής της παρούσας εργασίας και να εξηγηθούν συντόμως έννοιες, οι οποίες θα αναλυθούν διεξοδικά στο θεωρητικό μέρος.

Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από τρία κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια παρουσίαση όλων των Καταστροφικών Μεθόδων Τεχνικών Χαρακτηρισμού και των Μη Καταστροφικών Ελέγχων που χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό των υλικών, τόσο σε βιομηχανικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά της κάθε μέθόδου καθώς και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής παρουσίαση όλων των μαγνητικών ΜΚΕ που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των μαγνητικών υλικών. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου καθώς και τα συμπεράσματα που ελήφθησαν κατά την εφαρμογή τους από διάφορες ερευνητικές ομάδες.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μέθοδος συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση των δοκιμίων που μελετήθηκαν. Παρουσιάζονται το θεωρητικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης συγκόλλησης, καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι της μεθόδου.

Το πειραματικό μέρος αποτελείται από τα Κεφάλαια 5 και 6, στα οποία γίνεται εκτενής παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν από μια σειρά μετρήσεων, καθώς και ο σχολιασμός αυτών.

Στο Κεφάλαιο 7 που είναι και το τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής προτείνεται η περαιτέρω αναγκαία έρευνα στον τομέα των μαγνητικών μεθόδων που θα βελτιώσει την αξιοπιστία τους και θα οδηγήσει σε περισσότερο επαναλλήψιμα αποτελέσματα

Ακολουθεί παράρτημα με πίνακες και στοιχεία που αφορούν στην πιστοποίηση των υλικών που μελετήθηκαν και κάποιες ιδιότητές τους, ενώ στο τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία με τις πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα για τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

# **ABSTRACT**

The present Master Dissertation consists of an introduction and two separated discrete parts: a theoretical and an experimental one.

In the Introduction, the magnetic effect is briefly presented, so that the objective of the dissertation is better understood and some notions which are analytically presented in the main text would be briefly described.

The Theoretical part consists of three chapters. In Chapter 2 there is a presentation of all the Destructive Techniques and No Destructive Testings utilized for the evaluation of materials in industrial and experimental level. The main characteristics of each method are referred as well as the advantages and disadvantages.

Chapter 3 is about Magnetic NDTs. There is an extensive presentation of all the magnetic techniques used for the assessment of the magnetic materials. The advantages and disadvantages as well as the conclusions extracted from applying each method are also illustrated.

Chapter 4 is about the welding method used through the experimental process. The characteristics of the method, the parameters, the pluses and minuses and the theoretical background of the welding are presented extensively.

The Experimental Part is composed by Chapters 5 and 6. In those two chapters the experimental process (Chapter 5) and the conclusions reached, according to the data (Chapter 6) are analytically presented and annotated.

In Chapter 7 which is the final chapter, some proposals for future research on the magnetic methods field are recommended. The research proposed is the improvement of the magnetic methods in order to be more reliable and repeatable, something that can only happen through the standardization of the existing magnetic methods.

In the last pages of the dissertation there is an appendix followed by the acknowledgments.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή .....	1
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μέθοδοι Προσδιορισμού Παραμενουσών Τάσεων .....	6
2.1. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ .....	6
2.1.1. Ορισμός.....	6
2.1.2. Μέθοδοι προσδιορισμού παραμενουσών τάσεων.....	6
2.1.2.1. Καταστρεπτικές τεχνικές χαρακτηρισμού .....	6
2.1.2.1.1. Είδη καταστρεπτικών τεχνικών (ΚΤΧ).....	6
2.1.2.1.2. Βασικές έννοιες θραυστομηχανικής .....	8
2.1.2.1.3. Συμπεριφορά υλικών σε διάφορες καταπονήσεις.....	8
2.1.2.2. Μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ).....	9
2.1.2.2.1. Μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων.....	9
2.1.2.2.2. Εφαρμογές ΜΚΕ.....	10
2.1.2.2.3. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και λειτουργικές ιδιότητες ΜΚΕ .....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μέθοδοι Μαγνητικών Μετρήσεων για το Μη Καταστροφικό Έλεγχο των Σιδηρομαγνητικών Υλικών .....	15
3.1. ΘΕΩΡΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	15
3.1.1. Δυναμική μαγνητικών τοιχωμάτων.....	15
3.1.2. Δυναμική περιστροφής μαγνητικών περιοχών.....	16
3.1.3. Θεωρία σύζευξης μαγνήτισης-τάσης .....	17
3.1.4. Βασικές εξισώσεις μαγνητο-ελαστικής συμπεριφοράς .....	18
3.1.5. Άλλες εξισώσεις μαγνητο-ελαστικής συμπεριφοράς.....	19
3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΚΕ .....	20
3.2.1. Μαγνητική διαρροή (Magnetic flux leakage, MFL).....	20
3.2.1.1. Εφαρμογή του MLF .....	21
3.2.2. Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen.....	22
3.2.2.1. Ιδιομορφίες στα πειραματικά δεδομένα στις δοκιμές MBN.....	23
3.2.3. Μαγνητική μνήμη μετάλλων .....	24
3.2.4. Μαγνητικά σωματίδια.....	27
3.2.4.1. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου μαγνητικών σωματιδίων .....	28
3.2.5. Δινορεύματα.....	29
3.2.5.1. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου με δινορεύματα.....	31
3.2.6. Βρόχος υστέρησης B – H.....	32
3.2.7. Μαγνητοακουστική εκπομπή (ΜΑΕ) .....	32

3.2.8. Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης – Magnetostrictive Delay Line (MDL).....	33
3.2.9. Μαγνητική διαπερατότητα (Magnetic permeability).....	34
3.2.9.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη μαγνητική διαπερατότητα.....	36
3.2.9.1.1. Η διακύμανση της μαγνητικής διαπερατότητας σε χάλυβες με διαφορετική σύσταση σε άνθρακα .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συγκολλήσεις .....	40
4.1. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ TIG .....	40
4.1.1. Συγκόλληση TIG με συνεχές ρεύμα .....	42
4.1.2. Συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα .....	43
4.1.3. Οι βασικές συνδέσεις στις συγκολλήσεις TIG.....	44
4.1.4. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των συγκολλήσεων TIG .....	45
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματική Διαδικασία.....	48
5.1. ΥΛΙΚΟ ΠΟΥ ΕΛΗΦΘΗ .....	48
5.2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ .....	49
5.3. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	49
5.2.1. Διάταξη για την καταγραφή της χρονικής μεταβολής των τιμών της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας.....	49
5.2.2. Καμπύλη βαθμονόμησης αρχικού δείγματος.....	50
5.2.3. Χωρική κατανομή μαγνητική διαπερατότητας στο συγκολλημένο δείγμα .....	51
5.3. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ..	52
5.3.1. Προετοιμασία δειγμάτων .....	52
5.3.1.1. Κοπή δοκιμίων .....	52
5.3.1.2. Εγκιβωτισμός.....	52
5.3.1.3. Λείανση.....	53
5.3.1.4. Στίλβωση.....	54
5.3.1.5. Χημική προσβολή .....	55
5.3.2. Μελέτη δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) .....	55
5.4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	56
5.4.1. Μικρο-σκληρομετρήσεις .....	56
5.4.2. Δοκιμές εφελκυσμού.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα.....	57
6.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ .....	57
6.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ.....	61
6.2.1. Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης.....	61
6.2.2. Δοκιμές εφελκυσμού.....	62

6.2.3. Καμπύλη βαθμονόμησης .....	63
6.2.4. Χωρική κατανομή επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα πλαίσια εκπόνησης του ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού». Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ο προσδιορισμών των παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται στα υλικά, λόγω οποιασδήποτε επιφόρτισης ή/και θερμικών διεργασιών. Οι καταπονήσεις αυτές οδηγούν σε ποικίλες μικροδομικές μεταβολές σε όλο το υλικό, προκαλώντας ταυτόχρονα βάρθρωση του τασικού πεδίου. Οι έντονες διακυμάνσεις αυτού είναι πιθανό να οδηγήσουν ακόμα και σε αστοχία του υλικού. Ένα τυπικό παράδειγμα σημαντικών διακυμάνσεων του τασικού πεδίου είναι οι συγκολλήσεις τόξου. Για το λόγο αυτό στο υλικό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται συγκόλληση TIG, ή αλλιώς GTAW.

Η μέθοδος Μη Καταστροφικού Ελέγχου που εφαρμόζεται σε πειραματικό επίπεδο για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων είναι η Τεχνική Μαγνητικής Διαπερατότητας. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου βασίζεται στη μαγνητική φύση του ίδιου του προς εξέταση υλικού, το οποίο είναι ο χάλυβας τύπου St37-2. Πρόκειται για ένα μαγνητικά μαλακό χάλυβα, χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία. Τον χαρακτηρίζουμε μαλακά μαγνητικό, γιατί με εφαρμογή κατάλληλου μαγνητικού πεδίου μπορεί να μαγνητιστεί πολύ εύκολα. Συνεπώς, θα μπορέσει να προσδιοριστεί η διαφορά ανάμεσα στις παραμένουσες τάσεις που έχει το υλικό αναφοράς (το υλικό πριν από οποιαδήποτε διεργασία) και σε εκείνες μετά τη συγκόλληση.

Σύμφωνα με τη θεωρία, η διαπερατότητα ενός υλικού μεταβάλλεται μετά από οποιαδήποτε θερμική κατεργασία, εξαιτίας και της αύξησης ή μείωσης των παραμενουσών τάσεων. Συνεπώς, η μαγνήτιση του υλικού μεταβάλλεται υπό την εφαρμογή ενός εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

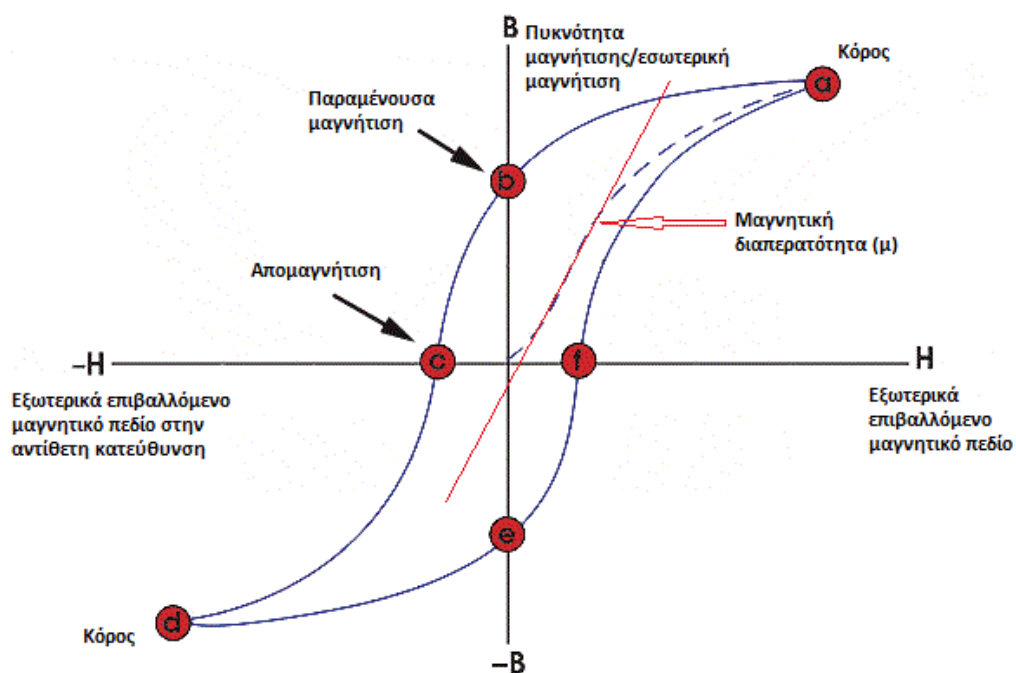
Ένα μαγνητικό υλικό αποτελείται από μαγνητικές περιοχές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μαγνητικά δίπολα (ροπές) με ίδια κατεύθυνση του διανύσματος της μαγνήτισής τους. Δύο γειτονικές μαγνητικές περιοχές χωρίζονται μεταξύ τους από μαγνητικά τοιχώματα, στα οποία το διάνυσμα της μαγνήτισης περιστρέφεται βηματικά. Στην αμαγνήτιστη κατάσταση, η συνολική μαγνήτιση του υλικού είναι μηδέν, καθώς τα επιμέρους διανύσματα της μαγνήτισης αλληλοεξουδετερώνονται.

Αν σε ένα φερρομαγνητικό υλικό εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο, τότε το υλικό αυτό αρχίζει να

μαγνητίζεται, δηλαδή τα διανύσματα της μαγνήτισης να περιστρέφονται με σκοπό να προσανατολιστούν στο εξωτερικό πεδίο. Σε χαμηλές τιμές πεδίου τα μαγνητικά τοιχώματα κινούνται, έτσι ώστε οι μαγνητικές περιοχές που είναι ευνοϊκότερα προσανατολισμένες στη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου να διευρύνονται. Για να μαγνητιστεί πλήρως το υλικό, να φτάσει δηλαδή στην κατάσταση κορεσμού, πρέπει να προσανατολιστούν όλα τα διανύσματα μαγνήτισης στη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για αυτό το λόγο, σε υψηλές τιμές πεδίου, παρατηρείται και η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων. Αυτό συμβαίνει με επιπλέον εφαρμογή πεδίου. Όταν το υλικό κορεστεί μαγνητικά, τότε η περαιτέρω εφαρμογή πεδίου δεν επιφέρει αλλαγή στη μαγνήτιση του υλικού.

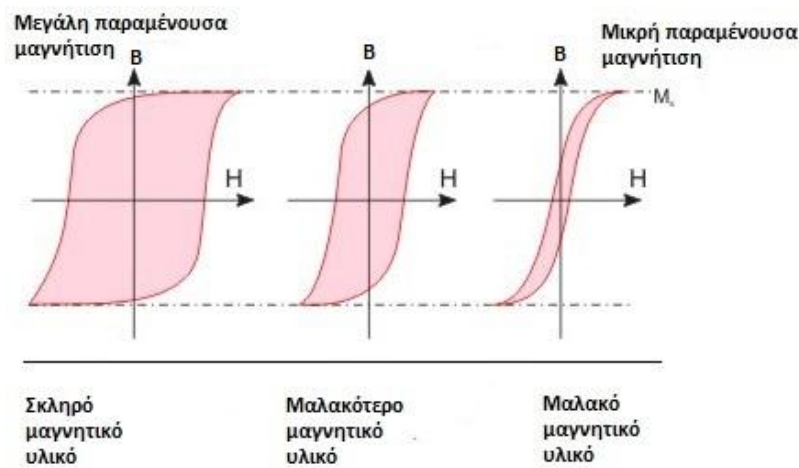
Τα μαλακά μαγνητικά υλικά απομαγνητίζονται χωρίς να απαιτείται υψηλές τιμές πεδίου. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά απομαγνητίζονται για μεγαλύτερες τιμές. Αν σταματήσει η επιβολή του μαγνητικού πεδίου στο υλικό, τότε αυτό παραμένει μαγνητισμένο (παραμένουσα μαγνήτιση).

Η μαγνητική διαπερατότητα ή επιδεκτικότητα που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία αποτελεί το λόγο της εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού ως προς το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Και δίνεται από τη σχέση:  $\mu = \frac{dB}{dH}$ , όπου dB η διαφορά εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού και dH η διαφορά εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Στην πραγματικότητα, η μαγνητική διαπερατότητα είναι η κλίση του B-H βρόχου όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1.1: Βρόχος υστέρησης B-H

Ο παραπάνω εικονιζόμενος βρόχος υστέρησης B-H είναι τυχαίος. Αυτό που μπορεί σαφώς να παρατηρηθεί, είναι πως το πόσο σκληρό ή μαλακό μαγνητικά είναι ένα υλικό καθορίζεται από την κλίση του λόγου  $dB/dH$ . Όσο περισσότερο απότομη είναι αυτή η κλίση τόσο στενότερος είναι και ο βρόχος υστέρησης, γιατί το σημείο  $f$  (ή αλλιώς  $H_c$ ) που είναι η κρίσιμη εξωτερική τιμή πεδίου, είναι πιο κοντά στην αρχή των αξόνων. Όσο δηλαδή μικρότερο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο χρειάζεται ένα υλικό για να αυξήσει την εσωτερική του μαγνήτιση και να φτάσει σε κόρο, τόσο περισσότερο επιδεκτικό (διαπερατό) είναι στη μαγνήτιση. Αντίστοιχα, τα σκληρά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από διευρυμένους βρόχους υστέρησης. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαφοροποίηση βρόχου υστέρησης για μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά.



**Εικόνα 1.2:** Σύγκριση βρόχου υστέρησης για σκληρά και μαλακά μαγνητικά υλικά

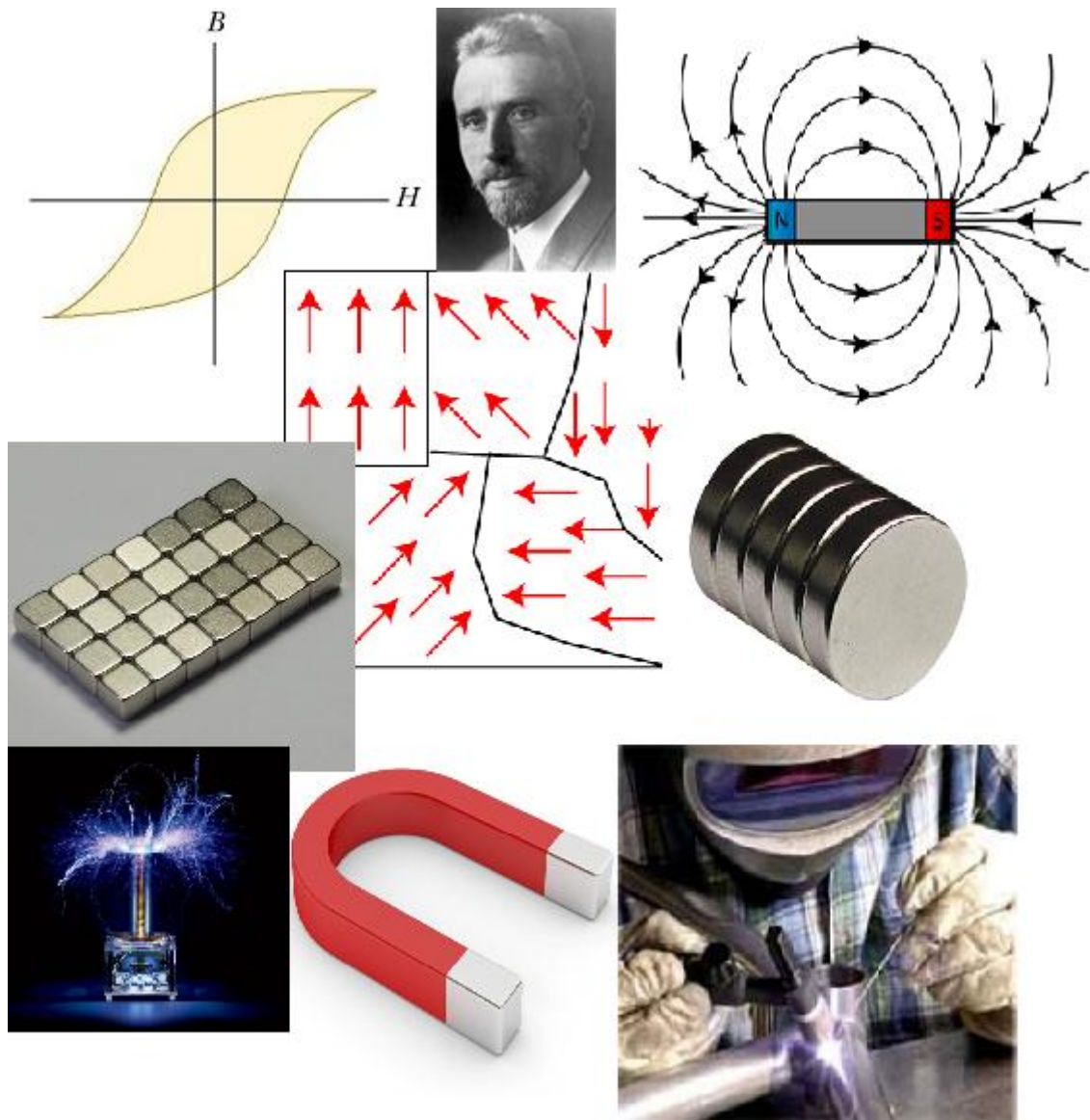
Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2, τα σκληρά μαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλή μαγνητική επαγωγή  $B$  και από μεγάλο  $H$ , ενώ τα πιο μαλακά από μικρότερο  $H$  και υψηλότερο  $B$ . Παρόλα αυτά, τα σκληρότερα μαγνητικά υλικά αποτελούν καλύτερους μόνιμους μαγνήτες, λόγω της μεγάλης παραμένουσας μαγνήτισής τους, όταν αφαιρεθεί το εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο.

Οι δημιουργία τάσεων σε ένα μαγνητικό υλικό αλλάζει τη μαγνητική συμπεριφορά του. Όπως προαναφέρθηκε, η μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού είναι μέσω της κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων και της περιστροφής των μαγνητικών διπόλων, με στόχο τον παραλληλισμό του διανύσματος μαγνήτισης του υλικού με τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Δομικές ατέλειες και διαταραχές μέσα στο υλικό αποτελούν σημεία αγκύρωσης των μαγνητικών τοιχωμάτων (παρεμποδίζουν την κίνησή τους). Χρειάζεται μεγαλύτερο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο για να υπερπηδήσουν τα μαγνητικά τοιχώματα τα συγκεκριμένα εμπόδια, συνεπώς καθυστερεί η μαγνήτιση του, μεταβάλλοντας σημαντικά τις

τιμές των μετρήσιμων παραμέτρων του βρόχου υστέρησης.

Έτσι λοιπόν, γίνεται αντιληπτή η σπουδαιότητα της σημασίας της μελέτης της μεταβολής των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, όσον αναφορά στις πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν για την κατάστασή του και τις τιμές των παραμενουσών τάσεων. Μεταβολές στην μικροδομή του μπορούν να γίνουν αντιληπτές μέσω των μαγνητικών ΜΚΕ, καθώς αλλάζει η συμπεριφορά του υλικού στη μαγνήτιση και συνεπώς αρκετές από τις ιδιότητές του.

# ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**

## **2.1. ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**

### **2.1.1. Ορισμός**

Τάσεις που ενυπάρχουν στο υλικό χωρίς την παρουσία εξωτερικού τασικού πεδίου ή θερμοκρασιακής βάρμωσης. Οι τάσεις αυτές είναι αδύνατο να παραλειφθούν και να ελαττωθούν.

### **2.1.2. Μέθοδοι προσδιορισμού παραμενουσών τάσεων**

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται σε ένα υλικό για τον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις καταστροφικές και τις μη-καταστροφικές τεχνικές.

#### **2.1.2.1. Καταστρεπτικές τεχνικές χαρακτηρισμού**

Οι καταστροφικές τεχνικές εφαρμόζονται σε ένα υλικό είτε για τον έλεγχο της εντατικής του κατάστασης, είτε για τη διερεύνηση πιθανών αιτίων αστοχίας. οι καταστροφικές τεχνικές ελέγχουν την ύπαρξη εσωτερικών ελαττωμάτων μέσω του προσδιορισμού τυχόν σημειακών διαβαθμίσεων της χημικής σύστασης των κραματικών στοιχείων, του μικροδομικού χαρακτηρισμού και της μελέτης των διακυμάνσεων των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Σε αντίθεση με τις μη καταστροφικές τεχνικές απαιτείται η καταστροφή του υλικού, μέσω της μερικής αφαίρεσης τμήματός του, ώστε να ληφθούν δοκίμια από τις περιοχές ενδιαφέροντος.

##### **2.1.2.1.1. Είδη καταστρεπτικών τεχνικών (KTX)**

Διαδεδομένες μέθοδοι KTX είναι:

- Χημική ανάλυση
- Μικροσκοπικός χαρακτηρισμός μέσω οπτικού μικροσκοπίου ή, για μεγαλύτερη

ανάλυση με ηλεκτρονικά μικροσκόπια σάρωσης (scanning electron microscope, SEM) και διερχόμενης δέσμης (transmission electron microscope, TEM)

- Σκληρομέτρηση
- Δοκιμή εφελκυσμού
- Δοκιμή κρούσης
- Δοκιμή κάμψης

Στον Πίνακα 2.1, παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές των ΚΤΧ, ως προς τη μέθοδο που χρησιμοποιείται.

**Πίνακας 2.1:** Εφαρμογές των ΚΤΧ

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Χημική ανάλυση	Φασματοσκοπία εκπομπής (emission spectroscopy) για χημική ανάλυση σε μελέτες αστοχίας μεταλλικών μερών λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας της
Μικροσκοπική παρατήρηση	Προσδιορισμός μικροδομικών μεταβολών από την αρχική δομή και ανίχνευση μικροσκοπικών ή υπομικροσκοπικών ελαττωμάτων (π.χ. πόρων, εγκλεισμάτων), τα οποία συμβάλλουν στην αστοχία του εξαρτήματος και είναι μη-ανιχνεύσιμα με τις τεχνικές μη καταστρεπτικού ελέγχου.
Σκληρομέτρηση	Μέθοδος που παρέχει μια πρώτη ένδειξη των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων και της κατανομής των εσωτερικών τάσεων στο υπό εξέταση υλικό. Με τη μέθοδο αυτή εκτιμάται η επιτυχής πραγματοποίηση επιφανειακών κατεργασιών σκλήρυνσης ή

	τροποποίησης στρωμάτων του υλικού
<b>Δοκιμή εφελκυσμού</b>	Παροχή πληροφοριών σχετικά με τη συμμόρφωση της κατασκευής προς τις απαιτήσεις σχεδιασμού και ελαχιστοποίηση της πιθανότητας αστοχίας του υλικού λόγω σφαλμάτων στη φάση του σχεδιασμού.
<b>Δοκιμή κρούσης</b>	Υπολογισμός της δυσθραυστότητας του υλικού υπό κρουστική επιφόρτιση.
<b>Δοκιμή κάμψης</b>	Προσδιορισμός της ολκιμότητας μιας συγκολλητής κατασκευής.

#### **2.1.2.1.2. Βασικές έννοιες θραυστομηχανικής**

Η Θραυστομηχανική (fracture mechanics) αποτελεί ένα από τα πεδία του κλάδου της επιστήμης της Μηχανικής των Υλικών, που για πρώτη φορά εισήγαγε την επίδραση της μικροδομής του υλικού στη μηχανική του συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, επιτρέπει την ποσοτική συσχέτιση των τιμών των ιδιοτήτων (φυσικών, μηχανικών και μαγνητικών) του υλικού και της παρουσίας σε αυτό δομικών ατελειών και της εντατικής κατάστασής του με τους μηχανισμούς έναρξης και διάδοσης ρωγμών. Με τον όρο θραύση δηλώνεται η απόσχιση ενός υλικού ή μιας κατασκευής σε δυο ή περισσότερα τμήματα υπό την επίδραση στατικής ή δυναμικής μηχανικής φόρτισης. Οι συζυγείς επιφάνειες που δημιουργούνται από τη διάδοση των ρωγμών καλούνται επιφάνειες θραύσης.

#### **2.1.2.1.3. Συμπεριφορά υλικών σε διάφορες καταπονήσεις**

Η μονοαξονική στατική εφελκυστική φόρτιση αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα για την κατανόηση των θεμελιωδών μηχανισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μηχανική καταπόνηση των υλικών. Ωστόσο, σε καθημερινές εφαρμογές, η επιβολή σύνθετων στατικών ή δυναμικών φορτίσεων αποτελεί ένα πολύπλοκο μηχανικό πρόβλημα. Η πολυπλοκότητα αυτή ενισχύεται όταν οι φορτίσεις συντελούνται σε ισχυρά διαβρωτικά μέσα και σε υψηλές θερμοκρασίες, ή/και τμήματα της κατασκευής βρίσκονται σε επαφή και σε σχετική κίνηση με



άλλες επιφάνειες. Εξαιτίας όλων των προαναφερόμενων συνεργηστικών φαινομένων, οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας μεταλλικών υλικών διακρίνονται σε τέσσερις χαρακτηριστικές περιπτώσεις, κατά στις οποίες:

- Η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης μεταβάλλεται χρονικά και αλλάζει πρόσημο σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής, η οποία βρίσκεται υπό συνθήκες **κόπωσης (fatigue)**.
- Η τιμή της επιβαλλόμενης τάσης παραμένει σταθερή με το χρόνο, αλλά η καταπόνηση της κατασκευής γίνεται σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και στο υλικό ενεργοποιούνται μηχανισμοί **ερπυσμού (creep)**
- Η κατασκευή λειτουργεί σε περιβάλλον με σχετικά υψηλή συγκέντρωση χημικών παραμέτρων οι οποίες συνεργούν στη **διάβρωση (corrosion)** του υλικού. [1]

#### **2.1.2.2. Μη καταστροφικοί έλεγχοι (ΜΚΕ)**

Οι **Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ)** αφορούν μεθόδους που εκτιμούν τη δομική ακεραιότητα των κατασκευών, χωρίς να επηρεάζουν τη λειτουργία τους. Μέσω των ΜΚΕ είναι δυνατό να προβλεφθεί με οικονομικό τρόπο, πιθανή αστοχία των υλικών, να εκτιμηθεί το εύρος και τη θέση εσωτερικών ρωγμών και να προσδιοριστούν πιθανές επιφανειακές ρωγματώσεις.

Οι τεχνικές των ΜΚΕ μπορούν επίσης να μετρήσουν τις διαστάσεις των εξεταζομένων δοκιμίων, να προσδιορίσουν, σε αυτά, μικροδομικές αλλαγές, διακυμάνσεις της χημικής σύστασης, των ιδιοτήτων τους και να εκτιμήσουν την εντατική κατάστασή του.

##### **2.1.2.2.1. Μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων**

Διαδεδομένες μέθοδοι ΜΚΕ είναι:

- Τα τασικά κύματα (διαμήκη, εγκάρσια, επιφανειακά κύματα Rayleigh, επιφανειακά κύματα σε υγρό)
- Τα διεισδυτικά υγρά
- Οι οπτικές μέθοδοι (θερμογραφία παθητική, θερμογραφία ενεργητική, επιθεώρηση με

γυμνό οφθαλμό, ραδιογραφία, ακτίνες-X)

- Τα δινορρεύματα
- Τα μαγνητικά σωματίδια [2]
- Οι μαγνητικές μετρήσεις (βρόχου υστέρησης, θορύβου Barkhausen, μαγνητικών ιδιοτήτων)
- Η μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας (παρακολούθηση ηλεκτρικού δυναμικού/ηλεκτρικής αντιστάσεως, χαρτογράφηση ηλεκτρικού δυναμικού/ηλεκτρικής αντιστάσεως)

Τα κοινά στοιχεία μεταξύ των ΜΚΕ περιλαμβάνουν:

1. Μια αξιόπιστη πηγή παροχής ενέργειας
2. Το δείγμα προς έλεγχο το οποίο θα αποδώσει πιθανές αστοχίες που υπάρχουν σε αυτό
3. Έναν ανιχνευτή (δηλαδή έναν αισθητήρα) ικανό να μετρήσει τις διακυμάνσεις των μετρούμενων κάθε φορά ιδιοτήτων
4. Ένα εύχρηστο λειτουργικό περιβάλλον για την καταγραφή και συγκέντρωση των πληροφοριών που συλλέγονται από τον ανιχνευτή. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν
5. Έναν εκπαιδευμένο χειριστή, ικανό να κατανοεί και να αξιολογεί τα αποτελέσματα που παρέχει η εκάστοτε μέθοδος

#### **2.1.2.2.2. Εφαρμογές ΜΚΕ**

Οι ΜΚΕ καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών εφαρμογών: αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, ιατρική κ.α. Ενδεικτικές εφαρμογές των ΜΚΕ, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, παρουσιάζονται στον πίνακα 2.2.

**Πίνακας 2.2:** Εφαρμογές των ΜΚΕ

ΜΕΘΟΔΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Τασικά κύματα	Έλεγχος πρόσφυσης σκυροδέματος στο υπέδαφος Έλεγχος πάχους δεξαμενών για διάβρωση Υπερηχογραφήματα
Διεσδυτικά υγρά	Έλεγχος κινητήρων αεροσκαφών
Οπτικές μέθοδοι	Έλεγχος σε συρματόσχοινα Έλεγχος δεξαμενών με θερμοκάμερες για πιθανές διαρροές
Μαγνητικά σωματίδια	Έλεγχος πυρηνικών εγκαταστάσεων Αισθητήρες δεινορευμάτων για έλεγχο διάβρωσης Έλεγχος σε συρματόσχοινα [3]
Ηλεκτρικές μετρήσεις	Ανίχνευση βλάβης δομικής επιστελέχωσης αεροσκαφών εκτός πτήσης ή/και κατά τη διάρκεια αυτής [4]
Μαγνητικές μετρήσεις	Έλεγχος ρωγματώσεων σε δομικούς χάλυβες Έλεγχος διάβρωσης και ρωγματώσεων σε ναυπηγικούς χάλυβες Έλεγχος τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές Έλεγχος ατελειών και ρωγματώσεων σε Duplex και TRIP χάλυβες

### 2.1.2.2.3. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα και λειτουργικές ιδιότητες ΜΚΕ

Οι προαναφερθείσες τεχνικές προσδιορισμού των παραμενουσών τάσεων παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Πίνακας 2.3) και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες λειτουργικές ιδιότητες (Πίνακας 2.4)

**Πίνακας 2.3:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΜΚΕ

Τεχνική	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Διάνοιξη οπής (Hole drilling)	Γρήγορη & απλή Εύκολα διαθέσιμη Φορητότητα του εξοπλισμού Για μεγάλο εύρος υλικών	Ημικαταστροφική Περιορισμένη ευαισθησία Περιορισμένη ανάλυση
Διάθλαση ακτίνων X (X ray diffraction)	Εύκολα διαθέσιμη Για μεγάλο εύρος υλικών Ακριβείς μετρήσεις	Βασικές μετρήσεις Για εργαστηριακή χρήση
Υπερηχητική (ultrasonic)	Γενικά διαθέσιμη Πολύ γρήγορη Χαμηλό Κόστος Φορητή	Περιορισμένη ανάλυση Μη ακριβή αποτελέσματα
Διάθλαση «σκληρών» ακτίνων X	Μεγάλη διεισδυτικότητα Απεικόνιση του προφίλ των τάσεων κατά βάθος	Τελείως εργαστηριακή Πολύ εξειδικευμένη

(hard X ray diffraction)	Πολύ γρήγορη	
Διάθλαση ακτίνας νετρονίων (neutron beam diffraction)	Εξαιρετική διεισδυτική ικανότητα των ακτίνων Τρισδιάστατη κατανομή τάσεων	Εντελώς εργαστηριακή Πολύ εξειδικευμένη
Μαγνητική (magnetic)	Πολύ γρήγορη Οικονομική Φορητή	Μόνο για έλεγχο σιδηρομαγνητικών υλικών Χαμηλή ανάλυση

Πίνακας 2.4: [5] Χαρακτηριστικά των ΜΚΕ

Τεχνική	Διείσδυση	Ανάλυση	Ακρίβεια	Σχόλια
Διάνοιξη οπής (Hole drilling)	1,2 x διάμετρο οπής	50μm βάθος	±50MPa	Ημικαταστροφική, Τύπου I
Διάθλαση ακτίνων X (X-ray diffracton)	<50μm (Al) <5μm (Ti)	1mm πλευρικά 20μm σε βάθος	±20MPa	Επιφανειακή Μη-Καταστροφική, Τύπου I , II, III
Διάθλαση «σκληρών» ακτίνων X	50μm (Al)	20μm πλευρικά 1mm σε	±10MPa	Μη-Καταστροφική, 2D ανάλυση, Τύπου I , II, III

(hard X-ray diffraction)		βάθος		
Διάθλαση ακτίνας νετρονίων (neutron beam diffraction)	200mm (Al) 30mm (Fe) 4mm (Ti)	500μm	±50MPa	Μη-Καταστροφική, 3D ανάλυση, Τύπου I , II, III
Υπερηχητική (ultrasonic)	>10cm	5mm	10%	Εξαρτάται από τη μικροδομή Τύπου I , II, III
Μαγνητική (magnetic)	10cm	1mm	10%	Εξαρτάται από τη μικροδομή Μόνο για μαγνητικά υλικά, Τύπου I , II, III

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

## 3.1. ΘΕΩΡΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

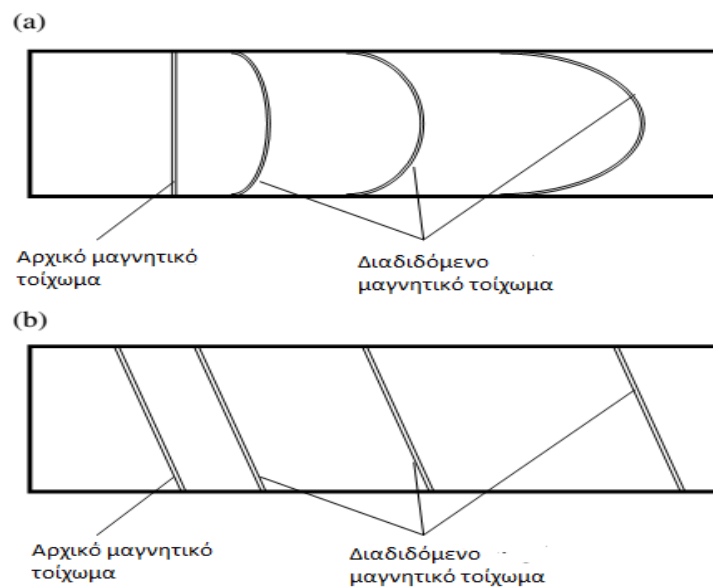
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα κομμάτι των ΜΚΕ το οποίο αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια είναι οι μετρήσεις μαγνητικών ιδιοτήτων διαφόρων μαγνητικών υλικών για τον προσδιορισμό τάσεων και πιθανών αστοχιών. Στη συνέχεια θα γίνει εκτενής περιγραφή των διαδεδομένων μεθόδων μαγνητικών ΜΚΕ.

Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό των σιδηρομαγνητικών υλικών, τα οποία υποδιαιρούνται σε πολυάριθμες μαγνητικές περιοχές, είναι η αλληλεπίδραση ενός εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου και της ίδιας της μαγνήτισής τους [6-11]. Ένα εξωτερικό πεδίο μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές των διαστάσεων ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, ένα φαινόμενο το οποίο ονομάζεται μαγνητοσυστολή [12,13]. Επίσης ένα εξωτερικό πεδίο τάσεων μπορεί να αλλάξει το διάνυσμα της μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πιεζομαγνητικό [14,15]. Και τα δύο φαινόμενα με τη μετατόπιση των τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών και την περιστροφή των μαγνητικών διπόλων. Οι διεργασίες αυτές αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση της εντατικής κατάστασης σιδηρομαγνητικών δομών στις διάφορες μεθόδους μαγνητικών μετρήσεων. Ως αποτέλεσμα, ένας μεγάλος αριθμός μη καταστροφικών μαγνητικών τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες, όπως οι μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης (MDL), ο μαγνητικός θόρυβος Barkhausen (MBN), η μαγνητοακουστική εκπομπή (MAE), μαγνητική ανισοτροπία επαγωγικής τάσης (SMA) και η μαγνητομεταλλική μνήμη (MMM) [16,17].

### 3.1.1. Δυναμική μαγνητικών τοιχωμάτων

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, οι οποίοι περιγράφονται είτε από τη διαδικασία κύρτωσης, είτε από την άκαμπτη κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Τοιχώματα **χαμηλής ενέργειας** διαδίδονται μέσω της διαδικασίας **κύρτωσης** (σχήμα 3.1(α)), ενώ τοιχώματα **υψηλής ενέργειας** διαδίδονται περισσότερο **άκαμπτα** (σχήμα 3.1(β)). Η διαδικασία κύρτωσης είναι πιθανότερο να συμβεί σε μαλακά

μαγνητικά υλικά, τα ποία είναι επιδεκτικότερα στη μαγνητιση, ενώ η άκαμπτη κίνηση λαμβάνει χώρα σε σκληρότερα μαγνητικά υλικά. Ο εκάστοτε μηχανισμός της κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων καθορίζει την παρουσία ή όχι μαγνητικής υστέρησης. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται στα μαγνητικά αισθητήρια στοιχεία και εξαρτάται κυρίως από τις ατέλειες που υπάρχουν στο μαγνητικό υλικό και το φαινόμενο αγκύρωσης των μαγνητικών τοιχωμάτων. Η δυναμική των μαγνητικών τοιχωμάτων χρησιμοποιείται για μικρές μετρήσεις πεδίου, καθώς και για μηχανικούς αισθητήρες που βασίζονται σε μικρές μετρήσεις πεδίου [18].



**Σχήμα 3.1:** Μηχανισμοί κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων: (α) Κίνηση με κύρτωση του μαγνητικού τοιχώματος (β) Άκαμπτη κίνηση μαγνητικού τοιχώματος

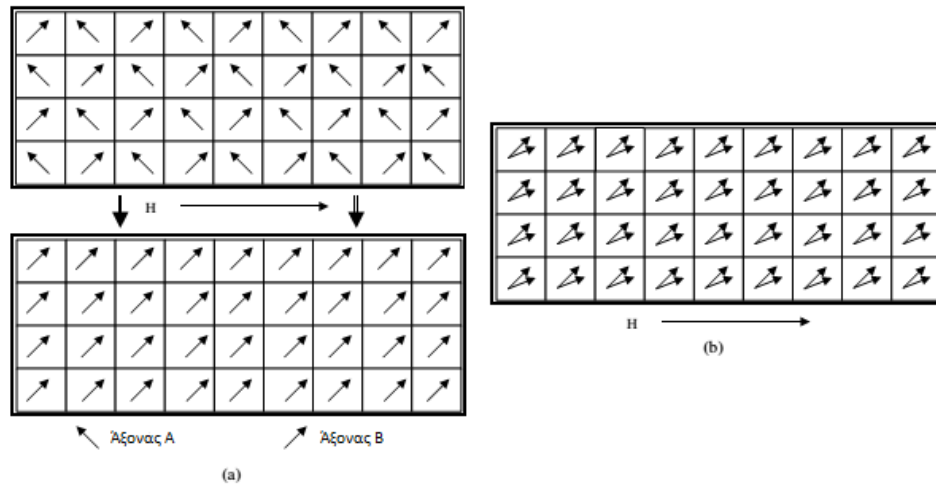
### 3.1.2. Δυναμική περιστροφής μαγνητικών περιοχών

Η περιστροφή των μαγνητικών διπόλων περιγράφεται ως μη-αναστρεπτή ή αναστρεπτή [19]. Προϋπόθεση της μη-αναστρεπτής περιστροφής είναι ο παράλληλος προσανατολισμός των μαγνητικών διπόλων στον εύκολο άξονα μαγνήτισης (σχήμα 3.2(α)). Η αναστρεπτή περιστροφή εμφανίζεται μετά μια μη-αναστρεπτή διαδικασία. Δεδομένου ότι, ο νέος εύκολος άξονας μαγνήτισης δεν είναι ο ίδιος με τον άξονα του εξωτερικού πεδίου, τα μαγνητικά δίπολα περιστρέφονται αντιστρεπτά προς τον άξονα του (σχήμα 3.2(β)). Και οι δύο διαδικασίες περιστροφής των μαγνητικών διπόλων σχετίζονται με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής.

Η υστέρηση της περιστροφής των μαγνητικών διπόλων, εξαιτίας της μη-αναστρεπτής διαδικασίας μαγνήτισης είναι υπεύθυνη για την παρουσία υψηλών μαγνητικών αλμάτων



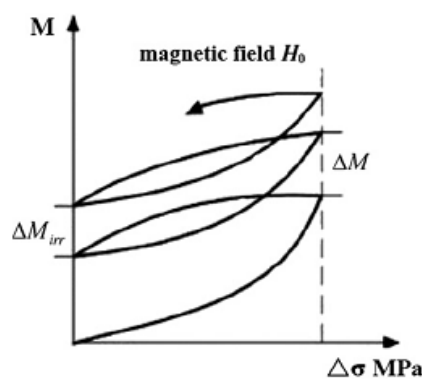
Barkhausen. Τόσο η μαγνητική υστέρηση, όσο και ο μαγνητικός θόρυβος επηρεάζουν την αβεβαιότητα του μαγνητικού αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της μαγνητικής απόκρισης [20].



**Σχήμα 3.2:** Δυναμική μαγνητικών περιοχών (a) Δύο διακριτοί άξονες ανισοτροπίας και κατά συνέχεια μη-αντιστρεπτή περιστροφή λόγω της επιβολής μαγνητικού (b) Αντιστρεπτή περιστροφή μαγνητικών περιοχών μετά την μη-αντιστρεπτή διαδικασία μαγνήτισης

### 3.1.3. Θεωρία σύζευξης μαγνήτισης-τάσης

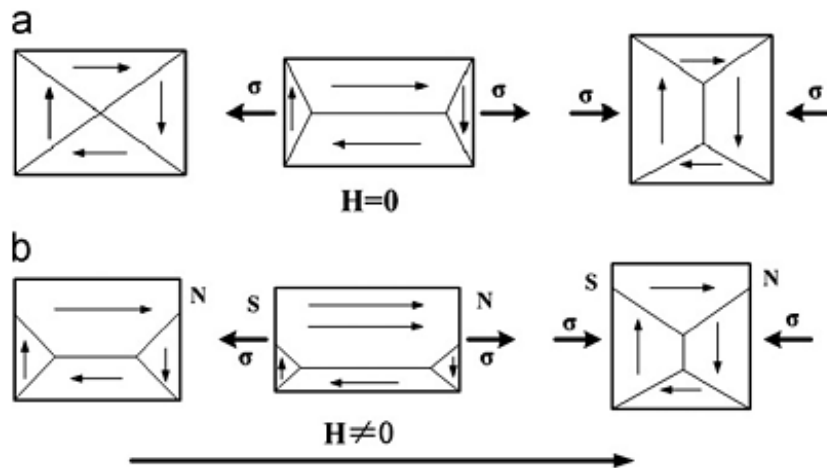
Είναι γνωστό ότι οι μαγνητικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών εξαρτώνται από την επίδραση δυναμικών ή στατικών φορτίσεων. Για παράδειγμα, οι τιμές του συνεκτικού πεδίου  $H_c$  και της μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu$  των σιδηρομαγνητικών υλικών μπορεί να αλλάξει υπό την εφαρμογή τασικού πεδίου, ακόμα και εντός της ελαστικής περιοχής παραμόρφωσης [21]. Υπό την επίδραση κυκλικών φορτίσεων (σχήμα 3.3), η υπερνίκηση των μαγνητικών τοιχωμάτων των σημείων αγκύρωσης οδηγεί για μια μη-αναστρεπτή διαφορά μαγνήτισης  $\Delta M_{irr}$  [22].



**Σχήμα 3.3:** Διατήρηση της μη αναστρεπτής συνιστώσα μαγνητισμού ( $\Delta M_{irr}^{\sigma}$ ) σε κάθε κύκλο

φόρτισης.

Από μικροδομικής άποψης, ένα σιδηρομαγνητικό δείγμα αποτελείται από πολλές μαγνητικές περιοχές. Κάθε περιοχή είναι  $10^{-8}$ - $10^{-12}$  m<sup>3</sup> σε όγκο και περιλαμβάνει περίπου  $10^{12}$  -  $10^{15}$  άτομα. Οι μαγνητικές ροπές διανέμονται τυχαία στην αρχική κατάσταση, και δεν εμφανίζεται μαγνήτιση στη μακρο-κλίμακα. Όταν εφαρμόζεται πεδίο σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, η παρουσία εφελκυστικών τάσεων τείνει να προσανατολίζει τα μαγνητικά δίπολα παράλληλα στη διεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου σε ένα θετικά μαγνητοσυστολικό υλικό, ενώ η παρουσία θλιπτικών τείνει να τα προσανατολίζει κάθετα στη διεύθυνση επιβολής της τάσεως [23]. Στο σχήμα 3.4α απεικονίζεται μια συμμετρική δομή μαγνητικών περιοχών, στην οποία το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι  $H=0$ . Μόνο στην περίπτωση που εφαρμόζεται πεδίο  $H \neq 0$  (σχήμα 3.4β), η συμμετρική αυτή δομή δεν διατηρείται και το δείγμα μαγνητίζεται. Έτσι, η παρουσία ενός εξωτερικού πεδίου (π.χ. ένα τεχνητό πεδίο ή το μαγνητικό πεδίο της Γης) είναι απαραίτητη προϋπόθεση για όλες τις μαγνητικές τεχνικές ΜΚΕ.



**Σχήμα 3.4:** Το μαγνητικό πεδίο και η μηχανική τάση επηρεάζουν την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Οι εφελκυστικές τάσεις προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα παράλληλα στη διεύθυνση των τάσεων, ενώ οι θλιπτικές τάσεις κάθετα στη διεύθυνση αυτή.

### 3.1.4. Βασικές εξισώσεις μαγνητο-ελαστικής συμπεριφοράς

Η κλασική μαγνητο-ελαστική συμπεριφορά ενός σιδηρομαγνητικού υλικού περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις [24]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_\sigma + \varepsilon_H = S\sigma + D^\sigma H \\ B = B_\sigma + B_H = D^H \sigma + \mu H \end{cases} \quad (1)$$

όπου  $S$  είναι ο τανυστής των μητρών δυσκαμψίας,  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα,  $D^\sigma$  συντελεστής μαγνήτισης-ελαστικότητας και το  $D^H$  ο συντελεστής ελαστικότητας-μαγνήτισης.  $\sigma$  και  $H$  είναι τανυστές της τάσης και του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα. Το  $\epsilon$  και το  $B$  υποδηλώνουν τανυστή παραμόρφωσης και τανυστή δρώντος μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα.  $\epsilon_\sigma$  και  $\epsilon_H$  είναι οι συνιστώσες της παραμόρφωσης που προκαλείται από την τάση και το μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα. Τα  $B_\sigma$  και  $B_H$  υποδηλώνουν τις συνιστώσες μαγνήτισης που προκαλείται από την τάση και μαγνητικό πεδίο, αντίστοιχα.

### 3.1.5. Άλλες εξισώσεις μαγνητο-ελαστικής συμπεριφοράς

Για ένα ιστροπικό σιδηρομαγνητικό υλικό, ένας αριθμός αντιπροσωπευτικών μακρομοντέλων έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να περιγράψουν το μαγνητομηχανικό φαινόμενο [19-21]:

- $$\left(\frac{d\lambda}{dH}\right)_\sigma = \left(\frac{dB}{d\sigma}\right)_H \quad (2)$$

$(d\lambda/dH)_\sigma$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητοσυστολής με το εφαρμοζόμενο πεδίο υπό σταθερή τάση  $\sigma$  και  $(dB/d\sigma)_H$  είναι η αλλαγή της μαγνητικής επαγωγής ως προς την τάση υπό σταθερό εξωτερικό πεδίο. Η εξίσωση 2 ποσοτικοποιεί τη σχέση μεταξύ του φαινομένου της μαγνητοσυστολής και του μαγνητο-ελαστικού φαινομένου.

- $$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{1}{k^2}\sigma(1-c)(M_{an} - M_{irr}) + \frac{dM_{an}}{d\sigma} \quad (3)$$

Η εξίσωση 3 περιγράφει την εξάρτηση του μαγνητισμού του υλικού από την επιβαλλόμενη τάση, καθώς και την ανυστεριτική μαγνήτιση  $M_{an}$  (δηλαδή την ιδανική περίπτωση μαγνήτισης ενός υλικού χωρίς να υπάρχουν απώλειες) και την  $M_{irr}$  (η μη αναστρέψιμη συνιστώσα της μαγνήτισης). Οι  $k$  και  $c$  είναι σταθερές του υλικού.

- $$E_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda\sigma \cos^2\theta \quad (4)$$

Η εξίσωση 4 απεικονίζει την εξάρτηση της ενέργειας τάσης ( $E_\sigma$ ) προς την τάση ( $\sigma$ ), τη μαγνητοσυστολή όγκου ( $\lambda$ ) και τη γωνία μεταξύ της εφαρμοζόμενης τάσης και του πεδίου ( $\theta$ ).

Μαγνητικό-ελαστικό-πλαστικό μοντέλο για την εξέταση των διαφόρων μηχανισμών της ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης από τους Wang και την ομάδα του:

- Δύναμη μαγνητισμού:  $M = M_s [\coth(\frac{H_{total}}{\mu_0 \alpha}) - \frac{\mu_0 \alpha}{H_{total}}]$
- Δρον πεδίο:  $H_{total} = H_H + H_\sigma^e + H_\sigma^p$
- Μαγνητο-επαγωγικό πεδίο:  $H_H = H + \alpha M$
- Ελαστο-επαγωγικό δρον πεδίο:  $H_\sigma^e = \frac{3\sigma_{eq} \cos^2 \beta}{\mu_0} \times [(\lambda_{11} + \lambda_{12}\sigma) + 2(\lambda_{21} + \lambda_{22}\sigma)M^2]M$
- Ψευδο-επαγωγικό πεδίο:  $H_\sigma^p = -k|\varepsilon^p|$  όπου  $k = \frac{1}{\mu_0} \frac{b(\varepsilon_\pi)}{2M_s}$  (5)

Στην εξίσωση 5,  $M_s$  είναι η μαγνήτιση κορεσμού  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού μια βασική παράμετρος του πεδίου που αντιπροσωπεύει την σύζευξη δια μέσω των μαγνητικών περιοχών.  $\sigma_{eq}$  είναι η ισοδύναμη τάση για μια σύνθετη κατάσταση τάσης,  $\beta$  η γωνία μεταξύ της μαγνήτισης και των κατευθύνσεων ισοδύναμων τάσεων.  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{21}$  και  $\lambda_{22}$  είναι οι συντελεστές μαγνητοσυστολής,  $e^p$  η πλαστική παραμόρφωση,  $\langle \varepsilon_\pi \rangle$  η μέση ενέργεια ακύρωσης της περιοχής για μαγνητικό τοίχωμα  $180^\circ$  και  $b$  είναι σταθερά του υλικού [25].

Παρόλο που οι εξισώσεις Wang έχουν αποδειχτεί πειραματικά, παραμένει ακόμα υπό διερεύνηση κατά πόσο μπορούν να εκφράσουν όλα τα φερρομαγνητικά υλικά. Σαφώς, η αποσύζευξη στα μοντέλα σύζευξης μαγνήτισης τάσης οδηγεί σε ένα αντικρουόμενο συμπέρασμα: ένα σιδηρομαγνητικό δείγμα μπορεί να μαγνητιστεί από την τάση, ακόμη και αν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο, το οποίο έρχεται σε αντίθεση με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να προταθούν περισσότερο πειστικά μοντέλα, ώστε να έχουμε μια ενδελεχή κατανόηση της επίδρασης της σύζευξης μαγνήτισης και τάσης των σιδηρομαγνητικών υλικών

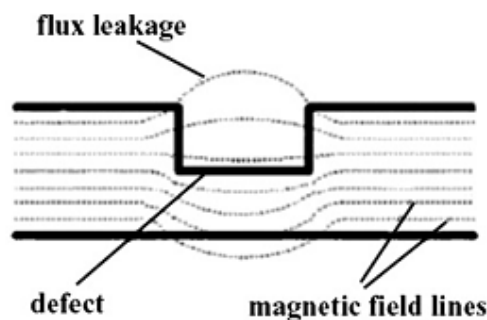
## 3.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΜΚΕ

### 3.2.1. Μαγνητική διαρροή (Magnetic flux leakage, MFL)

Ως μία κλασσική μέθοδος ΜΚΕ, η αρχή της τεχνικής MFL είναι σχετικά απλή. Όταν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, οποιαδήποτε γεωμετρική ασυνέχεια στο υπό έλεγχο αντικείμενο θα εκτρέψει το πεδίο εκτός του υλικού (σχήμα 3.5). Η μαγνητική διαρροή παρακολουθείται από έναν αισθητήρα μαγνητικού πεδίου και να χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν οι διαστάσεις της δομικής ατέλειας. Αν και το

φαινόμενο MFL είναι εύκολα κατανοητό, ο σχεδιασμός και η ανάλυση των MFL συστημάτων περιλαμβάνει περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πεδίου διέγερσης, της διαρροής ροής και των ατελειών στο υλικό.

Η διέγερση της μαγνητικής ροής θα πρέπει να είναι υψηλή και ομοιογενής, ώστε να επιτρέπεται η μεταβολή της μαγνητικής ροής να συμβεί στη θέση μιας δομικής ατέλειας. Οι αισθητήρες πρέπει να βρίσκονται κοντά στη θέση, στην οποία οι αλλαγές στην πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου να είναι διακριτές.

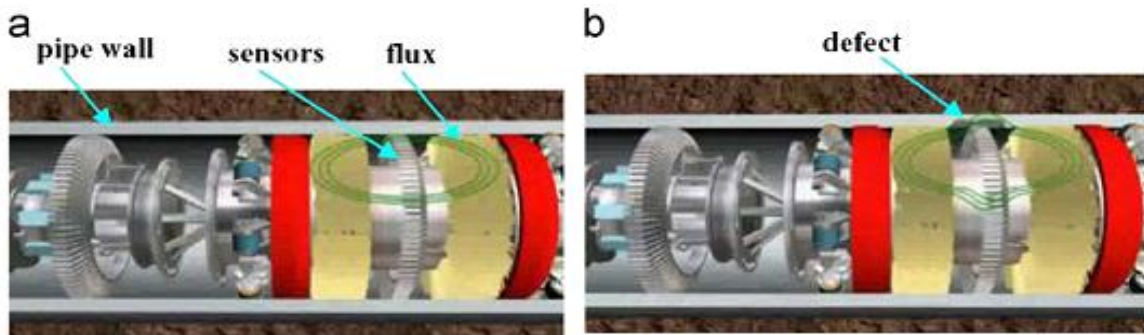


**Σχήμα 3.5:** Απεικόνιση της διαρροής της μαγνητικής ροής, λόγω μιας γεωμετρικής ασυνέχειας

Τα δεδομένα της δειγματοληψίας MFL αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας έναν ενσωματωμένο σύστημα αποθήκευσης δεδομένων, και στη συνέχεια αναλύονται από εκπαιδευμένους αναλυτές δεδομένων.

### 3.2.1.1. Εφαρμογή του MFL

Μια επιτυχής εφαρμογή της τεχνικής MFL είναι η συσκευή, που ονομάζεται "pipeline-rig", η οποία έχει αναπτυχθεί για να ανιχνεύει την διάβρωση και απώλεια μετάλλου σε αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου [26-28]. Το σχήμα 3-6 αναπαριστά τον αισθητήρα " pipeline-rig ". Ένας ισχυρός μόνιμος μαγνήτης δημιουργεί το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο για να μαγνητίσει ως τον κορεσμό το σωλήνα. Εάν το τοίχωμα του σωλήνα είναι τέλειο δεν θα διαρρεύσει η μαγνητική ροή (σχήμα 3.6α). Ωστόσο, η πιθανότητα διαρροής της μαγνητικής ροής (σχήμα 3.6β) εξαιτίας μιας ατέλειας στο τοίχωμα του σωλήνα ανιχνεύεται από μια σειρά περιφερειακά καταναμεμένων αισθητηρίων πάνω σε αυτόν.

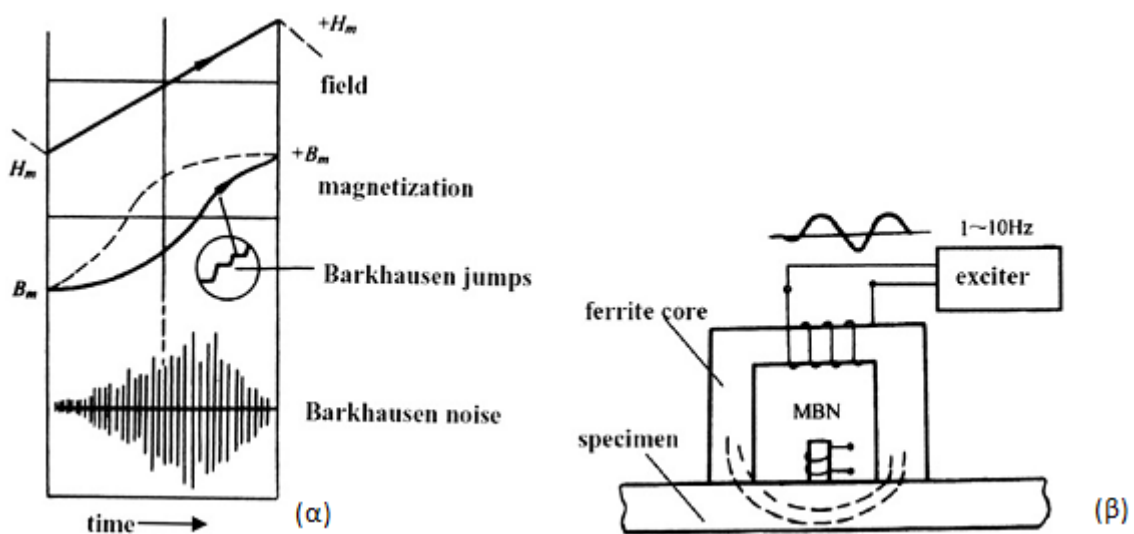


Σχήμα 3.6: Δομή του αισθητήρα “pipeline-pig” (α) χωρίς και (β) με διαρροή μαγνητικής ροής

### 3.2.2. Μαγνητικός θόρυβος Barkhausen

Το 1919 ο Barkhausen [29] διαπίστωσε ότι, όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται από ένα αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο, παράγεται θόρυβος σε ένα πηνίο τοποθετημένο κοντά στο υλικό. Ο μαγνητικός θόρυβος έχει τη μορφή τασικών παλμών (σχήμα 3.7(α)). Ένας τυπικός αισθητήρας Barkhausen δίνεται στο σχήμα 3.7β.

Η ανάπτυξη του μαγνητικού θορύβου Barkhausen (MBN) οφείλεται στην απότομη κίνηση των  $180^\circ$  μαγνητικών τοιχωμάτων κατά μήκος όλων των τοπικών σημείων αγκύρωσης [30-32]. Το σήμα MBN δημιουργείται λόγω της μη αναστρέψιμης κίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων των μαγνητικών περιοχών. Το εύρος εξαρτάται από τις παραμένουσες και εφαρμοζόμενες τάσεις. Έτσι, είναι μια χρήσιμη ΜΚΕ τεχνική για την ανίχνευση της παρουσίας των παραμενουσών και εφαρμοζόμενων τάσεων σε σιδηρομαγνητικά δείγματα. Η τεχνική MBN χρησιμοποιείται επίσης και για τον προσδιορισμό του εύκολου άξονα μαγνήτισης [33].



Σχήμα 3.7: (α) Ανάπτυξη του θορύβου Barkhausen κατά τη διάρκεια της μαγνήτισης του δείγματος και (β) απεικόνιση ενός αισθητήρα MBN

### 3.2.2.1. Ιδιομορφίες στα πειραματικά δεδομένα στις δοκιμές MBN

Σε χάλυβες με θετική μαγνητοσυστολική σταθερά, τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι η ένταση του MBN αυξήθηκε στη διεύθυνση της μαγνήτισης, λόγω της παρουσίας εφελκυστικών τάσεων εντός της ελαστικής περιοχής παραμόρφωση, ενώ μειώθηκε λόγω της παρουσίας θλιπτικών τάσεων [34-41]. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των διαφορετικών επιδράσεων των εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στην κίνηση των τοιχωμάτων [42-44]: η εφελκυστική τάση αυξάνει τον αριθμό των κινητών 180° μαγνητικών τοιχωμάτων, αναπροσανατολίζει τις περιοχές, ενώ η θλιπτική τάση εμποδίζει τη μετακίνηση των 180° τοιχωμάτων, μειώνοντας τον αριθμό τους.

Η πλαστική παραμόρφωση οδηγεί σε σημαντική αύξηση της πυκνότητας των διαταραχών και αλλάζει την ενέργεια του μαγνητικού τοιχώματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση της πλαστικής παραμόρφωσης στα σήματα MBN είναι περισσότερο πολύπλοκη από εκείνη της ελαστικής παραμόρφωσης [45-47]. Μια τέτοια πολυπλοκότητα αντανακλάται ιδιαίτερα από ορισμένους αντιφατικούς ισχυρισμούς που αναφέρθηκαν σχετικά με την εξάρτηση των MBN σημάτων από την πλαστική παραμόρφωση. Για παράδειγμα, οι περισσότερες μελέτες ανέφεραν συνεχή μείωση του θορύβου Barkhausen, όσο αυξάνεται η πλαστική παραμόρφωση [48-53], ενώ στην άλλες μελέτες παρατηρήθηκε μια αύξηση της περιοχής χαμηλής πλαστικής παραμόρφωσης που ακολουθείται από μια μείωση στην περιοχή υψηλής πλαστικής παραμόρφωσης[54-58].

Μελετώντας την επίδραση την κυκλικής φορτίσης στο σήμα MBN, οι Kettunen και Ruuskanen [59] μέτρησαν τη μαγνητική απόκριση δύο δομικών χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα υπό συνθήκες κυκλικών θλιπτικών τάσεων. Διαπιστώθηκε ότι το σήμα MBN αυξήθηκε αρχικά και στη συνέχεια σταθεροποιήθηκε χωρίς μεγάλες μεταβολές μέχρι την τελική αστοχία των δειγμάτων. Οι Karjalainen και Moilanen [60] μελετώντας δείγματα μαλακού χάλυβα υπό σταθερή παραμόρφωση καμπτικής κόπωσης, απέδειξαν ότι το συνολικό πλάτος του σήματος μειώθηκε κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση του σήματος πριν την αστοχία.

Ο Fujiya και η ομάδα του [61] εξέτασαν τις μεταβολές στο σήμα MBN σε πειράματα χαμηλών κύκλων κόπωσης σε μαλακούς χάλυβες. Τόνισαν ότι το πλάτος του σήματος MBN μειωνόταν συνεχώς κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτωση και δεν εμφάνισε καμία ιδιαίτερη αλλαγή στο πλάτος του, πριν από την αστοχία. Οι Lindgren και Lepisto [62] χρησιμοποίησαν μια συνεχή μέθοδο μέτρησης για να ελέγξουν το σήμα MBN σε όλα τα

στάδια της κόπωσης. Παρατήρησαν ότι **το μέγιστο σήμα MBN αυξάνονταν με την αύξηση της έντασης της τάσης, αλλά η ελάχιστη τιμή του παρέμενε σταθερή.**

Οι **αλλαγές του πλάτους MBN** ως συνάρτηση των κύκλων κόπωσης βρέθηκαν να είναι **διαφορετικές** μεταξύ των δειγμάτων **μαλακού χάλυβα** και **χάλυβα υψηλής αντοχής** [63-67]. Αυτό συμβαίνει είναι επειδή τα σήματα MBN είναι πολύ ευαίσθητα σε ότι αφορά στη μικροδομή σιδηρομαγνητικών υλικών [68,69] και στα συστήματα μέτρησης [70,71].

### 3.2.3. Μαγνητική μνήμη μετάλλων

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, προτάθηκε μια τεχνική παθητικού μαγνητικού ΜΚΕ η οποία ονομάστηκε τεχνική Μαγνητικής Μνήμης Μετάλλων (MMM) [72,73]. Το πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι αντί ενός τεχνητού ισχυρού πεδίου, σημαντικό ρόλο παίζει το μαγνητικό πεδίο της Γης. Επίσης, η τεχνική MMM και εμφανίζει και άλλα ελκυστικά πλεονεκτήματα:

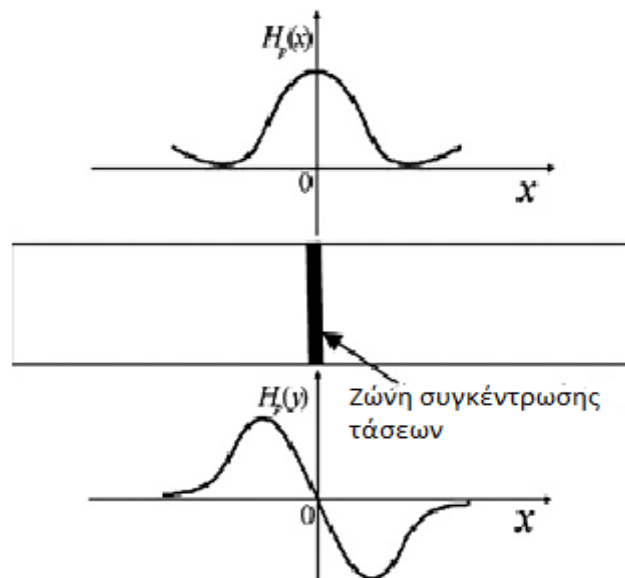
- είναι αποτελεσματική μέθοδος για την εκτίμηση της πρόιμης βλάβη και της ανάπτυξης γεωμετρικών ατελειών
- έχει βάθος ανίχνευσης έως λίγων χιλιοστών σε σύγκριση με τα την τεχνική περίθλασης ακτίνων-X που το βάθος διεύθυνσης της δέσμης είναι της τάξεως των μm.
- η λειτουργία της είναι απλή και ταχύτερη.

Ο φυσικός μηχανισμός της τεχνικής MMM περιγράφεται στις αναφορές [74-77]. Υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου της Γης και μηχανικού φορτίου, σήματα διαρροής μαγνητικής ροής του ίδιου του υλικού (Self-Magnetic Flux Leakage-SMFL) παράγονται στις ζώνες συγκέντρωσης τάσεων όπου η εφαπτομενική συνιστώσα SMFL  $H_p(x)$  φτάνει στο μέγιστο και η κανονική συνιστώσα  $H_p(y)$  αλλάζει πολικότητα και αποκτά μηδενική τιμή (σχήμα. 3.8). Η μαγνητική κατάσταση εξακολουθεί να διατηρείται ακόμη και εάν το φορτίο αφαιρεθεί. Ως εκ τούτου, οι ζώνες συγκέντρωσης τάσεων μπορούν να ανιχνευθούν με μέτρηση των σημάτων SMFL πάνω της επιφάνειας της υπό έλεγχο δομής. Από μικροδομικής απόψεως, αυτό οφείλεται στο μη αναστρέψιμο προσανατολισμό των μαγνητικών διπόλων, που προκαλούνται από πλαστική παραμόρφωση στη μέγιστη ζώνη συγκέντρωσης τάσης.

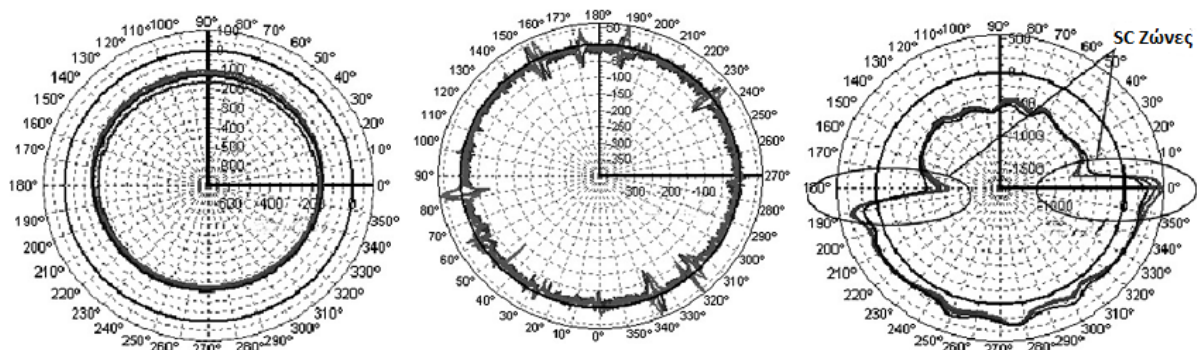
Διάφορες εφαρμογές αυτής της τεχνικής έχουν αναφερθεί π.χ. για διάγνωση της κατάστασης των σωλήνων φυσικού αερίου και πετρελαίου, για σιδηροτροχιές, τροχούς τουρμπινών, δοχεία πίεσης κ.α. [74]. Στο σχήμα 3.9 απεικονίζεται η κανονική της συνιστώσας  $H_p(y)$  από τρεις μαγνητικούς δακτυλίους. Το πολύ χαμηλότερο πλάτος της  $H_p(y)$  στον αριστερό



δακτύλιο σημαίνει ότι είναι σε κατάσταση “καλής λειτουργίας”. Ωστόσο, το πολύ υψηλότερο πλάτος της  $H_p(y)$  στο δεξί δακτύλιο δείχνει ότι είναι σοβαρά φθαρμένος. Επιπλέον, τα αποτελέσματα δείχνουν τις πιθανές θέσεις της ζώνης συγκέντρωσης τάσεων (Stress Concentration-SC), όπως επισημαίνεται στη δεξιά εικόνα του σχήματος 3.7.



**Σχήμα 3.8:** Σχηματική αναπαράσταση των SMFL κατανομών στη ζώνη συγκέντρωσης τάσης. Η  $H_p(x)$  φθάνει το μέγιστο και η κανονική συνιστώσα  $H_p(y)$  είναι μηδενική στη μέγιστη ζώνη συγκέντρωσης τάσης.



**Σχήμα 3.9:** Έλεγχος των αποτελεσμάτων της κανονικής συνιστώσας  $H_p(y)$  από τρεις δακτυλίους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αριστερός δακτύλιος είναι σε καλή κατάσταση λειτουργίας και ο δεξιός έχει υποστεί σοβαρές φθορές

Η τεχνική MMM είναι κατάλληλη για πολλές μηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο, ως νέα μέθοδος ελέγχου, εξακολουθεί να χρειάζεται ένα μεγάλο αριθμό βελτιώσεων. Ένα εξ αυτών

είναι η απαίτηση ακριβέστερων και ποιοτικότερων κριτηρίων. Μέχρι σήμερα η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται μόνο ως ποιοτική μέθοδος ελέγχου για την ανίχνευση πιθανών επικίνδυνων θέσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα συμπεράσματα ερευνών, ώστε να γίνει αντιληπτή η συσχέτιση μεταξύ του σήματος SMFL και των δομικών χαρακτηριστικών.

Ο Dong και η ομάδα του [78] μέτρησε το σήμα SMFL για μια σειρά χαλύβων τύπου 18CrNiWA, υπό την επίδραση εφελκυστικών τάσεων. Με την **αύξηση της τάσης εφελκυσμού** κατά την διάρκεια της **ελαστικής παραμόρφωσης**, οι τιμές του σήματος SMFL αναπτύσσονται **αριστερόστροφα**, ενώ **στο στάδιο της πλαστικής παραμόρφωσης συγκεντρώνεται τοπικά**.

Ο Wang και η ομάδα του [79,80] εκτέλεσαν αριθμητικές προσομοιώσεις των σημάτων SMFL, χρησιμοποιώντας ένα αναθεωρημένο μαγνητικό μοντέλο, όπου παρουσιάζονται κρίσιμοι παράγοντες (π.χ. το μέγεθος, η θέση και η πυκνότητα της τοπικής πλαστικής ζώνης και οι τιμές lift-off του αισθητήρα) που επηρεάζουν το σήμα SMFL.

Η ομάδα του Yao [81] επιβεβαίωσε πειραματικά ότι, σε δείγματα Q235 χάλυβα, το σήμα SMFL και η βάθμωσή του διαφοροποιούνταν σημαντικά κατά τη μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική παραμόρφωση. Ωστόσο, καμία αλλαγή δεν παρατηρούνταν κατά τη διάρκεια ολόκληρης της θλιπτικής φόρτισης. Για την εξήγηση μιας τέτοιας μαγνητικής συμπεριφοράς έλαβαν υπόψιν τους διαφορετικούς μηχανισμούς μετακίνησης των μαγνητικών τοιχωμάτων, όταν εφαρμόζονται εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία.

Ο Shi με την ομάδα του [82] μελετώντας δείγματα 18CrNi4A χάλυβα υπό συνθήκες κόπωσης, μετρήσαν το σήμα SMFL και τη βάθμωσή του εξέτασαν την επίδραση του τοπικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσης στους ελέγχους αυτούς.

Η ομάδα του Leng [83] έλεγξε το σήμα SMFL σε κυκλικές καμπτικές επιφορτίσεις για χάλυβα 18CrNi4A. Τα πειραματικά αποτελέσματα εξηγούνται ποιοτικά από το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Jiles [84]. Ο Wilson και η ομάδα του [85] εισήγαγαν ένα νέο τριαξονικό μαγνητικό αισθητήρα, για να επιβεβαιώσουν ότι η παράλληλη συνιστώσα  $B_x$  σχετίζεται περισσότερο με την εφαρμοζόμενη τάση από ό,τι η κάθετη συνιστώσα  $B_z$ .

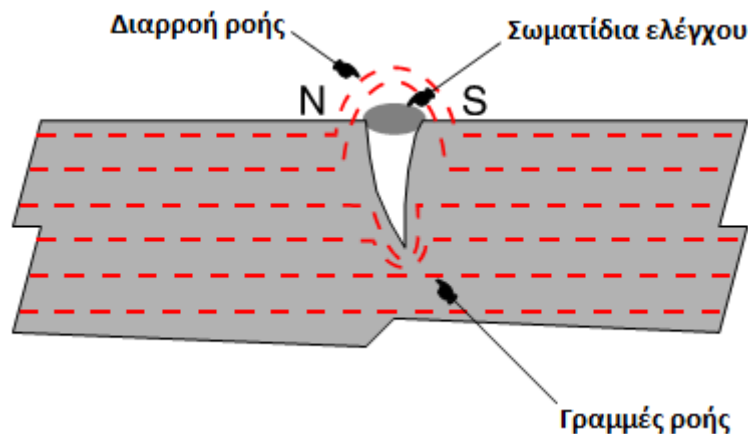
Οι Roskosz και Gawrilenko [86] παρουσίασαν περαιτέρω πειραματικές και αριθμητικές αναλύσεις της κατανομής της SMFL σε δείγματα με εγκοπές, υπό την επιβολή φορτίου.

Η τεχνική MMM, αν και έχει λάβει σημαντική προσοχή κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, εξακολουθεί να χρειάζεται περαιτέρω βελτιώσεις, για τους ακόλουθους λόγους:

1. Έλλειψη φυσικών μοντέλων για την ποσοτικοποίηση των σχέσεων μεταξύ του σήματος SMFL και της πλαστικής παραμόρφωσης.
2. Η έλλειψη ποσοτικών κριτηρίων στη μελέτη των χαρακτηριστικών των γεωμετρικών ατελειών [87].

### 3.2.4. Μαγνητικά σωματίδια

Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την ανίχνευση ασυνεχειών, τόσο στην επιφάνεια, όσο και κοντά σε αυτή. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μαγνητικά υλικά, κυρίως φερριτικούς χάλυβες. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της μεθόδου ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια.



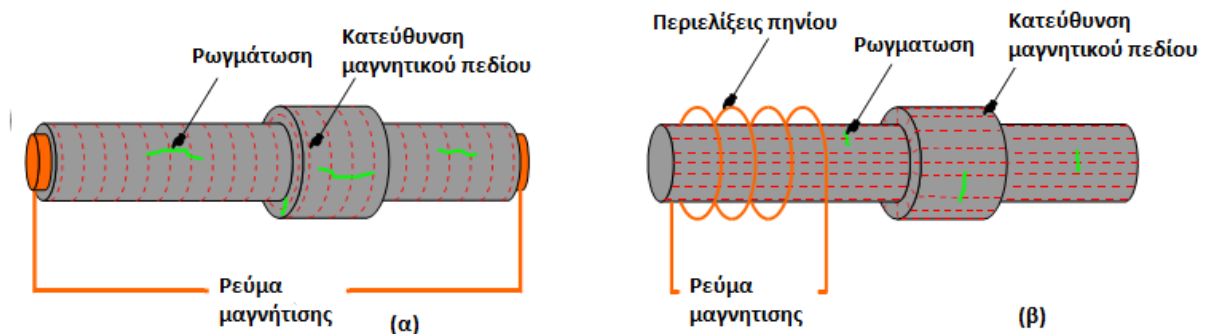
**Σχήμα 3.10:** Απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια

Η αρχή λειτουργίας του ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια είναι η δημιουργία μαγνητικής ροής στο υπό εξέταση αντικείμενο, μέσω των γραμμών μαγνητικής ροής που εκτείνονται κατά μήκος της επιφάνειας του δοκιμίου, κάθετα προς την πιθανή γεωμετρική ατέλεια. Στα σημεία που οι μαγνητικές γραμμές ροής προσεγγίζουν μια ασυνέχεια, θα αποκλίνουν. Η ακμή της ρωγμής δημιουργεί τοπικούς μαγνητικούς πόλους. Αυτοί έχουν τη δύναμη να προσελκύσουν πολύ λεπτά σωματίδια μαγνητικού υλικού, όπως ρινίσματα σιδήρου. Συνήθως, αυτά τα σωματίδια είναι οξειδία του σιδήρου με εύρος μεγέθους από 20 έως 30  $\mu\text{m}$  και αιωρούνται σε ένα υγρό το οποίο παρέχει στα σωματίδια κινητικότητα πάνω στην επιφάνεια του υπό έλεγχο δοκιμίου, βοηθώντας τη μετακίνησή τους προς τις ακμές της ρωγμής. Ωστόσο, τα σωματίδια σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να εναποτεθούν και σε μορφή ξηρής σκόνης.

Τα σωματίδια μπορεί να είναι κόκκινα ή μαύρα οξειδία, ή μπορούν να επικαλυφθούν με μια

φθορίζουσα στο υπεριώδες φως ουσία. Στόχος, είναι να καταστεί όσο το δυνατότερο εμφανής η αντίθεση μεταξύ ρωγμής και υλικού βάσης.

Η συγκεκριμένη τεχνική δεν ανιχνεύει μόνο τις ατέλειες που συνήθως δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, αλλά καθιστά επίσης εύκολα ορατές τις ατέλειες που υπό άλλες συνθήκες θα απαιτούσαν προσεκτική εξέταση της επιφάνειας. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι παραγωγής της μαγνητικής ροής στο υπό έλεγχο δείγμα, εκ των οποίων η πιο απλή είναι η παρουσία ενός μόνιμου μαγνήτη στην επιφάνεια. Δυστυχώς, η μέθοδος αυτή δεν χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια, λόγω της κακής επαφής και της εξασθένησης της μαγνητικής δύναμης. Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζονται δύο διατάξεις για ανίχνευση διαμήκων, περιφερειακών και εγκάρσιων ατελειών.



**Σχήμα 3.11:** Σχηματική αναπαράσταση διάταξης για την ανίχνευση (α) διαμήκων στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου γεωμετρικών ατελειών (εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα του δοκιμίου) (β) εγκάρσιων και περιφερειακών στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου γεωμετρικών ατελειών (με χρήση πηνίου)

### 3.2.4.1. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου μαγνητικών σωματιδίων

#### Πλεονεκτήματα:

1. Η απλότητα της λειτουργίας και της εφαρμογής της μεθόδου
2. Ποσοτική μέθοδος
3. Μπορεί να είναι αυτοματοποιημένη

#### Μειονεκτήματα:

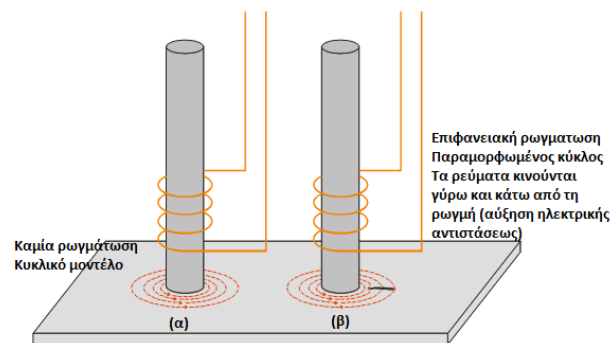
1. Εφαρμόζεται μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά.
2. Περιορίζεται στις ατέλειες που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν
3. Δεν εγγυάται τη μη αστοχία του υλικού εάν η μέθοδος ελέγχου δεν έχει πραγματοποιηθεί σωστά ή δεν έχει ανιχνεύσει βλάβες

### 3.2.5. Δινορεύματα

Οι κύριες εφαρμογές της τεχνικής δινορευμάτων είναι η ανίχνευση επιφανειακών ή υπο-επιφανειακών ρωγματώσεων, η μέτρηση της αγωγιμότητας και του πάχους επικαλύψεων. Η τεχνική είναι ευαίσθητη στην αγωγιμότητα του υλικού, στη διαπερατότητα και στις διαστάσεις του δοκιμίου.

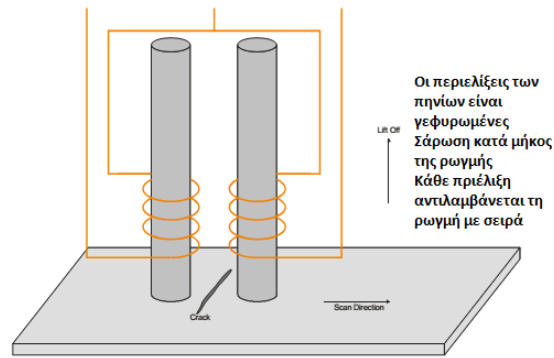
Δινορεύματα μπορούν να παραχθούν σε οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό το οποίο υποβάλλεται σε ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (η συχνότητα κυμαίνεται συνήθως από 10Hz έως 10MHz). Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργείται με την εφαρμογή εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα πηνίο. Οι περιελίξεις του σύρματος του πηνίου μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ 10 και 500. Το μέγεθος των δινορευμάτων που παράγονται στο δοκίμιο εξαρτάται από την αγωγιμότητα, τη διαπερατότητα και τη γεωμετρία του. Οποιαδήποτε αλλαγή στο υλικό ή στη γεωμετρία του μπορεί να ανιχνευθεί από το πηνίο διέγερσης, σαν μια αλλαγή στην αντίσταση του πηνίου.

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται μια απλή διάταξη του αισθητήρα των δινορευμάτων. Ένα πηνίο το οποίο έχει τυλιχθεί γύρω από μια φερριτική ράβδο τοποθετείται κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου που πρόκειται να ελεγχθεί. Η παρουσία μιας ρωγμής στην επιφάνεια του δοκιμίου, διαταράσσει τη φυσική ροή των δινορευμάτων και μεταβάλλει τη σύνθετη αντίσταση του πηνίου διεγέρσεως.

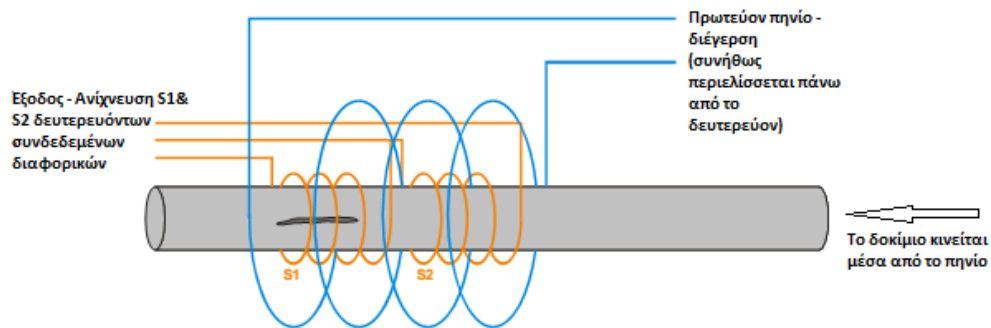


**Σχήμα 3.12:** Μηχανισμός λειτουργίας του ΜΚΕ ελέγχου με δινορεύματα για μια φερριτική ράβδο (πηνίο με μονή περιέλιξη)

Τα πηνία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε ζεύγη, τα οποία ονομάζεται καθοδηγούμενα ζεύγη (σχήμα 3.13). Με τον τρόπο αυτό ενισχύονται τα σήματα που σχετίζονται με την απόσταση του ανιχνευτή από την επιφάνεια.

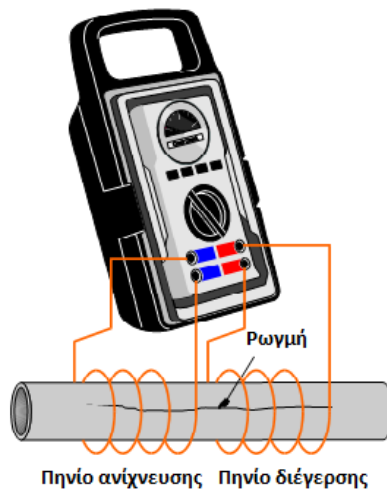


**Σχήμα 3.13:** Πηνίο με δύο περιελίξεις γνωστό ως καθοδηγούμενο ζεύγος ή διαφορικός ανιχνευτής. Τα πηνία μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μια διαμόρφωση τύπου μετασχηματιστή (σχήμα 3.14), όπου ένα πηνίο είναι το πρωτεύον και ένα άλλο το δευτερεύον.



**Σχήμα 3.14:** Πηνίο τύπου μετασχηματιστή με τρεις περιελίξεις

Τα λαμβανόμενα σήματα των δινορευμάτων μπορούν να εμφανιστούν σε οθόνες τύπου CRT. Οι αλλαγές στα σήματα των δινορευμάτων προκαλούνται από τις διαφορές στη σύσταση, τη σκληρότητα, την υφή, το σχήμα, την αγωγιμότητα, τη διαπερατότητα και γεωμετρία. Στο σχήμα 3.15 απεικονίζεται ο τυπικός εξοπλισμός για την διεξαγωγή ΜΚΕ με δινορεύματα.



**Σχήμα 3.15:** Σχηματική απεικόνιση ελέγχου με δινορεύματα για ανίχνευση διαμηκών ρωγματώσεων

### 3.2.5.1. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου με δινορεύματα

#### Πλεονεκτήματα

1. Κατάλληλη μέθοδος για τον έλεγχο του υλικού (ανίχνευση γεωμετρικής ατέλειας, σύσταση, σκληρότητα, αγωγιμότητα, διαπερατότητα, κλπ)
2. Οι πληροφορίες παρέχονται με απλούς όρους: often go/no go. Οι ηλεκτρονικές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόκτηση πολύ μεγαλύτερης πληροφορίας για το υλικό
3. Είναι διαθέσιμες εξαιρετικά συμπαγείς και φορητές μονάδες
4. Δεν χρειάζονται αναλώσιμα (με εξαίρεση τους ανιχνευτές - που ορισμένες φορές χρειάζονται επισκευή)
5. Ευελιξία στην επιλογή των ανιχνευτών και των συχνοτήτων ελέγχου, ώστε να ταιριάζουν σε διαφορετικές εφαρμογές
6. Δυνατότητα ολικής αυτοματοποίησης

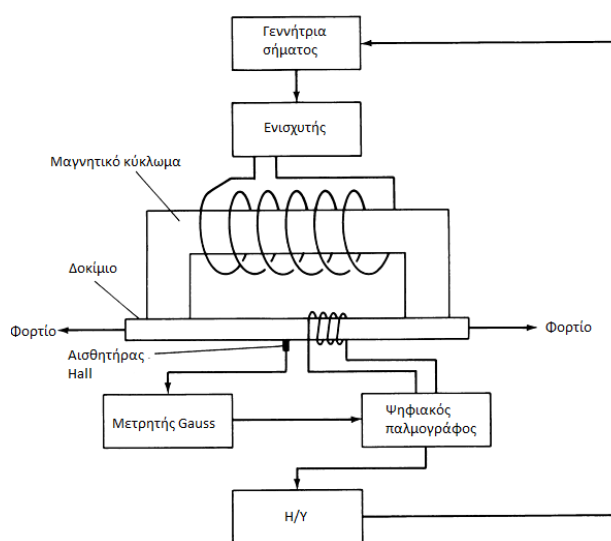
#### Μειονεκτήματα

1. Το ευρύ φάσμα των παραμέτρων που επηρεάζουν τις ενδείξεις των δινορευμάτων αποκαλύπτει ότι το σήμα από ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό του υλικού, π.χ. μια ρωγμή, μπορεί να καλυφθεί από μια ανεπιθύμητη παράμετρο, π.χ. αλλαγή στη σκληρότητα. Συνεπώς, επιβάλλεται η προσεκτική επιλογή του ανιχνευτή και των ηλεκτρονικών συσκευών σε ορισμένες εφαρμογές

2. Γενικά ο έλεγχος περιορίζεται στις επιφανειακές συνθήκες ρωγματώσεων και ελαφρώς σε ατέλειες κάτω από την επιφάνεια του υλικού [88]

### 3.2.6. Βρόχος υστέρησης B – H

Μία τυπική διάταξη για τη μέτρηση του χαρακτηριστικού βρόχου υστέρησης ενός ραβδοειδούς δοκιμίου φαίνεται στο σχήμα 3.14. Τα βασικά στοιχεία του αισθητήρα είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης γύρω από τον οποίο τυλίγεται το πηνίο διέγερσης για τη δημιουργία του πεδίου μαγνητισμού, ένα πηνίο το οποίο τυλίγεται γύρω από το δείγμα για τη μέτρηση του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής B στο υλικό, καθώς και ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου. Στο συγκεκριμένο σχήμα χρησιμοποιείται και ένας αισθητήρας Hall για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, H, το οποίο είναι παράλληλο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η γεννήτρια σήματος παρέχει ένα σήμα χαμηλής συχνότητας, τυπικά της τάξεως λίγων Hertz, και η έξοδος του πηνίου ολοκληρώνεται ως προς το χρόνο και αποδίδει την πυκνότητα ροής στο υλικό. Στο δείγμα της διάταξης του σχήματος 3.16 επιβάλλεται μια μονοαξονική εφελκυστική τάση για την μελέτη των επιπτώσεων της επιβολής μηχανικής τάσης στη μαγνητική υστέρηση [89].



Σχήμα 3.16: Πειραματική διάταξη για μετρήσεις βρόχου υστέρησης

### 3.2.7. Μαγνητοακουστική εκπομπή (ΜΑΕ)

Όταν επαναλαμβάνεται ένας βρόχος υστέρησης, εκπέμπονται ακουστικά κύματα υψηλής συχνότητας. Αυτό το φαινόμενο, ονομάζεται μαγνητοακουστική εκπομπή (ΜΑΕ) και δεν πρέπει να συγχέεται με το κλασικό μαγνητοσυστολικό φαινόμενο.

Υπάρχει η άποψη ότι οι γεωμετρικές ατέλειες είναι αυτές που σχετίζονται άμεσα με την



προσέγγιση της MAE. Σε πολλαπλούς κύκλους μαγνήτισης, ο κύριος μηχανισμός μαγνητισμού είναι η κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος. Σύμφωνα με τις κλασικές προσεγγίσεις [90,91], ένα μαγνητικό τοίχωμα θα πρέπει να κινηθεί υπό τη δράση ενός απείρως μικρού μαγνητικού πεδίου. Οι γεωμετρικές ατέλειες (όρια των κόκκων, πόροι, διαταραχές, κλπ), επιδρούν στην μη αντιστρεπτή κίνηση του μαγνητικού τοιχώματος. Δηλαδή, χωρίς την αγκύρωση του μαγνητικού τοιχώματος στα διάφορα μικροδομικά εμπόδια, δεν υπάρχει μαγνητική υστέρηση.

Ωστόσο υπάρχει και η άποψη ότι η μαγνητική υστέρηση σχετίζεται και με τη δημιουργία και κατόπιν η εξάλειψη του μαγνητικού τοιχώματος [92].

### 3.2.8. Μαγνητοσυστολικές γραμμές καθυστέρησης – Magnetostrictive Delay Line (MDL)

Τα μαγνητοσυστολικά υλικά τείνουν να προσανατολίζουν τα μαγνητικά δίπολα των μαγνητικών περιοχών στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Έτσι, εφαρμόζοντας μια εξωτερική πόλωση ή ένα παλμικό πεδίο κατά μήκος του MDL, δημιουργούνται αρχικά άλματα Barkhausen, τα οποία συμβάλλουν στο υστερητικό και μη-αναστρέψιμο μέρος της συνάρτησης  $\lambda(H)$ <sup>1</sup>:

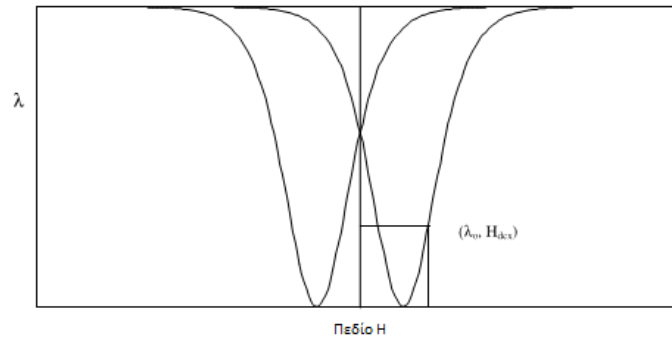
$$\lambda(H) = \lambda_s (1 - e^{-\alpha(H \pm H_c)^2})$$

και κατά συνέπεια, σε μικρή γωνία περιστροφής, η οποία είναι το ανυστερητικό και αναστρέψιμο μέρος της συνάρτησης  $\lambda(H)$ :

$$\lambda(H) = \lambda_s (1 - e^{\alpha H^2}), \alpha > 0$$

Ως εκ τούτου, η πόλωση του MDL με ένα συνεχές πεδίο πόλωσης  $H_{dcx}$ , οδηγεί σε μία επιμήκυνση του υλικού  $\delta\lambda_0$ , που απεικονίζεται ως ένα σημείο ( $\Delta\lambda_0, H_{dcx}$ ) σε σχέση με την συνάρτηση  $\lambda(H)$  (σχήμα 3.17).

<sup>1</sup> Η συνάρτηση  $\lambda(H)$  είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό σε ο,τι αφορά στη λειτουργία μιας MDL διάταξης και συνεπώς σε μια κατανομή των αισθητήρων που βασίζονται στην τεχνική MDL. Η σωστή προσαρμογή θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη δυναμική απόκριση του  $\lambda(H)$  σε σχέση με τη συχνότητα και όχι μόνο με τη σταθερά μαγνητοσυστολικού κορεσμού  $\lambda_s$  ή τη συνάρτηση στατικής μαγνητοσυστολής.



**Σχήμα 3.17:** Η συνάρτηση  $\lambda(H)$  που δείχνει την εξάρτηση της μικροπαραμόρφωσης από το επιβαλλόμενο πεδίο

Όταν ένα παλμικό πεδίο  $H_e(t)$  εφαρμόζεται επιπρόσθετα στην περιοχή όπου το πεδίο πόλωσης έχει ήδη εφαρμοστεί, λαμβάνει χώρα μια παρόμοια, αλλά δυναμική επιμήκυνση  $\delta l(t)$ , με αποτέλεσμα ένα ελαστικό κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του MDL. Το κύμα αυτό εκφράζεται από την κλασσική εξίσωση κύματος. Το σχήμα 3.18 απεικονίζει μια χαρακτηριστική MDL διάταξη.



**Σχήμα 3.18:** Μαγνητοσυστολική γραμμή καθυστέρησης (MDL)

### 3.2.9. Μαγνητική διαπερατότητα (Magnetic permeability)

Η εισαγωγή της μαγνητικής διαπερατότητας ( $\mu$ ) τα τελευταία χρόνια αποτέλεσε μια πολύ σημαντική και εύχρηστη παράμετρο στα πλαίσια του χαρακτηρισμού της μαγνητικής συμπεριφοράς των σιδηρομαγνητικών υλικών. Η μαγνητική διαπερατότητα στην πραγματικότητα εκφράζει το λόγο της μαγνητικής επαγωγής  $B$  σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $H$  προς το πεδίο αυτό.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Όταν το πεδίο είναι πολύ χαμηλό, ο λόγος  $B/H$  αποκαλείται αρχική διαπερατότητα [93]. Ο ορισμός της δίνεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\mu_{in} = \lim_{B \rightarrow 0} \frac{B}{H}, \text{ ή } \mu_{in} = \left( \frac{dB}{dH} \right)_{B=0, H=0} = \left( \frac{B}{H} \right)_{B=0, H=0}$$

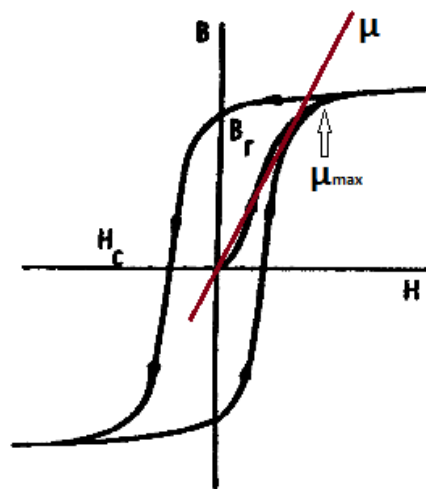
Έπίσης υπάρχει και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα η οποία ορίζεται ως η μαγνητική

διαπερατότητα ενός συγκεκριμένου μέσου ως προς τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \text{ όπου } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H}\cdot\text{m}^{-1}$$

Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητών επηρεάζεται έντονα από το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο  $H$  και το ιστορικό του υλικού [94].

Όταν το επιβαλλόμενο πεδίο μαγνήτισης είναι υψηλό εμφανίζεται η μέγιστη διαπερατότητα. Ωστόσο στο μαγνητικό κορεσμό, η μαγνητική διαπερατότητα ελαχιστοποιείται. Συχνά, μελετάται η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας ως προς τη μαγνητική επαγωγή [93].



**Σχήμα 3.19:** Προσδιορισμός της μαγνητικής διαπερατότητας από το βρόχο υστέρησης  $B-H$  ενός σιδηρομαγνητικού υλικού

Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι ενδεικτικές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας για επιλεγμένα μαλακά μαγνητικά υλικά. Παρατηρούμε ότι σε ορισμένα μαγνητικά υλικά οι τιμές του  $\mu$  είναι εξαιρετικά υψηλές. Αυτό συνεπάγεται ότι οι βρόχοι μαγνητικής υστέρησης των συγκεκριμένων υλικών τείνουν να «κλείνουν», δηλαδή εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές του  $B$  σε σχέση με το  $H$ .

**Πίνακας 3.1:** Μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικών μαλακών μαγνητικών υλικών [94]

Υλικό	Σύσταση	Μαγνητική διαπερατότητα ( $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ )		Απομαγνητότητα $H_c$ ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Επαγωγή κόρου (T)
		Αρχική σχετική διαπερατότητα $\mu_i$	Μέγιστη σχετική διαπερατότητα $\mu_{\max}$		
Σίδηρος	99,99% Fe	150	5.000	80	2,15
Θειούχος	96% Fe	500	7.000	40	1,97

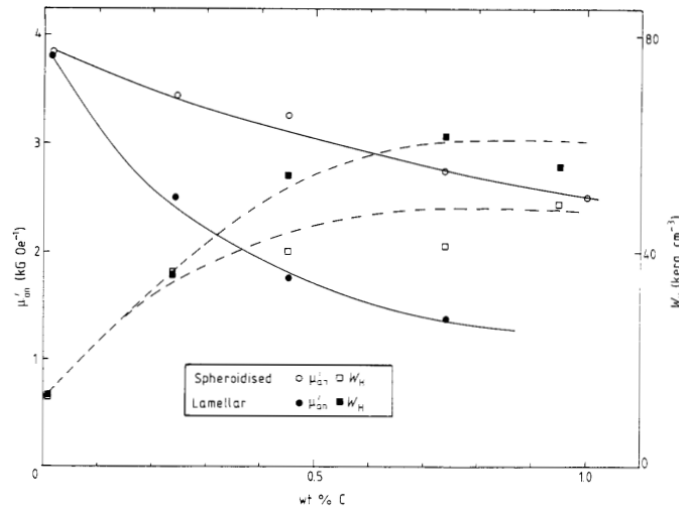
σίδηρος (μη-προσανατολισμέ-νος)	4% Si				
Θειούχος σίδηρος (προσανατολισμένοι κόκκοι)	97% Fe 3% Si	1.500	40.000	8	2,0
Permalloy	78% Ni 22% Fe	8.000	100.000	4	1,08
Superpermalloy	79% Ni 16% Fe 5% Mo	100.000	1.000.000	4	1,60
Hipernik	50% Ni 50% Fe	4.000	70.000	0,16	0,79
Mumetal	77% Ni 16% Fe 5% Cu 2% Cr	20.000	100.000	4	0,65
Permendur	50% Fe 50% Co	800	5.000	160	2,45
Hipereo	64% Fe 35% Co 0.5% Cr	650	10.000	80	2,42
Supermendur	49% Fe 49% Co 2% V		60.000	16	2,40

### 3.2.9.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη μαγνητική διαπερατότητα

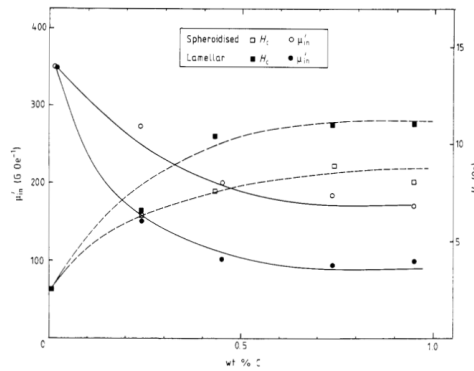
Η μαγνητική διαπερατότητα είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μαγνητικών υλικών. Όχι μόνο είναι συνάρτηση της δομής, της χημικής σύνθεσης και της κρυσταλλικότητας, αλλά και γιατί εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μικροδομή, τη θερμοκρασία, την πίεση.

#### 3.2.9.1.1. Η διακύμανση της μαγνητικής διαπερατότητας σε χάλυβες με διαφορετική σύσταση σε άνθρακα

Σε μια ομάδα χάλυβων της σειράς 1000 πραγματοποιήθηκε μελέτη σχετικά με την επίδραση της περιεκτικότητας σε άνθρακα στην μαγνητική αποκρισιμότητα τους διαπίστωσαν ότι η αρχική μαγνητική διαπερατότητα μειώνονταν εκθετικά με αύξηση της περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα (σχήμα 3.20). Συμπέραναν επίσης ότι οι χάλυβες με σφαιροποιημένο σεμεντίτη (εικόνα 3.1(α)) είχαν υψηλότερη διαπερατότητα απ' ό,τι οι normalized (εικόνα 3.1(β)). Μάλιστα, για περιεκτικότητα σε άνθρακα πάνω από 0,2% κατά βάρος η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητάς τους διπλασιάζονταν (σχήμα 3.21).



**Σχήμα 3.20:** Η διακύμανση της ανυστερητικής διαπερατότητας  $\mu_{an}$  και της απώλειας υστέρησης  $W_H$ , ως προς την περιεκτικότητα σε άνθρακα, σε χάλυβες της σειράς 1000

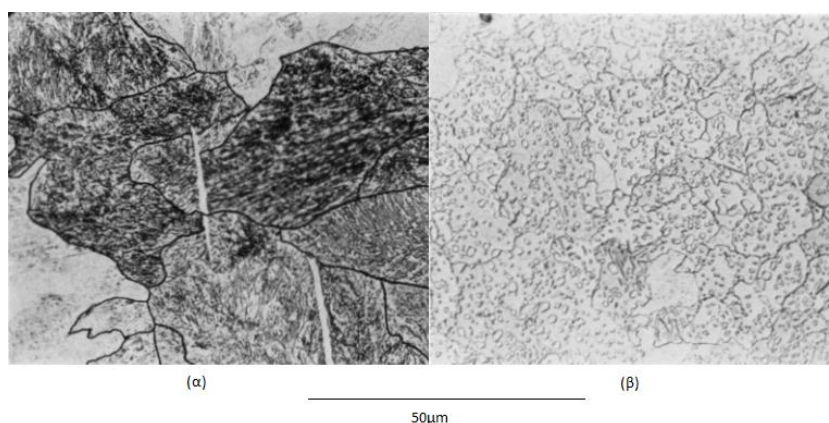


**Σχήμα 3.21:** Η διακύμανση της αρχικής μαγνητικής διαπερατότητας ως προς την περιεκτικότητα του χάλυβα σε άνθρακα, σε χάλυβες της σειράς 1000

**Πίνακας 3.2:** Τιμές μαγνητικής διαπερατότητας για δοκίμια χαλύβων της σειράς 1000

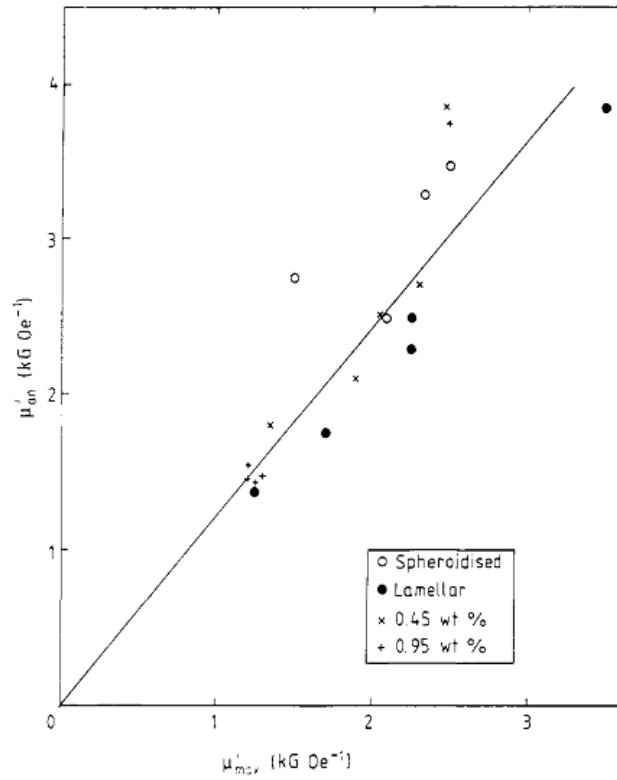
	Ανυστερητική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{an} (G \cdot Oe^{-1}) /$ $H \cdot m^{-1}$	Μέγιστη μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{max} (G \cdot Oe^{-1}) /$ $H \cdot m^{-1}$	Αρχική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_{in} (G \cdot Oe^{-1}) /$ $H \cdot m^{-1}$	
Χάλυβας με πλακοειδή σεμεντίτη	1000	3850±250 / 30.8	3500±200 / 28	350±50 / 2.8
	1020	2500±100 / 20	2250±100 / 18	150±20 / 1.2
	1045	1750±50 / 14	1700±50 / 13.6	100±15 / 0.8

Χάλυβας με σφαιροποιημένο σεμεντίτη	1080	1375±30 / 11	1250±25 / 10	95±15 / 0.76
	1095	2300±100 / 18.4	2250±100 / 18	100±15 / 0.8
	1000	3850 / 30.8	3500 / 28	350 / 2.8
	1020	3470 / 27.76	2500 / 20	275 / 2.2
	1045	3289 / 26.3	2080 / 16.64	200 / 1.6
	1080	2750 / 22	1475 / 11.8	185 / 1.48
	1095	2500 / 20	2100 / 16.8	170 / 1.36



**Εικόνα 3.1:** Εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο (α) από περλιτικούς κόκκους πλακοειδούς μορφολογίας και (β) σφαιροποιημένου σεμεντίτη εντός φερριτικής μήτρας

Η ομάδα που διεξήγαγε τη μελέτη, κατέληξε στο ότι η διακύμανση της μέγιστης διαφορικής διαπερατότητας  $\mu'_{max}$  σε σχέση με την περιεκτικότητα σε άνθρακα ήταν παρόμοιας μορφής με τη διακύμανση της ανυστερητικής διαπερατότητας σε σχέση με την περιεκτικότητα σε άνθρακα. Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο υστέρησης που πρότειναν οι Jiles και Atherton (1986), **η μέγιστη διαφορική διαπερατότητα  $\mu'_{max}$  και η ανυστερητική διαπερατότητα, στην αρχή, είναι ίσες σε μαλακά μαγνητικά υλικά.** Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους, όπως δείχνεται στο σχήμα 3.22, επιβεβαιώνουν την θεωρητική πρόβλεψη αρκετά καλά, αν και όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές του  $\mu_{max}$  ήταν ελαφρώς χαμηλότερες από της  $\mu_{an}$  επειδή τα δείγματα δεν έφτασαν ακριβώς σε μαγνητικό κορεσμό [95]

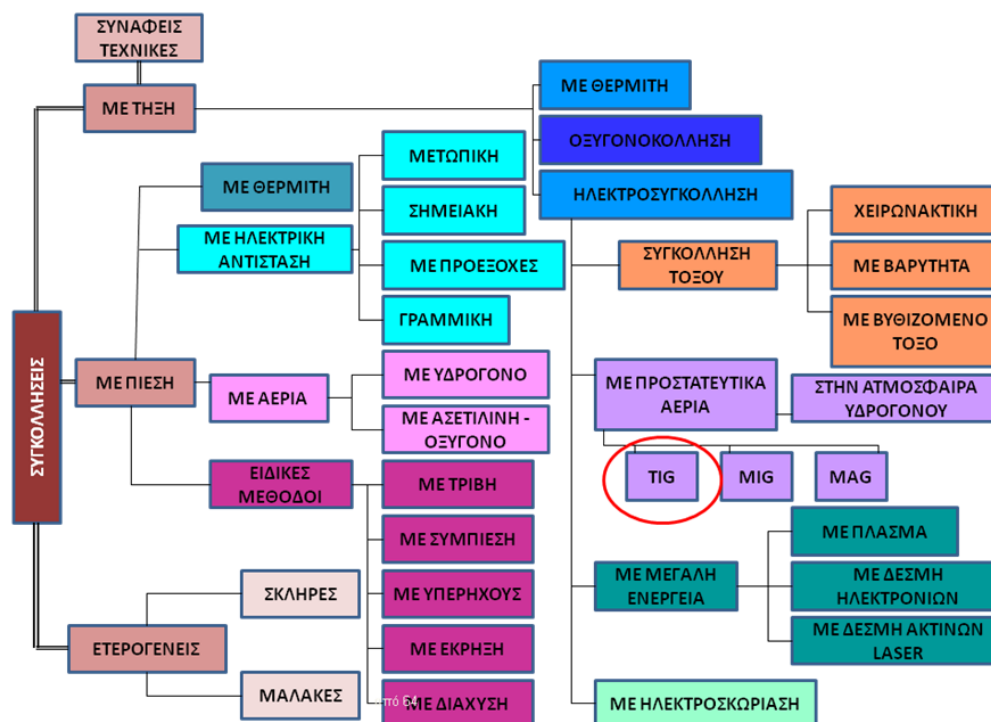


**Σχήμα 3.22:** Ο συσχετισμός της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu'_{max}$  και της ανυστερητικής διαπερατότητας  $\mu'_{an}$  στο αρχικό στάδιο

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

## 4.1. ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ TIG

Η συγκόλληση TIG (Tungsten Inert Gas) ή αλλιώς GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) είναι αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου (Σχήμα 4.1).

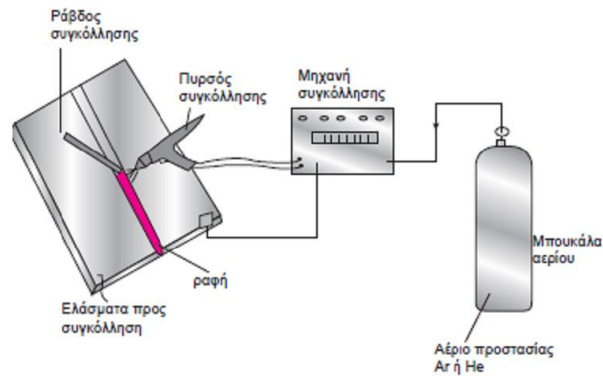


Σχήμα 4.1: Διάγραμματική απεικόνιση των μεθόδων συγκολλήσεων

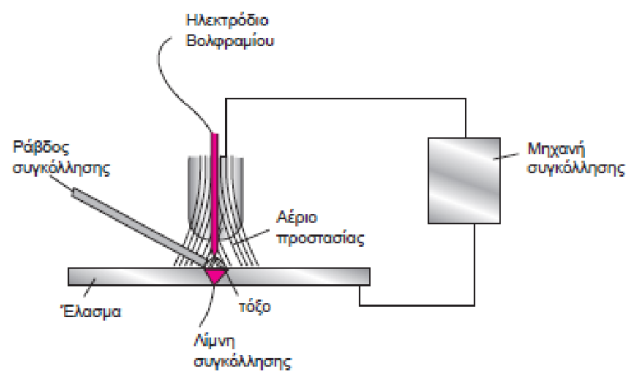
Η συγκόλληση αυτού του τύπου είναι μια μέθοδος κατά την οποία το ηλεκτρικό τόξο σχηματίζεται μεταξύ ενός μη-αναλυσκόμενου ηλεκτροδίου από βολφράμιο (W) και του προς συγκόλληση μετάλλου. Η συγκόλληση προστατεύεται από συνεχή ροή αδρανούς αερίου (στην συγκεκριμένη περίπτωση το αέριο που χρησιμοποιείται είναι Αργό-Arg). Στη λίμνη συγκόλλησης προστίθεται, εάν απαιτείται, πρόσθετο συγκολλητικό υλικό, που προέρχεται από μια ράβδο συγκόλλησης. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η διάταξη της συγκόλλησης TIG.

Το αέριο προστασίας χρησιμοποιείται για την προστασία της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα και ειδικότερα από την αντίδραση του τηγμένου μετάλλου με το οξυγόνο και το άζωτο. Οι αντιδράσεις αυτές συνήθως οδηγούν στο σχηματισμό πόρων και εγκλεισμάτων που εξασθενούν τη συγκόλληση. Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η περιοχή της συγκόλλησης και η προστασία της λίμνης από το αδρανές αέριο.





**Σχήμα 4.2:** Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου TIG



**Σχήμα 4.3:** Συγκόλληση TIG και λειτουργία αερίου προστασίας

Το αέριο προστασίας τροφοδοτείται στην περιοχή της συγκόλλησης από τον πυρσό συγκόλλησης. Στις συγκολλήσεις TIG το αέριο προστασίας είναι αργό (Ar) ή ήλιο (He). Η χρήση του αργού είναι πιο διαδεδομένη λόγω της καταλληλότητάς του για την συγκόλληση των περισσότερων μετάλλων και του μικρότερου κόστους σε σύγκριση με το ήλιο.

Στη συγκόλληση TIG δεν απαιτείται η χρήση επένδυσης (πάστας) ηλεκτροδίου. Έτσι αποφεύγονται όλα τα πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με την χρήση της πάστας, όπως ο εγκλωβισμός της πάστας στη συγκόλληση, καθώς και ο καθαρισμός μετά το πέρας της συγκόλλησης.

Με τη μέθοδο TIG είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί συγκόλληση σχεδόν όλων των μετάλλων και των βιομηχανικών κραμάτων, όπως οι δομικοί χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες, τα κράματα αλουμινίου, τα κράματα χαλκού (ορείχαλκοι και μπρούτζοι), τα κράματα νικελίου κ.α. Η μέθοδος TIG μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για διμεταλλικές συγκολλήσεις καθώς και για την επίστρωση σκληρών προστατευτικών επικαλύψεων πάνω σε μεταλλικά υποστρώματα.

Η συγκόλληση TIG μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο με συνεχές όσο και με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο τύπος του ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το προς συγκόλληση μέταλλο και την εφαρμογή.

#### 4.1.1. Συγκόλληση TIG με συνεχές ρεύμα

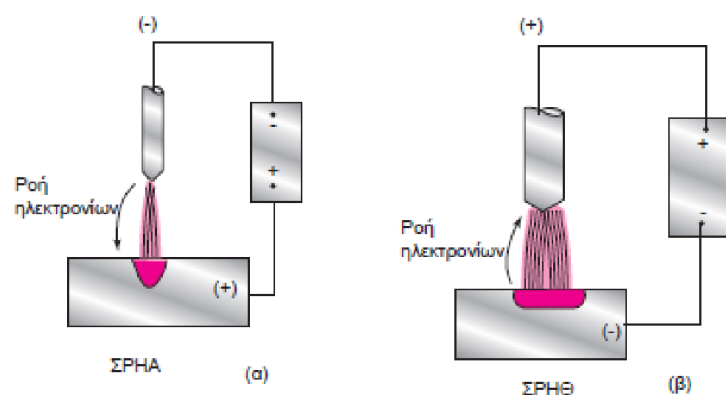
Στην συγκόλληση TIG με συνεχές ρεύμα (ΣΡ/DC) διακρίνονται δύο υποπεριπτώσεις:

(α) Συνεχές Ρεύμα-Ηλεκτρόδιο Αρνητικό (ΣΡΗΑ) ή (DCEN)

(β) Συνεχές Ρεύμα-Ηλεκτρόδιο Θετικό (ΣΡΗΘ) ή (DCEP)

Στην πρώτη περίπτωση (ΣΡΗΑ), το ηλεκτρόδιο του βολφραμίου είναι αρνητικό (-) και το προς συγκόλληση μέταλλο είναι θετικό (+). Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το ηλεκτρόδιο προς το μέταλλο όπου και προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα προκαλώντας τη θέρμανση και συνεπώς την τήξη του μετάλλου με αποτέλεσμα η συγκόλληση να είναι στενή και να πραγματοποιείται μεγάλη διείσδυση (σχήμα 4.4α). Η λειτουργία ΣΡΗΑ χρησιμοποιείται στις περισσότερες συγκολλήσεις των μετάλλων.

Στη δεύτερη περίπτωση (ΣΡΗΘ), η ροή των ηλεκτρονίων είναι αντίστροφη, από το μέταλλο προς το ηλεκτρόδιο και επομένως προκαλεί θέρμανση και σε πολλές περιπτώσεις τήξη της κορυφής του ηλεκτροδίου με επακόλουθη αλλοίωση της χημικής σύστασης της συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό, στις συγκολλήσεις ΣΡΗΘ πρέπει να χρησιμοποιείται ηλεκτρόδιο βολφραμίου μεγαλύτερης διαμέτρου. Αυτό, σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη ένταση του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα η συγκόλληση να έχει μεγαλύτερο πλάτος και μικρότερη διείσδυση (σχήμα 4.4β). Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι διαφορετικές μέθοδοι για την συγκόλληση μετάλλων με TIG.



**Σχήμα 4.4:** Πολικότητα (α) ΣΡΗΑ: στενή συγκόλληση με μεγάλη διείσδυση (β) ΣΡΗΘ: ευρεία συγκόλληση με μικρή διείσδυση

Πίνακας 4.1: Μέθοδοι συγκόλλησης TIG

Μέταλλο	ΣΡΗΑ	ΣΡΗΘ	ΕΡ
Χάλυβες	E	O	O
Χυτοσίδηροι	E	O	K*
Ανοξείδωτοι χάλυβες	E	O	K*
Κράματα υψηλών θερμοκρασιών	E	O	K*
Πυρίμαχα μέταλλα	E	O	O
<b>Κράματα αλουμινίου</b>			
<0,6mm	O**	K	E
>0.6mm	O**	O	E
Χυτά αλουμινίου	O**	O	E
<b>Κράματα χαλκού</b>			
Ορείχαλκοι	E	O	K*
Μπρούτζοι	E	O	O
<b>Κράματα μαγνησίου</b>			
<3mm	O**	K	E
>3mm	O**	O	E
Χυτά μαγνησίου	O*	O	E

E: Εξαιρετική K: Καλή O: Δεν συνιστάται

\*Με ένταση ρεύματος κατά 25% υψηλότερη από ΣΡΗΑ

\*\*Εκτός αν προηγηθεί μηχανικός ή χημικός καθαρισμός

#### 4.1.2. Συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα

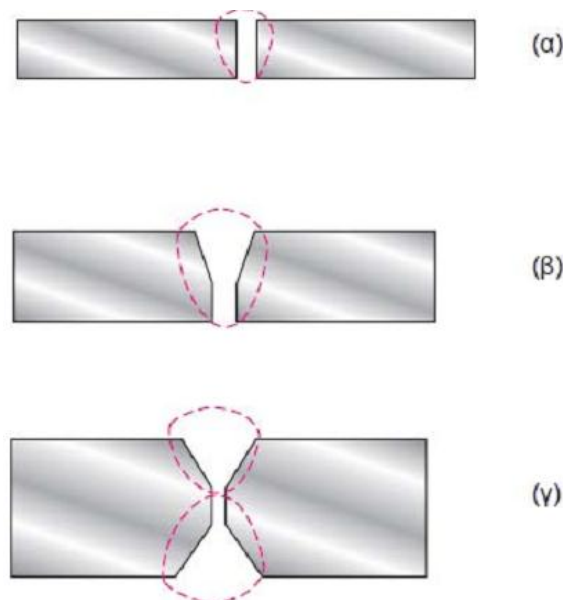
Κατά τη συγκόλληση TIG με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP/AC) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει συνδυασμός ΣΡΗΑ και ΣΡΗΘ. Στην πραγματικότητα, ένας πλήρης κύκλος ΕΡ αποτελείται από μισό κύκλο ΣΡΗΘ και μισό κύκλο ΣΡΗΑ.

### 4.1.3. Οι βασικές συνδέσεις στις συγκολλήσεις TIG

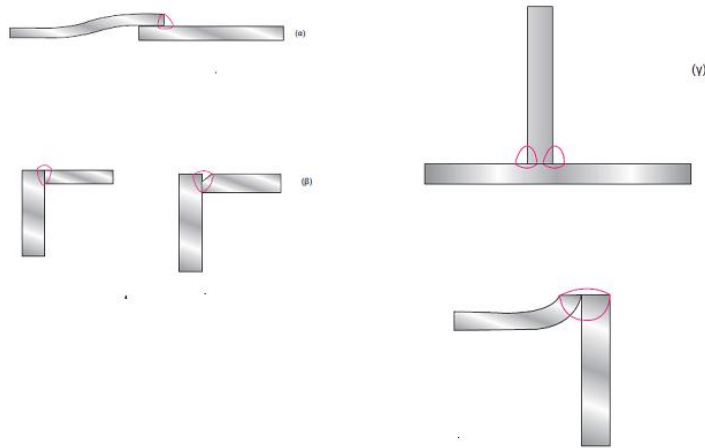
Στις συγκολλήσεις TIG χρησιμοποιούνται πέντε βασικές συνδέσεις ενώ όλες οι άλλες συνδέσεις αποτελούν συνδυασμό των πέντε βασικών συνδέσεων. Οι συνδέσεις αυτές είναι:

- 1) Σύνδεση συμβολής (butt joint) όπως και του δοκιμίου που συγκολλήθηκε (σχήμα 4.5α) Η σύνδεση συμβολής μπορεί να είναι απλή (σχήμα 4.6α), με μονό V (σχήμα 4.5) ή διπλό V (σχήμα 4.5γ). Η επιλογή της σύνδεσης εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων και από τη χρήση ή όχι συγκολλητικού υλικού. Το μονό και διπλό V κατασκευάζονται με φρεζάρισμα των ακμών των ελασμάτων. Το δοκίμιο της παρούσας εργασίας συγκολλήθηκε με απλή σύνδεση συμβολής.
- 2) Σύνδεση με επικάλυψη (lap joint) (σχήμα 4.6α)
- 3) Γωνιακή σύνδεση (corner joint) (σχήμα 4.6β)
- 4) Αυχενική σύνδεση “T”(tee joint) (σχήμα 4.γ)
- 5) Σύνδεση ακμών (edge joint) (σχήμα 4.6δ)

Σε όλες τις συνδέσεις απαιτείται καλός καθαρισμός πριν από τη συγκόλληση για την απομάκρυνση σκουριάς, οξειδίων, σκόνης, γράσου, λαδιών και κάθε τύπου ακαθαρσιών.



**Σχήμα 4.5:** Συνδέσεις συμβολής: (α) απλή (β) μονό V (γ) διπλό V



**Σχήμα 4.6:** (α) Σύνδεση με επικάλυψη, (β) Γωνιακές συνδέσεις, (γ) Αυχενική σύνδεση "T", (δ) Σύνδεση ακμών

#### 4.1.4. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των συγκολλήσεων TIG

Οι συγκολλήσεις TIG εμφανίζουν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εκ των οποίων τα σημαντικότερα είναι:

##### Πλεονεκτήματα

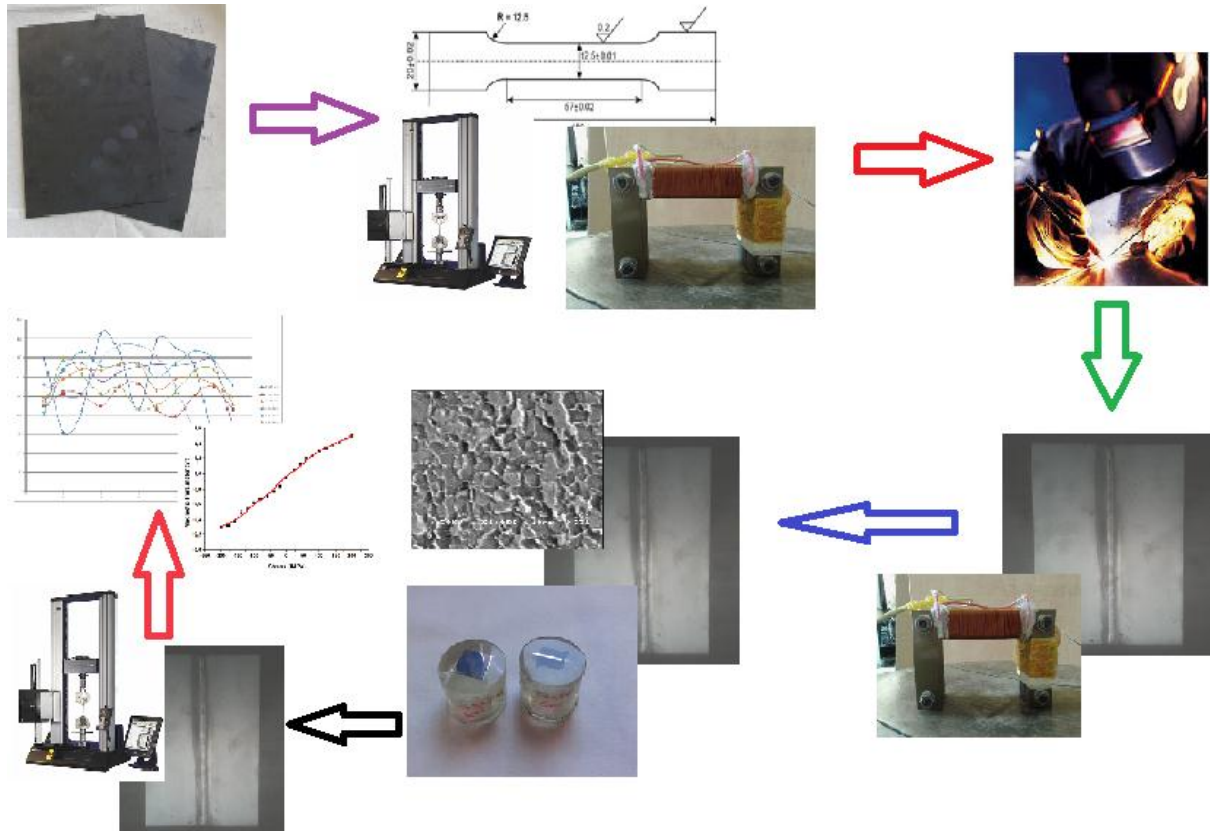
- Υψηλή ποιότητα συγκολλήσεων
- Μικρές παραμορφώσεις
- Μεγάλη ευελιξία στη χρήση μηχανών συγκόλλησης διαφορετικών τύπων
- Συγκόλληση με ή χωρίς προσθήκη πρόσθετου συγκολλητικού υλικού (filler)
- Ακρίβεια στον έλεγχο εισαγωγής θερμότητας

##### Μειονεκτήματα

- Χαμηλότερη παραγωγικότητα σε σχέση με τις συγκολλήσεις SMAW και GMAW-MIG
- Αντιοικονομική μέθοδος για ελάσματα μεγάλου πάχους (>10mm)
- Εύκολη μόλυνση της λίμνης συγκόλλησης όταν η προστασία αερίου δεν είναι

ικανοποιητική [96]

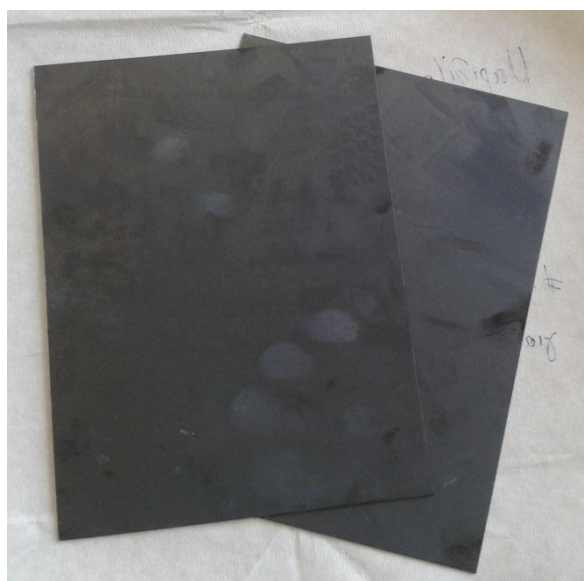
# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.1. ΥΛΙΚΟ ΠΟΥ ΕΛΗΦΘΗ

Το υλικό που παρελήφθη ήταν χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα τύπου St37- 2. Ελήφθησαν πέντε πλάκες, οι διαστάσεις των οποίων ήταν  $20 \text{ cm}^L \times 15 \text{ cm}^W \times 0,15 \text{ cm}^T$  (Εικόνα 5.1). Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του αρχικού υλικού, όπως δόθηκαν από τον προμηθευτή παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.



Εικόνα 5.1: Πλάκες χάλυβα τύπου St 37-2, όπως παραλήφθηκαν

Πίνακας 5.1: Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του αρχικού υλικού, όπως δόθηκαν από τον προμηθευτή

Τύπος	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ (%)				
	Όριο διαρροής (N/mm <sup>2</sup> )	Εφελκιστική τάση (N/mm <sup>2</sup> )	Παραμόρφωση (%)	C%	Mn%	Si%	P%	S%
St-37	265	405	31	0,090	0,520	0,010	0,019	0,007



## 5.2. ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟ ΥΛΙΚΟ

Το υλικό συγκολλήθηκε χειροκίνητα με τη μέθοδο TIG (εικόνα 5.2). Οι παράμετροι της συγκόλλησης παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.



Εικόνα 5.2: Το συγκολλημένο δοκίμιο St 37-2 με συγκόλληση TIG

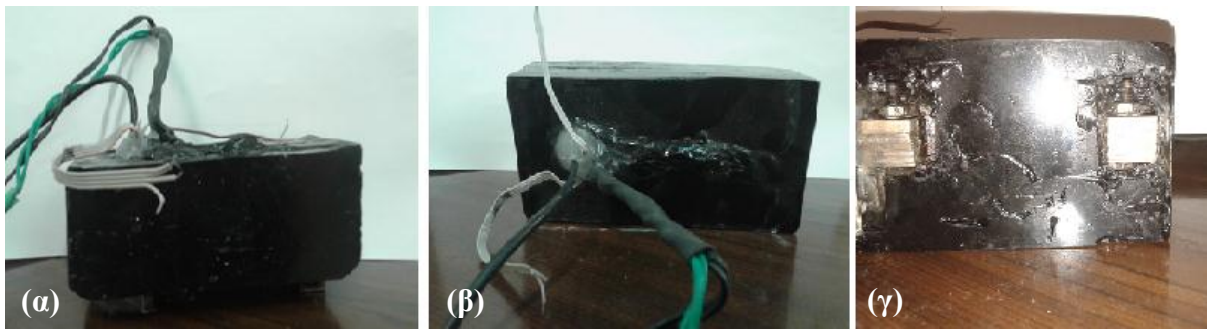
Πίνακας 5.2: Παράμετροι συγκόλλησης TIG

Σύνδεση συγκόλλησης	Είδος σύνδεσης	Τάση - ρεύματος (V)	Ένταση Ρεύματος (A)	Αέριο προστασίας	Παροχή Ar (lt/min)
TIG-GTAW	Συμβολής, απλή	15	85	Αργό (Ar)	18

## 5.3. ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 5.2.1. Διάταξη για την καταγραφή της χρονικής μεταβολής των τιμών της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

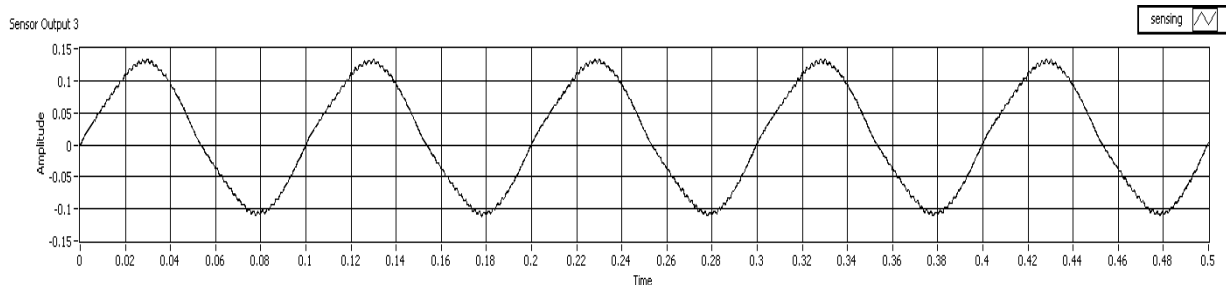
Για τον προσδιορισμό της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας, χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός μαγνητικός αισθητήρας που παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.



**Εικόνα 5.3:** (α) Πλαϊνή όψη, (β) κάτωψη και (γ) άνοψη του μαγνητικού αισθητήρα, ο οποίος προσδιορίζει την επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα

Ο αισθητήρας διεγείρονταν με ημιτονικό σήμα συχνότητας 1 KHz από μια γεννήτρια συχνοτήτων. Το σήμα διέγερσης και λήψης λαμβάνονταν από ένα σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ), με στόχο την επεξεργασία του (φιλτράρισμα σήματος εξόδου, απεικόνιση γραφικών παραστάσεων) σε περιβάλλον LabView. Το πηνίο λήψης τυλίγεται γύρω από έναν ηλεκτρομαγνήτη με αποτέλεσμα τη λήψη του επιφανειακού σήματος εξόδου.

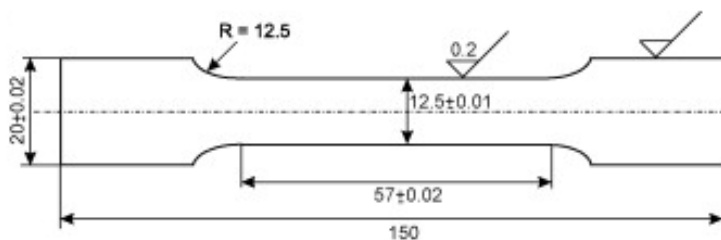
Στην εικόνα 5.4 παρουσιάζονται τυπικές μεταβολές της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας ως συνάρτηση του χρόνου για το δείγμα αναφοράς.



**Εικόνα 5.4:** Χρονικά μεταβαλλόμενη επιφανειακή μαγνητική διαπερατότητα για το δείγμα αναφοράς

### 5.2.2. Καμπύλη βαθμονόμησης αρχικού δείγματος

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκαν σταδιακές δυναμικές εφελκυστικές και θλιπτικές καταπονήσεις, εντός της ελαστικής περιοχής, σε προεπιλεγμένα βήματα παραμόρφωσης. Η διεύθυνση του εφελκυσμού ή της θλίψης ήταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης. Για το λόγο αυτό, από το αρχικό υλικό κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής 20 δοκίμια εφελκυσμού, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E8 [97]. Οι διαστάσεις, σε mm, των δειγμάτων αυτών παρουσιάζονται στην εικόνα 5.5.



**Εικόνα 5.5:** Διαστάσεις δειγμάτων εφελκυσμού.

Σε κάθε προεπιλεγμένο βήμα παραμόρφωσης πραγματοποιούνται πέντε δοκιμές. Σε κάθε μία από αυτές καταγράφονται μέσω του λογισμικού LabView η χρονική μεταβολή της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας. Ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών που προκύπτουν αντιπροσώπευε τη μαγνητική παράμετρο για την παραμόρφωση. Μέσω των εξισώσεων της ελαστικότητας προσδιορίστηκαν οι τιμές της τάσεως. Η ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας οδήγησε στον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης του αρχικού δείγματος. Μέσω της καμπύλης αυτής, ήταν δυνατή η αντιστοίχιση της μαγνητικής παραμέτρου με τις τιμές των παραμενουσών τάσεων στο συγκολλημένο υλικό.

### 5.2.3. Χωρική κατανομή μαγνητική διαπερατότητας στο συγκολλημένο δείγμα

Για την εκτίμηση της κατανομής των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας στο συγκολλημένο δοκίμιο, απαιτείται ο προσδιορισμός, στην επιφάνεια των συγκολλημένων δοκιμίων, των σημείων μέτρησης. Στη συνέχεια το πεδίο μαγνήτισης εφαρμόζονταν παράλληλα στη διεύθυνση της έλασης, δηλαδή ο μαγνητικός αισθητήρας τοποθετούνταν κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης σε κάθε σημείο μέτρησης.

Σε κάθε σημείο της μέτρησης καταγράφονται, μέσω του λογισμικού LabView ,η χρονική μεταβολή της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας. Ο μέσος όρος πέντε μετρήσεων αντιπροσώπευε την τιμή της επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας στο σημείο αυτό. Το δοκίμιο χωρίστηκε σε ζώνες ( $0,5^L\text{cm} \times 0,5^W\text{cm}$  η κάθε μια) κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, 385 στον αριθμό επί συνόλου (7 ζώνες μετρήσεων κατα το μήκος και 11 θέσεις μετρήσεων κατά πλάτος, με το μέσο όρο 5 επαναλήψιμων μετρήσεων για κάθε μια θέση). Από τη χωρική κατανομή της μαγνητικής παραμέτρου εξήχθησαν σημαντικά ποιοτικά συμπεράσματα για την αξιοπιστία και καταλληλότητα της συγκόλλησης καθώς επίσης και για τη μικροδομική-μορφολογική ομοιογένεια της κρυσταλλικής δομής και των διακυμάνσεων των τιμών της μικροσκληρότητας στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Επίσης, με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των τιμών της μαγνητικής παραμέτρου με την τιμή της παραμένουσας τάσης.

Το συγκολλημένο δοκίμιο προέκυψε από τη συνένωση δύο εκ των πέντε αρχικών πλακών χάλυβα

### **5.3. ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ**

#### **5.3.1. Προετοιμασία δειγμάτων**

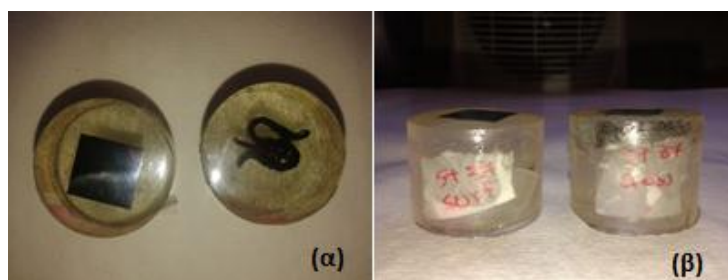
Για το μεταλλογραφικό χαρακτηρισμό του συγκολλημένου δοκιμίου χρειάστηκε να εξαλειφθούν οι επιφανειακές ανωμαλίες και στη συνέχεια να αποκαλυφθούν τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης συγκόλλησης. Τα στάδια προετοιμασίας είναι η κοπή, ο εγκιβωτισμός, η μηχανική λείανση, η στίλβωση και τέλος η χημική προσβολή.

##### **5.3.1.1. Κοπή δοκιμίων**

Από κάθε ζώνη της συγκόλλησης κόπηκαν με τη μέθοδο της υδροκοπής μικρότερα δείγματα με στόχο τον προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροδομικών χαρακτηριστικών της κάθε ζώνης.

##### **5.3.1.2. Εγκιβωτισμός**

Για τον εγκιβωτισμό των αντιπροσωπευτικών δειγμάτων των ζωνών της συγκόλλησης χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη τύπου EpoFix Resin, και σκληρυντής τύπου EpoFix Hardener. Η αναλογία σκληρυντή - ρητίνης ήταν περίπου 2ml σκληρυντή ανά 15ml ρητίνης. Το μίγμα αναδεύτηκε προσεκτικά για 2 min ώστε να μη σχηματιστούν φυσαλίδες. Παράλληλα, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στο κέντρο κυλινδρικών καλουπιών στα οποία συμπληρώθηκε το μίγμα σκληρυντή – ρητίνης. Στις εικόνες 5.6 (α) και (β) παρουσιάζονται τα εγκιβωτισμένα δείγματα του μετάλλου βάσης. Τα δείγματα μελετήθηκαν στην επιφάνειά τους και στην κάθετη διατομή τους.



**Εικόνα 5.6:** Εγκιβωτισμένα δείγματα της (α) επιφάνειας και (β) κάθετης διατομής του δείγματος αναφοράς.

### 5.3.1.3. Λείανση

Η λείανση των δειγμάτων έγινε χειροκίνητα στον περιστρεφόμενο δίσκο λειαντικής συσκευής. Για την ψύξη των δοκιμίων και για την απομάκρυνση των υπολειμμάτων της λείανσης εκχύνονταν νερό. Χρησιμοποιήθηκαν χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου, ονομαστικής πυκνότητας κόκκων 800, 1000, 1200, 2000 grit (κόκκοι SiC/in<sup>2</sup>) (Πίνακας 5.3). Η πίεση του εγκιβωτισμένου δοκιμίου πάνω στο περιστρεφόμενο λειαντικό χαρτί ήταν όσο το δυνατό, ομοιόμορφη και ισοκατανεμημένη σε όλη την επιφάνειά του. Πριν τη χρήση του επόμενου χαρτιού, το δοκίμιο ξεπλενόταν με αιθανόλη για να καθαριστεί από τυχόν ακαθαρσίες και στεγνώονταν με ψυχρό αέρα. Σε κάθε στάδιο, η λείανση πραγματοποιούνταν με κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση του προηγούμενου.

**Πίνακας 5.3:** Στάδια μηχανικής λείανσης

ΣΤΑΔΙΑ ΛΕΙΑΝΣΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΟΚΚΩΝ SiC	ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΑΝΣΗΣ
1	800	20-25min
2	1000	20-25min
3	1200	20-25min
4	2000	20-25min

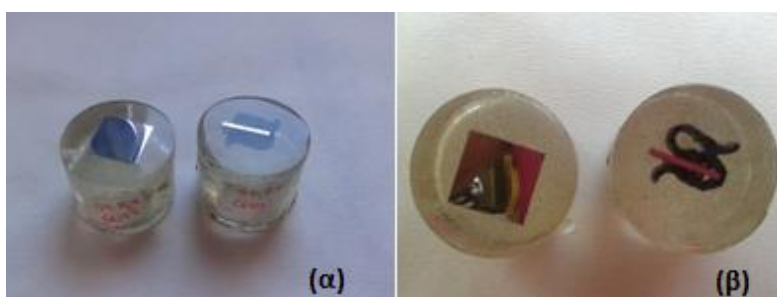
#### 5.3.1.4. Στίλβωση

Σκοπός της στίλβωσης ήταν η εξάλειψη των γραμμών της μηχανικής λείανσης, ώστε η επιφάνεια των εγκιβωτισμένων δοκιμίων να γίνει λεία και στιλπνή. Τα χαρτιά του καρβιδίου του πυριτίου αντικαταστήθηκαν από κατάλληλο τσόχινο ύφασμα, αντίστοιχο της αδαμαντόπαστας που χρησιμοποιούνταν. Η στίλβωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, αρχικά με αδαμαντόπαστα μεγέθους σωματιδίων 3 $\mu$ m και στη συνέχεια με 1 $\mu$ m (Πίνακας 5.4).

**Πίνακας 5.4:** Στάδια στίλβωσης

ΣΤΑΔΙΑ ΣΤΙΛΒΩΣΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΟΚΚΩΝ ΑΔΑΜΑΝΤΟΠΑΣΤΑΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΣΤΙΛΒΩΣΗΣ
1	3 $\mu$ m	30-35min
2	1 $\mu$ m	30-35min

Σε όλη τη διάρκεια της στίλβωσης συμπληρώνονταν λιπαντικό στην επιφάνεια του τσόχινου υφάσματος, για την ψύξη των δοκιμίων. Με το πέρας κάθε βήματος το δείγμα ξεπλένονταν σε αιθανόλη και ψύχονταν με ψυχρό αέρα. Στις εικόνες 5.7 (α) - (β) παρουσιάζονται τα δοκίμια μετά και από τη στίλβωση



**Εικόνα 5.7:** (α) και (β): Τα εγκιβωτισμένα δοκίμια του βασικού μετάλλου μετά και από τη στίλβωση.

### 5.3.1.5. Χημική προσβολή

Για να είναι ορατά τα όρια των κόκκων του πολυκρυσταλλικού υλικού είναι απαραίτητη η επιλεκτική διάβρωση των ορίων τους (etching). Η χημική προσβολή των δειγμάτων έγινε με Nital 2% (2ml HNO<sub>3</sub> / 98ml C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) για 20 sec σε θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια ακολούθησε η έκπλυση του δείγματος με αιθανόλη. Μετά τη χημική προσβολή ήταν δυνατή η αποκάλυψη της μικροδομής των δειγμάτων, η παρατήρηση της μορφολογίας των κόκκων τους και η εκτίμηση του μέσου μεγέθους αυτών.

### 5.3.2. Μελέτη δειγμάτων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope)

Τόσο η επιφάνεια, όσο και η κάθετη διατομή των αντιπροσωπευτικών δοκιμών από κάθε ζώνη της συγκόλλησης μελετήθηκε στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV (εικόνα 5.8).



**Εικόνα 5.8:** Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) τύπου Jeol GSM 6380-LV

Οι λειτουργικές συνθήκες για τη λήψη εικόνων δευτερογενών ηλεκτρονίων (secondary electron mode, SEI mode) και πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (backscattered electron mode, BES mode) δίνονται στον πίνακα 5.5.

**Πίνακας 5.5:** Συνθήκες λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης

Συνθήκες λειτουργίας	SEI mode	BES mode
Accelerating voltage	20kV	20kV
Vacuum	High	High

Spot size	50nm	60nm
Working distance	15mm	15mm

## 5.4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

### 5.4.1. Μικρο-σκληρομετρήσεις

Για τη μέτρηση της μικρο-σκληρότητας, η επιφάνεια του υλικού είχε λειανθεί με χαρτί καρβιδίου του πυριτίου των 1200 grit. Κάθε αποτύπωμα του διεισδυτή απείχε 10μm κατά το μήκος του δοκιμίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο μικροσκληρόμετρο της EAB και επιλέχθηκε φορτίο 300g και χρόνος επιβολής πλήρους φορτίου 15 sec. Πραγματοποιήθηκαν 10 μετρήσεις ανά δοκίμιο για ελαχιστοποίηση πιθανότητας σφάλματος. Από τη μέτρηση με αναλογικό τρόπο του μέσου όρου των διαγωνίων του αποτυπώματος πρόκυπτε η σκληρότητα του δείγματος, σύμφωνα με τους πίνακες μετατροπής της ένδειξης σε σκληρότητα.

### 5.4.2. Δοκιμές εφελκυσμού

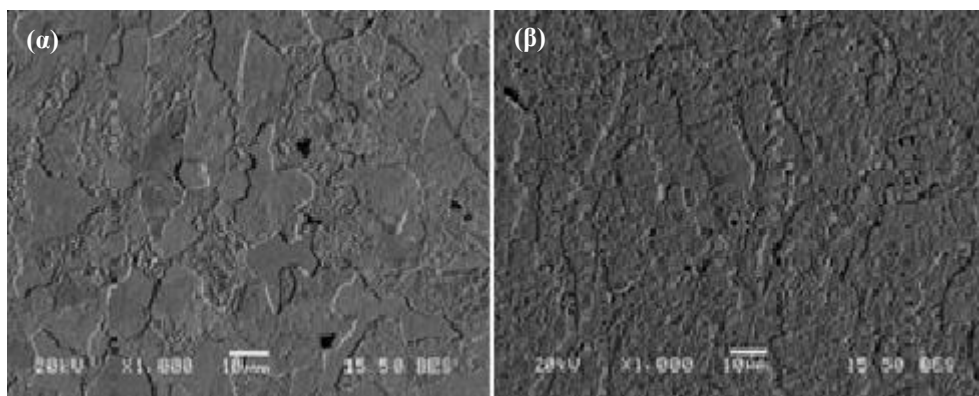
Έξι δοκίμια από το δείγμα αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές εφελκυσμού, με σκοπό τον επακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του αρχικού υλικού και των περιοχών ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσής του. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η μηχανή INSTRON. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε θερμοκρασία δωματίου και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για σχετικά αργό ρυθμό παραμόρφωσης: 0,5 mm/min. Μετά το τέλος της μηχανικής καταπόνησης προέκυψε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης για το συγκολλημένο δείγμα. Από αυτή προσδιορίστηκαν προσεγγιστικά οι τιμές του ορίου διαρροής (Yield Point), της μέγιστης εφελκυστικής τάσης θραύσης (Ultimate Tensile Strength) και της ολκιμότητας (Elongation).



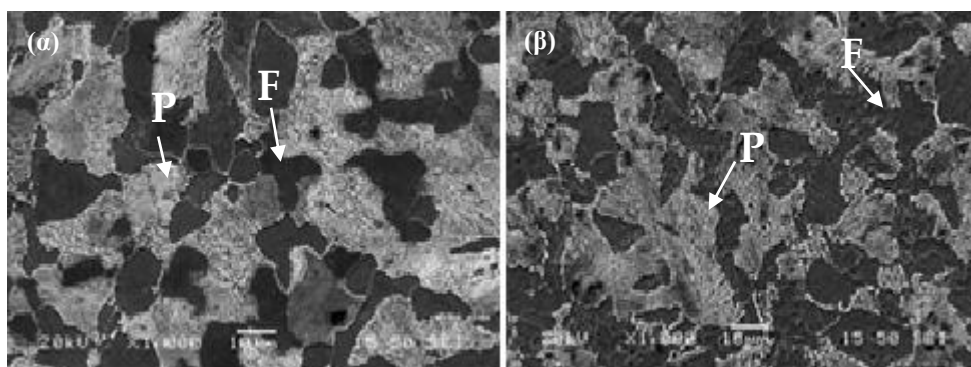
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΜΙΚΡΟΔΟΜΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

Μέσω εικόνας πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (εικόνα 6.1) παρατηρήθηκε η επιφάνεια (εικόνα 6.1(α)) και η κάθετη διατομή (εικόνα 6.1(β)) του μετάλλου βάσης του συγκολλημένου δείγματος. Ταυτοποιήθηκε, με τη χρήση αντίθεσης πεδίου, η ανάπτυξη μικρογραφικού ιστού μέσω της συμμετοχής φάσεων εντός θερμοδυναμικής ισορροπίας (προευτηκτοειδής φερρίτης, F) και του μικρογραφικού συστατικού του ευτηκτοειδούς περλίτη (P). Ο περλίτης αποτελείται από επάλληλα πλακίδια ευτηκτοειδούς φερρίτη και σεμεντίτη ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Από τις εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων (εικόνα 6.2) προκύπτει ότι, το μέταλλο βάσης χαρακτηρίζεται από ισαξονικούς και πολυγωνικούς φερριτικούς κόκκους και περλιτικούς κόκκους πλακοειδούς μορφολογίας. Το μέσο μέγεθος των φερριτικών κόκκων είναι ίσο με  $60 \mu\text{m} \pm 12 \mu\text{m}$ , ενώ του περλίτη είναι ίσο με  $48 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ .



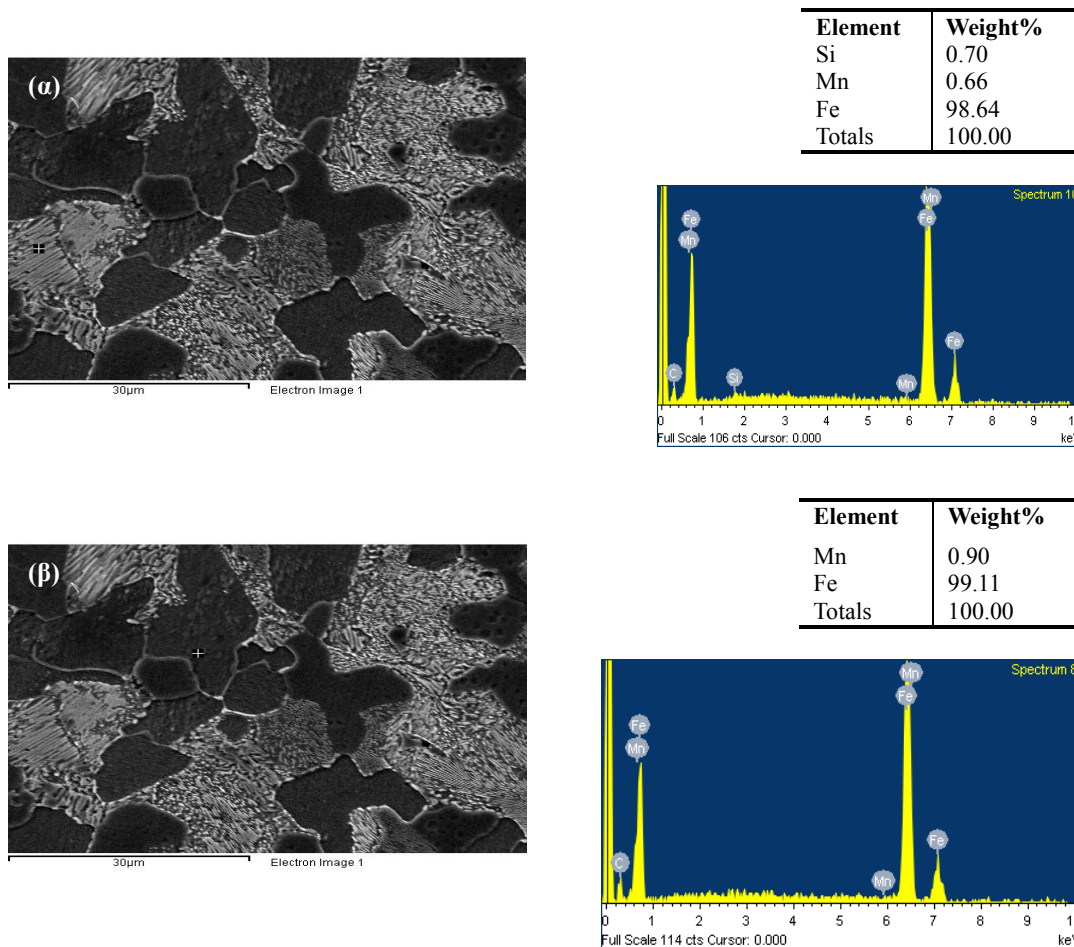
**Εικόνα 6.1:** Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης



**Εικόνα 6.2:** Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή του μετάλλου βάσης. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P ο περλίτης

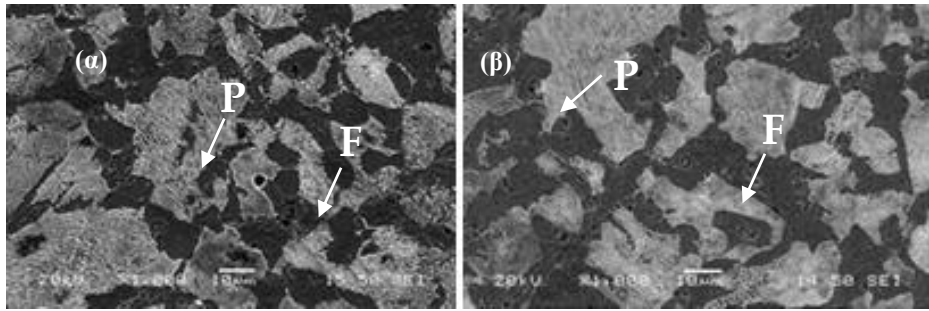
Μέσω της σημειακής χημικής μικροανάλυσης προσδιορίστηκε, τόσο σε περι-κρυσταλλικές

όσο και σε ενδο-κρυσταλλικές θέσεις φερριτικών και περλιτικών κόκκων, η κατά βάρος περιεκτικότητα των κύριων κραματικών στοιχείων του υλικού.

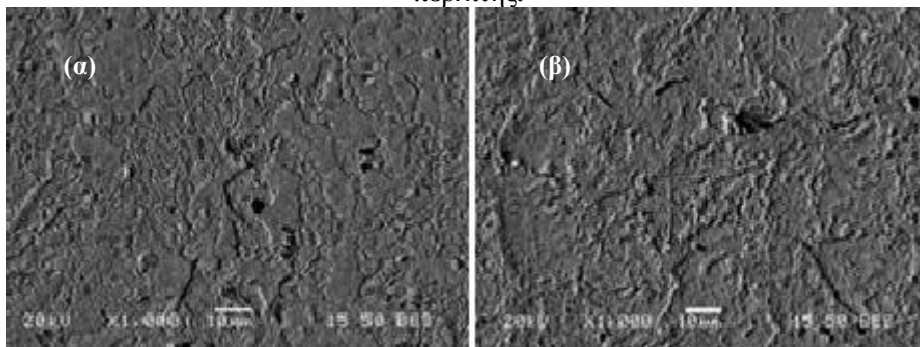


**Εικόνα 6.3:** Σημειακές χημικές αναλύσεις σε (α) περλιτικούς και (β) φερριτικούς κόκκους του μετάλλου βάσης

Οι εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων στην επιφάνεια (εικόνα 6.4(α)) και η κάθετη διατομή (εικόνα 6.4(β)) της θερμικά επηρεασμένης ζώνης του συγκολλημένου δοκιμίου δεικνύουν ότι η ζώνη αυτή αποτελείται από διευρυμένους κόκκους φερρίτη και περλίτη. Ως μικροδομικό συστατικό ο περλίτης χαρακτηρίζεται από ανισοτροπία ως προς τον προσανατολισμό και τη μορφολογική ετερογένεια, καθώς δεν παρατηρείται να ακολουθεί την πολυγωνική ισαξονική δομή. Ο προεντικτοειδής φερρίτης χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια του μέσου μεγέθους ανάπτυξής του και ετερογένεια ως προς τη κατευθυντικότητα του. Ωστόσο, οι κόκκοι παρουσιάζονται μεγαλύτεροι συγκριτικά με τους αντίστοιχους φερριτικούς κόκκους στο βασικό μέταλλο. Το μέσο μέγεθος των φερριτικών κόκκων είναι  $102 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ , ενώ των περλιτικών είναι ίσο με  $82 \mu\text{m} \pm 13 \mu\text{m}$ .

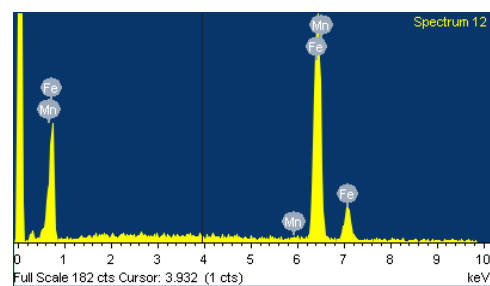
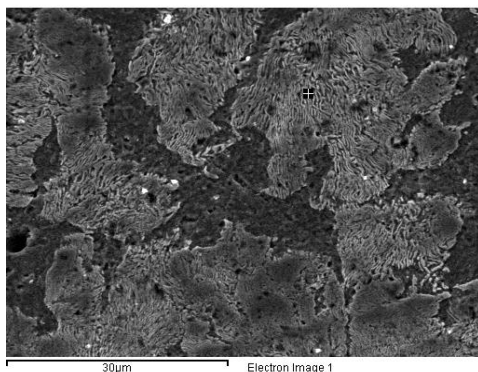


**Εικόνα 6.4:** Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Με F σημειώνονται οι κόκκοι του φερρίτη και με P ο περλίτης.

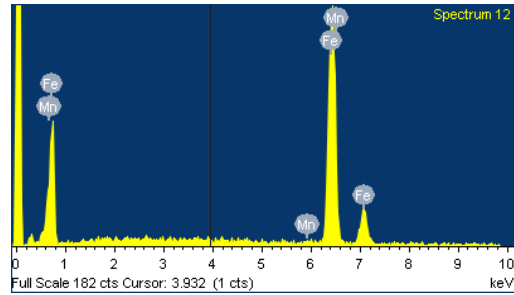
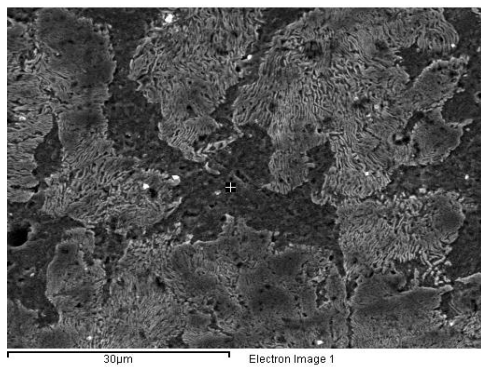


**Εικόνα 6.5:** Εικόνα πισοσκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη, παρατηρείται έντονη ανακατανομή των κραματικών στοιχείων στις περικρυσταλλικές θέσεις ισορροπίας, ως αποτέλεσμα της ταχύτατης απόψυξης. Λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που δίνεται στο κρυσταλλικό σύστημα της θερμικά επηρεασμένης ζώνης ώστε να αποψυχθεί, τα κραματικά στοιχεία δεν διαθέτουν τον απαιτούμενο χρόνο ώστε να πραγματοποιηθεί ομοιόμορφη διάχυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα.



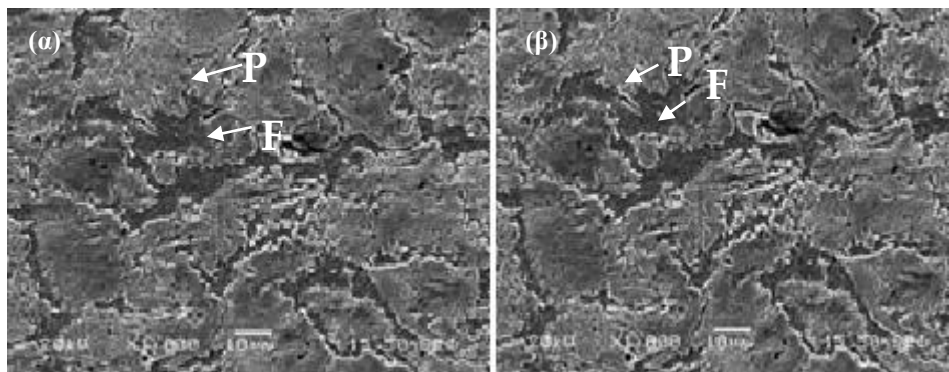
Element	Weight%	Atomic%
Si	0.64	1.27
Mn	0.22	0.22
Fe	99.14	98.51
Totals	100.00	



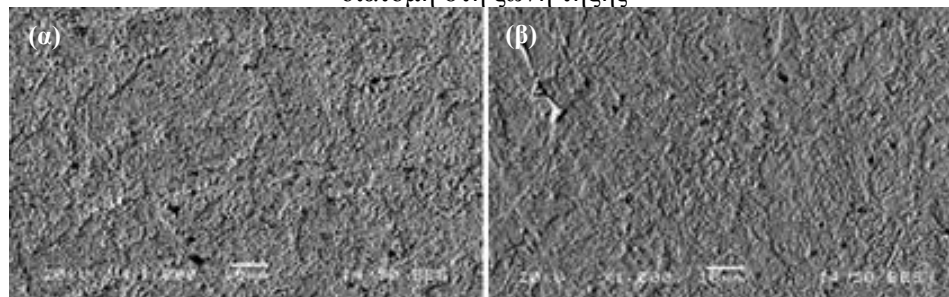
Element	Weight%	Atomic%
Si	0.42	0.82
Mn	0.52	0.53
Fe	99.06	98.65
Totals	100.00	

**Εικόνα 6.6:** Σημειακές χημικές αναλύσεις σε (α) περλιτικούς και (β) φερριτικούς κόκκους στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη

Στη ζώνη τήξης παρατηρούνται φάσεις εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας όπως είναι ο μπαινίτης και ο φερρίτης Widmanstaen. Οι φάσεις αυτές παρουσιάζουν φυλλολοειδή και γωνιώδη μορφολογία αντίστοιχα. Παράλληλα παρατηρείται συνδυασμένη συμμετοχή μη-ισοαξονικών κόκκων προευτηκτοειδούς φερρίτη και περλίτη που χαρακτηρίζεται από πυκνή επιστοίβαξη πλακιδίων. Οι συνθήκες γεινίασης μεταξύ των δύο φάσεων δημιουργούν ισχυρά κέντρα αγκύρωσης καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αναντιστοιχίας πλέγματος και ανισοτροπίας προσανατολισμού.

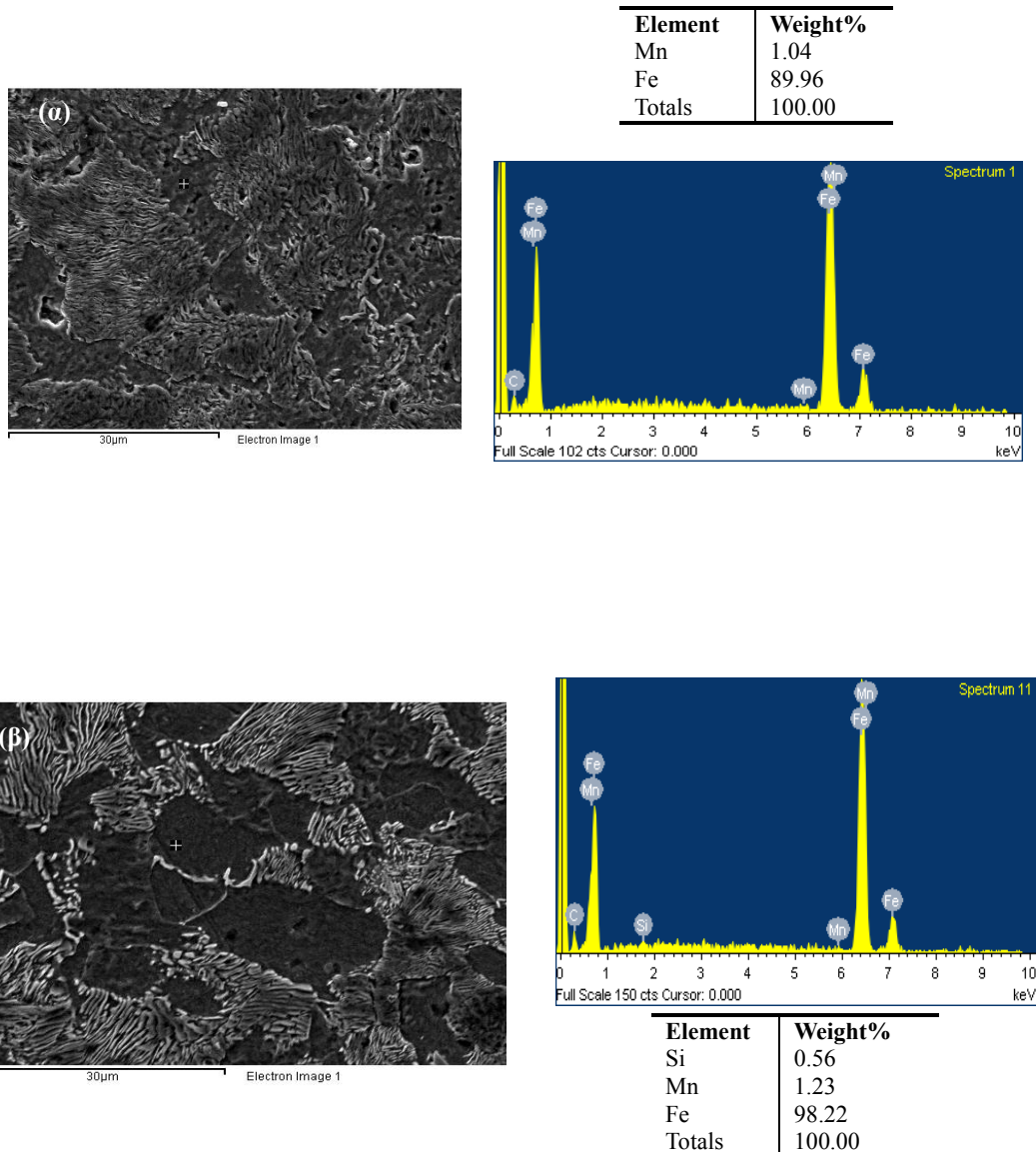


**Εικόνα 6.7:** Εικόνα δευτερογενών ηλεκτρονίων (SEI mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή στη ζώνη τήξης



**Εικόνα 6.8:** Εικόνα πισσοκεδαζόμενων ηλεκτρονίων (BES mode) από την (α) επιφάνεια και (β) κάθετη διατομή στη ζώνη τήξης

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται (εικόνα 6.9) τα αποτελέσματα των σημειακών στοιχειομετρικών αναλύσεων (εικόνα εξεταζόμενης περιοχής, φάσμα χημικής μικροανάλυσης και ποσοστιαία συμμετοχή των κραματικών στοιχείων) σε κάθε ζώνη της συγκόλλησης.



**Εικόνα 6.9:** Σημειακές χημικές αναλύσεις σε (α) περλιτικούς και (β) φερριτικούς κόκκους στη ζώνη τήξης

## 6.2. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

### 6.2.1. Δοκιμές μικρο-σκληρομέτρησης

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τιμές της μικροσκληρότητας από την εκάστοτε ζώνη της

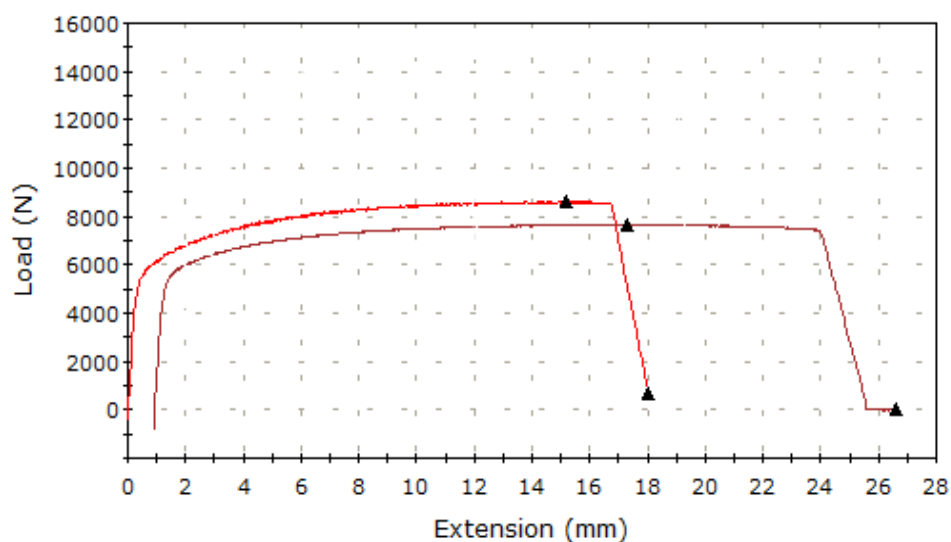
συγκόλλησης, καθώς και η τυπική απόκλιση αυτών.

**Πίνακας 6.1:** Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	Μέταλλο Βάσης	Θερμικά Επηρεασμένη ζώνη	Ζώνη τήξης
Μίκροσκληρότητα	318,5	162	546,5
Τυπική απόκλιση	±8	±9	±7

### 6.2.2. Δοκιμές εφελκυσμού

Στην εικόνα 6.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου – επιμήκυνσης του δοκιμίου που παρελήφθη και του συγκολλημένου. Είναι εμφανής η αύξηση των τιμών του ορίου διαρροής (Yield point,  $\sigma_y$ ) και της μέγιστης εφελκυστικής τάσης θραύσης (Ultimate Tensile Strength, UTS) μετά τη συγκόλληση. Αντίθετα, το συγκολλημένο δοκίμιο, παρουσιάζει μείωση της ολκιμότητάς του (elongation). Ωστόσο, η κλίση των καμπυλών στην ελαστική περιοχή, που σχετίζεται με το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) δεν παρουσιάζει σημαντική αλλαγή. Στον πίνακα 6.2, ποσοτικοποιούνται οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τη στατική καταπόνηση. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα μεγέθη των μηχανικών ιδιοτήτων που προκύπτουν από τις καμπύλες για το δείγμα αναφοράς και το συγκολλημένο δείγμα.



**Εικόνα 6.10:** Καμπύλες φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου που παρελήφθη και του συγκολλημένου

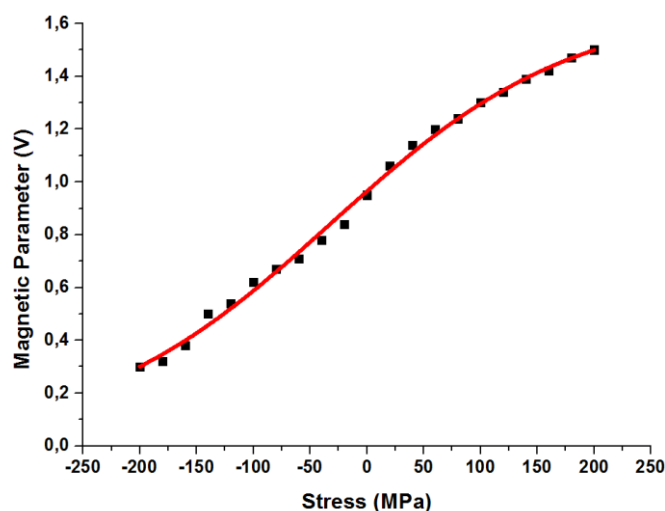
**Πίνακας 6.2:** Μηχανικές ιδιότητες του αρχικού και του συγκολλημένου υλικού οι οποίες προσδιορίστηκαν από τις αντίστοιχες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

	<b>Δείγμα αναφοράς</b>	<b>Συγκολλημένο δείγμα</b>
Όριο Διαρροής (Yield Strength) σε MPa	284	290
Μέγιστη Εφελκυστική Τάση Θραύσης (Ultimate Tensile Strength) σε MPa	350	362
Ολκιμότητα (Elongation) %	24	15

Τα δεδομένα που ελήφθησαν είναι αναμενόμενα, καθώς πραγματοποιώντας τη συγκόλληση δημιουργήθηκαν τάσεις στο κράμα οι οποίες είναι τα σημεία δημιουργίας και διάδοσης των διαταραχών. Έτσι το μέταλλο γίνεται πιο ψαθυρό και ελαφρώς σκληρότερο τοπικά λόγω της ύπαρξης της συγκόλλησης στο σημείο όπου θα ξεκινήσει η διάδοση των ρωγματώσεων λόγω εφελκυσμού (περίπου στο κέντρο του dog bone) και κατ' επέκταση λιγότερο όλκιμο από πριν λόγω της τοπικής του ψαθυροποίησης.

### 6.2.3. Καμπύλη βαθμονόμησης

Για την εκτίμηση της κατανομής των παραμενουσών τάσεων στα συγκολλημένα δοκίμια, πραγματοποιήθηκαν μαγνητικές μετρήσεις σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων. Με τη βοήθεια της καμπύλης βαθμονόμησης (εικόνα 6.11) πραγματοποιήθηκε αντιστοίχιση των μετρήσιμων τιμών της μαγνητικής επιφανειακής διαπερατότητας σε κάθε σημείο της μέτρησης με την τιμή της παραμένουσας τάσης.



**Εικόνα 6.11:** Καμπύλη βαθμονόμησης του δείγματος αναφοράς

#### 6.2.4. Χωρική κατανομή επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας

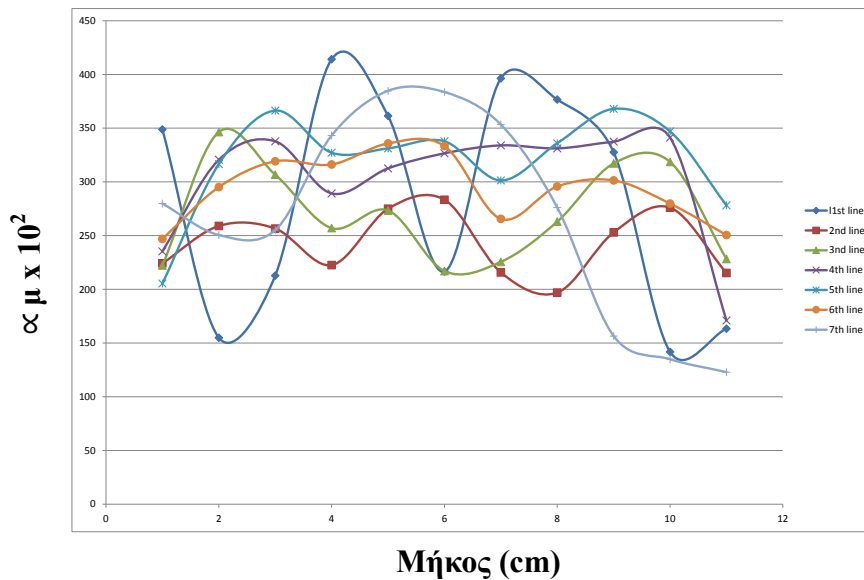
Το μέταλλο βάσης παρουσίαζε χαμηλές τιμές μαγνητικής απόκρισης, η οποία αυξάνονταν στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και στη συνέχεια μειώνονταν δραματικά στη ζώνη τήξης. Η φερριτοπερλιτική δομή συμβάλει στην κατανομή των τιμών αυτών. Ο περλίτης ως μικροδομικό συστατικό αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη. Σε αντίθεση με το φερρίτη που παρουσιάζει μαγνητική συμπεριφορά, ο σεμεντίτης, ως καρβίδιο αποτελεί ισχυρό σημείο αγκύρωσης για τα μαγνητικά δίπολα κατά τη διαδικασία της μαγνήτισης. Αυτό σημαίνει ότι παρεμποδίζει τη μαγνήτιση του υλικού. Το προηγούμενο συμπέρασμα σε συνδυασμό με την υψηλή ποσοστιαία συμμετοχή του φερρίτη συμβάλλει στις χαμηλές τιμές του μαγνητικού σήματος. Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη είναι ιδιαίτερα περιορισμένη και αποτελείται από ανομοιόμορφα μεγεθυμένους φερριτικούς και περλιτικούς κόκκους. Η ζώνη χαρακτηρίζεται από ισχυρή διαβάθμιση συγκέντρωσης χημικών στοιχείων. Εξαιτίας της αυξημένης ποσοστιαίας συμμετοχής του περλίτη, συγκριτικά με το αρχικό υλικό παρατηρούνται αυξημένες τιμές επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας. Τέλος, η ζώνη τήξης παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του μαγνητικού σήματος καθώς περιγράφεται από την παρουσία φάσεων εκτός θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Ο ρυθμός ψύξης αποτελεί σημαντική παράμετρο στο σχηματισμό παραμενουσών τάσεων σε συνολική κλίμακα στο συγκολλημένο υλικό. Οι περισσότερες τάσεις που αρχικά αναπτύσσονται στο υλικό ανακουφίζονται όταν ακόμη οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, ενώ οι τάσεις που αναπτύσσονται στα μετέπειτα στάδια της ψύξης παραμένουν όταν το υλικό έχει κρυσταλλωθεί και εγκλωβίζονται σε αυτό. Ως αποτέλεσμα, στο συγκολλημένο υλικό, παρουσιάζονται περιοχές στην επιφάνεια του υλικού σε κατάσταση μόνιμης θλίψης που εξισορροπούνται από τις εσωτερικές εφελκυστικές τάσεις. Υψηλοί ρυθμοί απόψυξης, εν γένει, αυξάνουν αυτές τις παραμένουσες τάσεις και η κατανομή τους είναι έντονη, καθώς παρουσιάζουν ένα σχεδόν παραβολικό προφίλ παραμενουσών τάσεων.

Συγκεκριμένα, το τηκόμενο υλικό στη ζώνη τήξης, λόγω της υψηλής του θερμοκρασίας, τείνει να διασταλεί. Καθώς ψύχεται, η συνεπακόλουθη συστολή του παρεμποδίζεται από την σχετική ακαμψία του υπόλοιπου βασικού μετάλλου. Η παρεμπόδιση της ελεύθερης μεταβολής των διαστάσεων της θερμαινόμενης ζώνης εμφανίζεται σαν ελαστική παραμόρφωση (στα επίπεδα του ορίου διαρροής), η οποία οδηγεί τελικά στην εμφάνιση της παραμένουσας τάσης. Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων είναι αποτέλεσμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο συγκολλημένο υλικό λόγω της διαμήκουσας συστολής. Η παραπάνω διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών τιμών της

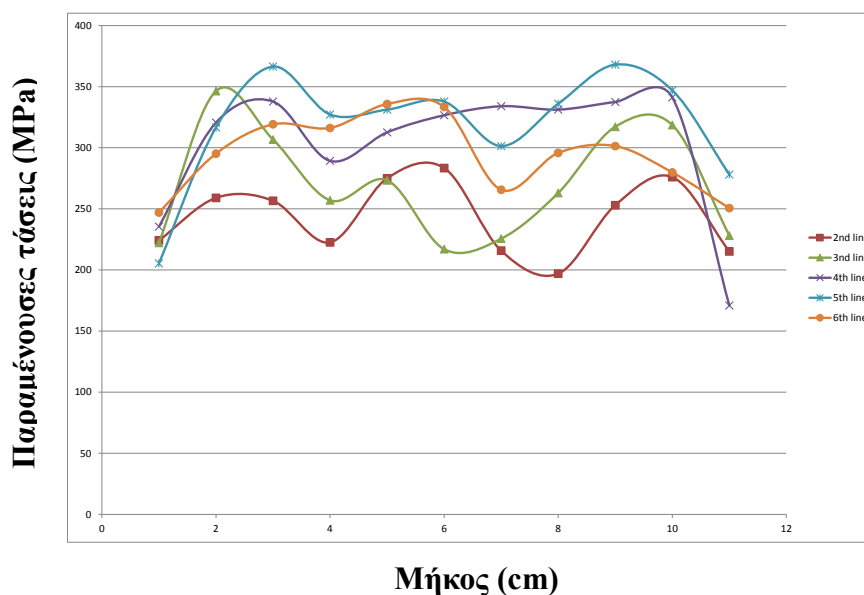


εφελκυστικής τάσης στην περιοχή γύρω από τη ραφή της συγκόλλησης, που σταδιακά μειώνονται, για να γίνουν θλιπτικές σε απόσταση από την γραμμή συγκόλλησης ίση προς μερικές φορές το πλάτος του μετάλλου κόλλησης. Συνεπώς, οι εφελκυστικές τάσεις στη ζώνη τήξης αντισταθμίζονται από τις θλιπτικές τάσεις που παρουσιάζονται στο βασικό μέταλλο. Οι γεινιάζουσες, στη ζώνη τήξης, θερμικά επηρεασμένες ζώνες, αποτελούν τις περιοχές ομαλής μετάβασης.



**Εικόνα 6.12:** Κατανομή επιφανειακής μαγνητικής διαπερατότητας στο συγκολλημένο δοκίμιο

Στηριζόμενοι στην καμπύλη βαθμονόμησης και στην κατανομή της μαγνητικής επιφανειακής διαπερατότητας (εικόνα 6.12) προσδιορίστηκε η κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 6.13.



**Εικόνα 6.13:** Κατανομή των παραμενουσών τάσεων στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης

Ο χάλυβας, χαρακτηρίζεται ως θετικά μαγνητοσυστολικός ( $\lambda_{si} > 0$ ) για χαμηλές τιμές εφαρμοζόμενου πεδίου. Ο εύκολος άξονας μαγνήτισης παρατηρείται, εν γένει, στην οικογένεια των  $\langle 100 \rangle$  κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Η παρουσία τάσεων, είτε λόγω στατικής/δυναμικής καταπόνησης (π.χ. εφελκυσμός/κόπωση αντίστοιχα), είτε λόγω κάποιας θερμικής κατεργασίας (ανόπτηση, συγκόλληση), αναγκάζει τη διάταξη των μαγνητικών περιοχών να ανακαταταχθεί, με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική ενέργεια του μεταλλικού συστήματος (κυρίως η μαγνητοελαστική ενέργεια και η ενέργεια ανισοτροπίας). Η νέα αυτή διάταξη των μαγνητικών περιοχών προκύπτει είτε με τον επαναπροσανατολισμό των διανυσμάτων της μαγνήτισης των μαγνητικών διπόλων, που περιγράφουν τις μαγνητικές περιοχές, όταν η διεύθυνσή τους διαφέρει από τη διεύθυνση της τάσης, είτε με την αύξηση των  $180^\circ$  μαγνητικών τοιχωμάτων. Γνωρίζουμε ότι, ο εύκολος άξονας μαγνήτισης αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση όπου ο αριθμός των  $180^\circ$  - μαγνητικών τοιχωμάτων είναι μέγιστος. Θεωρώντας τον εύκολο άξονα μαγνήτισης που περιγράφει την κατάσταση όπου καμία τάση δεν επενεργεί στο υλικό αποκλίνει από τη διεύθυνση των τάσεων που παρατηρούνται στη συνέχεια, συμπεραίνουμε ότι στην κατάσταση όπου εμφανίζονται τάσεις στο υλικό, ο αρχικός εύκολος άξονας μαγνήτισης θα περιστραφεί, προσεγγίζοντας τη διεύθυνση των τάσεων.

Στο συγκολλημένο δοκίμιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, αν και παρατηρούνται έντονες μικροδομικές αλλαγές στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης, είναι εμφανές ότι οι διακυμάνσεις των παραμενουσών τάσεων δεν είναι σημαντική. Όλες οι παραμένουσες τάσεις είναι εφελκυστικές, ακόμα και στο μέταλλο βάσης. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στην πάκτωση των προς συγκόλληση των μεταλλικών μερών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Έχει καταστεί προφανές ότι, οι μαγνητικές μέθοδοι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των ΜΚΕ και υπόσχονται ότι δύναται να προσδιορίσουν τις μακροσκοπικές τιμές των παραμενουσών τάσεων σε σιδηρομαγνητικούς χάλυβες, με τη χρήση αρκετά απλών ηλεκτρονικών διατάξεων.

Η μέτρηση της μαγνητικής διαπερατότητας είναι μια μέθοδος προσδιορισμού των τάσεων ιδιαίτερος σημαντική, καθώς η μαγνητική διαπερατότητα αποτελεί ενδογενή ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Παρόλα αυτά, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την καθιέρωση προτύπων, στον εκάστοτε εξεταζόμενο χάλυβα, όσον αναφορά στις αποδεκτές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας (ανώτερο και κατώτερο όριο), καθώς και στη συσχέτιση αυτών με τις τιμές των υπόλοιπων μαγνητικών μεθόδων. Για να συμβεί αυτό, απαιτείται η διεθνής διεργασηριακή συνεργασία και η τελική σύγκριση των τιμών των μαγνητικών μετρήσεων μεταξύ τους.

Σε κάθε περίπτωση, η ανάγκη βαθμονόμησης διαφόρων τύπων σιδηρομαγνητικών χαλύβων, ως προς τη μαγνητική τους διαπερατότητα κρίνεται αναγκαία. Η χρήση των καμπυλών βαθμονόμησης που προκύπτουν, στον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων, σε συγκολλημένα δείγματα χαλύβων, με διαφορετικές τεχνικές συγκόλλησης τόξου, αλλά και παραμέτρων θα επιβεβαιώσει την αξιοπιστία των μαγνητικών αποτελεσμάτων.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πίνακας 1:** Βασικά μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στον μαγνητισμό

Μέγεθος	Σύμβολο	SI (Sommerfield)	SI (Kennelly)	EMU (Gaussian)
Εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο	H	A/m	A/m	Oersteds
Μαγνητική επαγωγή	B	tesla	tesla	gauss
Μαγνήτιση	M	A/m	-	emu/cc
Ένταση μαγνητισής	I	-	tesla*	-
Μαγνητική ροή	Φ	weber	weber	maxwell
Ροπή στρέψης	M	A · m <sup>2</sup>	weber · m	emu
Πολική δύναμη	P	A · m	weber	emu/cm

\*Η ένταση της μαγνήτισης (I) που χρησιμοποιείται στο σύστημα μονάδων κατά Kennelly είναι απλώς ένα εναλλακτικό μέτρο της μαγνήτισης M, στην οποία χρησιμοποιείται η μονάδα μέτρησης tesla αντί του A/m. Σε κάθε περίπτωση, επομένως,  $I = \mu_0 \cdot M$ .

**Πίνακας 2:** Εξισώσεις βασικών μαγνητικών μεγεθών στα βασικά μετρητικά συστήματα

Μέγεθος	SI (Sommerfield)	SI(Kennelly)	EMU (Gaussian)
Μαγνητικό πεδίο	$B = \mu_0(H + M)$	$B = \mu_0(H + I)$	$B = H + 4\pi M$
Ενέργεια ροπής στρέψης στο κενό	$E = -\mu_0 m H$	$E = -m H$	$E = -m H$
Ροπή στρέψης στο κενό	$\tau = \mu_0 m \times H$	$\tau = m \times H$	$\tau = m \times H$



**MTC**  
M E T A L

**MILL TEST CERTIFICATE**

PROFORMA INVOICE NO : C126514-2323 VRICO  
S.A

13.10.2014

QUALITY CHARACTERISTICS OF GOODS											
DESCRIPTION OF GOODS	DIMENSION	HEAT NO	GRADES	MECHANICAL PROPERTIES			CHEMICAL COMPOSITION, %				
				YIELD STRENGTH (N/MM <sup>2</sup> )	TENSILE STRENGTH (N/MM <sup>2</sup> )	% ELONGATION	C %	Mn %	Si %	P %	S %
HOT ROLLED COIL	1.30X1200X0	474330	S235JR	265	405	31	0,090	0,520	0,010	0,019	0,007

**MTC METAL DIŞ TİCARET LTD.ŞTİ.**

19 Mayıs Mah. Atatürk Cad. Turapoglu Sok. Sirkubey Plaza No:82 D:10-11 34736 Kozyatağı-Kadıköy/İstanbul

TEL:+90.216.410 31 40-41 FAX:+90.216.464 08 78 e-mail: info@mtcmetal.com www.mtcmetal.com

**MTC METAL DIŞ TİC. LTD. ŞTİ.**  
19 Mayıs Mahallesi Atatürk Caddesi  
Sirkubey Plaza No:82 D:10-11  
Kozyatağı-Kadıköy/İSTANBUL/TURKEY  
T. 00 216 410 31 40 F. 00 216 464 08 78

**Εικόνα 1:** Πιστοποιητικό προδιαγραφών και ποιότητας του χάλυβα St-37 όπως παραλήφθηκε από την εταιρεία VETA SA

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δρ. Πανδώρα Ψυλλάκη, Φυσικές, μηχανικές και χημικές διεργασίες στα υλικά, διαβρωση και μετασχηματισμοί φάσεων Έννοια: αστοχία υλικών και κριτήρια επιλογής τους για βιομηχανικές εφαρμογές, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Χημεία & Τεχνολογία Υλικών», Ιωάννινα, Φεβρουάριος 2006
- [2] Αγγέλης Δημήτριος, ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ-ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ ΔΙΑΛΕΞΕΩΝ, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο Ιωαννίνων, Ιωάννινα 2009
- [3] Ν.-Μ. Μπάρκουλα, Α. Παϊπέτης, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΛΙΚΩΝ ΙΙΙ-ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ-Διδακτικές σημειώσεις, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο Ιωαννίνων, Ιωάννινα 2009
- [4] Μαρία-Ελισάβετ Κούλη, Χαρτογράφηση ηλεκτρικού δυναμικού για την ανίχνευση βλάβης σε σύνθετα υλικά-Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Σεπτέμβριος 2012
- [5] Παρουσίαση με τίτλο «Προσδιορισμός παραμενουσών τάσεων σε συγκολλημένα δείγματα χάλυβα: σύγκριση μαγνητικών μεθόδων με τεχνικές περίθλασης», Βουρνά Πολυξένη, 8<sup>ο</sup> Συνέδριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, 8-9 Μαΐου 2015, Αθήνα, Ελλάδα
- [6] Doebelin E O 1990 Measurement Systems: Applications and Design 4th edn (New York: McGraw-Hill)
- [7] Herceg E E 1976 Handbook of Measurement and Control review edn (Pennsauken, NJ: Schaevitz Engineering)
- [8] Boll R 1977 Soft magnetic materials Vacuumschmelze Handbook (London: Heyden)
- [9] Ripka P (ed) 2001 Magnetic Sensors and Magnetometers (Norwood, MA: Artech House)
- [10] Daughton J M 1999 GMR applications J. Magn. Magn. Mater. **192** 334–42
- [11] Mohri K, Bushida K, Noda M, Yoshida H, Panina L V and Uchiyama T 1995 Magneto-impedance element IEEE Trans. Magn. **31** 2455–60
- [12] du Tremolet de Lacheisserie E 1994 Magnetostriction: Theory and Applications of Magnetoelasticity (Boca Raton, FL: Chemical Rubber Company Press)
- [13] Jackson J D 1965 Electricity and Magnetism (New York: Wiley)

- [14] Jiles D 1993 Introduction to the Electronic Properties of Materials (London: Chapman and Hall)
- [15] Jiles D 1991 Introduction to Magnetism and Magnetic Materials (London: Chapman and Hall)
- [16] Hayes J P, Stone L A, Snelling H V, Jenner A G and Greenough R D 1997 Magnetic and magnetoelastic properties of thin films by pulsed laser deposition IEEE Trans. Magn. **33** 3613–15
- [17] Grabham N J, Beeby S P and White N M 2002 The formulation and processing of a thick-film
- [18] Mizutani M, Katoh H, Panina L V, Mohri K and Humphrey F B 1993 Distance sensors utilizing large Barkhausen effect excited by wire current pulse train in twisted amorphous magnetostrictive wires IEEE Trans. Magn. 29 3174–6
- [19] Chikazumi S 1964 Physics of Magnetism (New York: Wiley)
- [20] E. Hristoforou, Magnetostrictive delay lines: engineering theory and sensing applications, Institute of physics publishing, Measurement science and technology, 7 January 2003
- [21] D.C. Jiles, Journal of Applied Physics 21 (1988) 1196.
- [22] J.J. Zheng, S.Y. Cao, H.L. Wang, Sensors and Actuators A 143 (2008) 204.
- [23] M. Lindgren, T. Lepisto, NDT & E International 34 (2001) 337
- [24] Z.D. Wang, K. Yao, K.Q. Ding, NDT & E International 43 (6) (2010) 513
- [25] Z.D. Wang, B. Deng, K. Yao, Journal of Applied Physics 109 (2011) 083928
- [26] H.J.M. Jansen, M.M. Festen, Insight 37 (6) (1995) 421
- [27] M. Afzal, S. Udpa, NDT & E International 35 (7) (2002) 449
- [28] V. Babbar, L. Clapham, J. NDT, Evaluation 22 (4) (2003) 117
- [29] H. Barkhausen, Physics Z 29 (1919) 401
- [30] S. Chikazumi, S.H. Charap, Physics of Magnetism, Krieger Publishing Company, Florida, 1964
- [31] T.W. Krause, J.M. Makar, D.L. Atherton, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 137 (1–2) (1994) 25

- [32] L. Clapham, S. White, J. Lee, D.L. Atherton, *Journal of Applied Physics* 88 (4) (2000) 2163.
- [33] T.W. Krause, L. Clapham, D.L. Atherton, *Journal of Applied Physics* 75 (12) (1994) 7983.
- [34] C. Jagadish, L. Clapham, D.L. Atherton, *IEEE Transactions on Magnetics* 26 (3) (1990) 1160.
- [35] D.C. Jiles, *IEEE Transactions on Magnetics* 25 (5) (1989) 3455
- [36] M. Lindgren, T. Lepisto, *NDT & E International* 34 (2001) 337–344
- [37] T.W. Krause, L. Clapham, A. Pattantyus, D.L. Atherton, *Journal of Applied Physics* 79 (8) (1996) 4242.
- [38] A. Dhar, D.L. Atherton, *Non-destructive Testing Evaluation* 10 (1993) 287.
- [39] R. Pasley, *Materials Evaluation* (1970) 157
- [40] R. Rautioaho, P. Karjalainen, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 73 (1988) 96.
- [41] K. Titto, *Non-Destructive Testing-Australia* 26 (1989) 36.
- [42] M. Makar, D.L. Atherton, *IEEE Transactions on Magnetics* 30 (4) (1994) 1380.
- [43] L. Clapham, C. Jagadish, D.L. Atherton, *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (7) (1991) 1555.
- [44] T.W. Krause, N. Pulfer, P. Weymann, D.L. Atherton, *IEEE Transactions on Magnetics* 32 (5) (1996) 4764.
- [45] A.J. Birkett, W.D. Corner, B.K. Tanner, S.M. *Journal of Applied Physics* 22 (1989) 1240
- [46] X. Kleber, A. Vincent, *NDT & E International* 37 (2004) 439
- [47] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton, *NDT & E International* 34 (2001) 507
- [48] R.F. Krause, B.D. Cullity, *Journal of Applied Physics* 39 (1968) 5532.
- [49] A. Birkett, W.D. Corner, B.K. Tanner, S.M. Thompson, *Journal of Applied Physics* 22 (1989) 1240
- [50] U. Lieneweg, *IEEE Transactions on Magnetics* 10 (2) (1974) 118.



- [51] S. Vaidyanathan, V. Moorthy, P. Kalyanasundaram, T. Jayakumar, R. Baldev, *Metallurgical and Materials Transactions A* 30 (1999) 2067
- [52] D.J. Buttle, C.B. Scuby, J.P. Jakubovics, G.A.D. Briggs, *Philosophical Magazine* 55 (6) (1987) 717
- [53] A.J. Birkett, W.D. Corner, B.K. Tanner, S.M. Thompson, *Journal of Applied Physics* 22 (1989) 1240
- [54] C.G. Stefanita, D.L. Atherton, L. Clapham, *Acta Materials* 48 (2000) 3545
- [55] L.J. Swartzendruber, G.E. Hicho, H.D. Chopra, S.D. Leigh, G. Adam, E. Tsory *Journal of Applied Physics* 81 (8) (1997) 4263
- [56] D.G. Hwang, H.C. Kim, *Journal of Applied Physics* 21 (1988) 1807
- [57] C.G. Stefanita, D.L. Atherton, L. Clapham, *Acta Materialia* 48 (13) (2000) 2545
- [58] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton, *NDT & E International* 34 (2001) 507
- [59] P. Kettunen, P. Ruuskanen, *Scandinavian Journal of Metallurgy* 8 (1979) 112
- [60] L.P. Karjalainen, M. Moilanen, *NDT & E International* 13 (3) (1979) 51
- [61] Y. Furuya, H. Shimada, K. Yamada, T. Suzuki, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection* 41 (4) (1991) 215
- [62] M. Lindgren, T. Lepistö, *NDT & E International* 33 (2000) 423
- [63] Z.J. Chen, A. Strom, D.C. Jiles, *IEEE Transactions on Magnetics* 29 (6) (1993) 3031
- [64] L.P. Karjalainen, M. Moilanen, *IEEE Transactions on Magnetics* 16 (3) (1980) 514
- [65] K. Tiitto, *Nondestructive Testing Evaluations* 5 (1989) 27
- [66] M.R. Govindaraju, A. Strom, D.C. Jiles, S.B. Biner, Z.J. Chen, *Journal of Applied Physics* 10 (1993) 6165
- [67] V. Moorthy, B.K. Choudhary, S. Vaidyanathan, T. Jayakumar, K.B.S. Rao R. Baldev, *International Journal of Fatigue* 21 (1999) 263
- [68] O. Saquet, J. Chicois, A. Vincent, *Materials Science Engineering A* 269 (1999) 73
- [69] C. Gatelier-Rothea, J. Chicois, R. Fougères, P. Fleischmann, *Acta Materialia* 46 (14) (1998) 4873
- [70] D.K. Bhattacharya, S. Vaidyanathan, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 166

(1997) 111.

[71] A. Dhar, D.L. Atherton, IEEE Transactions on Magnetics 28 (6) (1992) 3363

[72] A.A. Doubov, Welding in World 41 (1998) 196

[73] A.A. Doubov, Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory, in: Proceedings of CHSNDT 7th Conference on NDT and International Research Symposium, Shantou China: Non-Destructive Testing Institution, CEMS, 1999, p. 181

[74] A.A. Doubov, G.V. Vstovsky, Physical Base of the Method of Metal Magnetic Memory, Moscow, 2000

[75] J.L. Ren, K. Song, G.H. Wu, J.M. Lin. Mechanism Study of Metal Magnetic Memory Testing, in: Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing Brisbane, Australia, 17–21 September, 2001

[76] A.A. Doubov, Inspection Diagnostics 6 (2001) 19

[77] A.A. Doubov, Principal Features of Metal Magnetic Memory Method and Inspection Tools as Compared to known Magnetic NDT Methods, in: Proceedings of the 16th Annual World Conference on Non-Destructive Testing, Montreal, Canada, 2004

[78] L.H. Dong, B.S. Xu, S.Y. Dong, L. Song, Q.Z. Chen, D. Wang, NDT & E International 42 (2009) 323

[79] Z.D. Wang, K. Yao, K.Q. Ding, NDT & E International 43 (4) (2010) 354

[80] Z.D. Wang, K. Yao, K.Q. Ding, NDT & E International 43 (6) (2010) 513

[81] K. Yao, Z.D. Wang, B. Deng, K. Shen, Experimental Mechanics, doi:10.1007/s11340-011-9490-3

[82] C.L. Shi, S.Y. Dong, B.S. Xu, P. He, NDT & E International 43 (1) (2010) 8

[83] J.C. Leng, M.Q. Xu, M.X. Xu, J.Z. Zhang, NDT & E International 42 (2009) 410

[84] D.C. Jiles, Journal of Applied Physics 28 (1995) 1537.

[85] J.W. Wilson, G.Y. Tian, S. Barrans, Sensors and Actuators A 135 (2007) 381

[86] M. Roskosz, P. Gawrilenko, NDT & E International 41 (2008) 570.

[87] Z.D. Wang, Y. Gu, Y.S. Wang, A review of three magnetic NDT technologies, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324 (2012) 382–388, September 2011

- [88] Mark Willcox & George Downes, A Brief Description of NDT Techniques, Insight NDT Equipment Ltd, 2000 - 2003
- [89] ASM Handbook, Volume 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM International, 1992
- [90] R. Becker and W. Doring, in Ferromagnetismus (Springer, Berlin, 1939), p. 176
- [91] S. Chikazumi, in Physics of Magnetism (Wiley, New York, 1964), p.264
- [92] M. Guyot and V. Cagan, The magneto-acoustic emission (invited), Journal of Applied Physics 73, 5348 (1993); doi: 10.1063/1.353728, AIP Publishing
- [93] Goldman Alex, Handbook of modern ferromagnetic materials, Copyright © 1999 by Springer Science+Business Media New York, ISBN 978-1-4613-7230-1
- [94] David Jiles, Introduction to magnetism and magnetic materials, Springer -Science and Business Media, B.V., First edition 1991 ©1991 David Jiles, ISBN 978-0-412-38640-4
- [95] D.C. Jiles, Magnetic properties and microstructure of AISI 1000 series carbon steels Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 21, No. 7, pp. 1186-1195 (14 Jul. 1988
- [96] Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Εισαγωγή στις συγκολλήσεις, εκδόσεις Τζιόλα, 2010, ISBN 978-960-418-258-9
- [97] ASTM E8-01. Standard test methods for tension testing of metallic materials, annual book of ASTM standards. Philadelphía: ASTM; 2003