

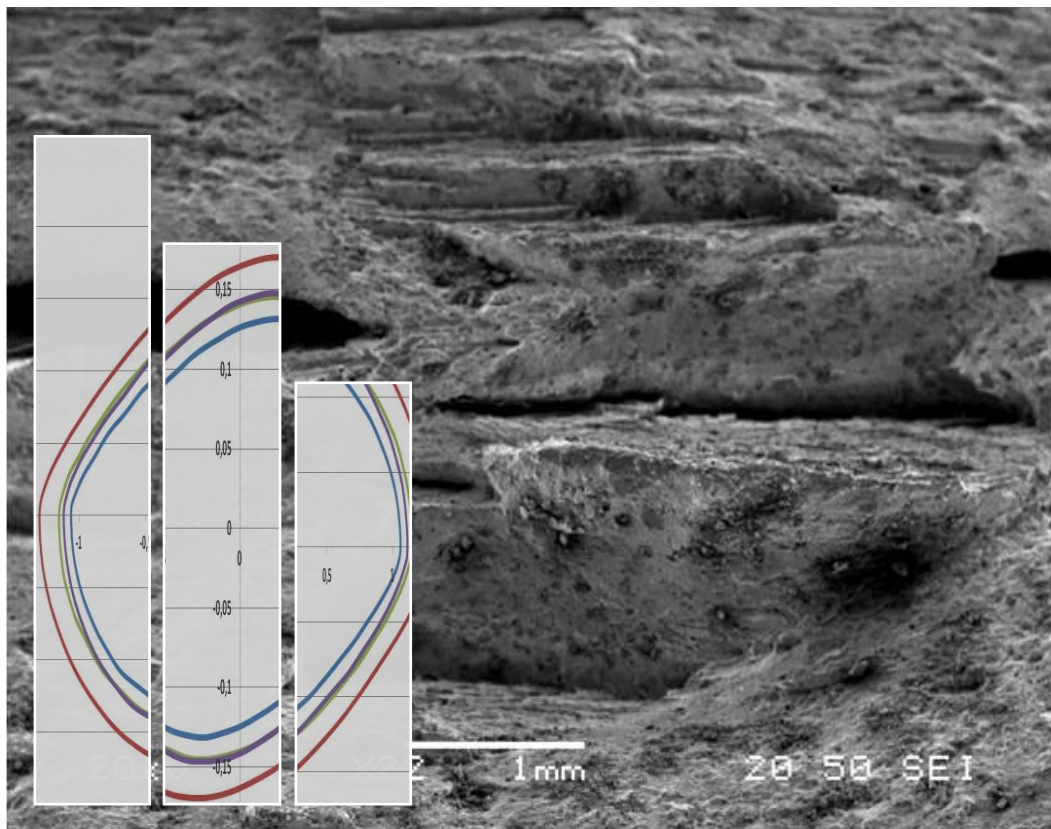


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**«ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ
ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωτούλα Γαρυφαλλιά



Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**«ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ – ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ
ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωτούλα Γαρυφαλλιά

**Επιβλέπων: Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις/..../2012

Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Χρήστος Παναγόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Γεώργιος Φούρλαρης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

Copyright © Κωτούλα Γαρυφαλλιά, 2012

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέπων Καθηγητή ΕΜΠ Χριστοφόρου Ε. για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την αποτελεσματικότητα με την οποία χειρίστηκε μια ποικιλία ζητημάτων καθ' όλη τη διάρκεια του εγχειρήματος. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Τσάκουμα Θ. για τη σημαντική βοήθεια που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου, καθώς και για τις πληροφορίες που μου προσέφερε. Ευχαριστώ επίσης τους κ. Βουδούρη Ν. και τον κ. Γκότση Β. που μου έδωσαν την δυνατότητα να πραγματοποιήσω την διπλωματική μου στην Εταιρία ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. Οφείλω να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό της Εταιρίας ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. για το έντονο ενδιαφέρον, τη φιλοξενία και τη συμπαράστασή τους και ειδικά του εργαστηρίου : . Κάπρος Θ., Μάκα Α., Κωνσταντινίδης Ν., Νάνος Χ., Πολυτάρχου Η., Στέφας Ν., Χαλίκου Ι. Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην υποψήφια διδάκτορα του ΕΜΠ Βουρνά Ξ. για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την καθοδήγησή της, την προσφορά πολύτιμων γνώσεων σε θέματα σχετικά με την εργασία μου και την πολύτιμη βοήθειά της. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη και την υπομονή τους.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της απόκρισης του βρόχου υστέρησης καθώς και της επιρροής του από τη μεταβολή υπο-μηδενικών θερμοκρασιών και του ποσοστού ολκιμότητας, σε δείγματα χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα επιδιώχθηκε η συσχέτιση της καταστροφικής δοκιμής Drop Weight Tear Test (DWTT) με μια μη καταστροφική μαγνητική μέθοδο, τον βρόχο υστέρησης. Με την δοκιμή DWTT επιτυγχάνεται με την θραύση δοκιμίων, ο υπολογισμός του ποσοστού της όλκιμης επιφάνειας θραύσης.

Η διπλωματική εργασία έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις της εταιρίας ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε., στη Θίσβη Βοιωτίας, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό που μεταφέρθηκε από το Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών. Σε αρχικό στάδιο και με την χρήση του εξοπλισμού αυτού συλλέχθηκε ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων από διάφορα δείγματα.

Τα δείγματα προέρχονταν από σωλήνες διαφορετικών διαστάσεων και πάχους, που χρησιμοποιούνται από τη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. για την δοκιμή DWTT. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή σωλήνων είναι ο χάλυβας. Η παραγωγή των σωλήνων πραγματοποιείται σε δύο μονάδες που διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο συγκόλλησης. Η πρώτη μονάδα είναι Ευθείας Ραφής και η συγκόλληση είναι αυτογενής (HFI), ενώ η δεύτερη μονάδα είναι Ελικοειδούς Ραφής και η συγκόλληση είναι ετερογενής (SAWH).

Οι μετρήσεις χωρίστηκαν σε δυο πειραματικές ομάδες. Η πρώτη αφορά δείγματα HFI μικρού πάχους και οι μετρήσεις λήφθηκαν προτού τα δείγματα θραυστούν με την δοκιμή DWTT. Η δεύτερη αφορά ένα δοκίμιο SAWH μεγαλύτερου πάχους στο οποίο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αφού αρχικά είχε γίνει η θραύση του δοκιμίου με την δοκιμή DWTT. Και στις δυο περιπτώσεις οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε υπο-μηδενικές θερμοκρασίες.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Όσον αφορά την πρώτη πειραματική ομάδα, στα δοκίμια, μετά την θραύση, έγινε θραυστογραφία με Ηλεκτρικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM). Στην δεύτερη πειραματική ομάδα ήταν γνωστή μέσω της εταιρίας η θερμοκρασία μετάβασης του δοκιμίου, η θερμοκρασία δηλαδή όπου η επιφάνεια θραύσης γίνεται από όλκιμη ψαθυρή. Δεδομένου αυτού έγινε προσπάθεια να

συσχετιστεί η θερμοκρασία μετάβασης που έδινε η δοκιμή DWTT, με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τους βρόχους υστέρησης που συλλέχθηκαν από τις μετρήσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας, καθώς επίσης και ερευνών που έχουν προηγηθεί, η χρήση της μη καταστροφικής μαγνητικής δοκιμής του βρόχου υστέρησης σε μια πιο ευρείας κλίμακα εφαρμογής θα επέτρεπε την πλήρη τεκμηρίωση της αξιοπιστίας της.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	9
1.1	Εισαγωγή	9
1.2	Διαμαγνητικά υλικά	10
1.3	Παραμαγνητικά υλικά.....	10
1.4	Φερρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	11
1.5	Αντιφερρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά.....	12
1.6	Φερριμαγνητικά υλικά ή Σιδηριμαγνητικά υλικά.....	12
1.7	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ	12
1.7.1	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	12
1.7.2	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ	13
1.7.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ.....	13
1.7.4	ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ.....	15
1.7.5	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	15
1.7.6	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE.....	15
1.8	ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	16
2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ	17
2.1	Μαγνητικές περιοχές	17
2.2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ	18
2.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ.....	19
2.4	ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ	20
2.5	ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ.....	21
3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	22
3.1	Βασικές κατηγορίες	22

3.2	Οπτικές Μέθοδοι	24
3.3	Ραδιογραφικές Μέθοδοι.....	24
3.4	Μέθοδοι Υπερήχων	24
3.5	Μέθοδοι Ακουστικής Πρόσκρουσης και Ακουστικών Εκπομπών.....	25
3.6	Ηλεκτρικές & Μαγνητικές Μέθοδοι.....	25
3.6.1	Ηλεκτρικές Μέθοδοι.....	25
3.6.2	Μακρινό πεδίο δινορευμάτων (Remote field testing - RFT)	27
3.6.3	Μαγνητικές Μέθοδοι.....	27
3.6.4	Βρόχος Υστέρησης.....	29
3.7	Μέθοδοι Διεισδυτικού Υγρού και Ελέγχου Διαρροής	29
3.7.1	Διεισδυτικά υγρά	29
3.7.2	Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection).....	30
4	ΘΡΑΥΣΗ.....	32
4.1	Εισαγωγή	32
4.2	Συγκέντρωση Τάσεων σε Ασυνέχειες	32
4.3	Θεωρητική αντοχή θραύσης	36
4.3.1	Θεωρητική Αντοχή των Κρυστάλλων σε Διάτμηση	38
4.4	Θεωρία Griffith για την Ψαθυρή Θραύση	41
4.5	Ρυθμός Απελευθέρωσης Ενέργειας Παραμόρφωσης.....	44
4.6	Ο Παράγοντας Έντασης Τάσεων.....	45
4.7	Τρόποι (modes) Προώθησης Ρήγματος.....	47
4.8	Δυσθραυστότητα K_{Ic}	48
4.9	Εκτίμηση του K_{Ic} από Δοκιμή Κρούσης.....	49
4.10	Η Δυσθραυστότητα στο Σχεδιασμό Κατασκευών	52
5	TRANSITION CURVE	54
5.1	Καμπύλη μετάβασης.....	54

5.2	ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ.....	55
5.3	ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ.....	56
5.4	DROP-WEIGHT TEAR TEST.....	57
6	ΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	59
6.1	Εισαγωγή.....	59
6.2	Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης.....	60
6.2.1	Χημική σύσταση.....	60
6.2.2	Τρόποι παραγωγής.....	64
7	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ.....	69
7.1	Απόκριση βρόχου υστέρησης σε δείγματα χάλυβα Σωληνουργείας Κορίνθου α.ε. 69	
7.2	Πειραματική διάταξη.....	69
7.3	Πειραματική διαδικασία.....	73
7.4	Ομάδες πειραματικών μετρήσεων.....	75
7.4.1	Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών και στη συνέχεια εύρεση του ποσοστού ολκιμότητας μετά τη μέθοδο DWTT.....	75
7.4.2	Συμπεράσματα.....	87
7.4.3	Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών συμπεριλαμβανομένης και της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη σε ψαθυρή θραύση σε δείγματα τα οποία η ολκιμότητα είχε προσδιοριστεί με τη μέθοδο DWTT . 87	
7.4.4	Συμπεράσματα.....	92
8	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	93
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	94
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

EIKONEΣ

Εικόνα 1-1: Μαγνητικός περιοδικός πίνακας.....	9
Εικόνα 1-2: Μαγνήτιση διαμαγνητικών υλικών	10
Εικόνα 1-3: Εσωτερικό και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα διαμαγνητικά υλικά καθώς και οι απεικόνιση των συμπληρωμένων υποστοιβάδων.....	10
Εικόνα 1-4: Μαγνήτιση παραμαγνητικών υλικών	11
Εικόνα 1-5: Βρόχος Υστέρησης.....	14
Εικόνα 2-1: Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές .Σε κάθε περιοχή, τα spin είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό.....	17
Εικόνα 2-2: Δομή τοιχώματος Bloch 180°	18
Εικόνα 2-3: Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90°	19
Εικόνα 3-1: Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (b) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμψής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (c) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (d).....	20
Εικόνα 3-1: Φορητό Όργανο Δινορρευμάτων-Υπερήχων	25
Εικόνα 3-2: Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού	26
Εικόνα 3-3: Έλεγχος σωλήνα με ρεύματα eddy μακρινού πεδίου.	27
Εικόνα 3-4: Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια.....	28
Εικόνα 3-5: Τα στάδια της μεθόδου: 1) Καθαρισμός επιφάνειας, 2) Εφαρμογή διεισδυτικού υγρού, 3) Καθαρισμός από το υγρό, 4) Εφαρμογή της ουσίας εμφάνισης (developer).....	30
Εικόνα 4-1: Συγκέντρωση τάσεων σε έλασμα με κυκλική οπή.	33
Εικόνα 4-2: Έλασμα με ελλειψοειδή εγκοπή σε μονοαξονικό εφελκυσμό.	34
Εικόνα 4-3: Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεως (K_t) σαν συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, για ορισμένα είδη ασυνεχειών και εντατικών καταστάσεων.	35

Εικόνα 4-4: Μεταβολή της δύναμης συνοχής μεταξύ δύο ατόμων ως προς την μεταξύ τους απόσταση.....	36
Εικόνα 4-5: Μεταβολή της δύναμης συνοχής μεταξύ δύο ατόμων ως προς την μεταξύ τους απόσταση.....	37
Εικόνα 4-6: Η επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης προς το επίπεδο ολίσθησης η οποία προκαλεί ολίσθηση των κρυσταλλικών επιπέδων.	38
Εικόνα 4-7: Πυκνά κρυσταλλικά επίπεδα 1 και 2, επάνω στα οποία λαμβάνει χώρα ολίσθηση κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ	39
Εικόνα 4-8: Έλασμα με πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του, το οποίο περιέχει ένα ελλειπτικό εσωτερικό ρήγμα μήκους $2c$	43
Εικόνα 4-9: Έλασμα που υποβάλλεται σε εφελκυσμό.....	45
Εικόνα 4-10: Τρόποι προώθησης ρήγματος.....	47
Εικόνα 4-11: Εξάρτηση του παράγοντα έντασης τάσεων από το πάχος του δοκιμίου.....	49
Εικόνα 4-12: Δύο τυπικές καμπύλες από δοκιμή κρούσης.....	50
Εικόνα 4-13: (α) καμπύλη ποσοδιορισμού των σταθερών A,B, C, D (β) καμπύπη προσαρμογής.....	51
Εικόνα 4-14: Όλοι αυτοί οι συμβιβασμοί μεταξύ επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας, μεγέθους ρήγματος και K_{Ic}	53
Εικόνα 5-1: Transition Curve.....	54
Εικόνα 6-1: Σημάδεμα στεφάνι σωλήνων για κοπή δοκιμίων.....	62
Εικόνα 6-2: Στεφάνι σωλήνα μετά την κοπή δοκιμίων.....	62
Εικόνα 6-3: Διαστάσεις δοκιμίων DWTT και υποδοχέων.....	63
Εικόνα 6-4: Μονάδα ευθείας ραφής.....	64
Εικόνα 6-5: Μονάδα ελικοειδούς ραφής.....	67
Εικόνα 7-1: Πλατφόρμα μετρήσεων του λογισμικού.....	71
Εικόνα 7-2: Σήμα διέγερσης.....	71
Εικόνα 7-3: Σήμα λήψης	Εικόνα 7-4: Σήμα λήψης μετά από ψηφιακό
Εικόνα 7-5: Βρόχος υστέρησης.....	72

Εικόνα 7-6: Πειραματική διάταξη	74
Εικόνα 7-7: Μηχάνημα δοκιμής DWTT	75
Εικόνα 7-8 : Θραυσιγενής επιφάνειες των δειγμάτων μετά την δοκιμή DWTT.....	83
Εικόνα 7-9 : Προσδιορισμός επίδρασης "σχισμάτων", σε περίπτωση που περιλαμβάνονται στην επιφάνεια θραύσης και σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό τους	84
Εικόνα 7-10 : Εμβαδόν επιφάνεια θραύσης που λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της όλκιμης επιφάνειας θραύσης.....	84
Εικόνα 7-11: Προσδιορισμός εμβαδού επιφάνειας θραύσης που λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της όλκιμης επιφάνειας, όταν αυτή περιέχει εναλλάξ τμήματα ψαθυρής και όλκιμης θραύσης	85
Εικόνα 7-12 : Αποτελέσματα θραυστογραφίας για τους -20 °C	86
Εικόνα 7-13 : Αποτελέσματα θραυστογραφίας για τους -60 °C	86
Εικόνα 7-12:Υπολογισμός του ποσοστού όλκιμης επιφάνειας.....	88

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3-1: Μέθοδοι Ελέγχου διαρροής.....	31
Πίνακας 7-1: Προσδιορισμός χρόνου αναμονής δείγματος εντός του λουτρού	73
Πίνακας 7-2: Παράμετροι των μετρήσεων.....	75
Πίνακας 7-3: Παράμετροι των μετρήσεων.....	77
Πίνακας 7-4: Παράμετροι των μετρήσεων.....	88
Πίνακας 7-5: Παράμετροι των μετρήσεων.....	89

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 7-1: Βρόχος υστέρησης στους -20 για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$	76
Σχήμα 7-2: Βρόχος υστέρησης στους -30°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$	76
Σχήμα 7-3: Βρόχος υστέρησης στους -40°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$	76
Σχήμα 7-4: Βρόχος υστέρησης στους -60°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$	77
Σχήμα 7-5: Βρόχοι υστέρησης στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V= 4\text{V}$	78
Σχήμα 7-6: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V= 4\text{V}$	78
Σχήμα 7-7: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V= 4\text{V}$	79
Σχήμα 7-8: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V= 4\text{V}$	79
Σχήμα 7-9: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$	80
Σχήμα 7-10: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$	80
Σχήμα 7-11: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r στους $-20,-30,-40,-60^{\circ}\text{C}$	81
Σχήμα 7-12: Τάση εξόδου συναρτήσεως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο	82
Σχήμα 7-13:Απώλειες βρόχου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	82
Σχήμα 7-14: Βρόχοι υστέρησης για θερμοκρασίες -55°C , -63°C , -75°C	89
Σχήμα 7-15: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V=(5,7,9)\text{V}$	90
Σχήμα 7-16: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V= (5,7,9)\text{V}$	90
Σχήμα 7-17: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20,-30,-40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V= (5,7,9)\text{V}$	91
Σχήμα 7-18: Τάση εξόδου συναρτήσεως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο	91
Σχήμα 7-19: Μαγνητική διαπερότητα (μ)	92

1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Ο καλύτερος τρόπος για να παρουσιάσουμε τα διαφορετικά είδη μαγνητισμού είναι να περιγράψουμε πως τα μαγνητικά υλικά αποκρίνονται στην επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου. Η κύρια διάκριση είναι ότι σε κάποια υλικά δεν υπάρχει μια ομοιόμορφη αλληλεπίδραση του των ατομικών μαγνητικών ροπών, ενώ σε άλλα υλικά η αλληλεπίδραση αυτή είναι ισχυρή. υπάρχουν δύο τύποι μαγνητικών υλικών :

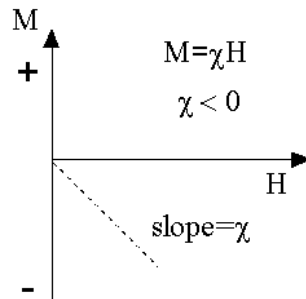
- Τα μαγνητικά υλικά τα οποία μαγνητίζονται μόνο όταν τους εφαρμοστεί εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά.
- Τα μαγνητικά που διατηρούν την μαγνητική τους κατάσταση ακόμα και κατά την απουσία εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου (αυθόρμητη μαγνήτιση). Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι τα φερρομαγνητικά, αντιφερρομαγνητικά και φερριμαγνητικά υλικά. Τα περισσότερα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικές εφαρμογές ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

1												2					
H																He	
3	4										5	6	7	8	9	10	
Li	Be										B	C	N	O	F	Ne	
11	12										13	14	15	16	17	18	
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89															
Fr	Ra	Ac															
			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	

Εικόνα 1-1: Μαγνητικός περιοδικός πίνακας

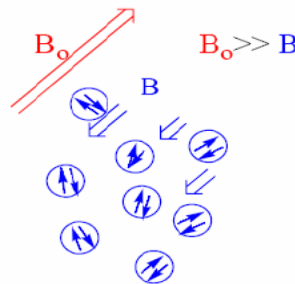
1.2 Διαμαγνητικά υλικά

Τα διαμαγνητικά υλικά αποτελούν υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι αρνητική και μικρή της τάξης $\chi = -10^{-5}$. Το γεγονός ότι η επιδεκτικότητα είναι αρνητική αποδίδεται στην αντίθεση της μαγνητικής τους απόκρισης στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Όταν ένα διαμαγνητικό υλικό, τοποθετηθεί εντός ενός μαγνητικού πεδίου, τότε το διάνυσμα μαγνήτισης M εντός του υλικού είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 1-2: Μαγνήτιση διαμαγνητικών υλικών

Στα διαμαγνητικά υλικά όλα τα ηλεκτρόνια είναι συζευγμένα, είναι δηλαδή όλες οι στιβάδες/υποστιβάδες συμπληρωμένες, έτσι όταν δεν υπάρχει εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο δεν υπάρχει και μόνιμη μαγνητική ροπή.

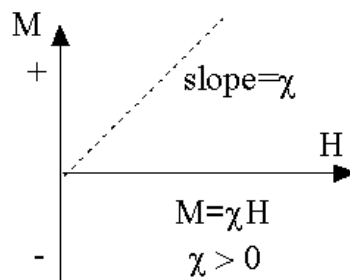


Εικόνα 1-3: Εσωτερικό και εξωτερικό μαγνητικό πεδίο στα διαμαγνητικά υλικά καθώς και οι απεικόνιση των συμπληρωμένων υποστοιβάδων.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα διαμαγνητικά υλικά απωθούν το εξωτερικά εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο και ότι υπό την απουσία μαγνητικού πεδίου δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες.

1.3 Παραμαγνητικά υλικά

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υλικά των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μικρή και θετική και κυμαίνεται από 10^{-3} έως 10^{-5} , γεγονός που δεικνύει ότι τα παραμαγνητικά υλικά έλκονται από το μαγνητικό πεδίο.



Εικόνα 1-4: Μαγνήτιση παραμαγνητικών υλικών

Απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου, και λόγω των τυχαίων συγκρούσεων μεταξύ των μορίων, οι ροπές των μορίων έχουν τυχαίους προσανατολισμούς. Παρουσία μαγνητικού πεδίου η μαγνήτιση των παραμαγνητικών υλικών είναι ασθενής αλλά προσανατολισμένη παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο. Η μαγνήτιση M συνήθως μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό εξηγείται με βάση το ότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες, λαμβάνουν χώρα περισσότερες μοριακές συγκρούσεις, και η ευθυγράμμιση των μοριακών μαγνητικών ροπών με το πεδίο καταστρέφεται. Οι παραμαγνητικές ιδιότητες οφείλονται στην ύπαρξη ασύζευκτων ηλεκτρονίων και έτσι τα παραμαγνητικά υλικά έχουν διπολική μαγνητική ροπή. Αν και υπάρχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια οι μαγνητικές τους ροπές δεν αλληλεπιδρούν μαγνητικά και η συνολική μαγνήτιση, όπως και στα διαμαγνητικά υλικά, είναι μηδέν όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι τα παραμαγνητικά υλικά ελκύονται από το μαγνητικό πεδίο και δεν διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες όταν η επίδραση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου πάψει να υπάρχει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το αλουμίνιο.

1.4 Φερρομαγνητικά υλικά ή Σιδηρομαγνητικά υλικά

Η σημαντικότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι τα σιδηρομαγνητικά υλικά των οποίων η επιδεκτικότητα είναι θετική, πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (τυπικά μπορεί να λάβει τιμές από 50 έως 10000) και εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση ακόμα και απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Έτσι, έχουν μεγάλη και θετική επιδεκτικότητα που εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έχουν μια ισχυρή αλληλεπίδραση σε ένα μαγνητικό πεδίο και είναι ικανά να διατηρήσουν τις μαγνητικές του ιδιότητες ακόμα και όταν το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο πάψει να υπάρχει. Η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση M και το εφαρμοζόμενο πεδίο είναι μη γραμμική. Το φαινόμενο του

σιδηρομαγνητισμού εμφανίζεται κάτω από μία κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie, T_c . Για θερμοκρασία πάνω από την T_c ο σιδηρομαγνητισμός χάνεται και το υλικό γίνεται παραμαγνητικό. Παραδείγματα παραμαγνητικών υλικών είναι ο σίδηρος, το νικέλιο, το κοβάλτιο καθώς και κάποιες σπάνιες μεταλλικές γαίες με τα κράματα τους.

1.5 Αντιφερρομαγνητικά υλικά ή Αντισιδηρομαγνητικά υλικά

Τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή αλλά θετική μαγνητική επιδεκτικότητα. Σε αντίθεση με τα σιδηρομαγνητικά υλικά, δεν έχουν παραμένουσα μαγνήτιση απουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως εμφανίζουν μαγνητική τάξη με τέτοιο τρόπο ώστε οι μαγνητικές ροπές των ατόμων που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις να έχουν αντίθετη φορά και να αλληλοαναιρούνται. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι, απουσία πεδίου εφαρμοζόμενου πεδίου, δεν υπάρχει μαγνήτιση. Η αντισιδηρομαγνητική συμπεριφορά των υλικών εμφανίζεται κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Neel T_N . Σε θερμοκρασίες πάνω από την T_N , τα αντισιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά.

1.6 Φερριμαγνητικά υλικά ή Σιδηριμαγνητικά υλικά

Τα σιδηριμαγνητικά υλικά παρουσιάζουν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία που ονομάζεται θερμοκρασία Curie (T_c), παρόμοια μαγνητική συμπεριφορά με τους σιδηρομαγνήτες. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της T_c , τα σιδηριμαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Αντίθετα από ότι συμβαίνει στην περίπτωση των αντισιδηρομαγνητικών υλικών, οι μαγνητικές ροπές, μολονότι έχουν αντίθετη φορά, έχουν διαφορετικό μέτρο, και έτσι δεν αλληλοαναιρούνται. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος είναι μαγνητισμένος ακόμα και απουσία εφαρμοζόμενου πεδίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι οι φερρίτες (Fe_3O_4).

1.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΩΝ

1.7.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα των σιδηρομαγνητών είναι η υψηλή τους μαγνητική διαπερατότητα. Η διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή σαν συνάρτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, όπως στα παραμαγνητικά υλικά. Αντιθέτως, για να περιγραφούν οι ιδιότητες κάποιου σιδηρομαγνητικού υλικού ως προς τις μαγνητικές του

ιδιότητες θα πρέπει να μετρήσουμε την μαγνητική του επαγωγή \mathbf{B} ως συνάρτηση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου πεδίου \mathbf{H} σε ένα συνεχές διάστημα τιμών του \mathbf{H} (παραγωγή της καμπύλης του βρόχου υστέρησης). Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών κυμαίνεται στο εύρος από 10 έως 100000. Οι υψηλότερες τιμές, απαντώνται σε ειδικά κράματα, όπως το permalloy και το supermalloy τα οποία είναι κράματα σιδήρου-νικελίου.

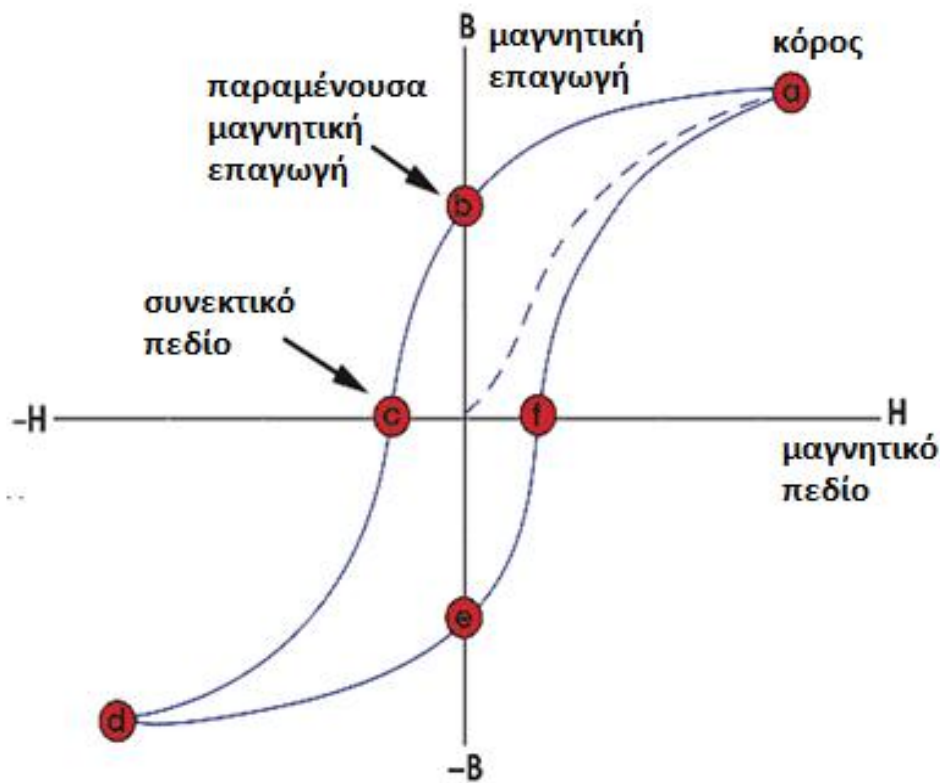
1.7.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Οι σιδηρομαγνήτες έχουν την ικανότητα να μαγνητίζονται, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο και να διατηρούν τη μαγνήτισή τους και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Η ικανότητα τους αυτή αποτελεί το κύριο χαρακτηριστικό που τους διαχωρίζει από τα παραμαγνητικά υλικά, τα οποία αν και εμφανίζουν μαγνητική ροπή παρουσία ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου παύουν να είναι μαγνητισμένα μετά την απομάκρυνση αυτού.

1.7.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗ

Οι μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες μπορούν εύκολα να αναπαρασταθούν με την χάραξη του διαγράμματος του της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} συναρτήσει του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} που αποτελεί την καμπύλη του βρόχου υστέρησης. Εναλλακτικά είναι δυνατή η χάραξη του αντίστοιχου διαγράμματος μαγνήτισης, από το οποίο όμως λαμβάνονται οι ίδιες πληροφορίες.

Ένας τυπικός βρόχος υστέρησης παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες μπορούν να καθορίσουν αν κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό είναι κατάλληλο για μια δεδομένη εφαρμογή ή όχι.



Εικόνα 1-5: Βρόχος Υστέρησης

Σε ένα φερρομαγνητικό υλικό το οποίο δεν έχει ποτέ πριν μαγνητιστεί, ή που έχει απομαγνητιστεί πλήρως, η εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς την διεύθυνση του πεδίου (διακεκομμένη γραμμή της Εικόνα 1-5: Βρόχος Υστέρησης.) Κατά την αύξηση του μαγνητικού πεδίου H σύνορα των περιοχών μετατοπίζονται και η μαγνήτιση μεγαλώνει. Φτάνοντας στο σημείο a , περαιτέρω αύξηση του μαγνητικού πεδίου επηρεάζει ανεπαίσθητα την επαγωγή B . Η τιμή της επαγωγής στο σημείο a είναι B_s (επαγωγή κόρου και κατά συνέπεια μαγνήτιση κόρου M_s) απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές έχουν ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H , οπότε περαιτέρω αύξηση του πεδίου δεν επηρεάζει καθόλου την μαγνήτιση M και κατά συνέπεια την μαγνητική επαγωγή B . Η μαγνήτιση κορεσμού M_s εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου.

Στη συνέχεια, καθώς το H αρχίζει σταδιακά να ελαττώνεται η καμπύλη μετακινείται από το σημείο a στο b . Σε αυτό το σημείο, αν και το εξωτερικό πεδίο έχει μηδενιστεί, η επαγωγή δεν

είναι μηδέν αλλά έχει τιμή B_r . Στο σημείο b το υλικό έχει μετατραπεί σε μόνιμο μαγνήτη γιατί υπάρχει μαγνήτιση χωρίς εξωτερικό πεδίο H και η μαγνήτιση ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση M_r και κατ' επέκταση παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r .

Εφαρμόζοντας στο υλικό πεδίο που αυξάνεται με αντίστροφη πολικότητα, η μαγνητική επαγωγή ελαττώνεται, και στο σημείο c μηδενίζεται ($B=0 \rightarrow$ κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης). Στο σημείο αυτό το μαγνητικό πεδίο έχει τιμή $-H_c$ και ονομάζεται συνεκτικό πεδίο.

Αυξάνοντας αρνητικά το πεδίο, το υλικό θα φτάσει σε μαγνήτιση κόρου προς την αντίθετη φορά (σημείο d). Ελαττώνοντας το εξωτερικό πεδίο η καμπύλη περνάει από το σημείο e (παραμένουσα μαγνητική επαγωγή $-B_r$). Καθώς συνεχίζουμε να αυξάνουμε το H , η καμπύλη του βρόχου περνάει από το σημείο f (συνεκτικό πεδίο H_c)

1.7.4 ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΕΣΜΟΥ

Από το βρόχο υστέρησης φαίνεται ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αρχικά αμαγνήτιστο. Με εφαρμογή ενός εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου H , προκαλείται η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B προς την διεύθυνση του πεδίου. Καθώς αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο H , η μαγνήτιση θα φτάσει τελικά σε μια τιμή M_0 . Η τιμή αυτή απεικονίζει την κατάσταση στην οποία όλες οι μαγνητικές ροπές μέσα στον όγκο του υλικού είναι ευθυγραμμισμένες παράλληλα με το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο H και ονομάζεται μαγνήτιση κορεσμού. Η μαγνήτιση κορεσμού εξαρτάται από το μέγεθος της ατομικής μαγνητικής διπολικής ροπής του υλικού και από τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου.

1.7.5 ΣΥΝΕΚΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Για την επαναφορά ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνήτη σε κατάσταση πλήρους απομαγνήτισης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ενός αντίστροφου εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικά πεδίου έντασης H_c . Το πεδίο αυτό ονομάζεται συνεκτικό πεδίο (coercive field) και αντιστοιχεί στις τιμές του H στα σημεία c και f της καμπύλης υστέρησης.

1.7.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ CURIE

Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, η προστιθέμενη θερμική ενέργεια αυξάνει την κινητικότητα των μαγνητικών περιοχών. Αυτό διευκολύνει τις μαγνητικές περιοχές να ευθυγραμμιστούν αλλά τις αποτρέπει επίσης από το να παραμείνουν ευθυγραμμισμένες μετά την απομάκρυνση του εξωτερικά εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Συνεπώς, σε υψηλές θερμοκρασίες, η μαγνητική διαπερατότητα, η παραμένουσα μαγνήτιση και το συνεκτικό πεδίο μειώνονται. Αν η θερμοκρασία υπερβεί την κρίσιμη θερμοκρασία Curie τότε παύει να παρατηρείται η σιδηρομαγνητική συμπεριφορά και τα σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία Curie, εξαρτάται από το υλικό και μεταβάλλεται με προσθήκη κραματικών.

1.8 ΣΚΛΗΡΑ ΚΑΙ ΜΑΛΑΚΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και επομένως απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μικρών μαγνητικών πεδίων. Το εμβαδόν της επιφάνειας των βρόχων υστέρησης των μαλακών μαγνητικών υλικών είναι μικρό και, ως εκ τούτου, οι απώλειες ισχύος ανά κύκλο είναι μικρές. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούνται πολλοί κύκλοι μαγνήτισης και απομαγνήτισης, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικές μηχανές, μετασχηματιστές και επαγωγείς, όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κυκλικά.

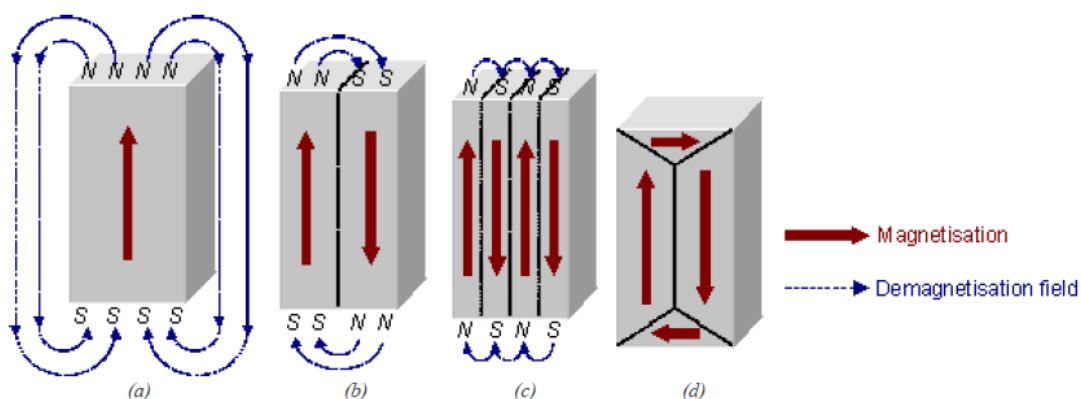
Τα σκληρά μαγνητικά υλικά από την άλλη πλευρά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα και για αυτό απαιτούν την εφαρμογή σχετικά μεγάλων μαγνητικών πεδίων. Οι καμπύλες των βρόχων υστέρησης είναι ευρείες και σχεδόν ορθογώνιες και για τον απομαγνητισμό τους απαιτείται η εφαρμογή μεγάλων πεδίων. Λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα σκληρά μαγνητικά πεδία είναι κατάλληλα ως μόνιμοι μαγνήτες σε πολλές εφαρμογές.

2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

2.1 Μαγνητικές περιοχές

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού κατά την απουσία μαγνητικού πεδίου αποτελείται από μαγνητικές περιοχές. Μια μαγνητική περιοχή (magnetic domain) χαρακτηρίζεται από spin μαγνητικές ροπές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και η ύπαρξη τους είναι απαραίτητη για κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, καθώς ένα δείγμα μιας περιοχής έχει αυξημένη μαγνητοστατική ενέργεια. Το «σπάσιμο» της μαγνήτισης σε τοπικές περιοχές μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια. Στο σχήμα 5, δίνεται σχηματικά η εμφάνιση και ανάπτυξη των περιοχών σε ένα δείγμα που ενώ αρχικά έχει παραμένουσα μαγνήτιση και είναι κορεσμένο, απομαγνήτιζεται.

Το δείγμα έχει μεγάλη μαγνητοστατική ενέργεια (a) που είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης ελεύθερων μαγνητικών γραμμών οι οποίες εξέρχονται από την επιφάνεια του υλικού και προκαλούν τη δημιουργία εξωτερικού πεδίου απομαγνήτισης. Το πεδίο απομαγνήτισης αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα μαγνήτιση του υλικού. Η διαίρεση της μαγνήτισης σε δύο περιοχές (b), μειώνει την μαγνητοστατική ενέργεια κατά το ήμισυ, στο (c) κατά το ένα τέταρτο της αρχικής και ούτω καθεξής. Στο σχήμα (d) η μαγνητοστατική ενέργεια θα είναι θεωρητικά μηδενική αν δεν υπεισερχόταν ο παράγοντας της ανισοτροπίας και των γειτονικών περιοχών που έχουν διαφορά προσανατολισμού κατά 180° .

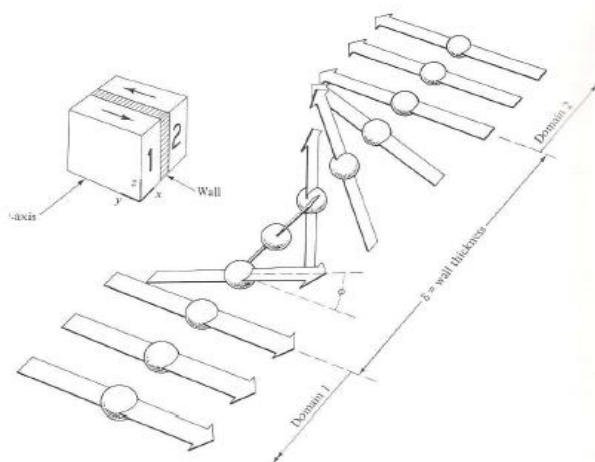


Εικόνα 2-1: Σχηματική απεικόνιση της διαίρεσης της μαγνήτισης σε περιοχές. Σε κάθε περιοχή, τα spin είναι παράλληλα αλλά οι περιοχές έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς στο υλικό

2.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ

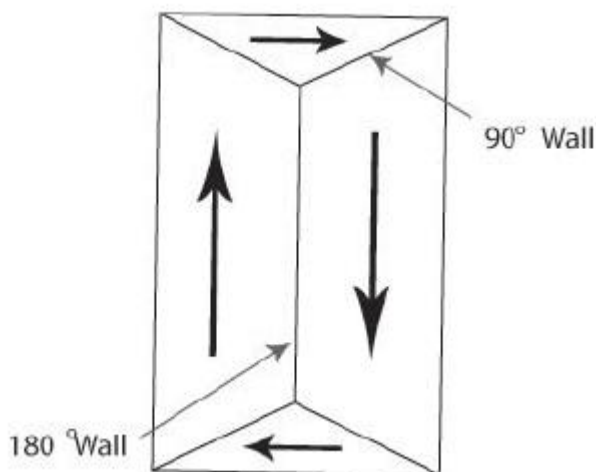
Τα μαγνητικά τοιχώματα αποτελούν τα χωρίσματα των μαγνητικών περιοχών, στις οποίες η μαγνήτιση έχει διαφορετικό προσανατολισμό. Μέσα στο τοίχωμα, η μαγνήτιση αλλάζει κατεύθυνση από αυτή της μίας περιοχής στην άλλη. Τα τοιχώματα αυτά δεν είναι απείρως λεπτά αλλά έχουν ένα πεπερασμένο πλάτος. Το πάχος τους ουσιαστικά είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ενέργεια ανταλλαγής (που απαιτεί την ύπαρξη ενός τοιχώματος μεγάλου πάχους) και την ενέργεια ανισοτροπίας (που απαιτεί την ύπαρξη ενός λεπτού τοιχώματος). Ένα στενό τοίχωμα δημιουργεί μεγάλες γωνίες για γειτονικά spin και η ενέργεια ανταλλαγής είναι μεγάλη, ενώ σε ένα ευρύ τοίχωμα, πολλά spin έχουν κατεύθυνση μακριά από τις διευθύνσεις εύκολης μαγνήτισης με αποτέλεσμα την αύξηση της ενέργειας ανισοτροπίας. Έτσι το πάχος ισορροπίας είναι αυτό για το οποίο ελαχιστοποιείται η συνολική δυναμική ενέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της ενέργειας ανταλλαγής και της ενέργειας ανισοτροπίας εντός του τοιχώματος.

Γενικά τα μαγνητικά τοιχώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε τοιχώματα 180° και σε μη- 180° , δηλαδή σε τοιχώματα που χωρίζουν αντιπαράλληλες και μη αντιπαράλληλες μαγνητικές περιοχές. Τα τοιχώματα 180° συναντώνται σχεδόν σε όλα τα υλικά και διαφέρουν από όλα τα άλλα τοιχώματα στο ότι δεν επηρεάζονται από την επιβολή μηχανικής τάσης. Στα τοιχώματα αυτά οι διευθύνσεις της μαγνήτισης σε γειτονικές περιοχές είναι αντιπαράλληλες και κατά συνέπεια οι μαγνητικές ροπές των περιοχών αυτών έχουν διευθύνσεις ισοδύναμων κρυσταλλογραφικών διευθύνσεων. Στην Εικόνα 2-2 απεικονίζεται ένα τοίχωμα 180° που διαχωρίζει δύο περιοχές με μαγνήτιση σε αντίθετες διευθύνσεις. Αν η μαγνήτιση περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στην επιφάνεια του τοιχώματος, τότε το τοίχωμα καλείται τοίχωμα Bloch.



Εικόνα 2-2: Δομή τοιχώματος Bloch 180°

Στα υλικά που κρυσταλλώνονται στο κυβικό σύστημα, τα τοιχώματα μη-180° είναι όλα 90°, έτσι ώστε οι διευθύνσεις των δίπολων σε γειτονικές μαγνητικές περιοχές να είναι ορθές γωνίες. Γι' αυτό στο σίδηρο που οι κύριοι άξονες είναι στις διευθύνσεις (100), τα μαγνητικά τοιχώματα ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (-100) είναι όλα 180°, ενώ αυτά που είναι ανάμεσα στις διευθύνσεις (100) και (010) είναι τοιχώματα 90°. Συχνά όλα τα μη -180° μαγνητικά τοιχώματα αναφέρονται εσφαλμένα ως τοιχώματα 90° για να τονίζεται η ευαισθησία που έχουν στην επιβολή μηχανικής τάσης σε σχέση με τα τοιχώματα 180°.



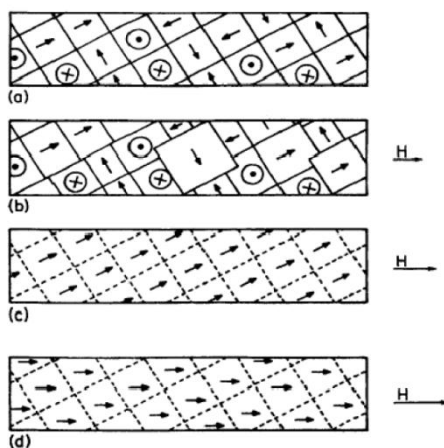
Εικόνα 2-3: Απεικόνιση μαγνητικών τοιχωμάτων 180° και 90°

2.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

Ο κόκκος ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από μαγνητικές περιοχές ακόμα και απουσία μαγνητικού πεδίου. Η διαφορά ανάμεσα στην κατάσταση μαγνήτισης και στην κατάσταση απομαγνήτισης είναι η διαφορετική διάταξη και προσανατολισμός των μαγνητικών περιοχών. Όταν ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εφαρμοσθεί σε ένα μη μαγνητισμένο σιδηρομαγνητικό υλικό οι μεταβολές της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} συναρτήσει του πεδίου \mathbf{H} παράγουν την αρχική καμπύλη μαγνήτισης.

Σε ενδιάμεσες τιμές πεδίου ένας άλλος μηχανισμός αρχίζει να αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Αυτός ο μηχανισμός είναι η περιστροφή μαγνητικών περιοχών, κατά τον οποίο οι ατομικές ροπές σε περιοχή που είναι προσανατολισμένη σε μη θεμιτή κατεύθυνση ξεπερνούν την ενέργεια ανισοτροπίας και περιστρέφονται έως ότου προσανατολιστούν παράλληλα με έναν ισοδύναμο εύκολο κρυσταλλογραφικό άξονα που σχηματίζει μικρότερη γωνία με το επιβαλλόμενο πεδίο.

Η τελική επίδραση του πεδίου στις μαγνητικές περιοχές εμφανίζεται σε ισχυρά πεδία. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι μαγνητικές ροπές που έχουν σχηματίζει μικρή γωνία με το πεδίο), αρχίζουν με την περαιτέρω αύξηση του πεδίου να αποκλίνουν σταδιακά τείνοντας να ευθυγραμμιστούν απόλυτα με το πεδίο. Έτσι το υλικό αποκτά μία μόνο μαγνητική περιοχή.



Εικόνα 2-4: Επίδραση της μαγνήτισης στις μαγνητικές περιοχές. (α) μερική μαγνήτιση, (β) κίνηση των τοιχωμάτων περιοχών από μερικής μαγνήτισης έως το σημείο καμπής της καμπύλης μαγνήτισης μέσω μη αντιστρεπτής στροφής της μαγνήτισης των περιοχών (γ) από την καμπή της καμπύλης μαγνήτισης στην τεχνητή μαγνήτιση μέσω αντιστρεπτής στροφής των διανυσμάτων μαγνήτισης (δ)

2.4 ΤΕΧΝΗΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΚΟΡΟΥ

Όταν όλες οι περιοχές έχουν προσανατολιστεί, με το διάνυσμα της αυθόρμητης μαγνήτισης τους παράλληλα στο πεδίο, το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μία μόνο μαγνητική περιοχή. Η κατάσταση αυτή αποκαλείται τεχνητή μαγνήτιση κόρου. Εάν το μαγνητικό πεδίο αυξηθεί πέρα από αυτή την τιμή, τότε παρατηρείται μία περαιτέρω, αργή, αύξηση της μαγνήτισης. Σε αυτό το σημείο οι ατομικές μαγνητικές ροπές, που δεν είναι τέλεια διατεταγμένες λόγω της θερμικής κίνησης, φθάνουν σε κατάσταση πλήρους διάταξης, με αποτέλεσμα την αύξηση της αυθόρμητης μαγνήτισης του υλικού. Η αυθόρμητη μαγνήτιση εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους 0 K είναι ίση με τη μαγνήτιση κορεσμού αλλά πέφτει το μηδέν καθώς προσεγγίζεται η θερμοκρασία Curie. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε θερμοκρασίες πάνω από τους 0 K, οι μαγνητικές ροπές εκτελούν μία μεταπτωτική κίνηση γύρω από τη διεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου εξαιτίας της θερμικής ενέργειας. Αυτή η κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα η αυθόρμητη μαγνήτιση να είναι μικρότερη από τη μαγνήτιση κορεσμού. Σε πολύ υψηλά μαγνητικά πεδία οι μαγνητικές ροπές διατάσσονται πλήρως και η μαγνήτιση φθάνει τη μαγνήτιση κορεσμού.

2.5 ΚΙΝΗΣΗ ΤΩΝ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Για να μαγνητιστεί, ένας σιδηρομαγνητικός μονοκρυστάλλος θα πρέπει ένα μετακινηθούν τα τοιχώματα των περιοχών που έχουν μαγνήτιση παράλληλη προς το επιβαλλόμενο πεδίο εις βάρος των περιοχών των οποίων η μαγνήτιση είναι αντίθετη προς τη μαγνήτιση του επιβαλλόμενου πεδίου.

Η μετατόπιση ενός τοιχώματος εντός ενός κρυστάλλου επηρεάζεται από τις κρυσταλλικές ατέλειες, και τις προσμίξεις. Έτσι δεν είναι ομαλή και είναι, συνήθως, μη αντιστρεπτή εκτός από την περίπτωση που το υλικό είναι υψηλής καθαρότητας. Τα μαγνητικά τοιχώματα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επηρεάζονται από τις μη μαγνητικές προσμίξεις, τα έγκλεισματα, τρύπες και ρωγμές. Ένα έγκλεισμα για παράδειγμα που βρίσκεται σε μια περιοχή, μαγνητίζεται και δημιουργούνται σε αυτό βόρειος και νότιος πόλος. Αν το τοίχωμα έπρεπε να περάσει από μέσα από το έγκλεισμα, τότε η μαγνητοστατική ενέργεια θα ήταν μικρότερη, γεγονός που είναι ενεργειακά προτιμότερο. Η μείωση της μαγνητοστατικής δυναμικής ενέργειας σημαίνει ότι απαιτείται πλέον μεγαλύτερη δύναμη για να κινηθεί το τοίχωμα και να απομακρυνθεί από το έγκλεισμα. Έτσι μακροσκοπικά φαίνεται ότι οι προσμίξεις έλκουν τα τοιχώματα και καταφέρνουν να συγκρατούν κατά κάποιο τρόπο την κίνηση τους.

Επίσης, οι διαταραχές στον κρυστάλλο του υλικού δημιουργούν πεδία τοπικών τάσεων, τα οποία με τη σειρά τους αναπτύσσουν μία ανομοιογενή τάση μέσα στον όγκο του στερεού εμποδίζοντας έτσι την κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Αυτό εξηγεί γιατί δοκίμια που έχουν υποστεί ψυχρή μηχανουργική κατεργασία εμφανίζουν υψηλότερο συνεκτικό πεδίο και μικρή αρχική επιδεκτικότητα σε σχέση με άλλα δοκίμια του ίδιου υλικού, τα οποία έχουν ανακτηθεί. Για την απομάκρυνση ενός τοιχώματος από μία διαταραχή, απαιτείται η εφαρμογή ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα, ότι η κίνηση ενός τοιχώματος εντός κρυστάλλου δεν είναι ομαλή, αλλά πραγματοποιείται με απότομα άλματα. Το τοίχωμα συγκρατείται σε κάποιο σημείο από μία ατέλεια ή από μία πρόσμειξη και για να ελευθερωθεί απαιτείται η εφαρμογή ενός ισχυρότερου πεδίου. Μόλις αποδεσμευτεί, το τοίχωμα κινείται μέχρις ότου να δεσμευτεί από μία άλλη ατέλεια, όπου και παραμένει μέχρι το πεδίο αυξηθεί ακόμα παραπάνω και ούτω καθεξής.

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

3.1 Βασικές κατηγορίες

Η ευρεία βιομηχανική παραγωγή και χρήση προϊόντων από μεταλλικά και μη υλικά, αλλά και οι υψηλές απαιτήσεις της σύγχρονης τεχνολογίας για τη σύνθεση νέων υλικών, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και εφαρμογή ποικίλων μεθόδων ανάλυσης και χαρακτηρισμού υλικών, προκειμένου να καθορισθεί και να διασφαλισθεί η ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.

Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού υλικών διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες :

1. Καταστροφικές μέθοδοι (Destructive Testing, DT)

Είναι οι μέθοδοι εκείνες στις οποίες είναι αναγκαία για το χαρακτηρισμό του υλικού η απόσπαση από αυτό δείγματος καθορισμένων διαστάσεων. Οι μη-μηχανικές καταστροφικές μέθοδοι συνήθως κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το είδος της δέσμης που χρησιμοποιείται ως πηγή ανάλυσης αλλά και τον τύπο αλληλεπίδρασης δέσμης-υλικού.

2. Μη καταστροφικές μέθοδοι (Non Destructive Testing, NDT)

Ως μη καταστροφικές δοκιμές ελέγχου θεωρούνται αυτές που η εφαρμογή τους δεν επηρεάζει την ακεραιότητα ή την λειτουργικότητα των προς έλεγχο αντικειμένων. Αν και τις περισσότερες φορές με τις μεθόδους NDT δεν είναι δυνατό να μετρηθούν άμεσα οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, ωστόσο με αυτές μπορούν να εντοπισθούν εύκολα μάκρο- και μικροσκοπικές ατέλειες του υλικού που ενδέχεται να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία του. Οι μέθοδοι NDT χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην παραγωγική διαδικασία γιατί βοηθούν στη διάγνωση των καίριων ελαττωμάτων του προϊόντος και οδηγούν στη βελτιστοποίηση των συνθηκών κατασκευής του.

Κάθε μέθοδος NDT έχει διαφορετικό βαθμό ακριβείας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Όμως, οι NDT είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή -άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Καταστροφικοί και Μη έλεγχοι εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, οπότε τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με NDT και στη συνέχεια με DT ώστε να

συγκριθούν τα αποτελέσματα τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια της μεθόδου.

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς Μη-Καταστροφικούς Ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών είναι:

1. ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών
2. οι υπόγειες σωληνώσεις
3. οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους
4. τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων
5. τα συρματόσχοινα γεφυρών

Οι εφαρμογές των NDT, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

1. στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο)
2. στην αεροδιαστημική (Πλάισια αεροπλάνων & διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες)
3. στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
4. στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)
5. σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
6. στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
7. σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς
8. στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
9. στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.)
10. στην ναυτιλία (μηχανές, εξαρτήματα)
11. στην τέχνη (ακτινογραφίες)

Οι πιο συχνές μέθοδοι ΜΚΕ που συναντούνται σήμερα στην βιομηχανία είναι οι ακόλουθες :

- Οπτικές Μέθοδοι
- Ραδιογραφικές Μέθοδοι
- Μέθοδοι Υπερήχων
- Μέθοδοι Ακουστικής Πρόσκρουσης και Ακουστικών Εκπομπών
- Ηλεκτρικές & Μαγνητικές Μέθοδοι
- Μέθοδοι Διεσδυτικού Υγρού και Ελέγχου Διαρροής

3.2 Οπτικές Μέθοδοι

Η πιο παραδοσιακή οπτική τεχνική ΜΚΕ είναι η επιθεώρηση με το ανθρώπινο μάτι. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να αντικατασταθεί και χρησιμοποιείται ουσιαστικά σε όλα τα συστήματα. Η οπτική παρατήρηση έχει βελτιωθεί με την ενίσχυση του οπτικού μικροσκοπίου, λόγω της εφεύρεσης των ψηφιακών μηχανών. Κάμερες υψηλής ανάλυσης στα αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να επεξεργαστούν ταχέως οπτική πληροφορία και να ενημερώσουν για ρωγμές επιπέδου 100 μm.

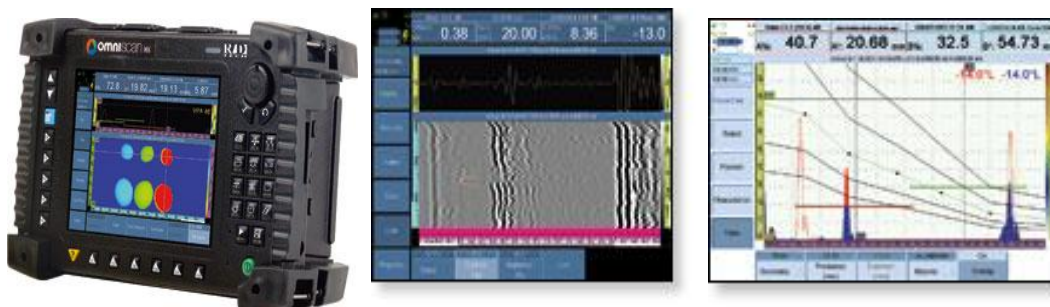
3.3 Ραδιογραφικές Μέθοδοι

Οι ακτίνες X και γ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και τον εντοπισμό ατελειών π.χ. κενών, ρωγμών. Η χρήση των ακτινών γίνεται, διότι είναι ικανές να διαπεράσουν υλικά τα οποία είναι μη διαπερατά στο φως. Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής εξάγονται από το ραδιογράφημα, το οποίο είναι ένα φιλμ το οποίο έχει εκτεθεί στην ακτινοβολία των ακτινών X ή γ. Αυτή η ακτινοβολία έχει προηγούμενα διαπεράσει το προς έλεγχο αντικείμενο. Σκιές στο ραδιογράφημα αποδεικνύουν την ύπαρξη ατελειών στο αντικείμενο.

3.4 Μέθοδοι Υπερήχων

Μία ελαστική ιδιότητα ενός μετάλλου μπορεί να καθορισθεί σαν η μετατόπιση των ατόμων του μετάλλου, όταν χτυπηθεί από άλλο αντικείμενο. Μία παραπέρα έννοια από την παραπάνω, είναι η μετάδοση της ενέργειας με τη μετατόπιση των ατόμων από τη θέση ισορροπίας τους. Με τον τρόπο αυτό η ενέργεια μεταδίδεται από το ένα άκρο του αντικειμένου στο άλλο. Οι μετατοπίσεις αυτές έχουν ελαστική υφή και καλούνται

φωνόνια. Επομένως, οι ελαστικές ιδιότητες καθώς και οι ακουστικές ιδιότητες των μεταλλικών υλικών μπορούν να καθορισθούν μικροσκοπικά με τη χρήση φωνονίων. Κάθε ατέλεια όμως, όπως ρωγμή, κενό κ.λ.π., η οποία υπάρχει στο μεταλλικό υλικό διαταράσσει την ομαλή εμφάνιση των φωνονίων, δηλ. την ελαστική μετατόπιση των ατόμων από τη θέση ισορροπίας τους.



Εικόνα 3-1: Φορητό Όργανο Δινορευμάτων-Υπερήχων

3.5 Μέθοδοι Ακουστικής Πρόσκρουσης και Ακουστικών Εκπομπών

Μια εναλλακτική μέθοδος σχετίζεται με τις ακουστικές τεχνικές. Είναι βασισμένη στη διαταραχή της παραγωγής, διάδοσης και ανίχνευσης των ελαστικών κυμάτων λόγω της παρουσίας ατελειών και ρωγμών. Σήμερα, δύο τεχνικές χρησιμοποιούνται βιομηχανικά και εργαστηριακά, η τεχνική υπερήχων και η τεχνική ακουστικής εκπομπής. Η τεχνική υπερήχων είναι βασισμένη στην παλμική ή ημιτονοειδή μετάδοση των ελαστικών παλμών ενώ το ανιχνευόμενο σήμα μπορεί να ενημερώσει για τη μορφή, το μέγεθος και τη διανομή των ρωγμών και των ατελειών. Η ακουστική εκπομπή είναι βασισμένη στην τροποποίηση των ρυθμών παραγωγής, διάδοσης και ανίχνευσης ελαστικών κυμάτων μέσα στο υπό εξέταση υλικό λόγω των υπάρχουσών ατελειών στη μικροδομή. Λειτουργούν κατά προτίμηση στην περιοχή χαμηλότερων συχνοτήτων, ενώ η ανίχνευση των ρωγμών και των ατελειών βασίζεται στην αρμονική ανάλυση των ανιχνευόμενων σημάτων (ψηφιακά κυκλώματα μετασχηματισμού κατά Fourier και λογισμικοί κώδικες).

3.6 Ηλεκτρικές & Μαγνητικές Μέθοδοι

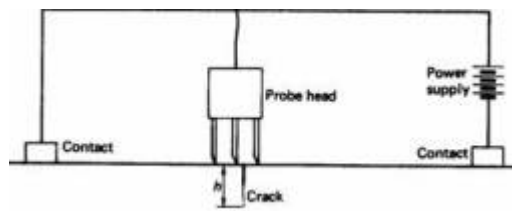
3.6.1 Ηλεκτρικές Μέθοδοι

Υπάρχουν πολλές ηλεκτρικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον ΜΚΕ όπως για παράδειγμα, η μέτρηση της αντίστασης του υλικού, η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, και η χρήση του τριβοηλεκτρικού, του θερμοηλεκτρικού ή του

εξωηλεκτρονίου φαινομένου. Όμως, οι δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων είναι η **μέθοδος πτώσης δυναμικού για εντοπισμό ρωγμών**, και, ο **έλεγχος ρευμάτων eddy** (Foucault).

3.6.1.1 Μέθοδος της Πτώσης Δυναμικού (Potential Drop)

Η μέθοδος λειτουργεί με τη μέτρηση της τάσης στην επιφάνεια του μετάλλου, το οποίο διαρρέεται από σταθερό DC ή εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η παρουσία ρωγμών, ή άλλων ατελειών, προκαλεί μεταβολές στη αγωγιμότητα του υλικού και αντίστοιχα στη μετρούμενη τάση.



Εικόνα 3-2: Μέθοδος Πτώσης Δυναμικού

Η ίδια συσκευή που χρησιμοποιείται για την παροχή του ρεύματος και τη μέτρηση της τάσης μπορεί να μετατρέπει τις μεταβολές της πτώσης δυναμικού σε μεταβολές του μήκους της ρωγμής, εφόσον φυσικά έχει προηγηθεί η κατάλληλη ρύθμιση.

Η χρήση DC ρεύματος προσφέρει ευκολότερη τοποθέτηση και ρύθμιση, καθώς και μεγαλύτερη συσχέτιση τάσης και μήκους ρωγμής. Από την άλλη η χρήση AC ρεύματος απαιτεί πολύ μικρότερη ισχύ, διότι χάρις στο επιδερμικό φαινόμενο το ρεύμα κυκλοφορεί μόνο στην επιφάνεια του μετάλλου, έτσι δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του δοκιμίου και επιπλέον επιτρέπει τη χρήση μιας πληθώρας τεχνικών για τη μείωση του θορύβου.

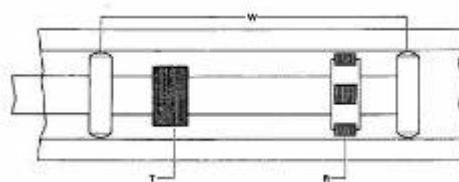
Οι δύο τεχνικές των DC και AC ρευμάτων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ταυτόχρονα ώστε να συνδυάζονται τα προτερήματά τους και να βελτιώνονται τα αποτελέσματα.

3.6.1.2 Δινορεύματα (Eddy-Current)

Στην μέθοδο δινορευμάτων χρησιμοποιείται ένα ζεύγος πηνίων που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας. Όταν αυτά βρεθούν κοντά στην επιφάνεια του μεταλλικού υλικού παράγουν σε αυτήν δινορεύματα τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούν πεδίο που επιδρά στα πηνία και επηρεάζει το ρεύμα που τα διαρρέει. Οι αλλαγές αυτές μας πληροφορούν για την κατάσταση της επιφανείας του υλικού.

Η βασική τεχνική είναι να μετακινείται η κεφαλή με τα πηνία πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου και να καταγράφεται κάθε αλλαγή στο ρεύμα και τη τάση των πηνίων. Όταν στην

επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες, τα πεδία των δινορευμάτων αλλοιώνονται και επηρεάζουν διαφορετικά το ρεύμα των πηνίων.



Εικόνα 3-3: Έλεγχος σωλήνα με ρινορεύματα μακρινού πεδίου.

3.6.2 Μακρινό πεδίο δινορευμάτων (Remote field testing - RFT)

Μια παραλλαγή της μεθόδου είναι η μέτρηση του μακρινού πεδίου των δινορευμάτων που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο μικρών μεταλλικών σωλήνων με εσωτερικό καθετήρα. Η τεχνική παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς εντοπίζει με την ίδια ευαισθησία εσωτερικά και εξωτερικά ελαττώματα του τοιχώματος του σωλήνα. Χαρακτηριστικό της τεχνικής είναι ότι τα δύο πηνία είναι απομακρυσμένα, και, το ένα χρησιμοποιείται σαν πομπός και το άλλο σαν δέκτης.

3.6.3 Μαγνητικές Μέθοδοι

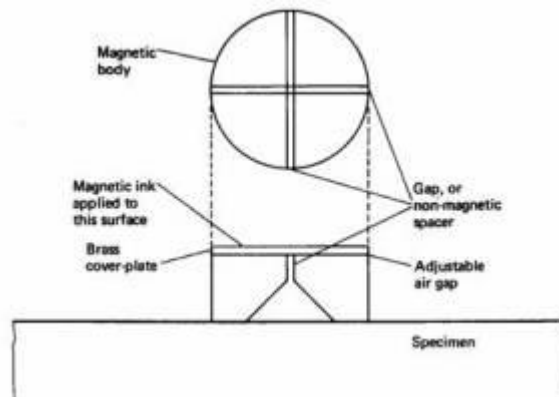
Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ βασίζονται στον εντοπισμό των απωλειών της μαγνητικής ροής λόγω ατελειών του υλικού. Όταν ένα δοκίμιο μαγνητιστεί και περιέχει μια ασυνέχεια στην επιφάνειά του ή κάτω από αυτήν, δημιουργείται μια παραμόρφωση στη μαγνητική ροή η οποία προκαλεί ένα τοπικό πεδίο απώλειας μαγνητικής ροής. Οι μέθοδοι βασίζονται στους νόμους του Maxwell (1873) και χρησιμοποιούν σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και πολύ ισχυρούς υπολογιστές.

Οι μαγνητικές μέθοδοι ΜΚΕ μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε υλικά που μαγνητίζονται. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μαγνητική μέθοδος ελέγχου είναι η τεχνική των μαγνητικών ρινιδίων σε μελάνι ή σκόνη.

3.6.3.1 Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια (Magnetic Particles)

Τα υπό έλεγχο δοκίμια μαγνητίζονται κατάλληλα και στην επιφάνειά τους τοποθετούνται σιδηρομαγνητικά ρινίδια. Τα ρινίδια έλκονται και συγκεντρώνονται στα σημεία απώλειας της ροής, κάνοντας τις ατέλειες ορατές με γυμνό μάτι. Τα ρινίδια τοποθετούνται στην

επιφάνεια ελέγχου είτε σαν χρωματιστό μαγνητικό μελάνι (magnetic ink) ή σαν μαγνητική σκόνη (magnetic particles).



Εικόνα 3-4: Έλεγχος με Μαγνητικά Ρινίδια

3.6.3.2 Μαγνητογραφία (Magnetography)

Εναλλακτικά η μέτρηση της μαγνητικής ροής μπορεί να γίνει με ένα είδος μαγνητοταινίας η οποία πιέζεται στην επιφάνεια του μαγνητισμένου υλικού. Στη συνέχεια η ταινία αφαιρείται για επεξεργασία και ανάλυση των ενδείξεων. Η διαδικασία αυτή λέγεται μαγνητογραφία αλλά δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα διαδεδομένη.

3.6.3.3 Εντοπισμός Απωλειών Μαγνητικής Ροής (Magnetic flux leakage - MFL)

Οι απώλειες μαγνητικής ροής μπορούν να καταγραφούν και με αισθητήρες που φέρουν πηνία ή μαγνητοδιόδους. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σωλήνες, αγωγούς, δεξαμενές και συρματόσχοινα.

3.6.3.4 Έλεγχος Θορύβου Barkhausen (Barkhausen Noise)

Οι ατέλειες στη κρυσταλλική δομή ενός υλικού, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές ιδιότητές του, είναι οι ίδιες που επηρεάζουν και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν έχει γίνει ακόμη πλήρως κατανοητή αλλά διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen και των βημάτων Barkhausen παρέχουν πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες.

Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα μεγάφωνο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο (ένα ανάλογο φαινόμενο είναι η μαγνητοακουστική εκπομπή). Ο θόρυβος Barkhausen είναι ευαίσθητος στη

παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρο-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης, και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.

3.6.4 Βρόχος Υστέρησης

Το μαγνητικό πεδίο είναι θεμελιώδης έννοια στη θεωρία του μαγνητισμού και δημιουργείται από ένα κινούμενο φορτίο ή ένα ηλεκτρικό ρεύμα στον χώρο ή και από μόνιμους μαγνήτες. Οι ιδιότητες του μαγνητικού πεδίου ανιχνεύονται από την δύναμη που ασκεί το πεδίο στο κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο, ή στον αγωγό που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, από την ροπή που εφαρμόζεται σε ένα μαγνητικό δίπολο, ή ακόμα και από τον αποπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ηλεκτρονίων σε ορισμένους τύπους ατόμων.

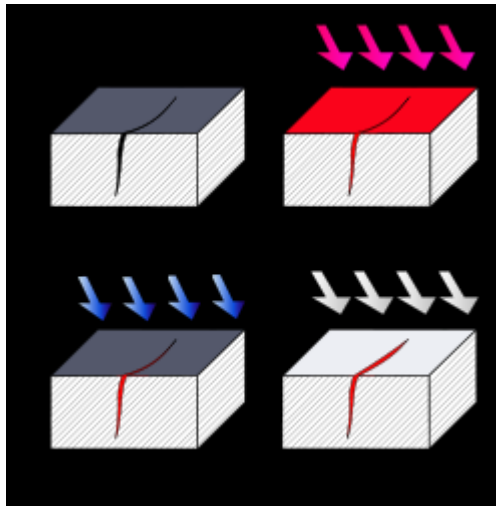
3.7 Μέθοδοι Διεισδυτικού Υγρού και Ελέγχου Διαρροής

3.7.1 Διεισδυτικά υγρά

Ο έλεγχος με διεισδυτικό υγρό ή χρωστική ουσία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών σε μη σιδηρούχα κράματα ή σε σιδηρούχα κράματα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αντίστοιχη ηλεκτρική ή μαγνητική μέθοδος. Μερικές φορές εφαρμόζεται και σε μη μεταλλικά υλικά.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Το υπό εξέταση υλικό, το οποίο περιέχει ρωγμές, μη ορατές με γυμνό οφθαλμό, καθαρίζεται επιμελώς.
2. Το διεισδυτικό υγρό απλώνεται στην επιφάνειά του υλικού ώστε να εισχωρήσει μέσα στις ρωγμές. Μικρότερα αντικείμενα βυθίζονται και ολόκληρα μέσα στο υγρό.
3. Στη συνέχεια το πλεονάζον υγρό αφαιρείται και η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε στο υλικό να παραμείνει μόνο το υγρό που έχει εισχωρήσει στις ρωγμές.
4. Τέλος, στην επιφάνεια του υλικού απλώνεται ένα υγρό ή σκόνη «εμφάνισης» (developer), η οποία όταν έρχεται σε επαφή με το διεισδυτικό υγρό δημιουργεί έντονη χρωματική αντίθεση. Η έντονη αλλαγή στο χρώμα κάνει τις επιφανειακές ρωγμές ορατές.



Εικόνα 3-5: Τα στάδια της μεθόδου: 1) Καθαρισμός επιφάνειας, 2) Εφαρμογή διεισδυτικού υγρού, 3) Καθαρισμός από το υγρό, 4) Εφαρμογή της ουσίας εμφάνισης (developer).

3.7.2 Έλεγχοι Διαρροής (Leak Detection)

Πολλές συσκευές σχεδιάζονται να λειτουργούν με υψηλή εσωτερική πίεση και κατά συνέπεια πρέπει να ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με τη μέθοδο εντοπισμού διαρροών διοχετεύεται αέριο ή υγρό υπό πίεση στη συσκευή και ελέγχουμε την παρουσία του στην άλλη πλευρά του τοιχώματος καθώς και τυχόν μειώσεις στη πίεση του.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές, σε άλλες διοχετεύεται αέριο ενώ το σώμα είναι βυθισμένο σε υγρό οπότε δημιουργούνται φυσαλίδες (bubble testing), και σε άλλες διοχετεύεται χρωματιστό ή φωσφορίζον υγρό το οποίο εντοπίζεται στην άλλη πλευρά με ειδικό φωτισμό π.χ. υπέρυθρες λυχνίες. Το αέριο που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το ήλιο, λόγω της αδρανούς του φύσης. Κάθε τεχνική έχει διαφορετικές προδιαγραφές, ευαισθησία αλλά και κόστος. Ο επόμενος Πίνακας 3-1 παραθέτει μερικές από τις μεθόδους ελέγχου διαρροής.

Πίνακας 3-1: Μέθοδοι Ελέγχου διαρροής

Method	Probe	Minimum detectable leak (cm ³ /s)	Comment
Water immersion	air/He	10 ⁻³	low cost
Dye penetrant	—	10 ⁻⁴	low cost
Pressure changes	—	10 ⁻⁵	low cost
Ionisation gauge	H, He, O	10 ⁻⁷	—
Ultrasonic	air	10 ⁻²	—
Radioisotope K-85	counter	10 ⁻¹⁰	special safety precautions needed
Mass spectrometer	He	10 ⁻¹⁰	versatile; very costly
Sniffer	He	10 ⁻⁶	versatile; costly

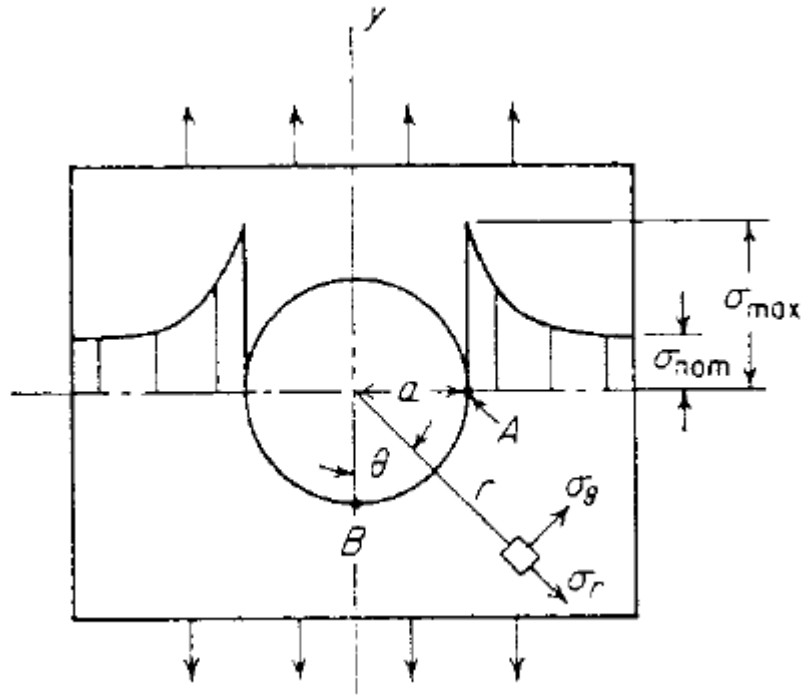
4 ΘΡΑΥΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Θραύση (fracture) ονομάζεται ο διαχωρισμός, ή θρυμματισμός, ενός στερεού σώματος σε δύο ή περισσότερα κομμάτια, κάτω από την επίδραση μηχανικών τάσεων. Η διαδικασία της θραύσης μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά στάδια: την πυρήνωση (initiation) και την προώθηση (propagation) ρηγμάτων. Η θραύση των υλικών γενικά διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: όλκιμη (ductile) και ψαθυρή (brittle). Η όλκιμη θραύση χαρακτηρίζεται από το μεγάλο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό, πριν και κατά τη διάρκεια προώθησης των ρηγμάτων, τα οποία τελικά επιφέρουν τη θραύση. Αντίθετα, η ψαθυρή θραύση χαρακτηρίζεται από την μεγάλη ταχύτητα με την οποία προωθούνται τα ρήγματα στο υλικό, χωρίς να προκαλέσουν πλαστική παραμόρφωση. Η πιθανότητα εμφάνισης ψαθυρής θραύσης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας, με αύξηση της ταχύτητας φόρτισης και με την παρουσία εγχοπών ή άλλων ασυνεχειών στο υλικό. Η ψαθυρή θραύση, ακριβώς επειδή συμβαίνει ακαριαία και χωρίς προειδοποίηση, είναι συνήθως ιδιαίτερα καταστροφική και ο σχεδιασμός κατασκευών πρέπει να γίνεται με βασικό κριτήριο την αποφυγή της.

4.2 Συγκέντρωση Τάσεων σε Ασυνέχειες

Η ύπαρξη μιας γεωμετρικής ασυνέχειας (discontinuity) σε ένα υλικό, όπως για παράδειγμα μία τρύπα ή μία εγχοπή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ανομοιόμορφης κατανομής της τάσης κοντά στην περιοχή της ασυνέχειας. Αυτό σημαίνει ότι κοντά στην ασυνέχεια οι τάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή, από ότι σε σημεία του υλικού που βρίσκονται μακριά από την ασυνέχεια. Επομένως, στις περιοχές ασυνέχειας του υλικού εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων (stress concentration). Στην Εικόνα 4-1: Συγκέντρωση τάσεων σε έλασμα με κυκλική οπή, δείχνει ένα έλασμα που καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό και το οποίο περιέχει μία οπή κυκλικής γεωμετρίας. Εάν δεν υπήρχε η οπή, τότε η ορθή εφελκυστική τάση θα ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια διατομής του ελάσματος και θα είχε παντού την τιμή (σ_{nom}). Η παρουσία της οπής επιφέρει ανομοιόμορφη κατανομή της ορθής εφελκυστικής τάσης, η οποία ακριβώς στα όρια της οπής εμφανίζει ένα μέγιστο σ_{max} και καθώς απομακρυνόμαστε από την οπή μειώνεται σταδιακά, μέχρις ότου φτάσει στην τιμή σ_{nom} .



Εικόνα 4-1: Συγκέντρωση τάσεων σε έλασμα με κυκλική οπή.

Η ποσοτικοποίηση της συγκέντρωσης τάσεων γίνεται με τη χρήση ενός θεωρητικού συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, K_t . Γενικά, ο συντελεστής K_t εκφράζει τον λόγο της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται κοντά στην ασυνέχεια, ως προς την τάση που επικρατεί μακριά από αυτήν.

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}}$$

Εκτός του ότι μία ασυνέχεια δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων κοντά της, μεταβάλλει τοπικά και την κατάσταση του υλικού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Εικόνα 4-1 όπου η εντατική κατάσταση είναι απλός μονοαξονικός εφελκυσμός, κοντά στην οπή η εντατική κατάσταση είναι σύνθετη, αφού αναπτύσσονται οι ορθές τάσεις σ_r (με φορά ακτινικά προς την οπή) και σ_θ (με φορά εφαπτομενικά προς την οπή) και η διατμητική τάση $\tau_{\theta r}$. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα έχει αποδειχθεί ότι η εντατική κατάσταση κοντά στην κυκλική οπή περιγράφεται από τις εξής σχέσεις:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta$$

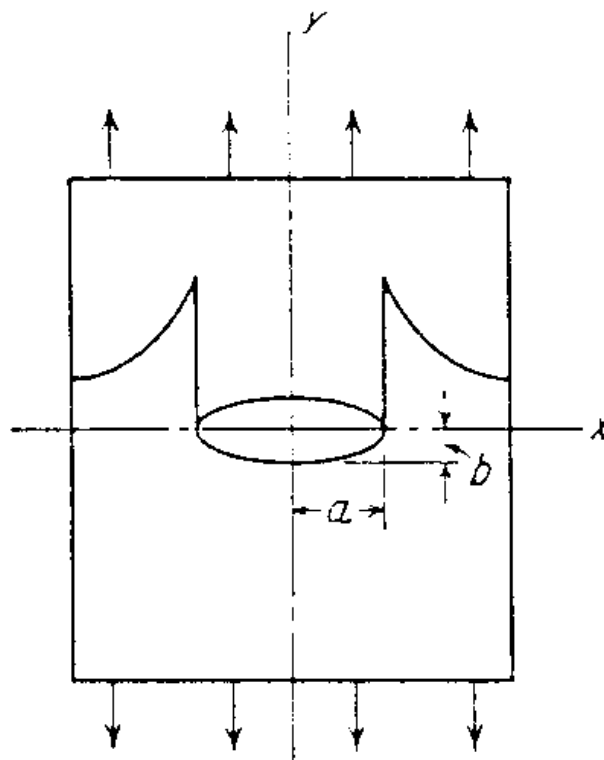
$$\tau_{\theta r} = -\frac{\sigma}{2} \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2} \right) \cdot \sin 2\theta$$

όπου σ η ομοιόμορφη τάση που επικρατεί μακριά από την οπή (δηλαδή στο παράδειγμά μας η σ_{nom}), a η ακτίνα της κυκλικής οπής και r και θ οι συντεταγμένες οποιουδήποτε σημείου του υλικού σε σχέση με το κέντρο της οπής.

Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στο σημείο Α για το οποίο $\theta = \pi/2$ και $r = a$ ($\sigma_{\theta} = 3\sigma = \sigma_{\text{max}}$, $\sigma_r = 0$ και $\tau_{\theta r} = 0$). Για $\theta = 0$ και $r = a$ ($\sigma_{\theta} = -\sigma$, $\sigma_r = 0$ και $\tau_{\theta r} = 0$) είμαστε στο σημείο Β το οποίο υφίσταται θλίψη σε μία διεύθυνση κάθετη προς το επιβαλλόμενο εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο.

Αν έχουμε ένα έλασμα σε μονοαξονικό εφελκυσμό (Εικόνα 4-2), στο οποίο υπάρχει ελλειψοειδής εγκοπή με ημιάξονες a και b , η μέγιστη τάση στα άκρα της εγκοπής δίδεται από τη σχέση:

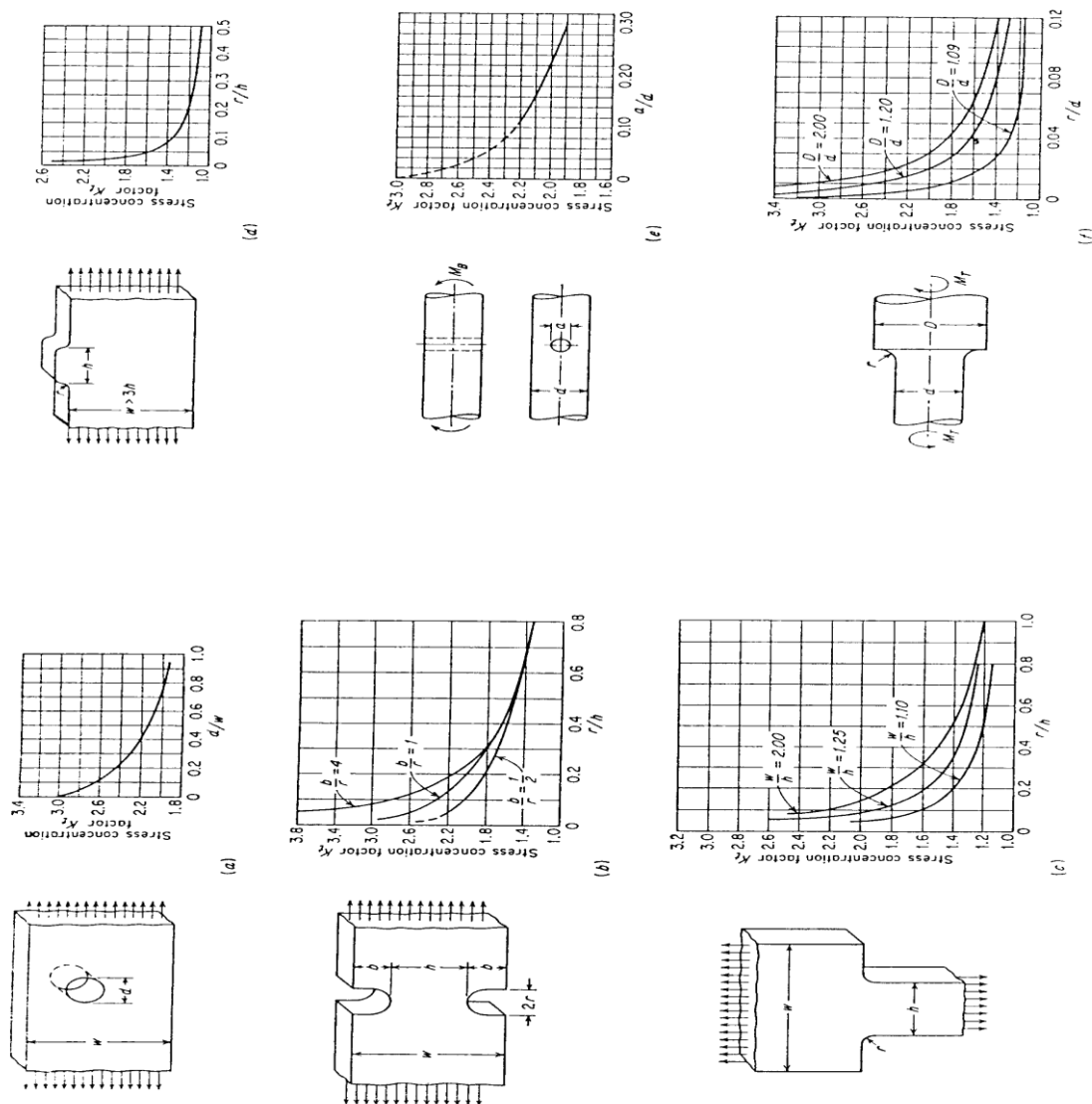
$$\sigma_{\text{max}} = \sigma \left(1 + 2\frac{a}{r} \right)$$



Εικόνα 4-2: Έλασμα με ελλειψοειδή εγκοπή σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Παρατηρήστε ότι όταν $a = b$ (όταν δηλαδή έχουμε κυκλική οπή) τότε $\sigma_{\max} = 3\sigma$. Παρατηρήστε ακόμη ότι η τιμή της μέγιστης τάσης είναι ευθέως ανάλογη του λόγου a/b . Επομένως, για μία πολύ στενή και επιμήκη εγκοπή ($a \gg b$), κάτι που για παράδειγμα ισχύει στα ρήγματα, δημιουργείται πολύ υψηλή συγκέντρωση τάσεων στα άκρα της εγκοπής.

Δυστυχώς, αναλυτικές λύσεις για τον καθορισμό της συγκέντρωσης τάσεων υπάρχουν διαθέσιμες μόνο για πολύ απλές γεωμετρίες ασυνεχειών. Στην Εικόνα 4-3 συνοψίζονται διαγράμματα που δίνουν το K_t σαν συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, για ορισμένα είδη ασυνεχειών και εντατικών καταστάσεων.

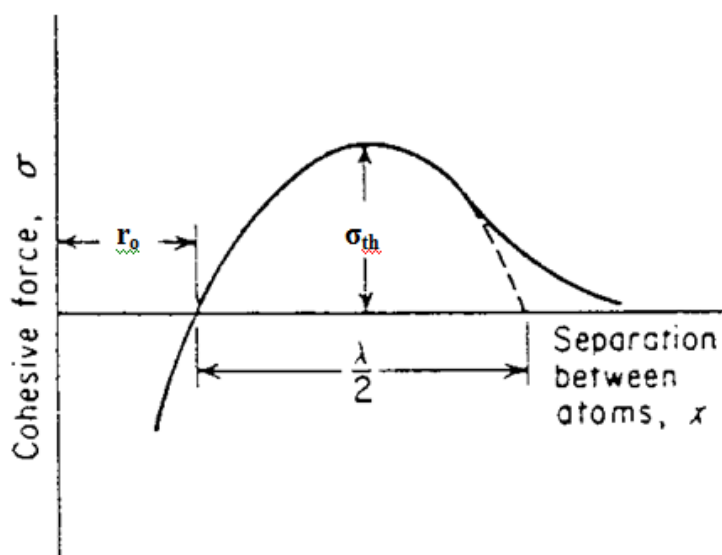


Εικόνα 4-3: Συντελεστής συγκέντρωσης τάσεως (K_t) σαν συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, για ορισμένα είδη ασυνεχειών και εντατικών καταστάσεων.

4.3 Θεωρητική αντοχή θραύσης

Τα μεταλλικά υλικά έχουν τεράστια τεχνολογική αξία, επειδή καταφέρνουν να συνδυάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό υψηλή μηχανική αντοχή και ολκιμότητα. Γενικά, η υψηλή αντοχή των μετάλλων οφείλεται στις δυνάμεις συνοχής (cohesive forces) που αναπτύσσονται μεταξύ των ατόμων τους. Οι δυνάμεις συνοχής είναι ουσιαστικά οι δυνάμεις του χημικού δεσμού μεταξύ των ατόμων, οι οποίες αντιστέκονται στις εξωτερικές δυνάμεις και προσπαθούν να συγκρατήσουν τα άτομα στις θέσεις ισορροπίας τους.

Η Εικόνα 4-4 δείχνει τη μεταβολή της δύναμη συνοχής μεταξύ δύο ατόμων με την απόσταση που τα χωρίζει. Δύο άτομα κανονικά ισορροπούν σε απόσταση r_0 (θέση ισορροπίας), όπου εκεί η δύναμη συνοχής μηδενίζεται. Αν κάποιος προσπαθήσει να απομακρύνει τα άτομα από τη θέση αυτή, επιβάλλοντας για παράδειγμα ένα εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο, τότε ο χημικός δεσμός που τα συνδέει προβάλλει αντίσταση και η δύναμη συνοχής αυξάνεται. Σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση διαχωρισμού η δύναμη συνοχής παίρνει μία μέγιστη τιμή (σ_{th}). Αν η απόσταση των ατόμων αυξηθεί ακόμη περισσότερο, η δύναμη συνοχής μειώνεται και μετά από κάποια απόσταση μηδενίζεται, γεγονός που υποδηλώνει το “σπάσιμο” του δεσμού.



Εικόνα 4-4: Μεταβολή της δύναμης συνοχής μεταξύ δύο ατόμων ως προς την μεταξύ τους απόσταση.

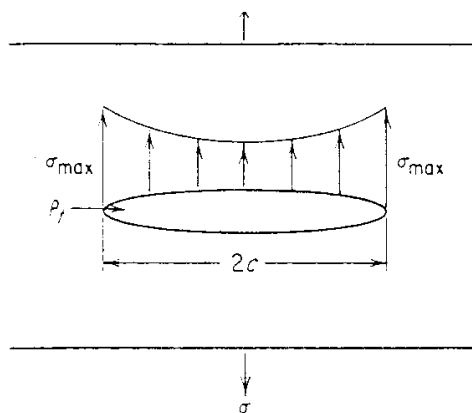
Επομένως, η σ_{th} εκφράζει ουσιαστικά την θεωρητική αντοχή σε θραύση ενός υλικού. Κι αυτό διότι για να πραγματοποιηθεί η θραύση πρέπει το υλικό να αποσπαστεί σε δύο τουλάχιστον ξεχωριστά κομμάτια, γεγονός που σημαίνει ότι θα πρέπει να σπάσουν οι

δεσμοί ανάμεσα στα άτομα των δύο κομματιών. Επομένως, για να συμβεί αυτό θα πρέπει η εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση να ξεπεράσει την σ_{th} . Ακόμη η σ_{th} εκφράζει την θεωρητική αντοχή δύο γειτονικών κρυσταλλικών επιπέδων απέναντι σε μία ορθή τάση που προσπαθεί να τα απομακρύνει κάθετα το ένα από το άλλο.

Η θεωρητική αντοχή σε θραύση των περισσότερων υλικών έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά σε $\sigma_{th} \cong E/10$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μία πάρα πολύ υψηλή τάση (το E των περισσότερων μετάλλων και κεραμικών είναι της τάξεως των μερικών δεκάδων GPa). Στην πραγματικότητα, όμως, τα περισσότερα υλικά υφίστανται θραύση σε τάσεις από 10 έως και 1000 φορές μικρότερες από την σ_{th} . Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα πραγματικά υλικά περιέχουν ρήγματα, στα οποία εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Έτσι, παρότι γενικά σε μία κατασκευή οι τάσεις μπορεί να είναι πολύ μικρότερες από την σ_{th} , κοντά στα ρήγματα οι τοπικές τάσεις είναι δυνατόν να ξεπερνούν την σ_{th} , με αποτέλεσμα να επέρχεται ψαθυρή θραύση του υλικού.

Το πόσο πολύ εξασθενεί την αντίσταση ενός υλικού σε θραύση η παρουσία ρηγμάτων μπορεί να φανεί με ένα απλό παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μεγάλο έλασμα που καταπονείται σε μονοαξονικό εφελκυσμό, στο οποίο υπάρχει ένα ελλειψοειδές ρήγμα, Εικόνα 4-5. Το ρήγμα έχει μήκος $2a$ και η ακτίνα καμπυλότητας στις αιχμές του είναι ρ_t . Κοντά στο ρήγμα υπάρχει συγκέντρωση τάσεων και η μέγιστη τάση εμφανίζεται στις αιχμές του ρήγματος και ισούται με:

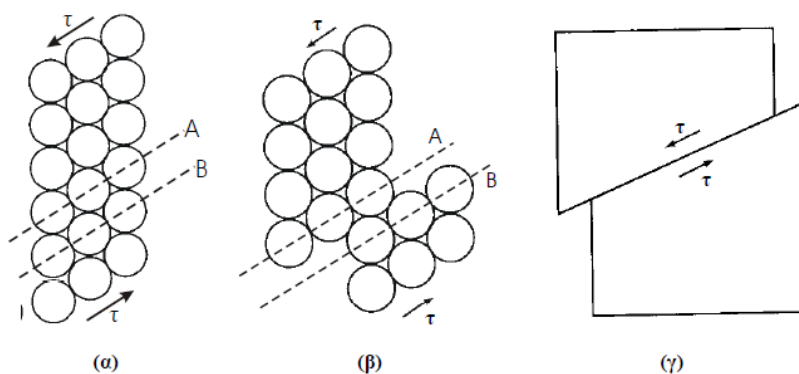
$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho_t}} \right) \approx 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho_t}}$$



Εικόνα 4-5: Μεταβολή της δύναμης συνοχής μεταξύ δύο ατόμων ως προς την μεταξύ τους απόσταση.

4.3.1 Θεωρητική Αντοχή των Κρυστάλλων σε Διάτμηση

Η ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων μπορεί να συμβεί μόνο με την επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης προς το επίπεδο ολίσθησης (Εικόνα 4-6 α και β). Μία ορθή τάση δεν θα μπορούσε να προκαλέσει ολίσθηση, αλλά απλώς θα προσπαθούσε να απομακρύνει (αν ήταν εφελκυστική για παράδειγμα) το ένα κρυσταλλικό επίπεδο από το άλλο. Κατά συνέπεια, εφόσον η πλαστική παραμόρφωση των μεταλλικών υλικών (σε μακροσκοπική κλίμακα) συντελείται με την ολίσθηση εκατοντάδων ή χιλιάδων κρυσταλλικών επιπέδων (σε μικροσκοπική κλίμακα) μέσω διατμητικών τάσεων, είναι λογικό ότι οι διατμητικές τάσεις είναι αυτές που ευθύνονται για την πλαστική παραμόρφωση των μεταλλικών υλικών.



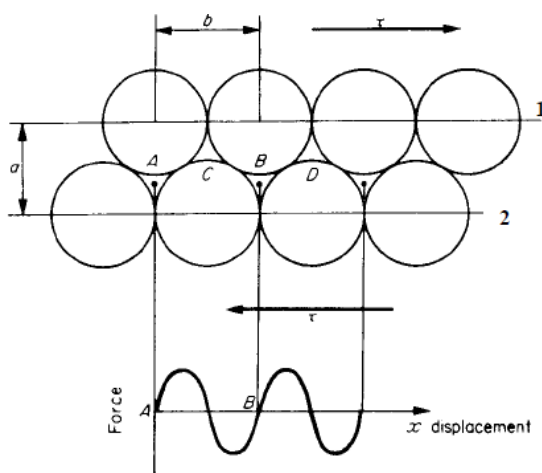
Εικόνα 4-6: Η επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης προς το επίπεδο ολίσθησης η οποία προκαλεί ολίσθηση των κρυσταλλικών επιπέδων.

Αν εξετάζουμε μόνο δύο (πυκνά) κρυσταλλικά επίπεδα 1 και 2, επάνω στα οποία λαμβάνει χώρα ολίσθηση κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ , Εικόνα 4-6. Έστω ότι η απόσταση από άτομο σε άτομο επάνω σε κάθε πυκνό επίπεδο είναι b και η απόσταση μεταξύ των πυκνών επιπέδων (interplanar spacing) είναι a ($a \cong b = 2r$, όπου r η ατομική ακτίνα). Κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ το κρυσταλλικό επίπεδο 1 τείνει να ολισθήσει προς τα δεξιά και το 2 προς τα αριστερά. Για να πραγματοποιηθεί η ολίσθηση αυτή θα πρέπει τα άτομα του 1 να περάσουν πάνω από τα άτομα του 2. Για παράδειγμα, το άτομο A του επιπέδου 1 θα πρέπει να περάσει πάνω από το άτομο C του επιπέδου 2 και να καταλήξει στην θέση του ατόμου B του επιπέδου 1. Εννοείται ότι την ίδια κίνηση κάνουν ταυτόχρονα και τα υπόλοιπα γειτονικά

Στην Εικόνα 4-6β φαίνεται ότι δεν χρειάζεται να ολισθήσουν όλα τα κρυσταλλικά επίπεδα για να δημιουργηθεί αυτό το μικρό σκαλοπάτι. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ολίσθηση έγινε μόνο μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων A και B, τα οποία αποτελούν και το επίπεδο

ολίσθησης. Η διεύθυνση ολίσθησης στο συγκεκριμένο παράδειγμα συμπίπτει με την διακεκομμένη γραμμή του σχήματος. Στην Εικόνα 4-6β το μέγεθος του σκαλοπατιού που δημιουργήθηκε είναι μόλις 1 ατομική διάμετρος. Ωστόσο, εύκολα μπορεί να φανταστεί κανείς ότι εάν συνεχιστεί η ολίσθηση του επιπέδου Α σε σχέση με το Β τότε το σκαλοπάτι θα γίνει μεγαλύτερο σε μέγεθος. Κάτι τέτοιο δείχνει το Στην Εικόνα 4-6γ, όπου εδώ έχουν απαλειφθεί τα άτομα για απλότητα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται οι γραμμές ολίσθησης, που φτάνουν να είναι παρατηρήσιμες με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Βεβαίως, η διαδικασία αυτή δεν γίνεται μόνο μεταξύ δύο κρυσταλλικών επιπέδων, αλλά όπως είναι λογικό συμβαίνει σε πολλά ακόμη κρυσταλλικά επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται πολλές γραμμές ολίσθησης, τις οποίες εμείς βλέπουμε τελικά σαν μπάντες ολίσθησης στο οπτικό μικροσκόπιο.

Ας υποθέσουμε ότι από την Εικόνα 4-6α απομονώσουμε και εξετάζουμε μόνο δύο (πυκνά) κρυσταλλικά επίπεδα 1 και 2, επάνω στα οποία λαμβάνει χώρα ολίσθηση κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ , στην Εικόνα 4-7. Έστω ότι η απόσταση από άτομο σε άτομο επάνω σε κάθε πυκνό επίπεδο είναι b και η απόσταση μεταξύ των πυκνών επιπέδων (interplanar spacing) είναι a ($a \cong b = 2r$, όπου r η ατομική ακτίνα). Κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ το κρυσταλλικό επίπεδο 1 τείνει να ολισθήσει προς τα δεξιά και το 2 προς τα αριστερά. Για να πραγματοποιηθεί η ολίσθηση αυτή θα πρέπει τα άτομα του 1 να περάσουν πάνω από τα άτομα του 2. Για παράδειγμα, το άτομο Α του επιπέδου 1 θα πρέπει να περάσει πάνω από το άτομο C του επιπέδου 2 και να καταλήξει στην θέση του ατόμου Β του επιπέδου 1. Εννοείται ότι την ίδια κίνηση κάνουν ταυτόχρονα και τα υπόλοιπα γειτονικά άτομα του κάθε επιπέδου. Με τον τρόπο αυτό τα δύο κρυσταλλικά επίπεδα θα έχουν ολισθήσει κατά μία απόσταση b .



Εικόνα 4-7: Πυκνά κρυσταλλικά επίπεδα 1 και 2, επάνω στα οποία λαμβάνει χώρα ολίσθηση κάτω από την επίδραση της διατμητικής τάσης τ .

Στο κάτω μέρος της Εικόνα 4-7 υπάρχει ένα διάγραμμα, που δείχνει την αντίσταση που προβάλλει το κρυσταλλικό πλέγμα σε σχέση με την απόσταση ολίσθησης των κρυσταλλικών επιπέδων. Στην αρχική θέση τα άτομα βρίσκονται σε θέσεις ισορροπίας και επομένως η δύναμη αντίστασης είναι μηδέν. Καθώς το επίπεδο 1 αρχίζει να ολισθαίνει προς τα δεξιά, το άτομο A αρχίζει να “σκαρφαλώνει” επάνω στο άτομο C. Η δύναμη αντίστασης στην κίνηση αυτή αρχίζει να αυξάνει. Η μέγιστη δύναμη παρατηρείται σε μία απόσταση περίπου $x = b/4$, όταν δηλαδή το άτομο A έχει “σκαρφαλώσει” κατά το ήμισυ επάνω στο C. Όταν το A φτάσει ακριβώς στην κορυφή του C, τότε η δύναμη αντίστασης και πάλι μηδενίζεται, καθώς στο σημείο αυτό το άτομο A βρίσκεται σε θέση μετασταθούς ισορροπίας. Καθώς η ολίσθηση συνεχίζεται, το άτομο A αρχίζει να κινείται προς τη νέα θέση ισορροπίας, δηλαδή την θέση του ατόμου B. Στην κίνηση αυτή το πλέγμα προβάλλει και πάλι την ίδια αντίσταση, με αντίθετη όμως φορά. Όταν το άτομο A φτάσει στη νέα θέση ισορροπίας (αυτή που αρχικά είχε το άτομο B) τότε η δύναμη αντίστασης μηδενίζεται και πάλι. Τώρα τα κρυσταλλικά επίπεδα 1 και 2 έχουν ολισθήσει κατά μία απόσταση b .

Η μεταβολή της αντίστασης που προβάλλει το κρυσταλλικό πλέγμα στην ολίσθηση των επιπέδων 1 και 2 μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση σαν ημιτονοειδής, δηλαδή:

$$\tau = k \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

Για πολύ μικρές μετατοπίσεις ισχύει ότι $\sin(2\pi x/b) \cong 2\pi x/b$, οπότε :

$$\tau = k \cdot \frac{2\pi x}{b}$$

Από το νόμο του Hooke έχουμε ότι:

$$\tau = G \cdot \gamma \Rightarrow \tau = G \cdot \frac{x}{\alpha}$$

όπου γ η διατμητική παραμόρφωση.

Άρα:

$$G \cdot \frac{x}{\alpha} = k \cdot \frac{2\pi x}{b} \Rightarrow k = \frac{G \cdot b}{2\pi\alpha} \text{ και}$$

$$\tau = \frac{G \cdot b}{2\pi\alpha} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η μέγιστη δύναμη αντίστασης στην ολίσθηση εμφανίζεται περίπου στο $x = b/4$. Επομένως, η μέγιστη διατμητική τάση που απαιτείται για να υπερνικήσει την αντίσταση αυτή και να προκαλέσει ολίσθηση των κρυσταλλικών επιπέδων (άρα και πλαστική παραμόρφωση) είναι:

$$\tau_{\max} = \frac{G \cdot b}{2\pi\alpha}$$

Επειδή $b \cong \alpha$, η μέγιστη διατμητική τάση που απαιτείται για να προκαλέσει ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων παίρνει τελικά την τιμή:

$$\tau_{\max} \cong \frac{G}{6} = \tau_{th}$$

Η τελευταία εξίσωση δίνει την θεωρητική αντοχή κρυστάλλου σε διάτμηση, τ_{th} . Εάν, δηλαδή, σε έναν τέλειο κρύσταλλο η διατμητική τάση που αναπτύσσεται επάνω στο επίπεδο ολίσθησης (και η οποία προέρχεται από τα εξωτερικά φορτία) ξεπεράσει την τιμή τ_{th} , τότε θα υπάρξει ολίσθηση κρυσταλλικών επιπέδων και, κατά συνέπεια, πλαστική παραμόρφωση του κρυστάλλου. Η τιμή τ_{th} αποτελεί την αντίσταση που προέβαλε ένας τέλειος κρύσταλλος απέναντι σε μία διατμητική τάση που προσπαθούσε να προκαλέσει ολίσθηση ανάμεσα σε δύο παράλληλα κρυσταλλικά επίπεδα. Καθώς μία ορθή τάση δεν μπορούσε να προκαλέσει ολίσθηση, παρά μόνο κάθετη απομάκρυνση των δύο επιπέδων μεταξύ τους, ακριβώς αυτή την αντίσταση σε ορθές τάσεις που προσπαθούν να διαχωρίσουν δύο κρυσταλλικά επίπεδα εκφράζει η σ_{th} .

Η τιμή της θεωρητικής αντοχής σε διάτμηση των μεταλλικών υλικών είναι πάρα πολύ υψηλή. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι κρύσταλλοι των μεταλλικών υλικών δεν είναι τέλειοι, αλλά περιέχουν διαφόρων ειδών ατέλειες (imperfections) ή ελαττώματα (defects) στην κρυσταλλική τους δομή. Το σημαντικότερο είδος ατέλειας, που παίζει βασικό ρόλο στην πλαστική διαρροή των μεταλλικών υλικών είναι, ως γνωστόν, οι γραμμοαταξίες (dislocations).

4.4 Θεωρία Griffith για την Ψαθυρή Θραύση

Πρώτος ο A. Griffith το 1920 προσπάθησε να εξηγήσει την απόκλιση, ανάμεσα στην θεωρητική και στην πειραματικά παρατηρούμενη αντοχή των υλικών σε θραύση. Παρότι σήμερα αναγνωρίζεται ότι η θεωρία Griffith ισχύει απόλυτα μόνο για πολύ ψαθυρά υλικά, όπως για παράδειγμα το γυαλί, οι ιδέες που εισήγαγε η θεωρία αυτή ήταν πολύ διαφωτιστικές και για την θραύση πιο όλκιμων υλικών, όπως είναι τα μέταλλα.

Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, κάθε ψαθυρό υλικό περιέχει ένα πλήθος λεπτών ρηγμάτων, στα οποία δημιουργείται συγκέντρωση τάσεων, έτσι ώστε οι τάσεις κοντά στα ρήγματα να ξεπερνούν την θεωρητική αντοχή του υλικού σε θραύση, παρότι μακριά από τα ρήγματα οι τάσεις μπορεί να βρίσκονται σε αρκετά χαμηλές τιμές. Όταν οποιοδήποτε από τα ρήγματα αυτά προωθείται μέσα στο υλικό, τότε δημιουργούνται δύο νέες ελεύθερες επιφάνειες, δηλαδή οι πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος.

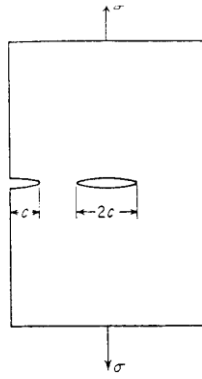
Όπως είναι γνωστό, κάθε ελεύθερη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ένα ποσό ενέργειας

που λέγεται *επιφανειακή ενέργεια* (surface energy), η φυσική προέλευση της οποίας οφείλεται στο γεγονός ότι τα άτομα στις ελεύθερες επιφάνειες έχουν “ανικανοποίητους” (δηλ. σπασμένους) χημικούς δεσμούς και είναι πιο ευκίνητα απ’ ότι τα άτομα στο εσωτερικό του υλικού. Κατά συνέπεια, με την προώθηση του ρήγματος και την αύξηση της ελεύθερης επιφανείας του, η συνολική ενέργεια του υλικού αυξάνεται κατά ένα ποσό ίσο με την επιφανειακή ενέργεια θα περίμενε κανείς ότι σε κανένα υλικό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει αυθόρμητη προώθηση ρηγμάτων (δηλαδή θραύση), αφού έτσι θα αυξανόταν η συνολική ενέργεια του συστήματος.

Ωστόσο, το σπάσιμο χημικών δεσμών που προκαλείται κατά την προώθηση ενός ρήγματος οδηγεί σε μείωση μίας άλλης μορφής ενέργειας του υλικού, της *ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης* (elastic strain energy). Η ενέργεια αυτή οφείλεται στο έργο που παράγουν τα εξωτερικά φορτία που καταπονούν και παραμορφώνουν ελαστικά το υλικό. Η ενέργεια αυτή είναι αποθηκευμένη στο υλικό και όταν εκλείψουν τα εξωτερικά φορτία μηδενίζεται. Όταν ένα ρήγμα που προωθείται περάσει από ένα σημείο του υλικού και το χωρίσει σε δύο τμήματα, τα τμήματα αυτά παύουν πλέον να βρίσκονται υπό τάση, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης που βρισκόταν αποθηκευμένη εκεί.

Επομένως, η προώθηση ενός ρήγματος στο υλικό επιφέρει μείωση της αποθηκευμένης ελαστικής ενέργειας και αύξηση της επιφανειακής ενέργειας στο σύστημα. Εάν η μείωση της ελαστικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της επιφανειακής ενέργειας, τότε η προώθηση του ρήγματος οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενέργειας του συστήματος και επομένως το σύστημα τείνει αυθόρμητα προς την κατεύθυνση αυτή. Όταν συμβαίνει αυτό δηλαδή, το υλικό “θέλει” να υποστεί θραύση για να ελαχιστοποιήσει την συνολική του ενέργεια.

Η Εικόνα 4-8, που δείχνει ένα έλασμα με πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του, το οποίο περιέχει ένα ελλειπτικό εσωτερικό ρήγμα μήκους $2c$ (ή ένα ημιελλειπτικό επιφανειακό ρήγμα μήκους c) και καταπονείται σε απλό εφελκυσμό.



Εικόνα 4-8: Έλασμα με πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του, το οποίο περιέχει ένα ελλειπτικό εσωτερικό ρήγμα μήκους $2c$

Η μείωση της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης που οφείλεται στην ύπαρξη του ρήγματος ισούται με:

$$\Delta U_{el} = -\frac{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \sigma^2}{E}$$

όπου σ η τάση μακριά από το ρήγμα και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Αντίθετα, η αύξηση της επιφανειακής ενέργειας που οφείλεται στην ύπαρξη του ρήγματος (δηλ. η ενέργεια των πλευρικών του επιφανειών) δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta U_s = 4\alpha \cdot \gamma_s$$

όπου γ_s είναι η επιφανειακή ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας του υλικού. Η μεταβολή της συνολικής ενέργειας του υλικού λόγω της ύπαρξης του ρήγματος είναι:

$$\Delta U = \Delta U_{el} + \Delta U_s$$

Σύμφωνα με την θεωρία του Griffith, το ρήγμα θα προωθηθεί υπό σταθερή τάση σ εάν μια απειροστή αύξηση του μήκους του ρήγματος da τείνει να μειώσει ή έστω (οριακά) να αφήσει αμετάβλητη την συνολική ενέργεια του συστήματος. Δηλαδή:

$$\frac{d(\Delta U)}{da} = \frac{d}{da} \left(-\frac{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \sigma_f^2}{E} + 4\alpha \cdot \gamma_s \right) = 0 \Rightarrow -\frac{2\pi \cdot \alpha \cdot \sigma_f^2}{E} + 4 \cdot \gamma_s = 0 \Rightarrow \sigma_f = \left(\frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2}$$

Η Εξ. (10) δίνει την τιμή της (μακροσκοπικής) τάσης που απαιτείται, για να προκαλέσει την προώθηση ενός μικροσκοπικού ρήγματος σε ένα ψαθυρό υλικό, σαν συνάρτηση του μεγέθους του ρήγματος. Παρατηρείστε ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του ρήγματος, τόσο μικρότερη είναι η τάση που απαιτείται για να προκληθεί ψαθυρή θραύση του υλικού, δηλαδή τόσο μικρότερη η αντοχή του υλικού σε θραύση, σ_f .

Παρόμοιες σχέσεις, που υπολογίζουν την αντοχή σε θραύση σαν συνάρτηση του μεγέθους του ρήγματος, προκύπτουν και σε προβλήματα διαφορετικής γεωμετρίας ή εντατικής κατάστασης. Για παράδειγμα, εάν θεωρήσουμε ένα έλασμα με πάχος πολύ μεγαλύτερο από το μέγεθος του ρήγματος τότε η εξίσωση Griffith παίρνει τη μορφή:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E \cdot \gamma_s}{(1-\nu^2)\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2}$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η θεωρία Griffith προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια την αντοχή σε θραύση ενός τέλεια ψαθυρού υλικού, δηλαδή ενός υλικού που δεν επιδέχεται καθόλου πλαστική παραμόρφωση. Τέτοια υλικά είναι το γυαλί και αρκετά ακόμη κεραμικά υλικά. Ωστόσο, όσον αφορά τα μέταλλα, ακόμη και τα πιο σκληρά μεταλλικά υλικά δεν είναι τελείως ψαθυρά, από την άποψη ότι πάντοτε επιδέχονται έστω και ένα πολύ μικρό ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Κατά συνέπεια, η εξίσωση Griffith δεν προβλέπει ποσοτικά με μεγάλη ακρίβεια την αντοχή σε θραύση των μετάλλων. Έτσι, ο E. Orowan πρότεινε μία τροποποίηση της εξίσωσης Griffith για τα μεταλλικά υλικά, η οποία περιλαμβάνει έναν επιπλέον όρο, που αφορά την ενέργεια (γ_p) που απορροφά το μέταλλο όταν παραμορφώνεται πλαστικά κατά την προώθηση του ρήγματος:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E \cdot (\gamma_s + \gamma_p)}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{E \cdot \gamma_p}{\alpha} \right)^{1/2}$$

Το γ_s στο τελευταίο μέλος της εξίσωσης μπορεί να απαλειφθεί, επειδή είναι πολύ μικρότερο του γ_p . Αυτό συμβαίνει επειδή οι συνήθεις τιμές του γ_p είναι της τάξεως των $10^2 - 10^3 \text{ J/m}^2$, ενώ η επιφανειακή ενέργεια γ_s κυμαίνεται συνηθέστερα μεταξύ $1 - 2 \text{ J/m}^2$.

4.5 Ρυθμός Απελευθέρωσης Ενέργειας Παραμόρφωσης

Επειδή η ποσότητα γ_p είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί πειραματικά, καθώς συνδέεται με ένα πολύ μικροσκοπικό φαινόμενο όπως είναι η προώθηση τόσο μικρών ρηγμάτων, ο G. Irwin το 1958 εισήγαγε μία άλλη ποσότητα, που είναι απευθείας μετρήσιμη. Η ποσότητα αυτή συμβολίζεται με G, ονομάζεται *ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης* (strain-energy release rate) και εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο απελευθερώνεται ελαστική ενέργεια από το υλικό κατά την διαδικασία προώθησης του ρήγματος. Οι μονάδες μέτρησης του G είναι επίσης J/m^2 , όπως και του γ_p . Όταν το G πάρει μία κρίσιμη τιμή, τότε το ρήγμα γίνεται ασταθές,

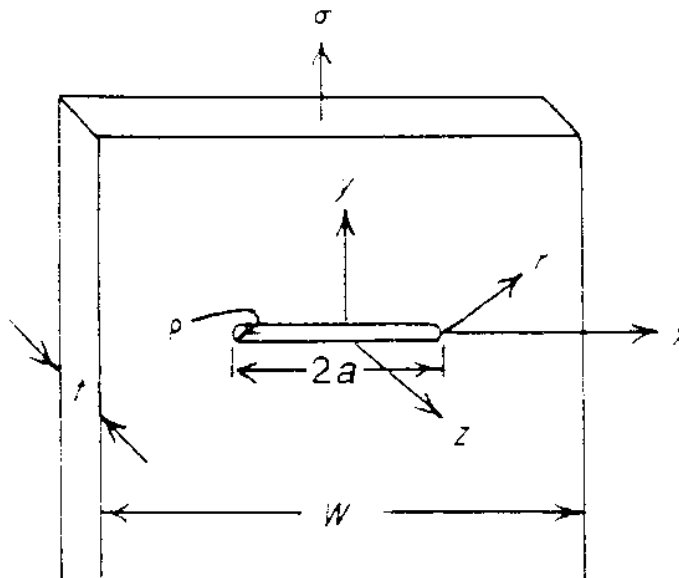
προωθείται ταχύτατα και προκαλεί θραύση του υλικού. Η κρίσιμη αυτή τιμή συμβολίζεται με G_c και ονομάζεται *κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης* ή *ενεργειακή δυσθραυστότητα* (fracture toughness) του υλικού.

$$\sigma_f = \left(\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}$$

όπου σ_f η αντοχή του υλικού σε θραύση.

4.6 Ο Παράγοντας Έντασης Τάσεων

Η εντατική κατάσταση που επικρατεί κοντά στις αιχμές ενός ρήγματος, το οποίο βρίσκεται σε ένα λεπτό έλασμα που υποβάλλεται σε εφελκυσμό (Εικόνα 4-9) δίδεται από τις παρακάτω σχέσεις:



Εικόνα 4-9: Έλασμα που υποβάλλεται σε εφελκυσμό

$$\sigma_x = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\sigma_y = \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\tau_{xy} = \sigma \left(\frac{\alpha}{2r} \right)^{1/2} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

Οι εξισώσεις ισχύουν όταν $a > r > \rho$, δηλαδή ισχύουν για αιχμηρά ρήγματα και περιγράφουν τις τάσεις σε απόσταση από το ρήγμα μεγαλύτερη από την ακτίνα καμπυλότητας της αιχμής του.

Ακριβώς μπροστά από την αιχμή του ρήγματος ($\theta = 0$) το τασικό πεδίο που αναπτύσσεται είναι: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \left(\frac{\alpha}{2r} \right)^{1/2}$ και $\tau_{xy} = 0$.

Οι παραπάνω εξισώσεις δείχνουν ότι οι τοπικές τάσεις που επικρατούν κοντά σε ένα ρήγμα εξαρτώνται από το γινόμενο της (μακροσκοπικής) τάσης σ μακριά από το ρήγμα και της τετραγωνικής ρίζας του μεγέθους του ρήγματος. Το γινόμενο αυτό ονομάστηκε από τον Irwin παράγοντας έντασης τάσεων (stress intensity factor) K . Για ένα αιχμηρό ρήγμα σε ένα μεγάλο έλασμα ο παράγοντας έντασης τάσεων ορίζεται ως εξής:

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot \alpha}$$

Προκύπτει λοιπόν:

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

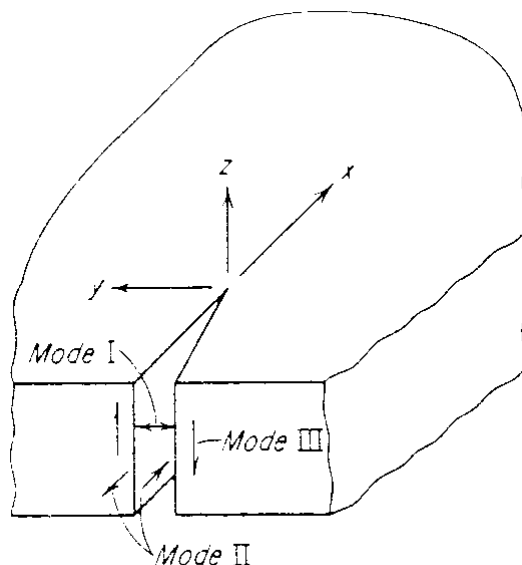
Ο παράγοντας έντασης τάσεων αποτελεί έναν εύχρηστο τρόπο για την περιγραφή της εντατικής κατάστασης που επικρατεί γύρω από ένα ρήγμα. Εάν δύο ρήγματα διαφορετικής γεωμετρίας έχουν τον ίδιο παράγοντα έντασης τάσεων, τότε το τασικό πεδίο γύρω από τα ρήγματα αυτά θα είναι το ίδιο. Τιμές του παράγοντα έντασης τάσεων K για διάφορες γεωμετρίες ρηγμάτων και για διάφορες εντατικές καταστάσεις μπορούν να υπολογιστούν μέσω της θεωρίας ελαστικότητας. Στη γενική περίπτωση ο παράγοντας έντασης τάσεων δίδεται από την εξίσωση:

$$K = f \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot \alpha}$$

όπου το f ονομάζεται *παράγοντας σχήματος* ή *γεωμετρίας* (shape ή geometry factor) και εξαρτάται από τη μορφή του ρήγματος (ελλειπτικό, ημιελλειπτικό, ημικυκλικό, κ.ο.κ.), τη θέση του στο υλικό (επιφανειακό, εσωτερικό), τη γεωμετρία και τις διαστάσεις του δομικού στοιχείου ή εξαρτήματος στο οποίο βρίσκεται το ρήγμα, καθώς και από την εντατική κατάσταση.

4.7 Τρόποι (modes) Προώθησης Ρήγματος

Ένα ρήγμα μπορεί να προωθηθεί με διάφορους τρόπους μέσα σε ένα υλικό, σε σχέση με τις τάσεις που προσπαθούν να “ανοίξουν” τις πλευρικές του επιφάνειες (δηλαδή τις επιφάνειες θραύσης). Οι τρόποι αυτοί έχουν καταταγεί σε τρεις βασικές κατηγορίες, που ονομάζονται *mode I*, *mode II* και *mode III* και φαίνονται παραστατικά στην Εικόνα 4-10. Για κάθε έναν από τους τρεις αυτούς τρόπους ορίζεται και ο αντίστοιχος παράγοντας έντασης τάσεων, δηλαδή K_I , K_{II} και K_{III} . Στο *mode I* οι πλευρικές επιφάνειες του ρήγματος απομακρύνονται η μία από την άλλη (κι έτσι προωθείται το ρήγμα) κάτω από την επίδραση εφελκυστικής ορθής τάσης κάθετης στις επιφάνειες αυτές. Στο *mode II* η προώθηση του ρήγματος γίνεται με την επίδραση διατμητικής τάσης παράλληλης στις πλευρικές του επιφάνειες, ενώ στο *mode III* έχουμε και πάλι διατμητική τάση παράλληλη στις πλευρικές επιφάνειες αλλά με φορά κάθετη σε σχέση με το *mode II*.



Εικόνα 4-10: Τρόποι προώθησης ρήγματος

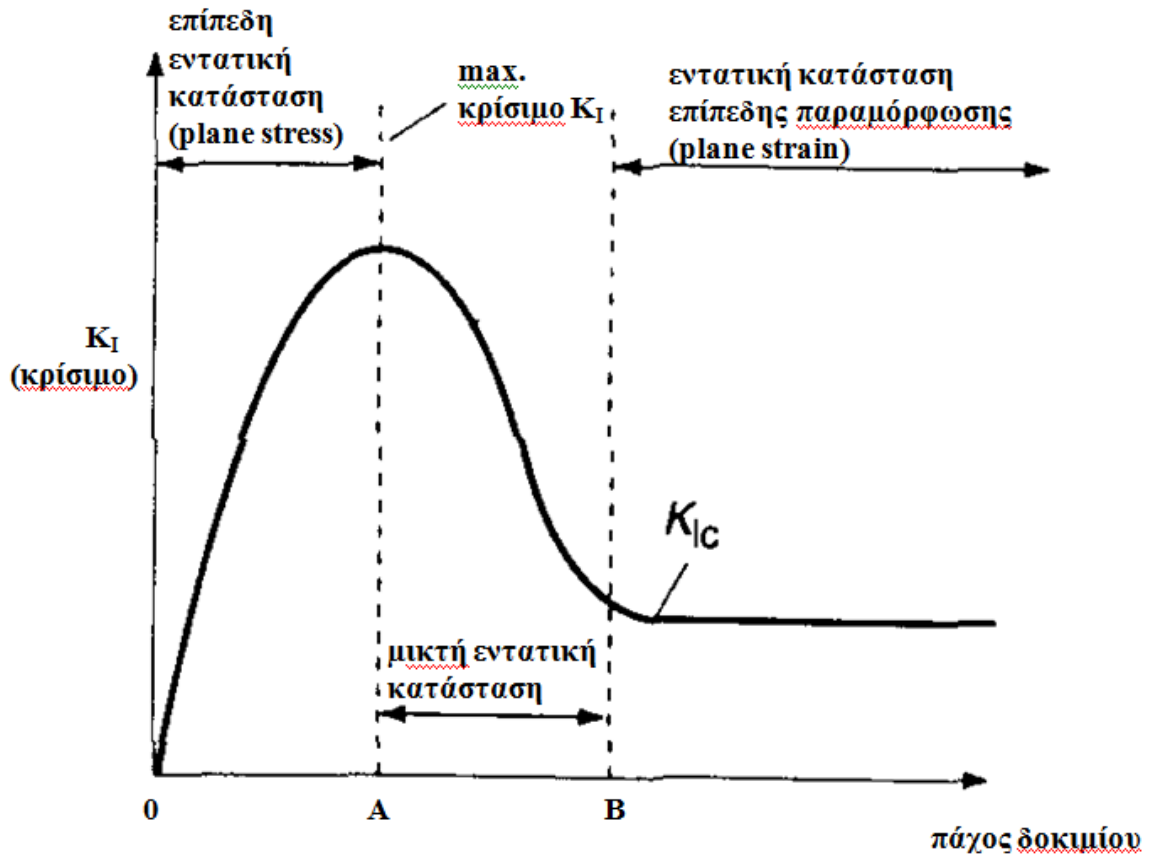
4.8 Δυσθραυστότητα K_{Ic}

Από τους τρεις τρόπους προώθησης ρήγματος που είδαμε στη προηγούμενη παράγραφο, το mode I έχει τη μεγαλύτερη πρακτική σημασία, καθώς μπορεί ευκολότερα να προωθήσει ένα ρήγμα. Υπάρχουν δύο ακραίες περιπτώσεις για το mode I. Η μία περίπτωση είναι όταν το υλικό έχει λεπτό πάχος διατομής, οπότε μπροστά στις αιχμές του ρήγματος επικρατεί *επίπεδη εντατική κατάσταση* (plane stress). Η άλλη ακραία περίπτωση είναι όταν έχει μεγάλο πάχος διατομής, οπότε μπροστά στις αιχμές του ρήγματος επικρατεί εντατική κατάσταση *επίπεδης παραμόρφωσης* (plane strain). Όπως θα δούμε παρακάτω, η περίπτωση της επίπεδης παραμόρφωσης είναι πιο σημαντική, επειδή τότε οι τιμές του κρίσιμου παράγοντα έντασης τάσεων K_I είναι χαμηλότερες, σε σύγκριση με την επίπεδη εντατική κατάσταση.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η *κρίσιμη τιμή του παράγοντα έντασης τάσεων* K_I ενός συγκεκριμένου υλικού, στην οποία επέρχεται η θραύση του, δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται σημαντικά από το πάχος του δοκιμίου και κατ' επέκταση από την εντατική κατάσταση που επικρατεί κοντά στο ρήγμα. Αυτό σημαίνει ότι το κρίσιμο K_I δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν *ιδιότητα* του υλικού, αφού δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό, αλλά και από την γεωμετρία και τις διαστάσεις του. Ωστόσο, η κρίσιμη αυτή τιμή σταθεροποιείται από κάποιο πάχος δοκιμίου και πάνω. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα της Εικόνας 4-11, το οποίο δείχνει την μεταβολή του κρίσιμου παράγοντα έντασης τάσεων K_I σαν συνάρτηση του πάχους διατομής του υλικού. Όπως φαίνεται, η κρίσιμη τιμή του K_I αρχικά αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος δοκιμίου και φτάνει σε μία μέγιστη τιμή σε πάχος A. Από εκεί και πέρα αρχίζει να μειώνεται, μέχρις ότου από κάποιο πάχος δοκιμίου B και πάνω σταθεροποιείται. Δηλαδή, από το πάχος B και πάνω το κρίσιμο K_I παραμένει σταθερό.

Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η εντατική κατάσταση που επικρατεί μπροστά στις αιχμές του ρήγματος. Σε πολύ λεπτά δοκίμια και μέχρι το πάχος A επικρατεί *επίπεδη εντατική κατάσταση* (plane stress). Σε πάχη μεταξύ A και B η εντατική κατάσταση είναι μικτή, ενώ σε πάχη μεγαλύτερα του B (εκεί που σταθεροποιείται η κρίσιμη τιμή του K_I) επικρατεί εντατική κατάσταση *επίπεδης παραμόρφωσης* (plane strain). Αυτή η σταθερή κρίσιμη τιμή του K_I είναι ιδιότητα του υλικού, ονομάζεται *δυσθραυστότητα* (fracture toughness) ή κρίσιμος παράγοντας έντασης

τάσεων σε επίπεδη παραμόρφωση και συμβολίζεται με το K_{Ic} . Αυτή ακριβώς είναι η ιδιότητα που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό κατασκευών για αντοχή σε θραύση και όπως βλέπουμε είναι μία μάλλον συντηρητική εκτίμηση της δυσθραυστότητας του υλικού.



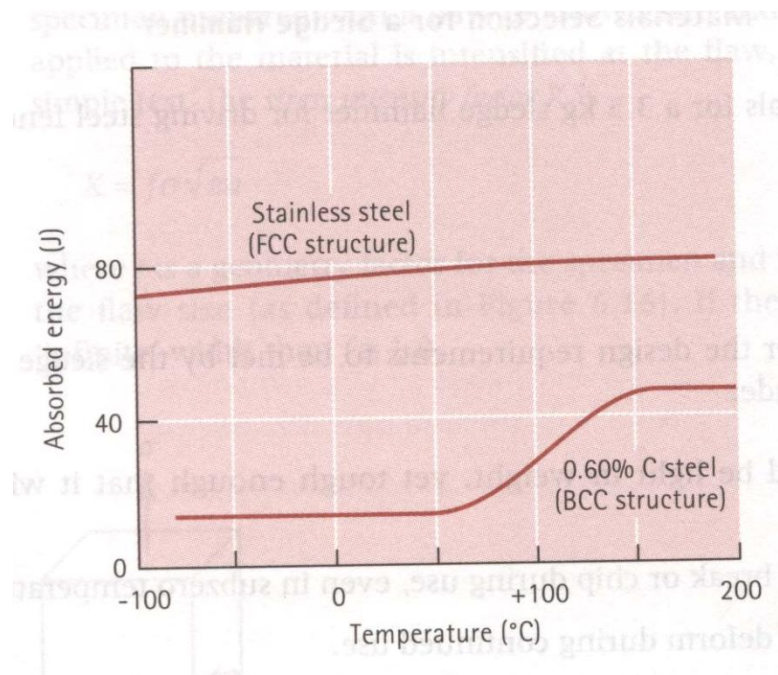
Εικόνα 4-11: Εξάρτηση του παράγοντα έντασης τάσεων από το πάχος του δοκιμίου

4.9 Εκτίμηση του K_{Ic} από Δοκιμή Κρούσης

Η *δοκιμή κρούσης* (impact test), στην οποία ένα δοκίμιο με προκατασκευασμένη εγκοπή σχήματος V (V-notch) χτυπιέται με ένα ειδικό σφυρί στη μηχανή κρούσης και μετριέται η ενέργεια που απορροφάται κατά την θραύση του δοκιμίου, είναι μία μηχανική δοκιμή πολύ πιο γρήγορη, απαιτεί λιγότερη προετοιμασία και γενικά παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία στην εκτέλεση. Έτσι λοιπόν, έχουν αναπτυχθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις, που προσπαθούν να δώσουν μία εκτίμηση του K_{Ic} του υλικού από αποτελέσματα δοκιμών κρούσης.

Δύο τυπικές καμπύλες από δοκιμή κρούσης φαίνονται στο διάγραμμα στην Εικόνα 4-12. Το διάγραμμα αυτό δείχνει την ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο κατά την

θραύση του, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται η δοκιμή κρούσης. Όσο χαμηλότερη είναι η ενέργεια που απορροφά το υλικό για να σπάσει τόσο πιο ψαθυρό είναι. Ορισμένα υλικά (π.χ. οστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες) παρουσιάζουν μία ομαλή καμπύλη, ενώ άλλα (π.χ. απλοί ανθρακοχάλυβες) παρουσιάζουν μία μετάβαση από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 4-12: Δύο τυπικές καμπύλες από δοκιμή κρούσης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να γίνει μία εκτίμηση του K_{Ic} ενός μεταλλικού υλικού από αποτελέσματα δοκιμών κρούσης, κάθε μία από τις οποίες ισχύει κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Για την κατάλληλη επιλογή και τα όρια ισχύος κάθε μεθόδου ο μηχανικός θα πρέπει πάντοτε να συμβουλευέται τις κατάλληλες προδιαγραφές (π.χ. API 579).

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία πλήρη καμπύλη κρούσης (δηλαδή σε διάφορες θερμοκρασίες) για έναν χάλυβα με 0,60% C, σαν αυτόν της Εικόνα 4-12, που εμφανίζει μετάβαση. Πρώτα πρέπει να καθορίσουμε την ενέργεια κρούσης, CVN, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Για να το κάνουμε αυτό χρησιμοποιούμε την εξής συνάρτηση:

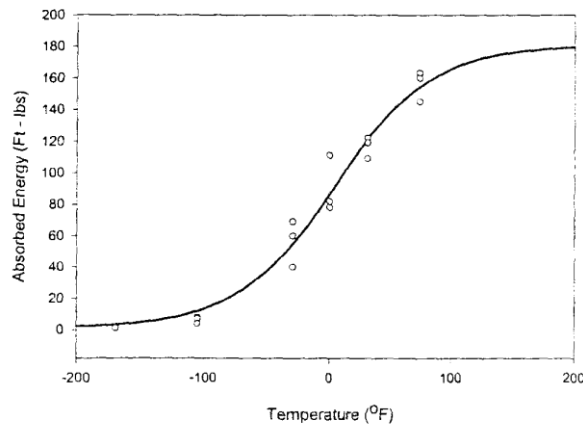
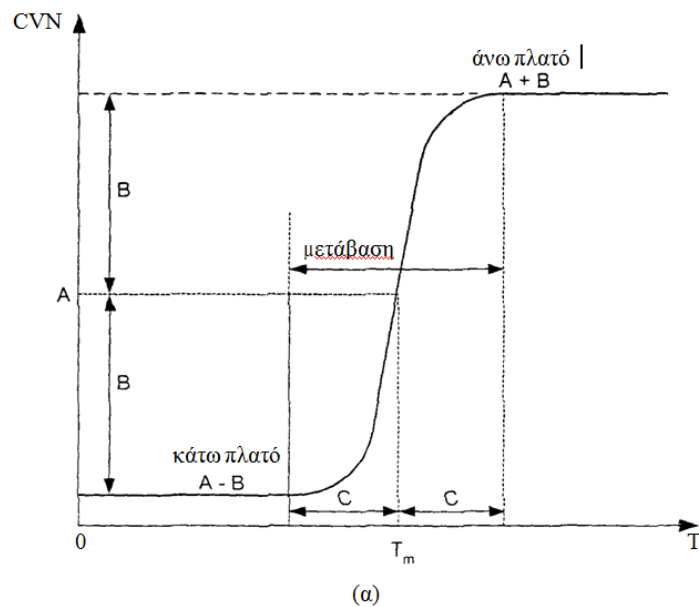
$$CVN = A + B \tanh\left[\frac{(T - D)}{C}\right]$$

όπου τα A, B, C και D είναι σταθερές, που καθορίζουμε προσαρμόζοντας την

καμπύλη που φαίνεται στην Εικόνα 4-13α στα υπάρχοντα αποτελέσματα από τις δοκιμές κρούσης του υλικού σε διάφορες θερμοκρασίες T. Μία τέτοια προσαρμογή καμπύλης (curve fitting) φαίνεται στην Εικόνα 4-13β. Τα σημεία του διαγράμματος στην Εικόνα 4-13β είναι τα αποτελέσματα των δοκιμών κρούσης που έχουμε κάνει, όπου κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος (T,CVN).

Στη συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε την δυσθραυστότητα K_{IC} με κάποια κατάλληλη εξίσωση. Μία τέτοια είναι η εξίσωση Rolfe – Novak:

$$K_{IC} = 8,47(CVN)^{0.63}$$



(β)

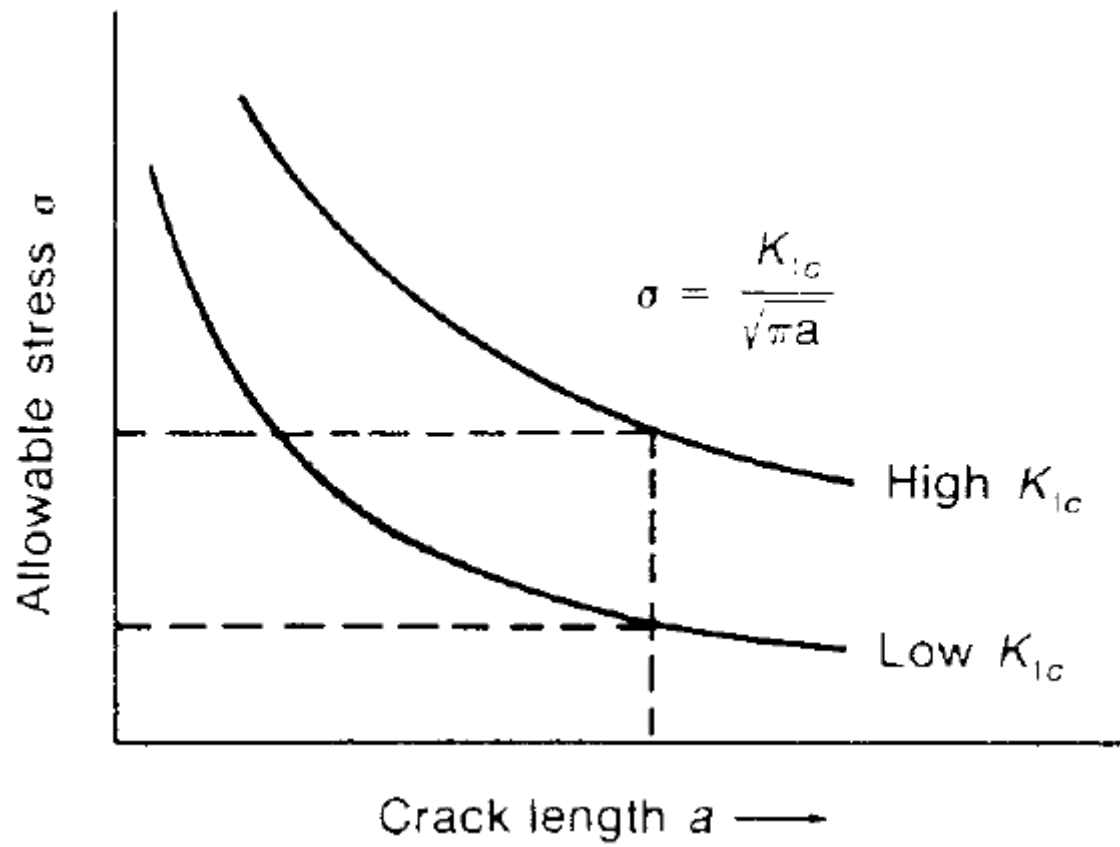
Εικόνα 4-13: (α) καμπύλη ποσδιορισμού των σταθερών A,B, C, D (β) καμπύτη προσαρμογής

4.10 Η Δυσθραυστότητα στο Σχεδιασμό Κατασκευών

Όπως είδαμε, μια σωστά καθορισμένη τιμή του K_{Ic} αντιπροσωπεύει την δυσθραυστότητα ενός υλικού, ανεξάρτητα από το μέγεθος των ρηγμάτων, την γεωμετρία και την εντατική κατάσταση του αντικειμένου. Τότε και μόνον τότε το K_{Ic} είναι ιδιότητα του υλικού, επειδή επηρεάζεται μόνο από τα χαρακτηριστικά του υλικού και όχι από άλλους παράγοντες. Η βασική σχέση που χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό κατασκευών με βάση την δυσθραυστότητα του υλικού είναι η $K = f \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$, η οποία ονομάζεται και *κριτήριο θραύσης*.

Η μορφή του κριτηρίου θραύσης δείχνει τον έμφυτο συμβιβασμό που χαρακτηρίζει τον σχεδιασμό κατασκευών στη θραυσεομηχανική. Εάν έχει επιλεγεί το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστεί ή κατασκευή μας, τότε το K_{Ic} είναι καθορισμένο. Επιπρόσθετα, εάν αποδεχτούμε ότι η κατασκευή μας περιέχει σταθερά ρήγματα, τότε με βάση το μεγαλύτερο από τα ρήγματα αυτά, υπολογίζουμε την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας (σ_{max}) από την $K = f \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}$, έτσι ώστε $f_{max} \cdot \sigma_{max} \sqrt{\pi \cdot a}^{1/2} < K_{Ic}$.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν έχουμε επιλέξει υλικό και σκοπός μιας είναι να κατασκευάσουμε μία κατασκευή, που πρόκειται να καταπονηθεί από συγκεκριμένη τάση (σ) κατά τη λειτουργία της. Τότε θα πρέπει να επιλέξουμε υλικό με τέτοια τιμή K_{Ic} , έτσι ώστε ακόμη και τα μεγαλύτερου μεγέθους προϋπάρχοντα ρήγματα να παραμείνουν σταθερά κατά τη λειτουργία. Εάν πάλι θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την τάση λειτουργίας, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι το υλικό μας δεν θα περιέχει ρήγματα μεγαλύτερα από ένα δεδομένο μέγεθος. Όλοι αυτοί οι συμβιβασμοί μεταξύ επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας, μεγέθους ρήματος και K_{Ic} φαίνονται στο διάγραμμα του στην Εικόνα 4-14. Όπως βλέπουμε, ένα υλικό με υψηλότερο K_{Ic} μπορεί να αντέξει με ασφάλεια υψηλότερη τάση λειτουργίας για δεδομένο μέγεθος ρήματος. Αντιστοίχως, για δεδομένη τάση λειτουργίας, ένα υλικό με υψηλότερο K_{Ic} μπορεί να λειτουργήσει με παρουσία μεγαλύτερου μεγέθους ρηγμάτων από ότι ένα υλικό με χαμηλότερο K_{Ic} .



Εικόνα 4-14: Όλοι αυτοί οι συμβιβασμοί μεταξύ επιτρεπόμενης τάσης λειτουργίας, μεγέθους ρήγματος και K_{Ic}

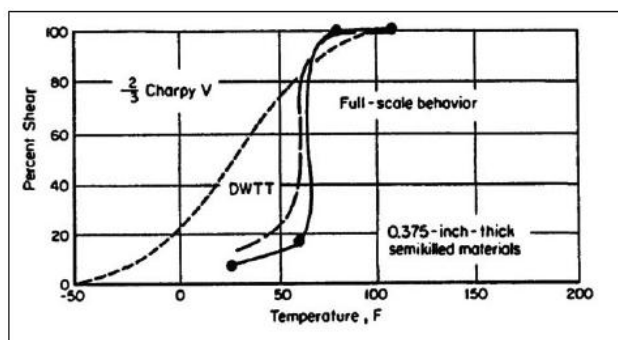
5 TRANSITION CURVE

5.1 Καμπύλη μετάβασης

Δοκιμές DWTT αλλά και impact σε μια κλίμακα θερμοκρασιών μας δίνουν την λεγόμενη transition curve. Σε χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση θα είναι ψαθυρή, η ενέργεια απορρόφησης θα είναι χαμηλή και η επιφάνεια θραύσης θα είναι 0% όλκιμη. Αυτό είναι το λεγόμενο χαμηλό ράφι. Σε υψηλές θερμοκρασίες η θραύση θα είναι όλκιμη, η ενέργεια απορρόφησης θα είναι μεγάλη και η επιφάνεια θραύσης θα είναι 100% όλκιμη. Αυτό είναι το λεγόμενο υψηλό ράφι. Ανάμεσα στο χαμηλό και το υψηλό ράφι υπάρχει μια μεταβατική περιοχή, στην οποία η ενέργεια απορρόφησης και η ολκιμότητα της επιφάνειας θραύσης μεγαλώνουν όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία μεταβολής από ψαθυρό σε όλκιμο είναι η θερμοκρασία στη οποία η επιφάνεια θραύσης αλλάζει από ψαθυροί σε όλκιμη. Αυτή η θερμοκρασία συνήθως καθορίζεται με αναφορά κάποιου ποσοστού όλκιμης επιφάνειας. Παραδείγματος χάριν η θερμοκρασία μετάβασης διάδοσης της θραύσης ορίζεται σε επιφάνεια θραύσης 85% όλκιμη.

Η Transition Curve για δοκιμές πλήρους κλίμακας είναι πολύ απότομη. Η αλλαγή από ψαθυρή σε όλκιμη θραύση γίνεται μέσα σε περίπου 17°C. Δύο εργαστηριακά tests βρέθηκαν να έχουν μεγάλο βαθμό συσχέτισης με τις δοκιμές πλήρους κλίμακας. Το Charpy V-notch(CVN) test και το DWTT. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα οι κλίμακες είναι ιδιαίτερα όμοιες. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα τεστ θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη δοκιμών πλήρους κλίμακας και όχι μόνο. Ειδικά η καμπύλη του DWTT για ποσοστά ολκιμότητας πάνω από 85% έρχεται σε απόλυτη ταύτιση με την καμπύλη πλήρους κλίμακας.



Εικόνα 5-1: Transition Curve

Επειδή τα δοκίμια του DWTT είναι δοκίμια πλήρους πάχους σε αντίθεση με τα δοκίμια CVN που είναι ανεξάρτητου πάχους, βρέθηκε ότι τα δοκίμια του DWTT δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα για το εξεταζόμενο πάχος.

Σύμφωνα με τα τεστ που έγιναν στο Battelle Memorial Institute η μορφές θραύσης που εμφανίζονται σε τεστ πλήρους κλίμακας μπορούν να συσχετιστούν με τις μορφές των επιφανειών θραύσης των δοκιμίων DWTT. Η θερμοκρασία μετάβασης διάδοσης της θραύσης, θα μπορούσε να προσδιοριστεί με τη μεταβολή της επιφάνειας θραύσης ενός δοκιμίου DWTT. Πλέον όλες οι προδιαγραφές παραγωγής σωλήνων αναφέρουν ότι το ελάχιστο ποσοστό όλκιμης επιφάνειας σε δοκιμή DWTT είναι το 85%.

5.2 ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ

Η δοκιμή κρούσης χρησιμοποιείται για να επιλέγονται υλικά που μεταβαίνουν απρόθυμα στην ψαθυρή περιοχή σχηματίζοντας καμπύλες θερμοκρασίας μετάβασης. Σκοπός είναι να επιλεγεί ένα υλικό που έχει μια ικανοποιητική δυσθραυστότητα όταν υπόκεινται σε έντονες καταπονήσεις.

Η καμπύλη θερμοκρασίας μετάβασης σε ένα μεγάλο φάσμα υλικών. Μεσαίας και χαμηλής αντοχής fcc μέταλλα και κυρίως hcp μέταλλα έχουν τόσο υψηλή δυσθραυστότητα ώστε η ψαθυρή θραύση δεν αποτελεί πρόβλημα εκτός εάν είναι σε ένα ιδιαίτερο χημικό περιβάλλον που προκαλούνται αντιδράσεις. Υψηλής αντοχής υλικά ($\sigma_0 > E/150$) έχουν τόσο μικρή δυσθραυστότητα που η ψαθυρή θραύση μπορεί να συμβεί σε ελάχιστες πιέσεις της ελαστικής περιοχής σε όλες τις θερμοκρασίες και στους ρυθμούς παραμόρφωσης όταν έχουμε ατέλειες. Υψηλής αντοχής χάλυβας, αλουμίνιο και τιτάνιο κράματα ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Στις χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση προκύπτει με όλκιμα cleavage, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες η θραύση προκύπτει με χαμηλής ενέργειας σπασίματα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η ανάλυση της μηχανικής θραύσης είναι χρήσιμη και απαραίτητη. Η δυσθραυστότητα σε χαμηλής και μεσαίας αντοχής bcc μετάλλων, όπως το Βηρύλλιο(Be), ο Ψευδάργυρος(Zn) και κεραμικά υλικά εξαρτώνται ιδιαίτερα από τη θερμοκρασία. Στις χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση προκύπτει με cleavage ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες η θραύση προκύπτει με όλκιμα σπασίματα. Συνεπώς, υπάρχει μια μετάβαση από ψαθυρό σε όλκιμο καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Στα μέταλλα αυτή η μετάβαση συμβαίνει στο 0.1 στο 0.2 στην απόλυτη θερμοκρασία τήξης T_m , ενώ στα κεραμικά η μετάβαση πραγματοποιείται περίπου στο 0.5-0.7 T_m .

Προφανώς όσο πιο χαμηλή είναι η θερμοκρασία μετάβασης, τόσο μεγαλύτερη η δυσθραυστότητα του υλικού. Το πιο συντηρητικό κριτήριο για τη θερμοκρασία μετάβασης είναι να επιλέξεις την T_1 , σε αντιστοιχία με την μέγιστη ενέργεια θραύσης και την θερμοκρασία στην οποία η θραύση είναι 100% ινώδης(0% cleavage). Αυτό το κριτήριο θερμοκρασίας μετάβασης ονομάζεται fracture transition plastic(FTP). Η FTP είναι η θερμοκρασία στην οποία η θραύση αλλάζει από τελείως όλκιμη σε αρκετά ψαθυρή. Πιθανότατα η ψαθυρή θραύση είναι ανεπαίσθητα πάνω από την FTP.

Η χρήση της FTP είναι πολύ συντηρητική και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να μην είναι πρακτική. Ένα αυθαίρετο, αλλά λιγότερο συντηρητικό κριτήριο είναι να βασιστεί την θερμοκρασία μετάβασης σε 50% cleavage-50% διατμητικών αποσχίσεων (shear), T_2 . Αυτό ονομάζεται fracture-appearance transition temperature(FATT). Ακόμη ένα καλό κριτήριο είναι να βασιστεί η θερμοκρασία μετάβασης εκεί που η θραύση γίνεται 100% cleavage T_2 . Αυτό το σημείο είναι γνωστό ως nil ductility temperature (NDT). Η NDT είναι η θερμοκρασία στην οποία η θραύση δεν επιδέχεται περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση. Κάτω από την NDT η πιθανότητα για όλκιμη θραύση είναι αμελητέα.

5.3 ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ

Αλλαγές στην θερμοκρασία μετάβασης σε βαθμούς πάνω από 50⁰C μπορούν να παραχθούν από αλλαγές στη χημική σύνθεση ή στη μικροδομή μαλακού χάλυβα. Οι μεγαλύτερες αλλαγές στην θερμοκρασία μετάβασης οφείλονται στις αλλαγές της ποσότητας του άνθρακα και του μαγγανίου. Ο φώσφορος έχει, επίσης, ισχυρή επίδραση στο να αυξάνει την θερμοκρασία μετάβασης.

Η δυσθραυστότητα επηρεάζεται ιδιαίτερα από το οξυγόνο. Για υψηλής καθαρότητας σίδηρο έχει βρεθεί ότι το οξυγόνο περιέχει πάνω από 0.003% περικρυσταλλική θραύση και αντίστοιχη απορρόφηση. Όταν το οξυγόνο που περιέχεται αυξηθεί απο 0.001% στην υψηλή τιμή 0.057%, η θερμοκρασία μετάβασης θα αυξηθεί από τους -15⁰C στους 340⁰C. Μελετώντας αυτά τα αποτελέσματα, δεν αποτελεί έκπληξη ότι η αποξείδωση έχει μια σημαντική επίδραση στην θερμοκρασία μετάβασης. Χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε οξείδια(trimmed steel), γενικά δείχνου μια θερμοκρασία μετάβασης πάνω από την θερμοκρασία δωματίου. Χάλυβες που είναι αποξείδωμένοι με πυρίτιο(semikilled steel), έχουν χαμηλή θερμοκρασία μετάβασης, ενώ για τους χάλυβες γεμάτους με πυρίτιο και αλουμίνιο η θερμοκρασία μετάβασης θα είναι γύρω στους -60⁰C.

Το μέγεθος των κόκκων έχει, επίσης, ισχυρή επίδραση στην θερμοκρασία μετάβασης. Μια μείωση στην διάμετρο των κόκκων μπορεί σε ένα μαλακό χάλυβα να προκαλέσει την μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης κατά 16°C . Σε κράματα χάλυβα που έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία, έχει παρατηρηθεί ότι η μειώνοντας το μέγεθος των κόκκων του οστενίτη μειώνεται και η θερμοκρασία μετάβασης. Πολλοί από τους μεταβλητές που αφορούν την επεξεργασία μαλακών χαλύβων επηρεάζουν το μέγεθος των κόκκων του φερρίτη (ferrite grain size) και αυτό επηρεάζει την θερμοκρασία μετάβασης. Από την ομαλοποίηση μετά την θερμή έλαση καταλήγουν στην βελτίωση των κόκκων, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης. Ο ρυθμός της ψύξης από την ομαλοποίηση και την αποξείδωση είναι μεταβλητές που επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ψύξη με τον αέρα (air cooling) και η αποξείωση του αλουμινίου έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης. Η ψύξη με ψεκασμό (spray cooling) μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία μέχρι και 50°C .

Για μια γνωστή χημική σύνθεση και αποξείδωση, η θερμοκρασία μετάβασης θα είναι αισθητά υψηλότερη σε ένα παχί δοκίμιο σε σύγκριση με ένα λεπτό. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία να επιτυγχάνεται ομοιόμορφος περλίτης και μέγεθος κόκκων σε ένα παχί δοκίμιο. Γενικά, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτό ισχύει για πάχη άνω των 12mm.

Χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορούν να παρουσιάσουν δυο είδη φαινομένων που μπορούν να προκαλέσουν την αύξηση της θερμοκρασίας μετάβασης.

1. Quench aging, προκαλείται από κατακρήμνιση σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα που έχουν εμβαπτιστεί περίπου στους 700°C .
2. Strain aging, συμβαίνει σε χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα που έχει στερεοποιηθεί με πίεση (cold-working). Μόνο με cold-working θερμοκρασία μετάβασης μπορεί να αυξηθεί γύρω στους 25°C με 30°C .

5.4 DROP-WEIGHT TEAR TEST

Η χρήση του DWTT είναι αποτέλεσμα της ανάγκης να χρησιμοποιηθούν δοκίμια μεγαλύτερα και με μεγαλύτερο πάχος. Η βασική αιτία για την δημιουργία μεγαλύτερων δοκιμίων είναι η ανικανότητα να γίνει η θραύση σε μικρά εργαστηριακά δοκίμια με τάσεις κάτω από την τάση διαρροής.

Η πρώτη εξέλιξη ήταν ένα τεστ δημιουργίας ρωγμής με έκρηξη (explosion-crack-starter test) που παρουσίασε μια μικρή ψαθυρή επιφάνεια τοποθετημένη στην επιφάνεια ενός

δοκιμίου χάλυβα με διαστάσεις 350 x 350 x25 mm. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε ένα κυκλικό μηχάνημα και 'φορτώθηκε' με μια ποσότητα εκρηκτικών που πυροδοτήθηκαν ταυτόχρονα. Οι δοκιμές συνεχίστηκαν σε διάφορες θερμοκρασίες και η εμφάνιση της θραύσης όρισε τις διάφορες θερμοκρασίες μετάβασης. Κάτω από την NDT η θραύση είναι ελαστική κατά μήκος όλου του δοκιμίου. Η θερμοκρασία κατά την οποία ξ θραύση παύει να είναι ελαστική ονομάζεται fracture transition elastic (FTE). Η θερμοκρασία πάνω από την οποία συμβαίνει αυτή η πλήρης ολκιμότητα ονομάζεται fracture transition plastic (FTP).

Το drop weight tear test(DWTT) αναπτύχθηκε ειδικά για τον προσδιορισμό της NDT σε δοκίμια μορφής πλάκας πλήρους πάχους . Στην επιφάνεια του δοκιμίου μορφής πλάκας αποτίθεται μια μικρού μήκους ραφή ψαθυρής συγκόλλησης. Μια μικρή εγκοπή δημιουργείται στην ραφή συγκόλλησης και το δείγμα στηρίζεται ως απλή δοκός σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας. Η ψαθυρή ραφή συγκόλλησης θραύεται σε κοντινά στην τάση διαρροής φορτία, ως αποτέλεσμα δυναμικής φόρτισης από πτώση βάρους. Ένα βαρύ μπλοκ από χυτοσίδηρο, σίδηρο ή χάλυβα, με μια ομαλή, επίπεδη κορυφή στην οποία τα μέταλλα διαμορφώνονται από τη σφυρηλάτηση, περιορίζει την παραμόρφωση του δοκιμίου .Δεδομένου ότι το δείγμα είναι μεγάλου ανοίγματος δοκός φορτισμένη σε τρία σημεία καμψής, η τάση στην εφελκούμενη ζώνη του δοκιμίου μορφής πλάκας, δεν υπερβαίνει την τάση διαρροής. Αν η αρχική ρωγμάτωση διαδοθεί κατά το πλάτος του δοκιμίου από την εφελκούμενη ζώνη προς τα άκρα, η θερμοκρασία δοκιμής είναι κάτω της NDT. Δεν απαιτείται πλήρης διαχωρισμός του δείγματος στην θλιβόμενη ζώνη. Η NDT είναι η υψηλότερη θερμοκρασία κατά την οποία δεν παρουσιάζεται όλκιμη θραύση. Η δοκιμή είναι εύκολα επαναλήψιμη και η NDT μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια 5°C .

Η δοκιμή dynamic tear test(DT)(πρώιμη εκδοχή αυτού του test είναι το DWTT) είναι αποτέλεσμα της δοκιμής κρούσης.. Ενώ τα δοκίμια είχα πάχος 15 και 25 mm, με την δοκιμή DWTT έχουν γίνει δοκίμια με πάχος μέχρι και 30 mm. Για την δοκιμή κρούσης τα δοκίμια για την θραύση τοποθετούνται σε ένα μηχάνημα με ένα εκκρεμές, το οποίο μετράει την ενέργεια απορρόφησης κατά την θραύση. Η μέγιστη ενέργεια για ένα μηχάνημα δοκιμής κρούσης που μπορεί να καταγράψει είναι 330 J, ενώ για το DWTT είναι 14 J.

6 ΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή

Οι χάλυβες είναι από τα παλαιότερα μέταλλα και η πατρότητά τους αποδίδεται σε ένα μυθικό λαό, με το ίδιο όνομα που κατοικούσε στον Εύξεινο πόντο. Οι Αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν σε μεγάλο βαθμό χάλυβες, κυρίως για την κατασκευή όπλων, ενώ ιστορικές πηγές αναφέρουν ότι μέθοδοι εξόρυξης και κατεργασίας του σιδήρου εφαρμόζονται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Όμως η παραγωγή χάλυβα σε μεγάλη κλίμακα αναπτύχθηκε τον περασμένο αιώνα, κυρίως στα χρόνια της βιομηχανικής επανάστασης.

Από τους χάλυβες, το 90% περίπου καταλαμβάνουν κράματα σιδήρου (Fe) - άνθρακα (C), ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αποτελούν οι ελαφρά και ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες, οι ανοξείδωτοι χάλυβες και οι εργαλειοχάλυβες.

Ο άνθρακας αποτελεί το αποτελεσματικότερο και ταυτόχρονα το φθηνότερο στοιχείο κραμάτωσης του σιδήρου επιφέροντας σημαντική σκλήρυνσή του. Στους χάλυβες συναντώνται περιεκτικότητες σε άνθρακα από 0,008% κ.β. (κατά βάρος) έως και 2,1% κ.β. , σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στους χάλυβες εκτός του άνθρακα εισέρχονται και άλλα στοιχεία ή προσθήκες. Αυτά προστίθενται με σκοπό τη βελτίωση μερικών ιδιοτήτων του χάλυβα ή μπορεί να προέρχονται από τις ακαθαρσίες των υλικών κατασκευής του χάλυβα. Οι εμπειροχόμενες προσθήκες στο χάλυβα αντιδρούν με το σίδηρο, με τον άνθρακα και μεταξύ τους μεταβάλλοντας τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του.

Από την άποψη της χημικής σύστασης οι χάλυβες διαιρούνται σε :

- ανθρακοχάλυβες
- κραματωμένοι χάλυβες

Στους ανθρακοχάλυβες το κύριο συστατικό είναι ο άνθρακας. Το μαγγάνιο (Mn) και το πυρίτιο (Si) στις κανονικές ποσότητες που περιέχονται στους χάλυβες δεν ασκούν βασική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες και προστίθενται κυρίως από μεταλλουργικές άποψης. Επιπλέον ως ακαθαρσίες εμφανίζονται το θείο (S) και ο φώσφορος (P). Οι κραματωμένοι χάλυβες διαιρούνται σε μαγγανιούχους, μαγγανιούχους - χρωμιούχους κ.α.

Επίδραση των στοιχείων προσθήκης στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα

Άνθρακας (C): Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, τόσο αυξάνεται η αντοχή θραύσης και η σκληρότητά του ενώ μειώνεται η σχετική επιμήκυνση και η δυσθραυστότητα (ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν τη θραύση του, π.χ. ψαθυρά ή όλκιμα υλικά). Χάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα συγκολλούνται εύκολα, ενώ με μεγαλύτερη περιεκτικότητα δύσκολα ή καθόλου.

Μαγγάνιο (Mn): Έχει αποξειδωτική δράση μειώνοντας την επιβλαβή επίδραση του πυριτίου (Si) και του θείου (S) και βελτιώνοντας την συγκολλητότητα των χαλύβων.

Πυρίτιο (Si): Χρησιμοποιείται ως αποξειδωτικό στοιχείο (0,03- 0,35%) κατά την παρασκευή του χάλυβα. Αυξάνει την αντοχή και την ελαστικότητα των χαλύβων. Σε μεγαλύτερες ποσότητες επιδρά δυσμενώς στην συγκολλητότητα των χαλύβων.

Νικέλιο (Ni): Αυξάνει την εμβαπτότητα (ευκολία με την οποία βάφεται ο χάλυβας) και την αντιδιαβρωτική του ικανότητα. Αυξάνει όμως την τάση για δημιουργία ρηγματώσεων κατά τη συγκόλληση.

Χρώμιο (Cr): Αυξάνει την αντοχή στη διάβρωση, τη σκληρότητα και την εμβαπτότητα του χάλυβα (κατασκευή εργαλείων κοπής).

Χαλκός (Cu): Σε ποσοστό μέχρι 0,3% δε δυσκολεύει τη συγκόλληση, ενώ αυξάνει την αντοχή και την αντίσταση στη διάβρωση.

Θείο (S): Είναι επιβλαβής ακαθαρσία από την άποψη της συγκόλλησης η οποία εμφανίζεται σε όλες τις κατηγορίες των χαλύβων. Αυξάνει την τάση για ρηγμάτωση εν θερμώ και για το λόγο αυτό πρέπει να περιορίζεται στο 0,05%. Στα σύρματα συγκόλλησης επιτρέπεται η περιεκτικότητα του θείου μέχρι 0,034%.

Φώσφορος (P): Είναι επιβλαβής ακαθαρσία και αποτελεί αιτία ρηγματώσεων σε περιοχές όπου εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό.

6.2 Χαρακτηριστικά πρώτης ύλης

6.2.1 Χημική σύσταση

Ελάσματα χάλυβα σε μορφή ρολών (τσέρκια) αποτελούν την πρώτη ύλη για την κατασκευή σωλήνων στη ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ. Για την επίτευξη των απαιτούμενων αντοχών στις δοκιμές που πραγματοποιούνται στην εταιρεία, ο χρησιμοποιούμενος χάλυβας πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Υψηλή καθαρότητα. Εγκλείσματα και ακαθαρσίες τα οποία προέρχονται από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα μειώνουν την απορροφούμενη ενέργεια στη δοκιμή δυσθραυστότητας (Charpy test) και δημιουργούν πόρους έγκλισης αέριου υδρογόνου.
- Τα ελάσματα του χάλυβα πρέπει να χαρακτηρίζονται από ομοιομορφία των κόκκων και ομοιογένεια χωρίς μεγάλες διαφορές στη σκληρότητα. Σωστή επιλογή της σύστασης του χάλυβα και προσεκτικός έλεγχος της διαδικασίας χύτευσης οδηγούν στην εξάλειψη του φαινομένου των κατακρημνισμάτων στο κέντρο του ελάσματος. Η ομοιομορφία της δομής επιτυγχάνεται από τον προσεκτικό έλεγχο της διαδικασίας της έλασης και των επιβαλλόμενων θερμοκρασιών.

Μια τυπική σύσταση του χάλυβα που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σωλήνων με διαστάσεις (508 x15,9) mm και ποιότητας X65 είναι η εξής :

Στοιχείο	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Nb	Ca	CEV
%	0,045	0,15	0,95	0,015	0,0012	0,21	0,04	0,3	0,044	0,0025	0,25
				MAX	MAX						

Τα χαμηλά επίπεδα στη περιεκτικότητα του άνθρακα είναι επιθυμητά για την ελαχιστοποίηση της τάσης σχηματισμού μαρτενσιτικής δομής και την μείωση του επιβλαβούς φαινομένου που προκαλείται από τη μαρτενσίτη και από άλλα μικρογραφικά συστατικά που μετασχηματίζονται σε χαμηλές θερμοκρασίες.

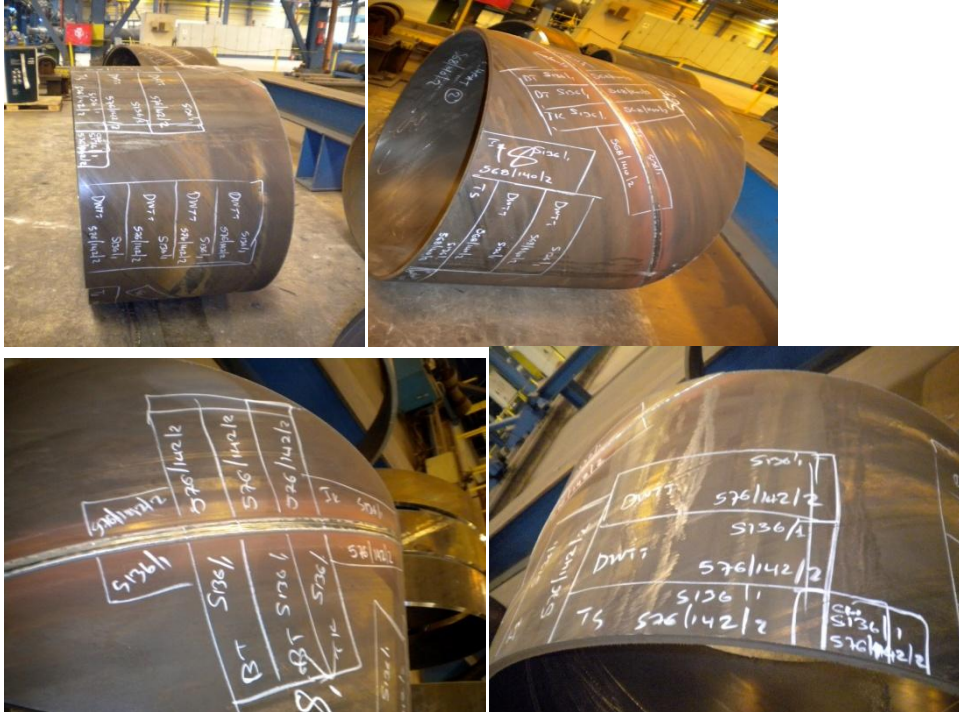
Μερικοί κατασκευαστές προσθέτουν βανάδιο (V) ή/και μολυβδαίνιο (Mo) με σκοπό την παραγωγή χάλυβα ποιότητας X70 σε μεγαλύτερες διαμέτρους (>323 mm). Οι συστάσεις αυτές περιέχουν χαμηλό ποσοστό ισοδύναμου άνθρακα (περίπου 0,30), γεγονός που καθιστά τους χάλυβες εύκολα συγκολλησίμους.

Οι οδηγίες που χρησιμοποιούνται στα ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. βασίζονται στα πρότυπα API Recommended Practice 5L3 και EN 10274.

Σε περιπτώσεις που αναφέρεται στην Εντολή Παραγωγής η πραγματοποίηση της δοκιμής Drop Weight Tear Test (DWTT), τότε αυτή εκτελείται σύμφωνα με το περιεχόμενο της οδηγίας εργασίας (working instruction). Η θερμοκρασία δοκιμής και τα όρια αποδοχής του Shear Area θα γίνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη. Επιπλέον, η

συχνότητα της δειγματοληψίας γίνεται ανάλογα με τις προδιαγραφές του πελάτη και για τις εσωτερικές δοκιμές ανάλογα με την παραγωγή.

Κοπή δοκιμίων



Εικόνα 6-1: Σημάδεμα στεφάνι σωλήνων για κοπή δοκιμίων

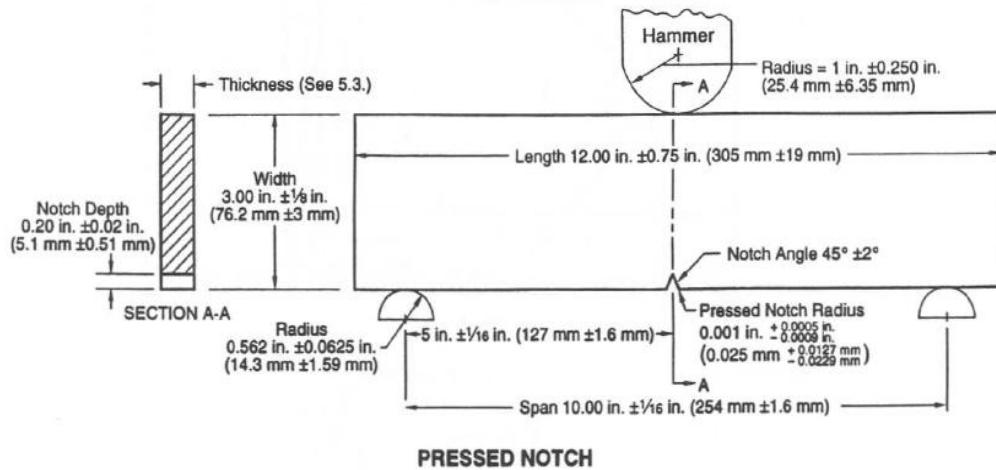


Εικόνα 6-2: Στεφάνι σωλήνα μετά την κοπή δοκιμίων

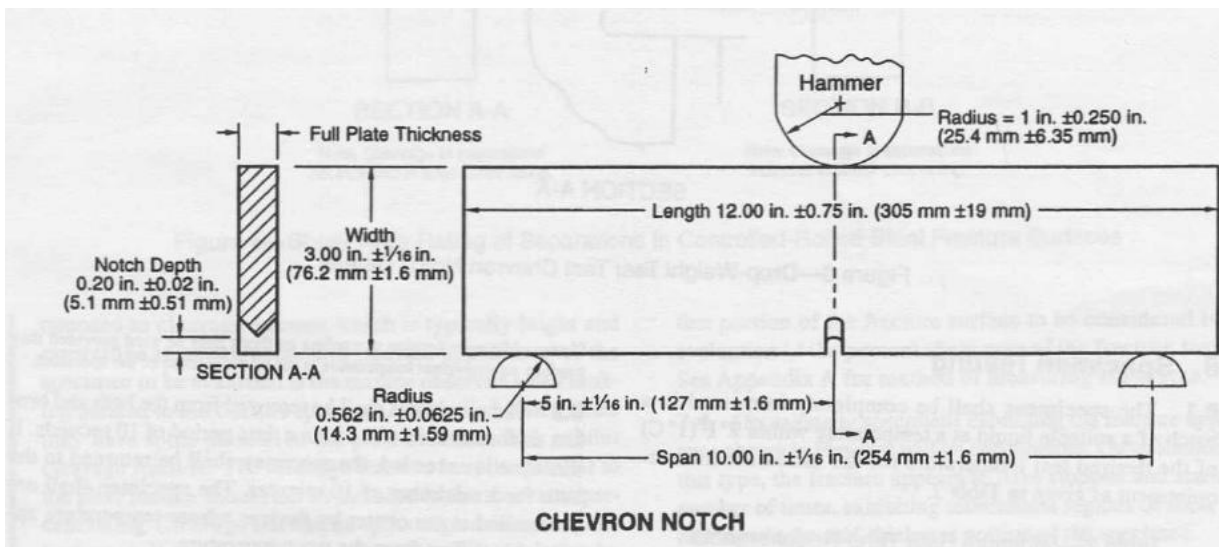
Προετοιμασία δοκιμίων

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής χρησιμοποιούνται επιπεδωμένα δοκίμια εκτός από την περίπτωση όπου ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος είναι μικρότερος από 40. Σ' αυτή την περίπτωση το κέντρο του δοκιμίου (25 mm έως 50 mm) μπορεί να παραμείνει με την καμπυλότητα του σωλήνα.

Στα δοκίμια δημιουργείτε ένα τεχνικό σφάλμα (χαραγή) στο καθένα. Χρησιμοποιούνται δυο τύποι χαραγής (pressed και chevron) τα γεωμετρικά σχήματα των οποίων φαίνονται παρακάτω.



PRESSED NOTCH



CHEVRON NOTCH

Εικόνα 6-3: Διαστάσεις δοκιμών DWTT και υποδοχέων

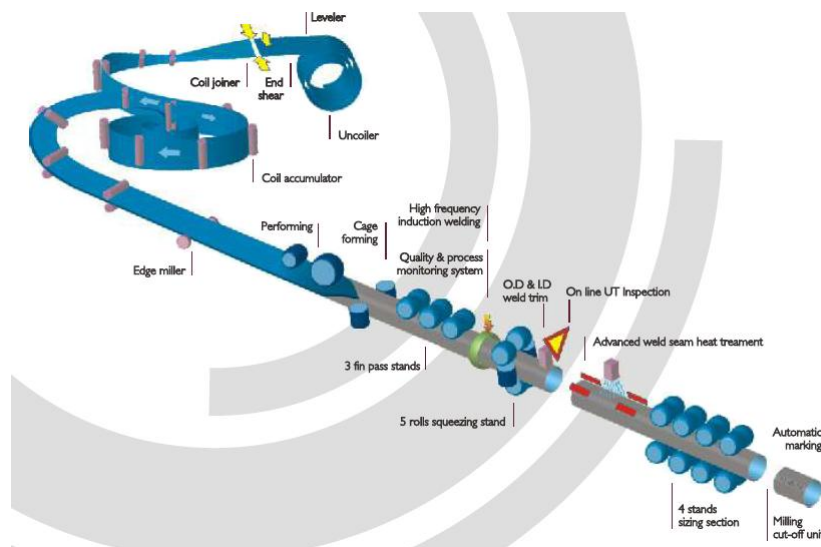
Στη χαραγή τύπου pressed 'π्रेसάρεται' το υλικό και προτιμάται σε χαμηλής ανθεκτικότητας χάλυβες. Ενώ, στη χαραγή τύπου chevron αφαιρείται ένα μέρος του υλικού και προτιμάται σε υψηλής αντοχής χάλυβες, όπου και εκμηδενίζει την υπερβολική ενέργεια έναρξης θραύσης που συχνά οδηγεί σε ακύρωση της δοκιμής.

6.2.2 Τρόποι παραγωγής

6.2.2.1 Μονάδα Ευθείας Ραφής, 26’’

6.2.2.1.1 Σύντομη Περιγραφή

Ο σωλήνας υψίσυχνης συγκόλλησης HFI (High Frequency welding) κατασκευάζεται έλασμα σε σχήμα ρολού (τσέρκι). Αφού εκτυλιχθεί, το επίπεδο έλασμα ξακρίζεται σε σταθερό πλάτος από μία μηχανή φρεζαρίσματος άκρων. Κατόπιν το έλασμα λαμβάνει σταδιακά στρογγυλό σχήμα από ράουλα διαμόρφωσης, τα οποία καταλήγουν πριν από τη συγκόλληση στην τελική διάμετρο του σωλήνα. Στο τελικό βήμα της από διαμόρφωσης οι άκρες του ελάσματος συγκλίνουν προς το σημείο συγκόλλησης.



Εικόνα 6-4: Μονάδα ευθείας ραφής

Η διαδικασία υψίσυχνης συγκόλλησης χρησιμοποιεί πίεση και θερμότητα προκειμένου να ενώσει τις άκρες του ελάσματος που σχηματίζουν ανοικτή ραφή, χωρίς την προσθήκη μετάλλου πλήρωσης. Καθώς πλησιάζουν οι άκρες του ελάσματος σε σχήμα V, παρέχεται γύρω από τον σωλήνα ρεύμα υψηλής συχνότητας από ένα επαγωγικό πηνίο. Το ρεύμα συγκεντρώνεται κατά μήκος των άκρων του V θερμαίνοντάς το μέσω ηλεκτρικής αντίστασης, ώστε να σχηματιστεί η συγκόλληση καθώς οι κύλινδροι συμπίεσης κλείνουν τον σωλήνα. Τα εξωτερικά και εσωτερικά καπάκια τήγματος συγκόλλησης -που σχηματίζονται λόγω πίεσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης- αφαιρούνται ενώ το υλικό είναι ακόμη ζεστό. Μια συσκευή συνεχούς ελέγχου με υπέρηχους, τοποθετημένη ακριβώς μετά το σημείο συγκόλλησης, ελέγχει συνεχώς την ποιότητα της συγκόλλησης.

Η υψίσυχη συγκόλληση υποβάλλεται στην συνέχεια σε θερμική κατεργασία προκειμένου να επαναφερθεί η δομή του χάλυβα στη ζώνη αυτή. Η γραμμή θερμικής κατεργασίας αποτελείται από δύο στάδια επαγωγικής θέρμανσης, με ένα ενδιάμεσο στάδιο ψύξης με νερό.

Η ακριβής εξωτερική διάμετρος δίνεται στον σωλήνα με την τελική ψυχρή διαμόρφωση. Η ίδια γραμμή διαμόρφωσης μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή τετράγωνων ή ορθογώνιων κοίλων δοκών με ψυχρή κατεργασία. Ο σωλήνας κόβεται τελικά στο καθορισμένο μήκος από ένα κινητό μηχάνημα κοπής.

Μετά τη διαμόρφωση των άκρων, ο σωλήνας προωθείται στη γραμμή επιθεώρησης. Κάθε σωλήνας ελέγχεται υδροστατικά σύμφωνα με τα εφαρμοζόμενα πρότυπα και στη συνέχεια υποβάλλεται σε μη καταστροφικό έλεγχο με υπέρηχους της συγκόλλησης και του σώματος του. Στο τελικό στάδιο, όλοι οι σωλήνες επιθεωρούνται για έλεγχο συμμόρφωσής τους με τις εκάστοτε διαστασιακές απαιτήσεις, ενώ επίσης διενεργείται οπτικός έλεγχος της εσωτερικής και εξωτερικής επιφάνειας κάθε σωλήνα.

Η διαδικασία παραγωγής και επιθεώρησης παρακολουθείται πλήρως από υπολογιστικό σύστημα περισυλλογής ποιοτικών δεδομένων, με τερματικά εισόδου κατά μήκος όλης της γραμμής. Κανένας σωλήνας δεν γίνεται αποδεκτός αν δεν διασταυρωθεί η συμμόρφωση όλων των δεδομένων που σχετίζονται με την παραγωγή και την ποιότητα με τις εφαρμοζόμενες προδιαγραφές.

6.2.2.1.2 Πλεονεκτήματα

Οι σωλήνες υψίσυχνης συγκόλλησης συχνότητας (HFI) έχουν επιτυχή παρουσία, εδώ και πολλά χρόνια, σε απαιτητικές εφαρμογές της ενεργειακής βιομηχανίας. Ορισμένα από τα οφέλη που προέρχονται από την επιλογή των σωλήνων HFI είναι:

- **Αξιόπιστη προμήθεια:** Η υψηλή παραγωγικότητα της διαδικασίας HFI εξασφαλίζει αξιοπιστία και ευελιξία στους χρόνους παράδοσης.
- **Ποιότητα συγκόλλησης:** Ο τελευταίος τεχνολογικός εξοπλισμός παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου εξασφαλίζει συγκολλήσεις με ιδιότητες που ικανοποιούν και τα πιο απαιτητικά πρότυπα ποιότητας.
- **Ομοιομορφία πάχους:** Η χρήση χάλυβα θερμής έλασης διασφαλίζει μικρές ανοχές πάχους τοιχώματος για όλη την περιφέρεια του σωλήνα.

- **Γρήγορη εργοταξιακή κατασκευή:** Η συμμόρφωση των σωλήνων με τις αυστηρότερες ανοχές διαστάσεων διασφαλίζει ευκολία στο ταίριασμα των άκρων και βέλτιστη on-site συγκολλησιμότητα.

6.2.2.2 Μονάδα Ελικοειδούς Ραφής, 100’’

6.2.2.2.1 Σύντομη Περιγραφή

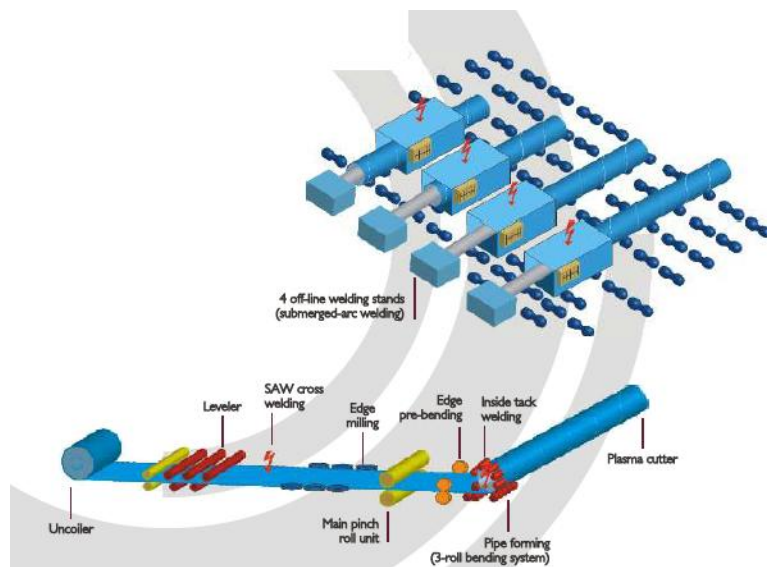
Η διαδικασία δύο βημάτων για την κατασκευή σωλήνα ελικοειδούς ραφής βυθισμένου τόξου (SAWH) αποτελείται από δύο ξεχωριστές εργασίες: διαμόρφωση σωλήνα/συνεχής προ-συγκόλληση (tack welding) και διπλή συγκόλληση εμβαπτιζόμενου τόξου. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται χαλύβδινο έλασμα θερμής έλασης διαμορφωμένο σε ρολά. Αφού εκτυλιχθεί, το χαλύβδινο έλασμα φρεζάρεται στο επιθυμητό πλάτος και οι άκρες μορφοποιούνται σε διπλό V, για να δώσουν τις συγκολλησιμες άκρες. Πριν από την εισαγωγή του στον κλωβό διαμόρφωσης, τα άκρα του ελάσματος κάμπτονται ελαφρά στη μηχανή προ-διαμόρφωσης.

Η διαμόρφωση του σωλήνα γίνεται από σύστημα κάμψης τριών σημείων (three-roll bending). Η διάμετρος του παραγόμενου σωλήνα εξαρτάται από τη γωνία ελίκωσης. Οι συγκλίνουσες άκρες του ελάσματος ενώνονται με μια συνεχή προ-συγκόλληση (Tack-welding) υπό ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου (Gas Metal Arc Weld). Οι παράμετροι διαμόρφωσης και συγκόλλησης παρακολουθούνται συνεχώς από συστήματα ελεγχόμενα με υπολογιστή, ενώ η κεφαλή της συγκόλλησης καθοδηγείται από σύστημα ανίχνευσης με λέιζερ. Στη συνέχεια μια κινητή διάταξη κοπής με πλάσμα κόβει το σωλήνα στο επιθυμητό μήκος.

Κατόπιν ο ήδη διαμορφωμένος σωλήνας προωθείται στο δεύτερο κατασκευαστικό βήμα, στη διπλή συγκόλληση βυθισμένου τόξου (DSAW). Στο βήμα αυτό ο σωλήνας συγκολλάται εξωτερικά και εσωτερικά με εμβαπτιζόμενο τόξο (SAW), τήκοντας την αρχική προ-συγκόλληση (Tack weld), έτσι ώστε αυτή να ενσωματωθεί στην τελική συγκόλληση. Σε ένα προγενέστερο στάδιο, στο κάθε άκρο του σωλήνα προσαρτώνται πλάκες έναρξης - τέλους της συγκόλλησης για τη διασφάλιση της σταθεροποίησης των παραμέτρων συγκόλλησης, οι οποίες συνεχώς παρακολουθούνται, ελέγχονται και καταγράφονται αυτόματα καθ’ όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η πλήρης ευθυγράμμιση της εσωτερικής και εξωτερικής συγκόλλησης διασφαλίζεται από αντίστοιχα συστήματα ανίχνευσης με λέιζερ.

Αφού συγκολληθεί, ο σωλήνας προωθείται στους σταθμούς ελέγχου. Ο κάθε σωλήνας δοκιμάζεται υδροστατικά σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα και στη συνέχεια υποβάλλεται σε Μη Καταστρεπτικό Έλεγχο με υπερήχους επί της ραφής συγκόλλησης και επί του σώματος του σωλήνα. Επιπλέον διενεργείται ραδιογραφικός έλεγχος της συγκόλλησης σε κάθε άκρο του σωλήνα καθώς και σε τυχόν σημεία που επιδιορθώθηκαν με συγκόλληση. Αφού προετοιμαστούν τα άκρα του σωλήνα, όλοι οι σωλήνες υποβάλλονται σε τελικό έλεγχο, για να εξακριβωθεί η συμμόρφωσή τους με τις απαιτήσεις των διαστάσεων και διενεργείται οπτικός έλεγχος των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών.

Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής και ελέγχων παρακολουθείται από ένα κεντρικό σύστημα συγκέντρωσης δεδομένων το οποίο αποτελείται από τερματικούς σταθμούς (υπολογιστές) σε κάθε σταθμό εργασίας. Η τελική αποδέσμευση κάθε σωλήνα πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που όλα τα δεδομένα κατά την παραγωγική διαδικασία και τους ελέγχους ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμοζόμενων προδιαγραφών.



Εικόνα 6-5: Μονάδα ελικοειδούς ραφής

6.2.2.2.2 Πλεονεκτήματα

Οι σωλήνες με ελικοειδή συγκόλληση εμβαπτίζομενου τόξου (SAWH, Hellical Submerged Arc Welded) έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως στην ενεργειακή βιομηχανία με επιτυχία, εδώ και πολλά χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, οι σωλήνες SSAW που κατασκευάζονται με τη μέθοδο "Two - Step" κερδίζουν διαρκώς μερίδιο αγοράς, από ότι

οι εναλλακτικές τεχνολογίες (σωλήνες UOE, σωλήνες on-line SAW) κυρίως εξαιτίας των προηγμένων τεχνικών χαρακτηριστικών τους:

- **Ευελιξία:** Η διάμετρος του παραγόμενου σωλήνα μπορεί να μεταβληθεί εύκολα προσαρμόζοντας ανάλογα τη γωνία ελίκωσης του ελάσματος. Αυτό δεν εξασφαλίζει μόνο οφέλη σε σχέση με την έγκαιρη παράδοση εντός στενών χρονικών πλαισίων, αλλά και επιτρέπει την παραγωγή σωλήνων μη τυποποιημένης διαμέτρου.
- **Χαμηλό κόστος εγκατάστασης αγωγού:** Παράγονται σωλήνες μήκους έως και 18 m, γεγονός που οδηγεί σε επωφελή μείωση του αριθμού των περιφερειακών συγκολλήσεων που απαιτούνται για την κατασκευή του αγωγού.
- **Χαμηλότερο κόστος παραγωγής:** Το χαμηλότερο κόστος προκύπτει από το μειωμένο κόστος Α' ύλης (HRC έναντι plate), το χαμηλότερο κόστος παραγωγής και τις μικρότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες.
- **Υψηλότερη παραγωγικότητα:** Ο μεγαλύτερος ρυθμός παραγωγής της διαδικασίας "Two - Step" εξασφαλίζει άμεση παράδοση προϊόντων εντός στενών χρονικών πλαισίων.
- **Διαστασιολογικά χαρακτηριστικά και ποιότητα συγκόλλησης ανώτερου επιπέδου:** Τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά βελτιστοποιούνται κατά το στάδιο της διαμόρφωση του σωλήνα, ενώ στο επόμενο στάδιο της συγκόλλησης του σωλήνα βελτιστοποιούνται οι παράμετροι της συγκόλλησης, χωρίς το ένα στάδιο να επηρεάζει το άλλο αρνητικά.

7 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

7.1 Απόκριση βρόχου υστέρησης σε δείγματα χάλυβα Σωληνουργείας Κορίνθου α.ε.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η απόκριση και μεταβολή του βρόχου υστέρησης ως συνάρτηση υπομηδενικών θερμοκρασιών και του ποσοστού ολκιμότητας σε δείγματα χάλυβα Σωληνουργείας.

Η διαδικασία περιλαμβάνει δύο ομάδες πειραματικών μετρήσεων:

- Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών και στη συνέχεια εύρεση του ποσοστού ολκιμότητας μετά τη μέθοδο DWTT .
- Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών συμπεριλαμβανομένης και της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη σε ψαθυρή θραύση σε δείγματα τα οποία η ολκιμότητα είχε προσδιοριστεί με τη μέθοδο DWTT .

Στην πρώτη ομάδα πειραματικών μετρήσεων τα δείγματα ήταν λεπτότερα σε σύγκριση με τα δείγματα της δεύτερης ομάδας.

7.2 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των μαγνητικών δοκιμών σε χάλυβες της Σωληνουργείας Κορίνθου χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός υστερησιογράφος του εργαστηρίου Μεταλλωγνωσίας. Η διάταξη αυτή πρέπει να είναι σε θέση να μετρά βρόχους μαγνητικής υστέρησης σε πεδίο συχνότητας από dc έως και 10 Hz, με τιμές πεδίου από 10 A/m έως και 10 kA/m. Η διάταξη παράγει συγκριτικές μετρήσεις καθώς δεν έχει βαθμονομηθεί με τη βοήθεια υλικών αναφοράς γνωστών και πιστοποιημένων ιδιοτήτων. Η βαθμονόμηση σχετίζεται με την διεργαστηριακή σύγκριση βρόχων υστέρησης υλικών με γνωστά χαρακτηριστικά. Οι συγκριτικές μετρήσεις χωρίς την βαθμονόμηση της συσκευής είναι από μόνες τους πολύ σημαντικές και δεν εμποδίζουν την ανάπτυξη και χρήση ενός συστήματος μαγνητικών μετρήσεων, ακόμη και με την χρήση τεχνικών κανονικοποίησης.

Η διάταξη στηρίζεται στην αρχή του κλειστού μαγνητικού κυκλώματος, όπου το πηνίο λήψης είναι τυλιγμένο γύρω από το προς μέτρηση υλικό ενώ η διέγερση επιβάλλεται από πηνίο που περιβάλλει είτε το ίδιο το προς μέτρηση δείγμα. Έτσι το πεδίο επιβάλλεται απευθείας πάνω στο δείγμα, με τον πυρήνα (yoke) να αποτελεί απλά το υλικό σύζευξης

του μαγνητικού κυκλώματος, ο έλεγχος της τιμής του επιβαλλόμενου πεδίου στο υλικό είναι πιο ακριβής, διότι το εισαγόμενο λάθος αφορά μόνο στην ελαφρά διαφοροποίηση του συντελεστή απομαγνήτισης. Ακόμη, η κυματομορφή του πεδίου διέγερσης ως προς το χρόνο ελέγχεται με ακρίβεια (ημιτονοειδής) και δεν παραμορφώνεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνήτη.

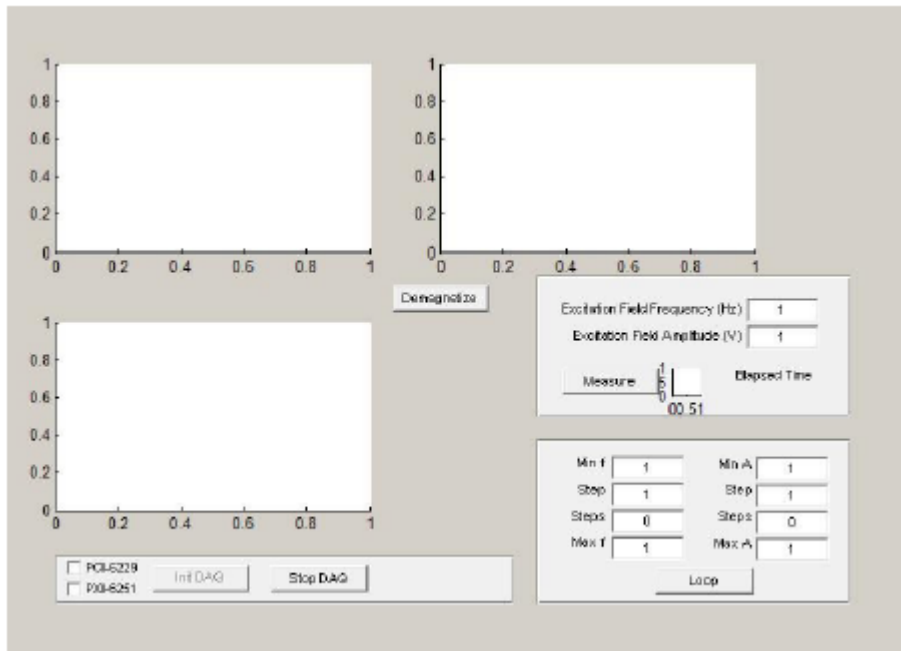
Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από:

- το υπό δοκιμή υλικό και ένα ηλεκτρομαγνητικό πυρήνα σε σχήμα Π που κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα και
- πηνία διέγερσης και λήψης τα οποία είναι τοποθετημένα στον άξονα του υπό δοκιμή υλικού

Το ηλεκτρονικό μέρος της διάταξης περιλαμβάνει τα παρακάτω συστήματα που ελέγχονται από ηλεκτρονικό υπολογιστή:

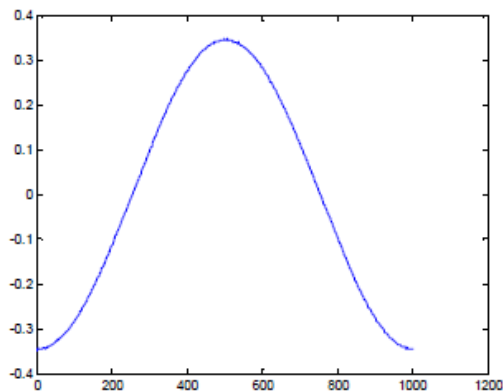
- Σύστημα PXI της NI με κάρτα συλλογής δεδομένων (DAQ) μέσω της οποίας δημιουργείται το αρχικό σήμα διέγερσης (ημιτονοειδές), ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται τα σήματα από τα πηνία λήψης και την ενισχυμένη διέγερση. Το σύστημα PXI διαθέτει και κάρτα μέτρησης αντίστασης-χωρητικότητας-επαγωγής (LCR meter).
- Διπολικό τροφοδοτικό ισχύος- ενισχυτή σήματος και διέγερσης ρεύματος με χαρακτηριστικά $\pm 70V$, $\pm 6A$ της Kerco
- Lock-in amplifier

Η διέγερση και η λήψη επιτυγχάνεται μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο αποκλειστικά σε περιβάλλον Matlab για τον συγκεκριμένο είδος μετρήσεων. Η πλατφόρμα αλληλεπίδρασης με το σύστημα μετρήσεων βρόχου υστέρησης μέσω του λογισμικού απεικονίζεται στην Εικόνα 7-1.



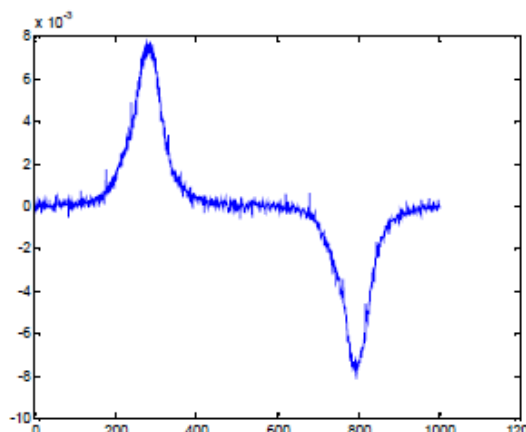
Εικόνα 7-1: Πλατφόρμα μετρήσεων του λογισμικού

Το σήμα διέγερσης (Εικόνα 7-2) δημιουργείται μέσω συνάρτησης από το Matlab με δυνατότητα επιλογής των επιθυμητών τιμών του πλάτους και της συχνότητας (από τον χρήστη) ενώ ταυτόχρονα καθορίζονται και τα χαρακτηριστικά (αριθμός σημείων, χρόνος ενεργοποίησης της σκανδάλης κλπ) παραγωγής του σήματος από την κάρτα.

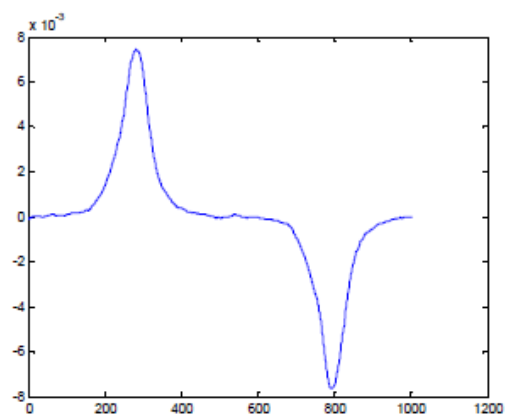


Εικόνα 7-2: Σήμα διέγερσης

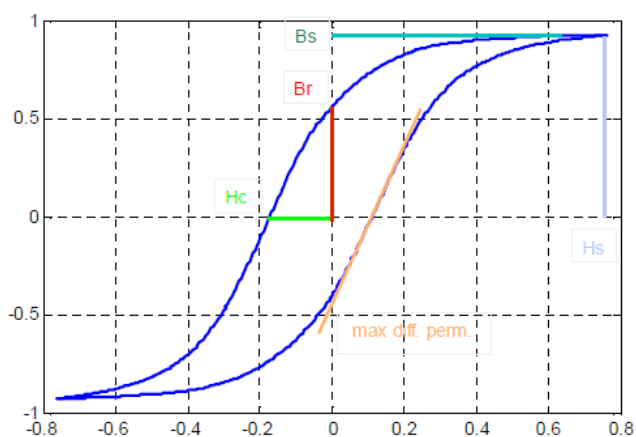
Από την κάρτα το σήμα οδηγείται σε ενισχυτή ρεύματος που τροφοδοτεί με τη σειρά του το πηνίο διέγερσης ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται ένα δεύτερο πηνίο που δρα ως βαθυπερατό φίλτρο. Το σήμα από το πηνίο λήψης (της τάξης των mV) λαμβάνεται από την κάρτα απευθείας ή μετά από προενίσχυση μικρού κέρδους (Εικόνα 7-3). Από την κάρτα λαμβάνονται, επίσης και τα σήματα του ρεύματος διέγερσης. Με τη χρήση του Matlab πραγματοποιούνται το ψηφιακό υπερπερατό φιλτράρισμα των σημάτων (Εικόνα 7-34) και ο προσδιορισμός του βρόχου υστέρησης (Εικόνα 7-5).



Εικόνα 7-3: Σήμα λήψης



Εικόνα 7-4: Σήμα λήψης μετά από ψηφιακό ηλεκτρονικό φιλτράρισμα



Εικόνα 7-5: Βρόχος υστέρησης

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

Η παρακολούθηση του πειράματος γίνεται μέσω των τριών γραφημάτων που σχηματίζονται σε κάθε προκαθορισμένη περίοδο και αποτυπώνουν μακροσκοπικά τα τρία σήματα: της διέγερσης, της λήψης και τον προκύπτοντα βρόχο υστέρησης.

Από τον τελικό βρόχο υστέρησης (Εικόνα 7-5) προσδιορίζονται και οι παράμετροι των οποίων η μεταβολή διαφοροποιείται και πληροφορεί για την κατάσταση του υπό μελέτη υλικού.

7.3 Πειραματική διαδικασία

Τα δείγματα ευθείας ραφής τοποθετούνται αρχικά εντός του πηνίου λήψεως ενώ παράλληλά γεμίζουμε το λουτρό με πετρελαιο αιθέρα. Στη συνέχεια η διάταξης πηνίο – δείγμα τοποθετείται μέσα στο λουτρό. Η θερμοκρασία δοκιμής πρέπει να διατηρείται με ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ εντός της προκαθορισμένης τιμής. Αυτό πετυχαίνεται με την συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας με τη βοήθεια θερμόμετρου που τοποθετείτε μέσα στο λουτρό ώστε να ελέγχει συνεχώς την θερμοκρασία. Όποτε παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας προσθέεται από τον χειριστή CO_2 σε μορφή πάγου ώστε να διατηρείται η απαιτούμενη θερμοκρασία.

Συνθήκες δοκιμής

Τα δοκίμια πρέπει να διατηρηθούν στη θερμοκρασία $\pm 2^{\circ}\text{F}$ (1°C) για έναν ελάχιστο χρόνο όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Στα ΣΩΛΗΝΟΥΡΓΕΙΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ Α.Ε. η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μπορούν να φτάσουν τα δοκίμια ώστε να γίνει η δοκιμή DWTT είναι -78°C . Η διατήρηση των δοκιμίων πρέπει να γίνεται με πλήρη βύθιση τους σε λουτρό ψυκτικού μέσου. Το ψυκτικό που χρησιμοποιείται είναι πετρελαϊκός αιθέρας (υγρής μορφής) και διοξείδιο του άνθρακα (αέριας μορφής). Επιπλέον, οι επιφάνειες των δοκιμίων πρέπει να απέχουν από τον πυθμένα, τα πλαϊνά του θαλάμου ψύξης και μεταξύ τους τουλάχιστον 25 mm ή απόσταση ίση με το πάχος τοιχώματος (όποιο είναι μεγαλύτερο).

Η θερμοκρασία δοκιμής πρέπει να διατηρείται με ακρίβεια $\pm 1^{\circ}\text{C}$ εντός της προκαθορισμένης τιμής.

Πίνακας 7-1: Προσδιορισμός χρόνου αναμονής δείγματος εντός του λουτρού

ΠΑΧΟΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ API 5L3 min	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ EN 10274 min
Μικρότερο των 12,7 mm	15	15min ή 30sec/mm πάχος (ο αυστηρότερος χρόνος)
Από 12,7 mm έως 25,4 mm	20	
Άνω των 25,4 mm	45	



Τα πηνία είναι συνδεδεμένα με τη διάταξη που θα μετρήσει το βρόχο υστέρησης.



Εικόνα 7-6: Πειραματική διάταξη

Η απαιτούμενη ενέργεια θραύσης δοκιμίου DWTT υπολογίζεται με βάση την απαιτούμενη ενέργεια θραύσης δοκιμίου CVN.

Η ταχύτητα πτώσης του σφυριού κατά την κρούση, πρέπει να είναι μεταξύ 5 και 9 m/sec. Το δοκίμιο πρέπει να είναι συμμετρικά τοποθετημένο πάνω στη βάση στήριξης και το κέντρο της χαραγής να μην αποκλίνει περισσότερο από 1,59 mm από τον άξονα του σφυριού.

Το δοκίμιο πρέπει να θραυτεί εντός 10 sec από τη στιγμή που βγαίνει από το λουτρό διατήρησης της θερμοκρασίας (στην αντίθετη περίπτωση επανατοποθετείται στο λουτρό για επιπλέον 10 min).

Το δοκίμιο πρέπει να θραυτεί σε μια και μόνο κρούση. Η ακτίνα καμπυλότητας των υποδοχέων του δοκιμίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15,9 mm. Μεγαλύτερη ακτίνα έχει διαπιστωθεί ότι οδηγεί σε μπλοκάρισμα του δοκιμίου.



Εικόνα 7-7: Μηχάνημα δοκιμής DWTT

7.4 Ομάδες πειραματικών μετρήσεων

7.4.1 Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών και στη συνέχεια εύρεση του ποσοστού ολκιμότητας μετά τη μέθοδο DWTT .

7.4.1.1 Εξαγωγή Βρόχων Υστέρησης

Δείγματα που είχαν διαστάσεις 24’’ χ 0,375’’ (609,6 mm x 9,52 mm) τοποθετήθηκαν μέσα στο λουτρό και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η θραύση τους στο DWTT.

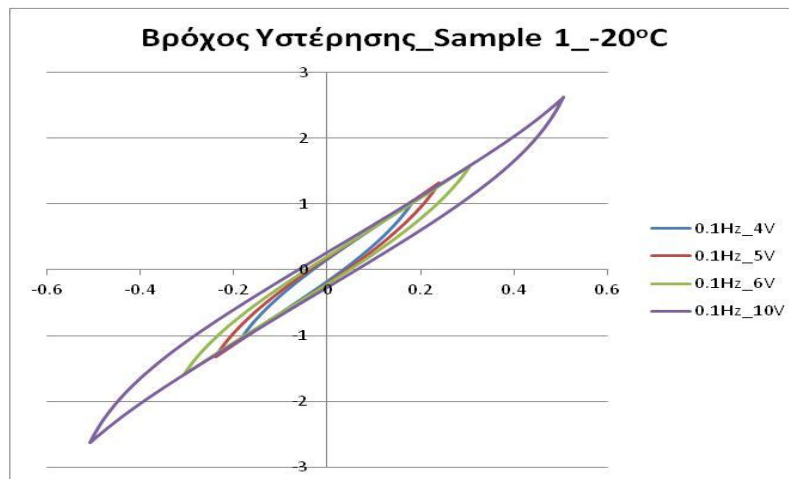
Οι παράμετροι των μετρήσεων που έγιναν στα δοκίμια ήταν η θερμοκρασία του λουτρού, η συχνότητα διέγερσης στο πηνίο λήψης και η τάση διέγερσης. Οι τιμές της θερμοκρασίας ήταν -20, -30, -40, -60° C, της συχνότητας 0.1 Hz και 0.5 Hz και της τάση από 4 μέχρι 10 V (Πίνακας). Από τους βρόχους υστέρησης που προέκυψαν μελετήσαμε τα εξής στοιχεία: μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r), συνεκτικό πεδίο (H_c), εμβαδό βρόχου (W) .

Πίνακας 7-2: Παράμετροι των μετρήσεων

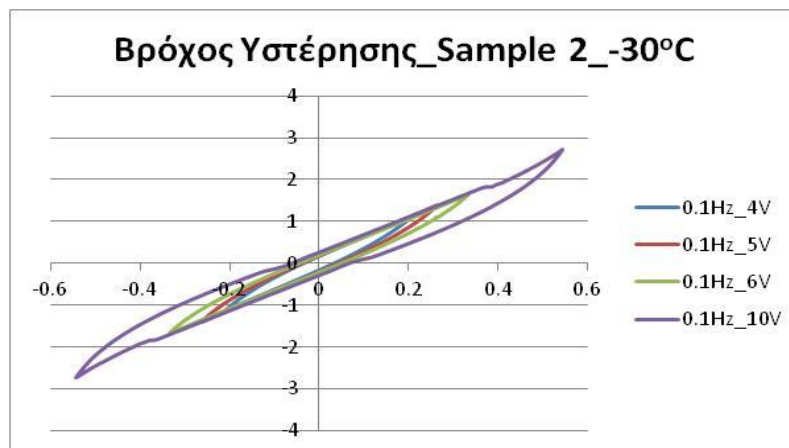
Θερμοκρασία (°C)	-20	-30	-40	-60
Συχνότητες	0,1Hz και 0,5Hz	0,1Hz και 0,5Hz	0,1Hz και 0,5Hz	0,1Hz και 0,5Hz
Τάση	4V – 10V	4V – 10V	4V – 10V	4V – 10V

Οι βρόχοι που προέκυψαν μεταβάλλοντας μόνο την παράμετρο της τάσης διέγερσης (εύρος τάσεων 4V-10V) και διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους της θερμοκρασίας και της συχνότητας παρουσιάζονται στα σχήματα 7-1 – 7-4 .

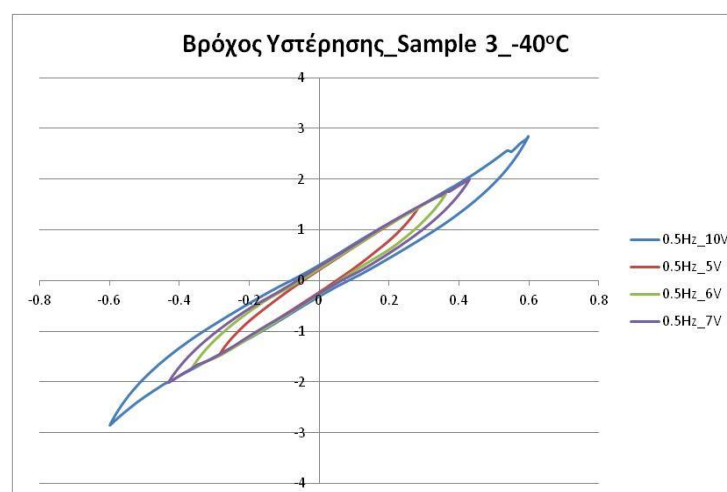
Σχήμα 7-1: Βρόχος υστέρησης στους -20°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$



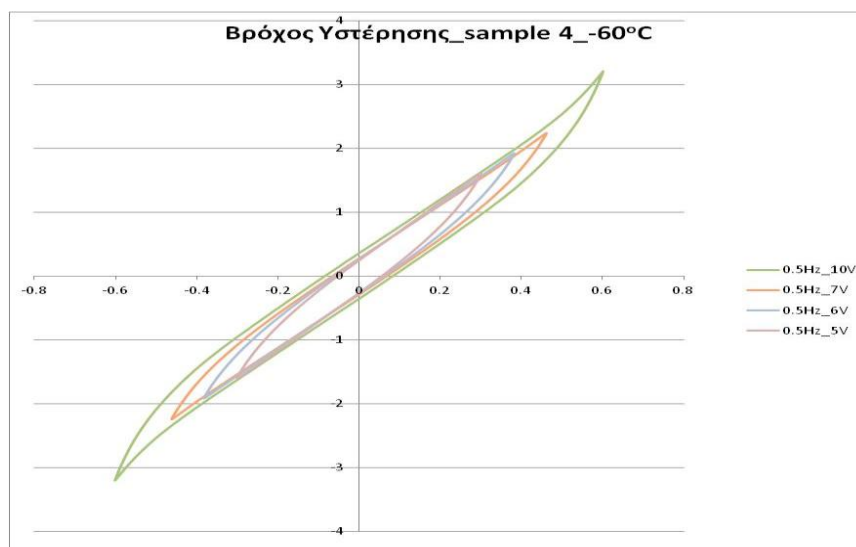
Σχήμα 7-2: Βρόχος υστέρησης στους -30°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$



Σχήμα 7-3: Βρόχος υστέρησης στους -40°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$



Σχήμα 7-4: Βρόχος υστέρησης στους -60°C για $0,1\text{Hz}$ και $V=(4,5,6,10)\text{V}$



Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνουμε την τάση διέγερσης από τα 4V στα 10V οι τιμές της μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), της παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r), του συνεκτικού πεδίου (H_c) και του εμβαδού του βρόχου (W) αυξάνονται. Οι βρόχοι δηλαδή επιμηκύνονται (αύξηση της μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s)) και αυξάνεται και το πλάτος τους (αύξηση του του συνεκτικού πεδίου (H_c)) με αποτέλεσμα το συνολικό εμβαδό του βρόχου να αυξάνεται. Καθώς αυξάνεται η τάση διέγερσης αυξάνεται και η ενέργεια που δίδεται στα μαγνητικά δίπολα ώστε να προσανατολιστούν στο εφαρμοζόμενο εξωτερικά μαγνητικό πεδίο με ταυτόχρονη κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων. Η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων παρεμποδίζεται όμως από τις εσωτερικές ατέλειες και διαταραχές του υλικού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις υπομηδενικές θερμοκρασίες που γίνεται η μέτρηση η πτώση της θερμοκρασίας "παγώνει" την κίνηση των διαταραχών.

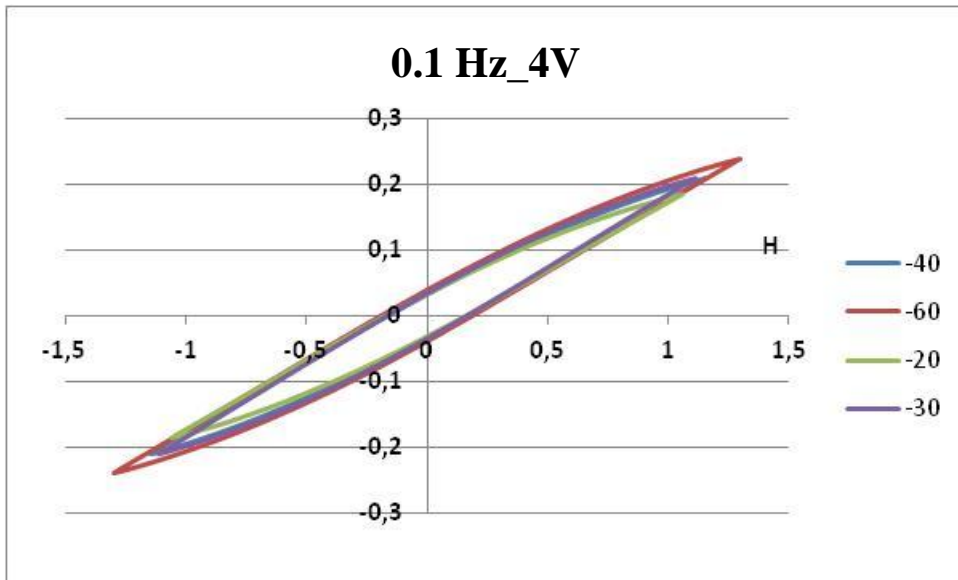
Παρακάτω θα εξετάσουμε αναλυτικότερα τους βρόχους υστέρησης στις θερμοκρασίες $-20, -30, -40$ και -60°C με συχνότητα $0,1\text{ Hz}$ και τάση 4V . Θα αναλύσουμε τα τρία βασικά σημεία του βρόχου: μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r), συνεκτικό πεδίο (H_c), εμβαδό βρόχου (W).

Πίνακας 7-3: Παράμετροι των μετρήσεων

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	-20	-30	-40	-60
Συχνότητες	0,1Hz	0,1Hz	0,1Hz	0,1Hz
Τάση	4V	4V	4V	4V

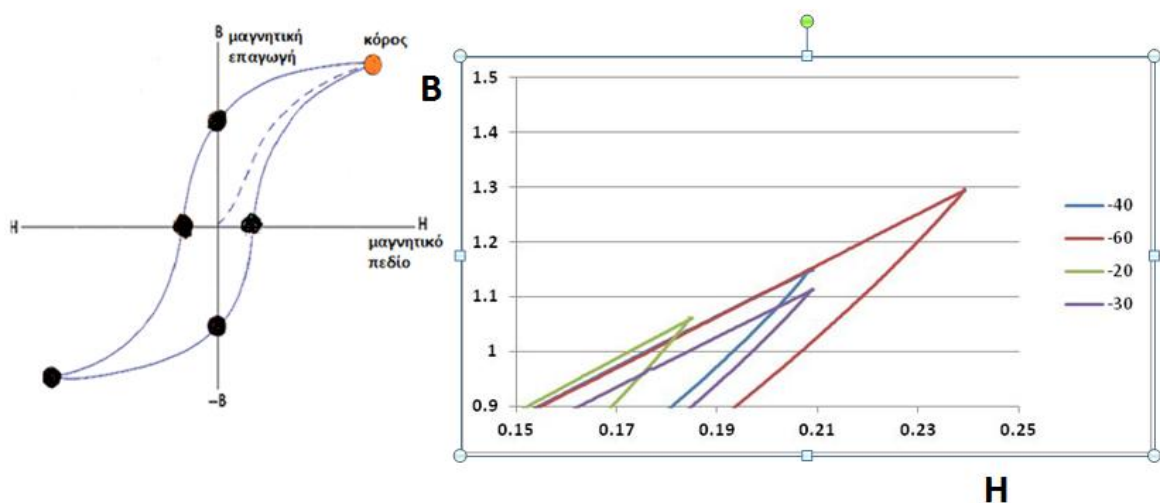
Οι βρόχοι όπως αυτοί προέκυψαν για τις διάφορες θερμοκρασίες φαίνονται στην εικόνα . να σημειωθεί ότι η επιλογή της τιμής της συχνότητας 0,1Hz μειώνει το επιδερμικό φαινόμενο που θα ενίσχυε τις απώλειες του βρόχου υστέρησης.

Σχήμα 7-5: Βρόχοι υστέρησης στους -20,-30,-40, -60°C για 0,1Hz και V= 4V

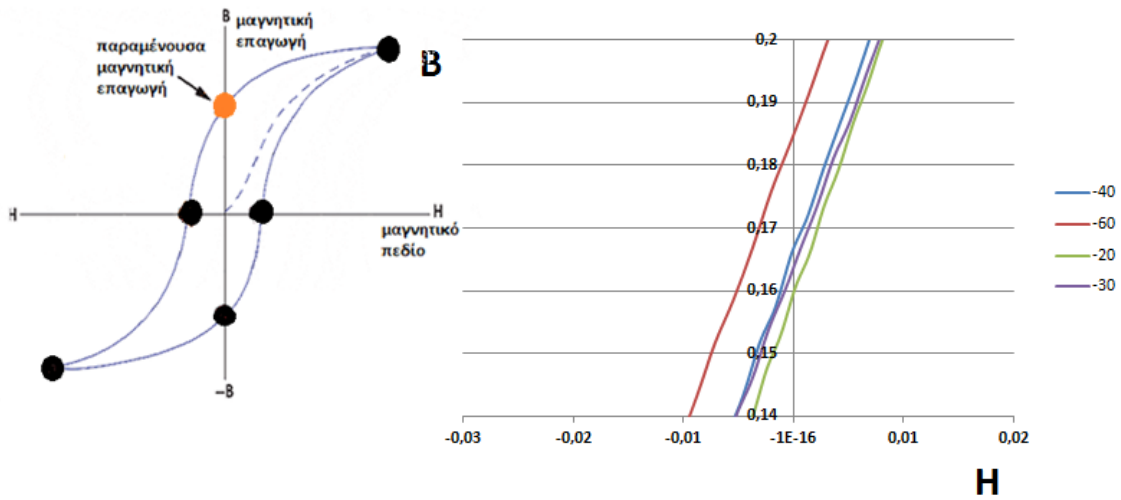


Μια γενική παρατήρηση είναι ότι με την πτώση της θερμοκρασίας επιμηκύνονται (αύξηση της μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s)) και αυξάνεται και το πλάτος τους (αύξηση του του συνεκτικού πεδίου (H_c)) με αποτέλεσμα το συνολικό εμβαδό του βρόχου να αυξάνεται. Για να μελετήσουμε καλύτερα τα μεγέθη που προκύπτουν από τους βρόχους αλλάζουμε την κλίμακα στους άξονες όπως φαίνεται στα σχήματα 7-6 – 7-8 .

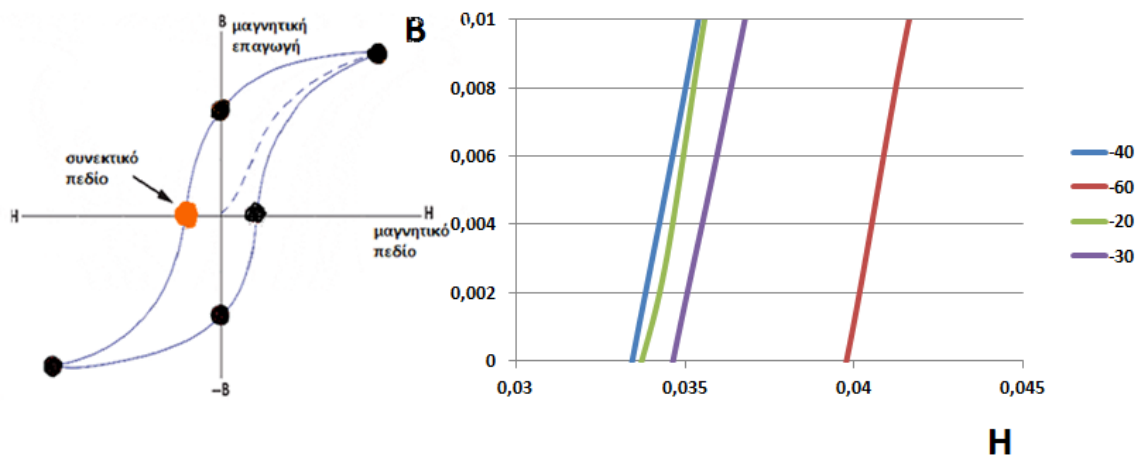
Σχήμα 7-6: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους -20,-30,-40, -60°C για 0,1Hz και V= 4V



Σχήμα 7-7: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V=4\text{V}$

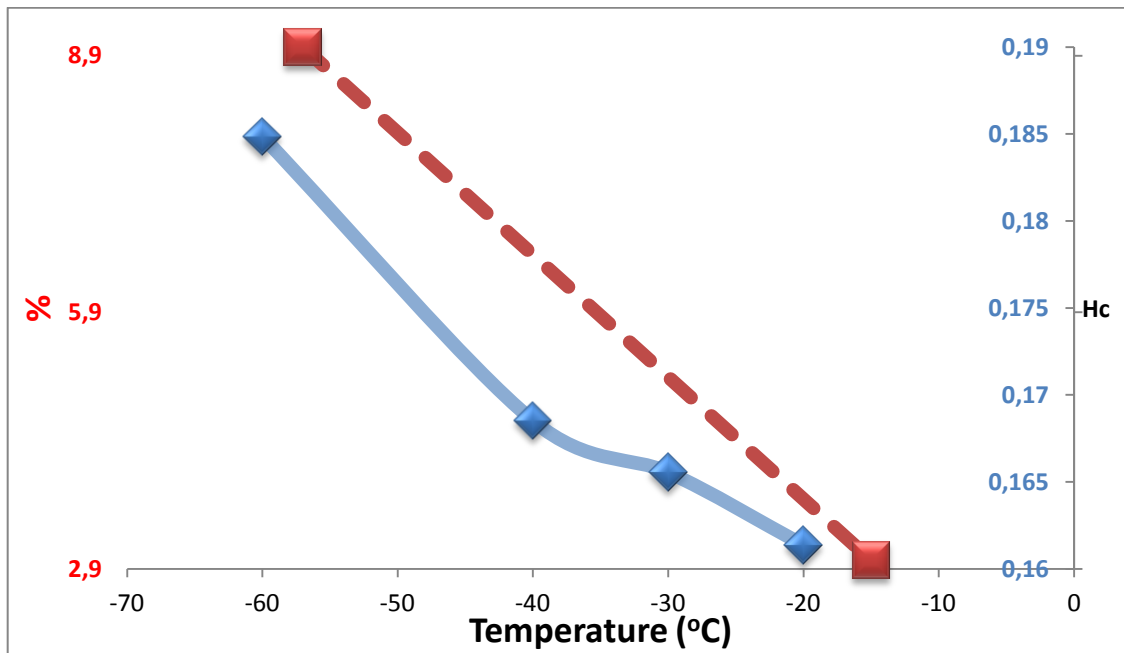


Σχήμα 7-8: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,1\text{Hz}$ και $V=4\text{V}$

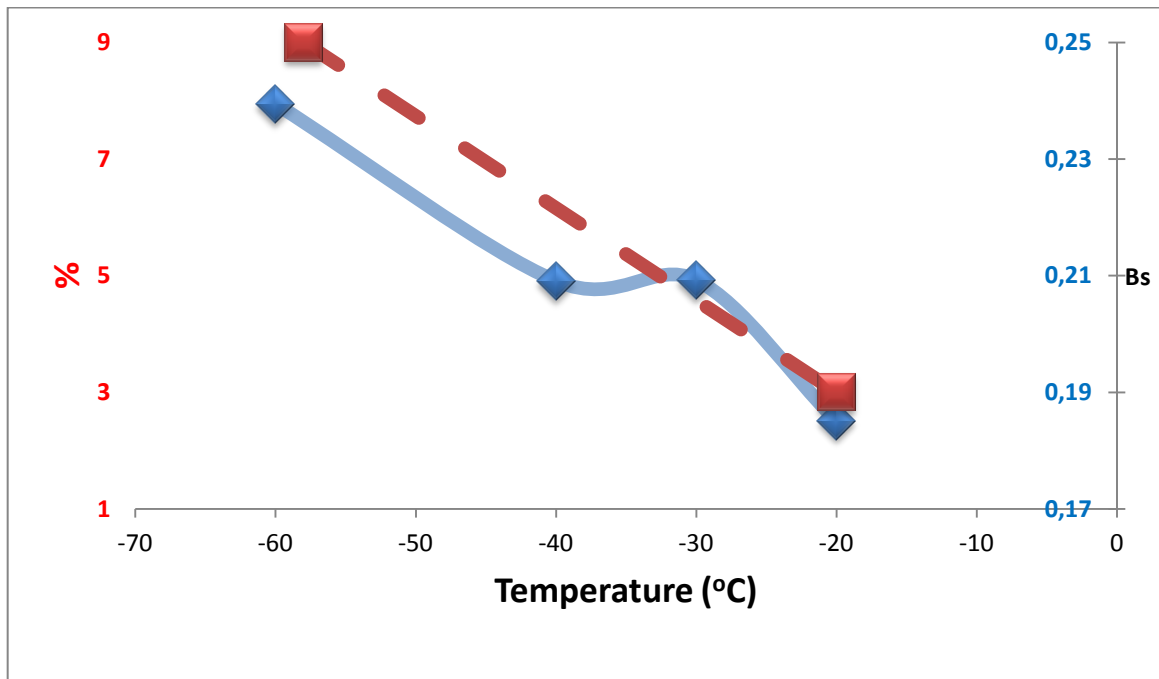


Από τις τιμές που εξάγονται από τις παραπάνω γραφικές προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις.

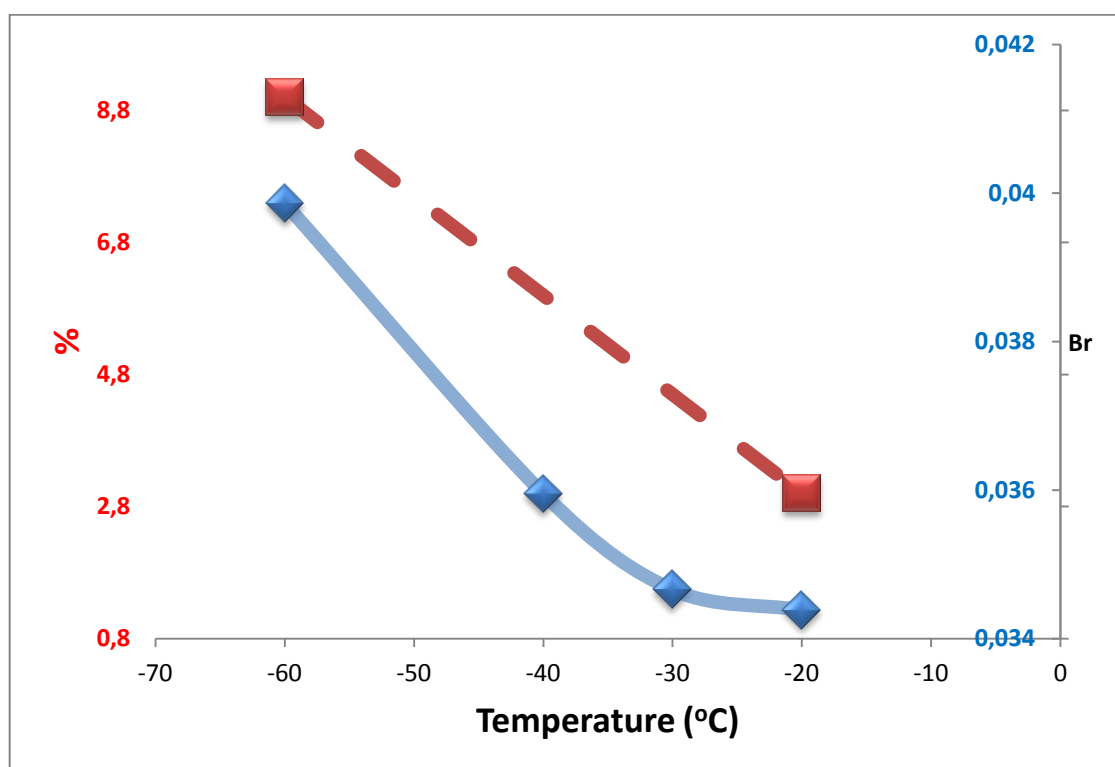
Σχήμα 7-9: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 7-10: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 7-11: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή B_r στους $-20, -30, -40, -60^\circ\text{C}$

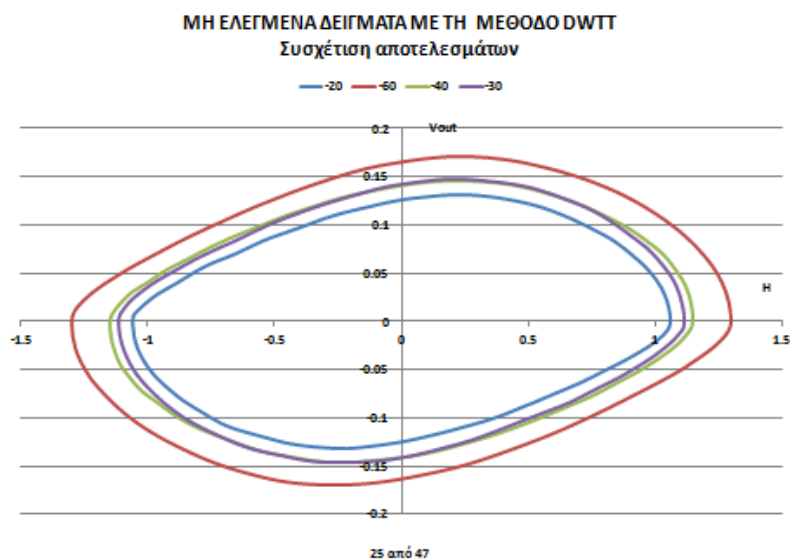


Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία (από τους -20°C στους -60°C) τόσο αυξάνεται το συνεκτικό πεδίο. Το ίδιο παρατηρείται και για την μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) και για την παραμένουσα μαγνητική (B_r).

Με τη χρήση του image analyzer υπολογίστηκε το ποσοστό όλκιμης και ψαθυρής επιφάνειας όπως φαίνεται στα Σχήμα 7-9: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20, -30, -40, -60^\circ\text{C}$ Σχήμα 7-10 και Σχήμα 7-11.

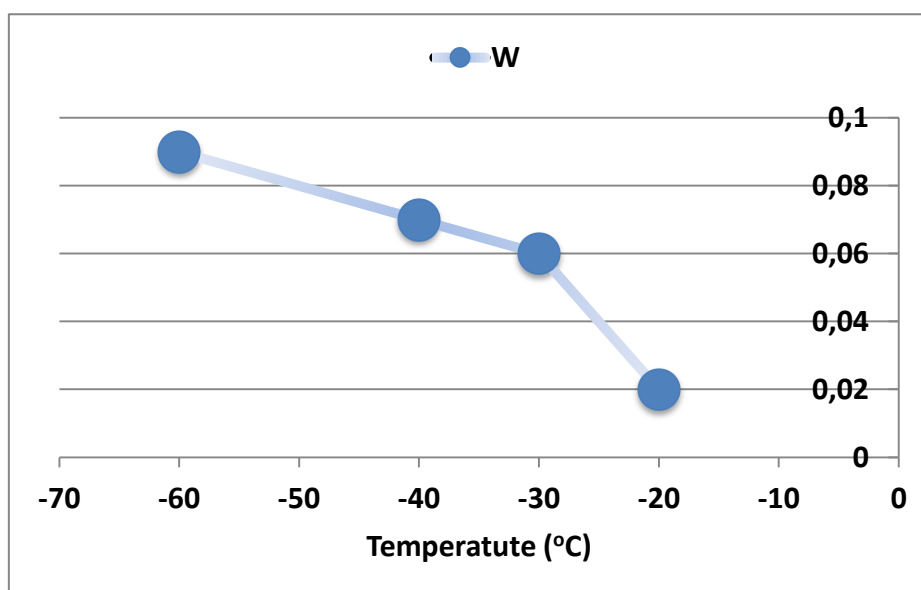
Επειδή δεν μας ενδιαφέρει η τάση εξόδου συναρτήσει του χρόνου αλλά ως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο για αυτό τον λόγο παραθέτουμε αυτή την γραφική παράσταση. Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται το πλάτος της V_{out} , παρατηρούμε ότι όπου $V_{out}=0$ κάνει ‘γωνία’ (μια ομαλή αλλαγή στην V_{out}).

Σχήμα 7-12: Τάση εξόδου συναρτήσεως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο



Όσο μειώνεται η θερμοκρασία τόσο μεγαλώνει το εμβαδόν αφού μεγαλώνει ο βρόχος. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται (από τους -20°C στους -60°C) η κίνηση των διαταραχών μέσα στο υλικό παρεμποδίζεται λόγω ψύξης και η απώλεια ενέργειας είναι μεγαλύτερη, να χρειάζεται μεγαλύτερο εξωτερικώς εφαρμοζόμενο πεδίο για να κορεστεί μαγνητικά το δείγμα και για να απομαγνητίσουμε.

Σχήμα 7-13: Απώλειες βρόχου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας



7.4.1.2 Θραυσιγενής Επιφάνεια

Η θραυσιγενής επιφάνεια των δειγμάτων μετά την DWTT θράυση τους φαίνεται στις Εικόνες 7-8 .



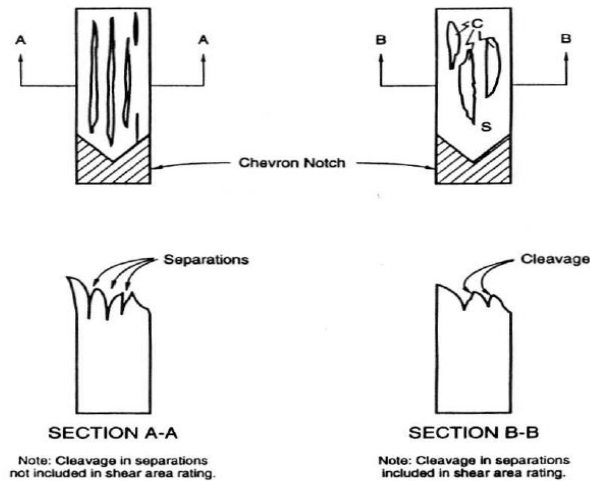
Εικόνα 7-8 : Θραυσιγενής επιφάνειες των δειγμάτων μετά την δοκιμή DWTT

Ο υπεύθυνος της Σωληνουργείας Κορίνθου με βάση το πρότυπο αξιολόγησε τις θραυσιγενής επιφάνειες. Στόχος της αξιολόγησης των θραυσμένων δοκιμίων είναι ο προσδιορισμός της όλκιμης επιφάνειας θραύσης.

- Ως όλκιμη επιφάνεια θραύσης θεωρείται η επιφάνεια εκείνη που εμφανίζεται με γκρι θαμπή απόχρωση.
- Ως ψαθυρή επιφάνεια θραύσης θεωρείται η επιφάνεια εκείνη που εμφανίζεται με λαμπερή απόχρωση και κρυσταλλική μορφή.

Ορίζεται ως ποσοστό όλκιμης επιφάνειας θραύσης το επί τοις εκατό (%) ποσοστό αυτής επί του συνολικού εμβαδού της επιφάνειας θραύσης που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό.

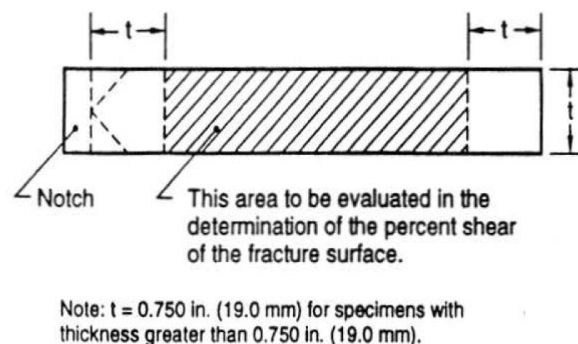
Σε περίπτωση που η επιφάνεια θραύσης περιέχει "σχίσματα" το επίπεδο των οποίων εκτείνεται παράλληλα στην επιφάνεια έλασης του δοκιμίου, αυτά δε λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό της επιφάνειας θραύσης .



Εικόνα 7-9 : Προσδιορισμός επίδρασης "σχισμάτων", σε περίπτωση που περιλαμβάνονται στην επιφάνεια θραύσης και σε συνάρτηση με τον προσανατολισμό τους

Αντίθετα, όταν το επίπεδο των σχισμάτων σχηματίζει γωνία με την επιφάνεια έλασης του δοκιμίου, τότε αυτά συνυπολογίζονται στον προσδιορισμό της όλκιμης επιφάνειας θραύσης, εκτός και αν η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο EN 10274 Latest Ed., οπότε δεν συνυπολογίζονται.

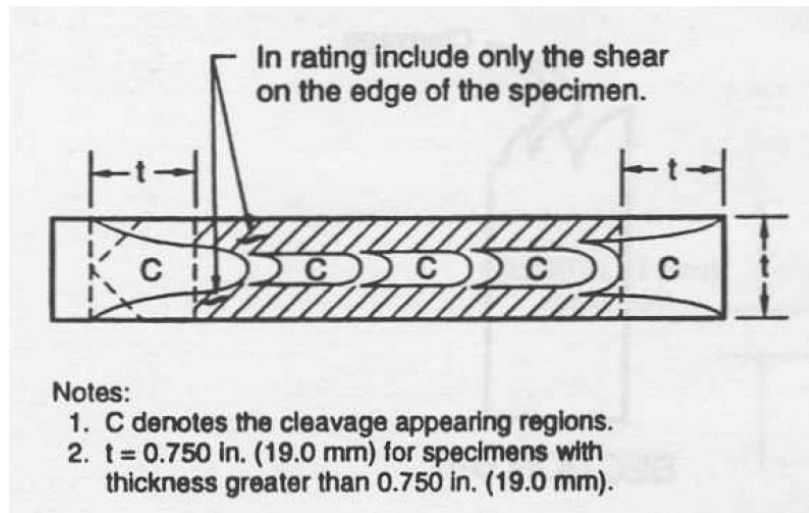
- Για πάχη δοκιμίου έως και 19,0 mm, λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του ποσοστού όλκιμης επιφάνειας, το εμβαδόν της επιφάνειας θραύσης που περικλείεται μεταξύ των νοητών γραμμών που απέχουν απόσταση ίση με το πάχος του δοκιμίου από το άκρο της εγκοπής (pressed notch) ή της μύτης (chevron notch) και της απέναντι πλευράς του δοκιμίου.



Εικόνα 7-10 : Εμβαδόν επιφάνεια θραύσης που λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό της όλκιμης επιφάνειας θραύσης.

- Για πάχη δοκιμίου μεγαλύτερα από 19,0 mm, η παραπάνω απόσταση ορίζεται ως 19,0 mm.
- Σε περιπτώσεις που η επιφάνεια θραύσης περιλαμβάνει εναλλάξ όλκιμα και ψαθυρά τμήματα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, τότε η όλκιμη επιφάνεια

που περικλείεται μεταξύ των ψαθυρών τμημάτων δε λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό, ενώ η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει την όλκιμη περιοχή.



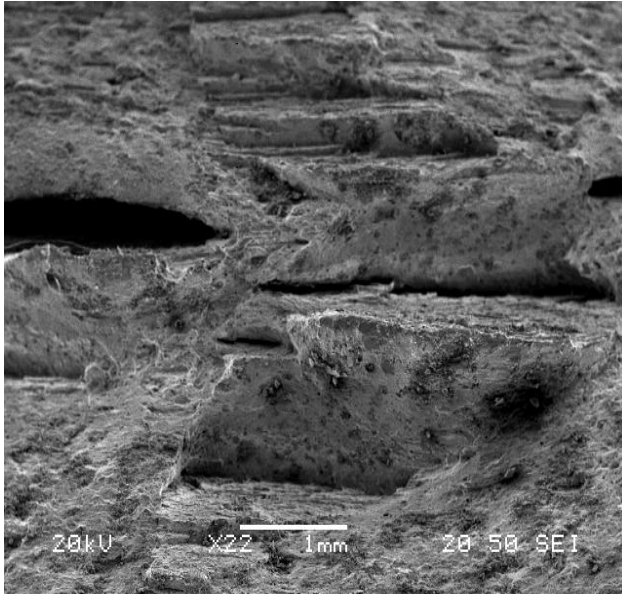
Εικόνα 7-11: Προσδιορισμός εμβαδού επιφάνειας θραύσης που λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της όλκιμης επιφάνειας, όταν αυτή περιέχει εναλλάξ τμήματα ψαθυρής και όλκιμης θραύσης

Δοκίμια τα οποία στην περιοχή κάτω από τη χαραγή εμφανίζουν μετρήσιμα όλκιμη θραύση η οποία συνεχίζεται σε ψαθυρή, κρίνονται άκυρα (invalid).

- Έγκυρα δοκίμια θεωρούνται αυτά που εμφανίζουν ψαθυρή επιφάνεια από την άκρη της χαραγής με εξαίρεση τα δοκίμια που εμφανίζουν όλκιμη επιφάνεια σε όλη την επιφάνεια θραύσης.

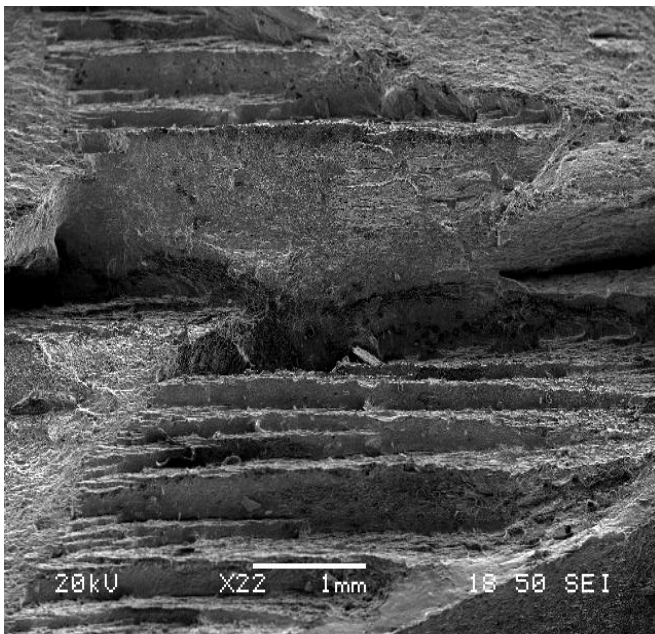
Με βάση το πρότυπο ο υπεύθυνος της Σωληνουργείας όρισε ότι το ποσοστό ολκιμότητας στην περιοχή C ήταν 100% λόγω του μικρό πάχος των δειγμάτων.

Η θραυστογραφία των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο SEM και η περιοχή η οποία μελετήθηκε είναι στο κέντρο του δοκιμίου και όχι στην περιοχή C.



Εικόνα 7-12 : Αποτελέσματα

θραυστογραφίας για τους -20°C



Εικόνα 7-13 : Αποτελέσματα

θραυστογραφίας για τους -60°C

Παρατηρούμε ότι και στις δύο θερμοκρασίες (-20°C και -60°C) παρουσιάζονται μικτές περιοχές (όλκιμες και ψαθυρές). Με την πτώση της θερμοκρασίας αυξάνεται το εμβαδόν την ψαθυρής επιφάνειας και τόσο οι αποσχίσεις όσο και τα cleavage γίνονται απότομα και αιχμηρά.

7.4.2 Συμπεράσματα

- Όλα τα δείγματα drop είναι 100% όλκιμα οπότε δεν μπορούμε να κάνουμε άμεση συσχέτιση των μαγνητικών αποτελεσμάτων με το ποσοστό όλκιμότητας των δειγμάτων.
- Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται (από τους -20°C στους -60°C) η κίνηση των διαταραχών μέσα στο υλικό παρεμποδίζεται λόγω ψύξης και η απώλεια ενέργειας είναι μεγαλύτερη, να χρειάζεται μεγαλύτερο εξωτερικώς εφαρμοζόμενο πεδίο για να κορεστεί μαγνητικά το δείγμα και για να απομαγνητίσουμε.
- Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται (από τους -20°C στους -60°C) παρεμποδίζεται και η κίνηση των μαγνητικών τοιχωμάτων.

7.4.3 Μέτρηση του βρόχου σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών συμπεριλαμβανομένης και της θερμοκρασίας μετάβασης από την όλκιμη σε ψαθυρή θραύση σε δείγματα τα οποία η όλκιμότητα είχε προσδιοριστεί με τη μέθοδο DWTT .

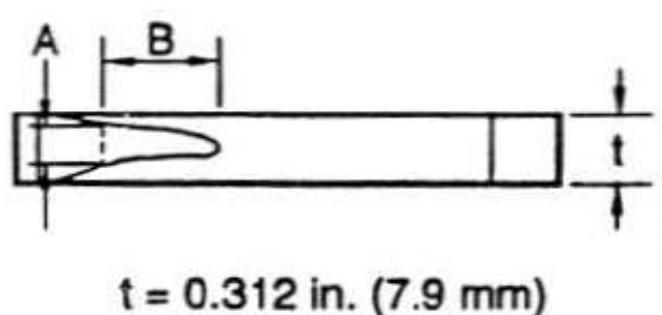
Δείγμα το οποίο αρχικά είχε θραυστεί με την μέθοδο DWTT, με διαστάσεις $48'' \times 19,30''$ ($1219,2\text{mm} \times 490,22 \text{ mm}$) τοποθετήθηκε μέσα στο λουτρό. Μειώνοντας σταδιακά τη θερμοκρασία μέσα στο λουτρό με την διαδικασία που προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Τα πάχος των δειγμάτων είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το πάχος των δειγμάτων της πρώτης ομάδας. Επίσης η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή δόθηκε από τη Σωληνουργεία ότι είναι -60°C . Τα δείγματα είχαν υποστεί πρώτα DWTT και στη συνέχεια αφού προσδιορίστηκε το ποσοστό όλκιμότητας τοποθετήθηκαν εντός του λουτρού για την λήψη των βρόχων υστέρησης σε ένα εύρος υπομηδενικών θερμοκρασιών που περιλαμβάνει και τους -60°C .

Λόγω του πάχους του δείγματος το ποσοστό της όλκιμης επιφάνειας θραύσης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S = 100 \times [(2,8 - 2 \times t) \times t - 0,75 \times A \times B] / [2,8 - 2 \times t) \times t]$$

Όπου SA = το ποσοστό όλκιμης επιφάνειας (%), t = το πάχος του δοκιμίου, A = το πλάτος της ψαθυρής ζώνης σε απόσταση ίση με t από το άκρο της εγκοπής (pressed notch) ή της μύτης (chevron notch), B = το μήκος της ψαθυρής ζώνης που περικλείεται μεταξύ των νοητών γραμμών "2t".

Ο παραπάνω τύπος χρησιμοποιείται μόνο για ποσοστά όλκιμης θραύσης που είναι μεταξύ 45 % και 100%.



Εικόνα 7-14: Υπολογισμός του ποσοστού όλκιμης επιφάνειας

Οι παράμετροι των μετρήσεων που έγιναν στα δοκίμια ήταν η θερμοκρασία του λουτρού, η συχνότητα διέγερσης στο πηνίο λήψης και η τάση διέγερσης. Οι τιμές της θερμοκρασίας ήταν -45, -55, -57, -59, -61, -63, -65, -70, -75°C, της συχνότητας 0.1 Hz και 0.5 Hz και της τάση από 4 μέχρι 10 V (Πίνακας 7-4).

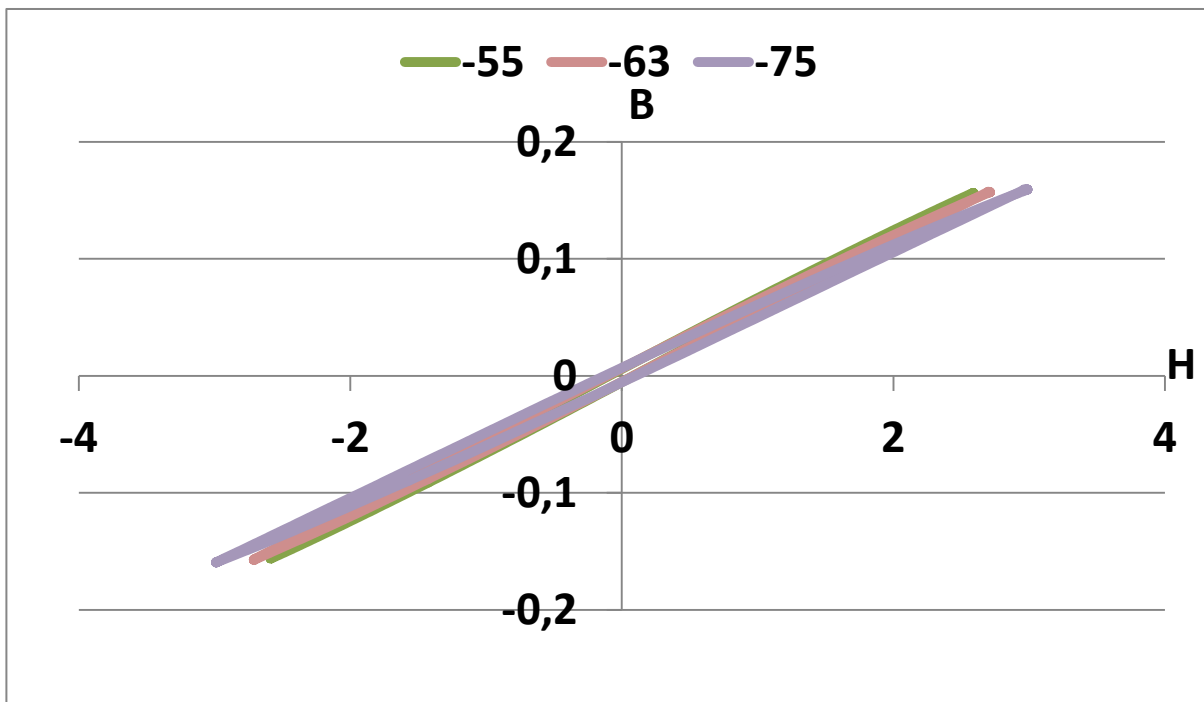
Πίνακας 7-4: Παράμετροι των μετρήσεων

T(°C)	-45	-55	-57	-59	-61	-63	-65	-70	-75
f (Hz)	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5	0,1 & 0,5
V (V)	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10	4-10

Ενδεικτικοί βρόχοι υστέρησης σε τρεις θερμοκρασίες φαίνονται παρακάτω. Οι θερμοκρασίες που επιλέχθηκαν είναι πριν και μετά τη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή.

Ενδεικτικοί βρόχοι υστέρησης σε τρεις θερμοκρασίες φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 7-14. Οι θερμοκρασίες που επιλέχθηκαν είναι πριν και μετά τη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή.

Σχήμα 7-14: Βρόχοι υστέρησης για θερμοκρασίες -55°C, -63°C, -75°C



Μια γενική παρατήρηση είναι ότι με την πτώση της θερμοκρασίας επιμηκύνονται (αύξηση της μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s)).

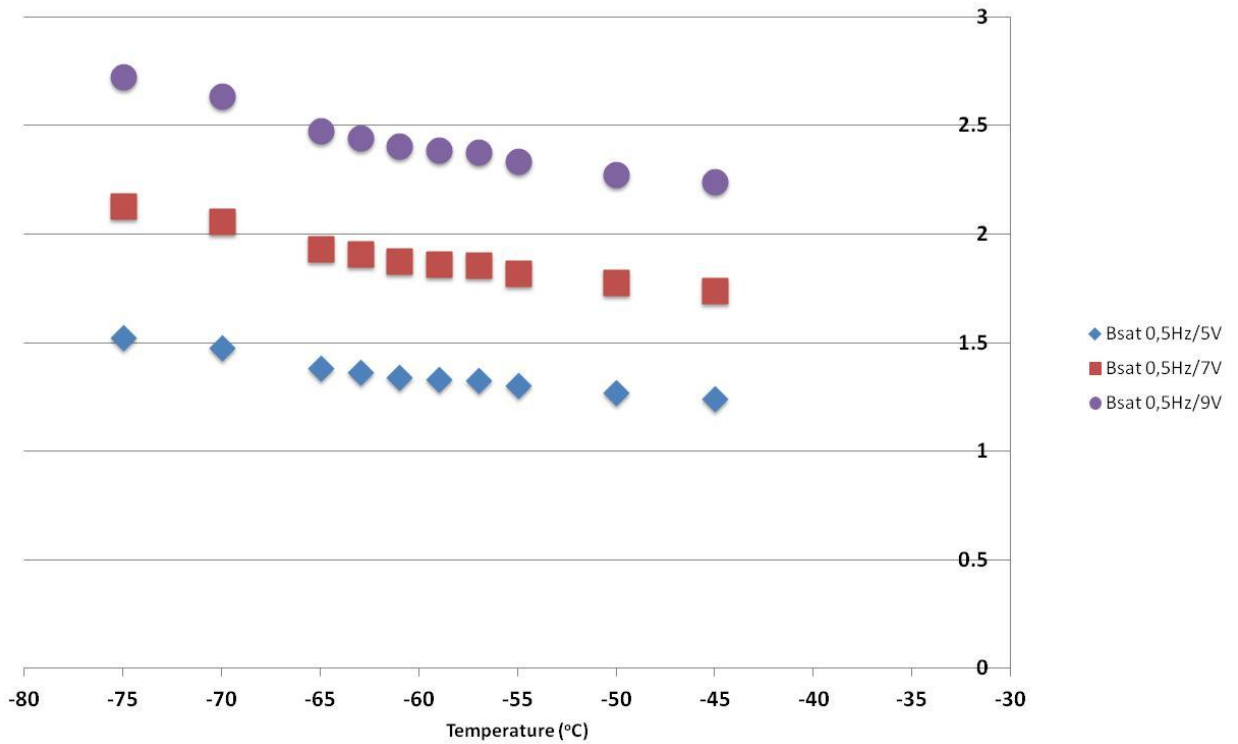
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε αναλυτικότερα τους βρόχους υστέρησης στις θερμοκρασίες -45, -55, -57, -59, -61, -63, -65, -70, -75°C με συχνότητα 0,5 Hz και τάση 4-10 V. Από τους βρόχους υστέρησης που πήραμε θα μελετήσουμε τα εξής στοιχεία: μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r), συνεκτικό πεδίο (H_c).

Πίνακας 7-5: Παράμετροι των μετρήσεων

T(°C)	-45	-55	-57	-59	-61	-63	-65	-70	-75
f(Hz)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
V (V)	5 – 10	5 –10	5 –10	5 –10	5 –10	5 –10	5 –10	5 –10	5 –10

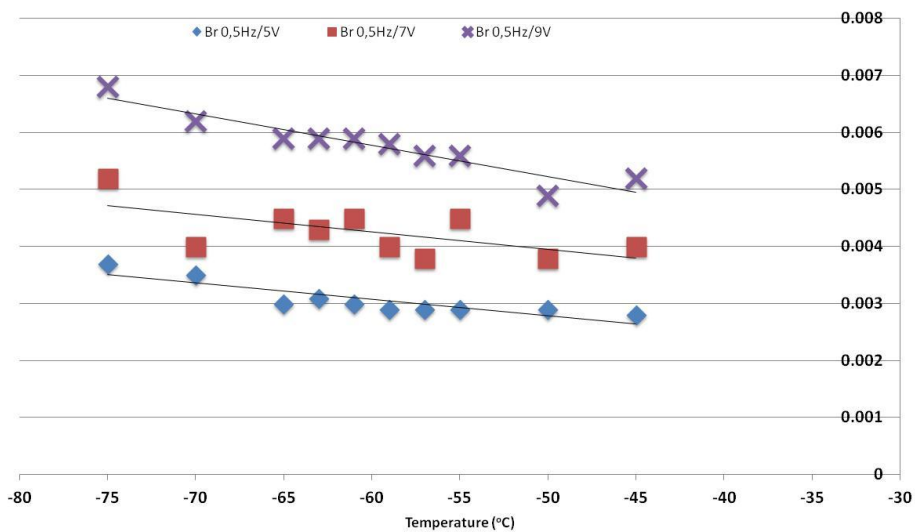
Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία (από τους -45°C στους -75°C) τόσο αυξάνεται η μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s). (Σχήμα 7-15)

Σχήμα 7-15: Μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V = (5, 7, 9)\text{V}$



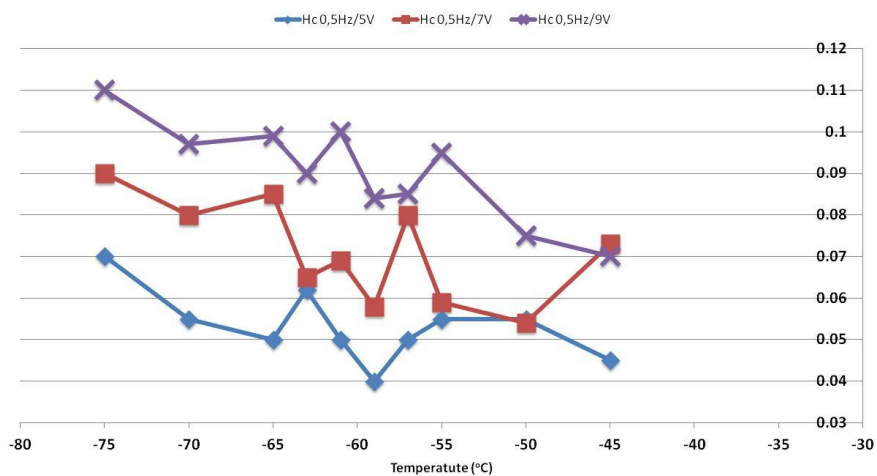
Όμοια με τη μαγνητική επαγωγή κόρου (B_s), η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r), πάλι για τάση $(5, 7, 9)\text{V}$, παρατηρούμε ότι φέρνοντας την γραμμή τάσης σε κάθε μια από τις επιβαλλόμενες τάσεις εμφανίζεται αύξηση καθώς μειώνεται η θερμοκρασία. (Σχήμα 7-16)

Σχήμα 7-16: Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (B_r) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V = (5, 7, 9)\text{V}$



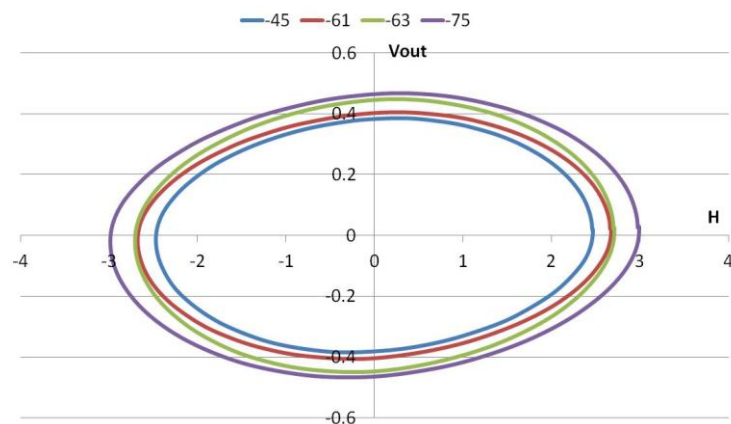
Όσο αναφορά το συνεκτικό πεδίο (H_c) με τάσεις 5,7,9V, παρατηρούμε ότι σε ένα εύρος θερμοκρασιών γύρω από τους $-57,5^{\circ}\text{C}$ (που περιλαμβάνει και τους -60°C που είναι η θερμοκρασία αναφοράς της μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή περιοχή για το συγκεκριμένο δείγμα) υπάρχει μια έντονη αλλαγή των τιμών του συνεκτικού πεδίου. (Σχήμα 7-7-17) Πάνω από τους $-57,5^{\circ}\text{C}$ έχουμε όλκιμη περιοχή ενώ κάτω από τους $-57,5^{\circ}\text{C}$ έχουμε ψαθυρή περιοχή. Στο εύρος θερμοκρασιών υπάρχει μεικτή περιοχή (όλκιμη και ψαθυρή).

Σχήμα 7-7-17: Συνεκτικό πεδίο (H_c) στους $-20, -30, -40, -60^{\circ}\text{C}$ για $0,5\text{Hz}$ και $V = (5, 7, 9)\text{V}$



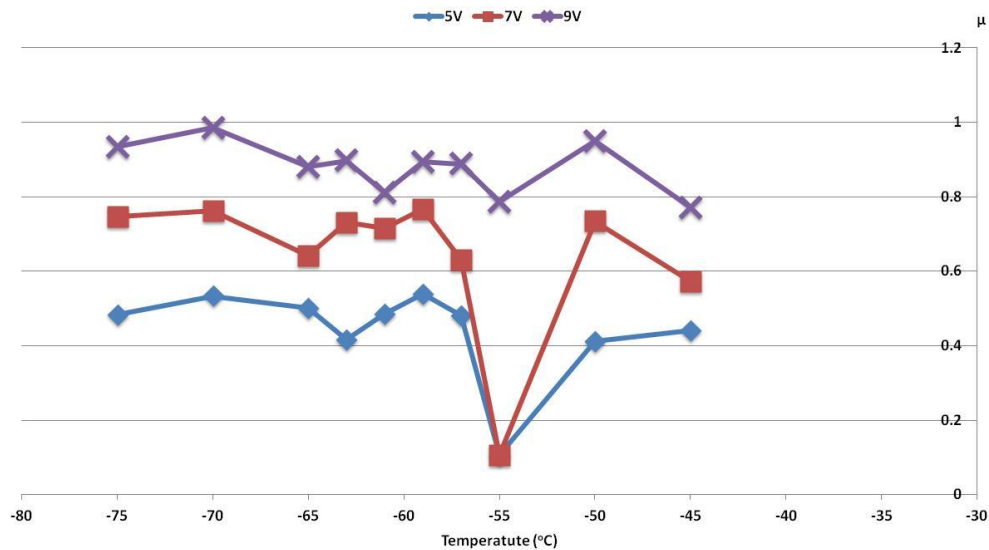
Στο Σχήμα 7-18 βλέπουμε την τάση εξόδου συναρτήσει του χρόνου ως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο. Παρατηρούμε ότι καθώς μειώνεται η θερμοκρασία αυξάνεται το πλάτος της V_{out} . Δεν παρατηρούμε απότομες αλλαγές στην διεύθυνση της μαγνήτισης.

Σχήμα 7-18: Τάση εξόδου συναρτήσεως προς το επιβαλλόμενο εξωτερικά πεδίο



Όσον αφορά τη μαγνητική διαπερότητα (μ) στους -55 παρατηρείται έντονη μεταβολή. Σε σχέση με τους $-57,5\text{C}$ υπάρχει μια απόκλιση(temperature shifting), η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι βρόχοι υστέρησης δεν είναι κύριοι αλλά είναι ελάσσονες .(Σχήμα 7-19)

Σχήμα 7-19: Μαγνητική διαπερότητα (μ)



7.4.4 Συμπεράσματα

- Η μαγνητική διαπερατότητα και η μαγνητική επαγωγή κόρου είναι άμεση συνάρτηση της θερμοκρασίας μετάβασης από όλκιμο σε ψαθυρό.
- Το συνεκτικό πεδίο εμφανίζει μια απόκλιση από τη θερμοκρασία μετάβασης από όλκιμο σε ψαθυρό (temperature shifting), η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι βρόχοι υστέρησης δεν είναι κύριοι αλλά είναι ελάσσονες .

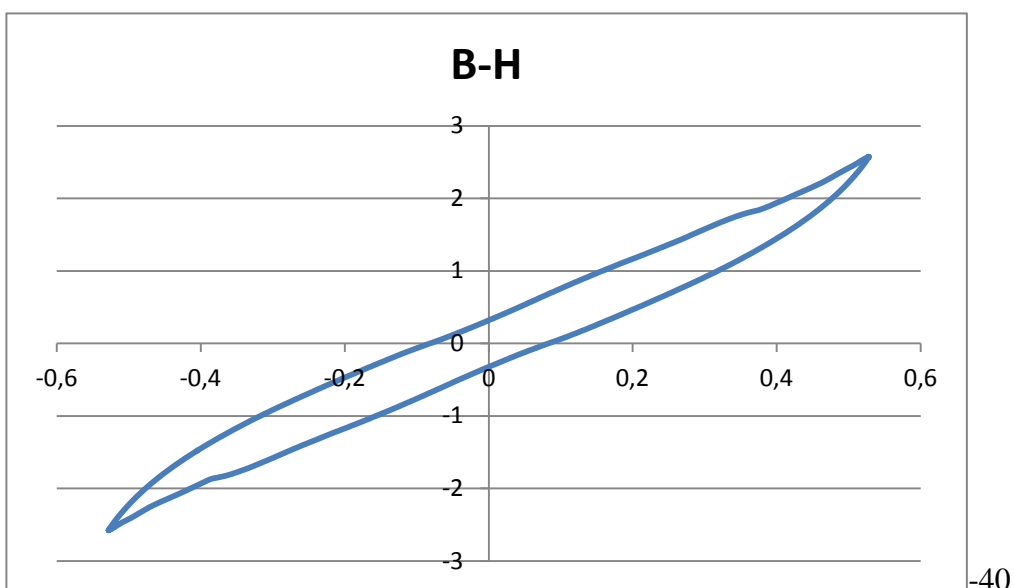
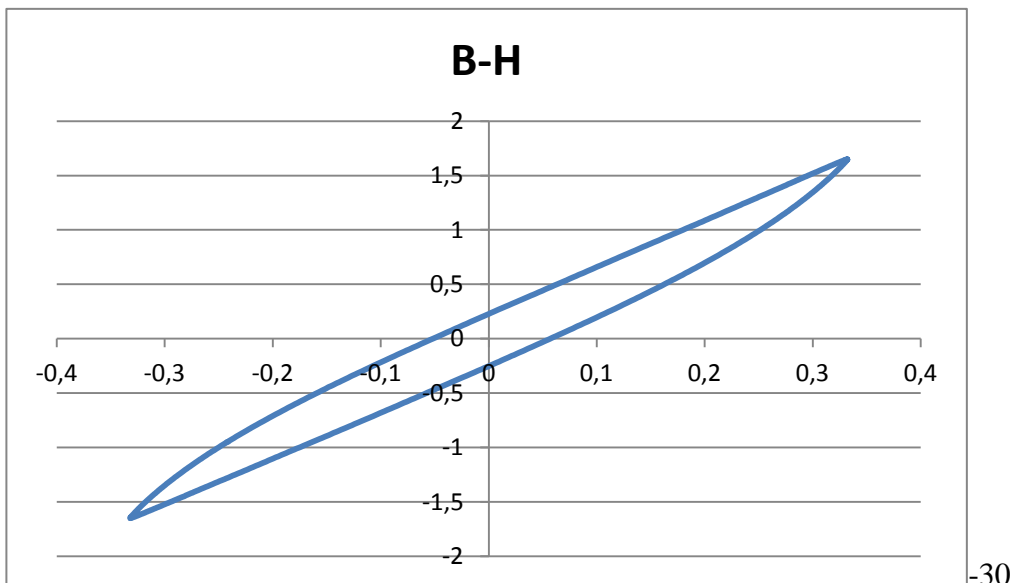
8 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

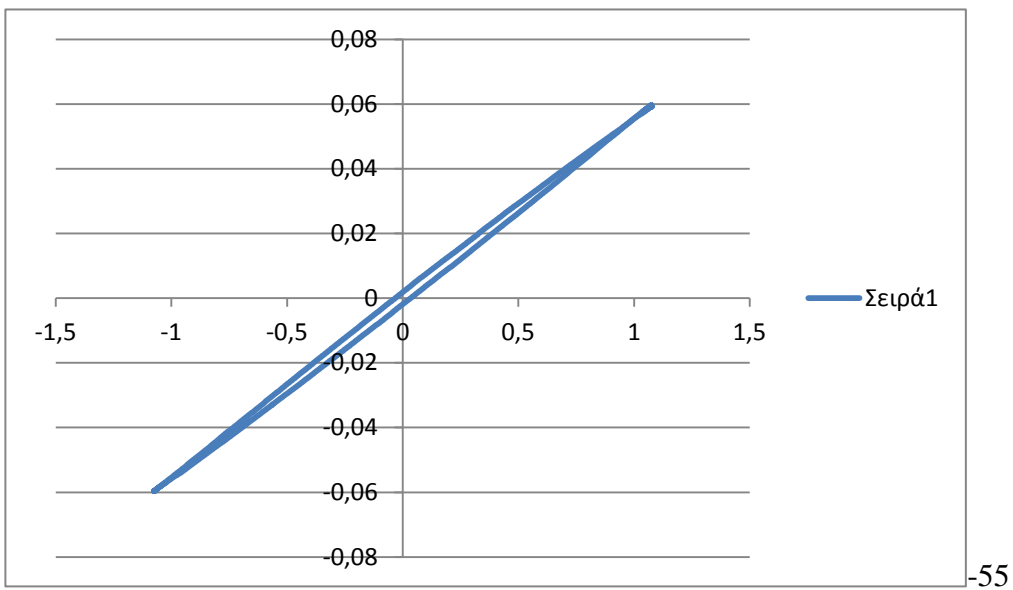
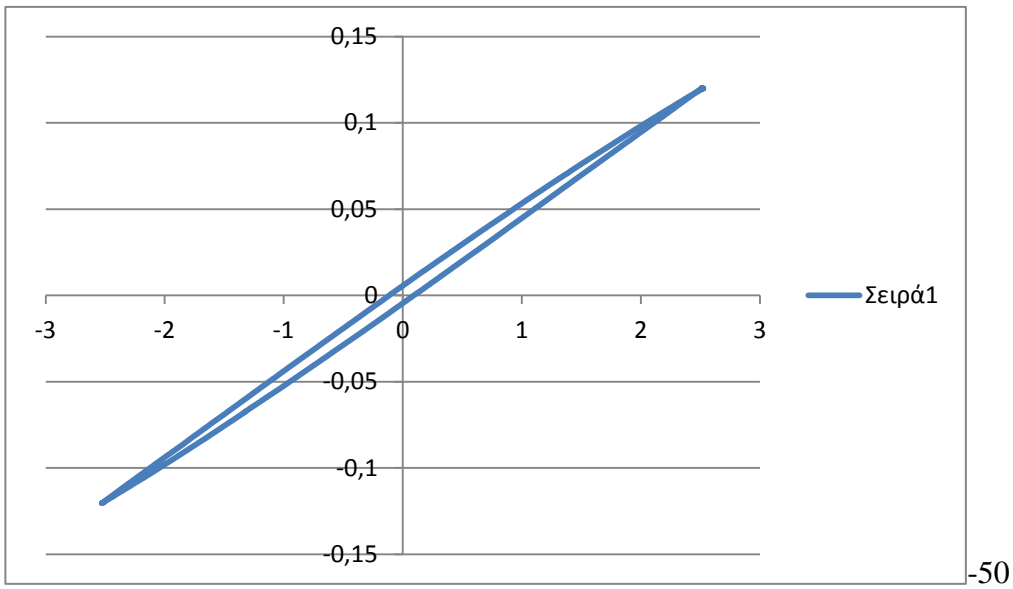
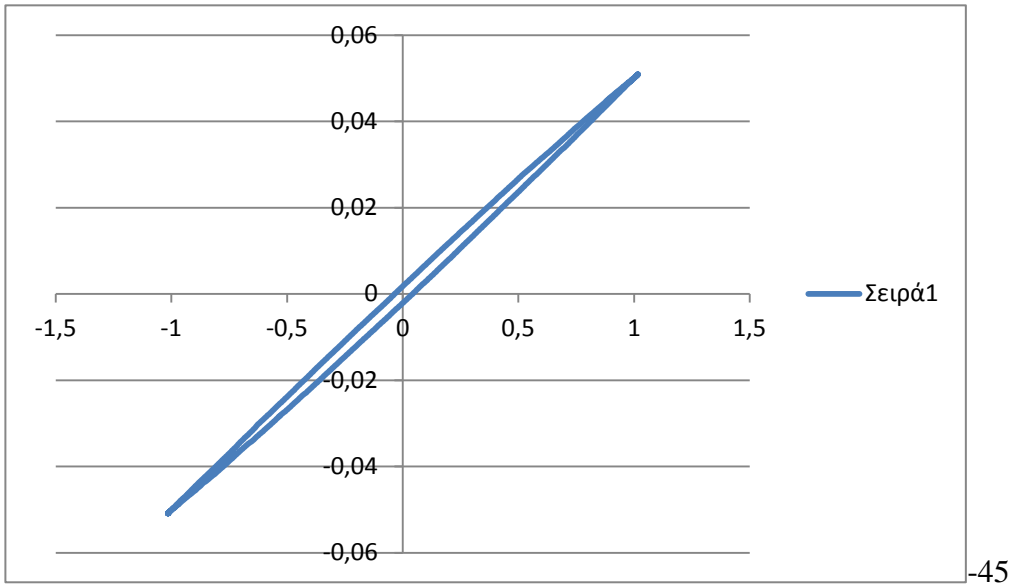
Χρειάζονται βελτιώσεις κατά τη διάρκεια της μέτρησης ώστε να:

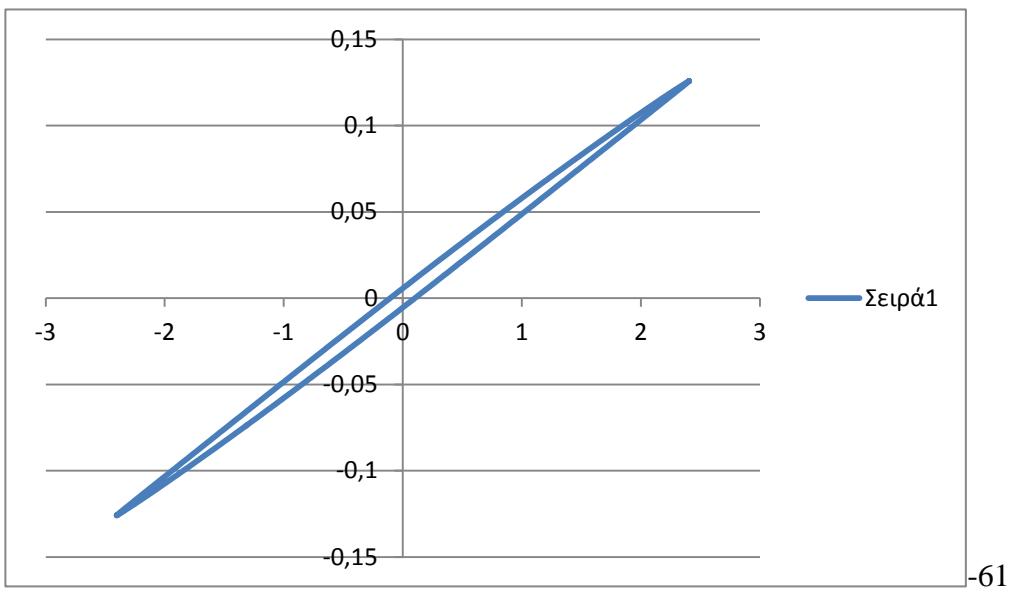
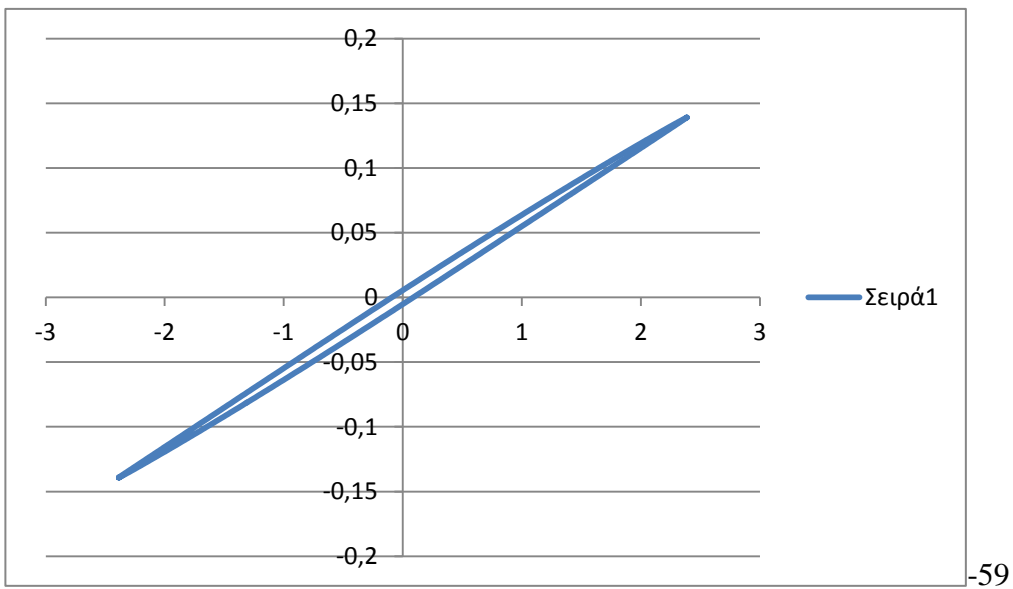
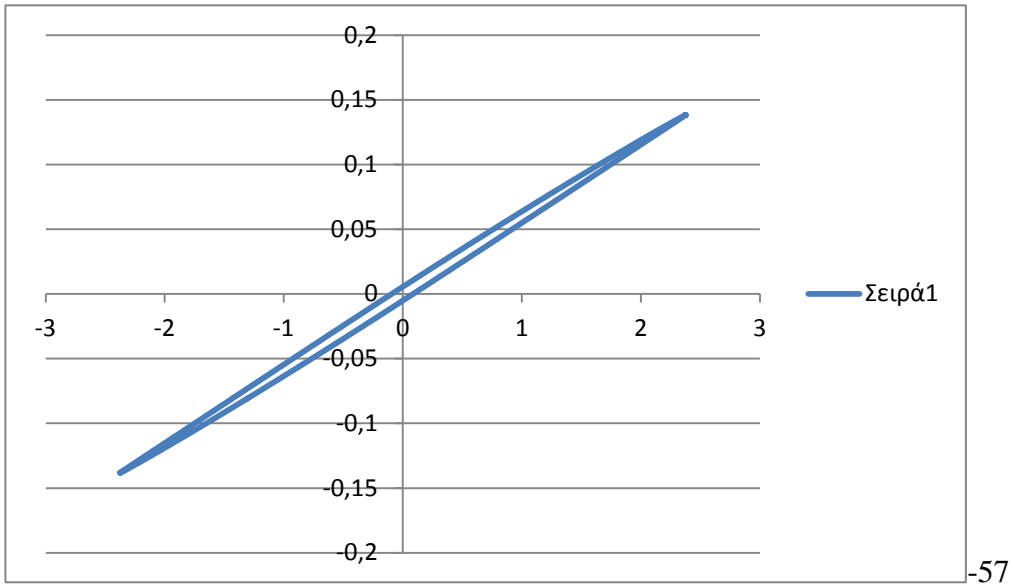
- λαμβάνουμε κύριους βρόχους υστέρησης
- εξαλειφτεί η μετατόπιση της θερμοκρασίας μετάπτωσης από την όγκιμη στην ψαθυρή περιοχή
- αποφεύγεται η ταλάντωση του δείγματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης σε υψηλά εφαρμοζόμενα πεδία διέγερσης
- βελτιωθεί η ποιότητα των βρόχων υστέρησης
- σταθεροποιείται η θερμοκρασία εντός του λουτρού

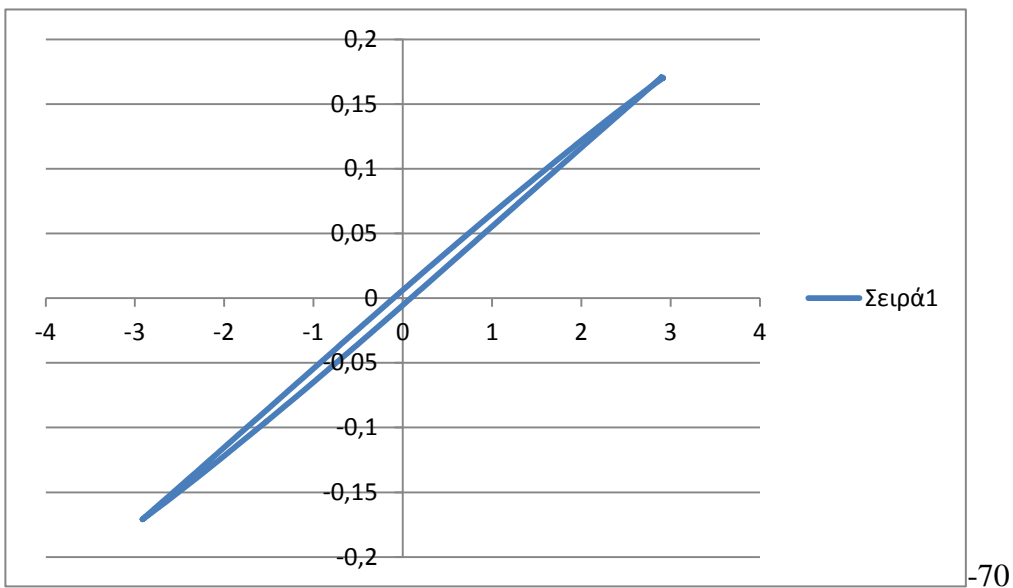
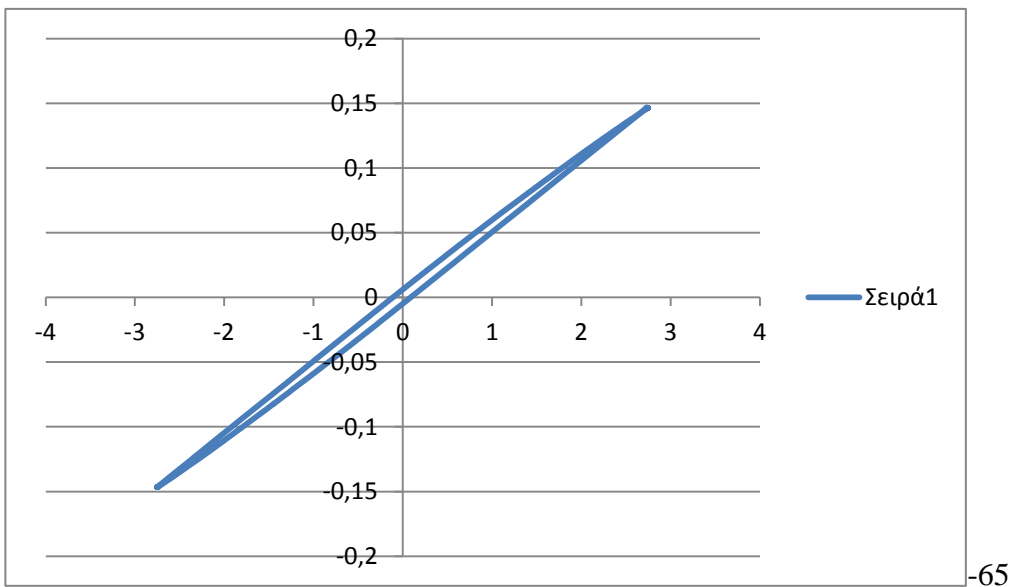
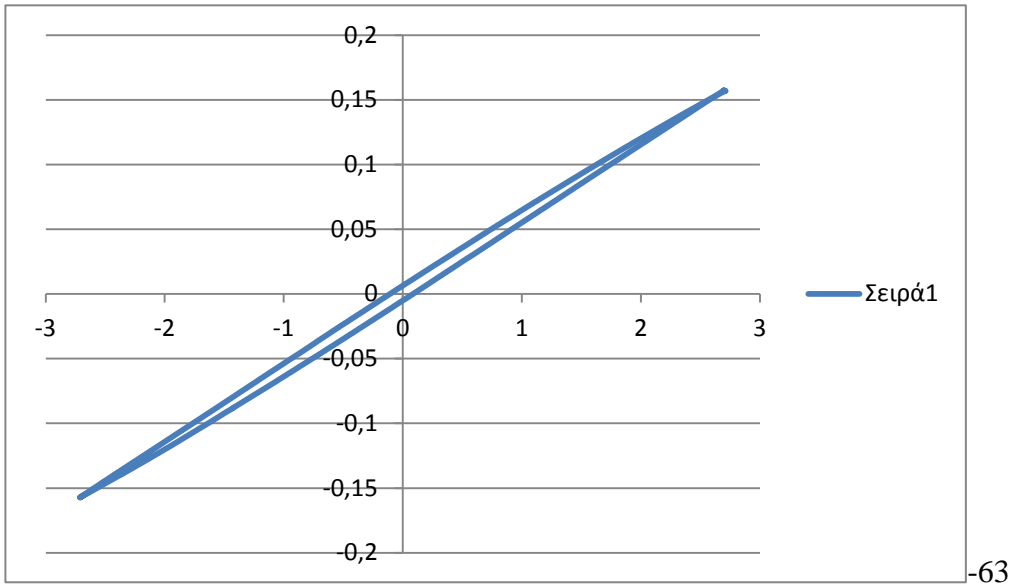
Συνίσταται επίσης η μέτρηση μαγνητικών ιδιοτήτων δειγμάτων με μεγαλύτερο πάχος και ποσοστό ψαθυρότητας με παράλληλη μελέτη των θραυσιγενών περιοχών καθώς και η ταυτόχρονη μέτρηση των δειγμάτων με BH Loops και MBN.

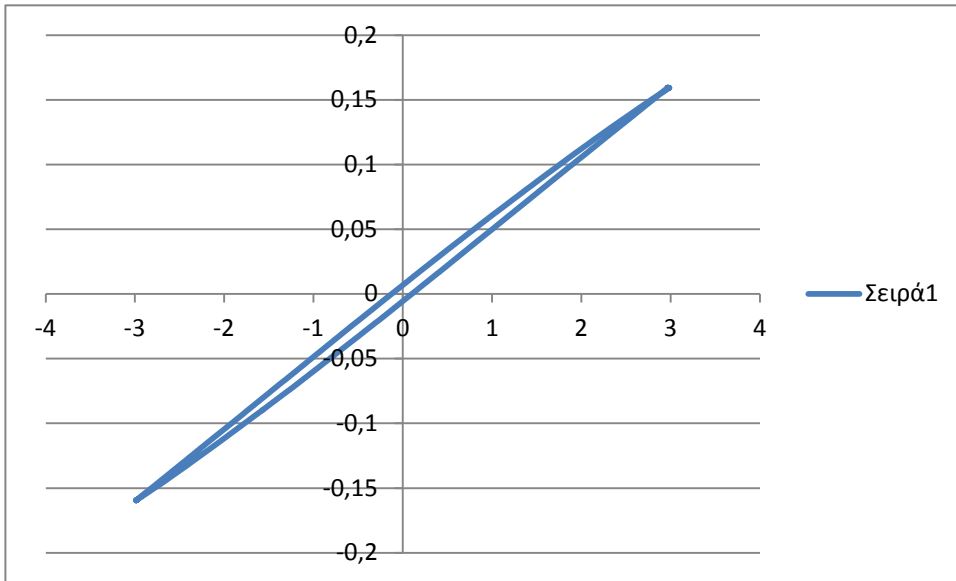
9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



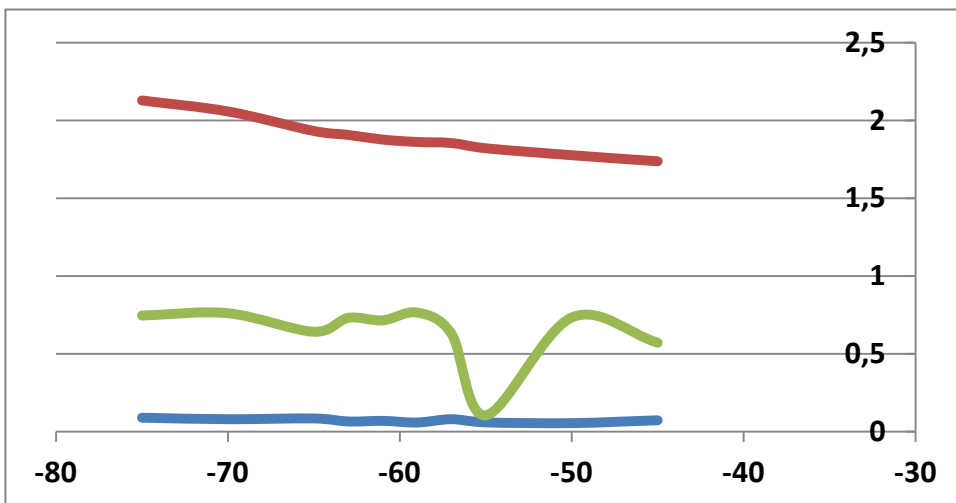
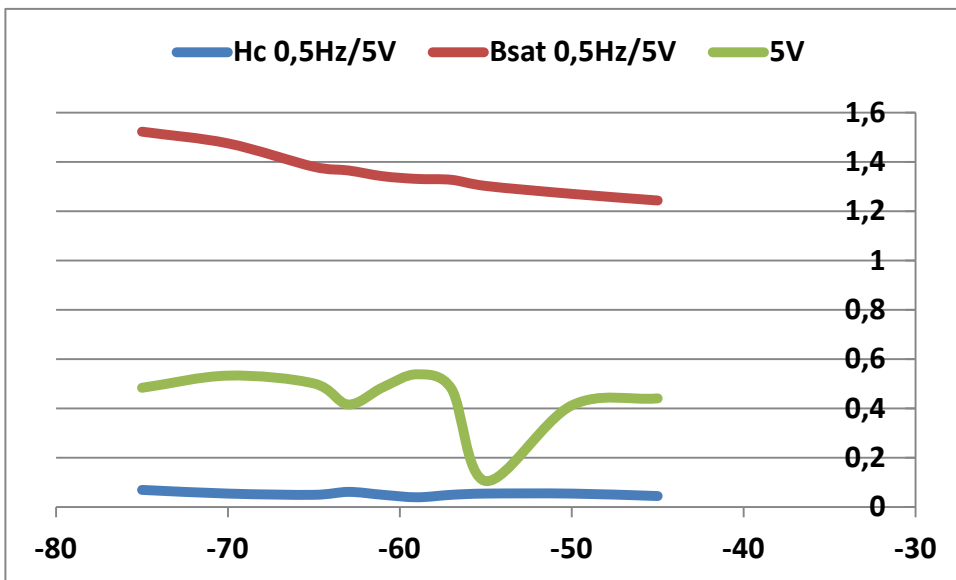


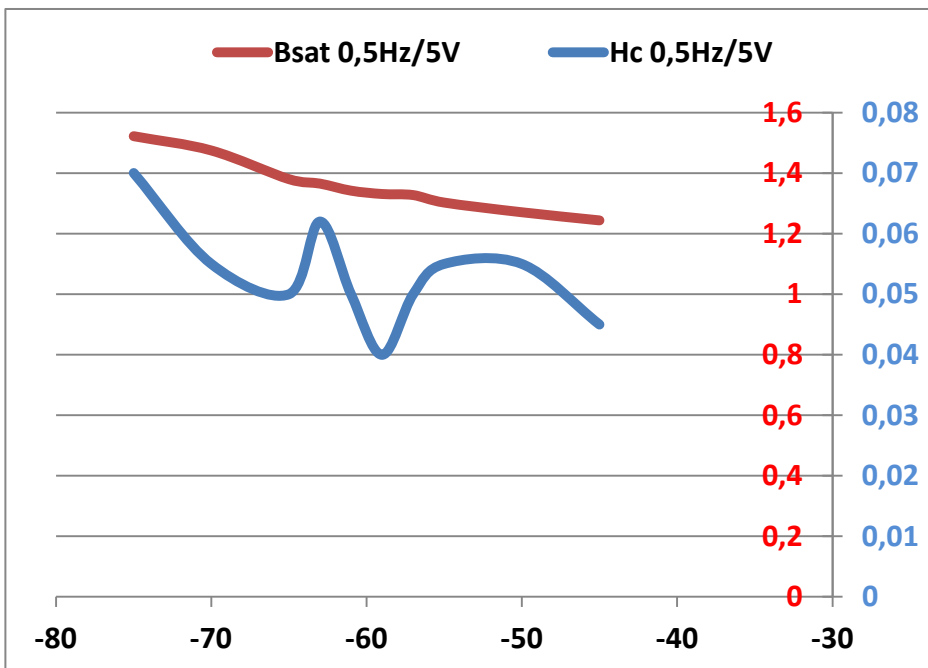
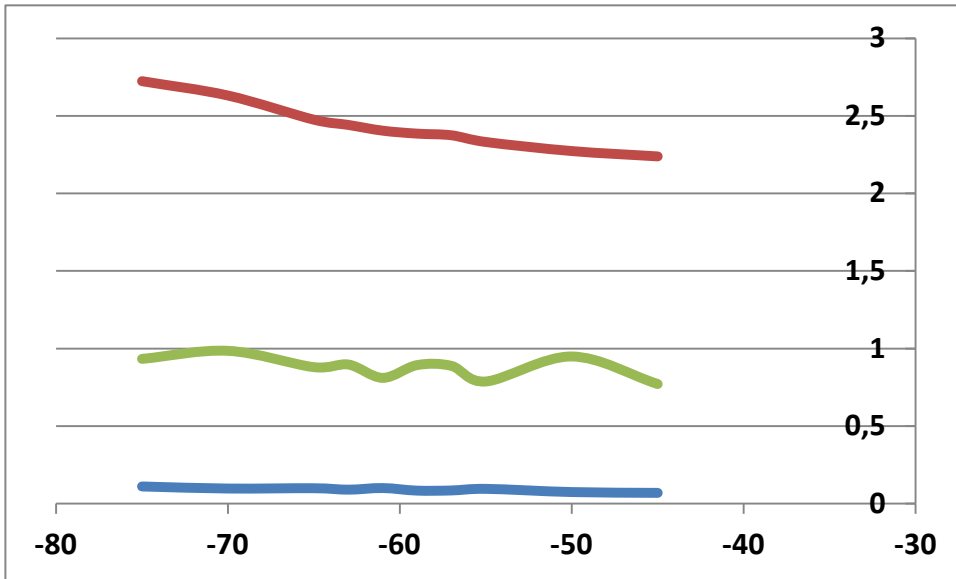


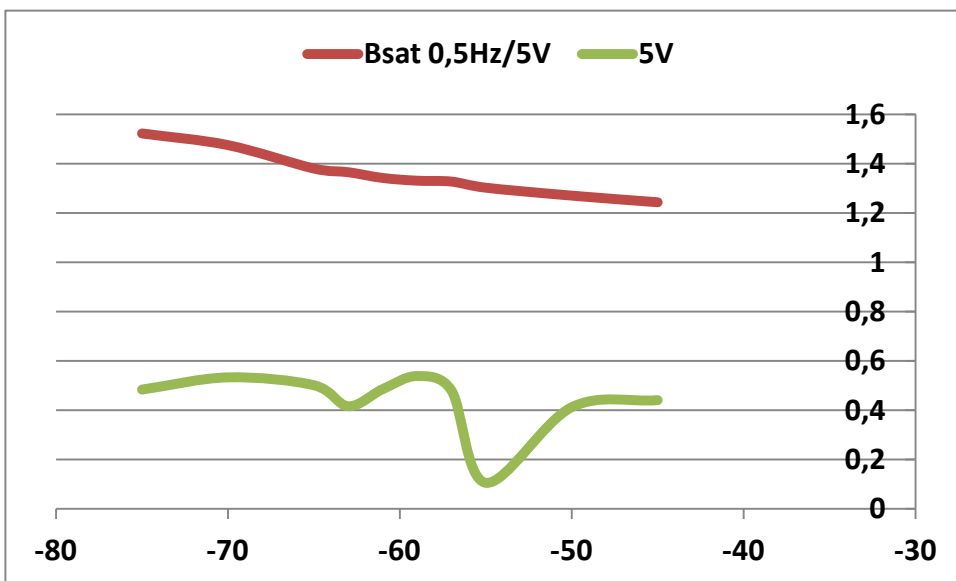
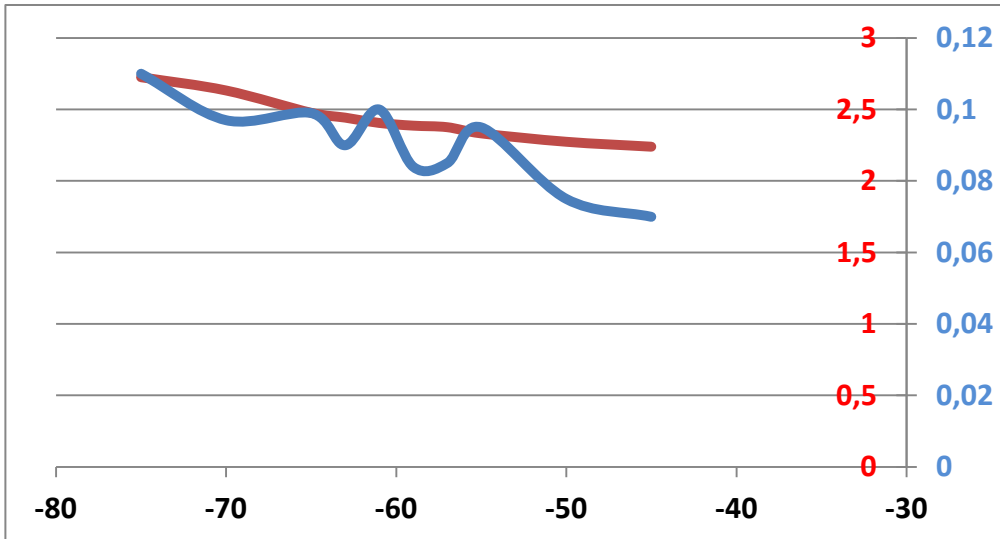
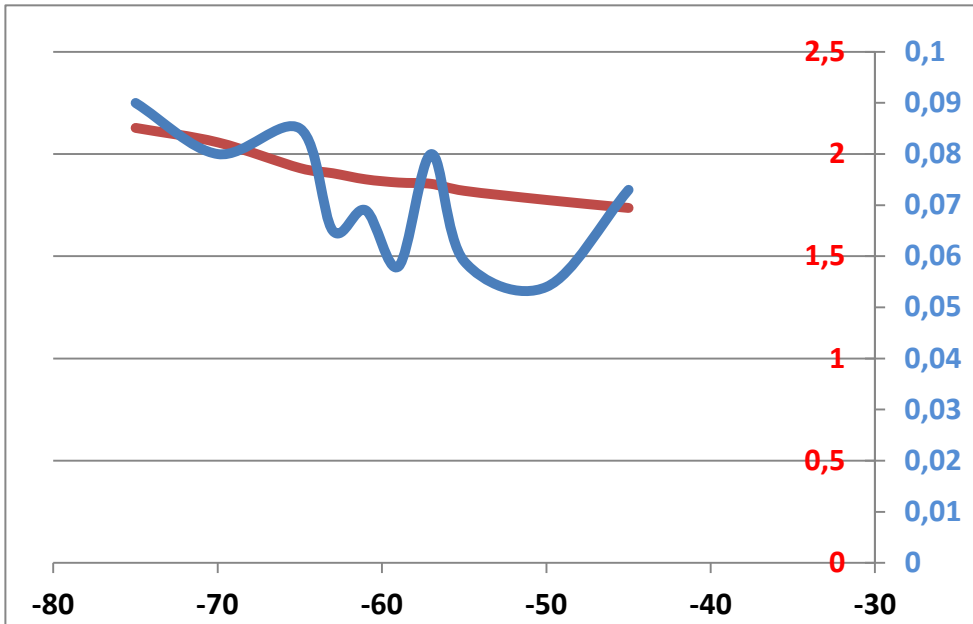


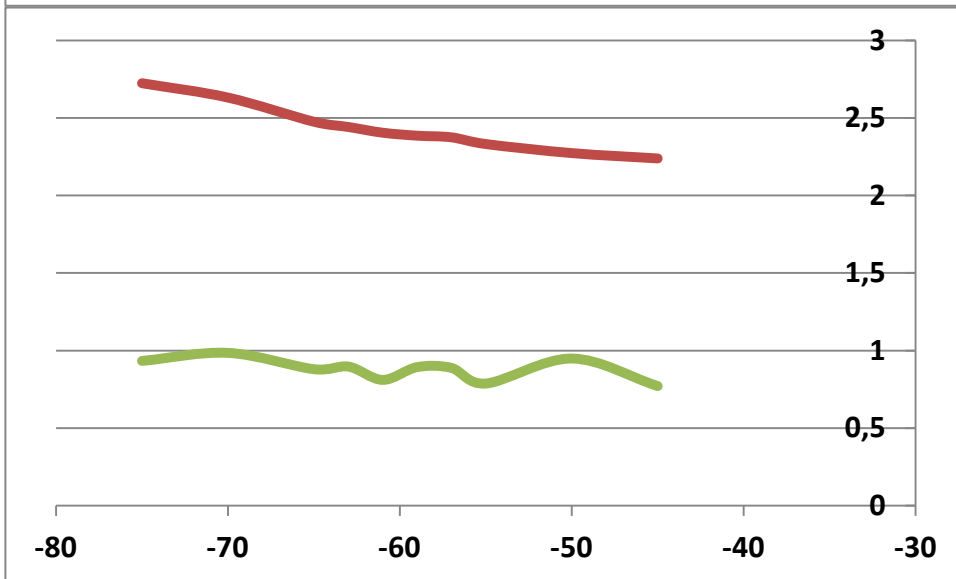
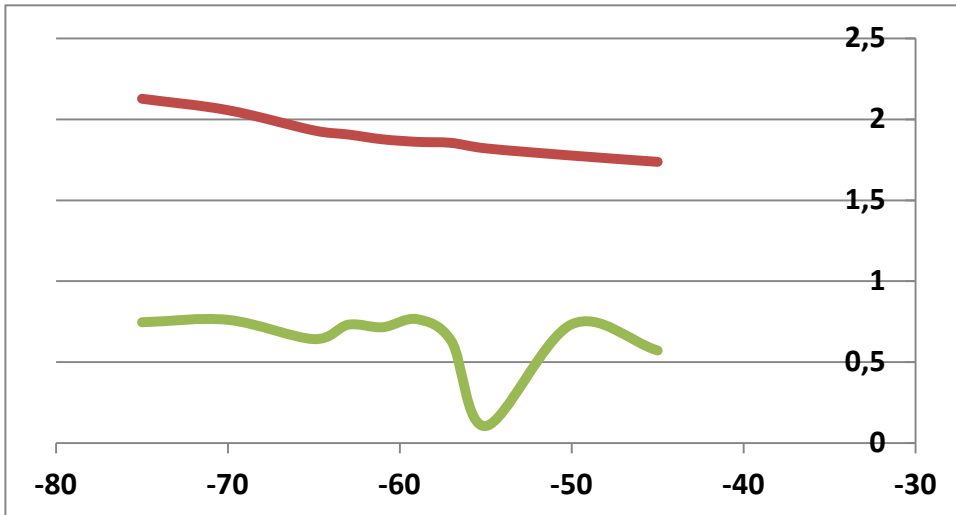


-75









10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brittle Fracture and Impact Testing.

<http://ndt-engineering.blogspot.gr/2011/01/blog-post.htm> . (n.d.).

<http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/30ndt.html>. (n.d.).

<http://users.teiath.gr/vmouss/ebooks/fmndt/sections/308MethYgrwn.html>. (n.d.).

Krautkramer, J. a. (1983). *Ultrasonic Testing of materials*.

P.P Puzak, M. S. (1954).

Robertson.T.S. (1953). *Engineering*.

Χριστοφόρου, Ε. (2011). *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ*. Αθήνα.

Παναγόπουλος, Δ. Ν. (1997). *ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΣΗ ΚΑΙ ΧΥΤΕΥΣΗ*. Αθήνα.

.