ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ & ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Κωτούλας Δημήτριος

Εξεταστική Επιτροπή:

Επιβλέπουσα:	**Ζερβάκη Άννα, Επίκουρη Καθηγήτρια ΕΜΠ**
Μέλη:	**Ανυφαντής Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ**
	Παπαδάκης Γεώργιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κα. Άννα Ζερβάκη, για τη συνεργασία, την καθοδήγησή και την αρωγή της.

Για την παροχή τεχνογνωσίας σχετικά με τον μη-καταστροφικό έλεγχο την εταιρία TQCC και τον κ. Δημήτρη Πιττέρη.

Για την υποστήριξη στις εργαστηριακές εφαρμογές, ευχαριστώ τον κ. Αθανάσιο Μαρκουλή, την κα. Χαρά Σαράφογλου και τον κ. Χαράλαμπο Ξάνθη, μέλη ΕΕΔΙΠ και ΕΤΕΠ, καθώς και τους μεταπτυχιακούς και διδακτορικούς φοιτητές της σχολής: Σταυρούλα Μαρίτσα, Θοδωρή Μαυροζούμη και Στεφανία Σπυροπούλου.

Για την λήψη των φωτογραφιών, τους συμφοιτητές μου: Γιάννη Τζανέτο και Γιώργο Γιαννακούρη.

Και τέλος, την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμπαράστασή τους καθ' όλο αυτό το ταξίδι.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ 11
1.1. Έλεγχος Ποιότητας 12
1.1.1. Σκοπός Συστημάτων Ελέγχου Ποιότητας 12
1.1.2. Σύστημα ISO στις συγκολλήσεις 12
1.1.3. Επίπεδα Ποιότητας 12
1.2. Ελαττώματα Συγκολλήσεων 13
1.2.1. Σειρά 100: Ρωγμές 13
1.2.2. Σειρά 200: Σπηλαιώσεις (cavities) 15
1.2.3. Σειρά 300: Στερεά Εγκλείσματα (solid inclusions) 15
1.2.4. Σειρά 400: Ατελής Τήξη και Διείσδυση (lack of fusion and penetration) 16
1.2.5. Σειρά 500: Ατελές Σχήμα (imperfect shape) 16
1.2.6. Σειρά 600: Άλλες Ατέλειες 17
1.3. Μη Καταστροφικός Έλεγχος 18
1.3.1. Βασικές Αρχές Μη Καταστροφικού Ελέγχου 18
1.3.2. Πιστοποίηση Ελεγκτών 19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ 20
2.1. Ιστορικά Στοιχεία 21
2.2. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός 22
2.2.1. Μεγεθυντικοί Φακοί και Καθρέπτες 22
2.2.2. Ενδοσκόπια και Κάμερες 22
2.2.3. Όργανα Ελέγχου Συγκολλήσεων 23
2.3. Διαδικασία Ελέγχου 24
2.3.1. Προετοιμασία Συγκόλλησης 24
2.3.2. Έλεγχος Προφίλ Συγκόλλησης 25
2.3.3. Έλεγχος Ατελειών 26
2.3.4. Αποδοχή/ Απόρριψη 26
2.3.5. Επανάληψη Ελέγχου κατά την Διάρκεια Υπηρεσίας 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ 27
3.1. Ιστορικά Στοιχεία 28
3.2. Αρχές Λειτουργίας & Φυσικό Υπόβαθρο 29
3.2.1. Επιθυμητά χαρακτηριστικά διεισδυτών 29
3.2.2. Φυσικές Ιδιότητες και Φαινόμενα (Διεισδυτικών) Υγρών 29
3.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός 32
3.3.1. Διεισδυτές (Penetrants) 32

3.3.2. Εμφανιστές (Developers) 32
3.3.3. Καθαριστές (Pre-cleaners) 33
3.3.4. Πρόσθετος Εξοπλισμός 34
3.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο 35
3.4.1. Προκαταρκτικός Καθαρισμός Δοκιμίου 35
3.4.2. Εφαρμογή Διεισδυτή 37
3.4.3. Απόπλυση Πλεονάσματος Διεισδυτή 37
3.4.4. Εφαρμογή Εμφανιστή 38
3.4.5. Αποτελέσματα 38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ 40
4.1. Ιστορικά Στοιχεία 41
4.2. Αρχές Λειτουργίας και Φυσικό Υπόβαθρο 42
4.2.1. Μαγνητισμός Υλικών 42
4.2.2. Διαρροή Μαγνητικού Πεδίου 46
4.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός 47
4.3.1. Καθαριστές (Pre-cleaners) 47
4.3.2. Βαφή Υποστρώματος (Background Color) 47
4.3.3. Διατάξεις Μαγνήτισης 47
4.3.4. Μαγνητικά Σωματίδια 50
4.3.5. Λοιπά Εργαλεία 50
4.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο 51
4.4.1. Προκαταρκτικός Καθαρισμός και Προετοιμασία Επιφάνειας Δοκιμίου 51
4.4.2. Εφαρμογή Υποστρώματος 52
4.4.3. Μαγνητισμός Δοκιμίου & Εφαρμογή Μαγνητικής Μελάνης 53
4.4.4. Αποτελέσματα 54
4.4.5. Απομαγνητισμός Δοκιμίου 56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ 57
5.1. Ιστορικά Στοιχεία 58
5.2. Αρχές Λειτουργίας και Φυσικό Υπόβαθρο 59
5.2.1. Χαρακτηριστικά ηχητικών κυμάτων 59
5.2.2. Ηχητικό Φάσμα – Υπέρηχοι 59
5.2.3. Είδη ηχητικών κυμάτων 60
5.2.4. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο – Παραγωγή υπερηχητικής δέσμης 60
5.2.5. Χαρακτηριστικά Δέσμης Υπερήχων 61
5.2.6. Διάδοση Δέσμης Υπερήχων 63
5.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός 64

5.3.1. Διατάξεις 64
5.3.2. Αισθητήρες 64
5.3.3. Μέθοδοι Απεικόνισης Δεδομένων 65
5.3.4. Μέσο Σύζευξης 66
5.3.5. Πρότυπα Δοκίμια Βαθμονόμησης 66
5.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο 67
5.4.1. Προετοιμασία Επιφανείας Δοκιμίου 67
5.4.2. Επιλογή Αισθητήρων και Βαθμονόμηση 67
5.4.3. Σάρωση 69
5.4.4. Αξιολόγηση και Χαρακτηρισμός Ευρημάτων 71
5.4.5. Διαστασιολόγηση Ατελειών 73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ 74
6.1. Ραδιογραφία 75
6.1.1. Περιγραφή Μεθόδου 75
6.1.2. Αρχή Λειτουργίας 75
6.1.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου 75
6.1.4. Εφαρμογές 76
6.2. Δινορεύματα 77
6.2.1. Περιγραφή Μεθόδου 77
6.2.2. Αρχή λειτουργίας 77
6.2.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου 77
6.2.4. Εφαρμογές 78
6.3. Ακουστική Εκπομπή 79
6.3.1. Περιγραφή Μεθόδου 79
6.3.2. Αρχή Λειτουργίας 79
6.3.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου 79
6.3.4. Εφαρμογές 80
6.4. Θερμογραφία 81
6.4.1. Περιγραφή Μεθόδου 81
6.4.2. Αρχή λειτουργίας 81
6.4.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου 81
6.4.4. Εφαρμογές 81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΦΟΡΗΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ (REPLICA) 82
7.1. Ιστορικά Στοιχεία 83
7.1.1. Μεταλλογραφική Εξέταση Υλικών 83
7.1.2. Ανάπτυξη Μεταλλογραφίας Πεδίου & Φορητής Μεταλλογραφίας 83

7.2. Περί Μεταλλογραφίας 84
7.2.1. Μελέτη Μακροδομής 84
7.2.2. Μελέτη Μικροδομής 84
7.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός και Τεχνικές 86
7.3.1. Λείανση 86
7.3.2. Στίλβωση 86
7.3.3. Ρέπλικα 87
7.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο 88
7.4.1. Λείανση & Στίλβωση 88
7.4.2. Χημική Προσβολή 89
7.4.3. Παραγωγή Ρέπλικας 90
7.4.4. Εξέταση Ρέπλικας στο Μικροσκόπιο 90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ 91
8.1. Εξέταση Συγκολλήσεων Μεταλλικής Κατασκευής 92
8.1.1. Κατά την Ναυπήγηση ενός Πλοίου 92
8.1.2. Έλεγχος Κατά την Διάρκεια Ζωής ενός Πλοίου 93
8.2. Εξέταση Μη Συγκολλητών Μερών 94
8.2.1. Μηχανολογικά μέρη που χρήζουν επιθεώρησης 94
8.2.2. Παχυμετρήσεις 94
8.2.3. Φορητή Μεταλλογραφία 95
8.2.4. Έλεγχος διαρροής 95
8.2.5. Εφαρμογές σε πλωτές κατασκευές 95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ 96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ 97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ 98
Α.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής 98
Α.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας 99
Α.3. Περιγραφή Διαδικασίας 99
Α.3.1. Προκαταρκτική Οπτική Επιθεώρηση 100
Α.3.2. Καθαρισμός Επιφάνειας Δοκιμίου 100
Α.3.3. Οπτική Επιθεώρηση 100
Α.3.4. Εφαρμογή Διεισδυτή 100
Α.3.5. Απομάκρυνση Πλεονάσματος Διεισδυτή 101
Α.3.6. Εφαρμογή Εμφανιστή 101
Α.3.7. Παρατήρηση και Καταγραφή 102
Α.3.8. Καθαρισμός Δοκιμίου 102

Α.4. Αξιολόγηση και Καταγραφή Αποτελεσμάτων 103
Α.4.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών 103
Α.4.2. Σύνταξη Αναφοράς 104
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ 106
Β.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής 106
Β.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας 107
Β.3. Περιγραφή Διαδικασίας 107
Β.3.1. Προκαταρκτική Οπτική Επιθεώρηση 107
Β.3.2. Καθαρισμός Επιφανείας Δοκιμίου 107
Β.3.3. Οπτική Επιθεώρηση 108
Β.3.4. Εφαρμογή Υποστρώματος 108
Β.3.5. Εφαρμογή Μαγνητικής Μελάνης 108
Β.3.6. Εφαρμογή Μαγνητίζουσας Δύναμης 108
Β.3.7. Παρατήρηση και Καταγραφή 109
Β.3.8. Πλήρης Εξέταση Επιφάνειας και Διευθύνσεων 110
Β.3.9. Καθαρισμός Δοκιμίου 111
Β.3.10. Απομαγνητισμός Δοκιμίου 111
Β.4. Αξιολόγηση και Καταγραφή Αποτελεσμάτων 112
Β.4.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών 112
Β.4.2. Σύνταξη Αναφοράς 113
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ 115
C.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής 115
C.2. Περιγραφή Διαδικασίας 116
C.2.1. Καθαρισμός Επιφάνειας Δοκιμίου 116
C.2.2. Οπτική Επιθεώρηση 116
C.2.3. Εκλογή Χρησιμοποιούμενων Κεφαλών και Περιοχής Ελέγχου 116
C.2.4. Κατασκευή Σκαριφήματος 117
C.2.5. Εξοικείωση με το Όργανο 118
C.2.6. Επιλογή και Εφαρμογή Μέσου Σύζευξης (Couplant) 119
C.2.7. Έλεγχος με Αισθητήρα Κάθετης Δέσμης 119
C.2.8. Έλεγχος με Αισθητήρες Δέσμης υπό Γωνία 121
C.2.9. Αξιολόγηση Ευρημάτων 124
C.3. Καταγραφή Αποτελεσμάτων 127
C.3.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών 127
C.3.2. Σύνταξη Αναφοράς 128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ D: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΟΡΗΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ 130

D.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής 130
D.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας 130
D.3. Περιγραφή Διαδικασίας 131
D.3.1. Προετοιμασία Επιφάνειας 131
D.3.2. Χημική Προσβολή 132
D.3.3. Παραγωγή Ρέπλικας 133
D.3.4. Παρατήρηση στο Μικροσκόπιο 134
D.4. Σύνταξη Αναφοράς 134
Βιβλιογραφικές Αναφορές 136
Πίνακας Εικόνων 139
Λίστα Πινάκων 141

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τον μη καταστροφικό έλεγχο (ΜΚΕ) συγκολλήσεων. Απώτερος σκοπός της εργασίας ήταν η παραγωγή γενικών οδηγιών εργασίας για την εκπόνηση του ελέγχου σε εργαστηριακό περιβάλλον. Οι οδηγίες αυτές αφορούν τις μεθόδους για τις οποίες διατίθεται ο απαιτούμενος εξοπλισμός (συσκευές και αναλώσιμα υλικά) στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Αυτές είναι ο έλεγχος με διεισδυτικά υγρά, μαγνητικά σωματίδια, υπερήχους και η φορητή μεταλλογραφία με παραγωγή ρέπλικας. Σημειώνεται πως οι οδηγίες εργασίας που προέκυψαν είναι εξειδικευμένες στην κάθε μέθοδο και τον παρεχόμενο εξοπλισμό αλλά όχι στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Επιπλέον, η κάθε μία εξ αυτών εφαρμόστηκε στο εργαστήριο προκειμένου να εξακριβωθεί η λειτουργικότητά της και η ικανότητα του συντάκτη να φέρει εις πέρας την εξέταση χρησιμοποιώντας τις οδηγίες εργασίας.

Προκειμένου να καταστεί αυτό εφικτό υπήρξε απαραίτητη η μελέτη και κατανόηση των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας και των ελαττωμάτων που ενδέχεται να παρουσιαστούν σε μία συγκόλληση. Ξεχωριστά αναλύθηκε ο οπτικός έλεγχος, καθώς αποτελεί την βάση και το αρχικό στάδιο του μη καταστροφικού ελέγχου.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι μέθοδοι των διεισδυτικών υγρών, μαγνητικών σωματιδίων και υπερήχων αντίστοιχα. Για κάθε μία εξ αυτών, παρατίθενται πληροφορίες για την ιστορική της διαδρομή μέχρι να αποκτήσει τη σημερινή της μορφή, για το φυσικό υπόβαθρο της λειτουργίας της, καθώς και για τον εξοπλισμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεσή της. Σκοπός των παραπάνω, υπήρξε η βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας της κάθε μεθόδου και των παραμέτρων που καθορίζουν το πεδίο εφαρμογών της και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά της. Ακολούθως, παρουσιάστηκαν τα στάδια της διαδικασίας ελέγχου (προσαρμοσμένα στην μεθοδολογία που χρησιμοποιεί ο εξοπλισμός του ΕΝΤ), και τα σημεία στα οποία πρέπει να δίνεται προσοχή κατά τη διενέργειά της. Ξεχωριστά αναπτύχθηκε η μέθοδος της φορητής μεταλλογραφίας, στην οποία έγινε επιπλέον σύντομη αναφορά σε στοιχεία της μεταλλογραφίας των υλικών. Το καθένα από τα κεφάλαια αυτά εμπλουτίστηκε με φωτογραφικό υλικό που προέκυψε από την διεκπεραίωση του ελέγχου στο εργαστήριο. Για λόγους πληρότητας, παρουσιάστηκαν και άλλες μέθοδοι μη-καταστροφικού ελέγχου, οι οποίες δεν καλύφθηκαν εργαστηριακά (ραδιογραφία, έλεγχος με δινορεύματα και ακουστική εκπομπή, θερμογραφία).

Τέλος, συμπεριλήφθηκαν πληροφορίες για τις συνηθέστερες εφαρμογές των μεθόδων που εξετάστηκαν στη ναυπηγική βιομηχανία καθώς και οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι εν λόγω εφαρμογές.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με τις οδηγίες εργασίας που συντάχθηκαν για τις 4 μεθόδους. Σε αυτές δίνεται έμφαση στις τεχνικές λεπτομέρειες που πρέπει να γνωρίζει ο εργαζόμενος και τα στάδια διενέργειάς τους.

ABSTRACT

The current Diploma Thesis covers the non-destructive testing (NDT) of welds. The ultimate goal of this thesis was to produce procedure instructions for testing in the laboratory environment. These instructions refer only to the methods for which the required equipment (devices and consumables) is available at the Shipping Technology Laboratory (STL) of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of NTUA. These are namely: liquid penetrant testing, magnetic particle inspection, ultrasound testing and field metallography with the means of replica. It is noted that the resulting procedure instructions are specific to each method and the equipment provided, but not to the test piece under examination. In addition, each of them was applied in the laboratory to verify its functionality and the author's ability to carry out the examination using the same instructions.

To make this possible, it was necessary to study and understand the quality management systems and the defects that may occur in a weld. Visual inspection was analyzed separately, as it is the basis and the initial stage of non-destructive testing.

Subsequently, the methods of liquid penetrants, magnetic particles and ultrasound were studied. For each of them, information is provided on its historical course that preceded its current form, on the scientific background of its operation, as well as on the equipment that can be used for its execution. The goal was to develop a deeper understanding of the operation of each method and the parameters that determine its field of applications and affect its effectiveness. Subsequently, the steps of the testing process (adapted to the general category of the laboratory equipment), and the points that required attention during its conduct were presented. The method of field metallography was examined separately and also included a brief reference on metallography. Each of these chapters was enriched with photographs captured during the testing procedure in the laboratory. For the sake of completeness, other methods of non-destructive testing were presented, though not carried out in the laboratory (radiography, eddy current and acoustic emission testing, thermography).

Finally, information was included regarding the most common applications of the methods examined in the maritime industry as well as the peculiarities of these applications.

The thesis was completed with the procedure instructions prepared for the 4 methods. In these, emphasis is placed on the technical details that the tester must be familiar with and the stages of their conduct.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

Η ποιότητα μιας κατασκευής αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργικότητάς της. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η θέσπιση προτύπων καθορισμού και ελέγχου της ποιότητας των συγκολλήσεων.

1.1. Έλεγχος Ποιότητας

1.1.1. Σκοπός Συστημάτων Ελέγχου Ποιότητας

Η ποιότητα και το κόστος είναι αδιαμφισβήτητα οι δύο κύριοι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την προθυμία του καταναλωτή να προχωρήσει στην αγορά ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Υψηλή ποιότητα σε συνάρτηση με χαμηλή τιμή καθιστά ένα προϊόν ανταγωνιστικό στην αγορά. Το παραπάνω αφορά εξίσου ιδιώτες καταναλωτές όσο και μεγάλες πολυεθνικές εταιρίες, και η ναυτιλιακή βιομηχανία δεν αποτελεί εξαίρεση.

Ωστόσο, ο καθορισμός της ποιότητας αποτελεί πρόκληση και συχνά πρόκειται για υποκειμενικό ζήτημα, εξ ου και η ανάγκη θέσπισης μοντέλων τα οποία καταδεικνύουν εάν ένα προϊόν ή υπηρεσία συμμορφώνεται με ορισμένα κριτήρια, τα οποία αφορούν συνιστώσες της ποιότητας τους. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, έχουν θεσπιστεί διαφορετικά πρότυπα διαχείρισης ποιότητας όπου ορίζουν τα κριτήρια με τα οποία πρέπει να συμμορφώνεται ο παραγωγός. Το πλέον διαδεδομένο σύστημα διαχείρισης ποιότητας είναι το πρότυπο ISO 9001 και αποσκοπεί στη διασφάλιση παροχής προϊόντων και υπηρεσιών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις των πελατών.

1.1.2. Σύστημα ISO στις συγκολλήσεις

Στην περίπτωση των συγκολλήσεων χρησιμοποιείται ξεχωριστό, εξειδικευμένο σύστημα ποιότητας. Αυτό είναι το πρότυπο ISO 3834: 2021, το οποίο περιγράφει τις απαιτήσεις ποιότητας για την συγκόλληση μετάλλων με τήξη. Σχηματίζεται με αυτόν τον τρόπο ένα κανονιστικό πλαίσιο, το οποίο αφορά τις διαδικασίες, τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, το προσωπικό και την επιθεώρηση και έλεγχο των εργασιών συγκόλλησης. Τα παραπάνω καθορίζονται από μία οικογένεια προτύπων, τα οποία εξειδικεύονται σε κάποια από τις πτυχές της διαδικασίας ή σε συγκεκριμένα υλικά και μεθόδους συγκόλλησης.

1.1.3. Επίπεδα Ποιότητας

Το Επίπεδο Ποιότητας στο οποίο υπάγεται μια συγκολλητή κατασκευή χαρακτηρίζει την ικανότητά της να παραλαμβάνει συγκεκριμένα φορτία χωρίς να αστοχεί. Ανάλογα με τις απαιτήσεις παραλαβής φορτίων και τις συνθήκες λειτουργίας της, καθορίζονται διαφορετικά επίπεδα ποιότητας. Από το υψηλότερο στο χαμηλότερο επίπεδο διακρίνονται σε B, C, D. Οι απαιτήσεις για την συμμόρφωση με κάθε επίπεδο ποιότητας περιγράφονται στο ISO 3834: 2021 [1].

1.2. Ελαττώματα Συγκολλήσεων

Η ύπαρξη και η φύση των ατελειών είναι καταλυτικός παράγοντας για τον καθορισμό της ποιότητας ενός προϊόντος. Τα ελαττώματα συγκολλήσεων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διαφορετικά κριτήρια. Λόγου χάριν, μια μέθοδος κατάταξης ορίζεται σύμφωνα με την AWS (American Welding Society) και τα διακρίνει σε:

1. Ελαττώματα που οφείλονται στην μέθοδο και την εκτέλεση της συγκόλλησης
2. Μεταλλουργικά ελαττώματα
3. Ελαττώματα που οφείλονται στην μελέτη και σχεδίαση της συγκόλλησης

Επιπλέον, τα ελαττώματα συγκολλήσεων μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την περιοχή στην οποία εμφανίζονται. Συγκεκριμένα διακρίνονται σε:

1. Ελαττώματα στο μέταλλο συγκόλλησης
2. Ελαττώματα στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη
3. Ελαττώματα στο βασικό μέταλλο

Η παρούσα ενότητα βασίζεται στο πρότυπο ποιότητας ISO 6520-1: 2007 (Welding and Allied Processes – Classification of Geometric Imperfections in Metallic Materials – Part 1: Fusion Welding). Το εν λόγω πρότυπο κατατάσσει τις γεωμετρικές ατέλειες στις έξι κατηγορίες που ακολουθούν, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους, και υιοθετείται από το διεθνές ινστιτούτο συγκολλήσεων IIW (International Institute of Welding). Η ταξινόμηση των ασυνεχειών πραγματοποιείται με τριψήφιους ή τετραψήφιους αριθμούς οι οποίοι τις κατηγοριοποιούν σε διαφορετικά επίπεδα.

Αρχικά όμως, κρίνεται σκόπιμο να διακριθεί η έννοια της ασυνέχειας/ατέλειας από αυτή του σφάλματος. Με την πρώτη, γίνεται αναφορά σε κάθε γεωμετρική απόκλιση της συγκόλλησης από την ιδανική, ενώ σφάλματα θεωρούνται μόνο οι μη αποδεκτές εκ των ατελειών.

1.2.1. Σειρά 100: Ρωγμές

Ρωγμή καλείται κάθε ασυνέχεια η οποία οφείλεται σε θραύση και χαρακτηρίζεται από οξύ άκρο και μεγάλο λόγο μήκους προς πλάτος ως προς το άνοιγμά της [1]. Η ψαθυρότητα των υλικών και η παρουσία εφελκυστικών τάσεων είναι παράγοντες που ευνοούν την εμφάνισή τους, ενώ συνιστούν ιδιαίτερα επικίνδυνο παράγοντα για την αστοχία ενός μηχανικού μέρους στο οποίο εμφανίζονται, καθώς η διάδοση τους κατά την μηχανική καταπόνηση δύναται να επιφέρει θραύση. Ως απόρροια των παραπάνω, οι κανονισμοί συνήθως δεν κρίνουν την ύπαρξή τους ως αποδεκτή. Οι ρηγματώσεις αποτελούν το κοινό αποτέλεσμα των παρακάτω περιγραφόμενων φαινομένων.

1.2.1.1. Θερμή Ρηγμάτωση (Hot Cracking)

Η συγκεκριμένη κατηγορία αφορά στην εμφάνιση ρωγμών είτε κατά τα τελευταία στάδια στερεοποίησης της λίμνης συγκόλλησης (Ρηγμάτωση Στερεοποίησης), είτε σπανιότερα κατά την ρευστοποίηση της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης (ΘΕΖ) κοντά στην γραμμή σύντηξης, όταν η κόλληση εκτίθεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (Ρηγμάτωση Ρευστοποίησης). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων εμφανίζεται στην επιφάνεια της ραφής κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης καθώς και στην απόληξή της (κρατήρας). Ανεπιθύμητα στοιχεία, ακαθαρσίες και παράγοντες που οδηγούν στην εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων (όπως η υψηλή ταχύτητα συγκόλλησης, τα μεγάλα διάκενα και η ελλιπής συγκράτηση μεταξύ των υπό συγκόλληση στοιχείων) αποτελούν πρόσφορο έδαφος για την εμφάνιση θερμής ρηγμάτωσης. Τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία από τους χάλυβες στην ανάπτυξη του φαινομένου.

[1] [2] (Παντελής, Παπάζογλου, & Χαϊδεμενόπουλος, 2017)

1.2.1.2. Ψυχρή Ρηγμάτωση - Ρηγμάτωση Υδρογόνου (Hydrogen Induced Cold Cracking)

Η ρηγμάτωση υδρογόνου ξεκινά στην ΘΕΖ της συγκόλλησης και συγκεκριμένα κάτω από την ραφή (under-bead crack), στον πόδα (toe crack) ή στην ρίζα της συγκόλλησης (root crack). Στη συνέχεια, ενδέχεται να επεκταθεί στη ζώνη συγκόλλησης. Προκειμένου να εμφανιστεί πρέπει να ικανοποιούνται στο σύνολο τους οι παρακάτω συνθήκες:

- Υψηλά επίπεδα υδρογόνου
- Ύπαρξη εφελκυστικών τάσεων
- Θερμοκρασία χαμηλότερη των 300 βαθμών Κελσίου
- Ευαίσθητη μικροδομή

Σε ψυχρή ρηγμάτωση είναι επιρρεπείς κατά κύριο λόγο οι χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης με μεσαία ή υψηλή περιεκτικότητα άνθρακα. Το φαινόμενο είναι πιθανό να εμφανιστεί μέχρι και επτά ημέρες μετά την εργασία, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ιδιαιτερότητες στον εντοπισμό του.

1.2.1.3. Περικρυσταλλική Ρηγμάτωση

Εντοπίζεται σε ανοξείδωτους χάλυβες (και δη υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα) και συγκεκριμένα στα σύνορα των κόκκων.

1.2.1.4. Ρηγμάτωση Αναθέρμανσης (Reheat Cracking)

Ο συγκεκριμένος τύπος ρηγμάτωσης εμφανίζεται περικρυσταλλικά σε χάλυβες (συνήθως χαμηλής κραμάτωσης) που δέχονται θερμική καταπόνηση κατά την λειτουργία τους.

1.2.1.5. Διαστρωμάτικη Ρηγμάτωση (Lamellar Tearing)

Αποτελεί ένα φαινόμενο ρηγμάτωσης το οποίο εμφανίζεται κάτω από συγκολλήσεις, στο μέταλλο βάσης και συχνά εκτός της ΘΕΖ [2]. Χωρικά εντοπίζεται κάτω από το όριο της ραφής (παράλληλα σε αυτή) αυχενικών συγκολλήσεων.

Ενδεικτικά, οι ρωγμές κατατάσσονται, αρχικά ανάλογα με την διεύθυνσή τους και εν συνεχεία με βάση την περιοχή εμφάνισής τους σύμφωνα με το ISO 6520-1, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί [Πίνακας 1.1].

Πίνακας 1.1 Κατηγοριοποίηση Ρωγμών κατά ISO 6520-1

<table>
<tr><th colspan="4">Σειρά 100: Ρωγμές</th></tr>
<tr><td>1001</td><td>Μικρορωγμές</td><td colspan="2">Συμπεριλαμβάνονται ρωγμές, των οποίων η παρατήρηση είναι εφικτή μόνο μέσω μικροσκοπίου</td></tr>
<tr><td>101</td><td>Διαμήκεις</td><td>Ρωγμές με διεύθυνση παράλληλη στον άξονα συγκόλλησης</td><td rowspan="6">Διακρίνονται ανάλογα με την θέση εμφάνισής τους στις παρακάτω κατηγορίες, λαμβάνοντας το αντίστοιχο τέταρτο ψηφίο:
(1) Στο μέταλλο συγκόλλησης
(2) Στην ραφή της συγκόλλησης
(3) Στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη
(4) Στο μέταλλο βάσης</td></tr>
<tr><td>102</td><td>Εγκάρσιες</td><td>Ρωγμές με διεύθυνση κάθετη στον άξονα της συγκόλλησης.</td></tr>
<tr><td>103</td><td>Αστεροειδείς</td><td>Ρωγμές οι οποίες πηγάζουν από κοινό σημείο</td></tr>
<tr><td>104</td><td>Ρωγμές Κρατήρα</td><td>Ρωγμές στο εκτεθειμένο άκρο της ραφής συγκόλλησης</td></tr>
<tr><td>105</td><td>Ομάδα ασύνδετων ρωγμών</td><td>Ομάδα ρωγμών, ασχέτως διεύθυνσης</td></tr>
<tr><td>106</td><td>Διακλαδούμενες ρωγμές</td><td>Ομάδα συνδεδεμένων ρωγμών οι οποίες προκύπτουν από κοινή αρχική ρωγμή.</td></tr>
</table>

[2] [3] (Farrar & Dolby, 1972)

1.2.2. Σειρά 200: Σπηλαιώσεις (cavities)

Οι σπηλαιώσεις είναι το συνηθέστερα εμφανιζόμενο είδος ατελειών στις συγκολλήσεις. Αποτελούν ασυνέχειες του μεταλλικού υλικού, που οφείλονται στην ύπαρξη αέριων διάκενων σε αυτό.

1.2.2.1. Πόροι αερίου (gas pores)

Πρόκειται για το συνηθέστερο σφάλμα της κατηγορίας των σπηλαιώσεων. Δημιουργούνται από την παγίδευση αερίων στο τηγμένο μέταλλο, τα οποία δημιουργούν φυσαλίδες κατά τη στερεοποίηση. Έχουν σφαιρικό σχήμα και μπορεί να οφείλονται σε εσφαλμένη τεχνική και κακό σχεδιασμό των συνθηκών συγκόλλησης. Ανάλογα με την κατανομή τους, οι πόροι διακρίνονται σε:

- Ομοιόμορφα κατανεμημένους (uniformly distributed / scattered porosity), οι οποίοι απλώνονται σε ένα τμήμα της συγκόλλησης. Στην περίπτωση που οι πόροι διαρρηγνύουν τη συνέχεια της ραφής συγκόλλησης, προκύπτει επιφανειακό πορώδες (surface porosity).
- Συγκεντρωμένους (cluster porosity), οι οποίοι σχηματίζουν ομάδες σε σημεία της συγκόλλησης, στα οποία παρουσιάστηκαν προβλήματα στο άναμμα και σβήσιμο του ηλεκτρικού τόξου.
- Γραμμικής κατανομής (linear porosity), οι οποίοι εμφανίζονται πέριξ των «πάσων».
- Μεμονωμένους (isolated pores).

1.2.2.2. Σκωληκότρυπες (wormholes)

Πρόκειται για επιμήκεις ή σωληνοειδείς κοιλότητες, οι οποίες στην ουσία αποτελούν επιμηκυμένους πόρους και προκύπτουν από την προοδευτική παγίδευση αερίων. Ενδέχεται να αποκτήσουν ακανόνιστο σχήμα και εμφανίζονται συχνότερα σε αυχενικές συγκολλήσεις.

1.2.2.3. Διάκενα κρατήρα (crater pipe)

Πρόκειται για κοιλότητα συρρίκνωσης στο τέλος μιας διαδρομής συγκόλλησης. Προκύπτει από την συστολή του μετάλλου συγκόλλησης κατά την πήξη του, η οποία οδηγεί στη δημιουργία κενού. Εμφανίζεται συχνότερα σε συγκολλήσεις TIG.

1.2.3. Σειρά 300: Στερεά Εγκλείσματα (solid inclusions)

Τα στερεά εγκλείσματα είναι ξένα στοιχεία, μεταλλικής ή μη προέλευσης, που παγιδεύονται στο μέταλλο συγκόλλησης. Συνήθως διακρίνονται από ακανόνιστο σχήμα, το οποίο τα διαφοροποιεί από τη σφαιρική μορφή των πόρων. Μπορούν ακολούθως να διακριθούν σε ευρύτερες κατηγορίες.

1.2.3.1. Εγκλείσματα σκωρίας (slag inclusions)

Πρόκειται για μη μεταλλικά σωματίδια παγιδευμένα στο μέταλλο συγκόλλησης. Συνήθως σχηματίζονται στα όρια των «πάσων» μιας συγκόλλησης.

1.2.3.2. Εγκλείσματα σκόνης (flux inclusions)

Πρόκειται για παγίδευση σκόνης, η οποία μπορεί να προέρχεται από την επένδυση των ηλεκτροδίων ή τη σκόνη που καλύπτει το τόξο στην περίπτωση της συγκόλλησης βυθιζόμενου τόξου (SAW).

1.2.3.3. Εγκλείσματα οξειδίου (oxide inclusions)

Εμφανίζονται στο τηγμένο μέταλλο και ενδέχεται να προέρχονται από οξείδια του μετάλλου βάσης ή του μετάλλου συγκόλλησης. Ιδιαίτερα επιρρεπείς στην εμφάνιση εγκλεισμάτων οξειδίου είναι οι συγκολλήσεις αλουμινίου και κραμάτων του.

1.2.3.4. Εγκλείσματα βολφραμίου (tungsten inclusions)

Εμφανίζονται σε συγκολλήσεις με μη αναλισκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου. Αιτίες μπορεί να αποτελέσουν το υψηλό ρεύμα συγκόλλησης ή η βύθιση του ηλεκτροδίου συγκόλλησης στο τηγμένο μέταλλο.

1.2.3.5. Εγκλείσματα χαλκού

Σχηματίζονται κατά την ανάφλεξη, η οποία ενδέχεται να προκύψει σε συγκολλήσεις που χρησιμοποιούν προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου.

1.2.4. Σειρά 400: Ατελής Τήξη και Διείσδυση (lack of fusion and penetration)

1.2.4.1. Ατελής Τήξη

Η ατελής τήξη περιγράφει το φαινόμενο της ύπαρξης κενών τα οποία οφείλονται στην ανεπαρκή τήξη του μετάλλου βάσης (ή προηγούμενων στρωμάτων συγκόλλησης) με το μέταλλο συγκόλλησης.

Εξαιτίας της μορφής τους αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και κατ' επέκταση κρίσιμα στοιχεία για την ποιότητα μιας συγκόλλησης.

1.2.4.2. Ατελής Διείσδυση

Η ατελής διείσδυση προκύπτει σε περιπτώσεις ανεπαρκούς πλήρωσης του διακένου μεταξύ των συγκολλούμενων μετάλλων στην περιοχή της ρίζας.

1.2.5. Σειρά 500: Ατελές Σχήμα (imperfect shape)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ατέλειες που σχετίζονται με τη γεωμετρία της ραφής. Ορισμένες από τις ευρύτερες κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται, αναπτύσσονται παρακάτω.

1.2.5.1. Υποκοπή (Undercut)

Η υποκοπή συνήθως συναντάται κοντά στη ραφή της συγκόλλησης, υπό τη μορφή εγκοπής ή αυλάκωσης. Εμφανίζεται στην ένωση του μετάλλου βάσης με το μέταλλο συγκόλλησης.

1.2.5.2. Υπερκάλυψη (Overlap)

Η υπερκάλυψη εμφανίζεται ως εξόγκωμα στον πόδα της συγκόλλησης, χωρίς να υπάρχει σύντηξη με το μέταλλο βάσης.

1.2.5.3. Ελαττωματική κυρτότητα ή κοιλότητα όψης (defective convexity or concavity)

Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται ελαττώματα που αφορούν τη μορφή της ραφής μιας αυχενικής συγκόλλησης.

1.2.6. Σειρά 600: Άλλες Ατέλειες

Ελαττώματα που δεν ανήκουν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες, περιλαμβάνονται σε αυτήν τη σειρά. Δύο βασικές κατηγορίες τέτοιων ατελειών περιγράφονται παρακάτω.

1.2.6.1. Ανάμματα τόξου (arc strike)

Το εν λόγω ελάττωμα προξενείται από την έναυση του τόξου εκτός της περιοχής συγκόλλησης και οδηγεί στην τήξη μέρους του μετάλλου βάσης. Είναι επικίνδυνη, καθώς ενδέχεται να οδηγήσει στο σχηματισμό ρωγμών στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.

1.2.6.2. Εκτόξευση μετάλλου (spatter)

Πρόκειται για ποσότητα τηγμένου μετάλλου που εκτοξεύεται από τη λίμνη συγκόλλησης και στη συνέχεια επικάθεται και στερεοποιείται στην επιφάνεια του μετάλλου βάσης.

Η υπερβολική εκτόξευση μετάλλου δεν επηρεάζει τις ιδιότητες της προκύπτουσας συγκόλλησης. Ωστόσο, οφείλεται σε λανθασμένες πρακτικές κατά τη συγκόλληση, οι οποίες ενδέχεται να έχουν οδηγήσει στην δημιουργία άλλων, επικινδυνότερων ασυνεχειών.

[4]

1.3. Μη Καταστροφικός Έλεγχος

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επάρκεια μιας κατασκευής σύμφωνα με το προκαθορισμένο επίπεδο απαιτούμενης ποιότητας, θα πρέπει τα στάδια της παραγωγής και των κατεργασιών της να διαδεχτεί ο έλεγχος για ατέλειες.

Στην περίπτωση μαζικώς παραγόμενων προϊόντων ενδέχεται να είναι επαρκής ο καταστροφικός έλεγχος, ο οποίος περιλαμβάνει μεθόδους που προϋποθέτουν την καταστροφή ή οδηγούν στην αστοχία του εξεταζόμενου μέρους. Ο καταστροφικός έλεγχος επιτρέπει να εξαχθούν συμπεράσματα για την αντοχή και την σκληρότητα ενός δοκιμίου, να αναλυθεί μεταλλογραφικά κ.α. Τα πορίσματα του ελέγχου καταδεικνύουν εάν η διαδικασία παραγωγής του προϊόντος επιφέρει τα προσδοκόμενα αποτελέσματα.

Στις περιπτώσεις που απαιτείται η διατήρηση της ικανότητας ενός δοκιμίου να λειτουργεί για τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε, θα πρέπει να επιστρατευθεί ο μη καταστροφικός έλεγχος.

1.3.1. Βασικές Αρχές Μη Καταστροφικού Ελέγχου

Ο μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ), Non-Destructive Testing (NDT), είναι ικανός να εντοπίσει ατέλειες ενός προϊόντος χωρίς να επηρεάζει την μελλοντική του λειτουργία. Μέσα από διαφορετικές τεχνικές και εργαλεία, καθιστά εφικτό τον εντοπισμό και τη διαστασιολόγηση (ενίοτε προσεγγιστικά) των ασυνεχειών ενός υλικού.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του ΜΚΕ, είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός των ασυνεχειών σε αποδεκτές ή σφάλματα, ανάλογα με τα επιτρεπόμενα όρια του ισχύοντος επιπέδου ποιότητας. Σε περίπτωση εντοπισμού σφαλμάτων, το υπό έλεγχο μέρος θα πρέπει να επιδιορθωθεί ή να αντικατασταθεί από ένα νέο.

1.3.1.1. Προκύπτουσες ενδείξεις μη καταστροφικού ελέγχου

Οι ενδείξεις που προκύπτουν από τον ΜΚΕ ενός δοκιμίου κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τα αίτια που τις προκαλούν και αξιολογούνται αντιστοίχως. Αυτές είναι:

- **Μη σχετικές**: καλούνται οι ενδείξεις οι οποίες προκύπτουν σε σημεία όπου δρουν οι παράγοντες στους οποίους βασίζεται η λειτουργία της εκάστοτε μεθόδου ελέγχου, αλλά δεν αποτελούν ασυνέχεια. Οφείλονται σε κατασκευαστικά στοιχεία, όπως η γεωμετρία, η τραχύτητα της επιφανείας ή η συναρμολόγηση ενός μηχανολογικού μέρους. Καθώς δεν καταδεικνύουν την ύπαρξη ατελειών, δεν θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη.
- **Εσφαλμένες:** είναι οι ενδείξεις οι οποίες προέρχονται από κάποια απροσεξία του ελεγκτή κατά την εκπόνηση της εξέτασης και με σωστούς χειρισμούς μπορεί να αποφευχθεί η εμφάνισή τους.
- **Σχετικές:** ονομάζονται οι ενδείξεις οι οποίες οφείλονται σε ασυνέχειες του υλικού του εξεταζόμενου μέρους, κατηγορία στην οποία πρακτικά ανήκουν οι ενδείξεις που αποκλείονται από τις δύο προηγούμενες.

Ακολούθως, λαμβάνει χώρα η διαστασιολόγηση, χαρακτηρισμός της φύσης και αξιολόγηση των ασυνεχειών που εντοπίστηκαν (προκύπτουσες σχετικές ενδείξεις). Ως σφάλματα χαρακτηρίζονται μόνον οι ασυνέχειες, οι οποίες υπερβαίνουν τα όρια που καθορίζει το αποζητούμενο επίπεδο ποιότητας. Τα κριτήρια αποδοχής μίας συγκολλητής συναρμογής στο εκάστοτε επίπεδο ποιότητας προσδιορίζονται από το ISO 5817: 2023[3] (ή από το ISO 10042 για συγκολλήσεις αλουμινίου και

[3] [5] (International Organization for Standardization, 2023)

των κραμάτων του), λαμβάνοντας υπόψιν τις ασυνέχειες που έχουν εντοπιστεί κατά τον έλεγχο της συγκόλλησης.

Σημειώνεται πως συνήθως δεν είναι εφικτός ο ακριβής προσδιορισμός των διαστάσεων μιας ασυνέχειας, παρότι κάθε μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου αποδίδει μετρήσιμα αποτελέσματα. Συνεπώς, η αντιστοίχιση με τα επιτρεπτά όρια που καθορίζει το επίπεδο ποιότητας, πραγματοποιείται διαμέσω προσαρμοσμένων πινάκων εξειδικευμένων στην εκάστοτε μέθοδο ΜΚΕ.

1.3.1.2. Δυνατότητες μη καταστροφικού ελέγχου

Η δυνατότητα μιας μεθόδου να επιφέρει ακριβή αποτελέσματα περιγράφεται μέσω δύο βασικών χαρακτηριστικών της:

- Ευαισθησία: περιγράφει την ικανότητα εντοπισμού ασυνεχειών με βάση το μέγεθός τους.
- Διακριτική ικανότητα: περιγράφει την ικανότητα διάκρισης δύο ξεχωριστών ασυνεχειών που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη.

1.3.2. Πιστοποίηση Ελεγκτών

Οι ελεγκτές, οι οποίοι εκτελούν τα στάδια του μη καταστροφικού ελέγχου, πιστοποιούνται κατά τα αντίστοιχα πρότυπα, προκειμένου να εξακριβωθεί η δυνατότητά τους να φέρουν εις πέρας την διαδικασία και περιορίζοντας στο ελάχιστο δυνατό αστοχίες που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα. Η πιστοποίηση περιλαμβάνει εκπαίδευση και εξέταση των δυνατοτήτων του ατόμου και αφορά συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου.

Επιπλέον, υπάρχουν τρία επίπεδα πιστοποίησης με διαφορετικές αρμοδιότητες σε κάθε περίπτωση:

- Level 1: είναι αρμόδιος για την εκπόνηση του ελέγχου και την καταγραφή των ενδείξεων που προκύπτουν από αυτόν.
- Level 2: είναι αρμόδιος για την ερμηνεία των ενδείξεων που καταγράφηκαν από την εξέταση. Επιπλέον, μπορεί να εκτελέσει ή να εποπτεύσει την διαδικασία ελέγχου.
- Level 3: είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της ακολουθούμενης διαδικασίας και μπορεί να συντάξει οδηγίες εργασίας. Είναι επίσης αρμόδιος για την βεβαίωση των αποτελεσμάτων του ελέγχου. Προκειμένου να εκτελέσει ο ίδιος την εργασία, θα πρέπει να διαθέτει και πιστοποίηση level 2.

Για την αναβάθμιση του επιπέδου πιστοποίησης, ο ελεγκτής θα πρέπει να έχει συμπληρώσει ορισμένο διάστημα προϋπηρεσίας στο τρέχον επίπεδο.

[6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

Ο οπτικός έλεγχος, Visual Testing (VT), αποτελεί την βάση του μη καταστροφικού ελέγχου. Δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού επιφανειακών ατελειών είτε με γυμνό μάτι είτε με την χρήση οπτικών βοηθημάτων ή και άλλων οργάνων.

Διενεργείται καθ΄ όλα τα στάδια παραγωγής ενός μέρους προκειμένου να εξασφαλίσει πως το τελικό προϊόν εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις ποιότητας που έχουν τεθεί.

2.1. Ιστορικά Στοιχεία

Ο οπτικός έλεγχος αποτελεί την πρώτη και απλούστερη μορφή μη καταστροφικού ελέγχου που εμφανίστηκε. Ήδη από την αρχαιότητα ο άνθρωπος έλεγχε τις κατασκευές του (μεταλλικές και μη) για ατέλειες, οι οποίες ήταν εμφανές πως τους προσέδιδαν πτωχότερες ιδιότητες.

Ωστόσο ο οπτικός έλεγχος είναι συνυφασμένος με τις απαρχές τις βιομηχανίας, στην οποία και εντοπίζεται με δύο εκφάνσεις. Αφενός, με την επιθεώρηση μεταλλικών μηχανημάτων για τον εντοπισμό ρωγμών και την εκτίμηση της διάβρωσης της επιφάνειάς τους. Αφετέρου, με την συστηματική εξέταση των προϊόντων για ατέλειες. Με την πάροδο των ετών η διαδικασία διενέργειας του ελέγχου σταδιακά εξελίχθηκε, προκειμένου να εξασφαλιστούν αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας και συνέπειας.

Σημαντική εξέλιξη της μεθόδου αποτέλεσε η υιοθέτηση οπτικών βοηθημάτων ως στοιχεία του εξοπλισμού του οπτικού ελέγχου. Αφετηρία για αυτό αποτέλεσε, στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η χρήση του ενδοσκοπίου (borescope) , το οποίο έως τότε τύγχανε εφαρμογών στο πεδίο της ιατρικής. Ο 2^{ος} Παγκόσμιος Πόλεμος, ο οποίος ακολούθησε, οδήγησε στην διάδοση και εξέλιξη του οπτικού ελέγχου και του εξοπλισμού που τον συνόδευε.

Στην πορεία, τόσο η ανάγκη αξιοπιστίας του οπτικού ελέγχου, όσο και οι γενικότερες εξελίξεις στον χώρο του μη καταστροφικού ελέγχου, οδήγησαν στην θέσπιση προτύπων για τη διενέργεια της μεθόδου. Στον τομέα των συγκολλήσεων το αντίστοιχο πρότυπο του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης (International Organization for Standardization– ISO), είναι το ISO 17637: 2016[4].

[6], [8]

[4] [7] (International Organization for Standardization, 2016)

2.2. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά τον οπτικό έλεγχο ποικίλει και ενδέχεται να εξυπηρετεί την απευθείας ή την εξ αποστάσεως επιθεώρηση του δοκιμίου.

2.2.1. Μεγεθυντικοί Φακοί και Καθρέπτες

Οι μεγεθυντικοί φακοί παραμορφώνουν την όψη του εστιαζόμενου μέρους με αποτέλεσμα αυτό να προβάλλεται μεγεθυμένο στο μάτι του ελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται ο εντοπισμός ενδείξεων μικρότερου μεγέθους οι οποίες ενδεχομένως παραλείπονταν κατά την εξέταση με γυμνό μάτι. Επιπλέον, καθίσταται εφικτή η ευκρινέστερη επιθεώρηση ασυνεχειών μικρότερου μεγέθους, διευκολύνοντας τον χαρακτηρισμό τους.

Αντίστοιχα, οι καθρέπτες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την επιθεώρηση δυσπρόσιτων περιοχών του εξεταζόμενου δοκιμίου.

2.2.2. Ενδοσκόπια και Κάμερες

Τα ενδοσκόπια αποτελούν οπτικά βοηθήματα τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα εξέτασης δυσπρόσιτων περιοχών προσφέροντας ταυτόχρονα φωτισμό της. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με σύστημα φακών (rigid borescope). Σε αυτήν την περίπτωση, διαθέτουν σταθερή κυλινδρική απόληξη και συχνά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του εσωτερικού τοιχώματος σωληνώσεων. Εναλλακτικά, μεταδίδουν την εικόνα μέσω οπτικής ίνας (fiberscope), διαθέτοντας εύκαμπτη απόληξη. Το χαρακτηριστικό αυτό, επιτρέπει την προσέγγιση περιοχών δοκιμίων μεγαλύτερης γεωμετρικής πολυπλοκότητας, όπως σωλήνες με καμπυλότητα και μπλοκ κινητήρων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα ενδοσκόπια είναι εφοδιασμένα με ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης προκειμένου να μπορούν να διαστασιολογηθούν οι παρατηρούμενες ασυνέχειες.

Αντίστοιχες εφαρμογές βρίσκουν και συστήματα καμερών τα οποία επιτρέπουν την εξ αποστάσεως προσέγγιση, παρατήρηση και καταγραφή περιοχών, οι οποίες παρουσιάζουν δυσκολίες στην φυσική πρόσβαση του ελεγκτή. Κάμερες μπορούν να τοποθετηθούν και σε φορεία (όπως drones) ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Οι κάμερες χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις και στα ενδοσκόπια (video borescopes), μεταδίδοντας την καταγραφόμενη εικόνα προς εξωτερική οθόνη, στην οποία προβάλλεται σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 2.1)[5]. Οι συγκεκριμένες συσκευές έχουν αντίστοιχη όψη (και προσφέρουν αντίστοιχες δυνατότητες εξέτασης) με τα ενδοσκόπια οπτικής ίνας.

Εικόνα 2.1 Ενδοσκόπιο Κάμερας
Πηγή: General [generaltools.com]

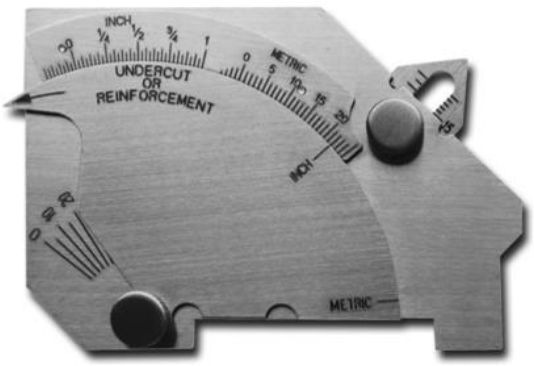
[5] [9] (GENERAL, 2024)

2.2.3. Όργανα Ελέγχου Συγκολλήσεων

Τα όργανα ελέγχου συγκολλήσεων προσφέρουν τη δυνατότητα μέτρησης παραμέτρων της συγκόλλησης, τόσο κατά την προετοιμασία, όσο και αναφορικά με το αποτέλεσμα αυτής. Αυτό, επιτυγχάνεται με πληθώρα εργαλείων ξεχωριστής μορφής, ώστε να προσφέρεται η δυνατότητα μέτρησης διαφορετικών παραμέτρων της συγκόλλησης.

Μερικά εξ αυτών, τα οποία τυγχάνουν ευρείας χρήσης εξαιτίας της ευελιξίας τους, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2[6] και Εικόνα 2.3[7]. Χρησιμοποιούνται για μία σειρά ελέγχων και μετρήσεων, οι οποίες θα εξεταστούν στην ακόλουθη ενότητα.

[6], [8], [12]



Εικόνα 2.2 Bridge Cam Gauge
Πηγή: Farwest Corrosion Control Company
[farwestcorrosion.com]

Εικόνα 2.3 V-WAC Single Weld Gauge
Πηγή: Farwest Corrosion Control Company
[farwestcorrosion.com]

[6] [10] (FARWEST CORROSION CONTROL COMPANY, 2024)
[7] [11] (FARWEST CORROSION CONTROL COMPANY, 2024)

2.3. Διαδικασία Ελέγχου

Ο οπτικός έλεγχος μίας συγκολλητής κατασκευής ξεκινά ήδη από την προετοιμασία της συγκόλλησης και συνεχίζεται μέχρι την αποδοχή ή απόρριψη του αποτελέσματος. Τα στάδια στα οποία διενεργείται, αναπτύσσονται παρακάτω.

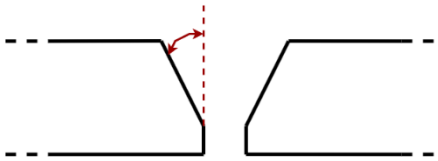
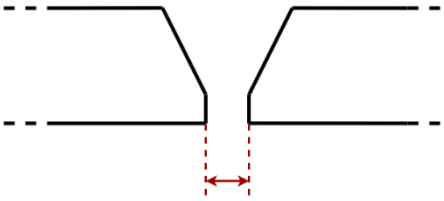
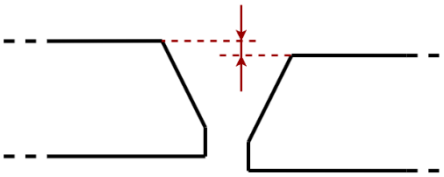
Σημειώνεται πως, της εκπόνησης του ελέγχου, θα πρέπει να προηγείται η εξοικείωση του ελεγκτή με την προδιαγραφή της συγκόλλησης (Welding Procedure Specification – WPS). Σε αυτή καθορίζονται μεταξύ άλλων οι ανοχές γεωμετρικών παραμέτρων (όπως της γωνίας λοξοτομής της ακμής προς συγκόλληση), αλλά και τα κριτήρια αποδοχής του τελικού προϊόντος σύμφωνα με το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας.

2.3.1. Προετοιμασία Συγκόλλησης

Αρχικά, εξετάζονται οι γεωμετρικές παράμετροι των ελασμάτων, προτού αυτά συγκολληθούν. Τέτοιες είναι η γωνία λοξοτομής της ακμής, το μεταξύ τους διάκενο στην περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης, καθώς και η ευθυγράμμισή τους (Πίνακας 2.1).

Εφόσον εντοπιστούν αστοχίες, αυτές θα πρέπει να διορθωθούν πριν ξεκινήσει η διαδικασία της συγκόλλησης.

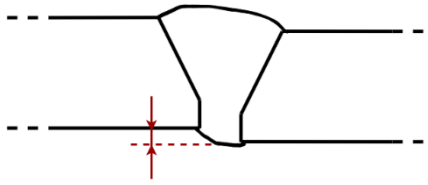
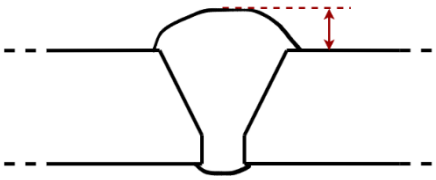
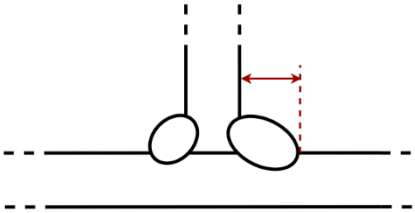
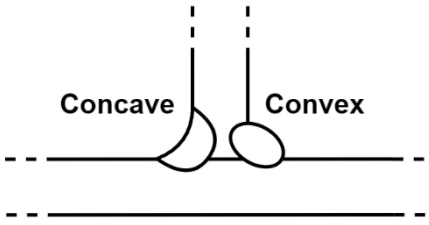
Πίνακας 2.1 Εξέταση κατά την προετοιμασία της συγκόλλησης

Πιθανές Αστοχίες	**Απεικόνιση Αστοχίας**	**Όργανα Ελέγχου**
Γωνία Λοξοτομής (Bevel Angle)		Bridge Cam Gauge
Διάκενο Ρίζας (Root Opening)		Χάρακας / Παχύμετρο
Ελαττωματική Ευθυγράμμιση (Misalignment)		Bridge Cam Gauge

2.3.2. Έλεγχος Προφίλ Συγκόλλησης

Κατόπιν της συγκόλλησης ελέγχεται το προφίλ της ως προς τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά. Αυτά, φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2 Γεωμετρική εξέταση προφίλ συγκόλλησης

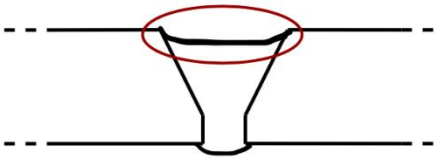
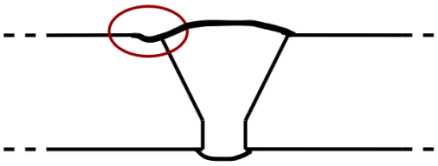
Τύπος Συγκόλλησης	**Πιθανές Αστοχίες**	**Απεικόνιση Αστοχίας**	**Όργανα Ελέγχου**
Μετωπική Συγκόλληση (Butt Weld)	Ελαττωματική Ευθυγράμμιση (Misalignment)		Bridge Cam Gauge
	Υπερβολική Ενίσχυση Όψης (Excessive Reinforcement)		Bridge Cam Gauge
Γωνιακή Συγκόλληση (Fillet Weld)	Μέγεθος Πόδα (Leg Size)		Bridge Cam Gauge/ V-WAC Gauge
	Υπερβολική Κυρτότητα Επιφάνειας (Concavity/ Convexity)		Bridge Cam Gauge

2.3.3. Έλεγχος Ατελειών

Στο παρόν στάδιο του ελέγχου αναζητούνται από τον ελεγκτή ατέλειες στην περιοχή της συγκόλλησης (Πίνακας 2.3). Τυπικές ασυνέχειες που ενδέχεται να παρατηρηθούν είναι το ανεπαρκές γέμισμα (underfill), η υποκοπή (undercut) και οι ρωγμές (cracks).

Οι ρωγμές δεν γίνονται αποδεκτές από κανένα επίπεδο ποιότητας και κατά συνέπεια οδηγούν στην απόρριψη του δοκιμίου. Αντιθέτως, στην περίπτωση του ανεπαρκούς γεμίσματος και της υποκοπής θα πρέπει να μετρηθεί το βάθος τους προκειμένου να διαπιστωθεί αν βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων.

Πίνακας 2.3 Εργαλεία εξέτασης ατελειών συγκόλλησης

Πιθανές Αστοχίες	**Απεικόνιση Αστοχίας**	**Όργανα Ελέγχου**
Ανεπαρκές Γέμισμα (Underfill)		Bridge Cam Gauge/ V-WAC Gauge
Υποκοπή (Undercut)		Bridge Cam Gauge/ V-WAC Gauge

2.3.4. Αποδοχή/ Απόρριψη

Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί στα προηγούμενα στάδια της εξέτασης και με βάση τα κριτήρια αποδοχής που ορίζονται στο WPS, ο ελεγκτής προβαίνει στην αποδοχή ή απόρριψη του δοκιμίου.

2.3.5. Επανάληψη Ελέγχου κατά την Διάρκεια Υπηρεσίας

Στη διάρκεια ζωής μιας συγκολλητής κατασκευής ο οπτικός έλεγχος επαναλαμβάνεται κατά διαστήματα. Σε αυτήν την περίπτωση, αφορά στην αναζήτηση ασυνεχειών. Συχνά διεξάγεται στα πλαίσια εξέτασης και με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ

Ο έλεγχος με τη χρήση διεισδυτών, Penetrant Testing (PT), αποτελεί μία από τις κύριες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, η οποία τυγχάνει ευρείας χρήσης σε ποικιλία βιομηχανιών, καθώς χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, φορητότητα και ευελιξία ως προς τα υλικά στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί. Πρακτικά αποτελεί βοήθημα για τον οπτικό έλεγχο, καθώς ο διεισδυτής συγκεντρώνεται στις επιφανειακές ασυνέχειες καθιστώντας ευκολότερη την παρατήρησή τους.

3.1. Ιστορικά Στοιχεία

Ο έλεγχος με τη χρήση διεισδυτών αποτελεί μία από τις πρώτες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου που εφαρμόστηκαν. Η αρχική του μορφή, πρωτοεμφανίστηκε στα τέλη του 19ου αιώνα, στην σιδηροδρομική βιομηχανία, όπου χρησιμοποιήθηκε μηχανέλαιο και σκόνη κιμωλίας ("oil and chalk-dust") για τον έλεγχο των αξόνων και άλλων τμημάτων των συρμών. Η διαδικασία περιελάμβανε την εμβάπτιση του υπό εξέταση μεταλλικού τμήματος σε χρησιμοποιημένο μηχανέλαιο, το οποίο και αφηνόταν να διεισδύσει στις ασυνέχειες της επιφάνειας του δοκιμίου. Στην συνέχεια, και αφότου απομακρυνόταν η περίσσεια ελαίου από την επιφάνεια, ραντίζονταν με σκόνη κιμωλίας εμποτισμένη με οινόπνευμα. Η στρώση λευκής σκόνης που προέκυπτε μετά την εξάτμιση του οινοπνεύματος, απορροφούσε το σκουρόχρωμο πετρέλαιο που είχε εισχωρήσει στις ασυνέχειες, αναδύοντάς το εκ νέου στην επιφάνεια, διαδικασία υποβοηθούμενη από κρουστικά φορτία στο δοκίμιο. Η χρωματική αντίθεση των δύο μερών οδηγούσε σε οπτικές ενδείξεις για την θέση των αναζητούμενων ατελειών.

Προκειμένου να ενισχυθεί η διείσδυση του ελαίου στις ασυνέχειες, αυτό διαλυόταν σε κηροζίνη για βελτίωση της διεισδυτικής του ικανότητας. Συχνά, το εν λόγω διάλυμα θερμαινόταν ώστε να μειωθεί το ιξώδες του και οι επιφανειακές τάσεις, ενώ εναλλακτικά μπορούσε να θερμανθεί το ελεγχόμενο δοκίμιο, ούτως ώστε να διασταλεί και ως εκ τούτου να διευρυνθεί και το άνοιγμα πιθανών υπαρχουσών ρωγμών.

Η μέθοδος κυριάρχησε στον τομέα του ελέγχου μέχρι την δεκαετία του 1930, οπότε και αντικαταστάθηκε σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο του μαγνητικού ελέγχου, και περιορίστηκε σε εφαρμογές σε μη σιδηρομαγνητικά υλικά. Ωστόσο, η τότε αναπτυσσόμενη αεροναυπηγική βιομηχανία, στην οποία τα τελευταία τύγχαναν ευρείας χρήσης (αλουμίνιο), την διατήρησε στο προσκήνιο. Στην συνέχεια, κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, οι αυξημένες απαιτήσεις στον έλεγχο της επιφάνειας των αεροσκαφών οδήγησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου. Αυτή εκφράζεται μέσα από μία σειρά εξελίξεων. Αφενός, από την ανάπτυξη εξειδικευμένων υγρών και διαλυτών με ωφέλιμες ιδιότητες τα οποία αντικατέστησαν το μηχανέλαιο και την κιμωλία προσφέροντας μεγαλύτερη ευαισθησία και αξιοπιστία. Οι εξειδικευμένοι διεισδυτές εμπλουτίστηκαν με φθορίζουσες ουσίες, οι οποίες κατά την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, οδηγούν σε ευδιάκριτες ενδείξεις. Αφετέρου, από την θέσπιση κανονιστικού πλαισίου, το οποίο και όριζε την προβλεπόμενη διαδικασία εκπόνησης της εξέτασης. Ωστόσο, τα στάδια της εν λόγω διαδικασίας δεν απείχαν πολύ από αυτά των αρχικών εκφάνσεων της μεθόδου.

Μεταπολεμικά, η μέθοδος επεκτάθηκε σε μία σειρά από βιομηχανικούς κλάδους όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η βιομηχανία υποδομών. Στα φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά που είχαν αναπτυχθεί προστέθηκαν και έγχρωμα τα οποία, ενώ υστερούσαν στην ευκρίνεια των ενδείξεων, επέτρεψαν την διενέργεια ελέγχου με λιγότερα μέσα (καθώς δεν απαιτείτο η ύπαρξη ηλεκτροδοτούμενων λαμπτήρων υπεριώδους), διευρύνοντας την φορητότητα και τον ορίζοντα εφαρμογής της μεθόδου.

Από τη δεκαετία του 1940 έως σήμερα διάφοροι οργανισμοί προχώρησαν στη θέσπιση των βιομηχανικών προτύπων διεξαγωγής του ελέγχου με την χρήση διεισδυτικών υγρών. Οι πληροφορίες που ακολουθούν στο κεφάλαιο αυτό βασίζονται στα αντίστοιχα πρότυπα του διεθνούς οργανισμού τυποποίησης (International Organization for Standardization– ISO).

[6], [13], [14]

3.2. Αρχές Λειτουργίας & Φυσικό Υπόβαθρο

Η αποδοτικότητα της μεθόδου βασίζεται στην ικανότητα του ελεγκτή και στις δυνατότητες των μέσων που χρησιμοποιούνται. Οι τελευταίες εκφράζονται από την ευαισθησία εντοπισμού ασυνεχειών. Βασικότερο παράγοντα της ευαισθησίας αποτελεί η ικανότητα του διεισδυτή να εισχωρεί σε ασυνέχειες μικρού ανοίγματος και βάθους και η παραμονή του σε αυτές μέχρι την ανάδυσή του στην επιφάνεια κατόπιν της εφαρμογής του εμφανιστή.

3.2.1. Επιθυμητά χαρακτηριστικά διεισδυτών

Η ικανότητα ενός διεισδυτή να επιφέρει τα προσδοκόμενα αποτελέσματα, βασίζεται σε ορισμένα χαρακτηριστικά της απόδοσης του. Αυτά αφορούν στην ικανότητα του να διεισδύσει στις ασυνέχειες της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται αλλά και να μπορεί να επιστρέψει ευδιάκριτες ενδείξεις.

Αφενός, για να δύναται να εισχωρήσει στις ασυνέχειες, θα πρέπει να μπορεί να καλύψει ομοιόμορφα το σύνολο της επιφάνειας στην οποία εφαρμόζεται και να διατηρείται για επαρκές διάστημα σε αυτή, προτού αποπλυθεί. Αφετέρου, είναι απαραίτητο να μπορεί να απομακρυνθεί η περίσσεια διεισδυτή από το δοκίμιο (με χρήση νερού ή κάποιου διαλύτη) χωρίς να επηρεάζεται το υγρό που έχει εισχωρήσει σε ασυνέχειες. Τέλος, είναι κρίσιμο να επιστρέφει ακριβείς και ευδιάκριτες ενδείξεις.

3.2.2. Φυσικές Ιδιότητες και Φαινόμενα (Διεισδυτικών) Υγρών

Οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών οι οποίες επηρεάζουν την αποδοτικότητα ενός υγρού ως διεισδυτή αναπτύσσονται παρακάτω, ενώ εξετάζεται και η επίδραση καθεμίας εξ αυτών.

3.2.2.1. Ιξώδες (Viscosity)

Ιξώδες (viscosity) καλείται η αντίσταση ενός ρευστού στην ροή του η οποία οφείλεται στις αναπτυσσόμενες τάσεις μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων του. Η επικρατούσα μονάδα μέτρησης είναι το $centiStoke$ ($1\ cSt = 1\ mm^2/sec$). Η εν λόγω φυσική ιδιότητα εκφράζεται με δύο τρόπους:

- Το δυναμικό ιξώδες (μ), το οποίο περιγράφει την αντίσταση ενός ρευστού στη ροή, όταν ασκείται σε αυτό κάποια εξωτερική δύναμη.
- Το κινηματικό ιξώδες (ν), το οποίο προκύπτει από τον λόγο του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού.

Βασικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει το ιξώδες ενός δεδομένου ρευστού, είναι η θερμοκρασία του. Συγκεκριμένα, αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της τιμής του ιξώδους και αντίστροφα.

Προκειμένου ο διεισδυτής να είναι σε θέση να επιτελέσει το έργο του, θα πρέπει να υπάρχει επαρκής στάσιμη ποσότητα (pool) διεισδυτή πάνω από την ασυνέχεια καθ' όλη την διάρκεια διείσδυσης. Για αυτόν το σκοπό, αποφεύγονται υγρά με πολύ μικρό συντελεστή ιξώδους, καθώς κάτι τέτοιο ενδέχεται να οδηγήσει σε ταχεία απομάκρυνσή του από την επιφάνεια του δοκιμίου, ενώ είναι πιθανό να επιφέρει απόπλυση του διεισδυτή από ρηχές ασυνέχειες κατά τον ενδιάμεσο καθαρισμό του δοκιμίου. Συγχρόνως, πολύ μεγάλος συντελεστής ιξώδους συνεπάγεται αύξηση του απαιτούμενου χρόνου διείσδυσης (και αντίστοιχα, του χρόνου που απαιτείται ώστε να αναδυθεί στην επιφάνεια μετά την εφαρμογή του εμφανιστή) και ως εκ τούτου δεν είναι επιθυμητός.

Πρακτικά, αναλόγως με την εφαρμογή, χρησιμοποιούνται διεισδυτές με τιμές κινηματικού ιξώδους μεταξύ 5 και 20 cSt.

3.2.2.2. Επιφανειακή Τάση (Surface Tension)

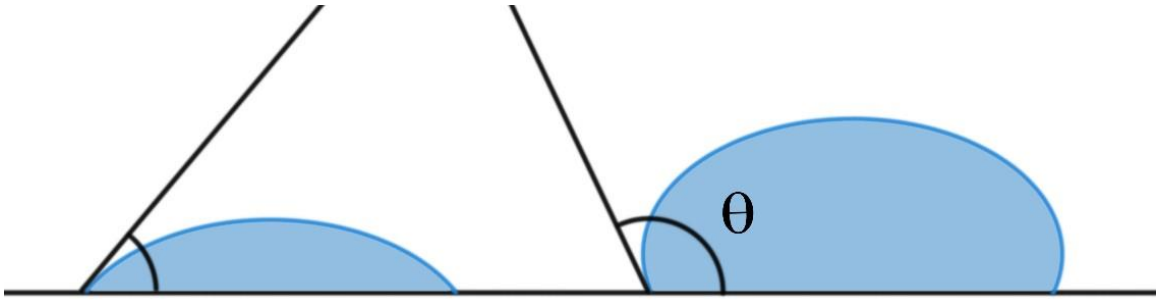
Η επιφανειακή τάση είναι αποτέλεσμα των δυνάμεων συνεκτικότητας, οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων ενός υγρού και έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση της μικρότερης δυνατής επιφάνειας από μία ποσότητα υγρού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί το σφαιρικό σχήμα που λαμβάνει μια σταγόνα νερού. Αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση των επιφανειακών τάσεων.

Ενώ γενικά είναι θεμιτό ο διεισδυτής να χαρακτηρίζεται από μεγάλες επιφανειακές τάσεις, κάτι τέτοιο έρχεται σε αντιδιαστολή με τις ευεργετικές μικρές γωνίες συνεπαφής (βλ. 3.2.2.3).

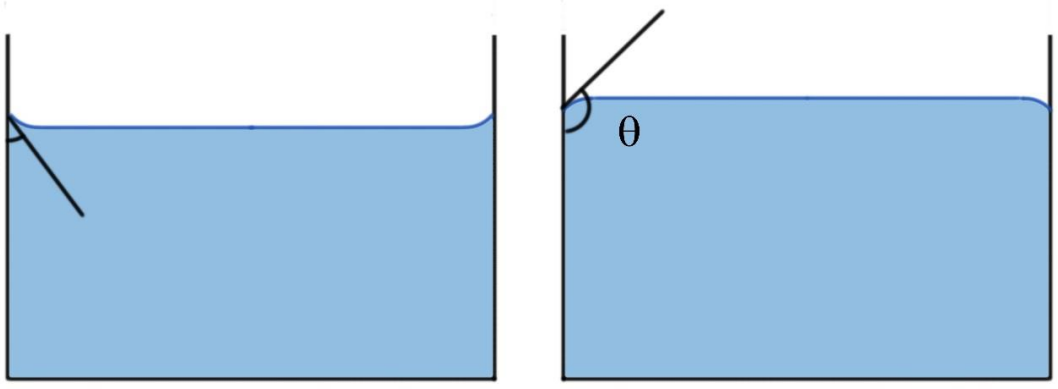
3.2.2.3. Τριχοειδές Φαινόμενο (Capillarity)

Η ικανότητα ενός υγρού να εισχωρήσει σε ασυνέχειες της επιφάνειας αποτελεί το αντιπροσωπευτικότερο μέτρο της καταλληλότητας ενός διεισδυτή και εκφράζεται από το τριχοειδές φαινόμενο. Το τριχοειδές φαινόμενο περιγράφει την τάση των υγρών να διεισδύουν σε στενά ανοίγματα ενός στερεού χωρίς την βοήθεια εξωτερικών δυνάμεων[8]. Η εκδήλωση του φαινομένου επηρεάζεται από την γωνία συνεπαφής του υγρού με το στερεό σώμα με το οποίο έρχεται σε επαφή.

Γωνία επαφής ή γωνία συνεπαφής, καλείται η γωνία που προκύπτει από την καμπύλωση της επιφάνειας ενός υγρού σε στερεή επιφάνεια στην οποία επικάθεται, εξαιτίας των δυνάμεων συνάφειας (Εικόνα 3.1). Στην περίπτωση των διεισδυτικών υγρών, ενδιαφέρον παρουσιάζει η γωνία συνεπαφής με τοιχώματα δοχείων (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.1 Γωνίες συνεπαφής (οξεία και αμβλεία)

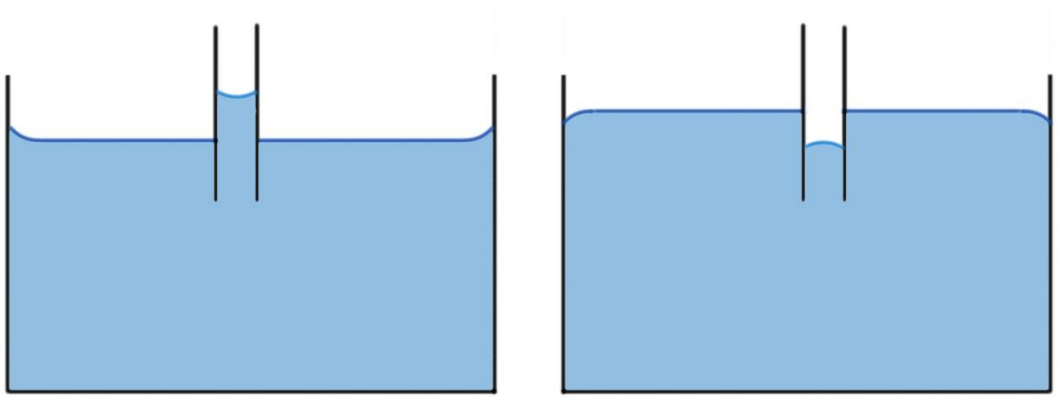


Εικόνα 3.2 Γωνία συνεπαφής στα κάθετα τοιχώματα δοχείου

[8] [15] Wikipedia: Capillary action, Oct 2024 [https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action]

Σε μεγάλο δοχείο, μεταξύ των τοιχωμάτων του θα επικρατούν οι βαρυτικές δυνάμεις, διαμορφώνοντας το οριζόντιο τμήμα της επιφάνειας του υγρού. Ωστόσο, για δοχεία μικρότερης διαμέτρου (πολύ λεπτούς σωλήνες) η επίδραση των δυνάμεων συνάφειας θα επηρεάζει ολόκληρη την έκταση του υγρού (Εικόνα 3.3).

Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα (στην περίπτωση γωνίας συνεπαφής μικρότερης των 90°) την ανύψωση του υγρού εντός του κυλίνδρου.

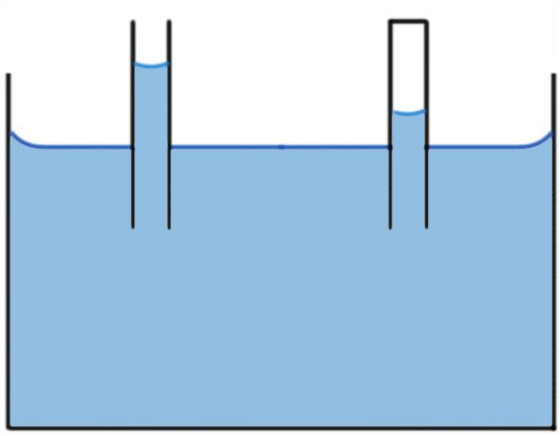


Εικόνα 3.3 Επίδραση γωνίας συνεπαφής στη στάθμη υγρού σε σωλήνα μικρής οπής

Το ύψος στο οποίο θα ανέλθει η στήλη υγρού θα είναι μικρότερο στην περίπτωση που ο σωλήνας είναι κλειστός στο επάνω μέρος, με συνέπεια σημαντικό μέρος του αέρα να εγκλωβίζεται πάνω από το υγρό, αναπτύσσοντας μεγαλύτερες πιέσεις (Εικόνα 3.4).

Για τα διεισδυτικά υγρά απαιτούνται οξείες γωνίες συνεπαφής, οι οποίες συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 8 και 10 μοιρών.

[6], [13], [14], [16], [17], [18], [19]



Εικόνα 3.4 Μεταβολή στάθμης υγρού σε "ανοιχτό" και "κλειστό" σωλήνα

3.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

Τα αναλώσιμα μέσα και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά τον έλεγχο με διεισδυτές ποικίλουν, προσδίδοντας σε κάθε περίπτωση διαφορετικά οφέλη στην διενέργεια της εξέτασης και διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο το πεδίο εφαρμογών της μεθόδου.

3.3.1. Διεισδυτές (Penetrants)

Οι διεισδυτές καλούνται να εισχωρήσουν στις ασυνέχειες της επιφάνειας του ελεγχόμενου δοκιμίου και να παραμείνουν σε αυτές, έως ότου εφαρμοστεί ο εμφανιστής. Έπειτα καλούνται να παράγουν ορατές και ευκρινείς ενδείξεις. Οι ιδιότητες οι οποίες καθορίζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο επιστρέφουν οπτικές ενδείξεις, υφίστανται οι παρακάτω ευρύτερες κατηγορίες διεισδυτικών υγρών:

- **Φθορίζοντα**: Προσδίδοντας στο διάλυμα του διεισδυτή φθορίζουσες ιδιότητες, η παρατήρηση γίνεται υπό την έκθεση της επιφάνειας σε υπεριώδες φως. Κατόπιν το υγρό εκπέμπει φως στο ορατό φάσμα (συνήθως στην περιοχή του κίτρινου / πράσινου / μπλε).
- **Χρωματιστά**: Το διάλυμα περιέχει χρωστικές που του προσδίδουν συνήθως κόκκινο χρώμα και η παρατήρηση γίνεται υπό λευκό (φυσικό) φως.
- **Διττής φύσης**: Αποτελούν συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων κατηγοριών και η παρατήρηση τους κατά την ολοκλήρωση της εξέτασης μπορεί να γίνει τόσο με λευκό όσο και με υπεριώδες φως.

Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο απομακρύνεται η περίσσεια των διεισδυτικών υγρών από τις εξεταζόμενες επιφάνειες, κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- **Water washable**: Η βάση του διεισδυτή είναι συνήθως το πετρέλαιο, το οποίο δεν μπορεί να απομακρυνθεί με νερό. Για αυτό το σκοπό είναι αναμεμειγμένο με γαλακτωματοποιητές, οδηγώντας σε τελικό προϊόν το οποίο επιτρέπει την πλύση με νερό.
- **Post-emulsifiable (lipophilic)**: Στην συγκεκριμένη περίπτωση προηγείται ένα στάδιο εφαρμογής λιπόφιλου γαλακτωματοποιητή στην καλυμμένη με διεισδυτή επιφάνεια του δοκιμίου. Στην συνέχεια, το γαλάκτωμα που προκύπτει απομακρύνεται με νερό.
- **Post-emulsifiable (hydrophilic)**: Στο πλεόνασμα διεισδυτή εφαρμόζεται ειδικό διάλυμα υδρόφιλου γαλακτωματοποιητή με βάση το νερό. Στην συνέχεια, το γαλάκτωμα που προκύπτει μπορεί να αποπλυθεί με νερό.
- **Solvent removable**: Η απομάκρυνση του πλεονάσματος διεισδυτή γίνεται με πανί στο οποίο έχει τοποθετηθεί κάποιο διαλυτικό μέσο. Η παρούσα διάκριση αφορά στην χρησιμοποιούμενη κατά περίπτωση τεχνική, καθώς όλα τα διεισδυτικά υγρά μπορούν να απομακρυνθούν με διαλύτες.

3.3.2. Εμφανιστές (Developers)

Οι εμφανιστές εφαρμόζονται στο εξεταζόμενο δοκίμιο μετά τους διεισδυτές και δημιουργούν μία επίστρωση η οποία απορροφά τους τελευταίους από τις ασυνέχειες στις οποίες έχουν εισχωρήσει, αναδύοντας τους στην επιφάνεια.

Οι εμφανιστές μπορεί να έχουν κάποια από τις κάτωθι μορφές:

- **Ξηροί**: Βρίσκονται σε μορφή σκόνης. Δεν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με χρωματιστά διεισδυτικά υγρά, καθώς δεν προσφέρουν την απαιτούμενη οπτική αντίθεση με αυτά.

- **Υδατικό διάλυμα**: Αποτελείται από στοιχεία εμφανιστή διαλυμένα σε νερό, τα οποία μετά την εξάτμιση του νερού δημιουργούν ένα παχύ λευκό φιλμ. Δεν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με χρωματιστά ή «water-washable» διεισδυτικά υγρά.
- **Υδατικό αιώρημα**: Αποτελείται από αδρανή στοιχεία εμφανιστή σε νερό και είναι απαραίτητη η ανάδευσή του πριν χρησιμοποιηθεί. Για την εξάτμιση του νερού απαιτείται η χρήση φούρνου ξήρανσης.
- **Μη υδατικό διάλυμα**: Αποτελείται από στοιχεία εμφανιστή σε μη υδατικό, πτητικό διαλύτη. Εξαιτίας της πτητικής του ιδιότητας ο διαλύτης εξατμίζεται ταχέως, δημιουργώντας μία ομοιόμορφη, λεπτή, λευκή επίστρωση. Συνήθως βρίσκεται σε έτοιμα προς χρήση δοχεία αεροζόλ.

3.3.3. Καθαριστές (Pre-cleaners)

Ο επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας του υπό εξέταση δοκιμίου αποτελεί στάδιο νευραλγικής σημασίας για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Οι ρυπαντικοί παράγοντες περιλαμβάνουν σκόνη, έλαια, προϊόντα διάβρωσης ή και υπολείμματα από προηγούμενη διενέργεια μη καταστροφικού ελέγχου. Είναι ικανοί να εισχωρούν ή να καλύπτουν ασυνέχειες επηρεάζοντας την λειτουργία της μεθόδου. Επιπλέον, ορισμένα έλαια παρουσιάζουν φθορίζουσες ιδιότητες, γεγονός που προξενεί προβλήματα στην περίπτωση ελέγχου με φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά

Ο καθαρισμός του δοκιμίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές μεθόδους, αναλόγως με τον διαθέσιμο εξοπλισμό και την κατάσταση της ελεγχόμενης επιφάνειας.

- **Διαλύτες**: Τα διαλυτικά μέσα εφαρμόζονται στην επιφάνεια είτε με ψεκασμό σε υγρή μορφή, είτε (σπανιότερα) υπό τη μορφή ατμού. Χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων, όπως έλαια και βερνίκια.
- **Απορρυπαντικά**: Εφαρμόζονται στην επιφάνεια του υλικού και αφότου επικαθήσουν σε αυτή για ορισμένο διάστημα, αποπλένονται μαζί με τις ακαθαρσίες στις οποίες έχουν συναφθεί. Τα απορρυπαντικά δεν θα πρέπει να είναι διαβρωτικά προς το υλικό της υπό καθαρισμό επιφάνειας.
- **Λουτρό υπερήχων**: Χρησιμοποιεί καθαριστικό υγρό αποτελούμενο από νερό και κάποιο διαλυτικό μέσο στο οποίο διαδίδονται υψίσυχνα ηχητικά κύματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία φυσαλίδων σε σημεία χαμηλής πιέσεως, οι οποίες όταν σκάζουν είναι ικανές να απομακρύνουν ρυπαντικά στοιχεία από την επιφάνεια του υπό καθαρισμό δοκιμίου. Το χρησιμοποιούμενο διαλυτικό μέσο εκλέγεται με γνώμονα την φύση του ρύπου. Η χρήση του λουτρού υπερήχων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον καθαρισμό εντός των ασυνεχειών, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα σημαντικό για την εξέταση με διεισδυτές. Ωστόσο, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, ιδιαίτερα στην φορητότητα και το μέγεθος του υπό καθαρισμό δοκιμίου.
- **Μηχανικά μέσα**: Προϊόντα της διάβρωσης μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά από την επιφάνεια με συρματόβουρτσα, αμμοβολή ή άλλα μηχανικά μέσα. Ωστόσο η χρήση τους αποφεύγεται καθώς οδηγεί σε αλλοίωση της επιφάνειας και είναι πιθανόν να καλύψει ασυνέχειες, αποκρύπτοντάς τες.
- **Άλλα μέσα**: Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να διενεργείται χημικός καθαρισμός, καύση κα.

Μία ή περισσότερες μέθοδοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον προκαταρκτικό καθαρισμό του εξεταζόμενου δοκιμίου. Βασικοί παράγοντες για την εκλογή τους είναι η προβλεπόμενη χρήση, το υλικό και οι διαστάσεις του δοκιμίου, καθώς και η φύση των επικαθήμενων ρύπων.

3.3.4. Πρόσθετος Εξοπλισμός

3.3.4.1. Λάμπα φθορισμού

Εκπέμπει φως στο φάσμα του υπεριώδους (συνήθως μήκους κύματος μεταξύ 315 και 400 nm) και είναι απαραίτητη για διεξαγωγή ελέγχου με φθορίζοντες διεισδυτές (Type I). Πλέον, μπορούν να τροφοδοτούνται από μπαταρία, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στον ελεγκτή.

3.3.4.2. Σταθερός εργαστηριακός εξοπλισμός

Αφορά σε διατάξεις σε περιβάλλον εργαστηρίου και εξειδικευμένες σταθερές εγκαταστάσεις. Μπορεί να περιλαμβάνει δεξαμενή εμβάπτισης του δοκιμίου (για διεισδυτή ή εμφανιστή), φούρνο ξήρανσης, θάλαμο επιθεώρησης με λαμπτήρα υπεριώδους και άλλες μονάδες οι οποίες διευκολύνουν την διενέργεια του ελέγχου (Εικόνα 3.5)[9].

Εικόνα 3.5 Φούρνος από γραμμή ελέγχου σταθερής εγκατάστασης
Πηγή: Johnson & Allen NDT [johnsonandallen.co.uk]

[6], [13], [14], [16], [17], [18], [19]

[9] [20] (JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938, 2024)

3.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο

Η ακολουθούμενη κατά περίπτωση διαδικασία περιγράφεται (σύμφωνα με το ISO 3452-2[10]: 2021) με έναν κωδικό ο οποίος προκύπτει από το είδος του διεισδυτή και του εμφανιστή και την μέθοδο αφαίρεσης του πλεονάσματος του πρώτου.

Στην περίπτωση του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, χρησιμοποιείται χρωματιστός διεισδυτής (Type II), ο οποίος μπορεί να αφαιρεθεί με νερό (Method A). Ο διαθέσιμος εμφανιστής βρίσκεται σε μορφή μη υδατικού διαλύματος και προορίζεται για χρήση σε συνεργασία με χρωματιστό διεισδυτικό υγρό (Form e). Τα προϊόντα βρίσκονται σε δοχεία αεροζόλ.

Για τα δεδομένα μέσα (Type II, Method A, Form e), ακολουθεί η περιγραφή της προβλεπόμενης διαδικασίας εξέτασης ενός δοκιμίου με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.

3.4.1. Προκαταρκτικός Καθαρισμός Δοκιμίου

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ευαισθησία στον έλεγχο με διεισδυτές θα πρέπει να έχει προηγηθεί σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας του υπό εξέταση δοκιμίου. Αποτελεί μάλιστα το καθοριστικότερο στάδιο της εξέτασης για την εξασφάλιση των αντιπροσωπευτικότερων δυνατών αποτελεσμάτων.

Τα ρυπαντικά στοιχεία καθώς και ορισμένες ενδεικνυόμενες διεργασίες απομάκρυνσής τους απαριθμούνται παρακάτω:

- **Έλαια**: Η κατηγορία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει έλαια που χρησιμοποιούνται σε μία μηχανολογική εγκατάσταση, όπως λιπαντικά και γράσα. Αυτά επηρεάζουν την αποδοτικότητα του διεισδυτή, καθώς στην πλειονότητά τους διακρίνονται από καλή διεισδυτική ικανότητα και τείνουν να εισχωρούν στις ασυνέχειες, ενώ ενδέχεται να δημιουργήσουν μεμβράνη η οποία τις καλύπτει. Για τον καθαρισμό τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαριστής (cleaner) που αποτελεί διαλύτη ο οποίος αποθηκεύεται και ψεκάζεται από δοχείο αεροζόλ.
- **Σκωρία και οξείδια**: Η ύπαρξή τους στην επιφάνεια εμποδίζει τον εντοπισμό ασυνεχειών, ενώ συγκρατούν μέρος διεισδυτή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικές ενδείξεις.
- **Βαφή και βερνίκι**: Παρότι δεν αποτελούν ακαθαρσίες, η παρουσία τους καλύπτει τις επιφανειακές ασυνέχειες και ως εκ τούτου θα πρέπει να απομακρύνονται πριν την διενέργεια της εξέτασης. Μπορούν να απομακρυνθούν με τη χρήση ισχυρού διαλύτη, όπως η ακετόνη.

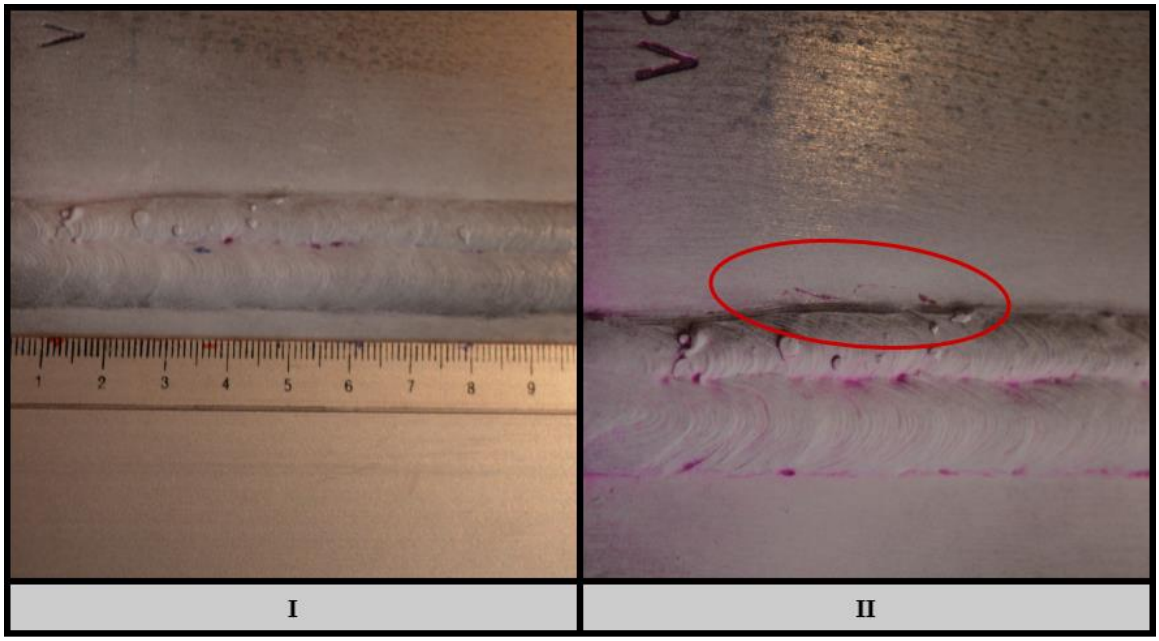
Εφόσον είναι γνωστό το ιστορικό του δοκιμίου (συνθήκες παρασκευής / αποθήκευσης / λειτουργίας), η διαδικασία του προκαταρκτικού καθαρισμού απλουστεύεται, καθώς προσαρμόζεται σε γνωστά ρυπαντικά στοιχεία.

Με την ολοκλήρωση του καθαρισμού, το δοκίμιο που πρόκειται να εξεταστεί θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο, εκτός από τις προαναφερθείσες ακαθαρσίες, από υγρασία και διαλύτες που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθαρισμό του.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.6), παρουσιάζεται περίπτωση στην οποία, ελλιπής καθαρισμός της επιφάνειας επιτρέπει την απόκρυψη υπάρχουσας, λεπτής ρωγμής στον πόδα της

[10] [21] (International Organization for Standardization, 2021)

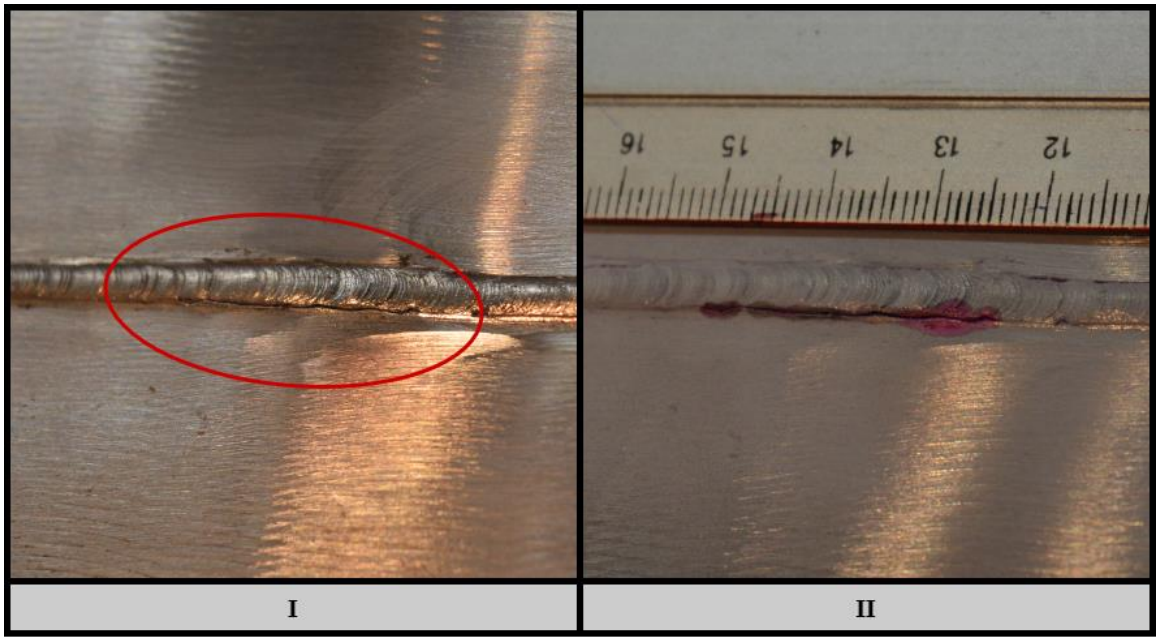
συγκόλλησης (I). Στη συνέχεια και κατόπιν επιμελούς καθαρισμού της περιοχής και επανάληψης της εξέτασης, η ασυνέχεια αποκαλύπτεται (II).



Εικόνα 3.6 (I) Ανεπαρκής προκαταρκτικός καθαρισμός δοκιμίου, (II) Εύρημα κατόπιν επανάληψης του ελέγχου μετά από σχολαστικότερο καθαρισμό

Αξίζει να σημειωθεί, πως κρίνεται σκόπιμο να προηγηθεί οπτική επιθεώρηση από τον ελεγκτή, αναζητώντας ενδείξεις που θα τον κατευθύνουν στην μετέπειτα εργασία του. Τα ρυπαντικά στοιχεία, προτού αφαιρεθούν, ενδέχεται να υποδείξουν ασυνέχειες στο υλικό, καθώς επικάθονται σε αυτές. Αντίστοιχα, ευεργετικά θα δράσει ο οπτικός έλεγχος και κατόπιν του καθαρισμού του δοκιμίου. Οι παρατηρήσεις στα παραπάνω στάδια αποτελούν σημαντικό βοήθημα για τον ελεγκτή.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.7), φαίνεται παράδειγμα υπάρχουσας ένδειξης πριν τη διενέργεια της εξέτασης (I), καθώς και η επιβεβαίωση της, μετά την εφαρμογή της μεθόδου (II).



Εικόνα 3.7 (I) Αρχική οπτική ένδειξη γραμμικής ατέλειας, (II) Επιβεβαίωση ύπαρξης ρωγμής με εφαρμογή της μεθόδου

3.4.2. Εφαρμογή Διεισδυτή

Κατά την εφαρμογή του διεισδυτή στην επιφάνεια δεν απαιτείται κάποια εξεζητημένη τεχνική. Σημασία πρέπει να δοθεί στην πλήρη κάλυψη της εξεταζόμενης περιοχής και την παραμονή του υγρού σε αυτή έως ότου εισχωρήσει στις υπάρχουσες ασυνέχειες. Προκειμένου να συμβεί αυτό, απαιτείται κάποιος χρόνος επικαθήσεως (dwell time) του διεισδυτή σε αυτές.

Υπερβολικός χρόνος επικαθήσεως ενέχει τον κίνδυνο, ο διεισδυτής να στεγνώσει στο δοκίμιο ή να απορρεύσει από αυτό. Κατά συνέπεια, το διάστημα αυτό, θα πρέπει να προσαρμόζεται στις δυνατότητες του εκάστοτε διεισδυτή. Για το διαθέσιμο διεισδυτικό υγρό, κυμαίνεται μεταξύ 2 και 30 λεπτών. Για τυπικές περιπτώσεις, 10 λεπτά θεωρούνται επαρκή.

Σημειώνεται πως η θερμοκρασία επιδρά στις προαναφερθείσες ιδιότητες του υγρού. Επομένως, σε περιπτώσεις ακραίων θερμοκρασιών, η επιλογή και διαχείριση του διεισδυτή θα διαφέρει.

3.4.3. Απόπλυση Πλεονάσματος Διεισδυτή

Στην συνέχεια απομακρύνεται η περίσσεια διεισδυτή από το δοκίμιο. Αυτό αποσκοπεί στον καθαρισμό της επιφάνειας, χωρίς την απόπλυση του από τις ασυνέχειες στις οποίες έχει επικαθήσει και είναι κρίσιμο για την απόδοση σαφών και ευδιάκριτων αποτελεσμάτων. Το πλεόνασμα διεισδυτή μπορεί να απομακρυνθεί με νερό ή με διαλύτη.

3.4.3.1. Απόπλυση με Νερό

Στην απόπλυση με νερό, η περίσσεια διεισδυτή απομακρύνεται μέσω ύδατος που χέεται στην επιφάνεια. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην ταχύτητα με την οποία το νερό προσπίπτει σε αυτή, ώστε να μην είναι ικανό να απομακρύνει τον διεισδυτή από ασυνέχειες στις οποίες έχει επικαθήσει.

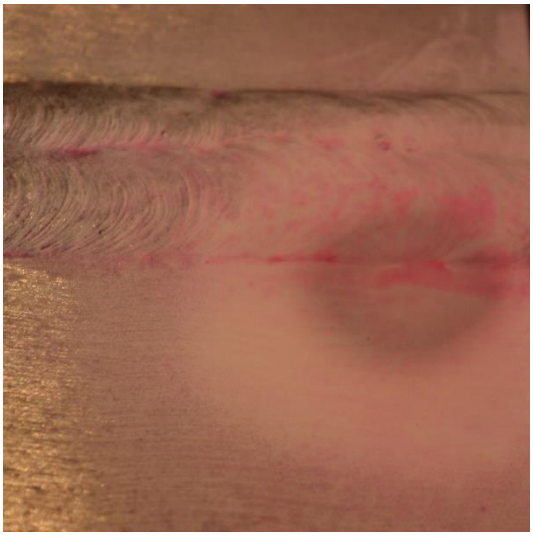
3.4.3.2. Απόπλυση με Διαλύτη

Κατά την απόπλυση με διαλύτη χρησιμοποιείται αρχικά ένα στεγνό πανί, με το οποίο απομακρύνεται ο κύριος όγκος του διεισδυτή από την επιφάνεια. Στην συνέχεια, με νέο ύφασμα – το οποίο έχει πρώτα διαβραχεί με διαλύτη – σκουπίζεται εκ νέου η επιφάνεια. Η διαδικασία γίνεται χωρίς άσκηση πίεσης και με γρήγορες κινήσεις. Η παραπάνω ενέργεια μπορεί να επαναληφθεί έως ότου πάψει να είναι εμφανές μέρος του διεισδυτή.

3.4.3.3. Στέγνωμα Επιφάνειας

Προτού συνεχιστεί η διαδικασία, θα πρέπει να απομακρυνθεί πλήρως η υγρασία που παραμένει στην επιφάνεια του εξεταζόμενου μέρους. Αυτό επιτυγχάνεται είτε σκουπίζοντας με κάποιο πανί, είτε θερμαίνοντας την επιφάνεια. Στην τελευταία περίπτωση, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία δεν θα πρέπει να ξεπεράσει τους 50° C. Σε αντίθετη περίπτωση, αλλοιώνονται οι ιδιότητες του διεισδυτικού υγρού, επηρεάζοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Στην Εικόνα 3.8, φαίνονται τα αποτελέσματα ανεπαρκούς στεγνώματος. Ο διεισδυτής έχει απλωθεί στην επιφάνεια οδηγώντας σε λανθασμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.8 Αποτέλεσμα εναπομείνασας υγρασίας

3.4.4. Εφαρμογή Εμφανιστή

Εφόσον η επιφάνεια έχει στεγνώσει πλήρως μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτή ο εμφανιστής. Σε αντίθετη περίπτωση θα προκύψουν εσφαλμένες ενδείξεις στη συνέχεια.

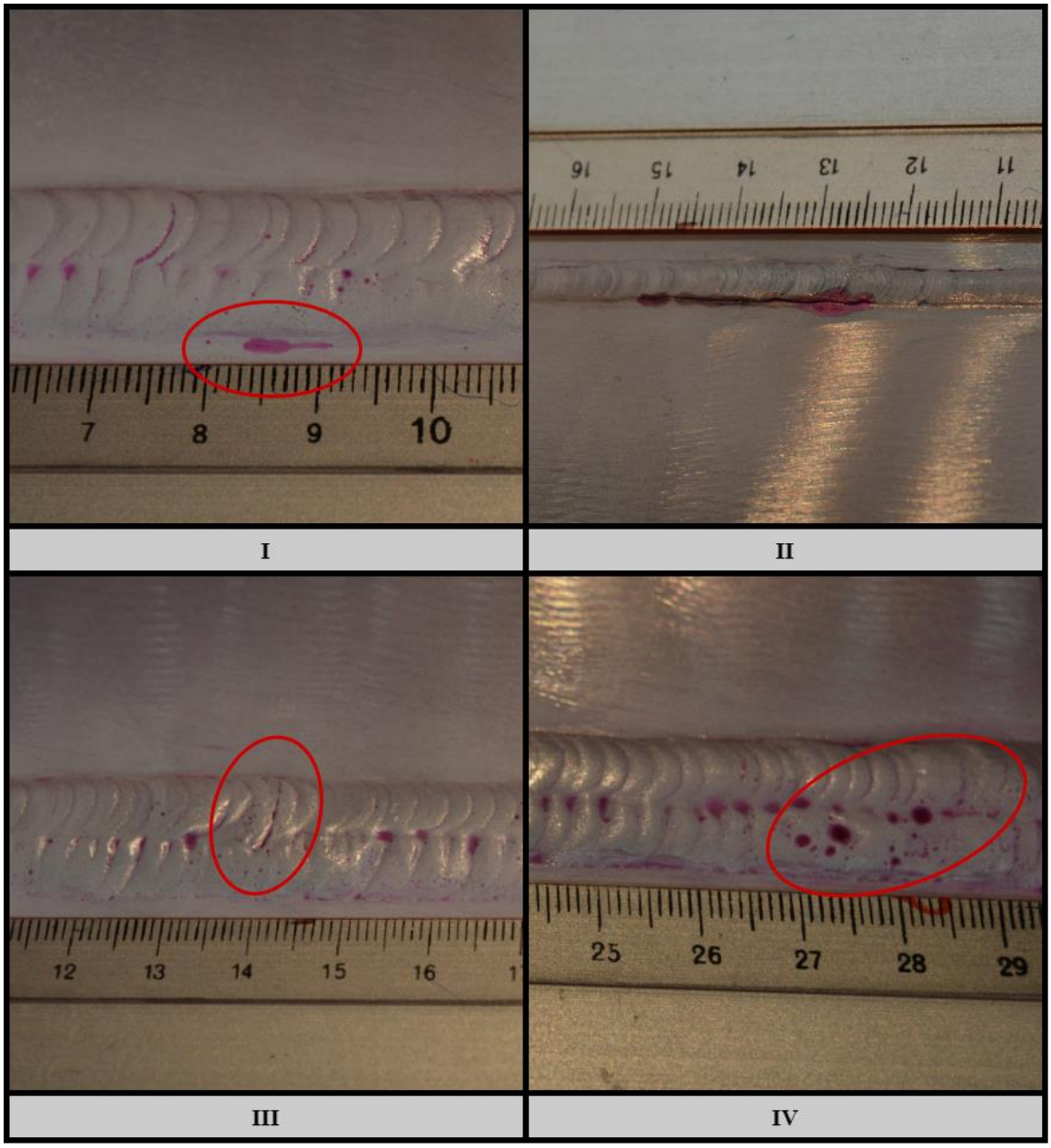
Εφαρμόζεται ένα λεπτό φιλμ εμφανιστή στην εξεταζόμενη περιοχή. Αυτό, δρα ως στυπόχαρτο, απορροφώντας τον διεισδυτή από τις ασυνέχειες στις οποίες έχει επικαθήσει. Προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή, θα πρέπει να παρέλθει κάποιος χρόνος. Από τα πρότυπα, αυτός ορίζεται σε 10-30 λεπτά.

3.4.5. Αποτελέσματα

Οι ενδείξεις που προκύπτουν θα πρέπει να διακριθούν σε σχετικές, μη σχετικές και εσφαλμένες. Μη σχετικές καλούνται οι ενδείξεις που οφείλονται σε συγκέντρωση διεισδυτή σε σημεία που δεν υπάρχουν ασυνέχειες (π.χ. σε περιοχές με επιφανειακή τραχύτητα). Αντιθέτως, οι εσφαλμένες ενδείξεις προξενούνται από λανθασμένους χειρισμούς κατά την διάρκεια του ελέγχου (π.χ. ανεπαρκές στέγνωμα).

Αφού διακριθούν οι σχετικές ενδείξεις, εξετάζεται το αν αποτελούν σφάλματα με βάση τα κριτήρια ποιότητας για το ελεγχόμενο δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό και την διαστασιολόγησή τους.

Τυπικές ασυνέχειες που μπορούν να εντοπιστούν με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών, και προέκυψαν από τις δοκιμές στο εργαστήριο παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.9).



Εικόνα 3.9 (I) Ρωγμή στον πόδα, (II) Ρωγμή στη ρίζα, (III) Εγκάρσια ρωγμή στη ραφή, (IV) Επιφανειακό πορώδες

[6], [13], [14], [16], [17], [18], [22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια, Magnetic Particle Inspection (MPI/ MPT/ MT) αποτελεί μία από τις κύριες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου η οποία τυγχάνει ευρείας χρήσης σε βιομηχανικό περιβάλλον, καθώς χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία στον εντοπισμό επιφανειακών ασυνεχειών. Μπορεί να εφαρμοστεί αποκλειστικά σε υλικά που μπορούν να μαγνητισθούν και ενδείκνυται για την ανίχνευση επιφανειακών ρωγμών σε αυτά.

4.1. Ιστορικά Στοιχεία

Ο μαγνητισμός των υλικών και οι ιδιότητες οι οποίες τους προσέδιδε είχαν παρατηρηθεί ήδη από την αρχαιότητα. Συγκεκριμένα μαγνητικά υλικά τα οποία είχαν την τάση να έλκουν τον σίδηρο έχουν καταγραφεί από Κινέζους και Έλληνες ήδη από τον 4ο αιώνα π.Χ. Η ετυμολογία της λέξης προέρχεται από την περιοχή της Μαγνησίας στην οποία και είχαν εντοπιστεί τέτοια υλικά. Ωστόσο, το θεωρητικό υπόβαθρο για την μελέτη του φαινομένου του μαγνητισμού τέθηκε στα τέλη του 18ου αιώνα μ.Χ., ενώ το φαινόμενο της μαγνητικής διαρροής στην οποία βασίζεται η μέθοδος ελέγχου παρατηρήθηκε στα τέλη του 19ου.

Έχοντας ως βάση τα παραπάνω και αναπτύσσοντας την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, προέκυψε η πρώτη μορφή της μεθόδου. Αυτή περιελάμβανε τον μαγνητισμό του εξεταζόμενου δοκιμίου και εξέταση με βελόνα πυξίδας για την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων που προέκυπταν σε σημεία ύπαρξης ασυνεχειών. Η εν λόγω μέθοδος εξέτασης βρήκε αρχικά εφαρμογή σε κάννες όπλων και ράγες σιδηροδρόμων για την ανίχνευση σφαλμάτων. Στην πορεία η βελόνα αντικαταστάθηκε από μαγνητικά σωματίδια (σε μορφή σκόνης), τα οποία συγκεντρώνονταν στις ρωγμές της επιφάνειας του υπό έλεγχο τεμαχίου.

Οι δύο Παγκόσμιοι Πόλεμοι που ακολούθησαν οδήγησαν στην ταχεία ανάπτυξη και διάδοση της μεθόδου η οποία βρήκε αρχικά εφαρμογή στην πολεμική βιομηχανία και στη συνέχεια υιοθετήθηκε από πληθώρα άλλων βιομηχανιών. Η αξιοπιστία της σταδιακά ενίσχυσε τη δημοφιλία της έναντι της μεθόδου των διεισδυτών (στην αντίστοιχη με την εποχή, πρωτόλεια μορφή της).

Πλέον, ο μαγνητικός έλεγχος αποτελεί μια μέθοδο που αξιοποιείται σε μεγάλο εύρος πεδίων τόσο κατά το στάδιο της παραγωγής, όσο και κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας μεταλλικών μερών. Στην πάροδο του χρόνου αναπτύχθηκαν εργαλεία και αναλώσιμα, τα οποία προσδίδουν στη μέθοδο μεγαλύτερη ευαισθησία και αξιοπιστία, ενώ επιτρέπουν τη διενέργεια του ελέγχου τόσο σε σταθερή εγκατάσταση, όσο και στο πεδίο. Επιπλέον, θεσπίστηκαν τα αντίστοιχα πρότυπα τα οποία υπαγορεύουν τις τεχνικές εκπόνησης του ελέγχου και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

[6], [13], [14]

4.2. Αρχές Λειτουργίας και Φυσικό Υπόβαθρο

Η αποδοτικότητα της μεθόδου βασίζεται στην ικανότητα του ελεγκτή και στις δυνατότητες των μέσων που χρησιμοποιούνται. Βασικότερη προϋπόθεση για τη λειτουργικότητά της, είναι η ικανότητα των μαγνητικών σωματιδίων να μπορούν να συγκεντρωθούν στις ασυνέχειες.

4.2.1. Μαγνητισμός Υλικών

Ο μαγνητισμός ενός υλικού είναι το αποτέλεσμα της περιστροφικής κίνησης που εκτελούν τα ηλεκτρόνια των ατόμων του. Αυτή προκύπτει είτε κατά την έκθεση του σώματος σε μαγνητικό πεδίο, είτε όταν αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Αποτέλεσμα της μαγνήτισης ενός υλικού, αποτελεί η τάση του τελευταίου να έλκει άλλα σιδηρομαγνητικά υλικά (όπως ο σίδηρος) καθώς και η δημιουργία ενός μαγνητικού πεδίου πέριξ αυτού. Ακόμα, έλκει ή απωθεί αντίστοιχα φορτισμένα σώματα.

Με κατάλληλη κατεργασία ενός υπό μαγνήτιση υλικού μπορεί να δημιουργηθεί ένας «μόνιμος μαγνήτης», ο οποίος παραμένει μαγνητικά φορτισμένος ακόμα και μετά την αναίρεση των συνθηκών που οδήγησαν στην φόρτισή του. Σε αντίθετη περίπτωση, απομαγνητίζεται παροδικά, χάνοντας σταδιακά την φόρτιση του (μερικώς ή εξ ολοκλήρου) όταν σταματήσει να ασκείται μαγνητίζουσα δύναμη σε αυτό.

4.2.1.1. Μαγνητικό Πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο είναι χώρος στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις σε ένα κινούμενο ηλεκτρικά φορτισμένο σώμα ή σε ένα μαγνητικά φορτισμένο σώμα. Μαγνητικό πεδίο δημιουργείται πέριξ ενός μόνιμου μαγνήτη ή ενός ηλεκτροφόρου αγωγού.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) περιγράφει την ικανότητά του να μαγνητίσει ένα σώμα εντός αυτού.

4.2.1.2. Δυναμικές ή Μαγνητικές Γραμμές

Οι δυναμικές γραμμές αποτελούν κλειστούς βρόχους που κατευθύνονται από το «νότιο» στο «βόρειο» πόλο ενός μαγνητικά φορτισμένου σώματος (και αντίστροφα στο χώρο εκτός του μαγνήτη). Πρόκειται για νοητές γραμμές οι οποίες ακολουθούν την διαθέσιμη διαδρομή με την μικρότερη αντίσταση, χωρίς να τέμνονται μεταξύ τους (ένας ελεύθερος Β πόλος θα κινείτο πάνω σε αυτή τη γραμμή). Το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο της δυναμικής γραμμής εφάπτεται σε αυτή. Η πυκνότητά των δυναμικών γραμμών είναι ανάλογη της έντασης του πεδίου και μειώνεται καθώς απομακρύνονται από τους πόλους.

Το σύνολο των μαγνητικών γραμμών σε ένα μαγνητισμένο σώμα καλείται μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή ανά μονάδα επιφάνειας, ονομάζεται μαγνητική επαγωγή (B).

4.2.1.3. Μαγνητική Διαπερατότητα

Η μαγνητική διαπερατότητα (μ), αποτελεί μέγεθος το οποίο καταδεικνύει την ευκολία με την οποία μαγνητίζεται ένα υλικό, δηλαδή την απαιτούμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) του οποίου η επίδραση απαιτείται ώστε το πρώτο να φορτιστεί μαγνητικά (με πυκνότητα μαγνητικής ροής B):

$$B = \mu * H$$

Ανάλογα με την τιμή της μαγνητικής τους διαπερατότητας, τα υλικά ταξινομούνται σε τρεις ευρύτερες κατηγορίες:

- Σιδηρομαγνητικά υλικά (με $\mu \gg 1$), τα οποία μαγνητίζονται εύκολα. Τυπικά σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν ο σίδηρος και ορισμένα από τα κράματά του (συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων χαλύβων). Μαγνητικός έλεγχος μπορεί να διενεργηθεί μόνο στα σιδηρομαγνητικά υλικά, εξαιτίας των ευεργετικών για την περίπτωση ιδιοτήτων τους.
- Παραμαγνητικά Υλικά (με $\mu \simeq 1^{+}$), που παρουσιάζουν ασθενή έλξη σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αλλά δεν διατηρούν μαγνητισμό όταν απομακρυνθούν από αυτό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι το αλουμίνιο και ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας.
- Διαμαγνητικά Υλικά (με $\mu \simeq 1^{-}$), που απωθούνται ελαφρώς όταν τοποθετηθούν σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τέτοια είναι ο χαλκός, ο άργυρος κ.α.

4.2.1.4. Βρόχος Υστέρησης – Μαγνητικός Κορεσμός

Ο βρόχος υστέρησης (hysteresis loop) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την μαγνητική συμπεριφορά ενός σιδηρομαγνητικού υλικού καθώς εφαρμόζεται σε αυτό μαγνητίζουσα δύναμη διαφορετικού μέτρου και κατεύθυνσης. Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος απεικονίζεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H), ενώ στον κατακόρυφο, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής.

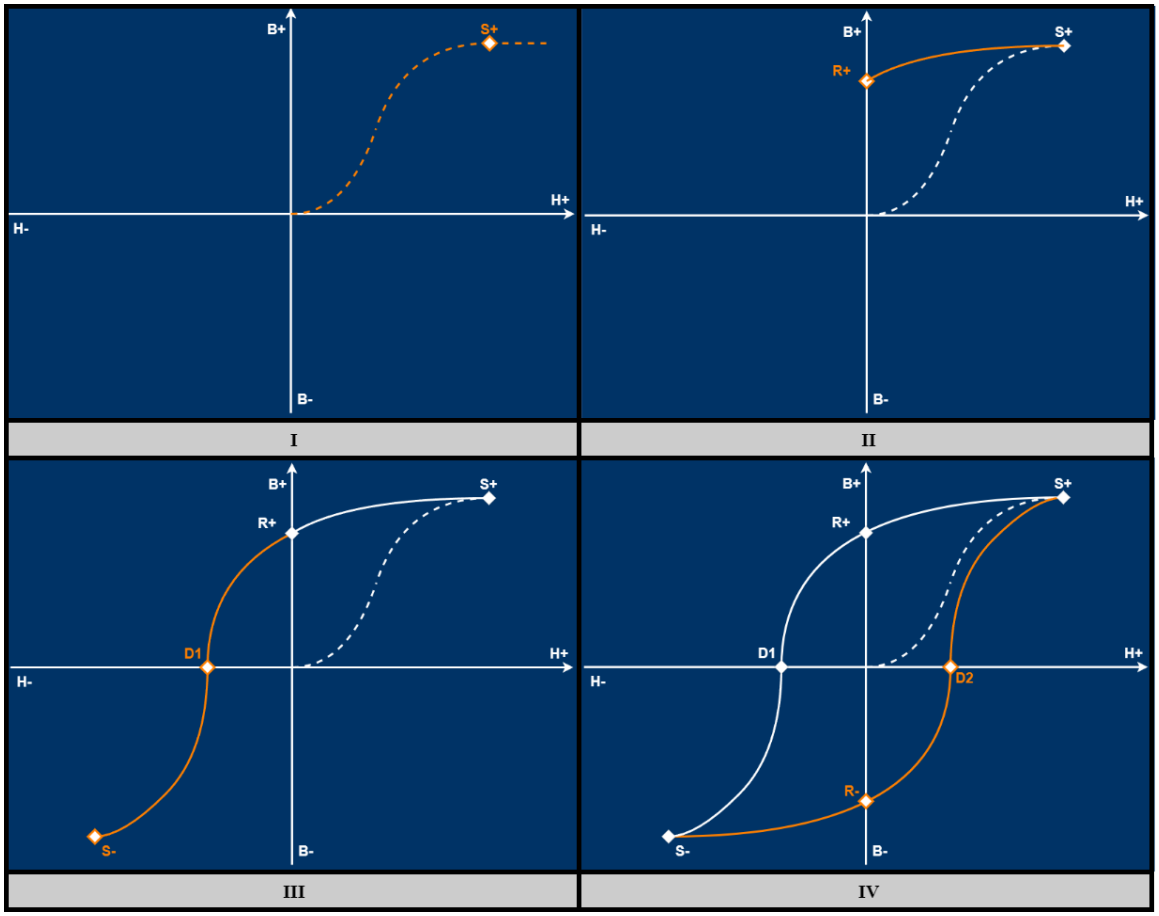
Το διάγραμμα του βρόχου υστέρησης διακρίνεται στις παρακάτω περιοχές (Εικόνα 4.1):

I. Όταν ένα μαγνητικά ουδέτερο σώμα ($B = 0$) βρεθεί εντός μαγνητικού πεδίου, φορτίζεται μαγνητικά. Μεγαλύτερη ένταση του πεδίου οδηγεί σε μεγαλύτερη πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Όμως, για δεδομένη τιμή της έντασης, επέρχεται μαγνητικός κορεσμός (S^{+}), με αποτέλεσμα περαιτέρω αύξηση της να μην επιφέρει αλλαγές στη φόρτιση του σώματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον προσανατολισμό των πόλων των επιμέρους στοιχειωδών διπόλων στην κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

II. Μετά από παύση της μαγνητίζουσας δύναμης, οδηγούμαστε στο σημείο R^{+}στο οποίο παρατηρείται παραμένουσα μαγνήτιση. Δηλαδή, παρότι έχει παύσει η επίδραση μαγνητικών δυνάμεων στο σώμα, αυτό δεν έχει επιστρέψει στην αρχική του ουδέτερη κατάσταση και κατά συνέπεια δεν έχει απωλέσει τις μαγνητικές του ιδιότητες.

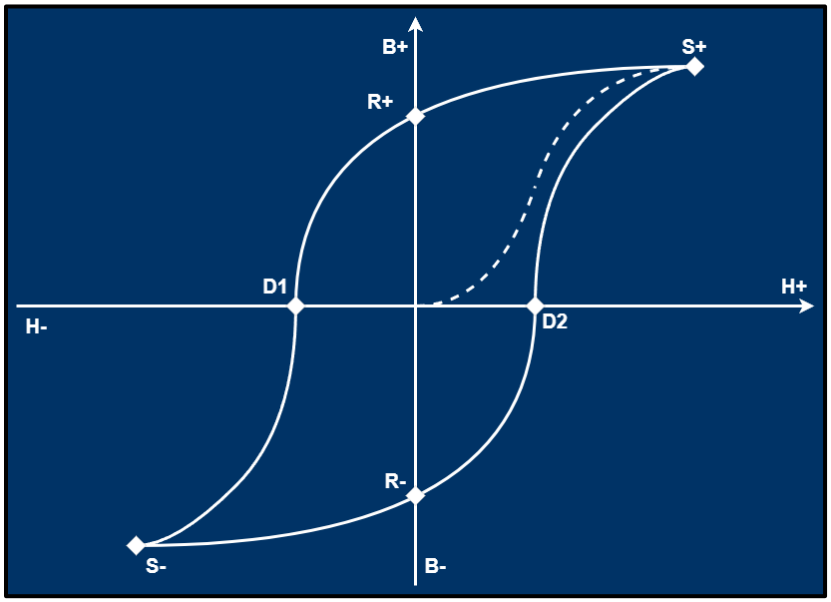
III. Προκειμένου να απομακρυνθεί η παραμένουσα μαγνήτιση, θα πρέπει να εφαρμοστεί μαγνητίζουσα δύναμη αντίθετης κατεύθυνσης από την προηγούμενη.
Εφόσον το μέτρο της έντασης του δρώντος πεδίου υπερβεί το απαιτούμενο (D_1), θα προκύψει μαγνητισμός του σώματος με αντίθετη κατανομή των πόλων σε σχέση με την αρχική συνθήκη.
Αντίστοιχα, σταδιακή αύξηση της έντασης του πεδίου θα οδηγήσει σε νέο κορεσμό (S^{-}).

IV. Ακολούθως, παύση της μαγνητικής δύναμης θα οδηγήσει σε παραμένουσα μαγνήτιση (R^{-}). Η εκ νέου εφαρμογή πεδίου με την αρχική κατεύθυνση θα επιφέρει σταδιακή απομαγνήτιση και για μεγαλύτερες εντάσεις, άνοδο έως το σημείο κορεσμού (S^{+}).



Εικόνα 4.1 Στάδια παραγωγής διαγράμματος βρόχου υστέρησης

Το σύνολο των παραπάνω απεικονίζεται στο διάγραμμα βρόχου υστέρησης (Εικόνα 4.2).

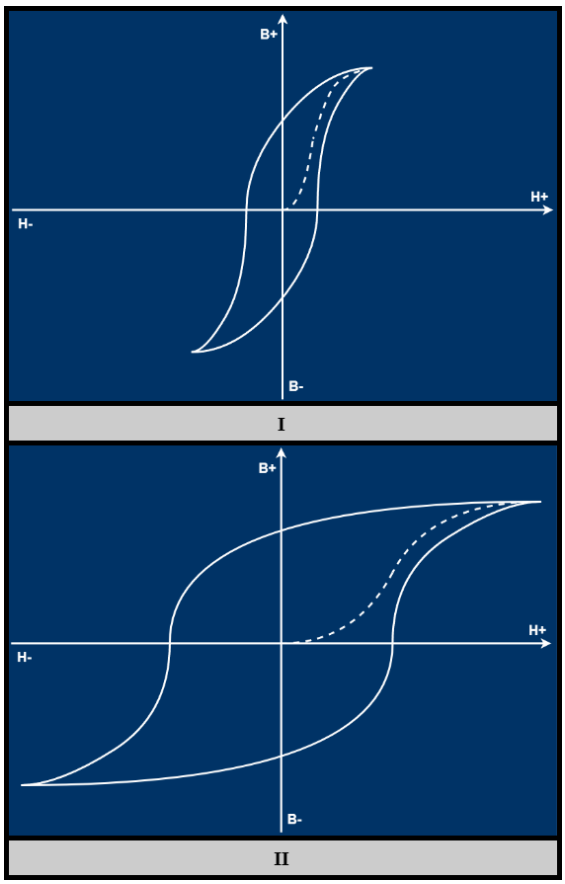


Εικόνα 4.2 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης

Τα υλικά διακρίνονται σε μαγνητικώς σκληρά και μαγνητικώς μαλακά, αναλόγως με την δυνατότητά τους να διατηρήσουν τις μαγνητικές τους ιδιότητες, μετά την απομάκρυνση του δρώντος μαγνητικού πεδίου.

- **Μαγνητικώς Μαλακά Υλικά:**
  Χαρακτηρίζονται από υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και μικρές τιμές παραμένουσας μαγνήτισης, δηλαδή απομαγνητίζονται σε μεγάλο βαθμό αφού παύσει η επίδραση του μαγνητικού πεδίου που τα έφερε σε αυτήν την κατάσταση.
  Συνεπώς το διάγραμμα βρόχου υστέρησής τους αναμένεται να έχει μικρές τιμές παραμένουσας μαγνήτισης B_R και να διακρίνεται από στενό και κατακόρυφο βρόχο (Εικόνα 4.3 - I).
  Τα μαγνητικά σωματίδια παράγονται από μαγνητικώς μαλακά υλικά, τα οποία προσελκύονται ευκολότερα και αμεσότερα από το διαρρέον μαγνητικό πεδίο στις ασυνέχειες και δεν «κολλάνε» μεταξύ τους.

- **Μαγνητικώς Σκληρά Υλικά:**
  Απεναντίας, τα μαγνητικώς σκληρά χαρακτηρίζονται από φαρδύ και οριζόντιο βρόχο με υψηλές τιμές παραμένουσας μαγνήτισης (Εικόνα 4.3 - II). Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών.



Εικόνα 4.3 Βρόχος Υστέρησης: (I) Μαγνητικώς μαλακού υλικού, (II) Μαγνητικώς σκληρού υλικού

4.2.1.5. Ρεύμα & Επιδερμικό Φαινόμενο

Όταν χρησιμοποιείται ρεύμα για την μαγνήτιση ενός σώματος, η κατανομή της μαγνητικής ροής επηρεάζεται από τη φύση του ρεύματος αυτού.

Κατά την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος, οι δυναμικές γραμμές κατανέμονται καθ' όλο το πάχος του δοκιμίου. Αντιθέτως, στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος συγκεντρώνονται στην επιφάνεια και σε μικρό βάθος κάτω από αυτή. Το εν λόγω φαινόμενο, καθορίζει την διεισδυτικότητα της μεθόδου, δηλαδή το βάθος στο οποίο δύναται να εντοπίσει υποεπιφανειακές ασυνέχειες.

Το αποτέλεσμα της χρήσης εναλλασσόμενου ρεύματος (σε σχετικά υψηλές συχνότητες), το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής κοντά στην επιφάνεια, καλείται επιδερμικό φαινόμενο.

Ο μαγνητικός έλεγχος με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, επωφελείται από το επιδερμικό φαινόμενο. Μάλιστα, η περιοδική φύση του ρεύματος, δονεί τα μαγνητικά σωματίδια, βοηθώντας τα να κινηθούν στην επιφάνεια του σώματος και κατά συνέπεια να συγκεντρωθούν στις ασυνέχειες.

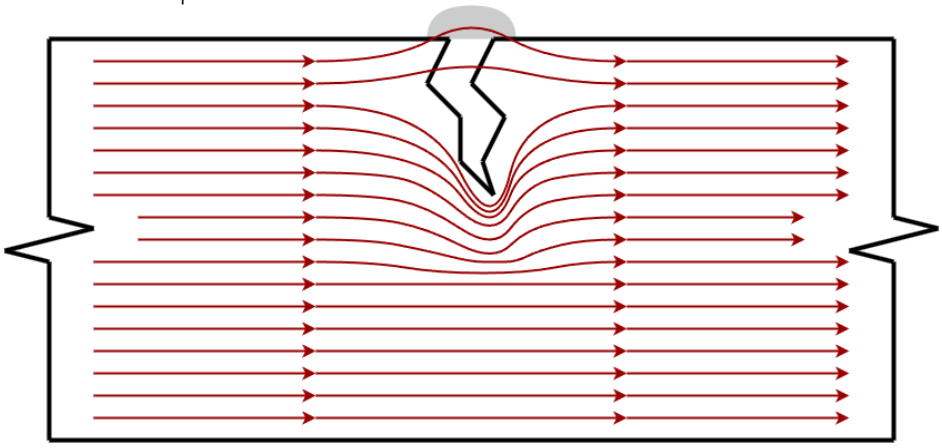
Όταν απαιτείται μεγαλύτερη διεισδυτικότητα, χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα. Ωστόσο, σε τέτοιες περιπτώσεις συχνά προτιμάται η επιστράτευση κάποιας άλλης, εξειδικευμένης μεθόδου μη-καταστροφικού ελέγχου.

4.2.2. Διαρροή Μαγνητικού Πεδίου

Όταν ένα δοκίμιο είναι μαγνητικά φορτισμένο, διαρρέεται από μαγνητικές γραμμές με κατεύθυνση από τον «νότιο» στον «βόρειο» πόλο του. Εφόσον στο δοκίμιο αυτό (λ.χ. μία μεταλλική δοκός) δεν εμφανίζονται ασυνέχειες ή έντονες γεωμετρικές μεταβολές, οι δυναμικές γραμμές δεν εξέρχονται αυτού (παρά μόνο από τους πόλους) και έχουν ομοιόμορφη κατανομή.

Αντιθέτως, όταν σε αυτό υπάρχουν σημεία απότομης μεταβολής της διαπερατότητας πολύ κοντά στην επιφάνεια, όπως επιφανειακές ασυνέχειες (λ.χ. ρωγμές), το μαγνητικό πεδίο διαταράσσεται. Συγκεκριμένα, οι δυναμικές γραμμές εκτρέπονται της διαδρομής τους, παρακάμπτοντας την ασυνέχεια. Μέρος των εκτρεπόμενων αυτών γραμμών οδηγείται προς το εσωτερικό του σώματος πυκνώνοντας την ροή στην περιοχή, ενώ οι υπόλοιπες διαφεύγουν από την επιφάνεια του σώματος και θα επανέλθουν σε αυτό αφού διέλθουν από το ρευστό που το περιβάλλει (Εικόνα 4.4).

Εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της διαρροής μαγνητικού πεδίου, καθώς και την ιδιότητα των σιδηρομαγνητικών σωματιδίων να συγκεντρώνονται στις μαγνητικές γραμμές, χρησιμοποιούμε τον μη καταστροφικό μαγνητικό έλεγχο για να εντοπίσουμε επιφανειακές και υποεπιφανειακές (σε πολύ μικρό βάθος) ασυνέχειες. Αυτό γίνεται με την μαγνήτιση του εξεταζόμενου μέρους η οποία ακολουθείται από την κάλυψη της επιφάνειας του από μαγνητικά σωματίδια. Εφόσον υπάρχει διαρροή μαγνητικού πεδίου σε κάποιο σημείο, τα σωματίδια θα συγκεντρωθούν στις διαφυγούσες δυναμικές γραμμές καταδεικνύοντας την ύπαρξη κάποιας ασυνέχειας. Η αναλυτική διαδικασία του ελέγχου με την εν λόγω μέθοδο, καθώς και η αξιολόγηση των προκύπτοντων ενδείξεων περιγράφεται αναλυτικά στα κεφάλαια που ακολουθούν.



Εικόνα 4.4 Διαρροή μαγνητικού πεδίου

Οι παραλλαγές της μεθόδου διακρίνονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες με βάση το χρονικό σημείο εφαρμογής της μαγνητίζουσας δύναμης:

4.2.2.1. Παραμένουσα Μέθοδος

Η παραμένουσα μέθοδος χρησιμοποιείται για την εξέταση μαγνητικώς σκληρών υλικών, στα οποία η παραμένουσα μαγνήτιση επαρκεί για την έλξη των σωματιδίων στις ασυνέχειες. Σε αυτήν την περίπτωση τα σωματίδια εφαρμόζονται μετά την παύση της μαγνήτισης του δοκιμίου, απλουστεύοντας την διαδικασία ελέγχου. Καθώς όμως εξακολουθούν να υπάρχουν απώλειες στη μαγνητική φόρτιση, η μέθοδος εφαρμόζεται χάριν ευκολίας μόνο σε δυσπρόσιτα σημεία.

4.2.2.2. Συνεχής Μέθοδος

Στην περίπτωση της συνεχούς μεθόδου, η οποία χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα μαγνητικά σωματίδια εφαρμόζονται στην επιφάνεια αμέσως πριν ή/και κατά την διάρκεια της εφαρμογής μαγνητίζουσας δύναμης. [6], [13], [14], [17], [23]

4.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

4.3.1. Καθαριστές (Pre-cleaners)

Ο επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας του υπό εξέταση δοκιμίου αποτελεί παράγοντα νευραλγικής σημασίας για την εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Οι ρυπαντικοί παράγοντες μπορεί να περιλαμβάνουν σκόνη, έλαια, προϊόντα διάβρωσης ή και υπολείμματα από προηγούμενη διενέργεια μη καταστροφικού ελέγχου. Η παρουσία τους αποτρέπει την ελεύθερη κίνηση των μαγνητικών σωματιδίων στην επιφάνεια, βλάπτοντας την αξιοπιστία της μεθόδου. Διαφορετικές μέθοδοι και προϊόντα που χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό της επιφανείας παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3.3.

4.3.2. Βαφή Υποστρώματος (Background Color)

Καθώς η αποτελεσματικότητα της μεθόδου βασίζεται στην παρατήρηση οπτικών ενδείξεων, είναι κρίσιμο αυτές να είναι όσο το δυνατόν πιο ευδιάκριτες. Για το σκοπό αυτό, πριν την εφαρμογή των σωματιδίων, χρησιμοποιείται υπόστρωμα βαφής το οποίο χρωματίζει την επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου, ώστε να ενισχυθεί η χρωματική αντίθεση μεταξύ τους. Καθώς οι μαγνητικές μελάνες (βλ. 4.3.4.2) έχουν μαύρο χρώμα, επιλέγεται λευκή βαφή υποστρώματος για την οπτική υποβοήθηση του ελεγκτή.

Στην περίπτωση χρήσεως μαγνητικών σωματιδίων με φθορίζουσες ιδιότητες (αναλυτικές πληροφορίες ακολουθούν παρακάτω), η παρατήρηση των αποτελεσμάτων διενεργείται στο σκοτάδι και υπό υπεριώδη ακτινοβολία. Συνεπώς, δεν χρειάζεται η εφαρμογή υποστρώματος στην επιφάνεια του δοκιμίου.

4.3.3. Διατάξεις Μαγνήτισης

Προκειμένου να επιτευχθεί η, απαραίτητη για την διεκπεραίωση του ελέγχου, μαγνητική φόρτιση του δοκιμίου, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά διατάξεων, εξειδικευμένες σε εφαρμογές με ξεχωριστές απαιτήσεις. Οι κύριοι παράγοντες που καταδεικνύουν την ιδανική κατά περίπτωση διάταξη, είναι το μέγεθος και η γεωμετρία του δοκιμίου, ο όγκος της εξεταστέας επιφάνειας και η ανάγκη φορητότητας του εξοπλισμού. Σύμφωνα με τον τρόπο που επιτυγχάνουν το σκοπό τους διακρίνονται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

4.3.3.1. Άμεση Μαγνήτιση

Σε αυτήν την περίπτωση το εξεταζόμενο μέρος διαρρέεται από ρεύμα, συνέπεια του οποίου είναι η μαγνητική του φόρτιση.

- **Ακροδέκτες**
  Πρόκειται για ένα ζεύγος μεταλλικών ακροδεκτών, οι οποίοι διαρρέονται από ρεύμα (Εικόνα 4.5)[11]. Καθώς δημιουργείται κύκλωμα με το εξεταζόμενο υλικό προκύπτει κυκλικό μαγνητικό πεδίο πέριξ των απολήξεών τους.

Εικόνα 4.5 Ακροδέκτες (pistol prods)
Πηγή: Johnson & Allen NDT [johnsonandallen.co.uk]

[11] [24] (JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938, 2024)

Κατά τη χρήση τους, υπάρχει ο κίνδυνος υπερθέρμανσης γύρω από το σημείο επαφής, και δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου. Σε συνδυασμό με το γεγονός πως το δοκίμιο διαρρέεται από ρεύμα εγείρονται ζητήματα ασφαλείας. Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων, είναι η σταδιακή ελάττωση της χρήσης της μεθόδου.

- **Μονάδα Πάγκου**
  Η μονάδα πάγκου (Εικόνα 4.6)[12] χρησιμοποιείται στον έλεγχο μικρότερων εξαρτημάτων αλλά και κυλινδρικών μεγαλύτερου μεγέθους (όπως κάποιος στροφαλοφόρος άξονας). Συνήθως διαθέτει ενσωματωμένη δεξαμενή διαλύματος μαγνητικών σωματιδίων, αυτοματοποιώντας την διαδικασία.
  Διαθέτει δύο κεφαλές οι οποίες χρησιμοποιούνται για την στήριξη του δοκιμίου αλλά και ως αγωγοί για την διαρροή του από ηλεκτρικό ρεύμα. Συνέπεια του προκύπτοντος κυκλώματος είναι ο σχηματισμός κυκλικού μαγνητικού πεδίου, εγκάρσια στην επιφάνεια του τεμαχίου.

Εικόνα 4.6 Μονάδα πάγκου
Πηγή: Johnson & Allen NDT [johnsonandallen.co.uk]

4.3.3.2. Έμμεση Μαγνήτιση

Στην περίπτωση της έμμεσης μαγνήτισης ο μαγνητισμός του δοκιμίου είναι προϊόν μαγνητικού πεδίου το οποίο σχηματίζεται εκτός αυτού.

- **Μονάδα Πάγκου**
  Η διάταξη μονάδας πάγκου που εξετάστηκε παραπάνω, διαθέτει και τη δυνατότητα έμμεσης μαγνήτισης. Συγκεκριμένα, μέσω πηνίων στα σημεία στερέωσης, αυτά μπορούν να λειτουργήσουν ως πόλοι, παράγοντας διάμηκες μαγνητικό πεδίο στο δοκίμιο.
  Μέσω των δύο διαφορετικών επιλογών μαγνήτισης, επιτρέπει την ανίχνευση διαμηκών και εγκαρσίων ασυνεχειών, προσδίδοντας αξιοσημείωτη ευελιξία και πρακτικότητα.

- **Κεντρικός Αγωγός**
  Η συγκεκριμένη τεχνική εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες μιας μονάδας πάγκου και χρησιμοποιείται για την εξέταση δοκιμίων με οπή στο κέντρο. Μεταλλική ράβδος (μεγάλης ηλεκτρικής αγωγιμότητας) τοποθετείται μεταξύ των κεφαλών της μονάδας και μέσα από την οπή του εξεταζόμενου μέρους. Στη συνέχεια η ράβδος διαρρέεται από ρεύμα και οδηγεί στον σχηματισμό κυκλικού μαγνητικού πεδίου, το οποίο και χρησιμοποιείται για την εξέταση με τα μαγνητικά σωματίδια.
  Η χρηστικότητα της τεχνικής οφείλεται εν πολλοίς στην δυνατότητα ταυτόχρονης εξέτασης πολλών εξαρτημάτων.

[12] [25] (JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938, 2024)

- **Μόνιμος Μαγνήτης:**
  Πρόκειται συνήθως για πεταλοειδή μαγνήτη, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο σε δύο σημεία, δημιουργώντας μαγνητική ροή μεταξύ των πόλων του. Ωστόσο, η ευαισθησία που επιτυγχάνεται είναι σχετικά μικρή και συχνά η μαγνητίζουσα δύναμη δεν επαρκεί ώστε να αποδώσει σαφείς ενδείξεις στα σημεία ενδιαφέροντος. Εφόσον αυτό αντισταθμιστεί με την χρήση ενός ισχυρότερου μαγνήτη, η αποκόλλησή του από την επιφάνεια, μετά το πέρας της εξέτασης, αποτελεί δύσκολη και ενδεχομένως επικίνδυνη εργασία. Επιπλέον, τα μαγνητικά σωματίδια τείνουν να συγκεντρώνονται στις απολήξεις του μαγνήτη, δυσχεραίνοντας περαιτέρω το έργο του ελεγκτή.
  Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μαγνητική ράβδος σε συνδυασμό με μία αντίστοιχη ενός ουδετέρου, μαγνητικά μαλακού υλικού, δημιουργώντας ροή μεταξύ των πόλων τους.
  Εξαιτίας των ζητημάτων αξιοπιστίας που αναφέρθηκαν παραπάνω η μαγνήτιση με μόνιμους μαγνήτες δεν βρίσκει παρά ελάχιστες εφαρμογές.

- **Πεταλοειδής Ηλεκτρομαγνήτης (Yoke):**
  Ο πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης (Εικόνα 4.7) αποτελείται από ένα μαγνητικά μαλακό υλικό με πεταλοειδές σχήμα που περιβάλλεται από πηνίο, το οποίο όταν διαρρέεται από ρεύμα οδηγεί στην δημιουργία διαμήκους μαγνητικού πεδίου μεταξύ των άκρων της συσκευής. Τροφοδοτείται από το δίκτυο ή μπαταρία.
  Οι απολήξεις του μπορούν να προσαρμοστούν μέσω δύο αρθρώσεων, επιτρέποντας την προσέγγιση περιοχών πολυπλοκότερης γεωμετρίας (όπως μία αυχενική συγκόλληση).

Εικόνα 4.7 Πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης (yoke)

  Ενδείκνυται για την εξέταση μικρών περιοχών και διακρίνεται για την φορητότητα και την πρακτικότητα της χρήσης του.

- **Πηνίο / Σωληνοειδές**
  Για την εξέταση δοκιμίων κυλινδρικού σχήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο χειροκίνητο πηνίο (Εικόνα 4.8)[13] το οποίο τα περιβάλλει και οδηγεί στη δημιουργία διαμήκους μαγνητικού πεδίου. Αποτελεί μία πρακτική μέθοδο εντοπισμού εγκάρσιων γραμμικών ασυνεχειών σε άξονες και ατράκτους.

Εικόνα 4.8 Πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος
Πηγή: Johnson & Allen NDT [johnsonandallen.co.uk]

[13] [26] (JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938, 2024)

4.3.3.3. Επαγωγικό Η/Μ Πεδίο

Το επαγωγικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργείται σε περιοχή γύρω από έναν αγωγό, όταν το ρεύμα που τον διαρρέει διακόπτεται απότομα. Αυτό οδηγεί στην ροή επαγόμενου ρεύματος σε σώματα που βρίσκονται στην περιοχή αυτή. Κατά συνέπεια, δημιουργείται αναλόγως του ρεύματος και μαγνητικό πεδίο, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξέταση. Η μέθοδος αυτή ξεχωρίζει, διότι αποφεύγει την επαφή κάποιου ρευματοφόρου αγωγού με το υπό έλεγχο δοκίμιο και τα προβλήματα που αυτή δημιουργεί (υπερθέρμανση / δημιουργία τόξου). Συνήθως αξιοποιείται για την εξέταση δακτυλίων.

4.3.4. Μαγνητικά Σωματίδια

Τα μαγνητικά σωματίδια που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από υψηλή διαπερατότητα και κατασκευάζονται από μαγνητικώς μαλακά υλικά (σίδηρο και οξείδια του σιδήρου). Συναντώνται στις ακόλουθες μορφές.

4.3.4.1. Ξηρά Σκόνη

Η ξηρή μέθοδος χρησιμοποιεί σκόνη σωματιδίων και ενδείκνυται για την εξέταση τραχιών επιφανειών και τον εντοπισμό ελαφρώς υποεπιφανειακών ασυνεχειών. Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι σκόνες διακρίνονται σε ορατές και φθορίζουσες, με τις δεύτερες να χρησιμοποιούνται σε σκοτεινό περιβάλλον υπό την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας και να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ευαισθησία. Σημειώνεται πως οι σκόνες σωματιδίων επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ευαισθησία χρησιμοποιούμενες σε συνδυασμό με εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο ενισχύει το επιδερμικό φαινόμενο και βοηθά τα σωματίδια να μετακινηθούν στην επιφάνεια.

4.3.4.2. Μαγνητικές Μελάνες

Οι μαγνητικές μελάνες αποτελούν αιωρήματα τα οποία αποτελούνται από κάποιον υγρό φορέα (διαλύτη ή νερό) και οξείδια του σιδήρου μεγέθους έως $40\ \mu m$.

Οι μελάνες περιέχουν χρωματιστά ή φθορίζοντα μαγνητικά σωματίδια, όπως και στην περίπτωση της ξηράς σκόνης. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με εναλλασσόμενο ρεύμα.

4.3.5. Λοιπά Εργαλεία

Μετά το πέρας της εξέτασης ενός υλικού, διατηρείται σε αυτό κάποιο μαγνητικό πεδίο. Αναλόγως με την χρήση του ή τις κατεργασίες που θα δεχτεί και την τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης, ενδέχεται να πρέπει να απομαγνητιστεί.

- Ο **μετρητής Gauss**, είναι εργαλείο μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Με έναν τέτοιο, ανιχνεύεται και μετράται η παραμένουσα μαγνήτιση στο δοκίμιο που εξετάστηκε.
- Οι **συσκευές απομαγνήτισης** (συνήθως πηνία) χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση του παραμένοντος μαγνητικού πεδίου από ένα σώμα το οποίο προηγουμένως ελέγχθηκε με την υπό μελέτη μέθοδο.

[6], [13], [14], [17], [23]

4.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος του μη καταστροφικού μαγνητικού ελέγχου χρησιμοποιεί κατά περίπτωση πολλά διαφορετικά είδη εξοπλισμού με ξεχωριστές δυνατότητες. Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κατηγορίες εξοπλισμού:

- Πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC Yoke).
- Ορατή μαγνητική μελάνη (χωρίς φθορίζουσες ιδιότητες), βάσης διαλύτη.
- Επιπλέον, χρησιμοποιούνται λευκό χρώμα υποστρώματος ως οπτικό βοήθημα για την δημιουργία αντίθεσης με την μαύρη μαγνητική μελάνη και καθαριστικό (cleaner).

Τα αναλώσιμα προϊόντα παρέχονται σε δοχεία αεροζόλ.

Για τα δεδομένα μέσα, ακολουθεί η περιγραφή της προβλεπόμενης διαδικασίας εξέτασης ενός δοκιμίου με την μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων.

4.4.1. Προκαταρκτικός Καθαρισμός και Προετοιμασία Επιφάνειας Δοκιμίου

Προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ευαισθησία στον μαγνητικό έλεγχο θα πρέπει να έχει προηγηθεί σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας του υπό εξέταση δοκιμίου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη μετακίνηση της μαγνητικής μελάνης στην επιφάνεια, προκειμένου να είναι εφικτή η προσέγγιση των ασυνεχειών.

Τα ρυπαντικά στοιχεία καθώς και ορισμένες ενδεικνυόμενες διεργασίες απομάκρυνσής τους απαριθμούνται παρακάτω:

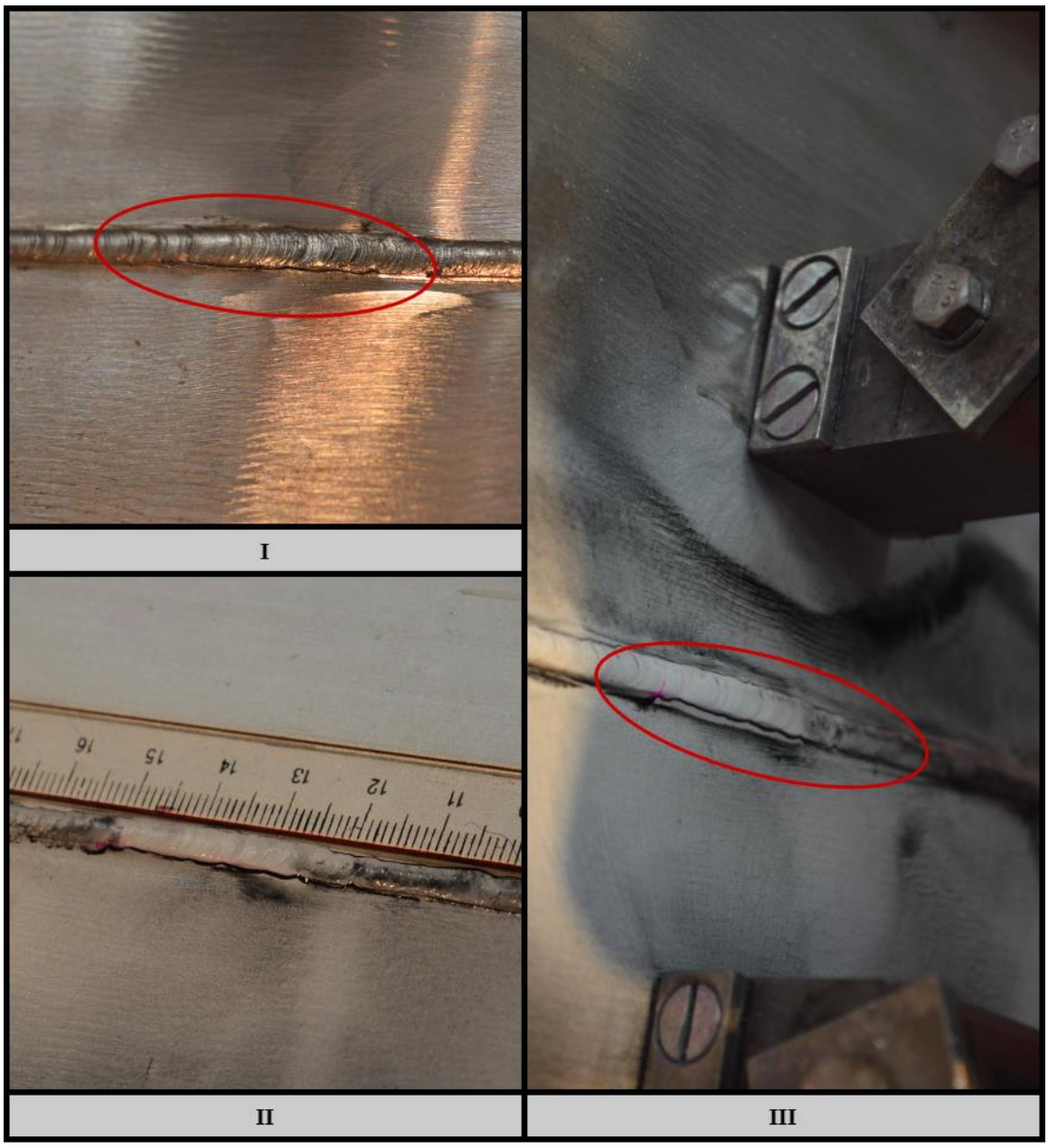
- **Έλαια**: Η κατηγορία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει έλαια που χρησιμοποιούνται σε μία μηχανολογική εγκατάσταση όπως λιπαντικά και γράσα. Για τον καθαρισμό τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο συσκευασμένο καθαριστικό (cleaner) το οποίο παρέχεται στα κιτ ελέγχου ή το λουτρό υπερήχων.
- **Σκωρία και οξείδια**: Η ύπαρξή τους στην επιφάνεια εμποδίζει τον εντοπισμό ασυνεχειών, ενώ συγκρατούν μέρος διεισδυτή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικές ενδείξεις.
- **Βαφή και βερνίκι**: Επηρεάζουν την μέθοδο μόνο αν έχουν μεγάλο πάχος, περίπτωση στην οποία θα πρέπει να αφαιρεθούν.

Εφόσον είναι γνωστό το ιστορικό του δοκιμίου (συνθήκες παρασκευής / αποθήκευσης / λειτουργίας), η διαδικασία του προκαταρκτικού καθαρισμού απλουστεύεται, καθώς προσαρμόζεται σε δεδομένα ρυπαντικά στοιχεία.

Με την ολοκλήρωση του καθαρισμού, το δοκίμιο που πρόκειται να εξεταστεί θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο, εκτός από τις προαναφερθείσες ακαθαρσίες, από υγρασία και διαλύτες που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθαρισμό του.

Αξίζει να σημειωθεί πως, όπως και στην μέθοδο των διεισδυτών, κρίνεται σκόπιμο να προηγηθεί οπτική επιθεώρηση από τον ελεγκτή, αναζητώντας ενδείξεις που θα τον κατευθύνουν στην μετέπειτα εργασία του. Τα ρυπαντικά στοιχεία, προτού αφαιρεθούν, ενδέχεται να υποδείξουν ασυνέχειες στο υλικό, καθώς επικάθονται σε αυτές. Αντίστοιχα, ευεργετικά θα δράσει ο οπτικός έλεγχος και κατόπιν του καθαρισμού του δοκιμίου. Οι παρατηρήσεις στα παραπάνω στάδια αποτελούν σημαντικό βοήθημα για τον ελεγκτή.

Παρακάτω (Εικόνα 4.9), παρουσιάζεται ρωγμή στη ρίζα συγκόλλησης η οποία είναι εμφανής κατά την οπτική επιθεώρηση (I). Η παρατήρηση, επιβεβαιώνεται και μετά την εξέταση με μαγνητικά σωματίδια (II), (III).



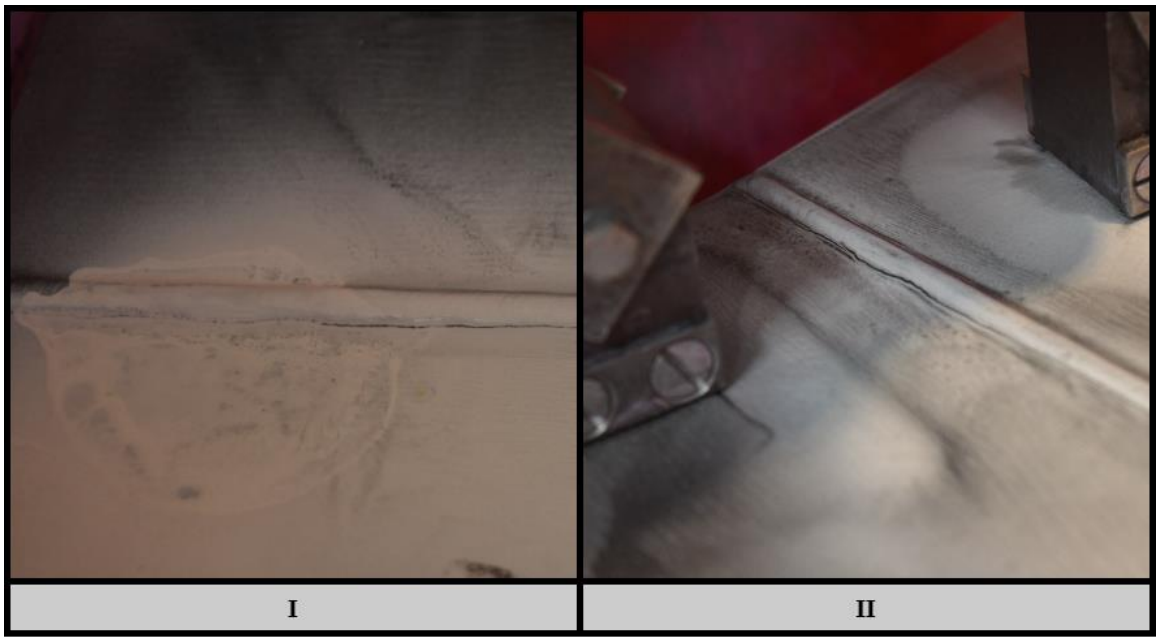
Εικόνα 4.9 (I) Αρχική οπτική ένδειξη γραμμικής ατέλειας, (II), (III) Επιβεβαίωση ύπαρξης ρωγμής με εφαρμογή της μεθόδου

4.4.2. Εφαρμογή Υποστρώματος

Προκειμένου να είναι ευδιάκριτες οι ενδείξεις της συγκέντρωσης μαγνητικών σωματιδίων (χωρίς φθορίζουσες ιδιότητες) που θα προκύψουν από την εφαρμογή της μεθόδου, χρησιμοποιείται λευκή βαφή η οποία χρωματίζει την επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου. Η πρακτική αυτή

αποσκοπεί στην δημιουργία αντίθεσης του παρασκηνίου με την μαγνητική μελάνη ή οποία επικάθεται στις ασυνέχειες του υλικού.

Καθώς το yoke χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα, η διεισδυτικότητα είναι μικρή και το φιλμ του χρώματος ενδέχεται να αποκρύψει υπάρχουσες επιφανειακές ασυνέχειες. Συνεπώς, θα πρέπει να έχει μικρό πάχος προκειμένου να επιτρέπει σε κάθε περίπτωση την διέλευση του διαρρέοντος μαγνητικού πεδίου από την ατμόσφαιρα. Στην Εικόνα 4.10 παρουσιάζεται περίπτωση, στην οποία το πάχος της στρώσης χρώματος εμποδίζει την εμφάνιση των ενδείξεων (I), οι οποίες όμως είναι εμφανείς όταν ακολουθηθεί ορθή πρακτική εφαρμογής υποστρώματος (II).



Εικόνα 4.10 (I) Στρώση βαφής υπερβολικού πάχους, (II) Αποκάλυψη ασυνέχειας που απέκρυπτε με επανάληψη της μεθόδου

4.4.3. Μαγνητισμός Δοκιμίου & Εφαρμογή Μαγνητικής Μελάνης

Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται μαγνητίζουσα δύναμη στο δοκίμιο με τον πεταλοειδή ηλεκτρομαγνήτη (AC yoke). Αυτός ο μαγνήτης χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό γραμμικών ασυνεχειών, μεταξύ άλλων και σε συγκολλητά δοκίμια. Σε αυτήν την περίπτωση οι αναμενόμενες ασυνέχειες που ενδέχεται να εντοπιστούν είναι κατά βάση ρωγμές αλλά και υποκοπή ή ατελής διείσδυση.

Πριν τον μαγνητισμό του δοκιμίου, είναι σημαντικό να επιβεβαιωθεί η ικανότητα του ηλεκτρομαγνήτη να φορτίζει επαρκώς το εξεταζόμενο σώμα. Αυτό εξασφαλίζει την επίτευξη της προβλεπόμενης ευαισθησίας και κατά συνέπεια, την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν.

Η διαδικασία του ελέγχου επάρκειας της συσκευής καθορίζεται από τα αντίστοιχα πρότυπα. Στην προκειμένη περίπτωση προβλέπει την ανύψωση μιας μεταλλικής πλάκας, ιδίου υλικού με αυτό του υπό έλεγχο δοκιμίου, μάζας τουλάχιστον 4.5 kg (απαιτείται ανυψωτική δύναμη $\sim 44\ N$). Εφόσον η παραπάνω ενέργεια αποδειχτεί εφικτή, επιβεβαιώνεται η λειτουργικότητα του ηλεκτρομαγνήτη αλλά και η επάρκεια της μαγνητίζουσας δύναμης στο υλικό ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος.

Κατόπιν, μπορεί να ξεκινήσει ο έλεγχος της περιοχής ενδιαφέροντος του εξεταζόμενου μέρους. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων, η περιοχή αυτή αφορά τα σημεία που είναι επιρρεπή στην εμφάνιση ατελειών οι οποίες προκύπτουν είτε κατά την παραγωγή είτε κατά την λειτουργία του

τεμαχίου. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τη ραφή της συγκόλλησης και τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (δηλαδή μία περιοχή περί τα 10 mm εκατέρωθεν της ραφής).

Το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την ενεργοποίηση του ηλεκτρομαγνήτη είναι διάμηκες με διεύθυνση μεταξύ των πόλων, δηλαδή των απολήξεων («ποδιών») της συσκευής. Η φύση του αυτή, επιτρέπει την ανίχνευση γραμμικών ασυνεχειών στις οποίες προσπίπτει υπό γωνία. Σε αντίθετη περίπτωση (γραμμικές ασυνέχειες παράλληλες στη ροή), το μαγνητικό πεδίο παρακάμπτει την ασυνέχεια χωρίς να διαρρέει στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια, δεν μπορεί να ανιχνευθεί με την υπό μελέτη μέθοδο.

Κατά τη διάρκεια του μαγνητισμού με το yoke, εφαρμόζονται στην ελεγχόμενη επιφάνεια τα μαγνητικά σωματίδια. Ο ψεκασμός τους από το δοχείο θα πρέπει να γίνεται παρατεταμένα και να οδηγεί σε ομοιόμορφη κατανομή τους σε όλη την ελεγχόμενη περιοχή. Ταυτόχρονα, αποφεύγεται η συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας μελάνης, η οποία λιμνάζοντας, ενδέχεται να αποκρύψει ασυνέχειες.

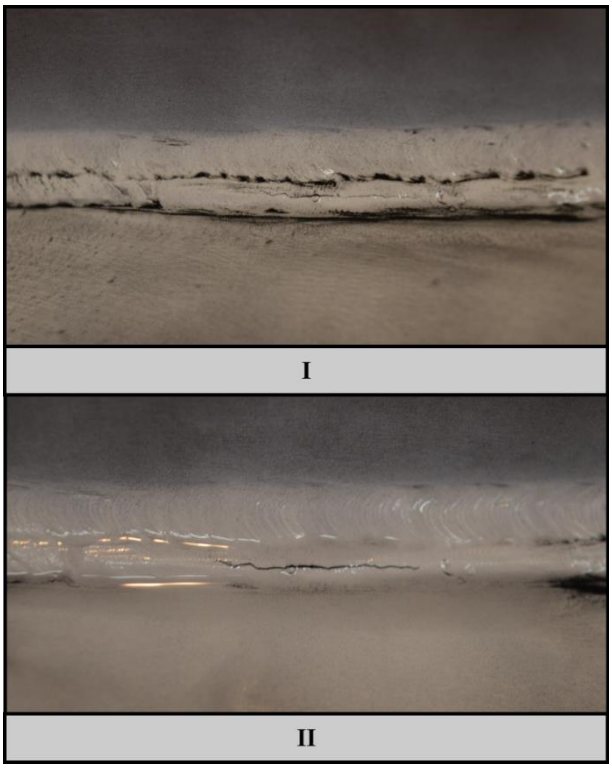
Καθώς ο ηλεκτρομαγνήτης θα πρέπει να μετακινηθεί, για να καλύψει το εύρος της εξεταζόμενης επιφάνειας, ο μαγνητισμός και η εφαρμογή των σωματιδίων αποτελούν αλλεπάλληλες διαδικασίες.

4.4.4. Αποτελέσματα

Οι ενδείξεις που προκύπτουν θα πρέπει να διακριθούν σε σχετικές, μη σχετικές και εσφαλμένες. Μη σχετικές καλούνται οι ενδείξεις που οφείλονται σε συγκέντρωση διεισδυτή σε σημεία που διαρρέει μαγνητικό πεδίο, αλλά δεν υπάρχουν ασυνέχειες (π.χ. σε περιοχές με επιφανειακή τραχύτητα ή απότομες γεωμετρικές αλλαγές). Αντιθέτως, οι εσφαλμένες ενδείξεις προξενούνται από λανθασμένους χειρισμούς κατά την διάρκεια του ελέγχου.

Οι σχετικές ενδείξεις διακρίνονται από της μη σχετικές με βάση το αποτύπωμά τους, το οποίο είναι λεπτό και έντονο.

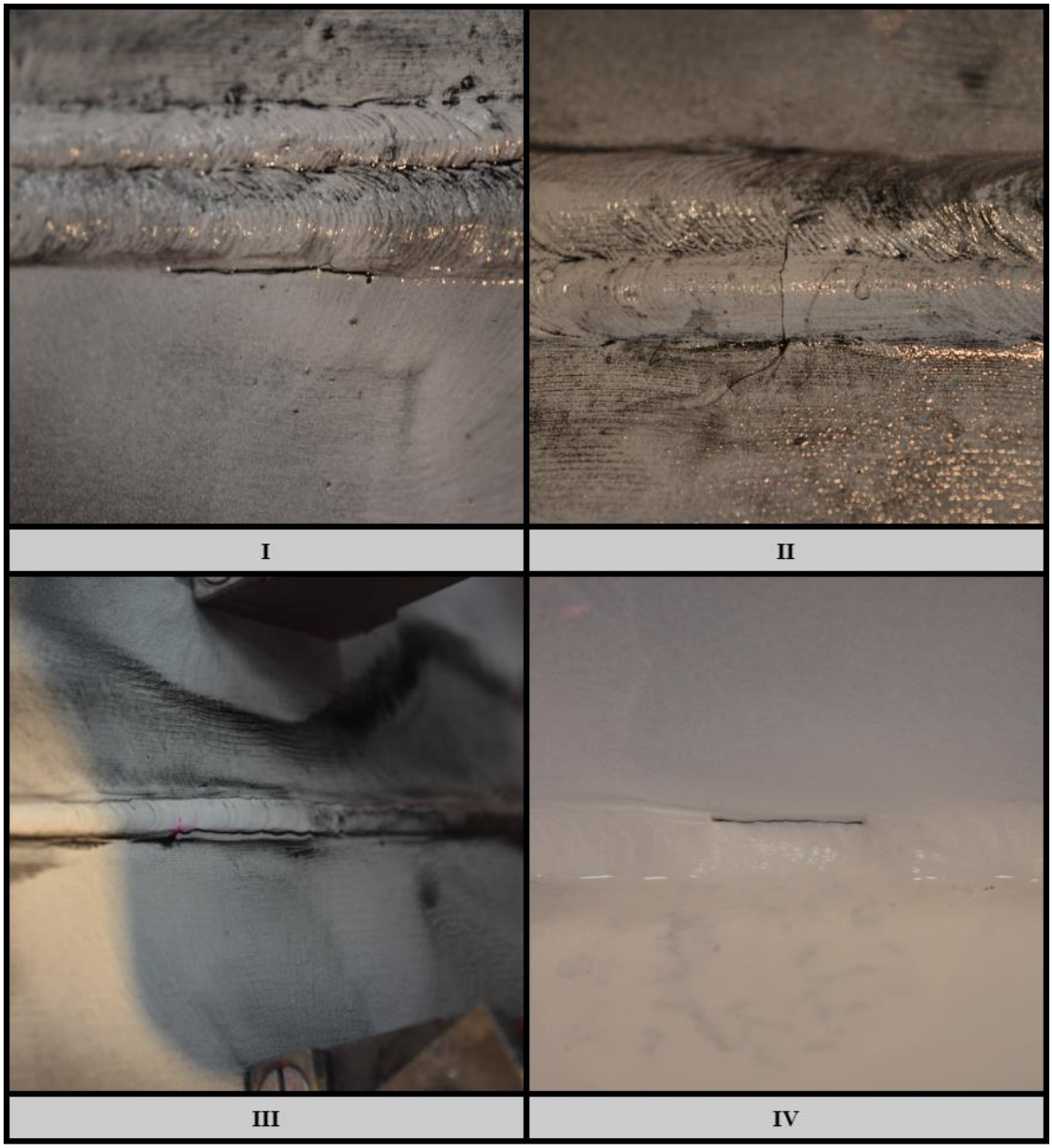
Στην Εικόνα 4.11, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την ίδια περιοχή εξεταζόμενου δοκιμίου αυχενικής συγκόλλησης. Στην πρώτη περίπτωση (I), είναι εμφανής μη σχετική ένδειξη μεταξύ των πάσων της ραφής, η οποία οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στην δεύτερη λήψη (II), έχει απομονωθεί η σχετική ένδειξη που υπάρχει στο σημείο και οφείλεται σε κάποια ρωγμή.



Εικόνα 4.11 (I) Διάφορες ενδείξεις στη ραφή αυχενικής συγκόλλησης, (II) Απομόνωση της σχετικής ένδειξης

Αφού διακριθούν οι σχετικές ενδείξεις, εξετάζεται το αν αποτελούν σφάλματα με βάση τα κριτήρια ποιότητας για το ελεγχόμενο δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον χαρακτηρισμό και την διαστασιολόγησή τους.

Τυπικές ασυνέχειες που μπορούν να εντοπιστούν με την μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων, και προέκυψαν από τις δοκιμές στο εργαστήριο παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.12 (I) Ρωγμή στον πόδα, (II) Εγκάρσια ρωγμή στη ραφή, (III) Ρωγμή στη ρίζα, (IV) Ατελής τήξη

4.4.5. Απομαγνητισμός Δοκιμίου

Μετά το πέρας του ελέγχου, το δοκίμιο διατηρεί κάποια παραμένουσα μαγνήτιση (ιδιαιτέρως αν πρόκειται για μαγνητικώς μαλακό υλικό). Σε ορισμένες περιπτώσεις, το γεγονός αυτό ενδέχεται να επηρεάζει την λειτουργία του και κατά συνέπεια, θα πρέπει να απομαγνητιστεί.

Η απομαγνήτιση μπορεί να γίνει μέχρι ενός βαθμού με το yoke, ωστόσο είναι αδύνατο να επιτευχθεί πλήρως. Η διαδικασία περιλαμβάνει την σταδιακή μείωση της έντασης του δρώντος πεδίου με ταυτόχρονες εναλλαγές της κατεύθυνσής του. Αυτό προϋποθέτει την σταδιακή απομάκρυνση του ηλεκτρομαγνήτη από το δοκίμιο, ενώ αυτός εκτελεί παλινδρομική περιστροφική κίνηση 180°.

Η παραπάνω διαδικασία, προοδευτικά οδηγεί στη «συρρίκνωση» του βρόχου υστέρησης (Εικόνα 4.2) έως ότου η παραμένουσα μαγνήτιση καταστεί αμελητέα.

[6], [13], [14], [17], [23], [27]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

Ο έλεγχος με την μέθοδο των υπερήχων, Ultrasonic Testing (UT) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο μη καταστροφικού ελέγχου, βρίσκοντας εφαρμογές σε πλήθος βιομηχανιών, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλη αξιοπιστία και αξιοσημείωτο εύρος στον εντοπισμό ασυνεχειών. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών στην επιφάνεια καθώς και σε μεγάλο βάθος κάτω από αυτή. Επιπλέον μπορεί να αξιοποιηθεί για παχυμέτρηση, καθώς και για τον χαρακτηρισμό εξέλιξης διάβρωσης μεταλλικών υλικών.

5.1. Ιστορικά Στοιχεία

Από αρχαιοτάτων χρόνων, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε τον ήχο που προέκυπτε καθώς έθετε σε δόνηση αντικείμενα (δια της κρούσης), ώστε να εκτιμήσει την ποιότητα τους. Υπάρχουσες ατέλειες, οδηγούσαν στην απόκλιση του παραγόμενου ήχου από τον συνήθη / αναμενόμενο. Με αυτόν τον τρόπο κατέστη εφικτός ο καθορισμός της ύπαρξης μεγαλύτερων ασυνεχειών και ο προσεγγιστικός προσδιορισμός της θέσης τους.

Στα τέλη του 19ου αιώνα παρατηρήθηκε και μελετήθηκε (αδελφοί Curie - 1880) το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή η ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων να παράγουν ηλεκτρική τάση καθώς ταλαντώνονται και αντιστρόφως. Αυτό αποτέλεσε και το έναυσμα για την μελέτη των υπερήχων. Στα χρόνια που ακολούθησαν και με την μέθοδο του παλμού – ηχούς, τα ηχητικά κύματα χρησιμοποιήθηκαν για υδρογραφικούς σκοπούς, καθώς και για τον εντοπισμό υποβρυχίων κατά τον 1ο Παγκόσμιο Πόλεμο.

Για πρώτη φορά στα υλικά, οι υπέρηχοι χρησιμοποιήθηκαν λίγο αργότερα (Sokolov – 1935), με την αξιοποίηση ενός κρυστάλλου ως πομποδέκτη και υδραργύρου ως μέσου σύζευξης μεταξύ πομποδέκτη και εξεταζόμενου μέρους. Ωστόσο, οι ενδείξεις στερούνταν ευκρίνειας εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των παραγόμενων και παραλαμβανόμενων παλμών. Στα χρόνια που ακολούθησαν και ιδίως κατά τον 2ο παγκόσμιο πόλεμο εξελίχθηκε ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός και τεχνικές, οδηγώντας στην άνθηση της μεθόδου.

Επόμενο κρίσιμο σημείο, αποτέλεσε η ανάπτυξη πομποδεκτών γωνιακής δέσμης (Sproule – 1947), διευρύνοντας το εύρος εφαρμογών του ελέγχου με υπερήχους, και επιτρέποντας μεταξύ άλλων την εξέταση συγκολλήσεων.

Έκτοτε υπήρξε σταδιακή ανάπτυξη της μεθόδου προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευαισθησία, ευκρίνεια των ενδείξεων και ακριβέστερη διαστασιολόγηση και χαρακτηρισμός των ευρημάτων. Με την διάδοση του ελέγχου με υπερήχους, ακολούθησε και η θέσπιση προτύπων ποιότητας και οδηγιών από τους οργανισμούς τυποποίησης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια και η συνέπεια των αποτελεσμάτων της εξέτασης.

[6], [13], [14]

5.2. Αρχές Λειτουργίας και Φυσικό Υπόβαθρο

Ο ήχος αποτελεί μηχανικό κύμα το οποίο διαδίδεται σε ένα σώμα, μεταφέροντας ενέργεια. Προκύπτει, όπως όλα τα μηχανικά κύματα, από μία διαταραχή που θέτει ορισμένα μόρια του μέσου σε ταλάντωση, η οποία σταδιακά μεταδίδεται στα γειτνιάζοντα.

5.2.1. Χαρακτηριστικά ηχητικών κυμάτων

Τα ηχητικά κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο (στερεό, υγρό ή αέριο) περιγράφονται από ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη.

5.2.1.1. Συχνότητα – Περίοδος – Μήκος Κύματος

Η συχνότητα (f) εκφράζει τις εκτελούμενες ταλαντώσεις ενός στοιχείου στη μονάδα του χρόνου. Αντίστοιχα, η περίοδος (T) αποτελεί τον απαιτούμενο χρόνο για την εκτέλεση μιας πλήρους ταλάντωσης από κάποιο μόριο. Τα δύο μεγέθη είναι αντίστροφα.

Ως μήκος κύματος (λ) ορίζεται η διανυθείσα από το κύμα απόσταση σε χρόνο μίας περιόδου.

5.2.1.2. Ταχύτητα Διάδοσης

Η ταχύτητα διάδοσης (c) του εκάστοτε είδους ηχητικού κύματος (βλ. 5.2.3) σε ένα σώμα, εξαρτάται αποκλειστικά από το μέσο διάδοσης και χαρακτηριστικά του, όπως η πυκνότητα και το μέτρο ελαστικότητας.

Για δεδομένο κύμα, προκύπτει από το γινόμενο του μήκους κύματος επί την συχνότητα του:

$$c = \lambda \cdot f$$

5.2.1.3. Ένταση

Η ένταση του ήχου εκφράζει την ισχύ του ηχητικού κύματος ανά μονάδα επιφανείας. Για την συγκριτική εκτίμηση της έντασης ενός ήχου χρησιμοποιείται η λογαριθμική κλίμακα με μονάδα μέτρησης το Bel (επικρατούσα μονάδα μέτρησης της στάθμης του είναι η υποδιαίρεση του, το decibel, dB).

5.2.2. Ηχητικό Φάσμα – Υπέρηχοι

Ο ήχος γίνεται αντιληπτός από τον άνθρωπο δια της ακοής. Ωστόσο, δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός κάθε ηχητικού κύματος με αυτόν τον τρόπο. Συγκεκριμένα, μπορούν να γίνουν αντιληπτοί μόνο ήχοι που ανήκουν στο ακουστικό φάσμα, δηλαδή ήχοι συχνοτήτων από 16 Hz έως 20 kHz.

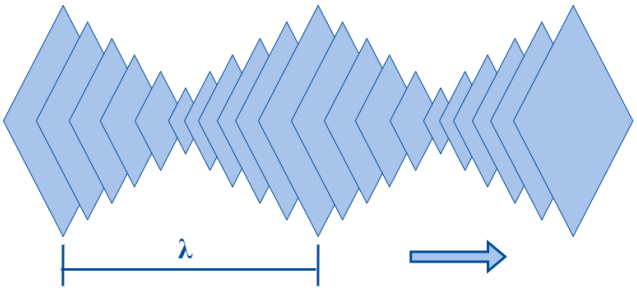
Αντιθέτως, οι υπέρηχοι έχουν συχνότητες μεγαλύτερες των 20 kHz (εξ ου και η ονομασία τους). Στην περίπτωση του μη καταστροφικού ελέγχου χρησιμοποιούνται υπέρηχοι με συχνότητες από 0.1 έως 25 MHz.

5.2.3. Είδη ηχητικών κυμάτων

Τα ηχητικά κύματα διακρίνονται σε ευρύτερες κατηγορίες ανάλογα με την διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων του μέσου. Στην περίπτωση του ελέγχου συγκολλήσεων με υπερήχους, χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση όλα τα παρακάτω είδη κυμάτων.

5.2.3.1. Διαμήκη κύματα (longitudinal waves)

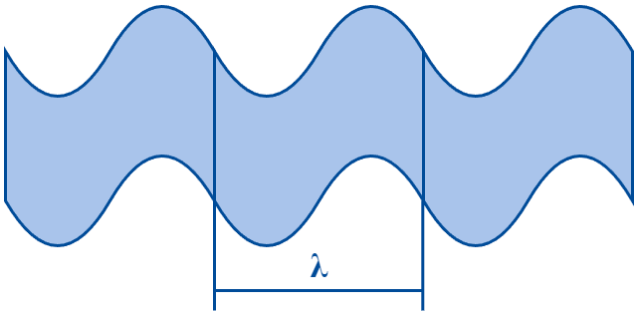
Τα διαμήκη κύματα (ή κύματα πιέσεως) χαρακτηρίζονται από κοινή διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων και διάδοσης του κύματος, δημιουργώντας πυκνώσεις και αραιώσεις (Εικόνα 5.1). Διαδίδονται με υψηλές ταχύτητες σε στερεά, υγρά και αέρια. Στα μέταλλα προκύπτουν κατά την κάθετη πρόσπτωση της ηχητικής δέσμης σε αυτά (περί τις 90°).



Εικόνα 5.1 Διάδοση διαμήκους κύματος

5.2.3.2. Εγκάρσια κύματα (shear waves)

Απεναντίας, τα εγκάρσια κύματα χαρακτηρίζονται από ταλάντωση των μορίων του μέσου, κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δημιουργώντας όρη και κοιλάδες (Εικόνα 5.2). Διαδίδονται σε στερεά, με μικρότερη ταχύτητα από τα διαμήκη κύματα. Προκύπτουν όταν η δέσμη προσπίπτει στο δοκίμιο υπό γωνία (όχι κάθετα) και είναι κρίσιμα για την εξέταση των συγκολλήσεων.



Εικόνα 5.2 Διάδοση εγκάρσιου κύματος

5.2.3.3. Επιφανειακά κύματα (surface / Rayleigh waves)

Τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται πλησίον της επιφάνειας ενός στερεού υλικού μεγάλου πάχους, και οφείλονται στην ελλειπτική τροχιά των ταλαντωμένων σωματιδίων. Προσαρμόζονται σε καμπυλότητες της επιφάνειας, αλλά ανακλώνται όταν συναντήσουν απότομες γεωμετρικές μεταβολές, όπως κάποια επιφανειακή ασυνέχεια.

5.2.3.4. Κύματα πλακών (Lamb waves)

Τέλος, σε ελάσματα μικρού πάχους σχηματίζονται κύματα πλακών μεταξύ των τοιχωμάτων τους. Διαδίδονται κατά μήκος της πλάκας και διακρίνονται σε συμμετρικά και ασύμμετρα. Στα πρώτα, τα μόρια στα απέναντι τοιχώματα, σε κάποια χρονική στιγμή, κινούνται με παρόμοιο τρόπο, προς το κέντρο ή το εξωτερικό της πλάκας. Στην περίπτωση των ασύμμετρων, τα μόρια κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση καθώς ταλαντώνονται.

5.2.4. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο – Παραγωγή υπερηχητικής δέσμης

Προκειμένου να παραχθεί και να ανιχνευθεί η ηχητική δέσμη, αξιοποιείται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό περιγράφει την ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων να ταλαντώνονται καθώς δέχονται ηλεκτρικό φορτίο και αντίστροφα. Το ίδιο φαινόμενο εκμεταλλεύονται και τα

ρολόγια μπαταρίας, ώστε να αποδώσουν ένα σταθερό παλμό, χρησιμοποιώντας κρυστάλλους χαλαζία (quartz).

Αντίστοιχοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται και στον έλεγχο με υπερήχους, με ευρύτερα διαδεδομένους πολυκρυσταλλικά κεραμικά, όπως τιτανικό βάριο, ζιρκονικός μόλυβδος κ.α. Όταν ένας αισθητήρας δρα ως δέκτης, παραλαμβάνει εναλλασσόμενο μηχανικό φορτίο, υποβαλλόμενος διαδοχικά σε εφελκυσμό και θλίψη. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δυναμικού από τον κρύσταλλο, το οποίο ανιχνεύεται από την συσκευή υπερήχων.

Αντίστροφα, καθώς ο αισθητήρας δρα ως πομπός, υποβάλλεται σε τάση εναλλασσόμενου ρεύματος με συνέπεια την περιοδική παραμόρφωσή του (συρρίκνωση και διαστολή) με υψηλή συχνότητα. Περιορίζοντας την παραμόρφωση αυτή σε μία διεύθυνση, στοχευμένη στο εξεταζόμενο μέσο, παράγονται μηχανικά ελαστικά κύματα. Το σύνολο των παραγόμενων αυτών κυμάτων σχηματίζει μια υπερηχητική δέσμη, της οποίας οι ιδιότητες επιτρέπουν την εξέταση μερών με την υπό μελέτη μέθοδο.

5.2.5. Χαρακτηριστικά Δέσμης Υπερήχων

Η φόρτιση του κρυστάλλου οδηγεί μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται παραπάνω στη δημιουργία μίας δέσμης υπερήχων από κάθε «παλμό». Η ηχητική δέσμη διακρίνεται σε τρεις επιμέρους τομείς (Εικόνα 5.3).

5.2.5.1. Νεκρή ζώνη

Στους αισθητήρες μονού κρυστάλλου (οι οποίοι καλούνται να δράσουν και ως πομποί και ως δέκτες ηχητικών κυμάτων), μεσολαβεί ένα διάστημα μεταξύ διαδοχικών παλμών, ώστε να ανιχνευθούν αντηχήσεις που ενδέχεται να προκύψουν. Ωστόσο, η ταλάντωση του κρυστάλλου διαρκεί κάποιο χρόνο (έως ότου αποσβεστεί πλήρως) στον οποίο δεν μπορεί να δράσει ως δέκτης. Συνέπεια αυτού, αντηχήσεις που προκαλούνται από ανακλαστήρες πολύ κοντά στον αισθητήρα, να επιστρέφουν σε αυτόν όσο ακόμα πάλλεται. Ως εκ τούτου, οι εν λόγω ενδείξεις δεν μπορούν να ανιχνευθούν.

Η περιοχή που περιέχει τα σημεία που ανήκουν στην παραπάνω κατηγορία ονομάζεται νεκρή ζώνη. Προκειμένου η νεκρή ζώνη να μην υπερκαλύπτει μέρος του εξεταζόμενου υλικού, δεν θα πρέπει να εκτείνεται πέρα από τα όρια του προστατευτικού περιβλήματος που φέρει ο αισθητήρας.

Ο σχηματισμός νεκρής ζώνης μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση αισθητήρων διπλών κρυστάλλων, όπου ο ένας δρα αποκλειστικά ως πομπός και ο άλλος ως δέκτης.

5.2.5.2. Εγγύς Ζώνη

Η εγγύς ζώνη ξεκινά από τον αισθητήρα, και χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις στην ένταση των παραγόμενων κυμάτων εξαιτίας των παρεμβαλόμενων δονήσεων που παράγονται από την περιφέρεια του κρυστάλλου. Αυτό, μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικές ενδείξεις, σχετικά με την ένταση των αντηχήσεων που προκαλούν οι ανακλαστήρες εντός της εγγύς ζώνης. Το εύρος της περιοχής αυτής μπορεί να υπολογιστεί:

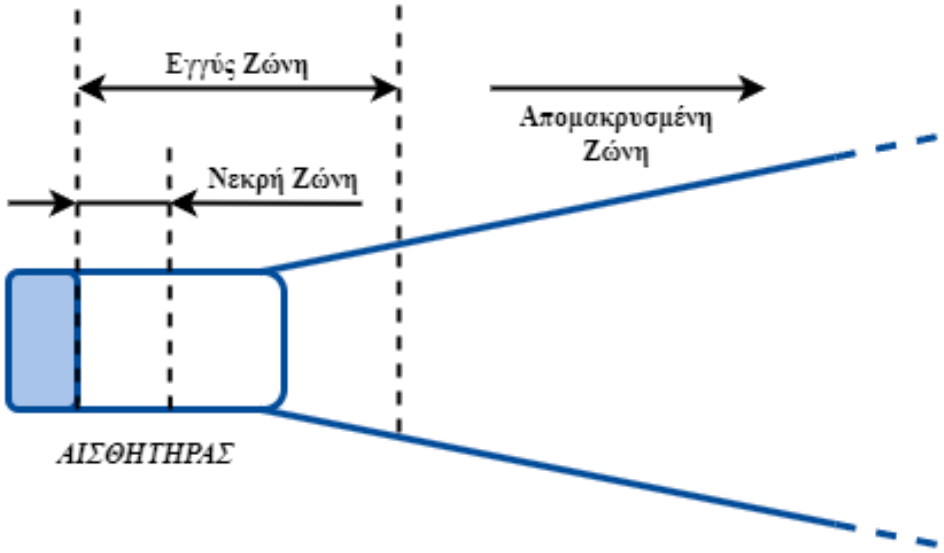
$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4c}$$

Όπου: $N\ [mm]$: Το μήκος της εγγύς ζώνης
$D\ [mm]$: Διάμετρος του κρυστάλλου

Συνεπώς, η εγγύς ζώνη μπορεί να περιοριστεί με μείωση του μεγέθους του κρυστάλλου και της συχνότητας του παλμού.

5.2.5.3. Απομακρυσμένη Ζώνη

Η απομακρυσμένη διαδέχεται την εγγύς ζώνη και αποτελεί την περιοχή στην οποία δεν προκύπτουν ανεπιθύμητες παρεμβολές. Σε αυτή τη ζώνη λαμβάνει χώρα, απρόσκοπτα ο μη καταστροφικός έλεγχος.



Εικόνα 5.3 Ζώνες ηχητικής δέσμης

5.2.6. Διάδοση Δέσμης Υπερήχων

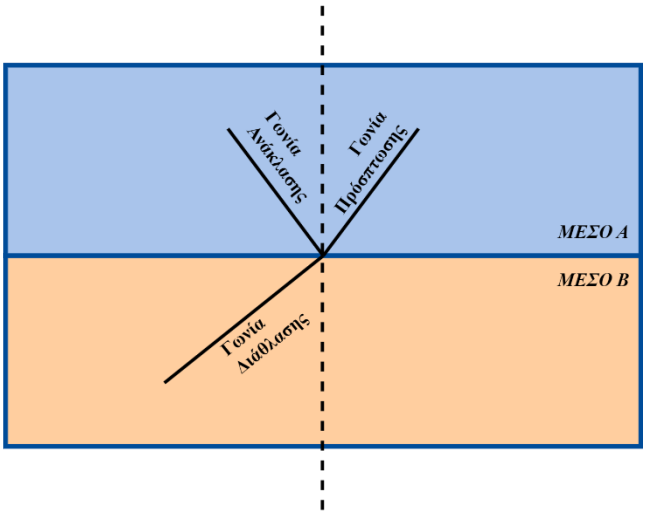
Η ηχητική δέσμη διαδίδεται απρόσκοπτα στο μέσο που σχηματίστηκε έως ότου συναντήσει κάποιο διαφορετικό. Κατά την αλλαγή του μέσου διάδοσης (μέσο με διαφορετική ακουστική αντίσταση) μπορεί να παρατηρηθεί ένας συνδυασμός των παρακάτω φαινομένων, που επιδρούν στην μετάδοση του ηχητικού κύματος:

5.2.6.1. Ανάκλαση

Κατά την αλλαγή μέσου διάδοσης ενός ηχητικού κύματος, μέρος της ενέργειας εξακολουθεί να διαδίδεται στο νέο μέσο, ενώ μέρος της ανακλάται με γωνία ανάκλασης ίση με την γωνία πρόσπτωσης (Εικόνα 5.4).

5.2.6.2. Διάθλαση

Αντίστοιχα, το ηχητικό κύμα που διαδίδεται στο νέο μέσο, διαθλάται (Εικόνα 5.4). Η γωνία διάθλασης υπολογίζεται από τον νόμο του Snell, ενώ όταν η δέσμη προσπίπτει κάθετα στην διεπιφάνεια των δύο μέσων (μηδενική γωνία πρόσπτωσης) δεν διαθλάται.



Εικόνα 5.4 Γωνίες ανάκλασης και διάθλασης

Νόμος του Snell: $\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{c_1}{c_2}$

Όπου: θ_1, θ_2 : η γωνία πρόπτωσης και διάθλασης

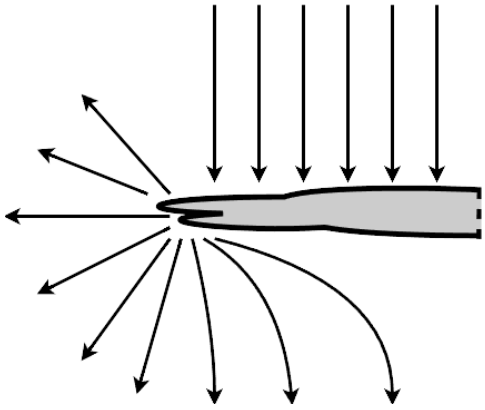
c_1, c_2 : η ταχύτητα διάδοσης στο αρχικό και στο μεταδιδόμενο μέσο

5.2.6.3. Περίθλαση

Το φαινόμενο της περίθλασης λαμβάνει χώρα κατά την πρόσπτωση της δέσμης σε λεπτή ασυνέχεια. Σε αυτή την περίπτωση, η τελευταία διασπείρεται από τα άκρα της ατέλειας προς ακανόνιστες διευθύνσεις, αλληλεπιδρώντας ενίοτε με τον παραγόμενο παλμό (Εικόνα 5.5).

5.2.6.4. Μετασχηματισμός

Ο μετασχηματισμός αφορά στην μετατροπή μιας μορφής κύματος σε μία άλλη (βλ. 5.2.3). Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας μετατροπής είναι ο μετασχηματισμός του διαμήκους κύματος που παράγεται από έναν γωνιακό αισθητήρα σε εγκάρσιο ηχητικό κύμα μετά την μετάδοσή του από την κεφαλή στο εξεταζόμενο μέταλλο.



Εικόνα 5.5 Περίθλαση ηχητικού κύματος

[6], [13], [14], [23]

5.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τον μη καταστροφικό έλεγχο με την μέθοδο των υπερήχων ποικίλει, προσαρμοζόμενος στην εκάστοτε συνθήκη.

5.3.1. Διατάξεις

5.3.1.1. Φορητή Συσκευή

Η φορητή συσκευή επιτρέπει την επιστράτευση της μεθόδου στο πεδίο. Πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό όργανο στο οποίο προσαρμόζονται οι κατάλληλοι για την εργασία αισθητήρες. Η συσκευή παρέχει ρεύμα για την γένεση των παλμών και διαθέτει ενσωματωμένη οθόνη για την απεικόνιση των ανιχνευόμενων αντηχήσεων. Παράλληλα επιτρέπει την προσαρμογή των παραμέτρων της διαδικασίας ώστε να εξασφαλιστεί η επιθυμητή ευαισθησία και η απόδοση ευκρινών αποτελεσμάτων. Τροφοδοτείται από παροχή του δικτύου ή και από ενσωματωμένη μπαταρία.

5.3.1.2. Δεξαμενή Υπερήχων

Για δοκίμια μικρότερων διαστάσεων, των οποίων είναι εφικτή η μεταφορά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθερή εγκατάσταση για την διενέργεια της εξέτασης. Πρόκειται για δεξαμενή με υγρό μέσο σύζευξης (συνηθέστερα νερό) στην οποία εμβαπτίζεται το υπό έλεγχο σώμα. Ο αισθητήρας προσαρμόζεται σε τηλεχειριζόμενο φορείο και μπορεί να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο ή να εκπέμψει τον παλμό από απόσταση.

Με την συγκεκριμένη διάταξη, η διαδικασία ελέγχου αυτοματοποιείται και επιταχύνεται σημαντικά. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί φορητές διατάξεις (bubblers, squirters), που προσομοιάζουν την φιλοσοφία της δεξαμενής υπερήχων, επιτρέποντας την αξιοποίηση των οφελών της μεθόδου και στο πεδίο.

5.3.2. Αισθητήρες

Οι αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση με την μέθοδο των υπερήχων ποικίλουν και καλύπτουν τις απαιτήσεις πολλών διαφορετικών εφαρμογών. Παρακάτω, παρατίθενται ορισμένοι από τους πιο δημοφιλείς.

5.3.2.1. Κάθετης Δέσμης

Οι αισθητήρες κάθετης δέσμης παράγουν δέσμη η οποία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου. Παρέχουν την δυνατότητα εντοπισμού ασυνεχειών στο υλικό αλλά και παχυμέτρησης, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο σε τυφλά σημεία χωρίς πρόσβαση στο απέναντι τοίχωμα (όπως το πάχος ενός σωλήνα).

Διακρίνονται σε μονού και διπλού κρυστάλλου. Στην πρώτη περίπτωση ο κρύσταλλος δρα ως πομπός και δέκτης, έναντι της δεύτερης όπου ο καθένας αναλαμβάνει έναν μόνο ρόλο. Στους αισθητήρες διπλού κρυστάλλου εξαλείφεται η νεκρή ζώνη, ώστε να είναι εφικτή η εξέταση σε μικρό βάθος.

5.3.2.2. Γωνιακής Δέσμης

Οι γωνιακές κεφαλές αποτελούν αισθητήρες που προσαρμόζονται σε ένα πέλμα (σφήνα) από plexiglass ώστε να εκπέμψουν την δέσμη υπό γωνία. Το ηχητικό κύμα, προσπίπτει στην επιφάνεια του δοκιμίου και διαθλάται, ενώ μετατρέπεται από διάμηκες σε εγκάρσιο.

Οι αισθητήρες γωνιακής δέσμης χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον έλεγχο συγκολλήσεων, καθώς είναι σε θέση να προσεγγίσουν το σώμα της συγκόλλησης στο σύνολό του.

5.3.2.3. Μαλακού Άκρου / Ύδατος

Οι κεφαλές μαλακού άκρου διαθέτουν ελαστική απόληξη, η οποία έρχεται σε επαφή με την εξεταζόμενη επιφάνεια. Αντίστοιχα, οι κεφαλές ύδατος σχηματίζουν έναν πίδακα νερού που βάλλεται προς την επιφάνεια του υπό έλεγχο μέρους. Σε αυτόν μεταδίδεται η ηχητική δέσμη προτού μεταδοθεί στο δοκίμιο.

Οι παραπάνω κεφαλές προσφέρουν καλή διεπαφή με τραχιές επιφάνειες, εξασφαλίζοντας την σύζευξη του αισθητήρα με το ελεγχόμενο εξάρτημα.

5.3.2.4. Πέλματος Καθυστέρησης

Η εν λόγω κεφαλή είναι εφοδιασμένη με μία προέκταση (πέλμα) από plexiglass στην οποία διαδίδεται η ηχητική δέσμη. Το μήκος της προέκτασης είναι επαρκές ώστε να εκμηδενίσει το αποτέλεσμα της νεκρής και εγγύς ζώνης, καθώς το εύρος της δεν υπερβαίνει το ύψος της στήλης του πέλματος. Συνεπώς, ο αισθητήρας πέλματος καθυστέρησης προσφέρεται για την εξέταση της επιφάνειας ενός δοκιμίου.

5.3.2.5. Συστοιχίας κρυστάλλων (phased array)

Ο αισθητήρας συστοιχίας κρυστάλλων (8 ή περισσοτέρων) χρησιμοποιείται με σκοπό να διευρυνθεί η ζώνη σάρωσης της κεφαλής, ώστε να καλύπτει μεγαλύτερο εύρος χωρίς να μετακινηθεί. Τυγχάνει ευρείας χρήσης στις συγκολλήσεις καθώς διευκολύνει τη σάρωση της περιοχής κάτω από το καπάκι. Οδηγεί στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας ελέγχου, καθώς χρησιμοποιεί λογισμικό για την επεξεργασία και απεικόνιση των συλλεγόμενων δεδομένων.

5.3.3. Μέθοδοι Απεικόνισης Δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέγονται από τον δέκτη του αισθητήρα, παρουσιάζονται στην οθόνη της συσκευής υπερήχων. Η απεικόνισή τους μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικές μορφές.

5.3.3.1. Μέθοδος Σάρωσης Εύρους (A-Scan)

Η συγκεκριμένη μέθοδος απεικόνισης (amplitude scan / A-scan) αποδίδει διάγραμμα χρόνου – πλάτους των εντοπιζόμενων αντηχήσεων. Ο χρόνος αφορά στο διάστημα που μεσολαβεί από την εκπομπή του παλμού έως την ανίχνευση της προκύπτουσας ηχούς. Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος στο εξεταζόμενο υλικό, ο χρόνος μπορεί εύκολα να μεταφραστεί στο βάθος του ανακλαστήρα από την επιφάνεια.

5.3.3.2. Μέθοδος Σάρωσης Λαμπρότητας (B-Scan)

Με την μέθοδο αυτή (brightness scan / B-scan), απεικονίζεται μία διαμήκης τομή του δοκιμίου (κατά την διεύθυνση της τροχιάς του αισθητήρα), στην οποία καταγράφονται οι ανακλαστήρες. Έτσι, αποδίδεται η οριζόντια θέση και το βάθος μιας ασυνέχειας ώστε να μπορεί να διαστασιολογηθεί.

Για την επιστράτευση της μεθόδου χρησιμοποιούνται τροχοφόρα φορεία με ενσωματωμένους αισθητήρες, τα οποία κινούνται σε ευθεία τροχιά κατά μήκος του δοκιμίου με σταθερή ταχύτητα.

5.3.3.3. Μέθοδος Σάρωσης Αντίθεσης (C-Scan)

Τέλος, με την σάρωση αντίθεσης (contrast scan / C-scan), απεικονίζεται η κάτοψη του δοκιμίου, συμπεριλαμβανομένων των ανακλαστήρων. Προκειμένου να υπολογιστεί η ακριβής θέση μιας ασυνέχειας, η απεικόνιση αποδίδεται για διαφορετικά βάθη.

Αυτό επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με λειτουργίες της απεικόνισης εύρους (A-scan) και με φορείο αισθητήρων με δυνατότητα κίνησης στο επίπεδο.

5.3.4. Μέσο Σύζευξης

Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική σύζευξη μεταξύ της κεφαλής και του δοκιμίου, θα πρέπει να εξαλειφθούν θύλακες αέρος μεταξύ των δύο, οι οποίοι θα δράσουν ως ανακλαστήρες, επιστρέφοντας θόρυβο και βλάπτοντας την ευαισθησία της μεθόδου.

Το μέσο σύζευξης (couplant) θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλο ιξώδες ώστε να διαβρέχει την επιφάνεια παραμένοντας σε αυτή. Ταυτόχρονα, δεν πρέπει να έχει διαβρωτικές ή τοξικές ιδιότητες. Τέλος, η ακουστική του αντίσταση θα πρέπει να προσεγγίζει αυτήν του εξεταζόμενου μέρους και του πέλματος του αισθητήρα. Με την επιλογή του κατάλληλου μέσου σύζευξης θα καλυφθεί πλήρως το διάκενο μεταξύ των δύο και η ηχητική δέσμη θα συμπεριφέρεται σαν να διαδίδεται σε ένα ενιαίο μέσο, περιορίζοντας τα φαινόμενα ανάκλασης, διάθλασης και περίθλασής της στην διεπιφάνεια.

Συνήθως, ως μέσο σύζευξης χρησιμοποιείται κάποιο έλαιο, γράσο, γλυκερίνη ή νερό.

5.3.5. Πρότυπα Δοκίμια Βαθμονόμησης

Η μέθοδος του ελέγχου με υπερήχους απαιτεί τον καθορισμό μίας σειράς παραμέτρων, κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να επιτυγχάνεται η ακρίβεια των ενδείξεων και μετρήσεων καθώς και η επιθυμητή ευαισθησία.

Τα πρότυπα δοκίμια βαθμονόμησης αποσκοπούν στον ακριβή καθορισμό των χαρακτηριστικών της χρησιμοποιούμενης κεφαλής και της αλληλεπίδρασής της με το εξεταζόμενο υλικό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς εξαρτημάτων από διαφορετικά υλικά και με ξεχωριστές δυνατότητες.

Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζονται από την βαθμονόμηση με τα πρότυπα δοκίμια είναι η ταχύτητα διάδοσης του παραγόμενου ηχητικού κύματος στο εξεταζόμενο μέρος και η γωνία διάθλασης της δέσμης, στην περίπτωση που προσπίπτει υπό γωνία σε αυτό.

[6], [13], [14], [23], [28]

5.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο

Για την εκπόνηση του μη καταστροφικού ελέγχου με την μέθοδο των υπερήχων μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά περίπτωση πολλά διαφορετικά είδη εξοπλισμού με ξεχωριστές δυνατότητες. Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, παρέχονται οι παρακάτω κατηγορίες εξοπλισμού:

- Συσκευή παχυμέτρησης με υπέρηχους: OLYMPUS 38DL PLUS.
- Συσκευή παχυμέτρησης και ανίχνευσης σφαλμάτων: MISTRAS POCKET UT™ .
- Ποικιλία αισθητήρων γωνιακής και καθέτου δέσμης για σάρωση εύρους (A-Scan).
- Πρότυπα δοκίμια βαθμονόμησης: Κλιμακωτό δοκίμιο VW, IIW-Type 1 Calibration Block (V1), δοκίμιο μινιατούρα για δέσμη υπό γωνία (V2).
- Αναλώσιμα, όπως γράσο ή γλυκερίνη ως μέσο σύζευξης και καθαριστικό (cleaner).

Για τα δεδομένα μέσα, ακολουθεί η περιγραφή της προβλεπόμενης διαδικασίας εξέτασης ενός συγκολλητού δοκιμίου με την υπό μελέτη μέθοδο.

5.4.1. Προετοιμασία Επιφανείας Δοκιμίου

Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου που εξετάστηκαν, έτσι και στην περίπτωση των υπερήχων τα ευκρινή και αξιόπιστα αποτελέσματα εξασφαλίζονται μόνο κατόπιν καθαρισμού της επιφανείας του εξεταζόμενου δοκιμίου.

Συγκεκριμένα, θα πρέπει να απομακρυνθούν από αυτή ρυπαντικοί παράγοντες οι οποίοι θα επηρεάσουν την ηχητική δέσμη, ανακλώντας ή διαθλώντας τη. Τέτοιοι μπορεί να είναι προϊόντα διάβρωσης, χώμα ή άλλες ακαθαρσίες. Η βαφή της επιφάνειας ενδέχεται επίσης να επηρεάσει τα αποτελέσματα της μεθόδου, αν είναι ανομοιογενής ή φέρει εκδορές.

Αφού εξασφαλιστεί πως δεν παρεμβάλλονται ρυπαντές μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, μπορεί να ακολουθήσει η διενέργεια του ελέγχου.

5.4.2. Επιλογή Αισθητήρων και Βαθμονόμηση

5.4.2.1. Επιλογή Αισθητήρων

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να επιλεχθούν οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν. Σκοπός είναι να προκύψει σάρωση του συνόλου του σώματος της συγκόλλησης καθώς και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στην οποία ενδέχεται να εμφανιστούν σφάλματα. Αυτό περιλαμβάνει κεφαλές καθέτου και γωνιακής δέσμης.

Η παραγόμενη ηχητική δέσμη θα προκαλέσει ανιχνεύσιμη αντήχηση, όταν ανακλαστεί σε ασυνέχειες στις οποίες προσπίπτει κάθετα. Για τον εντοπισμό ατελειών στο σώμα της συγκόλλησης επιστρατεύονται αισθητήρες γωνιακής δέσμης. Για την προσέγγιση παχύτερων δοκιμίων χρησιμοποιούνται κεφαλές μικρότερων γωνιών και αντίστροφα. Στην περίπτωση συγκολλήσεων μεγαλύτερης γεωμετρικής πολυπλοκότητας θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν 2 ή περισσότερες γωνιακές κεφαλές.

Επιπλέον, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και αισθητήρας κάθετης δέσμης, ώστε να εξακριβωθεί πως δεν παρεμβάλλονται ανακλαστήρες στο μέταλλο στη διαδρομή της δέσμης των γωνιακών κεφαλών, έως ότου αυτές φθάσουν στην περιοχή της συγκόλλησης.

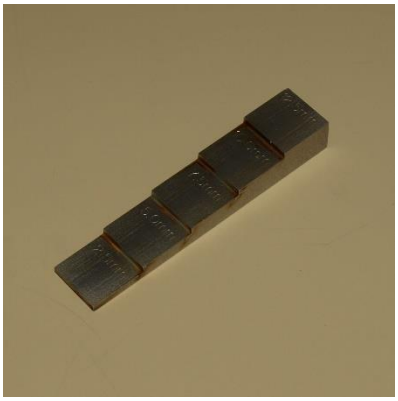
Τέλος, η προτιμητέα συχνότητα εκπομπής του αισθητήρα, καθορίζεται από την κοκκομετρία του υπό έλεγχο υλικού. Λεπτόκοκκα μέταλλα, εξετάζονται με κεφαλές μεγαλύτερων συχνοτήτων και αντίστροφα.

Οι αισθητήρες που επελέγησαν για την διεκπεραίωση της εξέτασης, θα πρέπει πρώτα να βαθμονομηθούν, σε συνδυασμό με την προσαρμογή των παραμέτρων της συσκευής.

5.4.2.2. Βαθμονόμηση με Αισθητήρες Κάθετης Δέσμης

Με βάση την κλιμακωτή πλάκα VW

Για την βαθμονόμηση με αισθητήρες κάθετης δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το κλιμακωτό δοκίμιο VW / step wedge calibration block (Εικόνα 5.6). Επιλέγοντας το πρότυπο που είναι κατασκευασμένο από το αντίστοιχο υλικό με το εξεταζόμενο μέρος, μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η ταχύτητα των διαμηκών ηχητικών κυμάτων που μεταδίδει ο αισθητήρας στο δοκίμιο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι τυποποιημένη για την συσκευή και περιλαμβάνει την σάρωση σε δύο ξεχωριστές βαθμίδες (με τις ακραίες τιμές πάχους).



Εικόνα 5.6 Κλιμακωτό δοκίμιο VW

Με βάση το εξεταζόμενο δοκίμιο

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμο πρότυπο δοκίμιο βαθμονόμησης από αντίστοιχο υλικό με το εξεταζόμενο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο το υπό έλεγχο δοκίμιο, με την προϋπόθεση πως είναι γνωστό ή μετρήσιμο το πάχος του σε κάποιο σημείο.

Σε αυτήν την περίπτωση, ανιχνεύεται η πρώτη και δεύτερη ηχώ που προκύπτει όταν ο αισθητήρας τοποθετηθεί σε αυτό το σημείο, με βάση τις οποίες εκτελείται η βαθμονόμηση. Η πρώτη αντήχηση προκύπτει από την ανάκλαση στο απέναντι τοίχωμα, ενώ η δεύτερη από την αντήχηση μετά από μία πλήρη παλινδρόμηση της δέσμης μεταξύ των τοιχωμάτων. Με τις δύο ενδείξεις επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας (με οποιαδήποτε από τις δύο μεθόδους), γίνεται γνωστή η ταχύτητα διάδοσης των εκπεμπόμενων διαμήκων κυμάτων στο εξεταζόμενο μέσο. Στο παρόν στάδιο, διενεργείται η σάρωση της περιοχής, όπου απαιτείται η χρήση των αισθητήρων κάθετης δέσμης όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.4.3.1 και 5.4.3.2.

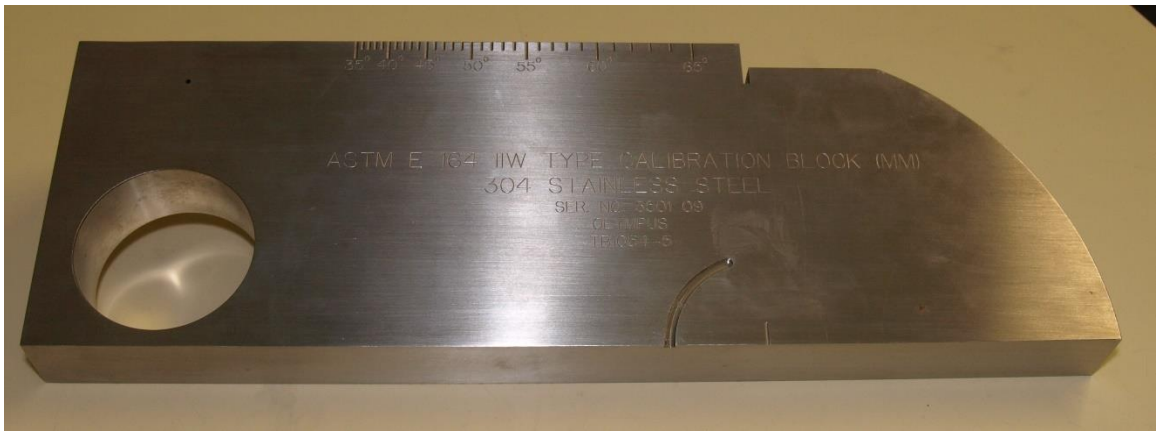
5.4.2.3. Βαθμονόμηση με Αισθητήρες Γωνιακής Δέσμης

Με βάση το πρότυπο δοκίμιο "IIW-Type 1"

Για την βαθμονόμηση με αισθητήρες γωνιακής δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο δοκίμιο IIW-Type 1 / V1 calibration block (Εικόνα 5.7). Σκοπός είναι αφενός ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης του ηχητικού κύματος (εγκάρσιο αυτή τη φορά) στο υλικό, όπως και στην περίπτωση των αισθητήρων κάθετης δέσμης. Αφετέρου όμως, θα πρέπει να διαπιστωθούν με ακρίβεια το σημείο εξόδου της ηχητικής δέσμης από τη σφήνα του αισθητήρα, καθώς και η πραγματική γωνία υπό την οποία μεταδίδεται στο εξεταζόμενο μέσο.

Για την βαθμονόμηση του αισθητήρα χρησιμοποιούνται διαφορετικά τμήματα του προτύπου. Αρχικά, η απόληξη τεταρτοκυκλίου του πρότυπου δοκιμίου, ώστε να εντοπιστεί η θέση μεγιστοποίησης της παραγόμενης ηχούς και άρα το ακριβές σημείο εξόδου της δέσμης. Στη συνέχεια, η κυκλική οπή του δοκιμίου για τον υπολογισμό της πραγματικής διεύθυνσης διάδοσης της ηχητικής δέσμης.

Τέλος, χρησιμοποιώντας την απόληξη τεταρτοκυκλίου σε συνδυασμό με την εγκοπή τεταρτοκυκλίου μικρότερης ακτίνας, υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης των παραγόμενων ηχητικών κυμάτων στο μέσο. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας δύο ενδείξεις (μία από το μεγάλο και μία από το μικρό τόξο μετά από την ανάκλαση στην επιφάνεια του πρώτου) γνωστού μήκους διαδρομής και ακολουθώντας την τυποποιημένη από τη συσκευή διαδικασία.



Εικόνα 5.7 Δοκίμιο βαθμονόμησης IIW-Type 1

Με βάση το πρότυπο δοκίμιο "miniature angle beam block"

Για την βαθμονόμηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί το δοκίμιο μινιατούρα για δέσμη υπό γωνία (miniature angle beam block - V2 calibration block), το οποίο όμως αποδίδει πτωχότερα αποτελέσματα και δεν προτιμάται (Εικόνα 5.8).

Εικόνα 5.8 Miniature angle beam block

5.4.2.4. Ρύθμιση Συσκευής

Εκτός από τους αισθητήρες, θα πρέπει να προσαρμοστεί και η συσκευή στο δεδομένο σενάριο. Αυτό, απαιτεί προσαρμογή των παραμέτρων της (οι οποίες καθορίζουν την επεξεργασία και παρουσίαση των συλλεγόμενων δεδομένων), ώστε να αποδίδονται ακριβείς, ευκρινείς και ευανάγνωστες ενδείξεις. Τέτοια είναι η ένταση, φίλτρα συχνοτήτων, ο δειγματοληπτικός ρυθμός κ.α.

5.4.3. Σάρωση

Η σάρωση εκτελείται από όλες τις επιλεγείσες κεφαλές με την χρήση κατάλληλου μέσου (συνήθως γλυκερίνης) για την σύζευξη με το ελεγχόμενο δοκίμιο. Επιφέρει τις ενδείξεις, οι οποίες θα αξιολογηθούν στη συνέχεια.

5.4.3.1. Καθορισμός Περιοχών Σάρωσης

Αρχικά, προσδιορίζεται η περιοχή της επιφάνειας στην οποία θα κινηθούν οι αισθητήρες γωνιακής δέσμης. Αυτή εξαρτάται από τις τροχιές μισού και πλήρους βήματος.

Η θέση μισού βήματος (Half Skip) είναι αυτή στην οποία ο εκάστοτε αισθητήρας ηχοβολεί στην ρίζα της συγκόλλησης. Αντίστοιχα, η θέση πλήρους βήματος (Full Skip) καταδεικνύει το σημείο από το οποίο ο αισθητήρας εκπέμπει δέσμη η οποία, αφότου ανακλαστεί στο απέναντι τοίχωμα του δοκιμίου, φθάνει στο καπάκι της συγκόλλησης.

Ο υπολογισμός των θέσεων αυτών γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1 Υπολογισμός Half & Full Skip

	Από τον άξονα της συγκόλλησης	Από το άκρο της ραφής
Half Skip Distance	$T * \tan(\theta)$	$T/\cos(\theta)$
Full Skip Distance	$2T * \tan(\theta)$	$2T/\cos(\theta)$

Όπου: T : το πάχος του δοκιμίου
θ : η γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής δέσμης
ν : το πάχος της ραφής συγκόλλησης

Το εύρος της περιοχής στην οποία θα κινηθεί ο αισθητήρας στην επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου, ορίζεται από την τροχιά μισού βήματος και από την τροχιά πλήρους βήματος προσαυξημένη κατά $\nu/2$, δηλαδή το μισό του πάχους της ραφής. Η τελευταία, προκύπτει από την θέση στην οποία η δέσμη ηχοβολεί στον πόδα της συγκόλλησης.

Ο αισθητήρας γωνιακής δέσμης πραγματοποιεί σάρωση από τα σημεία που ανήκουν στην παραπάνω περιοχή, καλύπτοντας πλήρως το σώμα της συγκόλλησης.

5.4.3.2. Σάρωση με Αισθητήρες Κάθετης Δέσμης

Οι κάθετες κεφαλές εξετάζουν την περιοχή από την οποία θα διέλθουν στη συνέχεια οι γωνιακές. Κατά την σάρωση, αναζητείται η ύπαρξη κάποιας ασυνέχειας που παρεμβάλλεται της κεφαλής και του απέναντι τοιχώματος. Με αυτόν τον τρόπο, ορίζονται οι θέσεις ανακλαστήρων οι οποίοι στη συνέχεια ενδέχεται να παρεμβληθούν στην πορεία διάδοσης της δέσμης υπό γωνία, οδηγώντας σε παραπλανητικά αποτελέσματα και «αποκρύπτοντας» μέρος του σώματος της συγκόλλησης.

Εφόσον εντοπιστούν τέτοιες ασυνέχειες, θα πρέπει να αναζητηθούν τεχνικές για την παράκαμψή τους. Αυτές περιλαμβάνουν την χρήση επιπλέον κεφαλών διαφορετικής γωνίας ή προσέγγιση από το απέναντι τοίχωμα του συγκολλητού δοκιμίου.

5.4.3.3. Σάρωση με Αισθητήρες Γωνιακής Δέσμης

Ακολούθως (και κατόπιν βαθμονόμησης της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης κεφαλής), διενεργείται η σάρωση με τους αισθητήρες γωνιακής δέσμης· η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά την εξέταση της ρίζας και στη συνέχεια του σώματος της συγκόλλησης.

Για τον έλεγχο της ρίζας, η κεφαλή τοποθετείται στην θέση μισού βήματος (για Single-V) και κινείται κατά μήκους αυτής με μικρές μετατοπίσεις στον άλλο άξονα. Προσοχή πρέπει να δίδεται σε παραπλανητικές αντηχήσεις που οφείλονται στην γεωμετρία της ρίζας. Αυτός είναι και ο λόγος που το παρόν στάδιο εκτελείται ξεχωριστά.

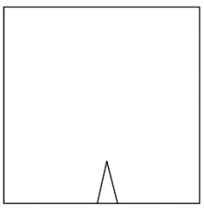
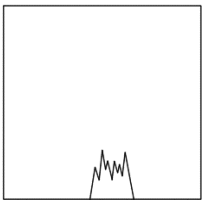
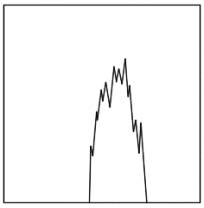
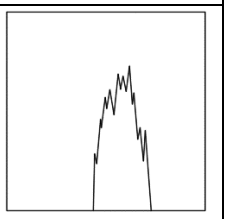
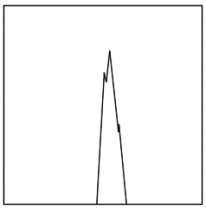
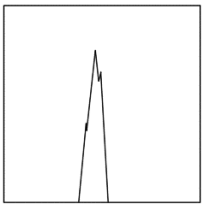
Σημαντικό βοήθημα για την αξιολόγηση των ενδείξεων που προκύπτουν από την ρίζα είναι να έχει προηγηθεί οπτική επιθεώρηση αυτής, ώστε να εντοπιστούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ενδέχεται να επιφέρουν μη σχετικές ενδείξεις.

Στη συνέχεια, η σάρωση του σώματος πραγματοποιείται από την περιοχή που ορίζεται από τις θέσεις $half - skip$ και $full - skip + \nu/2$. Περιλαμβάνει την παλινδρομική κίνηση του αισθητήρα μεταξύ των δύο θέσεων για όλο το μήκος της συγκόλλησης. Επιπλέον, είναι απαραίτητη και η περιστροφή της κεφαλής, για την εξέταση του κάθε σημείου από πολλές διευθύνσεις.

5.4.4. Αξιολόγηση και Χαρακτηρισμός Ευρημάτων

Όταν κατά τη σάρωση προκύψει η ένδειξη κάποιας ηχούς, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για τον καθορισμό του παράγοντα που την προξενεί. Στοιχεία που βοηθούν σε αυτή τη διάκριση παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2).

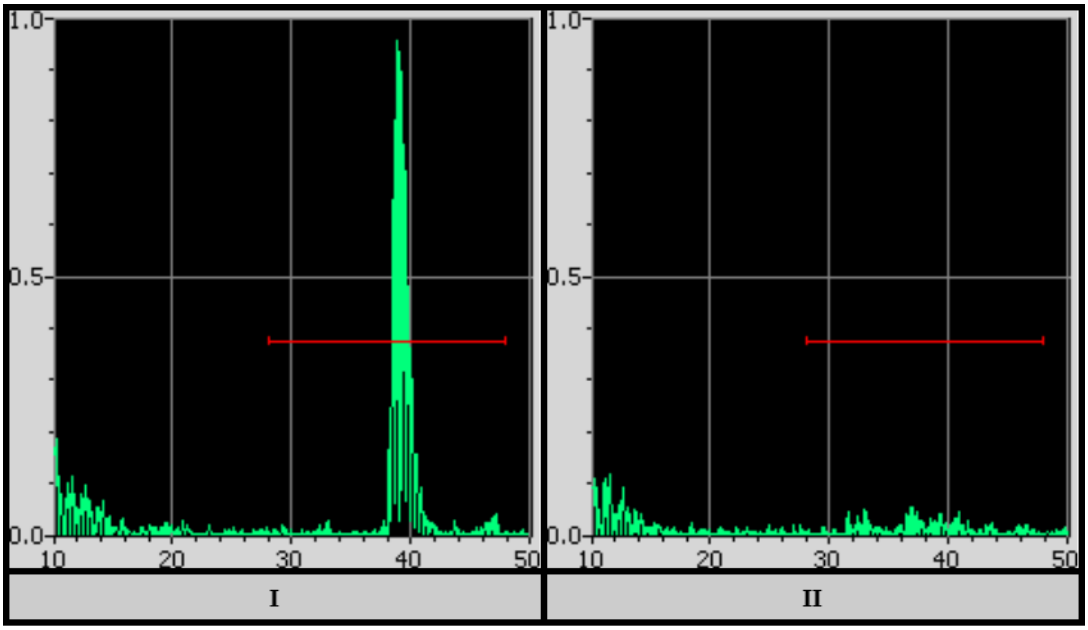
Πίνακας 5.2 Απεικονίσεις ατελειών

Τύπος Ασυνέχειας	**Ένταση Σήματος**	**Έκταση στον Οριζόντιο Άξονα**	**Ορατότητα**	**Μορφή Σήματος**
Πόρος	Χαμηλή	Περιορισμένη		
Πορώδες	Χαμηλή	Εκτεταμένη		
Εγκλείσματα	Υψηλή	Εκτεταμένη		
Ρωγμή	Υψηλή	Εκτεταμένη	Και από τις 2 πλευρές της συγκόλλησης	
Ατελής Τήξη	Υψηλή	Περιορισμένη	Μόνο από τη 1 πλευρά, καθώς από την άλλη η ηχητική δέσμη προσπίπτει με μικρή γωνία και δεν α-νιχνεύεται ηχώ	
Ατελής Διείσ-δυση	Υψηλή	Περιορισμένη	Και από τις 2 πλευρές της συγκόλλησης	

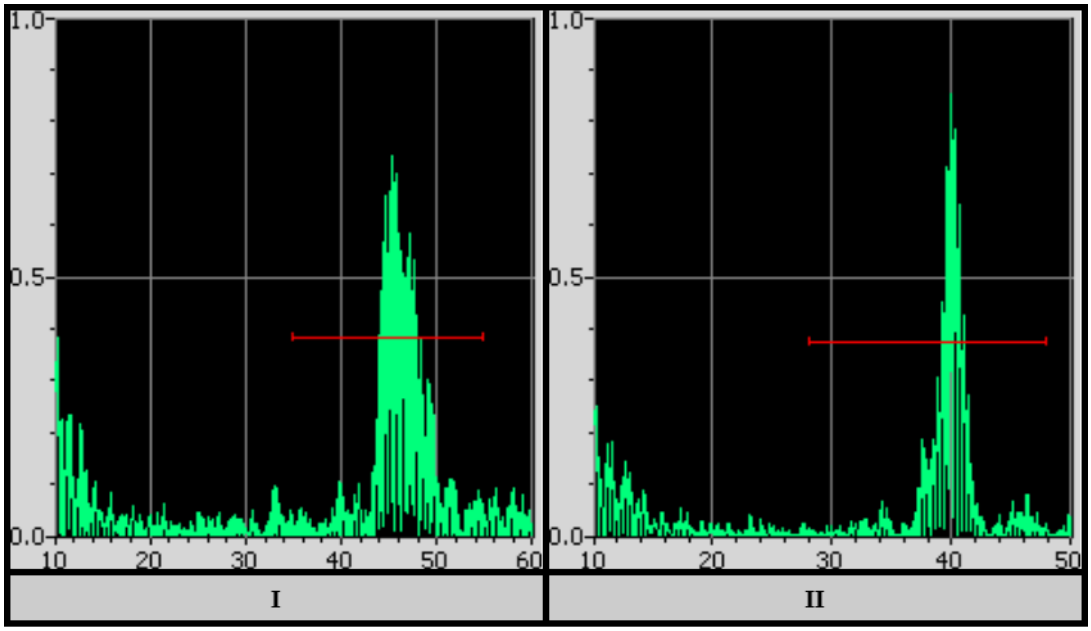
5.4.4.1. Διάκριση ατελούς τήξης και ρωγμής

Οι ενδείξεις ατελούς τήξης και ρωγμής μπορεί να μοιάζουν. Όπως, όμως, φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 5.2), μπορούν να διακριθούν με την προσέγγιση από τις δύο πλευρές της ραφής. Η Εικόνα 5.10 και Εικόνα 5.9 που προέκυψαν από τις εργαστηριακές εφαρμογές καταδεικνύουν αυτό το γεγονός.

Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση της προσέγγισης της ατελούς τήξης από την απέναντι πλευρά, η φαλτσοκοπή ανακλά την δέσμη προς την επιφάνεια και δεν επιστρέφει αντήχηση στον αισθητήρα. Αντίθετα, στην περίπτωση της ρωγμής, η ακανόνιστη μορφή της θα παράξει αντήχηση με κατεύθυνση προς τον πομποδέκτη κατά την προσέγγιση και από τις δύο πλευρές της ραφής



Εικόνα 5.10 Προσέγγιση ασυνέχειας ατελούς τήξης από δύο πλευρές (I και II)



Εικόνα 5.9 Προσέγγιση ρωγμής από δύο πλευρές (I και II)

5.4.4.2. Διάκριση ασυνεχειών στη Ρίζα

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.4.3.3, η ρίζα της συγκόλλησης αποτελεί περιοχή που απαιτείται ιδιαίτερος χειρισμός, καθώς ενίοτε επιστρέφει μη σχετικές ενδείξεις εξαιτίας της μορφής της.

Κατά τον έλεγχο της ρίζας της συγκόλλησης χωρίς ασυνέχειες, θα εμφανίζεται ηχώ από τη ρίζα σε απόσταση λίγο μεγαλύτερη της αναμενόμενης, ομοιόμορφη κατά το μήκος της συγκόλλησης. Αντιθέτως, η ύπαρξη ασυνεχειών στη ρίζα (υποκοπή, ατελής διείσδυση) θα οδηγήσει σε ενδείξεις μικρότερου βάθους κατά τον έλεγχο από την μία πλευρά και μεγαλύτερου από την άλλη. Η ένταση της εμφανιζόμενης ηχούς και η σύγκριση των ενδείξεων που προκύπτουν κατά τη σάρωση από τις δύο πλευρές μπορούν να καταδείξουν την φύση του ανακλαστήρα. Τα χαρακτηριστικά των συνήθων ασυνεχειών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3 Διάκριση ασυνεχειών ρίζας συγκόλλησης

Τύπος Ασυνέχειας	**Χαρακτηριστικά Ηχούς**	
Ατελής Διείσδυση	Μεγάλης Έντασης	Δεν εμφανίζεται ηχώ από τη ραφή
Υποκοπή	Μεγιστοποίηση ενδείξεων απομακρύνοντας ελαφρώς το σημείο σάρωσης	Εμφανίζεται και ηχώ από τη ραφή
Ρωγμή		Η ηχώ της ραφής εμφανίζεται μόνο από τη μία πλευρά

5.4.5. Διαστασιολόγηση Ατελειών

5.4.5.1. Τεχνική Πτώσης 6 dB

Για τη διαστασιολόγηση ασυνεχειών μεγάλου μήκους (μεγαλύτερο του εύρους της δέσμης υπερήχων) χρησιμοποιείται η τεχνική πτώσης σήματος “6 dB”. Αρχικά, βρίσκεται η θέση τοποθέτησης του αισθητήρα στην οποία εντοπίζεται ηχώ μέγιστης έντασης. Ακολούθως, ρυθμίζεται η κλίμακα του καθέτου άξονα προκειμένου η κορυφή της εν λόγω ένδειξης να φτάνει στο 80%. Ο αισθητήρας μετακινείται (προβάλλοντας στον ανακλαστήρα) έως ότου η ένταση της ηχούς φτάσει στο μισό της αρχικής, δηλαδή στο 40% του άξονα. Τότε θεωρείται ότι η δέσμη ηχοβολεί στην ασυνέχεια κατά το ήμισυ. Κατά συνέπεια, μπορεί να οριστεί το άκρο της ως το σημείο στο οποίο η διεύθυνση διάδοσης της δέσμης (την δεδομένη στιγμή) τέμνει το επίπεδο του ανακλαστήρα.

5.4.5.2. Τεχνική Πτώσης 20 dB

Για μικρότερες ατέλειες (μήκους μικρότερου του εύρους της δέσμης υπερήχων) χρησιμοποιείται η τεχνική πτώσης σήματος “20 dB”. Αντίστοιχα με την προηγούμενη τεχνική, όταν εντοπιστεί κάποιος ανακλαστήρας, βρίσκεται η θέση τοποθέτησης του αισθητήρα στην οποία παρατηρείται ηχώ μέγιστης έντασης και ρυθμίζεται η κλίμακα του καθέτου άξονα προκειμένου η κορυφή της εν λόγω ένδειξης να φτάνει στο 80%. Στη συνέχεια ο αισθητήρας μετακινείται (προβάλλοντας στον ανακλαστήρα) έως ότου η ένταση της ηχούς φτάσει στο 10% της αρχικής.

[6], [13], [14], [23], [28], [29], [30], [31]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται, για λόγους πληρότητας, αξιοσημείωτες μέθοδοι μη-καταστροφικού ελέγχου, οι οποίες δεν καλύφθηκαν εργαστηριακά. Ωστόσο, συναντώνται σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών και κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν συνοπτικά.

6.1. Ραδιογραφία

Ο ραδιογραφικός έλεγχος (Εικόνα 6.1)[14], Radiographic Testing (RT), αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους εξέτασης του εσωτερικού εξαρτημάτων, μαζί με τους υπερήχους.

6.1.1. Περιγραφή Μεθόδου

Οι αποτυπώσεις με ακτίνες Χ, που εξήγαγε το 1895 ο W.C. Röntgen και απεικόνιζαν τα οστά ανθρώπινου χεριού και μεταλλικά βαρίδια εντός κλειστού ξύλινου κουτιού, αποτέλεσαν τα πρώτα ραδιογραφήματα. Στην πορεία, οι ακτινογραφίες εξελίχθηκαν βρίσκοντας εφαρμογή, αρχικά στην ιατρική, αλλά στη συνέχεια και στη βιομηχανία για τον έλεγχο υλικών και κατασκευών.

Η ραδιογραφία αποτελεί μια από τις παλαιότερες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου υλικών. Χρησιμοποιώντας ακτίνες Χ ή Γ, οι οποίες διαπερνούν ένα σώμα, μπορεί να αποκαλύψει ατέλειες στο εσωτερικό του. Μαζί με τους υπερήχους, αποτελούν τις δύο κυρίαρχες μεθόδους ελέγχου της εσωτερικής δομής των υλικών.

6.1.2. Αρχή Λειτουργίας

Η μέθοδος συνίσταται στην παραγωγή ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (Χ ή Γ) για την προσβολή ενός αντικειμένου. Η ακτινοβολία διαπερνά μερικώς την ύλη και προσπίπτει σε έναν δέκτη (φωτογραφική πλάκα ή ανιχνευτή). Η ποσότητά της ακτινοβολίας που θα διαπεράσει το αντικείμενο και διέρχεται από ασυνέχειες διαφέρει από αυτή που διέρχεται από συμπαγές υλικό, καθώς συνήθως απορροφάται σε μικρότερο βαθμό από τις πρώτες. Περιοχές του υλικού με μικρότερο πάχος ή ασυνέχειες, εμφανίζονται πιο σκούρες από τις υπόλοιπες. Εξαίρεση μπορεί να αποτελέσουν εγκλείσματα με υψηλότερη απορρόφηση ακτινοβολίας.

6.1.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου

6.1.3.1. Ακτίνες Χ

Η παραδοσιακή μέθοδος παραγωγής ακτινών Χ βασίζεται στον βομβαρδισμό ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας, σε μεταλλικό στόχο, σε σωλήνα κενού. Μία τυπική διάταξη ακτινών Χ, αποτελείται από μια κάθοδο και μία άνοδο, οι οποίες είναι τοποθετημένες μέσα σε θάλαμο κενού. Μία διαφορά δυναμικού διατηρείται μεταξύ των δύο. Η κάθοδος βάλλει ηλεκτρόνια προς την άνοδο, τα οποία προσκρούοντας σε αυτή, παράγουν την επιθυμητή ακτινοβολία.

Μια διάταξη ακτινών Χ διαθέτει τρία βασικά στοιχεία ελέγχου:

- Τη διαφορά δυναμικού, η οποία ρυθμίζει το μήκος κύματος. Η αύξησή της οδηγεί σε μικρότερο μήκος κύματος, επομένως σε μεγαλύτερη διεισδυτικότητα των ακτινών Χ.
- Την ένταση του ρεύματος, η οποία καθορίζει την ποσότητα της ακτινοβολίας που παράγεται. Η αύξηση της έντασης οδηγεί στη δημιουργία μεγαλύτερου αριθμού ακτινών, επιτρέποντας καλύτερη απεικόνιση, αυξάνοντας όμως την εκπεμπόμενη ακτινοβολία.
- Το χρόνο έκθεσης, ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα της εξαγόμενης εικόνας.

[14] [32] (ONE STOP NDT, 2024)

6.1.3.2. Ακτίνες γ

Οι ακτίνες γ παράγονται, όταν ασταθή ραδιενεργά ισότοπα διασπώνται, αποβάλλοντας ενέργεια. Ιστορικά χρησιμοποιήθηκε Ράδιο 226, όμως για λόγους ασφαλείας επικράτησε η χρήση ισοτόπων όπως το Κοβάλτιο 60 και το Ιρίδιο 192. Καθώς η πηγή είναι ραδιενεργή φυλάσσεται σε ειδικές κάψουλες θωρακισμένες με μόλυβδο ή άλλο, αντίστοιχο υλικό, για προστασία των εργαζομένων από την ακτινοβολία. Η προκύπτουσα ακτινοβολία υψηλής ενέργειας διαθέτει μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από την αντίστοιχη των ακτινών Χ.

Τα ραδιενεργά ισότοπα παράγουν συγκεκριμένα μήκη κύματος και κάθε πηγή είναι δεσμευμένη σε αυτό. Η ποσότητα της ακτινοβολίας εξαρτάται από το μέγεθος της πηγής. Ως μονάδες μέτρησης χρησιμοποιούνται το $curie$ και το $becquerel$ ($1\ curie\ =\ 37\ GBq$). Στη βιομηχανική ραδιογραφία χρησιμοποιείται το $Gigabecquerel$ (GBq). Κατά συνέπεια, τα στοιχεία ελέγχου της μεθόδου περιορίζονται στο μέγεθος της πηγής και τον χρόνο. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό μήκος κύματος, θα πρέπει να επιστρατευθεί ξεχωριστή πηγή.

6.1.4. Εφαρμογές

Παρόλο που η ραδιογραφία μπορεί να ανιχνεύσει επιφανειακές ατέλειες και ρωγμές σε συγκεκριμένες διευθύνσεις (ασυνέχειες με αξιόλογο πάχος σε μια διεύθυνση παράλληλη με την δέσμη ακτινοβολίας), χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό ατελειών κάτω από την επιφάνεια.

Η ραδιογραφία χρησιμοποιείται κυρίως για την ανεύρεση ελαττωμάτων σε συγκολλήσεις και χυτά. Θεωρείται η πλέον αποτελεσματική μέθοδος για τον έλεγχο συγκολλήσεων λεπτότοιχων σωληνώσεων μικρής εσωτερικής διαμέτρου.

6.1.4.1. Πλεονεκτήματα

- Η ραδιογραφία μπορεί να εφαρμοστεί στα περισσότερα στερεά υλικά.
- Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι μια ακριβής και μόνιμη αποτύπωση της δοκιμής.
- Έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει ασυνέχειες στο εσωτερικό του δοκιμίου.

6.1.4.2. Μειονεκτήματα

- Εξαιτίας της ακτινοβολίας, υπάρχουν σημαντικά ζητήματα ασφαλείας στην διενέργεια του ελέγχου καθώς και στη διαχείριση του εξοπλισμού.
- Η ραδιογραφία μπορεί να ανιχνεύσει ατέλειες συγκεκριμένου προσανατολισμού.
- Η πυκνότητα και το πάχος του υπό έλεγχο υλικού μπορεί να αποτελέσουν περιοριστικούς παράγοντες στην εφαρμογή της μεθόδου.
- Απαιτεί ταυτόχρονη πρόσβαση και από δύο τοιχώματα του εξεταζόμενου μέρους.
- Χαρακτηρίζεται από υψηλό κεφαλαιακό και λειτουργικό κόστος και είναι χρονοβόρα.

Εικόνα 6.1 Ραδιογραφικός Έλεγχος
Πηγή: One Stop NDT: A Comprehensive Guide on Radiography Testing [onestopndt.com]

[6], [8], [13], [14]

6.2. Δινορεύματα

Ο έλεγχος με δινορεύματα, Eddy Current Testing (ECT), βρίσκει εφαρμογή στην εξέταση μεταλλικών, αγώγιμων υλικών, προσφέροντας γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

6.2.1. Περιγραφή Μεθόδου

Τα δινορεύματα αποτελούν ηλεκτρικά ρεύματα που γεννώνται σε έναν αγωγό όταν αυτός υποβάλλεται σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ανακάλυψη τους το 1864 από τον J. Maxwell βασίστηκε στις επιστημονικές εξελίξεις που προηγήθηκαν στους τομείς του ηλεκτρομαγνητισμού, της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και της αλληλεπίδρασης των προκύπτοντων μαγνητικών πεδίων. Η πρώτη χρήση των δινορευμάτων στο πεδίο του μη-καταστροφικού ελέγχου αναφέρεται στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, αλλά πρακτικά αναπτύχθηκε μετά τα τέλη της δεκαετίας του 1940 με την κατασκευή εξειδικευμένων οργάνων.

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο μεταλλικών, ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών, εντοπίζοντας επιφανειακές και ελαφρώς υποεπιφανειακές ασυνέχειες.

6.2.2. Αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος χρησιμοποιεί αισθητήρα με πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος πλησίον της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού, ασκώντας του αντίστοιχη μαγνητίζουσα δύναμη. Αυτό οδηγεί στην δημιουργία δινορευμάτων, τα οποία παράγουν ένα νέο μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με το πρώτο. Το προϊόν αυτής της αλληλεπίδρασης ανιχνεύεται ως τάση σε πηνίο.

Στα σημεία ύπαρξης ασυνεχειών διαταράσσεται η ροή των δινορευμάτων, επιδρώντας στο μαγνητικό πεδίο που σχηματίζουν. Κατ' επέκταση θα διαφοροποιηθεί και το συνολικό πεδίο που ανιχνεύεται. Συνεπώς, σημεία στα οποία εντοπίζονται μεταβολές του πεδίου κατά την εξέταση, καταδεικνύουν την ύπαρξη ασυνεχειών.

6.2.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου

Για την εκπόνηση του ελέγχου με την υπό μελέτη μέθοδο, απαιτούνται ένα ή περισσότερα πηνία σε συνδυασμό με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, για την παραγωγή των δινορευμάτων στο εξεταζόμενο υλικό. Τα πηνία ενσωματώνονται σε κεφαλές, οι οποίες εξειδικεύονται σε διαφορετικές εφαρμογές. Γενικά, διακρίνονται σε επιφανείας, εσωτερικού και συστοιχίας.

Οι κεφαλές δρουν ως αισθητήρες και, κατόπιν ενίσχυσης του σήματος, προβάλλουν τα δεδομένα που συλλέγουν σε οθόνη. Η απεικόνιση των δεδομένων γίνεται σε έναν άξονα (ως ύψος παλμού) ή, συνηθέστερα, σε σύστημα δύο αξόνων, σε διάγραμμα εμπέδησης. Η ηλεκτρική εμπέδηση εκφράζει την αντίσταση του πηνίου συνυπολογίζοντας τις μεταβολές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στα άκρα του. Από το διάγραμμα εμπέδησης μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες για το εύρος του λαμβανόμενου ηλεκτρικού σήματος (διαφορά δυναμικού) και την διαφορά φάσης του από το παραγόμενο (Εικόνα 6.2)[15].

[15] [33] (TiaT Europe - NDT Inspection, Training & Engineering, 2024)

6.2.4. Εφαρμογές

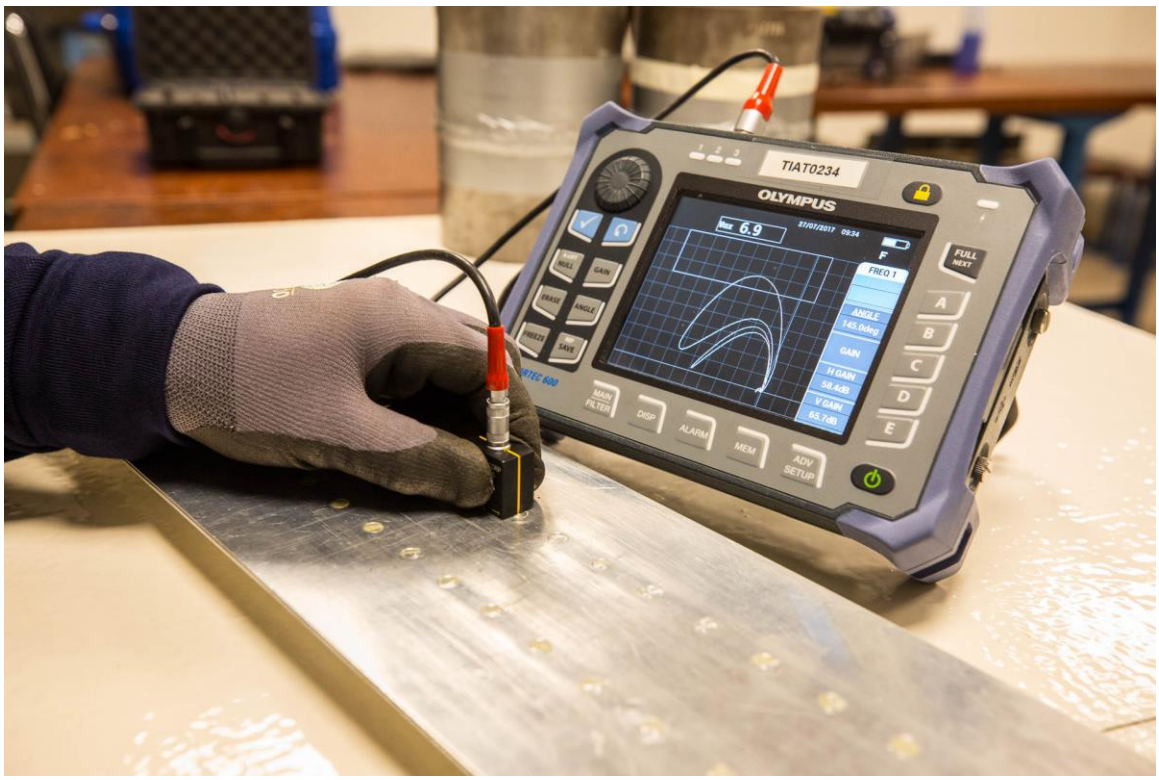
Η ευελιξία της μεθόδου, έχει οδηγήσει στην χρήση της σε διαφορετικά πεδία για τον έλεγχο σιδηρομαγνητικών και μη υλικών.

6.2.4.1. Πλεονεκτήματα

- Αξιόπιστη και ασφαλής μέθοδος χαμηλού κόστους.
- Η διεξαγωγή της διαδικασίας είναι ταχεία και επιτρέπει την καταγραφή των αποτελεσμάτων για εξέταση σε δεύτερο χρόνο.
- Ο εξοπλισμός δεν είναι απαραίτητο να βρίσκεται σε απευθείας επαφή με το ελεγχόμενο δοκίμιο και συνήθως δεν απαιτείται καθαρισμός του.

6.2.4.2. Μειονεκτήματα

- Η μέθοδος περιορίζεται σε ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά.
- Επιτρέπει υποεπιφανειακή σάρωση σε μικρό μόνο βάθος.
- Εξαρτήματα με τραχιά επιφάνεια ή πολύπλοκη γεωμετρία οδηγούν σε ανομοιόμορφη κατανομή των δινορευμάτων, δυσχεραίνοντας την διαδικασία.
- Μπορεί να ανιχνεύσει ατέλειες συγκεκριμένου προσανατολισμού.
- Υπολείπεται ευαισθησίας κοντά σε ακμές του δοκιμίου.



Εικόνα 6.2 Eddy Current Testing
Πηγή: TiaT Europe [tiat.nl]

[6], [8], [13], [14]

6.3. Ακουστική Εκπομπή

Η ακουστική εκπομπή, Acoustic Emission Testing (AET), αποτελεί κυρίαρχη μέθοδο για την εποπτεία της κατάστασης και τον εντοπισμό δημιουργούμενων ατελειών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του εξεταζόμενου τμήματος μιας κατασκευής.

6.3.1. Περιγραφή Μεθόδου

Από την αρχαιότητα, είχε παρατηρηθεί πως η παραγωγή ήχων αποτελεί πρόδρομο φαινόμενο των δομικών αστοχιών. Στα μέσα του 20ου αιώνα (J. Kaiser) αναπτύχθηκαν τα απαραίτητα όργανα για την ανίχνευση και ανάλυση των ηχητικών κυμάτων που γεννώνται στα σώματα κατά την καταπόνηση και παραμόρφωσή τους. Η πληροφορία αυτή, μπορούσε να καταδείξει την δημιουργία ή επέκταση ατελειών στην επιφάνεια και το εσωτερικό τους. Στην πορεία, κατορθώθηκε η απομόνωση της χρήσιμης ηχητικής πληροφορίας από τον θόρυβο, με αποτέλεσμα την βελτίωση της ευαισθησίας της μεθόδου.

Πλέον, η μέθοδος χρησιμοποιεί αισθητήρες προσαρμοσμένους στο σώμα, για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του κατά τη λειτουργία του. Μεταβολές στο λαμβανόμενο σήμα καταδεικνύουν την ύπαρξη ατελειών, ενώ είναι εφικτός και ο προσδιορισμός της θέσης τους.

6.3.2. Αρχή Λειτουργίας

Η μέθοδος, εν πολλοίς, βασίζεται σε αντίστοιχα φυσικά φαινόμενα με αυτή των υπερήχων.

Η παραμόρφωση ενός σώματος οδηγεί στη δημιουργία ηχητικών κυμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ακουστικής εκπομπής στο φάσμα των υπερήχων (συνήθως με συχνότητες $150 - 300\ kHz$). Η γέννηση και διάδοση ρωγμών ή άλλων ατελειών επηρεάζει την εκπομπή αυτή.

Αξιοποιώντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, τα κύματα αυτά μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες και να μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα. Η διασταύρωση και επεξεργασία των σημάτων διαφορετικών αισθητήρων σε δεδομένα σημεία της επιφάνειας ενός σώματος, επιτρέπει την ερμηνεία των συλλεγόμενων δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί να προσδιορίσει τη θέση μίας πηγής.

Η μέθοδος διαφέρει από τις προηγούμενες εξαιτίας του παθητικού χαρακτήρα της. Συγκεκριμένα, συλλέγει δεδομένα χωρίς να αποδίδει ενέργεια στο εξεταζόμενο σώμα και ενόσω αυτό λειτουργεί.

6.3.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά την μέθοδο της ακουστικής εκπομπής συνίσταται στους αισθητήρες, τους ενισχυτές και τα μέσα καταγραφής, επεξεργασίας και παρουσίασης των συλλεγόμενων δεδομένων (Εικόνα 6.3)[16].

Οι αισθητήρες αποτελούν πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, οι οποίες ανιχνεύουν τις ακουστικές εκπομπές μετατρέποντάς τες σε τάση. Έτσι, παρέχεται πληροφορία για την συχνότητα και το εύρος των εντοπιζόμενων παλμών.

Στη συνέχεια, το παραγόμενο από τους αισθητήρες ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται και επεξεργάζεται. Η αυτοματοποιημένη ανάλυση των δεδομένων μέσω λογισμικού μπορεί να αξιοποιήσει την

[16] [34] (NASA, 2024)

πληροφορία με διαφορετικούς τρόπους, ξεχωρίζοντας παράλληλα τις μη σχετικές ενδείξεις. Ο χαρακτηρισμός των ενδείξεων μπορεί να διενεργηθεί με διαφορετικές μεθόδους.

6.3.4. Εφαρμογές

Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής αξιοποιείται για την παρακολούθηση δομών σε πραγματικό χρόνο και τον εντοπισμό ατελειών, προτού αυτές οδηγήσουν στην αστοχία τους. Συνήθως, χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια λειτουργίας των εξεταζόμενων μερών, βρίσκοντας εφαρμογές σε σύνθετα υλικά, κεραμικά και μέταλλα.

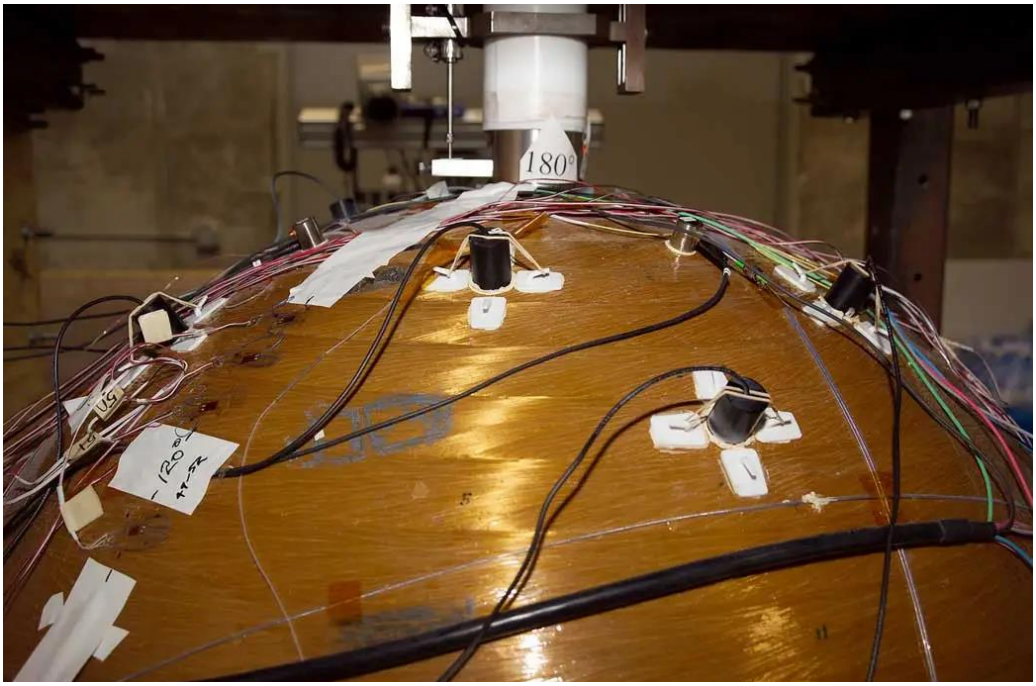
Στην περίπτωση των συγκολλήσεων χρησιμοποιείται, πέραν των παραπάνω περιπτώσεων, και για τον εντοπισμό ψυχρής ρηγμάτωσης, η οποία ενδέχεται να προκύψει μέρες μετά την διεργασία.

6.3.4.1. Πλεονεκτήματα

- Παρέχει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξεταζόμενου μέρους.
- Δεν είναι επεμβατική, αλλά παθητική.
- Μπορεί να παρακολουθηθεί από απόσταση
- Αυτοματοποιημένη σε μεγάλο βαθμό.

6.3.4.2. Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος εγκατάστασης
- Επιρρεπής στους θορύβους του περιβάλλοντος χώρου
- Αδυναμία εντοπισμού ατελειών που έχουν δημιουργηθεί και δεν επεκτείνονται (όπως εγκλείσματα)



Εικόνα 6.3 Έλεγχος με ακουστική εκπομπή σε δοχείο πιέσεως από σύνθετο υλικό
Πηγή: NASA: Acoustic Emission Testing [nasa.gov]

[6], [8], [13]

6.4. Θερμογραφία

Ο θερμογραφικός έλεγχος, Infrared Thermography (IRT), χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό υποεπιφανειακών ατελειών σε συγκολλητά και άλλα δοκίμια.

6.4.1. Περιγραφή Μεθόδου

Η ανακάλυψη της υπέρυθρης ακτινοβολίας στις αρχές του 19^{ου} αιώνα αποτέλεσε πρώτο στάδιο για την ανάπτυξη της μεθόδου. Στην πορεία αναπτύχθηκαν κάμερες οι οποίες επέτρεψαν την αποτύπωση και μελέτη του φαινομένου για το σκοπό του μη καταστροφικού ελέγχου

Η μέθοδος της θερμογραφίας ανιχνεύει την εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία ενός σώματος. Με αυτόν τον τρόπο, δύναται να εντοπίσει υπάρχουσες ασυνέχειες, οι οποίες και επηρεάζουν το θερμικό αποτύπωμα του εξεταζόμενου μέρους.

6.4.2. Αρχή λειτουργίας

Κάθε επιφάνεια εκπέμπει θερμική ακτινοβολία η οποία στις συνήθεις περιπτώσεις εμπίπτει στο φάσμα των υπέρυθρων. Η υπέρυθρη ακτινοβολία μπορεί να ανιχνευθεί και να μετασχηματιστεί σε ηλεκτρικό σήμα, από το οποίο υπολογίζεται η θερμοκρασία. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται θερμοκάμερες.

6.4.3. Εξοπλισμός και Ακολουθούμενη Διαδικασία Ελέγχου

Για την θερμογραφική εξέταση χρησιμοποιούνται υπέρυθρες κάμερες για την ανίχνευση της ακτινοβολίας και συσκευές επεξεργασίας, ανάλυσης και απεικόνισης των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Η θερμογραφία μπορεί να διενεργηθεί παθητικά, αξιοποιώντας τη φυσική θέρμανση του σώματος εξαιτίας της λειτουργίας του. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις, αξιοποιούνται και εξωτερικές πηγές θερμότητας για την θερμική διέγερση του δοκιμίου.

6.4.4. Εφαρμογές

Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε συγκολλητά δοκίμια, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού ατελειών κάτω από την επιφάνεια, όπως εγκλείσματα, πορώδες και ρωγμές.

Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την αποτροπή αστοχιών, με τον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων.

6.4.4.1. Πλεονεκτήματα

- Μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά υλικά
- Επιτρέπει τον εντοπισμό επιφανειακών και υποεπιφανειακών ασυνεχειών
- Μπορεί να παρέχει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξεταζόμενου μέρους.

6.4.4.2. Μειονεκτήματα

- Υψηλό κόστος εξοπλισμού
- Η θερμική απεικόνιση επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΦΟΡΗΤΗ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑ (REPLICA)

Ο έλεγχος με τη χρήση ρέπλικας (φορητή μεταλλογραφία), αποτελεί μία μέθοδο μη καταστροφικού μεταλλογραφικού ελέγχου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της μικροδομής ενός μεταλλικού υλικού σε οποιοδήποτε βιομηχανικό περιβάλλον.

7.1. Ιστορικά Στοιχεία

7.1.1. Μεταλλογραφική Εξέταση Υλικών

Τα πρώτα μικροσκόπια κατασκευάστηκαν στις αρχές του 17ου αιώνα. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιήθηκαν για την παρατήρηση των μετάλλων μέχρι τον 19ο αιώνα. Το 1863 ο H.C. Sorby κατόρθωσε να υπερκεράσει τα μέχρι τότε εμπόδια και να επεξεργαστεί την επιφάνεια του υλικού κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να είναι εφικτή η παρατήρησή της στο μικροσκόπιο. Η προετοιμασία της επιφάνειας περιελάμβανε την στίλβωση και χημική προσβολή της και αποτελεί την βάση της μεταλλογραφίας.

Τα επόμενα έτη, ο J.R Vilella σημείωσε σημαντική πρόοδο στις μεθόδους προετοιμασίας της επιφάνειας, βελτιώνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου και επιτρέποντας την παρατήρηση νέων δομών. Οι επιστημονικές εφευρέσεις που ακολούθησαν, οδήγησαν στη ανάπτυξη του εξοπλισμού (ηλεκτρονικό μικροσκόπιο) αλλά και των πρακτικών προετοιμασίας των υλικών, ενισχύοντας τα αποτελέσματα της εξέτασης.

Με την δυνατότητα παρατήρησης της μικροδομής των μετάλλων, βελτιώθηκε σημαντικά η κατανόησή τους από τον άνθρωπο. Έτσι, κατέστη εφικτή η σύνδεσή της με τις πρακτικές διαχείρισης και κατεργασίας του υλικού αλλά και με τις προκύπτουσες ιδιότητές του.

7.1.2. Ανάπτυξη Μεταλλογραφίας Πεδίου & Φορητής Μεταλλογραφίας

Η μεταλλογραφική εξέταση της μικροδομής ενός υλικού αποτελεί διαδικασία, η οποία απαιτεί την τομή και απομάκρυνση ενός μέρους του. Εξαιτίας αυτού, προϋποθέτει την παύση της λειτουργίας του και την επισκευή του, εφόσον αυτή είναι εφικτή. Προκειμένου αυτό να αποφευχθεί, παρουσιάστηκε η ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου της μικροδομής ενός εξαρτήματος.

Στα μέσα του 20ου αιώνα αναπτύχθηκαν τα κατάλληλα εργαλεία τα οποία επέτρεπαν την πραγματοποίηση της προετοιμασίας της επιφάνειας στο πεδίο. Το γεγονός αυτό επέτρεψε την επιτόπου εξέταση της μικροδομής του υλικού με κάποιο φορητό μικροσκόπιο («μεταλλογραφία πεδίου»). Επιπλέον, αναπτύχθηκε και η τεχνική της ρέπλικας, η οποία συνίσταται στην παραγωγή ενός αντιγράφου της δομής της προετοιμασμένης επιφάνειας του υλικού. Το αντίγραφο αυτό, μπορεί να μεταφερθεί για εξέταση στο εργαστήριο και να αποθηκευτεί, επιτρέποντας την επανάληψη του ελέγχου εφόσον κάτι τέτοιο απαιτηθεί («φορητή μεταλλογραφία»).

[35], [36]

7.2. Περί Μεταλλογραφίας

Η μεταλλογραφία χρησιμοποιείται στην εξέταση της δομής των μετάλλων. Περιλαμβάνει την παρατήρηση και ερμηνεία της και διενεργείται τόσο σε μακροσκοπικό, όσο και μικροσκοπικό επίπεδο.

7.2.1. Μελέτη Μακροδομής

Η μελέτη της μακροδομής ενός υλικού αφορά την εξέταση χαρακτηριστικών σε μεγεθύνσεις 1x – 50x. Για την παρατήρηση της μακροδομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί το γυμνό μάτι ή κάποιο εργαλείο μεγέθυνσης, όπως μεγεθυντικός φακός ή στερεοσκόπιο. Μπορεί να εκτελεστεί στην επιφάνεια του δοκιμίου και σε επίπεδο τομής ή θραύσης του. Μέσα από την μελέτη αυτή μπορούν να αντληθούν, μεταξύ άλλων, πληροφορίες για:

- Ύπαρξη εγκλεισμάτων και πόρων, και προσδιορισμός του μεγέθους και της κατανομής τους.
- Σημεία εκκίνησης ρωγμών και χαρακτηριστικά της διάδοσής τους.
- Διάβρωση, οξείδωση, ή φθορά της επιφάνειας.
- Χαρακτηριστικά μιας συγκόλλησης (διείσδυση, κατανομή «πάσων», εύρος ΘΕΖ).
- Χαρακτηριστικά της δομής χυτών και σφυρήλατων.

7.2.2. Μελέτη Μικροδομής

Η μικροδομή ενός μεταλλικού υλικού αφορά παρατήρηση σε μεγεθύνσεις 50x – 1000x. Για την μελέτη της μικροδομής ενός υλικού, χρησιμοποιείται το μικροσκόπιο. Για την παρατήρησή της απαιτείται η κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας. Αυτή περιλαμβάνει την λείανση και στίλβωσή της, ενώ ακολουθείται από την χημική προσβολή με κατάλληλο αντιδραστήριο για την ανάδειξη των χαρακτηριστικών της.

Η μικροδομή των μετάλλων μπορεί να περιγραφεί από την κρυσταλλική τους δομή, η οποία αποτελεί διάταξη ατόμων στο χώρο με περιοδικότητα στις τρεις διαστάσεις [17]. Η κρυσταλλική δομή συνήθως δεν είναι ενιαία καθ' όλο το υλικό (πολυκρυσταλλικά υλικά). Τα διακριτά μέρη της, που χαρακτηρίζονται από κοινή κρυσταλλική δομή, ονομάζονται κρύσταλλοι ή κόκκοι.

Τα μέταλλα περιέχουν διακεκριμένες φάσεις, οι οποίες αποτελούν ομογενείς περιοχές παρόμοιας χημικής σύστασης και κρυσταλλικής δομής και, ως εκ τούτου, παρεμφερών ιδιοτήτων. Στα μεταλλικά κράματα ενδέχεται να συνυπάρχουν ταυτόχρονα περισσότερες από μία φάσεις. Η φάση από την οποία χαρακτηρίζεται ένα μορφοποιημένο υλικό προκύπτει από διαφορετικές κατεργασίες και εξαρτάται από την σύσταση του κράματος. Ενδεικτικά, στους χάλυβες εμφανίζονται οι παρακάτω φάσεις και μίγματα φάσεων:

- Φερρίτης: στερεό διάλυμα Fe:C με δομή BCC (κυβικό χωροκεντρωμένο κρυσταλλικό σύστημα). Ο φερριτικός χάλυβας είναι μαλακός και ελατός.
- Ωστενίτης: στερεό διάλυμα Fe:C με δομή FCC (κυβικό εδροκεντρωμένο κρυσταλλικό σύστημα). Διακρίνεται από μικρή μαγνητική διαπερατότητα.
- Μαρτενσίτης: στερεό διάλυμα Fe:C με δομή BCT (χωροκεντρωμένο τετραγωνικό κρυσταλλικό σύστημα), το οποίο εμφανίζεται σε χάλυβες μετά από ταχεία ψύξη από την ωστενιτική περιοχή και διακρίνεται από ιδιαίτερα υψηλή σκληρότητα.

[17] [37] (Χρυσουλάκης & Παντελής, 2008)

- Σεμεντίτης: πρόκειται για ενδομεταλλική ένωση ορθορομβικής δομής με χημικό τύπο Fe_3C.
- Περλίτης: αποτελεί σύνθετη δομή φάσεων φερρίτη και σεμεντίτη.
- Μπαινίτης: αποτελεί σύνθετη δομή φάσεων φερρίτη και καρβιδίων. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη μηχανική αντοχή και ολκιμότητα.

Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής ενός υλικού μπορούν να αποτυπωθούν σε ρέπλικα και στη συνέχεια να μελετηθούν στο μικροσκόπιο από την τελευταία (Εικόνα 7.1). Οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν.

7.2.2.1. Σχήμα και μέγεθος κόκκων

Η μορφή και ο προσανατολισμός των κόκκων του υλικού επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές του ιδιότητες, ενώ μπορούν να μεταβληθούν από τις κατεργασίες ή από τις καταπονήσεις που δέχεται ένα εξάρτημα κατά τη λειτουργία του.

7.2.2.2. Προσδιορισμός φάσεων

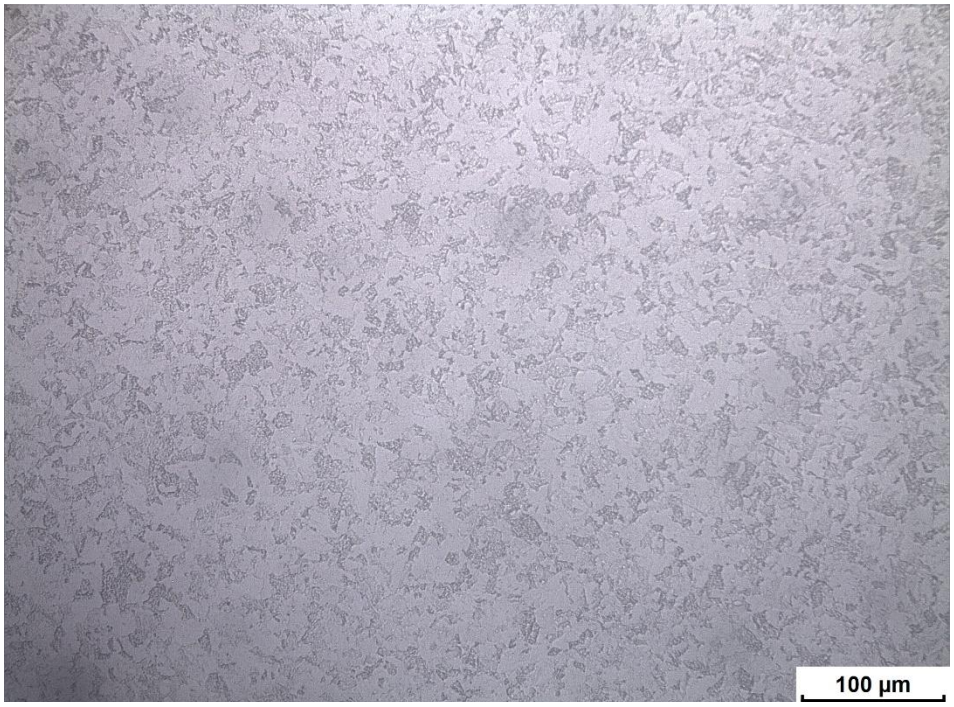
Ο προσδιορισμός της φάσης ή της κατανομής των φάσεων σε ένα υλικό βασίζεται στη διακριτή μορφή τους και επηρεάζει τις ιδιότητές του.

7.2.2.3. Ύπαρξη πόρων και εγκλεισμάτων

Μπορεί ακόμα να προσδιοριστεί η ύπαρξη πόρων και εγκλεισμάτων πολύ μικρότερου μεγέθους από αυτό που επιτρέπουν οι προηγούμενες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου.

Ακόμα, επιφανειακές ασυνέχειες, όπως ρωγμές, αποτυπώνονται στη ρέπλικα, παρότι δεν αποτελεί αποδοτικό τρόπο εντοπισμού τους.

Σημειώνεται πως η ρέπλικα μπορεί να αποδώσει μόνο την μορφολογία της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού και η αποτύπωση ενδέχεται να υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τις καταστροφικές μεθόδους μεταλλογραφικού ελέγχου. [35], [37]



Εικόνα 7.1 Μικροδομή χάλυβα P91 αποτυπωμένη σε ρέπλικα. Αποτελείται από φερρίτη, καρβίδια του χρωμίου και νησίδες περλίτη.

7.3. Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός και Τεχνικές

Καθώς η διενέργεια της μεθόδου ελέγχου απαιτεί την εφαρμογή της στο πεδίο και ενίοτε σε δυσπρόσιτα σημεία, είναι απαραίτητο ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός να χαρακτηρίζεται από φορητότητα. Οι κατηγορίες στις οποίες μπορεί να διακριθεί είναι οι παρακάτω:

7.3.1. Λείανση

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία της επιφανείας, αποτελούνται από περιστρεφόμενο άκρο στο οποίο μπορούν να προσαρμοστούν εξαρτήματα για όλα τα στάδια της λείανσης και στίλβωσης (Εικόνα 7.2)[18].

Η τροφοδοσία της μπορεί να γίνεται από μπαταρία, καθιστώντας τη ακόμα πιο εύχρηστη.

Εικόνα 7.2 Συσκευή λείανσης
Πηγή: Struers TransPol-5, portable, metallographic grinding/polishing machine [struers.com]

7.3.2. Στίλβωση

Για την στίλβωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συσκευή λείανσης στην οποία προσαρμόζονται τα κατάλληλα δισκία (πανάκια) σε συνεργασία με πάστα σωματιδίων διαμαντιού.

Μία εναλλακτική μέθοδος, είναι η ηλεκτρολυτική στίλβωση. Αυτή, αξιοποιεί κάποιο οξύ ως ηλεκτρολύτη και κάθοδο, ενώ ως άνοδος δρα το δοκίμιο. Αποτέλεσμα της ηλεκτρόλυσης είναι η αποτελεσματική μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται η στίλβωση της επιφάνειας. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί και με φορητή συσκευή, όπως αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 7.3[19].

Εικόνα 7.3 Συσκευή ηλεκτρολυτικής στίλβωσης
Πηγή: Struers MoviPol-5, Portable electrolytic polishing and etching apparatus [struers.com]

[18] [38] (Struers, 2024)
[19] [39] (Struers, 2024)

7.3.3. Ρέπλικα

Η ρέπλικα εφαρμόζεται στην εξεταζόμενη επιφάνεια και λαμβάνει την μορφή της μικροδομής του υλικού, δημιουργώντας ένα αντίγραφό της, Οι εξαγώμενες ρέπλικες μπορούν να διακριθούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες, ανάλογα με την μέθοδο που αξιοποιούν για την αποτύπωση της μικροδομής.

7.3.3.1. Ρέπλικες Επιφανείας

Οι ρέπλικες επιφανείας μορφοποιούνται σύμφωνα με την επιφάνεια στην οποία εναποτίθενται, αναπαριστώντας την μικροδομή του υλικού. Διατίθενται στις εξής ξεχωριστές μορφές:

- Οξικού άλατος: διαβρέχονται με ακετόνη πριν την εφαρμογή τους στην εξεταζόμενη επιφάνεια, η οποία εξατμίζεται και βοηθά στην μορφοποίηση της ρέπλικας.
- Ακρυλικές: η ρητίνη σχηματίζεται πάνω στην υπό έλεγχο επιφάνεια και την χρησιμοποιεί ως εκμαγείο για την αποτύπωση της μικροδομής της.
- Καουτσούκ: το υλικό της ρέπλικας εφαρμόζεται στην επιφάνεια σε υγρή μορφή και απομακρύνεται μετά την στερεοποίησή του.

7.3.3.2. Ρέπλικες Απόσπασης

Οι ρέπλικες απόσπασης λειτουργούν συγκρατώντας σωματίδια για μελέτη στο εργαστήριο. Για την παραγωγή τους απαιτείται δεύτερη χημική προσβολή (μετά την τοποθέτηση του φιλμ) για την απόσπαση των σωματιδίων αυτών από το δοκίμιο.

Οι ρέπλικες απόσπασης επιτρέπουν την εστίαση και εξέταση σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Κατά συνέπεια, για την παρατήρησή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Εικόνα 7.4 Ρέπλικα επιφανείας - οξικού άλατος: Struers Transcopy Replica Foil

[35], [36], [40]

7.4. Διαδικασία Ελέγχου στο Εργαστήριο

Για την παραγωγή ρέπλικας με σκοπό την εκπόνηση μη καταστροφικού μεταλλογραφικού ελέγχου μπορούν να αξιοποιηθούν ποικίλα είδη εξοπλισμού. Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, παρέχονται τα παρακάτω:

- Φορητή συσκευή λείανσης και στίλβωσης: Struers Transpol (Εικόνα 7.5)
- Ρέπλικες οξικού άλατος: Struers Transcopy Replica Foil (Εικόνα 7.4)

Για τα δεδομένα μέσα, ακολουθεί η περιγραφή της προβλεπόμενης διαδικασίας εξέτασης ενός δοκιμίου με την υπό μελέτη μέθοδο.

Εικόνα 7.5 Συσκευή Struers Transpol

7.4.1. Λείανση & Στίλβωση

Το πρώτο στάδιο στην προετοιμασία του εξεταζόμενου δοκιμίου αποτελεί η αφαίρεση υλικού με σκοπό την απόδοση μίας λείας επιφάνειας. Αυτό περιλαμβάνει, αρχικά την αφαίρεση της βαφής ή της υπερβολικής τραχύτητας με πιο επεμβατικά μέσα και στη συνέχεια στην προοδευτική λείανση με χαρτιά λείανσης μεγαλύτερου grit. Τα χαρτιά αυτά προσαρμόζονται στο περιστρεφόμενο άκρο του λειαντήρα της συσκευής. Μετά την ολοκλήρωση της λείανσης με ένα χαρτί, δεν θα πρέπει να είναι ορατές χαράξεις στην επιφάνεια.

Μετά την ολοκλήρωση της λείανσης, η επιφάνεια καθαρίζεται από πιθανά υπολείμματα και ακολουθεί η στίλβωσή της. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται ειδικό πανί σε συνδυασμό με κατάλληλη πάστα σωματιδίων διαμαντιού. Η διαδικασία ενδέχεται να απαιτήσει την χρήση διαφορετικών παστών, με σκοπό την απόδοση μίας λείας επιφάνειας που μοιάζει με καθρέπτη.

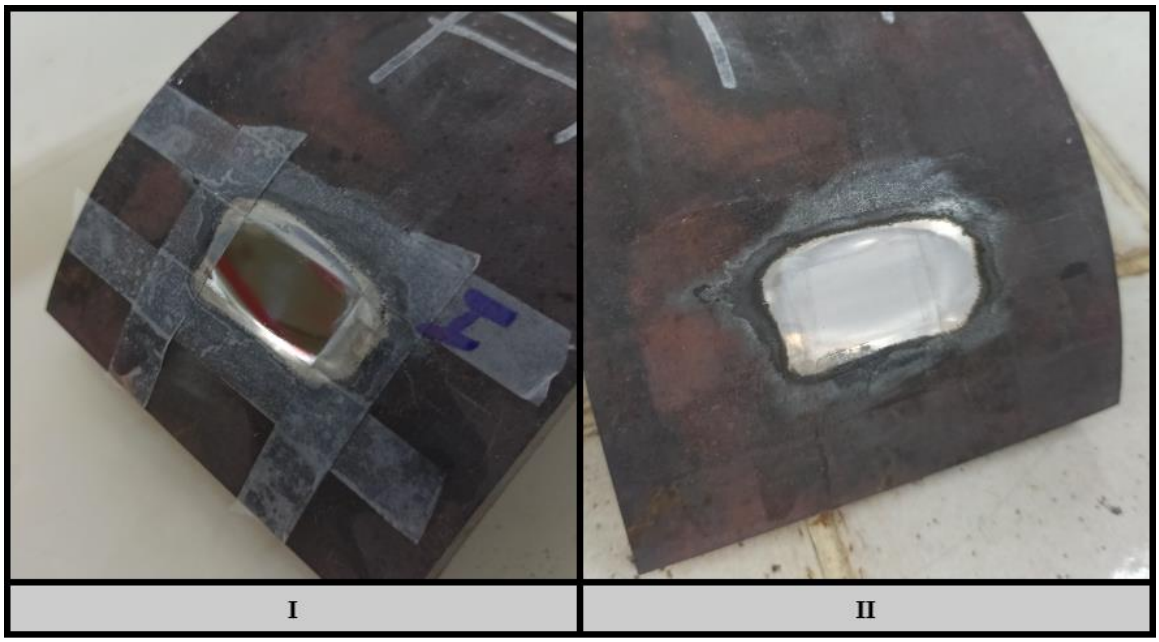
Κατά τη διάρκεια των παραπάνω διεργασιών προσοχή θα πρέπει να δοθεί, ώστε να αποφευχθεί η υπερθέρμανση της επιφάνειας.

7.4.2. Χημική Προσβολή

Προκειμένου η μικροδομή του υλικού να καταστεί παρατηρήσιμη, θα πρέπει να γίνει χημική προσβολή της προετοιμασμένης επιφάνειας (etching). Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται αντιδραστήριο το οποίο δύναται να αποδώσει τα καλύτερα κατά περίπτωση αποτελέσματα. Το ιδανικό διάλυμα για το εκάστοτε υλικό καθώς και ο χρόνος που χρειάζεται να παραμείνει σε αυτό μπορεί να βρεθεί στην διεθνή βιβλιογραφία ή στα αντίστοιχα πρότυπα.

Το αντιδραστήριο εναποτίθεται στην επιφάνεια και αφήνεται να δράσει. Η διάρκεια που πρέπει να παραμείνει σε αυτή διαφέρει κατά περίπτωση. Ωστόσο, σημειώνεται πως για την παραγωγή ρέπλικας ενδείκνυται η παρατεταμένη χημική προσβολή, η οποία προσφέρει καλύτερη αποτύπωση της μεταλλογραφίας του υλικού. Η διάρκεια της χημικής προσβολής θα πρέπει είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με σκοπό την παρατήρηση μικροδομής απευθείας στο μικροσκόπιο.

Μετά τη δράση του, το αντιδραστήριο απομακρύνεται από την επιφάνεια. Στη συνέχεια, αυτή καθαρίζεται με αιθανόλη, η οποία αφήνεται να εξατμιστεί ή στεγνώνεται με θερμοπίστολο. Σε αυτό το στάδιο η μέχρι πρότινος κατοπτρική επιφάνεια θα πρέπει να έχει αποκτήσει μία θαμπή όψη (Εικόνα 7.6).



Εικόνα 7.6 Προετοιμαζόμενη επιφάνεια (I) Μετά τη στίλβωση, (II) Μετά τη χημική προσβολή

7.4.3. Παραγωγή Ρέπλικας

Καθώς είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ιδανική διάρκεια προσβολής του υλικού, κρίνεται σκόπιμο να γίνεται σε στάδια, μεταξύ των οποίων παράγονται ρέπλικες.

Για την παραγωγή ρέπλικας, αρχικά εφαρμόζεται κατάλληλο διάλυμα οξικού άλατος στο φιλμ της ρέπλικας ώστε να μαλακώσει. Στη συνέχεια, προκειμένου να λάβει τη μορφή της μικροδομής του υλικού πιέζεται σε αυτό έως ότου εξατμιστεί το παραπάνω διάλυμα (Εικόνα 7.7). Αυτό οδηγεί στην εκ νέου σκλήρυνση του φιλμ, το οποίο αφαιρείται, έχοντας πλέον αποκτήσει την απεικόνιση της μικροδομής.

Εικόνα 7.7 Ρέπλικα υπό μορφοποίηση, τοποθετημένη σε προετοιμασμένη επιφάνεια

7.4.4. Εξέταση Ρέπλικας στο Μικροσκόπιο

Η ρέπλικα μπορεί να εφαρμοστεί σε κατάλληλη βάση ώστε να παρατηρηθεί στο οπτικό μικροσκόπιο. Σε αυτό μπορούν να εξεταστούν τα στοιχεία που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα (7.2.2).

[35], [36], [40]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Στη ναυπηγική βιομηχανία οι μη καταστροφικές μέθοδοι, που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, τυγχάνουν ευρείας χρήσης. Αξιοποιούνται τόσο κατά το στάδιο της ναυπήγησης όσο και κατά την λειτουργία πλοίων και πλωτών κατασκευών. Οι οδηγίες για την εκπόνηση του ελέγχου δίνονται από τους νηογνώμονες από τους οποίους συλλέχθηκαν και οι πληροφορίες που παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο. Οι οδηγίες αυτές παραπέμπουν σε πρότυπα ποιότητας τα οποία έχουν αναφερθεί προηγουμένως (όπως τα ISO 3834, 5817 κα).

8.1. Εξέταση Συγκολλήσεων Μεταλλικής Κατασκευής

Η βασικότερη ίσως αξιοποίηση του μη καταστροφικού ελέγχου στην ναυπηγική, αφορά τις συγκολλήσεις της γάστρας. Η επιθεώρηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου περιλαμβάνει την εξέταση:

- Γάστρας και δομικών στοιχείων της (ενισχυτικά, φρακτές, καταστρώματα)
- Υπερκατασκευών και υπερστεγασμάτων
- Βάσης κινητήρα

8.1.1. Κατά την Ναυπήγηση ενός Πλοίου

Στην προκειμένη, η εξέταση των συγκολλήσεων λαμβάνει χώρα κατά την ναυπήγηση ενός νέου πλοίου και αναλαμβάνεται από το ναυπηγείο ή κάποια ανάδοχο εταιρεία σε συνεννόηση με τον νηογνώμονα.

Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί μετά το πέρας της διαδικασίας συγκόλλησης και των κατεργασιών της. Ωστόσο, σε περιοχές που κρίνονται επικίνδυνες για εμφάνιση ψυχρής ρηγμάτωσης (delayed cracking), διενεργείται έλεγχος μετά την πάροδο κάποιων ημερών.

Τυπικά, χρησιμοποιούνται όλες οι κύριες μέθοδοι ΜΚΕ (διεισδυτικών υγρών, μαγνητικών σωματιδίων, υπερήχων και ραδιογραφίας) σε συνδυασμό με την οπτική εξέταση. Εξαίρεση αποτελούν οι συγκολλήσεις ελασμάτων μικρού πάχους (μικρότερου των 8 χιλιοστών), στις οποίες δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος με υπερήχους, παρά μόνο με κάποια πιο εξειδικευμένη μορφή της μεθόδου.

8.1.1.1. Περιοχές προς Εξέταση

Η πλήρης έκταση των συγκολλήσεων επιθεωρείται οπτικά. Στην συνέχεια, ο έλεγχος πραγματοποιείται δειγματοληπτικά σε περιοχές που έχουν προσυμφωνηθεί. Ο επιφανειακός έλεγχος αξιοποιεί κατά βάση τις μεθόδους των διεισδυτικών υγρών και των μαγνητικών σωματιδίων. Αντίστοιχα, για τον εντοπισμό ασυνεχειών κάτω από την επιφάνεια, συνήθως επιστρατεύονται οι μέθοδοι των υπερήχων και της ραδιογραφίας.

Πιο εκτεταμένα ελέγχονται συγκολλήσεις που καλούνται να παραλάβουν μεγάλα φορτία ή υποβάλλονται σε κόπωση και, κατά συνέπεια, είναι πιθανότερο να αστοχήσουν. Συγκεκριμένα, αυχενικές ή γωνιακές συγκολλήσεις θα πρέπει να εξεταστούν επιφανειακά με MPI ή LPT (Εικόνα 8.1)[20]. Συγκολλήσεις χυτών και σφυρήλατων (π.χ. στα μέρη του πηδαλίου) θα πρέπει να ελεγχθούν και «ογκομετρικά» με μία εκ των αντίστοιχων μεθόδων, UT και RT. Γενικά, οι υπέρηχοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στον εντοπισμό ασυνεχειών στο επίπεδο (π.χ. ρωγμές), ενώ η ραδιογραφία σε ασυνέχειες στο χώρο (εγκλείσματα, πόροι). Τέλος, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση των σημείων εκκίνησης και διακοπής μιας στρώσης της συγκόλλησης.

Επιπλέον, εξετάζονται περιοχές στις οποίες μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής δεν θα υπάρχει πρόσβαση και δεν θα μπορούν να ελεγχθούν στη διάρκεια ζωής και υπηρεσίας του πλοίου.

Ο έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιείται στην ραφή και το σώμα των συγκολλήσεων, καθώς και σε απόσταση 10 χιλιοστών εκατέρωθεν της ραφής, ώστε να καλύπτει και την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.

[20] [41] (EIWAA, 2024)

Σημειώνεται πως σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται επικουρικά πιο εξειδικευμένες τεχνικές ΜΚΕ, όπως αυτή των δινορευμάτων.

8.1.1.2. Καθορισμός Επιπέδου Ποιότητας

Σύμφωνα με το πρότυπο ποιότητας ISO 5817: 2023 (για το οποίο περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο Κεφάλαιο 1.1.3), το επίπεδο ορίζεται ανάλογα με την θέση και τα φορτία που καλείται να παραλάβει η εκάστοτε συγκόλληση. Για τις πλέον κρίσιμες ορίζεται το επίπεδο ποιότητας "B", ενώ για την πλειονότητα των υπόλοιπων απαιτείται επίπεδο "C". Όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη ενότητα, κριτήρια ανοχής των αποτελεσμάτων της κάθε μεθόδου αντιστοιχίζονται με αυτά του ISO 5817: 2023 με βάση αντίστοιχα πρότυπα.

8.1.1.3. Διαχείριση Σφαλμάτων

Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα του ελέγχου καταδείξουν την ύπαρξη ασυνεχειών εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, η συγκόλληση κρίνεται ελαττωματική. Συνεπώς, θα πρέπει να επιδιορθωθεί ή να αντικατασταθεί εξ ολοκλήρου. Εφόσον είναι εφικτή η επιδιόρθωσή της, η διορθωτική συγκόλληση θα πρέπει να ελεγχθεί καθ' όλο το μήκος της.

Στην περίπτωση που βρεθούν σφάλματα στην ελεγχόμενη περιοχή μιας συγκόλλησης, νέα εξέταση θα πρέπει να διενεργηθεί σε ευρύτερες περιοχές της εν λόγω συγκόλλησης, προκειμένου να διαπιστωθεί, αν οι παράγοντες που οδήγησαν στο εντοπισμένο ελάττωμα έχουν προξενήσει και άλλα προβλήματα.

8.1.2. Έλεγχος Κατά την Διάρκεια Ζωής ενός Πλοίου

Κατά την διάρκεια της ζωής ενός πλοίου διεξάγονται περιοδικοί έλεγχοι του μηχανολογικού του εξοπλισμού αλλά και της μεταλλικής του κατασκευής. Η γενικευμένη επιθεώρηση γίνεται ανά 5 έτη και απαιτεί τον δεξαμενισμό του πλοίου. Η επιθεώρηση της γάστρας απαιτείται ανά 2,5 έτη. Προκειμένου να αποφευχθεί η κοστοβόρα διαδικασία του δεξαμενισμού, συχνά είναι προτιμότερο η εξέταση αυτή να πραγματοποιηθεί υποβρυχίως.

Ο υποβρύχιος έλεγχος γίνεται παραδοσιακά από δύτες, αλλά πλέον και από ρομποτικά, τηλεχειριζόμενα μέσα. Περιλαμβάνει την οπτική επιθεώρηση με μέσα καταγραφής, τον μαγνητικό έλεγχο και την παχυμέτρηση με συσκευή υπερήχων.

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω, χρησιμοποιείται εξειδικευμένος εξοπλισμός. Αυτός περιλαμβάνει μέσα καθαρισμού της γάστρας, μέσα καταγραφής και φωτεινές πηγές για την εξασφάλιση των απαραίτητων συνθηκών για την επιθεώρηση.

Εικόνα 8.1 Μαγνητικός έλεγχος συγκόλλησης γάστρας
Πηγή: Conventional NDT [eiwaagroup.com]

[42], [43], [44], [45], [46]

8.2. Εξέταση Μη Συγκολλητών Μερών

Ο μη καταστροφικός έλεγχος στα πλαίσια της κατασκευής ή συντήρησης ενός πλοίου δεν περιορίζεται στην εξέταση των συγκολλήσεων.

8.2.1. Μηχανολογικά μέρη που χρήζουν επιθεώρησης

Τα σημαντικότερα από τα μηχανολογικά μέρη τα οποία χρήζουν επιφανειακής και ογκομετρικής εξέτασης είναι τα εξής:

- Στροφαλοφόροι άξονες
- Άξονας προπέλας
- Διωστήρες, βάκτρα, έμβολα και άλλα μέρη της κύριας μηχανής και γεννητριών
- Κοχλίες που υποβάλλονται σε δυναμική φόρτιση (αρκεί ο επιφανειακός έλεγχος)

Στις περισσότερες περιπτώσεις εξετάζονται με μία μέθοδο επιφανειακού ελέγχου (LPT ή MPI) και ογκομετρικά με την μέθοδο των υπερήχων.

8.2.2. Παχυμετρήσεις

Κατά την κατασκευή, αλλά κυρίως κατά τη διάρκεια των τακτικών επιθεωρήσεων ενός πλοίου, ελέγχεται το πάχος των ελασμάτων. Καθώς το μέταλλο με το χρόνο διαβρώνεται, χρησιμοποιούνται επεμβατικές εργασίες (όπως η αμμοβολή), οι οποίες αφαιρούν υλικό, με αποτέλεσμα το πάχος του σταδιακά να μειώνεται. Από την κατασκευή του πλοίου, όμως, ορίζεται το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος του κάθε ελάσματος. Η εξέταση του πάχους διενεργείται με την μέθοδο των υπερήχων, η οποία προσφέρει γρήγορα και ακριβή αποτελέσματα (Εικόνα 8.2)[21]. Εφόσον διαπιστωθεί πως κάποιο έλασμα δεν πληροί τις προϋποθέσεις πάχους, χρήζει αντικατάστασης.

Εικόνα 8.2 Παχυμέτρηση ελάσματος με συσκευή υπερήχων
Πηγή: Ultrasonic Thickness Measurement (UTM) [wcl.lt]

[21] [47] (WESTERN CENTRAL LABORATORY, 2024)

8.2.3. Φορητή Μεταλλογραφία

Η φορητή μεταλλογραφία χρησιμοποιείται για την εξέταση μεταλλικών μερών τα οποία έχουν υποστεί κόπωση, ερπυσμό ή άλλη μορφή καταπόνησης, η οποία μεταποιεί τη μικροδομή του υλικού, επηρεάζοντας τις ιδιότητές του.

Η μέθοδος αποδίδει καλά αποτελέσματα σε δοκίμια υπό ερπυσμό. Ο ερπυσμός αποτελεί φαινόμενο κατά το οποίο συνδυάζεται μηχανική και θερμική καταπόνηση. Κατά συνέπεια, η φορητή μεταλλογραφία χρησιμοποιείται ευρέως για την εξέταση μερών όπως λέβητες, σωληνώσεις θερμού ατμού, εναλλάκτες και μέρη της κύριας μηχανής.

8.2.4. Έλεγχος διαρροής

Στην περίπτωση δεξαμενών αλλά και συγκολλητών και χυτών δοκιμίων πολύ μικρού πάχους μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος ελέγχου διαρροής, η οποία πρακτικά αποτελεί έλεγχο με διεισδυτικά υγρά. Η ιδιαιτερότητά της έγκειται στο γεγονός ότι ο εμφανιστής εφαρμόζεται στην άλλη πλευρά του δοκιμίου από αυτήν που εφαρμόστηκε ο διεισδυτής. Με αυτόν τον τρόπο πιθανές ενδείξεις σηματοδοτούν πως ο διεισδυτής κατόρθωσε να διαπεράσει το δοκίμιο κατά το πάχος του.

8.2.5. Εφαρμογές σε πλωτές κατασκευές

Όπως στα πλοία, έτσι και σε άλλες πλωτές κατασκευές, ο μη καταστροφικός έλεγχος χρησιμοποιείται για την διασφάλιση της κατασκευής τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές, αλλά και την εξακρίβωση της καταλληλότητάς τους κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους.

Οι εφαρμογές των μεθόδων είναι αντίστοιχες με τις παραπάνω περιπτώσεις.

[45], [46]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Ανακεφαλαιώνοντας, ο μη καταστροφικός έλεγχος των συγκολλήσεων, αλλά και γενικότερα των υλικών, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο των διεργασιών που εξασφαλίζουν την επιθυμητή ποιότητα ενός προϊόντος.

Επιστρατεύοντας τις διαφορετικές μεθόδους ελέγχου και χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο εξοπλισμό επιτυγχάνεται ο εντοπισμός ασυνεχειών ξεχωριστής μορφής και προσανατολισμού. Χρησιμοποιώντας μάλιστα πολλές διαφορετικές μεθόδους, με εξειδικευμένες δυνατότητες καθίσταται εφικτή η εξέταση του σώματος στην επιφάνειά του αλλά και κάτω από αυτή.

Μέσα από τα πρότυπα ποιότητας, οι ασυνέχειες που βρέθηκαν, μπορούν να χαρακτηριστούν ως προς την επικινδυνότητά τους και να διαχωριστούν σε αποδεκτές ατέλειες και σφάλματα. Τα δοκίμια που περιέχουν σφάλματα απορρίπτονται και θα πρέπει να ακολουθήσει η επισκευή ή αντικατάστασή τους.

Τέλος, όλα τα παραπάνω τυγχάνουν ευρείας χρήσης στη ναυπηγική βιομηχανία, παρουσιάζοντας ιδιαιτερότητες στην εφαρμογή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

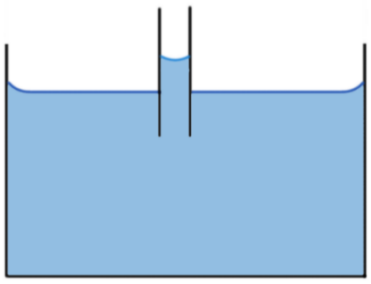
Στην συγκεκριμένη ενότητα παρατίθενται οι οδηγίες εργασίας που συντάχθηκαν για τις μεθόδους ελέγχου και εξειδικεύονται στην εξέταση συγκολλήσεων με τον διαθέσιμο εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ

Α.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής

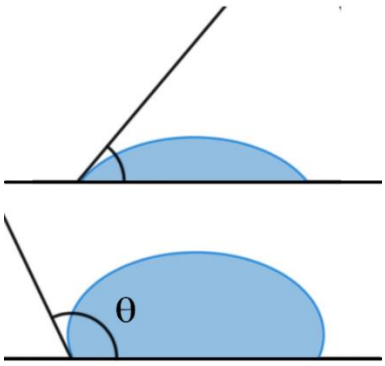
Η εξέταση με την χρήση διεισδυτικών υγρών αποτελεί μία από τις πρώτες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου που αναπτύχθηκαν. Χάρη στο μικρό κόστος, την σχετικά απλή διαδικασία διεξαγωγής και το ευρύ φάσμα εφαρμογών που διαθέτει, τυγχάνει ευρείας χρήσης.

Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στο τριχοειδές φαινόμενο (capillarity), το οποίο εκφράζει την τάση ενός υγρού να καμπυλώνει στα τοιχώματα του δοχείου εξαιτίας των δυνάμεων συνοχής του και των δυνάμεων συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Έχει ως αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης του υγρού σε σωλήνα μικρής διατομής (τριχοειδή) εξαιτίας των προαναφερθέντων δυνάμεων οι οποίες υπερνικούν τις βαρυτικές στο επίπεδο της στάθμης του (Εικόνα 10.1).



Εικόνα 10.1 Ανύψωση ρευστού σε τριχοειδή σωλήνα

Στην περίπτωση που οι δυνάμεις συνοχής (οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του υγρού) υπερτερούν των δυνάμεων συνάφειας (οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του ρευστού και του στερεού) τότε μία σταγόνα του υγρού πάνω στην εν λόγω επιφάνεια «αποφεύγει» την επαφή με αυτή και λαμβάνει σχήμα σφαιριδίου. Σε αντίθετη περίπτωση η σταγόνα θα απλωθεί στην επιφάνεια. Το παραπάνω αποτυπώνεται με την γωνία συνεπαφής, θ (Εικόνα 10.2). Η γωνία επαφής εκφράζει την ικανότητα διαβροχής μίας επιφάνειας από ένα υγρό και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των δύο (π.χ. τραχύτητα).



Εικόνα 10.2 Γωνίες συνεπαφής

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών, εκμεταλλευόμενος την παραπάνω ιδιότητα χρησιμοποιεί δύο μέρη, τον διεισδυτή (penetrant) και τον εμφανιστή (developer).

A. Αρχικά, ο διεισδυτής εφαρμόζεται πάνω στην υπό εξέταση επιφάνεια και κατόπιν της παρόδου κάποιου χρόνου (dwell time) δύναται να διεισδύσει στις ασυνέχειες αυτής. Στις μικρότερες εξ αυτών - οι οποίες αποτελούν και σημεία ενδιαφέροντος της εξέτασης, καθώς δεν είναι οπτικά εμφανείς - η διείσδυση ενισχύεται από το τριχοειδές φαινόμενο.
B. Στη συνέχεια και αφού απομακρυνθεί η περίσσεια ποσότητα διεισδυτή, εφαρμόζεται ο εμφανιστής. Αυτός, δρα ως στυπόχαρτο έλκοντας τον διεισδυτή από τις ασυνέχειες στις οποίες έχει επικαθήσει και καθιστώντας το αποτέλεσμα της διαδικασίας παρατηρήσιμο. Για αυτόν τον σκοπό ο διεισδυτής χρωματίζεται ή έχει φθορίζουσες ιδιότητες.

Όπως είναι προφανές, η μέθοδος δύναται να εντοπίσει μονάχα επιφανειακές ασυνέχειες. Για αυτόν το λόγο είναι απαραίτητο η επιφάνεια που ελέγχεται να είναι καθαρή από έλαια, γράσα και σκωρία και να μην έχει προηγηθεί κάποια διεργασία (όπως βαφή ή αμμοβολή) η οποία επηρεάζοντας την μορφή της επιφάνειας ενδέχεται να καλύψει κάποια ρωγμή ή άλλη ατέλεια.

Η διαδικασία εκπόνησης του ελέγχου, καθώς και λοιπές προδιαγραφές αναφορικά με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό αναγράφονται στο πρότυπο **ISO 3452**.

Α.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας

Η διαδικασία του ελέγχου με διεισδυτικά υγρά περιλαμβάνει τη χρήση επιβλαβών, εύφλεκτων και πτητικών υλικών.

Για αυτό το λόγο θα πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη επαφή τους με το δέρμα και συνίσταται η χρήση γαντιών κατά την εκτέλεση της εργασίας.

Ακόμα, δεν θα πρέπει να υπάρχουν ανοιχτές εστίες ή σπινθήρες στον χώρο εργασίας, ο οποίος είναι σκόπιμο να φωτίζεται επαρκώς με λευκό φως προκειμένου το φαινόμενο να είναι παρατηρήσιμο. Για να αποφευχθεί η εισπνοή του νέφους που δημιουργεί το σπρέι, ο χώρος εργασίας επιβάλλεται να αερίζεται καλά.

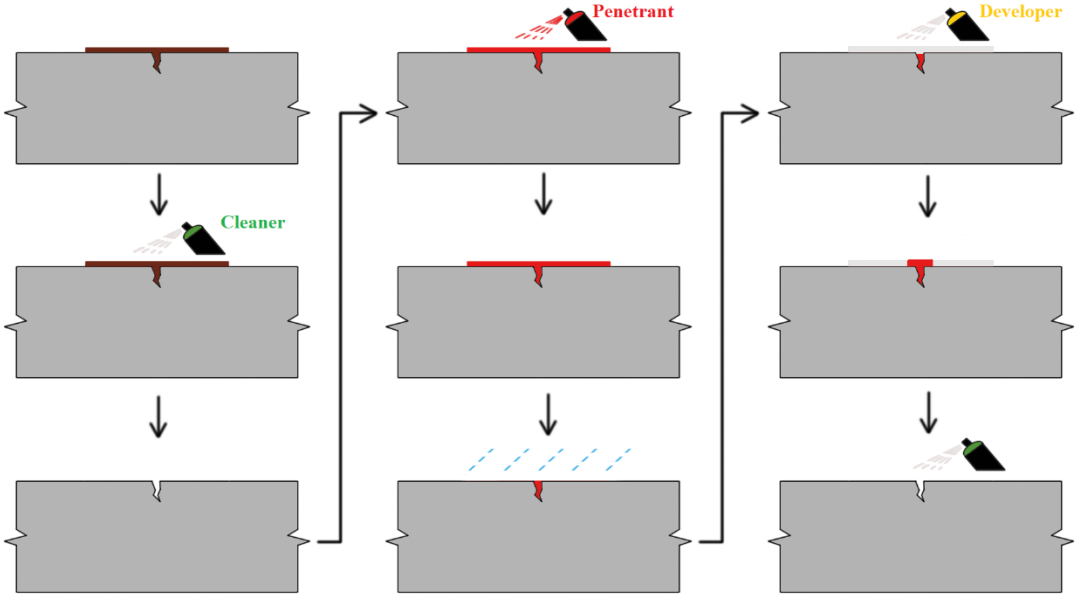
Τα αναλώσιμα διατηρούνται σε ψυχρό (10° – 30° C) και ξηρό περιβάλλον, ενώ το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας τους είναι από 5° έως 50° C. Τέλος, θα πρέπει να υπάρξει μέριμνα για τη συλλογή και απόρριψη των υγρών που χρησιμοποιούνται.

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στην Εικόνα 10.3.

Εικόνα 10.3 Χώρος εργασίας

Α.3. Περιγραφή Διαδικασίας

Συνοπτικά τα στάδια της διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 10.4), ενώ ακολουθούν αναλυτικές οδηγίες εργασίας για καθένα εξ αυτών. Σημειώνεται πως η εξέταση θα πρέπει να περιλαμβάνει την περιοχή της ραφής συγκόλλησης καθώς και την επιφάνεια του μετάλλου βάσης σε απόσταση τουλάχιστον 10 mm εκατέρωθεν αυτής.



Εικόνα 10.4 Στάδια ελέγχου με διεισδυτικά υγρά

Α.3.1. Προκαταρκτική Οπτική Επιθεώρηση

Στο πρώτο σκέλος αναζητούνται ασυνέχειες οι οποίες πιθανώς να είναι παρατηρήσιμες δια γυμνού οφθαλμού. Στο έργο αυτό μπορούν να βοηθήσουν ενδείξεις οι οποίες οφείλονται λ.χ. σε υπολείμματα λαδιού που έχουν διεισδύσει σε κάποια ρωγμή. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό η οπτική επιθεώρηση να προηγηθεί του καθαρισμού του δοκιμίου, κατόπιν του οποίου ορισμένες ενδείξεις ενδέχεται να απομακρυνθούν.

Ελέγξτε αν υπάρχουν τέτοιες ενδείξεις στο δοκίμιο, και καταγράψτε τα ευρήματά σας. Στη συνέχεια της εργασίας σας μπορείτε να εξακριβώσετε την εγκυρότητά τους.

Α.3.2. Καθαρισμός Επιφάνειας Δοκιμίου

Ακολουθεί ο καθαρισμός του δοκιμίου προκειμένου να απομακρυνθούν έλαια, γράσα, σκωρία και άλλα στοιχεία τα οποία ρυπαίνουν την επιφάνειά του. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιείται το Cleaner MAGNAFLUX SKC-S αφού πρώτα ανακινηθεί. Ψεκάστε το Cleaner στο δοκίμιο με έμφαση στις περιοχές όπου συγκεντρώνονται ξένες ουσίες. Εξασφαλίστε πως η επιφάνεια έχει στεγνώσει προτού προχωρήσετε, είτε σκουπίζοντας με κάποιο πανί/ χειροπετσέτα, είτε αναμένοντας την εξάτμιση του υγρού.

Εναλλακτικά, το Cleaner μπορεί να ψεκαστεί σε καθαρό πανί, με το οποίο στη συνέχεια θα γίνει ο καθαρισμός του δοκιμίου, ή να χρησιμοποιηθεί ακετόνη.

Α.3.3. Οπτική Επιθεώρηση

Έχοντας καθαρίσει την επιφάνεια του υπό έλεγχο δοκιμίου επαναλάβετε τον οπτικό έλεγχο ώστε να παρατηρηθούν ασυνέχειες οι οποίες πιθανώς δεν ήταν ορατές πριν τον καθαρισμό του. Εφόσον εντοπιστούν τέτοιες, καταγράψτε τα ευρήματά σας.

Α.3.4. Εφαρμογή Διεισδυτή

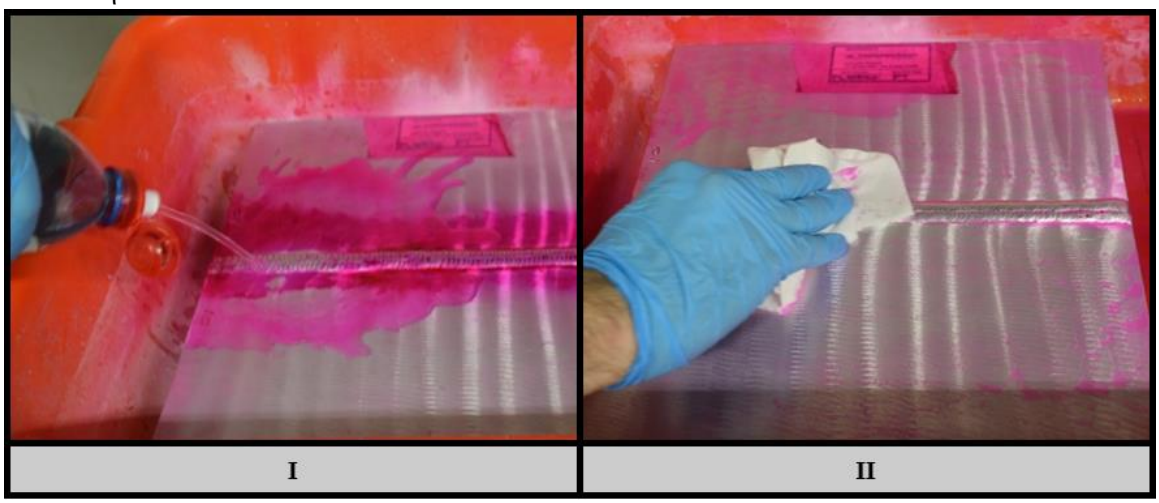
Στην καθαρισμένη και στεγνή επιφάνεια ελέγχου εφαρμόστε ένα φιλμ διεισδυτή TIEDE-PEN PWL-2 αφού πρώτα ανακινήσετε καλά το δοχείο. Ακολούθως, αναμείνετε την ολοκλήρωση της διείσδυσης στις ασυνέχειες της επιφάνειας του δοκιμίου (dwell time 5-30 min). 10-15 λεπτά αναμονής κρίνονται επαρκή ώστε να επιτευχθεί διείσδυση και στις πιο στενές ρωγμές (Εικόνα 10.5).

Εικόνα 10.5 (I) Διεισδυτής TIEDE-PEN, (II) Περιοχή εφαρμογής

Α.3.5. Απομάκρυνση Πλεονάσματος Διεισδυτή

Μετά το πέρας του χρόνου αναμονής της διείσδυσης απομακρύνετε το πλεόνασμα του διεισδυτή από την επιφάνεια του δοκιμίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείστε νερό (όχι υπό πίεση) καθώς ο χρησιμοποιούμενος διεισδυτής είναι "water-washable" (Εικόνα 10.6 – Ι). Ακολούθως στεγνώστε καλά το δοκίμιο (Εικόνα 10.6 – ΙΙ), δίνοντας έμφαση σε περιοχές στις οποίες ενδέχεται να παραμένει υγρασία (π.χ. πόδας ραφής συγκόλλησης).

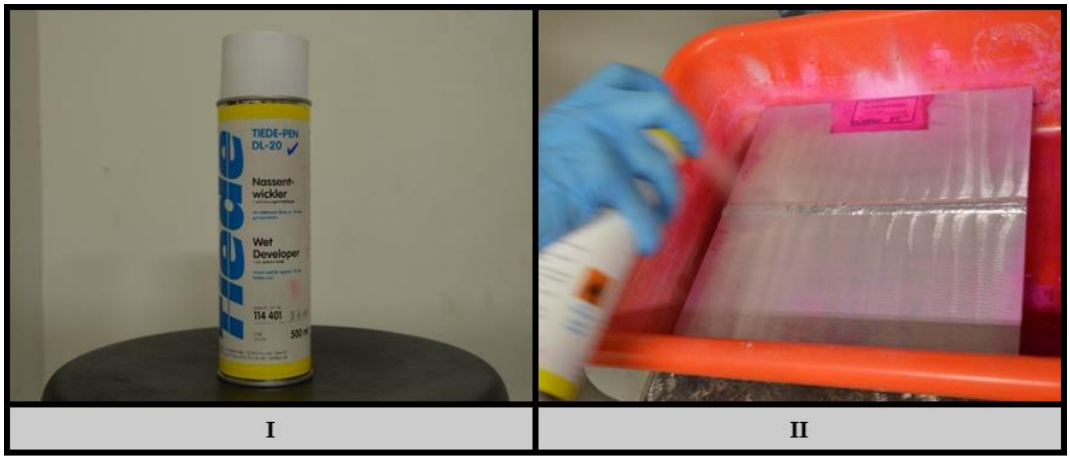
Εναλλακτικά η εν λόγω εργασία μπορεί να περατωθεί σκουπίζοντας την επιφάνεια με ένα καθαρό πανί στο οποίο έχει πρώτα τοποθετηθεί ποσότητα Cleaner. Σε αυτήν την περίπτωση σκουπίστε προς μία μόνο κατεύθυνση και επαναλάβετε έως ότου αφαιρεθεί όλη η περίσσεια ποσότητα διεισδυτή.



Εικόνα 10.6 (Ι) Απόπλυση πλεονάσματος διεισδυτή, (ΙΙ) Στέγνωμα επιφάνειας

Α.3.6. Εφαρμογή Εμφανιστή

Στο στεγνό δοκίμιο εφαρμόστε φιλμ εμφανιστή TIEDE-PEN DL-20 στην περιοχή όπου προηγουμένως ψεκάστηκε ο διεισδυτής. Είναι σημαντικό το δοχείο του εμφανιστή να έχει ανακινηθεί καλά πριν τη χρήση. Ακολούθως αναμείνετε εκ νέου για 5-30 λεπτά ώστε η εναπομείνασα ποσότητα διεισδυτή να αναδυθεί από τις ασυνέχειες στην επιφάνεια (Εικόνα 10.7). Πέντε λεπτά θεωρούνται επαρκής χρόνος ώστε να εμφανιστούν όλες οι ενδείξεις.



Εικόνα 10.7 (Ι) Εμφανιστής TIEDE-PEN, (ΙΙ) Εφαρμογή εμφανιστή

Α.3.7. Παρατήρηση και Καταγραφή

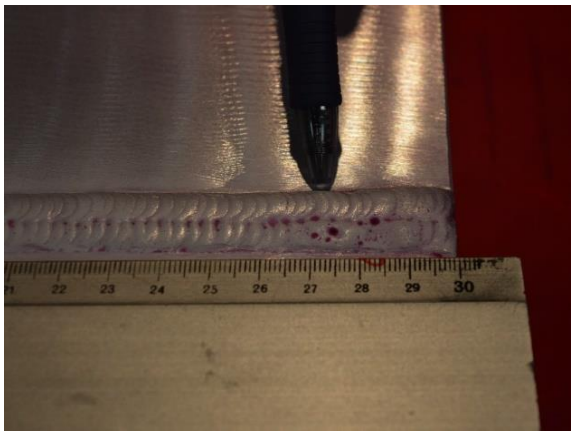
Εν συνεχεία, αναζητήστε πιθανές ενδείξεις, προχωρώντας στην καταγραφή τους. Για την τελευταία απαιτείται η σημείωση της θέσης και της έκτασής τους, ενώ χρήσιμη είναι και η φωτογράφισή τους (Εικόνα 10.8).

Ακολούθως, μπορεί να γίνει και η διάκριση των ανωτέρω ενδείξεων σε σχετικές, μη σχετικές και εσφαλμένες όπως και η καταγραφή των σχετικών προκειμένου στη συνέχεια να προσδιοριστεί το είδος τους.

Μη σχετικές, καλούνται οι ενδείξεις οι οποίες προέρχονται από την παρουσία διεισδυτή σε σημεία των οποίων η ύπαρξη οφείλεται στην παραγωγή ή συναρμολόγηση ενός μηχανολογικού μέρους. Τέτοια μπορεί να είναι η έντονη τραχύτητα που συχνά παρατηρείται σε χυτά, ή στοιχεία της συναρμογής ενός μέρους (όπως σημεία σύνδεσης με κοχλίες ή γυρωτικούς ήλους).

Απεναντίας, εσφαλμένες είναι οι ενδείξεις οι οποίες προέρχονται από κάποια απροσεξία του ελεγκτή κατά την εκπόνηση της εξέτασης. Η συνηθέστερη αβλεψία που οδηγεί σε εσφαλμένες ενδείξεις είναι το ανεπαρκές στέγνωμα της επιφάνειας πριν την εφαρμογή του εμφανιστή και τυπικά προκύπτει σε σημεία αλλαγής γεωμετρίας (π.χ. πόδας συγκόλλησης) στα οποία παραμένει υγρασία.

Σχετικές, ονομάζονται οι ενδείξεις οι οποίες οφείλονται σε ασυνέχειες της επιφάνειας του υλικού του εξεταζόμενου μέρους, κατηγορία στην οποία πρακτικά ανήκουν οι ενδείξεις που αποκλείονται από τις δύο προηγούμενες.



Εικόνα 10.8 Εντοπισμός ενδείξεων επιφανειακού πορώδους

Α.3.8. Καθαρισμός Δοκιμίου

Τέλος, προχωρήστε εκ νέου σε καθαρισμό του δοκιμίου, αρχικά με νερό και εν συνεχεία με το Cleaner SKC-S στα σημεία που απαιτείται, προκειμένου να αφαιρεθεί εναπομείνασα ποσότητα διεισδυτή από τις ασυνέχειες στις οποίες έχει πιθανώς επικαθήσει (Εικόνα 10.9).

Εικόνα 10.9 (I) Καθαριστικό, (II) Εφαρμογή στα σημεία παραμονής διεισδυτή

Α.4. Αξιολόγηση και Καταγραφή Αποτελεσμάτων

Α.4.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών

Αφότου εντοπιστούν οι ατέλειες με την μέθοδο του μη καταστροφικού ελέγχου, θα πρέπει να ταξινομηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια να καθοριστεί αν πρόκειται για σφάλματα (μη αποδεκτές ασυνέχειες) με βάση το αντίστοιχο κριτήριο αποδοχής για το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας.

Α.4.1.1. Αξιολόγηση Ενδείξεων

Στην περίπτωση των σχετικών ενδείξεων, οι οποίες οφείλονται σε ασυνέχειες του υλικού, θα πρέπει να ακολουθήσει η αξιολόγησή τους με βάση τα χαρακτηριστικά τους, ώστε να προσδιοριστεί η φύση της ασυνέχειας. Υπάγονται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- **Συνεχείς Γραμμικές**: Προξενούνται από γραμμικές ασυνέχειες της επιφάνειας του υλικού, όπως ρωγμές, ατελή τήξη ή διείσδυση και γρατζουνιές.
- **Διακεκομμένες Γραμμικές**: Οφείλονται στις ίδιες ατέλειες με τις συνεχείς γραμμικές. Ωστόσο εμφανίζονται διακεκομμένα όταν έχει καλυφθεί μέρος της ασυνέχειας, είτε εξαιτίας κάποιας μηχανουργικής κατεργασίας της επιφάνειας, είτε λόγω ανεπαρκούς καθαρισμού του δοκιμίου.
- **Στρογγυλές**: Είναι το αποτέλεσμα επιφανειακού πορώδους.
- **Μικρές Κουκκίδες**: Προέρχονται από οπές μικρής διαμέτρου και σχετικά μεγάλου βάθους (pinholes).
- **Αχνές**: Η προέλευσή τους είναι ασαφής. Ενδέχεται να προέρχονται από ανεπαρκή καθαρισμό του δοκιμίου ή από υπερβολικό πάχος στρώματος εμφανιστή. Συνιστάται ο επιμελής καθαρισμός και επανεξέταση του σημείου.

Α.4.1.2. Ταξινόμηση Ατελειών

Ο διαχωρισμός των ατελειών συγκολλήσεων σε ξεχωριστές κατηγορίες γίνεται με βάση το **ISO 6520-1: 2007**. Το τελευταίο, καθορίζει τις κατηγορίες ατελειών (συνοδευόμενες από έναν τριψήφιο ή τετραψήφιο κωδικό), καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που υπάγονται σε αυτές.

Γενικότερα, οι ασυνέχειες κατηγοριοποιούνται στις κάτωθι ομάδες, λαμβάνοντας στη συνέχεια περαιτέρω προσδιορισμό με βάση τα χαρακτηριστικά τους:

- **Ρωγμές (Cracks) - Σειρά 100**: Τοπικό σχίσιμο στο σώμα ή την επιφάνεια του υλικού.
- **Σπηλαιώσεις (Cavities) - Σειρά 200**: Πόροι και φυσαλίδες αερίων.
- **Στερεά Εγκλείσματα (Solid Inclusions) - Σειρά 300**: Στερεές ξένες ουσίες, παγιδευμένες στο μέταλλο συγκόλλησης.
- **Ατελής Τήξη και Διείσδυση (Lack of Fusion and Penetration) - Σειρά 400**: Η ατελής τήξη αφορά στην αδυναμία πλήρους τήξης του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό ή μεταξύ των πάσων. Αντιθέτως, η ατελής διείσδυση αποτελεί ένδειξη αδυναμίας του μετάλλου συγκόλλησης να φτάσει στο απαιτούμενο βάθος.
- **Ατελές Σχήμα (Imperfect Shape) - Σειρά 500**: Αφορά ατέλειες στο σχήμα της εξωτερικής επιφάνειας της συγκόλλησης ως προς την γεωμετρία του συνδέσμου, όπως υποκοπή.
- **Λοιπές Ασυνέχειες (Miscellaneous) - Σειρά 600**

Α.4.1.3. Επίπεδο Ποιότητας και Κριτήρια Αποδοχής

Το Επίπεδο Ποιότητας στο οποίο υπάγεται μια συγκολλητή κατασκευή χαρακτηρίζει την ικανότητά της να παραλαμβάνει συγκεκριμένα φορτία χωρίς να αστοχεί. Ανάλογα με το μέγεθος των φορτίων αυτών προκύπτουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας.

Το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας ενός εξαρτήματος προκύπτει από την προοριζόμενη χρήση του και τις καταπονήσεις που αναμένεται να δεχτεί.

Τα κριτήρια αποδοχής μίας συγκολλητής συναρμογής στο εκάστοτε επίπεδο ποιότητας προσδιορίζονται από το **ISO 5817: 2023** (ή από το ISO 10042 για συγκολλήσεις αλουμινίου και των κραμάτων του), λαμβάνοντας υπόψιν τις ασυνέχειες που έχουν εντοπιστεί κατά τον έλεγχο της συγκόλλησης.

Με βάση τις προδιαγραφές του αποζητούμενου επιπέδου ποιότητας ο ελεγκτής καλείται να διαπιστώσει αν οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν είναι εντός ανεκτών πλαισίων ή αν αποτελούν σφάλματα, περίπτωση στην οποία το δοκίμιο απορρίπτεται.

Συγκεκριμένα για την μέθοδο των διεισδυτικών υγρών, προβλέπονται κριτήρια ανοχής με βάση το πρότυπο **ISO 23277: 2015**. Καθώς οι ενδείξεις της μεθόδου βασίζονται στην ποσότητα παγιδευμένου διεισδυτή σε ασυνέχειες, ο οποίος διαρρέει από αυτές, δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν με ακρίβεια οι διαστάσεις της ατέλειας, και ειδικά το βάθος της. Για αυτό το λόγο γίνεται μέτρηση της μεγαλύτερης διάστασης της ένδειξης, η οποία και αντιστοιχίζεται σε νέα, ειδικά επίπεδα αποδοχής (Acceptance Levels 1/ 2/ 2X/ 3/ 3X).

Αξίζει να σημειωθεί πως διαδοχικές ασυνέχειες οι οποίες χωρίζονται από απόσταση το πολύ ίσης με τη μέγιστη διάσταση της μικρότερης ασυνέχειας λογίζονται ως μία, ενιαία ασυνέχεια.

- Η αντιστοίχιση των επιπέδων ποιότητας μεταξύ των δύο προτύπων (ISO 5817 και ISO 23277) ορίζεται στο πρότυπο **ISO 17635: 2016**.

Α.4.2. Σύνταξη Αναφοράς

Η εκπόνηση του ελέγχου θα πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αναφορά η οποία θα περιγράφει τα ευρήματα (Εικόνα 10.10), περιλαμβάνοντας:

- Πληροφορίες για το ελεγχόμενο δοκίμιο (διαστάσεις, υλικό, κατάσταση επιφανείας)
- Σκοπός ελέγχου και χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός (στοιχεία κατασκευαστή και προϊόντων)
- Περιγραφή εντοπιζόμενων ασυνεχειών και χαρακτηρισμός τους (όπως φαίνεται παρακάτω)
- Αποτελέσματα ελέγχου και αποδοχή ή απόρριψη (στην περίπτωση που εντοπιστούν σφάλματα) του εξεταζόμενου δοκιμίου

Οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν θα πρέπει να δίνονται συνοδευόμενες από σκαρίφημα και να αναγράφεται το είδος τους, το σημείο στο οποίο εντοπίζονται, καθώς και το μέγεθός τους. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω:

Αύξων Αριθμός	Τύπος Ασυνέχειας	Μήκος Ασυνέχειας	Απόσταση από το Σημείο Αναφοράς	Τυχόν Παρατηρήσεις
1	Ρωγμή στον Πόδα	15	100	

2	Επιφανειακό Πορώδες	80	200	

LIQUID PENETRANT TESTING REPORT

Inspector		Date		Report No	
		Location		Page No	
Scope of Testing					
Client		Material		Surface Condition	
Project No		Thickness		Surface Temp.	
Item No					
Acceptance Level					
PT Technique					
Penetrant					
Manufacturer		Fluorescent		Solvent Removable	
Label		Visible		Post Emulsified	
		Dual Purpose		Water Washable	
Developer					
Manufacturer		Aqueous		Soluble	
Label		Dry		Solvent	
Liquid Film					
Cleaner		**Joint Sketch**			
Manufacturer					
Label					
Procedure Discription					
Pre-Cleaning Method(s)					
Emulsifying Time					
Dwell Time					
Developing Time					

Findings					
Item No	Discontinuity	Length	Distance from point of reference	Evaluation	Remarks

Εικόνα 10.10 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς

[4], [5], [22], [48], [49]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

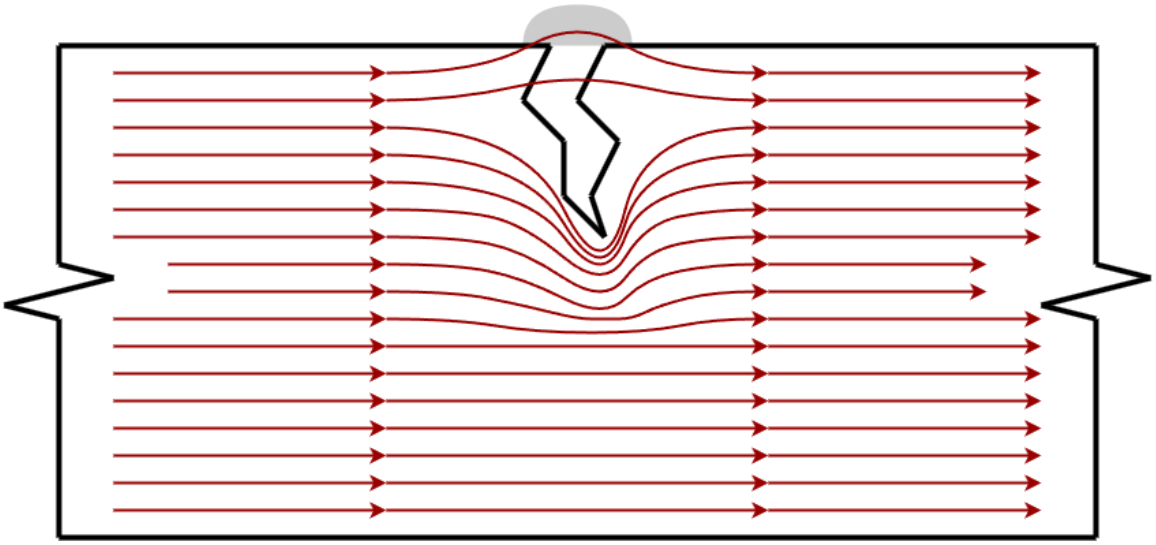
Β.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής

Η μέθοδος του μη καταστροφικού ελέγχου με τη χρήση μαγνητικών σωματιδίων αποτελεί μια αξιόπιστη και ευρέως διαδεδομένη μέθοδο εντοπισμού επιφανειακών και υποεπιφανειακών ατελειών σε σιδηρομαγνητικά υλικά. Η δυνατότητα εντοπισμού υποεπιφανειακών ασυνεχειών (σε πολύ μικρό βάθος) πρακτικά επιτρέπει την εφαρμογή της μεθόδου σε βαμμένη επιφάνεια. Κατά κύριο λόγο μπορεί να εντοπίσει ρωγμές ή άλλες γραμμικές ασυνέχειες (π.χ. ατελή διείσδυση).

Συνοπτικά, κατά τη διενέργεια της μεθόδου, η επιφάνεια του εξεταζόμενου δοκιμίου καλύπτεται από διάλυμα μαγνητικής μελάνης (εμπλουτισμένο με μαγνητικά σωματίδια). Κατά την εφαρμογή οριζόντιου μαγνητικού πεδίου στο δοκίμιο, μέσω ενός φορητού ηλεκτρομαγνήτη (yoke), τα μαγνητικά σωματίδια συγκεντρώνονται στις ασυνέχειες που διαπερνώνται κάθετα (45° – 90°) από το πεδίο. Το μαύρο χρώμα τους σε συνδυασμό με το λευκό χρώμα του υποστρώματος καθιστά εφικτή την παρατήρηση του φαινομένου και αποδίδει πληροφορίες για τη γεωμετρία και τη θέση τυχόν ασυνεχειών.

Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στο φαινόμενο της διαρροής μαγνητικού πεδίου. Σύμφωνα με το παραπάνω, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές που ορίζουν το εφαρμοσμένο μαγνητικό πεδίο σε ένα σώμα, έχουν την τάση να διαφεύγουν από αυτό και να διέρχονται μέσα από τον αέρα όταν συναντήσουν κάποια απότομη μεταβολή της γεωμετρίας (όπως κάποια επιφανειακή ασυνέχεια). Τα μαγνητικά σωματίδια συγκεντρώνονται και συγκρατώνται στις περιοχές που παρουσιάζεται διαρροή του μαγνητικού πεδίου (Εικόνα 10.11).

Η διαδικασία εκπόνησης του ελέγχου, καθώς και λοιπές προδιαγραφές αναφορικά με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό αναγράφονται στο πρότυπο **ISO 9934**.



Εικόνα 10.11 Διαρρέον μαγνητικό πεδίο σε ρωγμή

Β.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας

Η διαδικασία του ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια περιλαμβάνει τη χρήση επιβλαβών, εύφλεκτων και πτητικών υλικών.

Για αυτό το λόγο θα πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη επαφή τους με το δέρμα και συνίσταται η χρήση γαντιών κατά την εκτέλεση της εργασίας.

Ακόμα, δεν θα πρέπει να υπάρχουν ανοιχτές εστίες ή σπινθήρες στον χώρο εργασίας, ο οποίος είναι σκόπιμο να φωτίζεται επαρκώς με λευκό φως προκειμένου να καταστεί δυνατή η παρατήρηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Για να αποφευχθεί η εισπνοή του νέφους που δημιουργεί το σπρέι, επιβάλλεται ο καλός αερισμός του χώρου (Εικόνα 10.12).

Πλησίον του υπό εξέταση δοκιμίου, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αντικείμενα ευαίσθητα σε τέτοια πεδία θα πρέπει να έχουν απομακρυνθεί από το χώρο εργασίας.

Εικόνα 10.12 Χώρος Εργασίας

Τα αναλώσιμα, διατηρούνται σε ψυχρό και ξηρό περιβάλλον, ενώ θα πρέπει να υπάρξει μέριμνα για τη συλλογή και απόρριψη τους μετά το πέρας της εργασίας.

Β.3. Περιγραφή Διαδικασίας

Ακολουθούν οι οδηγίες εργασίας για την διενέργεια μη-καταστροφικού ελέγχου με την μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων.

Β.3.1. Προκαταρκτική Οπτική Επιθεώρηση

Στο πρώτο σκέλος αναζητούνται ασυνέχειες οι οποίες πιθανώς να είναι παρατηρήσιμες δια γυμνού οφθαλμού. Στο έργο αυτό μπορούν να βοηθήσουν ενδείξεις οι οποίες οφείλονται λ.χ. σε υπολείμματα λαδιού που έχουν διεισδύσει σε κάποια ρωγμή. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό η οπτική επιθεώρηση να προηγηθεί του καθαρισμού του δοκιμίου, κατόπιν του οποίου ορισμένες ενδείξεις ενδέχεται να απομακρυνθούν.

Ελέγξτε αν υπάρχουν τέτοιες ενδείξεις στο δοκίμιο, και καταγράψτε τα ευρήματά σας. Στη συνέχεια της εργασίας σας μπορείτε να εξακριβώσετε την εγκυρότητά τους.

Β.3.2. Καθαρισμός Επιφανείας Δοκιμίου

Ακολουθεί καθαρισμός του δοκιμίου προκειμένου να απομακρυνθούν έλαια, γράσα, σκωρία και άλλα στοιχεία τα οποία ρυπαίνουν την επιφάνειά του. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιείται το Cleaner MAGNAFLUX SKC-S αφού πρώτα ανακινηθεί. Ψεκάστε το Cleaner στο δοκίμιο με έμφαση στις περιοχές όπου συγκεντρώνονται ξένες ουσίες. Εξασφαλίστε πως η επιφάνεια έχει στεγνώσει προτού προχωρήσετε, είτε σκουπίζοντας με κάποιο πανί/ χειροπετσέτα, είτε αναμένοντας την εξάτμιση του υγρού.

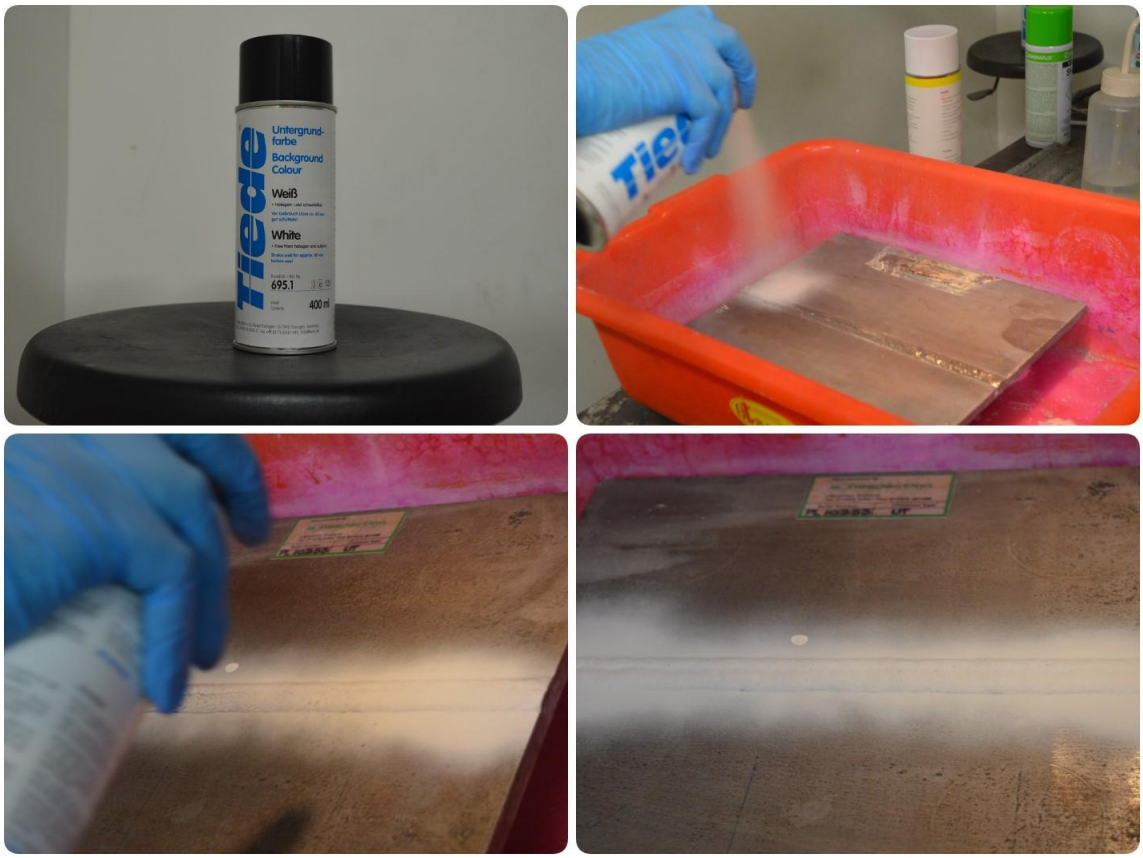
Εναλλακτικά, το Cleaner μπορεί να ψεκαστεί σε καθαρό πανί, με το οποίο στη συνέχεια θα γίνει ο καθαρισμός του δοκιμίου, ή να χρησιμοποιηθεί ακετόνη.

B.3.3. Οπτική Επιθεώρηση

Έχοντας καθαρίσει την επιφάνεια του υπό έλεγχο δοκιμίου επαναλάβετε τον οπτικό έλεγχο, ώστε να παρατηρηθούν ασυνέχειες, οι οποίες πιθανώς δεν ήταν ορατές πριν τον καθαρισμό του. Εφόσον εντοπιστούν τέτοιες, καταγράψτε τα ευρήματά σας.

B.3.4. Εφαρμογή Υποστρώματος

Εφαρμόστε το λευκό background paint (TIEDE 695.1) στην στεγνή πλέον περιοχή που θα γίνει ο έλεγχος, προκειμένου να είναι εύκολα ορατή η μαύρη μαγνητική μελάνη στην συνέχεια. Ψεκάστε μία λεπτή στρώση βαφής από απόσταση 15-20 cm στην περιοχή ελέγχου αφού πρώτα ανακινήσετε το δοχείο (Εικόνα 10.13). Αναμείνετε (περίπου ένα λεπτό) για να στεγνώσει και συνεχίστε με τον μαγνητικό έλεγχο.



Εικόνα 10.13 Εφαρμογή βαφής υποστρώματος

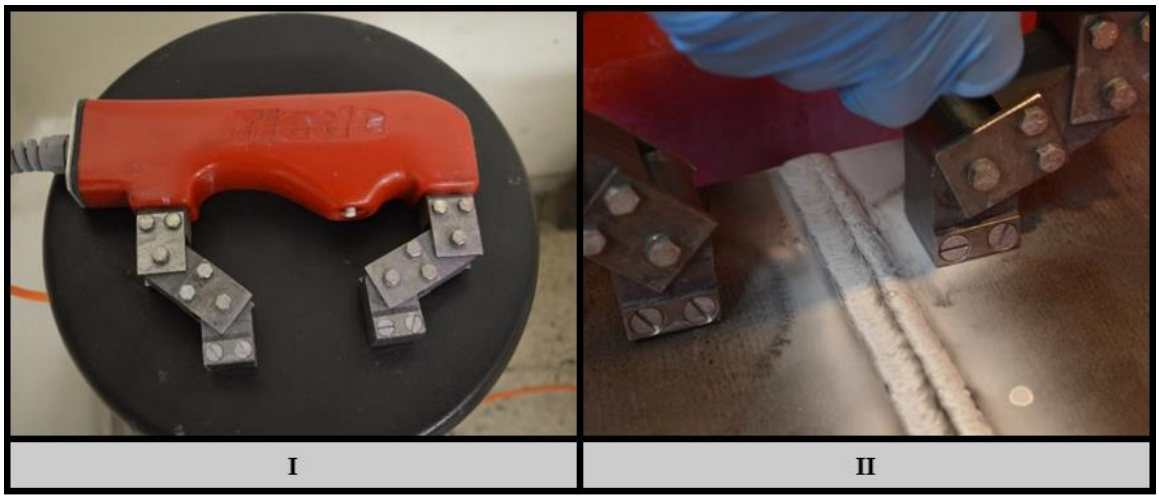
B.3.5. Εφαρμογή Μαγνητικής Μελάνης

Ψεκάστε τη μαγνητική μελάνη (TIEDE 690.2) στην περιοχή ελέγχου αφού πρώτα ανακινήσετε καλά το δοχείο. Εφαρμόστε λεπτή στρώση από απόσταση 15-20 cm.

B.3.6. Εφαρμογή Μαγνητίζουσας Δύναμης

Κατόπιν εφαρμόστε μαγνητίζουσα δύναμη μέσω του ηλεκτρομαγνήτη (Yoke) πατώντας το κουμπί που διαθέτει ο τελευταίος (Εικόνα 10.14).

Φυσήξτε ελαφρώς προκειμένου να συγκεντρωθούν τα μαγνητικά σωματίδια της μελάνης στις ασυνέχειες.



Εικόνα 10.14 (I) AC Yoke, (II) Εξέταση της συγκόλλησης

Β.3.7. Παρατήρηση και Καταγραφή

Ακολούθως, προβείτε στην παρατήρηση των ενδείξεων και στην καταγραφή τους. Για την τελευταία απαιτείται η σημείωση της θέσης και της έκτασής τους, ενώ χρήσιμη είναι και η φωτογράφησή τους (Εικόνα 10.15).

Στη συνέχεια, μπορεί να γίνει η διάκριση των ανωτέρω ενδείξεων σε σχετικές, μη σχετικές και εσφαλμένες όπως και η καταγραφή και προσδιορισμός του είδους στην περίπτωση των σχετικών.

Μη σχετικές, καλούνται οι ενδείξεις οι οποίες προέρχονται από την παρουσία μελάνης σε σημεία στα οποία δεν παρουσιάζεται κάποια ασυνέχεια του υλικού. Αυτό ενδέχεται να είναι αποτέλεσμα απότομης αλλαγής της γεωμετρίας (λ.χ. κάποια γωνία χωρίς fillet). Οι περιοχές αυτές, συχνά αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων, τα οποία είναι συνάμα επιρρεπή σε αστοχίες και για αυτό πρέπει να εξετάζονται επιμελώς. Ακόμα, τέτοιες ενδείξεις μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, τα οποία συχνά παρατηρούνται σε σημεία θερμικής καταπόνησης του. Οι μη σχετικές ενδείξεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το σημείο εμφάνισής τους και τη μορφή τους, καθώς εμφανίζονται ασθενέστερες και φαρδύτερες των σχετικών.

Απεναντίας, εσφαλμένες είναι οι ενδείξεις οι οποίες προέρχονται από λανθασμένες πρακτικές κατά την εκπόνηση του ελέγχου και δεν σχετίζονται με το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο. Συνήθως παρατηρούνται στα σημεία επαφής του εξεταζόμενου δοκιμίου με κάποιο μαγνητικά φορτισμένο σώμα (όπως το ίδιο το μαγνητίζον μέσο, δηλαδή στην δεδομένη περίπτωση στους βραχίονες του yoke) , ενώ συχνά οφείλονται σε ανεπαρκή καθαρισμό της επιφανείας.

Εικόνα 10.15 Ένδειξη ρωγμής στον πόδα της συγκόλλησης

Σχετικές, ονομάζονται οι ενδείξεις οι οποίες οφείλονται σε ασυνέχειες της επιφάνειας του υλικού του εξεταζόμενου μέρους, κατηγορία στην

οποία πρακτικά ανήκουν οι ενδείξεις που αποκλείονται από τις δύο προηγούμενες. Διακρίνονται από τη λεπτή και έντονη μορφή τους.

Β.3.8. Πλήρης Εξέταση Επιφάνειας και Διευθύνσεων

Το 6ο βήμα θα πρέπει να επαναληφθεί προκειμένου αφενός να καλυφθεί η περιοχή ελέγχου στο σύνολο της και αφετέρου να εφαρμοστεί μαγνητικό πεδίο σε διαφορετικές διευθύνσεις έτσι ώστε να μπορέσουν να εμφανιστούν ενδείξεις για ρωγμές με διαφορετικές διευθύνσεις. Για το σκοπό αυτό το yoke θα τοποθετείται και δεύτερη φορά στην εκάστοτε περιοχή, με την διεύθυνση του άξονα των πόλων να είναι κάθετη στην προηγούμενη!

Ο έλεγχος ενός συγκολλητού δοκιμίου θα πρέπει να διενεργείται τόσο στην ραφή συγκόλλησης, όσο και 10 mm εκατέρωθεν αυτής. Η εξέταση μπορεί να περατωθεί με δύο τρόπους.

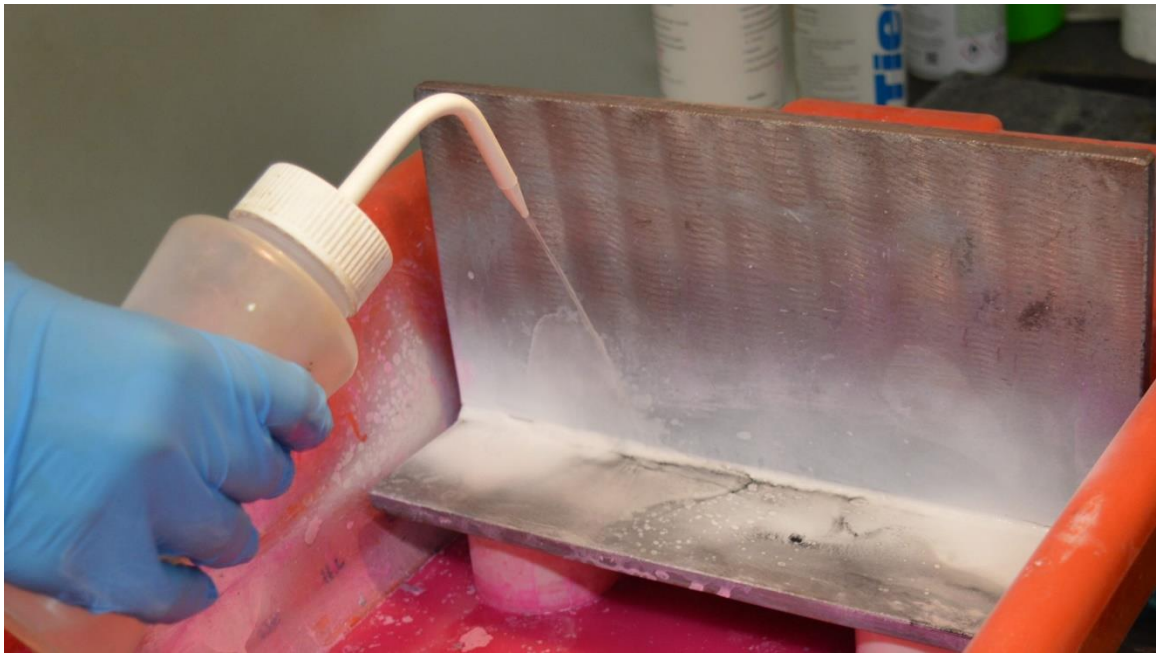
Σύμφωνα με την πρώτη μέθοδο, θα πρέπει οι δύο απολήξεις του ηλεκτρομαγνήτη να τοποθετηθούν εκατέρωθεν της συγκόλλησης με την μαγνητική ροή να προσπίπτει υπό γωνία 45 μοιρών στην ραφή. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει το yoke να τοποθετείτε χιαστί εναλλάξ προκειμένου να καλυφθούν όλες οι θέσεις και διευθύνσεις.

Στην δεύτερη περίπτωση, ο ηλεκτρομαγνήτης τοποθετείται αρχικά κάθετα στην ραφή, με τα «πόδια» του εκατέρωθεν αυτής και στη συνέχεια παράλληλα, κοντά στη ραφή (ξεχωριστά σε κάθε πλευρά της).

Στα σημεία που το yoke έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο συγκεντρώνονται μαγνητικά σωματίδια τα οποία ενδέχεται να οδηγήσουν σε μη σχετικές ενδείξεις ή και σε κάλυψη σχετικών ενδείξεων. Για τον λόγο αυτό αποφεύγεται η τοποθέτησή του πλησίον της ραφής συγκόλλησης (περιοχή ενδιαφέροντος). Επομένως, συνίσταται η χρήση της πρώτης μεθόδου, ενώ, εν συνεχεία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η δεύτερη προκειμένου να επιβεβαιώσει προηγούμενες ενδείξεις. Μία γραμμική ασυνέχεια οδηγεί σε πιο ευδιάκριτη ένδειξη, όταν οι μαγνητικές γραμμές τη διαρρέουν κάθετα!

Β.3.9. Καθαρισμός Δοκιμίου

Ακολούθως, προχωρήστε εκ νέου σε καθαρισμό του δοκιμίου, με ισχυρό διαλύτη, προκειμένου να απομακρυνθεί τόσο η μαγνητική μελάνη όσο και το λευκό υπόστρωμα. Για την διαδικασία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακετόνη (Εικόνα 10.16).



Εικόνα 10.16 Καθαρισμός βαφής υποστρώματος με ακετόνη

Β.3.10. Απομαγνητισμός Δοκιμίου

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου το δοκίμιο παραμένει μαγνητισμένο. Καθώς είναι πιθανό η παραμένουσα μαγνήτιση να επηρεάζει την λειτουργικότητά του, πρέπει να απομακρυνθεί. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ενεργοποιώντας το yoke (πλησίον του δοκιμίου αλλά χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτό) και περιστρέφοντας το, καθώς το απομακρύνετε σταδιακά από το δοκίμιο.

Έλεγχος της παραμένουσας μαγνήτισης του δοκιμίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση ενός μετρητή Gauss.

Β.4. Αξιολόγηση και Καταγραφή Αποτελεσμάτων

Β.4.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών

Αφότου εντοπιστούν οι ατέλειες με την μέθοδο του μη καταστροφικού ελέγχου θα πρέπει να ταξινομηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια να καθοριστεί αν πρόκειται για σφάλματα (μη αποδεκτές ασυνέχειες) με βάση το αντίστοιχο κριτήριο αποδοχής για το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας.

Β.4.1.1. Αξιολόγηση Ενδείξεων

Οι σχετικές ενδείξεις στον μαγνητικό έλεγχο λαμβάνουν το σχήμα τον ασυνεχειών που τις προκαλούν. Καθώς η μέθοδος παρουσιάζει ευαισθησία σε γραμμικές ασυνέχειες, οι προκύπτουσες ενδείξεις είναι συνήθως γραμμικές. Ωστόσο, κατά κανόνα οι υποεπιφανειακές ασυνέχειες οδηγούν στο σχηματισμό φαρδύτερων και αχνότερων γραμμών από τα μαγνητικά σωματίδια. Η ύπαρξή υποεπιφανειακών ατελειών μπορεί να επιβεβαιωθεί με έλεγχο με διεισδυτικά υγρά, κατά τον οποίο αναμένεται να εμφανιστούν μόνον οι επιφανειακές.

Β.4.1.2. Ταξινόμηση Ατελειών

Ο διαχωρισμός των ατελειών συγκολλήσεων σε ξεχωριστές κατηγορίες γίνεται με βάση το **ISO 6520-1: 2007**. Το τελευταίο, καθορίζει τις κατηγορίες ατελειών (συνοδευόμενες από έναν τριψήφιο ή τετραψήφιο κωδικό), καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που υπάγονται σε αυτές.

Γενικότερα, οι ασυνέχειες κατηγοριοποιούνται στις κάτωθι ομάδες, λαμβάνοντας στη συνέχεια περαιτέρω προσδιορισμό με βάση τα χαρακτηριστικά τους:

- **Ρωγμές (Cracks) - Σειρά 100**: Τοπικό σχίσιμο στο σώμα ή την επιφάνεια του υλικού.
- **Σπηλαιώσεις (Cavities) - Σειρά 200**: Πόροι και φυσαλίδες αερίων.
- **Στερεά Εγκλείσματα (Solid Inclusions) - Σειρά 300**: Στερεές ξένες ουσίες, παγιδευμένες στο μέταλλο συγκόλλησης.
- **Ατελή Τήξη και Διείσδυση (Lack of Fusion and Penetration) - Σειρά 400**: Η ατελής τήξη αφορά στην αδυναμία πλήρους τήξης του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό ή μεταξύ των πάσων. Αντιθέτως, η ατελής διείσδυση αποτελεί ένδειξη αδυναμίας του μετάλλου συγκόλλησης να φτάσει στο απαιτούμενο βάθος.
- **Ατελές Σχήμα (Imperfect Shape) - Σειρά 500**: Αφορά ατέλειες στο σχήμα της εξωτερικής επιφάνειας της συγκόλλησης ως προς την γεωμετρία του συνδέσμου, όπως υποκοπή.
- **Λοιπές Ασυνέχειες (Miscellaneous) - Σειρά 600**

Β.4.1.3. Επίπεδο Ποιότητας και Κριτήρια Αποδοχής

Το Επίπεδο Ποιότητας στο οποίο υπάγεται μια συγκολλητή κατασκευή χαρακτηρίζει την ικανότητά της να παραλαμβάνει συγκεκριμένα φορτία χωρίς να αστοχεί. Ανάλογα με το μέγεθος των φορτίων αυτών προκύπτουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας.

Το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας ενός εξαρτήματος προκύπτει από την προοριζόμενη χρήση του και τις καταπονήσεις που αναμένεται να δεχτεί.

Τα κριτήρια αποδοχής μίας συγκολλητής συναρμογής στο εκάστοτε επίπεδο ποιότητας προσδιορίζονται από το **ISO 5817: 2023** (ή από το ISO 10042 για συγκολλήσεις αλουμινίου και των κραμάτων του), λαμβάνοντας υπόψιν τις ασυνέχειες που έχουν εντοπιστεί κατά τον έλεγχο της συγκόλλησης.

Με βάση τις προδιαγραφές του αποζητούμενου επιπέδου ποιότητας ο ελεγκτής καλείται να διαπιστώσει αν οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν είναι εντός ανεκτών πλαισίων ή αν αποτελούν σφάλματα, περίπτωση στην οποία το δοκίμιο απορρίπτεται.

Συγκεκριμένα για την μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων, προβλέπονται κριτήρια ανοχής με βάση το πρότυπο **ISO 23278: 2015**. Καθώς οι ενδείξεις της μεθόδου βασίζονται στην συγκέντρωση μαγνητικής μελάνης στην επιφάνεια, προκύπτουν στοιχεία για την μορφή της ατέλειας αλλά όχι για το βάθος της. Για αυτό το λόγο γίνεται μέτρηση της μεγαλύτερης διάστασης της ένδειξης, η οποία και αντιστοιχίζεται σε νέα, ειδικά επίπεδα αποδοχής (Acceptance Levels 1/ 2/ 2X/ 3/ 3X).

Αξίζει να σημειωθεί πως διαδοχικές ασυνέχειες οι οποίες χωρίζονται από απόσταση το πολύ ίσης με τη μέγιστη διάστασης της μικρότερης ασυνέχειας λογίζονται ως μία, ενιαία ασυνέχεια.

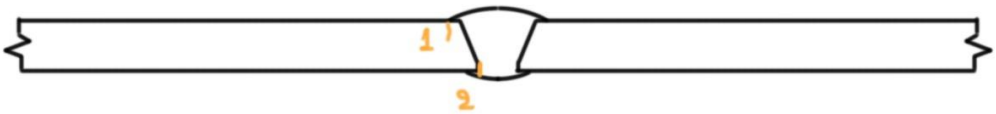
- Η αντιστοίχιση των επιπέδων ποιότητας μεταξύ των δύο προτύπων (ISO 5817 και ISO 23278) ορίζεται στο πρότυπο **ISO 17635: 2016**.

Β.4.2. Σύνταξη Αναφοράς

Η εκπόνηση της μεθόδου ελέγχου θα πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αναφορά η οποία θα περιγράφει τα ευρήματα (Εικόνα 10.17). Σε αυτήν περιλαμβάνονται:

- Πληροφορίες για το ελεγχόμενο δοκίμιο (διαστάσεις, υλικό, κατάσταση επιφανείας)
- Σκοπός ελέγχου και χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός (στοιχεία κατασκευαστή και προϊόντος)
- Περιγραφή εντοπιζόμενων ασυνεχειών και χαρακτηρισμός τους (όπως φαίνεται παρακάτω)
- Αποτελέσματα ελέγχου και αποδοχή ή απόρριψη (στην περίπτωση εντοπισμού σφαλμάτων) του εξεταζόμενου δοκιμίου

Οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν θα πρέπει να δίνονται συνοδευόμενες από σκαρίφημα και να αναγράφεται το είδος τους, το σημείο στο οποίο εντοπίζονται, καθώς και το μέγεθός τους. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Αύξων Αριθμός	Τύπος Ασυνέχειας	Μήκος Ασυνέχειας	Απόσταση από το Σημείο Αναφοράς	Τυχόν Παρατηρήσεις
1	Ρωγμή στον Πόδα	15	100	

2	Ατελής Διείσδυση	10	200	

MAGNETIC PARTICLE INSPECTION REPORT

Inspector		Date		Report No	
		Location		Page No	
Scope of Testing					
Client		Material		Surface Condition	
Project No		Thickness		Surface Temp.	
Item No					
Acceptance lvl					
MPI Technique					
Magnetizing Method					
Description		Contimuous		AC	
		Residual		DC	
Magnetic Particles					
Manufacturer		Fluorescent		Dry	
Label		Visible		Water Suspended	
				Distillate Suspended	

Background Paint	
Manufacturer	
Label	
Cleaner	
Manufacturer	
Label	
Procedure Description	
Pre-Cleaning Method(s)	
Demagnetization	

Joint Sketch

Findings

Item No	Discontinuity	Length	Distance from point of reference	Evaluation	Remarks

Εικόνα 10.17 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς

[4], [5], [27], [49], [50]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ

C.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής

Η δυνατότητα της μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους να εντοπίσει ασυνέχειες τόσο επιφανειακά όσο και σε σημαντικό βάθος κάτω από την επιφάνεια του δοκιμίου την καθιστά ικανή να εντοπίσει τις περισσότερες εξ αυτών, εξαιρουμένων ορισμένων συγκεκριμένου σχήματος και προσανατολισμού. Ακόμα, μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε μεταλλικά υλικά, όσο και σε κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα, σκυροδέματα και άλλα. Τα παραπάνω καθιστούν την μέθοδο ιδιαίτερα ευέλικτη και η χρήση της είναι διαδεδομένη σε πολλές βιομηχανίες, μεταξύ των οποίων και η ναυπηγική. Σημαντική εφαρμογή που βρίσκει στην τελευταία αποτελεί η παχυμέτρηση ελασμάτων (απαραίτητη για τον έλεγχο διαβρωμένων μεταλλικών μερών).

Συνοπτικά, κατά την διενέργεια της μεθόδου, δέσμη ηχητικού κύματος εκπέμπεται κατά το πάχος του ελεγχόμενου δοκιμίου. Μέρος αυτής ανακλάται κατά την αλλαγή του μέσου διάδοσης (όπως κάποιο στερεό έγκλεισμα, ρωγμή ή ακόμα και η εξωτερική επιφάνεια του υλικού) και επιστρέφει στον πομποδέκτη. Ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την επιστροφή του παλμού στον πομποδέκτη και οι θέσεις στις οποίες ο τελευταίος εντοπίζει την ηχώ παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος και την θέση μιας ασυνέχειας.

Ο έλεγχος με υπερήχους εκμεταλλεύεται τις ιδιότητες των μηχανικών κυμάτων, καθώς ο ήχος αποτελεί μηχανική ταλάντωση των σωματιδίων του μέσου στο οποίο διαδίδεται. Η ταλάντωση αυτή έχει την ίδια συχνότητα με αυτή του ηχητικού κύματος και υπερβαίνει το μέγιστο όριο που μπορεί να ακούσει ο άνθρωπος (~20 kHz). Συνήθως οι υπέρηχοι που χρησιμοποιούνται στο πεδίο του μη καταστροφικού ελέγχου υλικών έχουν συχνότητες εύρους 100 kHz έως 25 MHz. Τα διαδιδόμενα κύματα μπορεί να είναι διαμήκη ή εγκάρσια.

Η συσκευή των υπερήχων συνδέεται με έναν πομποδέκτη (σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι δύο ξεχωριστά όργανα) και εκμεταλλευόμενη το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο δημιουργεί ηχητική δέσμη η οποία διαδίδεται στο εξεταζόμενο υλικό προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η μέθοδος βασίζεται στους ανακλαστήρες που θα συναντήσει η δέσμη αυτή, οι οποίοι φανερώνουν μία αλλαγή στο μέσο διάδοσης, γεγονός που οδηγεί στην ανάκλαση μέρους της ακουστικής πίεσης που ασκείται κατά την διάδοση του ήχου. Κάτι τέτοιο μπορεί να ανιχνευθεί από τον δέκτη, περίπτωση στην οποία υπολογίζεται από την συσκευή η διανυθείσα από την ηχητική δέσμη απόσταση και εξάγεται το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ανακλαστήρας. Επιπλέον, ανιχνεύεται και η ενέργειά της αντήχησης. Καθώς οι ασυνέχειες ενός υλικού αποτελούν ανακλαστήρες, η παραπάνω διαδικασία επιτρέπει τον εντοπισμό και τη διαστασιολόγησή τους.

Η διαδικασία εκπόνησης του ελέγχου, καθώς και λοιπές προδιαγραφές αναφορικά με τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό αναγράφονται στα πρότυπα **ISO 17640:2018** και **ISO 22825: 2017**.

C.2. Περιγραφή Διαδικασίας

Ο έλεγχος ενός συγκολλητού δοκιμίου με την μέθοδο των υπερήχων μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους στάδια. Αρχικά, τον έλεγχο του μετάλλου βάσης με κάθετες κεφαλές και, στη συνέχεια, στο στάδιο εξέτασης της ρίζας και του σώματος της συγκόλλησης με τη χρήση γωνιακών κεφαλών. Τα παραπάνω θα πρέπει να πλαισιώνονται από βαθμονόμηση των χρησιμοποιούμενων αισθητήρων και της συσκευής υπερήχων (Εικόνα 10.18).

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας ελέγχου με τη χρήση της συσκευής Pocket UT™ του εργαστηρίου και αισθητήρες μονού κρυστάλλου (λειτουργούν ως πομπός και δέκτης των κυμάτων).

Εικόνα 10.18 Συσκευή υπερήχων Pocket UT

C.2.1. Καθαρισμός Επιφάνειας Δοκιμίου

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη κύλιση του πομποδέκτη στο εξεταζόμενο δοκίμιο και η σύζευξή του με αυτό, κρίνεται σκόπιμο να προηγηθεί καθαρισμός της επιφάνειας του. Για τον καθαρισμό οργανικών ρύπων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το cleaner SKC-S.

C.2.2. Οπτική Επιθεώρηση

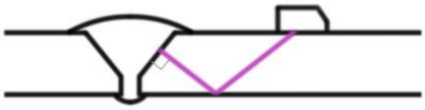
Σε αυτό το στάδιο, ο ελεγκτής καλείται να εξακριβώσει την ορθή προετοιμασία της επιφάνειας του δοκιμίου προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή σύζευξή της με τον αισθητήρα στην συνέχεια. Ακόμα, θα πρέπει να εντοπίσει γεωμετρικές ιδιαιτερότητες οι οποίες κατά τον έλεγχο θα οδηγήσουν σε ενδείξεις που δεν οφείλονται σε σφάλματα (μη σχετικές ενδείξεις).

Σε αυτό το σκέλος μπορούν ακόμα να αναζητηθούν ασυνέχειες οι οποίες πιθανώς να είναι παρατηρήσιμες δια γυμνού οφθαλμού. Ελέγξτε αν υπάρχουν τέτοιες ενδείξεις στο δοκίμιο, και καταγράψτε τα ευρήματά σας.

C.2.3. Εκλογή Χρησιμοποιούμενων Κεφαλών και Περιοχής Ελέγχου

Για την εξέταση ενός συγκολλητού δοκιμίου με την μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιούνται κάθετες και γωνιακές κεφαλές. Οι τελευταίες (πλην ειδικών περιπτώσεων) αφορούν σε γωνίες πρόσπτωσης της δέσμης υπερήχων: 45°, 60°, 70°.

Το πλήθος και οι γωνίες πρόσπτωσης της δέσμης των κεφαλών που θα προτιμηθούν, εξαρτώνται από το είδος της συγκόλλησης και το πάχος του μετάλλου βάσης. Για να προσεγγιστούν πολύπλοκες γεωμετρίες με συνέπεια κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν γωνιακές κεφαλές με διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Σημειώνεται πως προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ευαισθησία, θα πρέπει η ηχητική δέσμη να προσπίπτει κάθετα στο σώμα της συγκόλλησης (Εικόνα 10.19). Επιπλέον, οι κεφαλές μικρότερων γωνιών προτιμώνται για την εξέταση παχύτερων δοκιμίων και αντίστροφα, σύμφωνα με τον παρατιθέμενο πίνακα (Πίνακας 10.1).



Εικόνα 10.19 Διαδρομή γωνιακής δέσμης κάθετης πρόσπτωσης στο σώμα της συγκόλλησης

Πίνακας 10.1Συσχέτιση πάχους δοκιμίου και γωνίας αισθητήρα

Πάχος Δοκιμίου [mm]	Γωνία Πρόσπτωσης Δέσμης [deg]
<30	70°
30-60	60°
>60	45°

Για την πλειονότητα των υλικών ενδείκνυνται πομποδέκτες συχνοτήτων 1 έως 5 MHz.

C.2.4. Κατασκευή Σκαριφήματος

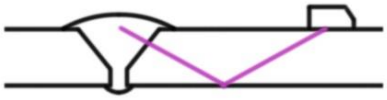
Σε αυτό το στάδιο, θα πρέπει να σχεδιαστεί σκαρίφημα του δοκιμίου (κάτοψη και πλάγια όψη ραφής συγκόλλησης) στο οποίο θα αποτυπωθούν και τα ευρήματα της εξέτασης στη συνέχεια. Το σχέδιο θα πρέπει να παρέχει πληροφορίες για την συγκόλληση (ύψος, πλάτος ραφής και ρίζας) και το δοκίμιο (πάχος).

Στη συνέχεια χαράσσονται οι τροχιές στις οποίες θα κινηθούν οι κεφαλές προκειμένου να επιτευχθεί σάρωση ολόκληρης της συγκολλητής περιοχής. Αρχικά, υπολογίζονται οι θέσεις μισού και πλήρους βήματος από τον άξονα της συγκόλλησης.

Η θέση μισού βήματος (Half Skip) είναι αυτή όπου για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής δέσμης οδηγεί σε σάρωση της ρίζας της συγκόλλησης (Εικόνα 10.20).
Απόσταση από άξονα συγκόλλησης: $T * \tan(\theta)$
Διανυθείσα απόσταση δέσμης: $T/\cos(\theta)$

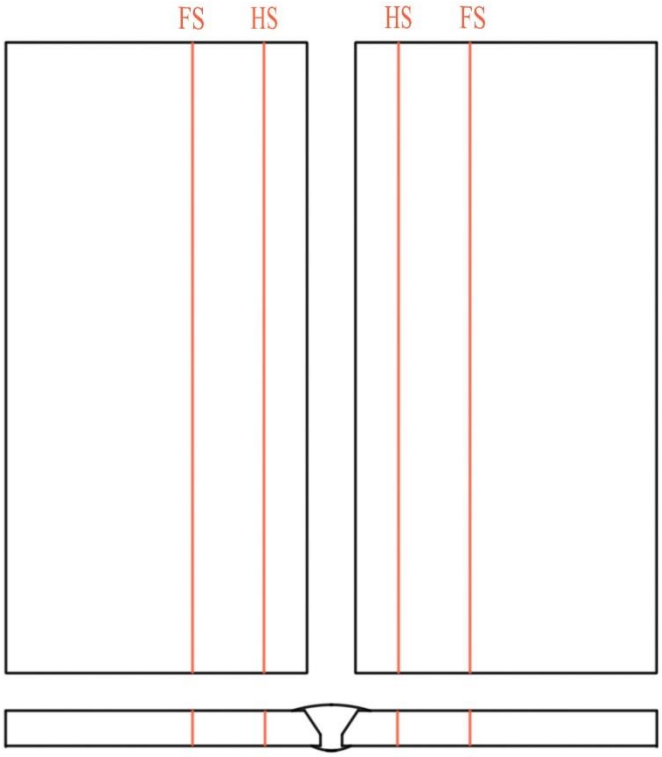
Εικόνα 10.20 Διαδρομή δέσμης για εξέταση της ρίζας

Αντίστοιχα υπολογίζεται η θέση πλήρους βήματος (Full Skip), η οποία οδηγεί σε σάρωση του καπακιού της συγκόλλησης στην οποία η ηχητική δέσμη προσπίπτει αφού ανακλαστεί στο απέναντι τοίχωμα του δοκιμίου (Εικόνα 10.21).
Απόσταση από άξονα συγκόλλησης: $2T * \tan(\theta)$
Διανυθείσα απόσταση δέσμης: $2T/\cos(\theta)$



Εικόνα 10.21 Διαδρομή δέσμης για εξέταση του καπακιού

Η παραπάνω διαδικασία θα πρέπει να επαναληφθεί ξεχωριστά για κάθε μία από τις χρησιμοποιούμενες γωνιακές κεφαλές. Στην συνέχεια, οι τροχιές ***Half Skip*** και ***Full Skip*** $+ \nu/2$ (όπου ν το πλάτος της συγκόλλησης) χαράσσονται στο σκαρίφημα, αλλά και στο ίδιο το δοκίμιο με ανεξίτηλο μαρκαδόρο (Εικόνα 10.22).



Εικόνα 10.22 Σκαρίφημα θέσεων Half Skip και Full Skip

C.2.5. Εξοικείωση με το Όργανο

Προκειμένου να γίνει σαφής ο τρόπος λειτουργίας του οργάνου (Pocket UT™) ακολουθεί ανάλυση των βασικότερων εκ των διαθέσιμων παραμέτρων του συστήματος, οι οποίες ρυθμίζονται κατά περίπτωση από τον ελεγκτή. Αναλυτικότερα, μπορούν να βρεθούν οδηγίες στο User's Guide του κατασκευαστή το οποίο συνοδεύει την συσκευή.

Στην αρχική οθόνη υπάρχουν οι επιμέρους κατηγορίες ρυθμίσεων ή παρεχόμενων ενδείξεων του οργάνου.

C.2.5.1. Material List

Η επιλογή "*Material*" από την αρχική οθόνη οδηγεί στην σελίδα "*Material List*". Σε αυτή μπορεί να οριστεί το εξεταζόμενο υλικό ώστε να αποδοθεί η αντίστοιχη ονομαστική ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε αυτό. Αυτή, στη συνέχεια, μπορεί να προσαρμοστεί με ακρίβεια στην πραγματική τιμή για το δεδομένο δοκίμιο και υλικό με τη διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration). Η ταχύτητα επηρεάζεται, πέραν του υλικού, και από την φύση του διαδιδόμενου κύματος. Εφόσον αυτό είναι εγκάρσιο (στην περίπτωση χρησιμοποίησης αισθητήρων γωνιακής δέσμης), θα πρέπει να επιλεγεί η παράμετρος "*Shear Wave*".

C.2.5.2. UT Sensor

Η επιλογή "*Probe*" από την αρχική οθόνη οδηγεί στην σελίδα "*UT Sensor*". Σε αυτή ρυθμίζονται οι παράμετροι που αφορούν στον αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Αυτές είναι:

- Η γωνία πρόσπτωσης της ηχητικής δέσμης στο δοκίμιο από την επιλογή "*Angle*" (ορίζεται μηδενική τιμή στην περίπτωση κάθετης κεφαλής)
- Η καθυστέρηση που οφείλεται στην διάδοση στο υλικό της σφήνας που παρεμβάλλεται μεταξύ του πομποδέκτη και του δοκιμίου (συνήθως plexiglass) σε έναν αισθητήρα γωνιακής δέσμης από την επιλογή "*Delay*". Η συγκεκριμένη παράμετρος ρυθμίζεται αυτόματα κατά την βαθμονόμηση.
- Η ταχύτητα διάδοσης στο υλικό της σφήνας ή στο υλικό του μέσου σύζευξης (συνήθως αφήνεται η προεπιλογή της συσκευής)
- Η απόσταση του άκρου της σφήνας μίας γωνιακής κεφαλής και του σημείου εξόδου της ηχητικής δέσμης από αυτό.

C.2.5.3. A-Scan

Από την επιλογή "*A-Scan*" προβάλλεται η βασική απεικόνιση της θέσης ανάκλασης (οριζόντιος άξονας) και της έντασης (κάθετος άξονας) του ανακλώμενου από μία ασυνέχεια ήχου. Σε αυτή τη σελίδα γίνεται η ανάγνωση των ενδείξεων που προκύπτουν κατά την διενέργεια του ελέγχου. Η μορφή του γραφήματος μπορεί να παραμετροποιηθεί με ορισμένες ρυθμίσεις:

- *Graph Settings*: Στην συγκεκριμένη ομάδα ρυθμίσεων υπάγονται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των αξόνων του φάσματος και μέσω αυτής διενεργείται η βαθμονόμηση, όπως περιγράφεται στην συνέχεια.
- *A/D Settings*: Από αυτήν τη σελίδα ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι του παραγόμενου γραφήματος. Περιέχει ρυθμίσεις για την ένταση του σήματος, τα φίλτρα και τη μορφή της κυματομορφής.
- *P/R and DAC Settings*: Στην καρτέλα αυτή βρίσκονται πρόσθετες ρυθμίσεις σχετικά με τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή της καμπύλης DAC (Distance Amplitude Correction).

- Gate Settings: Από αυτήν την καρτέλα προσαρμόζονται οι δύο πύλες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό αντηχήσεων εντός προσδιοριζόμενου εύρους βάθους και έντασης.
- Save Waveform: Με αυτή την επιλογή μπορεί να εξαχθεί και να αποθηκευτεί στιγμιότυπο του τρέχοντος φάσματος. Προκειμένου αυτό να διατηρηθεί σταθερό σε ένα σημείο ενδιαφέροντος χρησιμοποιείται το πλήκτρο "Pause/ Stop" της συσκευής.

C.2.6. Επιλογή και Εφαρμογή Μέσου Σύζευξης (Couplant)

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή σύζευξη μεταξύ της χρησιμοποιούμενης κεφαλής και του δοκιμίου θα πρέπει να εξαλειφθούν τα κενά αέρα που παρεμβάλλονται μεταξύ των δύο. Για αυτό το σκοπό εκτός του καθαρισμού του δοκιμίου, θα πρέπει να εφαρμοστεί και ένα μέσο σύζευξης (Couplant).

Ως τέτοιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια γέλη, έλαιο ή και νερό. Συνιστάται η χρήση γλυκερίνης (Εικόνα 10.23).

Εικόνα 10.23

C.2.7. Έλεγχος με Αισθητήρα Κάθετης Δέσμης

Η περιοχή του μετάλλου βάσης στην οποία πρόκειται να δράσουν οι αισθητήρες γωνιακής δέσμης θα πρέπει να ελεγχθεί ξεχωριστά. Η εξέταση θα πρέπει να διενεργηθεί στην περιοχή που παρεμβάλλεται μεταξύ της θέσης μέγιστου skip και της ραφής συγκόλλησης, με τη χρήση κάθετων κεφαλών. Με αυτόν τον τρόπο θα ανιχνευθούν τυχόν υπάρχοντες ανακλαστήρες οι οποίοι, στη συνέχεια, θα παρεμβληθούν στην εκπεμπόμενη από τις γωνιακές κεφαλές δέσμη οδηγώντας σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση που εντοπιστούν τέτοιοι, θα πρέπει να εξεταστούν οι τρόποι με τους οποίους θα προσεγγιστεί μέρος του σώματος ή της ρίζας της συγκόλλησης που ενδεχομένως καλύπτουν, με βάση την αρχική εκλογή των τροχιών σάρωσης.

Ακόμα, με τον αισθητήρα κάθετης δέσμης μπορεί να βρεθεί το ακριβές πάχος του δοκιμίου στην περιοχή ενδιαφέροντος, στην περίπτωση που δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός του με απλούστερα μέσα.

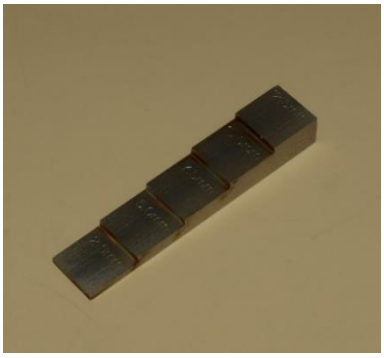
C.2.7.1. Βαθμονόμηση

Για την βαθμονόμηση της διάταξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο πρότυπο δοκίμιο βαθμονόμησης (calibration block). Το πρότυπο δοκίμιο θα πρέπει να είναι ίδιου υλικού με το εξεταζόμενο προκειμένου να ταυτίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ήχου μεταξύ των δύο.

A. Βαθμονόμηση με το κλιμακωτό δοκίμιο VW (step wedge calibration block)

Το εν λόγω πρότυπο δοκίμιο αποτελείται από 5 ισαπέχουσες βαθμίδες πάχους 2.5 έως 12.5 mm (Εικόνα 10.24). Αφότου συνδεθεί η επιλεγείσα κεφαλή (*Probe*), καταχωρούνται τα χαρακτηριστικά της (*Angle*). Στη συνέχεια επιλέγεται το υλικό του πρότυπου δοκιμίου από την διαθέσιμη λίστα στην σελίδα "*Material*" και τίθεται σε εφαρμογή η λειτουργία "*A-Scan*".

Εν συνεχεία, ακολουθείται η περιγραφόμενη διαδικασία διατηρώντας τις ενδείξεις του γραφήματος στην οθόνη της συσκευής ευδιάκριτες. Για αυτό το σκοπό, θα πρέπει να ρυθμιστούν από τον ελεγκτή το Gain, τα φίλτρα (LP και HP Filter), τα Average και Sampling Rate καθώς και το Damping.



Εικόνα 10.24 Δοκίμιο βαθμονόμησης VW

1. Από τις καρτέλες "*A/D Settings*" και "*DAC and P/R Settings*", εντός της λειτουργίας A-Scan ρυθμίζεται:

A/D Settings	Signal	Delay	0.00
		Width	20.00
	Rect	Full Rectification	
	Trig	Trig Source	Software
	Process	Offset (mV)	Default
DAC and P/R Settings	P/R	P/R Mode	P/R
		Voltage	300
	Pulser	Burst Shape	Spike / Square
		Frequency	**Transducer's Freq.**

2. Αφού ο πομποδέκτης τοποθετηθεί (χρησιμοποιώντας και κάποιο μέσο σύζευξης) στην θέση πάχους 12.5 mm, εντοπίζεται η ηχώ που προκύπτει στην οθόνη της συσκευής και η Gate1 προσαρμόζεται πάνω της. Από την καρτέλα "Gate Settings" επιλέγεται:

Gate Settings	Feature	Detect AMP By	Max Peak AMP
		Detect TOF By	First Threshold

Ακολούθως από την καρτέλα "*THK*" επιλέγεται "*Auto Calibration*". Στην ένδειξη "*REF1(thick)*" εισαγάγετε τη μετρούμενη τιμή του πάχους (12.5 mm) και πατήστε το κουμπί κάτω από την ένδειξη "*TOF (us)*".

Έπειτα, μετακινήστε το Probe στο λεπτό μέρος του πρότυπου δοκιμίου, πάχους 2.5 mm. Στην ένδειξη "*REF2(thin)*" εισαγάγετε τη μετρούμενη τιμή του τρέχοντος πάχους (2.5 mm) και πατήστε το κουμπί κάτω από την ένδειξη TOF (us).

Το στάδιο ολοκληρώνεται με την επιλογή του "*Calibrate*".

Β. Βαθμονόμηση στο εξεταζόμενο δοκίμιο ή σε πρότυπο γνωστού πάχους

Εφόσον είναι γνωστό ή μπορεί να μετρηθεί το πάχος του δοκιμίου σε κάποιο σημείο, η βαθμονόμηση είναι δυνατόν να διενεργηθεί τοποθετώντας την κεφαλή σε αυτό το σημείο. Βεβαιωθείτε ότι στην οθόνη είναι ευδιάκριτες οι ενδείξεις της πρώτης και δεύτερης ηχούς. Αυτές προκύπτουν από το ανακλώμενο μέρος της δέσμης στο απέναντι τοίχωμα, στην πρώτη περίπτωση ύστερα από την εκπομπή της δέσμης και στη δεύτερη από την επιστροφή μέρους της μετά από μία πλήρη παλινδρόμηση κατά το πάχος του δοκιμίου. Έπειτα, τοποθετείστε τις δύο πύλες στις αντίστοιχες ηχούς (Gate1 στην πρώτη και Gate2 στην δεύτερη) και επιλέξτε A-Scan Graph → H-Axis → Auto Calibration. Αφότου εισαγάγετε τις κατάλληλες τιμές για το sound path που εμπεριέχεται σε κάθε πύλη πατήστε "*Calibrate*".

C.2.7.2. Σάρωση επιφάνειας

Ακολούθως, γίνεται η σάρωση του προβλεπόμενου μέρους της επιφάνειας με τον πομποδέκτη. Σε αυτή την περίπτωση αναζητείται κάποια ηχώ η οποία προηγείται της αναμενόμενης από το απέναντι τοίχωμα του δοκιμίου ή η απώλεια της τελευταίας. Τα παραπάνω αποτελούν ενδείξεις πως κάποιος ανακλαστήρας παρεμβάλλεται της κεφαλής και του τοιχώματος και οδηγεί σε εκτροπή της πορείας (μέρους) της ηχητικής δέσμης. Ο ανακλαστήρας αυτός δεν είναι παρά μια ασυνέχεια του υλικού στο οποίο διαδίδεται ο υπέρηχος και κατά συνέπεια θα πρέπει να προσδιοριστεί η θέση του.

C.2.7.3. Αξιολόγηση ευρημάτων

Από την απόσταση που διανύει η δέσμη και φαίνεται στον οριζόντιο άξονα του φάσματος προκύπτει το βάθος στο οποίο βρίσκεται. Σε συνδυασμό με τις θέσεις στις οποίες βρίσκεται ο πομποδέκτης όταν η ασυνέχεια είναι εμφανής στο A-Scan, μπορούν να προσδιοριστούν οι διαστάσεις και η θέση της.

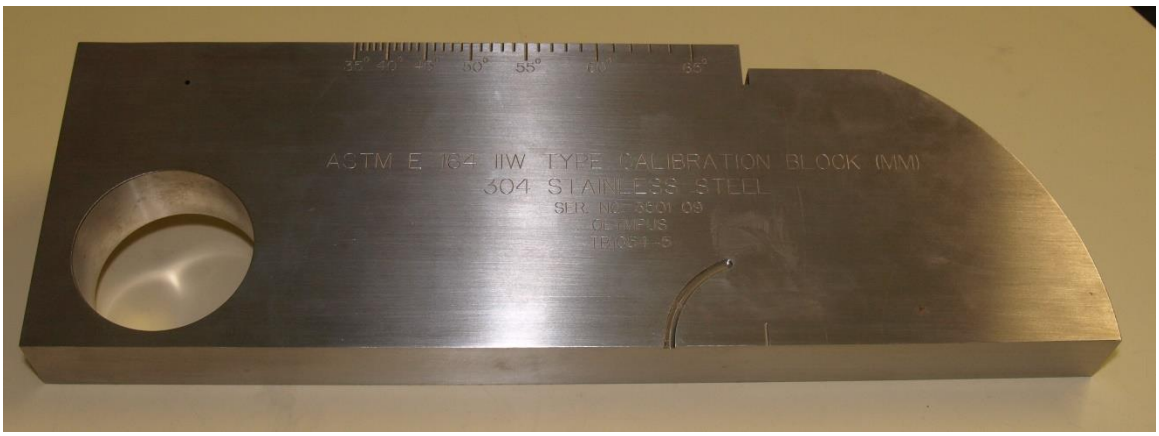
C.2.8. Έλεγχος με Αισθητήρες Δέσμης υπό Γωνία

Στην συνέχεια θα πρέπει να εξεταστεί για ασυνέχειες το σώμα και η ρίζα της συγκόλλησης. Για τον σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθούν οι γωνιακές κεφαλές που επελέγησαν. Αν πρόκειται για δύο ή περισσότερες γωνιακές κεφαλές, θα πρέπει η διαδικασία να επαναληφθεί ξεχωριστά για κάθε μία εξ αυτών, υπολογίζοντας κάθε φόρα το αντίστοιχο “skip distance”.

Εφόσον στο προηγούμενο βήμα εντοπίστηκαν ασυνέχειες οι οποίες παρεμβάλλονται της δέσμης των κεφαλών που επιλέχθηκαν, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ο έλεγχος του συνόλου του σώματος και ρίζας της συγκόλλησης. Για να επιτευχθεί αυτό ίσως χρειαστεί σάρωση και από το απέναντι τοίχωμα του δοκιμίου (εφόσον αυτό είναι προσβάσιμο) ή χρήση επιπλέον κεφαλής με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης.

C.2.8.1. Βαθμονόμηση κεφαλής

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει η βαθμονόμηση χρησιμοποιούμενων γωνιακών κεφαλών με τη χρήση του IIW-Type 1 Calibration Block (Εικόνα 10.25).

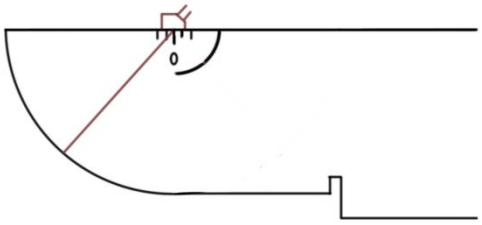


Εικόνα 10.25 Δοκίμιο βαθμονόμησης IIW - Type 1

A. Εύρεση Σημείου Εξόδου Δέσμης (Beam Index Point – BIP)

Το ονομαστικό σημείο εξόδου της δέσμης από την σφήνα στην οποία προσαρμόζεται ο πομποδέκτης συνήθως είναι σημειωμένο σε αυτή. Ωστόσο, αυτό ενδέχεται να αλλάξει με τη χρήση και την επερχόμενη φθορά, με αποτέλεσμα να πρέπει να επαναπροσδιοριστεί πριν τη χρήση της κεφαλής.

Για το σκοπό αυτό, η κεφαλή τοποθετείται (κατόπιν εφαρμογής μέσου σύζευξης) στην θέση 0 του πρότυπου δοκιμίου ώστε να ανακλάται στο τόξο των 100 mm (Εικόνα 10.26). Στη συνέχεια, προσαρμόζεται η συσκευή ώστε η αντήχηση του τόξου να είναι ευδιάκριτη. Κινώντας την κεφαλή κατά μήκος του block, αναζητείται το σημείο όπου η αντήχηση μεγιστοποιείται. Το σημείο της κεφαλής που βρίσκεται στην θέση 0 την στιγμή εκείνη, αποτελεί και το σημείο εξόδου της δέσμης.



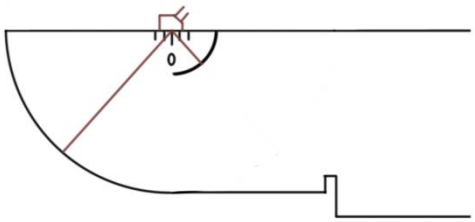
Εικόνα 10.26 Τοποθέτηση για προσδιορισμό σημείου εξόδου δέσμης

Β. Υπολογισμός ακριβούς γωνίας πρόσπτωσης ηχητικής δέσμης

Με κύλιση της εκάστοτε κεφαλής στην αντίστοιχη επιφάνεια (η οποία περιέχει την ονομαστική γωνία πρόσπτωσης στην κλίμακά της), θα πρέπει να βρεθεί το σημείο στο οποίο το σήμα που ανακλάται στο τόξο και επιστρέφει στον πομποδέκτη μεγιστοποιείται. Ακολούθως, σημειώνεται η γωνία στην οποία βρίσκεται το σημείο εκπομπής της κεφαλής τη δεδομένη στιγμή και αποτελεί την πραγματική γωνία που σχηματίζει η δέσμη του σήματος με την επιφάνεια στην οποία προσπίπτει.

C.2.8.2. Βαθμονόμηση Συσκευής

Στην παρούσα φάση θα πρέπει να ρυθμιστεί και να βαθμονομηθεί η συσκευή προκειμένου οι ενδείξεις που θα προκύψουν να είναι αξιόπιστες και ευανάγνωστες. Για το σκοπό αυτό ρυθμίζονται κατάλληλα οι παράμετροι του υλικού και της χρησιμοποιούμενης κεφαλής (Πίνακας 10.2).



Εικόνα 10.27 Τοποθέτηση για βαθμονόμηση συσκευής

Πίνακας 10.2 Ρύθμιση παραμέτρων υλικού και κεφαλής

Main Menu	Material	Material List	**Specimen's Material**
		Shear Wave	Checked
		Thickness	100
	Probe Menu	Angle	**Probe's Angle**
		Delay	Default
		Wedge Coupling	Default

Ακολούθως, ρυθμίζονται κατάλληλα οι παράμετροι στις κάτωθι κατηγορίες:

A-Scan	A-Scan Graph	H-Axis	Display	Distance
	A/D Settings	Signal	Gain	
			Delay	0.0
			Width	250
			Attn	Checked
		Filter	LP Filter	
			HP Filter	
		Rect	Full Rectification	
		Trig	Trig Source	Software
		Process	Average	
			Sampling Rate	
			Offset	Default
	DAC and P/R Settings	P/R	P/R Mode	P/R
			Voltage	300
			Damping	
		Pulser	Burst Shape	Spike / Square
			Frequency	**Transducer's Freq.**

Οι ρυθμίσεις για τις οποίες δεν αναγράφεται τιμή, θα πρέπει να προσαρμοστούν κατά περίπτωση έτσι ώστε να προκύπτουν ξεκάθαρες ενδείξεις στην οθόνη απουσία θορύβου.

Στη συνέχεια, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης:

1. Τοποθετήστε την κεφαλή με το σημείο εξόδου δέσμης στη θέση 0 και την δέσμη προς το μεγάλο τόξο (ακτίνας 100 mm). Θα πρέπει να φαίνονται δύο ενδείξεις, μία από το μεγάλο τόξο και μία από το μικρό μετά από την ανάκλαση στην επιφάνεια. Η κεφαλή θα διατηρηθεί στο σημείο για το υπόλοιπο της διαδικασίας (Εικόνα 10.27).
2. Μετακινήστε τις δύο πύλες στην κάθε ηχώ (την Gate1 στην πρώτη αντήχηση και την Gate2 στην δεύτερη).
3. Από την καρτέλα A-Scan Graph → H-Axis επιλέξτε "*Auto Calibration*" και εισαγάγετε στα πεδία καταχώρησης του sound-path τις κάτωθι τιμές και ακολούθως, "*Calibrate*".

SP for Gate1(mm)	100
SP for Gate2(mm)	225

4. Μετακινήστε την πρώτη πύλη (Gate1) στην δεύτερη ηχώ και επιλέξτε:

Gate Settings	Sync	Initial Pulse		
	Feature	Detect AMP By	Max Peak	
		Detect TOF By	First Threshold	
	THK	Auto Calibration	REF1(Thick)	225

   Πιέστε το κουμπί δίπλα από το σύμβολο +.
5. Τέλος, (χωρίς να κλείσετε το παράθυρο "*Auto Calibration*") μετακινήστε την δεύτερη πύλη (Gate2) στην πρώτη ηχώ και στο πεδίο "*REF2(Thin)*" εισαγάγετε την τιμή 100. Πιέστε το κουμπί δίπλα από το σύμβολο + και στη συνέχεια "*Calibrate*".

C.2.8.3. Σάρωση επιφάνειας – Έλεγχος ρίζας συγκόλλησης

Η συγκεκριμένη διαδικασία κρίνεται σκόπιμο να αποτελεί ξεχωριστό στάδιο της εξέτασης και να προηγείται του ελέγχου του σώματος της συγκόλλησης. Αυτό, διότι αφενός, στην περιοχή εμφανίζονται σφάλματα μεγαλύτερης επικινδυνότητας και συχνότητας και, αφετέρου, λόγω της γεωμετρίας της, ενδέχεται να επιστρέφει μη σχετικές ενδείξεις, οι οποίες πιθανόν να παραπλανήσουν τον ελεγκτή.

Προκειμένου να ελεγχθεί η ρίζα της συγκόλλησης, η κεφαλή θα πρέπει να τοποθετηθεί στην κατάλληλη απόσταση από τη ρίζα. Αυτή για μετωπικές συγκολλήσεις θα είναι στη θέση μισού βήματος (για Single-V). Η σάρωση γίνεται και από τις δύο πλευρές κατά μήκος της ραφής στην προαναφερθείσα θέση.

Απουσία ασυνεχειών, θα εμφανίζεται ηχώ από τη ρίζα σε απόσταση λίγο μεγαλύτερη της αναμενόμενης, ομοιόμορφη κατά το μήκος της συγκόλλησης. Αντιθέτως, η ύπαρξη ασυνεχειών στη ρίζα (υποκοπή, ατελής διείσδυση) θα οδηγήσει σε ενδείξεις μικρότερου βάθους κατά τον έλεγχο από την μία πλευρά και μεγαλύτερου από την άλλη. Η ένταση της εμφανιζόμενης ηχούς και η σύγκριση των ενδείξεων που προκύπτουν κατά τη σάρωση από τις δύο πλευρές μπορούν να καταδείξουν την φύση του ανακλαστήρα. Τα χαρακτηριστικά των συνήθων ασυνεχειών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10.3).

Πίνακας 10.3 Χαρακτηριστικά ενδείξεων διαφορετικών ασυνεχειών

Τύπος Ασυνέχειας	**Χαρακτηριστικά Ηχούς**	
Ατελής Διείσδυση	Μεγάλης Έντασης	Δεν εμφανίζεται ηχώ από τη ραφή
Υποκοπή	Μεγιστοποίηση ενδείξεων απομακρύνοντας ελαφρώς το σημείο σάρωσης	Εμφανίζεται και ηχώ από τη ραφή
Ρωγμή		Η ηχώ της ραφής εμφανίζεται μόνο από τη μία πλευρά

Αντίστοιχα για μετωπικές συγκολλήσεις double-V ο πομποδέκτης θα πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση ¼ του βήματος προκειμένου να εκπέμπει στη ρίζα. Ισχύουν τα παραπάνω, χωρίς να αναμένεται ηχώ από την ραφή της ρίζας.

C.2.8.4. Σάρωση επιφάνειας – Έλεγχος σώματος συγκόλλησης

Την εξέταση της ρίζας ακολουθεί η εξέταση του σώματος της συγκόλλησης. Η σάρωση θα γίνεται μεταξύ των δύο τροχιών που σημειώθηκαν σε προηγούμενο βήμα και αφορούν στην εκάστοτε χρησιμοποιούμενη κεφαλή γωνιακής δέσμης. Η εξέταση μπορεί να γίνει με ζιγκ-ζαγκ ή με διαδοχικές οριζόντιες σαρώσεις μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων skip. Περιοχές στις οποίες παρουσιάζονται ενδείξεις οι οποίες παραπέμπουν σε ασυνέχειες θα πρέπει να σημειωθούν και, εν συνεχεία, να ελεγχθούν ενδελεχώς. Η εξέταση αυτή θα περιλαμβάνει περιστροφική, διαμήκη και εγκάρσια κίνηση του Probe και από τις δύο πλευρές προκειμένου να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την διαστασιολόγηση και τον χαρακτηρισμό της ασυνέχειας.

C.2.9. Αξιολόγηση Ευρημάτων

Προκειμένου να χαρακτηριστεί μία ασυνέχεια θα πρέπει να προσδιοριστούν το μέγεθος, οι διαστάσεις και η κατηγορία στην οποία υπάγεται.

Οι παρακάτω τεχνικές προσφέρονται για την διαστασιολόγηση γραμμικών ατελειών.

C.2.9.1. Διαστασιολόγηση

Σε αυτό το στάδιο, επισημαίνονται οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές διαστασιολόγησης των ανακλαστήρων, καθώς η διασπορά της ηχητικής δέσμης οδηγεί σε αντηχήσεις μικρότερης έντασης, οι οποίες παραμένουν στο φάσμα για κάποιο διάστημα, όταν η δέσμη δεν επικεντρώνεται στην ασυνέχεια, αλλά πέριξ αυτής. Για αυτόν το λόγο, είναι κρίσιμο να οριστεί η περιοχή που λαμβάνεται υπόψιν στην διαστασιολόγηση της ασυνέχειας.

Α. Τεχνική πτώσης 6dB

Για τη διαστασιολόγηση ασυνεχειών μεγάλου μήκους (μεγαλύτερο του εύρους της δέσμης υπερήχων) χρησιμοποιείται η τεχνική πτώσης σήματος "6 dB". Όταν εντοπιστεί κάποιος τέτοιος ανακλαστήρας κατά την εξέταση, βρίσκεται η θέση τοποθέτησης του probe στην οποία εντοπίζεται ηχώ μέγιστης έντασης. Ακολούθως, ρυθμίζεται η κλίμακα του καθέτου άξονα προκειμένου η κορυφή της εν λόγω ένδειξης να φτάνει στο 80%.

Στη συνέχεια, ο αισθητήρας μετακινείται (προβάλλοντας στον ανακλαστήρα) έως ότου η ένταση της ηχούς φτάσει στο μισό της αρχικής, δηλαδή στο 40% του άξονα. Τότε θεωρείται ότι η μισή δέσμη ηχοβολεί στην ασυνέχεια και κατά συνέπεια ορίζει το άκρο της.

Β. Τεχνική πτώσης 20 dB

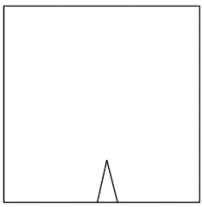
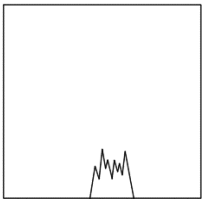
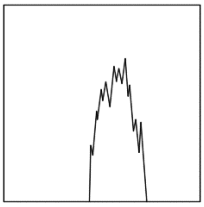
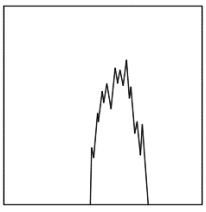
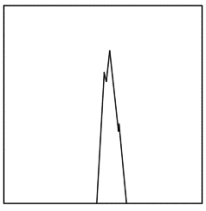
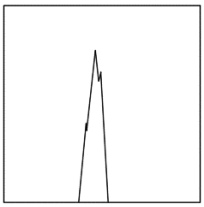
Για μικρότερες ατέλειες (μήκους μικρότερου του εύρους της δέσμης υπερήχων) χρησιμοποιείται η τεχνική πτώσης σήματος "20 dB". Αντίστοιχα με την προηγούμενη μέθοδο, όταν εντοπιστεί κάποιος ανακλαστήρας, βρίσκεται η θέση τοποθέτησης του αισθητήρα στην οποία παρατηρείται ηχώ μέγιστης έντασης και ρυθμίζεται η κλίμακα του καθέτου άξονα προκειμένου η κορυφή της εν λόγω ένδειξης να φτάνει στο 80%.

Στη συνέχεια ο αισθητήρας μετακινείται (προβάλλοντας στον ανακλαστήρα) έως ότου η ένταση της ηχούς φτάσει στο 10% της αρχικής.

C.2.9.2. Χαρακτηρισμός

Η φύση του ανακλαστήρα μπορεί να αποσαφηνιστεί με βάση τα χαρακτηριστικά των ενδείξεων που προκύπτουν (Πίνακας 10.4).

Πίνακας 10.4 Χαρακτηριστικά μορφής ενδείξεων ασυνεχειών

Τύπος Ασυνέχειας	**Ένταση Σήματος**	**Έκταση στον Οριζόντιο Άξονα**	**Ορατότητα**	**Μορφή Σήματος**
Πόρος	Χαμηλή	Περιορισμένη		
Πορώδες	Χαμηλή	Εκτεταμένη		
Εγκλεί-σματα	Υψηλή	Εκτεταμένη		
Ρωγμή	Υψηλή	Εκτεταμένη	Και από τις 2 πλευρές της συγκόλλησης	
Ατελής Τήξη	Υψηλή	Περιορισμένη	Μόνο από τη 1 πλευρά, καθώς από την άλλη η ηχητική δέσμη προσπίπτει με μικρή γωνία και δεν α-νιχνεύεται ηχώ	
Ατελής Διείσδυση	Υψηλή	Περιορισμένη	Και από τις 2 πλευρές της συγκόλλησης	

C.3. Καταγραφή Αποτελεσμάτων

C.3.1. Χαρακτηρισμός Ασυνεχειών

Αφότου εντοπιστούν οι ατέλειες με την μέθοδο του μη καταστροφικού ελέγχου θα πρέπει να ταξινομηθούν με βάση τα χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια να καθοριστεί αν πρόκειται για σφάλματα (μη αποδεκτές ασυνέχειες) με βάση το αντίστοιχο κριτήριο αποδοχής για το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας.

C.3.1.1. Ταξινόμηση Ατελειών

Ο διαχωρισμός των ατελειών συγκολλήσεων σε ξεχωριστές κατηγορίες γίνεται με βάση το **ISO 6520-1: 2007**. Το τελευταίο, καθορίζει τις κατηγορίες ατελειών (συνοδευόμενες από έναν τριψήφιο ή τετραψήφιο κωδικό), καθώς και τα χαρακτηριστικά των ασυνεχειών που υπάγονται σε αυτές.

Γενικότερα, οι ασυνέχειες κατηγοριοποιούνται στις κάτωθι ομάδες, λαμβάνοντας στη συνέχεια περαιτέρω προσδιορισμό με βάση τα χαρακτηριστικά τους:

- **Ρωγμές (Cracks) - Σειρά 100**: Τοπικό σχίσιμο στο σώμα ή την επιφάνεια του υλικού.
- **Σπηλαιώσεις (Cavities) - Σειρά 200**: Πόροι και φυσαλίδες αερίων.
- **Στερεά Εγκλείσματα (Solid Inclusions) - Σειρά 300**: Στερεές ξένες ουσίες, παγιδευμένες στο μέταλλο συγκόλλησης.
- **Ατελή Τήξη και Διείσδυση (Lack of Fusion and Penetration) - Σειρά 400**: Η ατελής τήξη αφορά στην αδυναμία πλήρους τήξης του μετάλλου συγκόλλησης με το βασικό ή μεταξύ των πάσων. Αντιθέτως, η ατελής διείσδυση αποτελεί ένδειξη αδυναμίας του μετάλλου συγκόλλησης να φτάσει στο απαιτούμενο βάθος.
- **Ατελές Σχήμα (Imperfect Shape) - Σειρά 500**: Αφορά ατέλειες στο σχήμα της εξωτερικής επιφάνειας της συγκόλλησης ως προς την γεωμετρία του συνδέσμου, όπως υποκοπή.
- **Λοιπές Ασυνέχειες (Miscellaneous) - Σειρά 600**

Ο χαρακτηρισμός με βάση τις ενδείξεις του ελέγχου με υπερήχους προσδιορίζεται από το πρότυπο **ISO 23279: 2017**.

C.3.1.1. Επίπεδο Ποιότητας και Κριτήρια Αποδοχής

Το Επίπεδο Ποιότητας στο οποίο υπάγεται μια συγκολλητή κατασκευή χαρακτηρίζει την ικανότητά της να παραλαμβάνει συγκεκριμένα φορτία χωρίς να αστοχεί. Ανάλογα με το μέγεθος των φορτίων αυτών προκύπτουν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας.

Το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας ενός εξαρτήματος προκύπτει από την προοριζόμενη χρήση του και τις καταπονήσεις που αναμένεται να δεχτεί.

Τα κριτήρια αποδοχής μίας συγκολλητής συναρμογής στο εκάστοτε επίπεδο ποιότητας προσδιορίζονται από το **ISO 5817: 2023** (ή από το ISO 10042 για συγκολλήσεις αλουμινίου και των κραμάτων του), λαμβάνοντας υπόψιν τις ασυνέχειες που έχουν εντοπιστεί κατά τον έλεγχο της συγκόλλησης.

Με βάση τις προδιαγραφές του αποζητούμενου επιπέδου ποιότητας ο ελεγκτής καλείται να διαπιστώσει αν οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν είναι εντός ανεκτών πλαισίων ή αν αποτελούν σφάλματα, περίπτωση στην οποία το δοκίμιο απορρίπτεται.

Συγκεκριμένα για την μέθοδο των υπερήχων, ο χαρακτηρισμός των ασυνεχειών ορίζεται από το **ISO 23279: 2017**, ενώ προβλέπονται κριτήρια ανοχής με βάση τα πρότυπα **ISO 11666:2018** και **ISO 17640: 2018.**

Αξίζει να σημειωθεί πως διαδοχικές ασυνέχειες οι οποίες χωρίζονται από απόσταση το πολύ ίσης με τη μέγιστη διάστασης της μικρότερης ασυνέχειας λογίζονται ως μία, ενιαία ασυνέχεια.

- Η αντιστοίχιση των επιπέδων ποιότητας μεταξύ των δύο προτύπων (ISO 5817 και ISO 11666 – ISO 17640) ορίζεται στο πρότυπο **ISO 17635: 2016**.

C.3.2. Σύνταξη Αναφοράς

Η εκπόνηση της μεθόδου ελέγχου θα πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αναφορά η οποία θα περιγράφει τα ευρήματα (Εικόνα 10.28). Σε αυτήν περιλαμβάνονται:

- Πληροφορίες για το ελεγχόμενο δοκίμιο (διαστάσεις, υλικό, κατάσταση επιφανείας)
- Σκοπός ελέγχου και χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός (στοιχεία κατασκευαστή και συσκευής)
- Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης (χρησιμοποιούμενες κεφαλές και πρότυπα δοκίμια και αποτελέσματα)
- Περιγραφή εντοπιζόμενων ασυνεχειών και χαρακτηρισμός τους (όπως φαίνεται παρακάτω)

Οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν θα πρέπει να δίνονται συνοδευόμενες από σκαρίφημα, ενώ θα πρέπει να αναγράφεται το είδος τους, το σημείο στο οποίο εντοπίζονται, καθώς και το μέγεθός τους. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στην σελίδα που ακολουθεί.

ULTRASONIC TESTING REPORT					
Inspector		Date		Report No	
		Location		Page No	
Scope of Testing					
Client		Material		Surface Condition	
Project No		Thickness		Surface Temp.	
Item No					
Acceptance lvl					
UT Technique					
Probes					
Probe Angle	0	45	60	70	
Frequency					
Calibration Block					
Ultrasonic Scanning Unit			**Couplant**		
Joint Sketch					
Findings					
Item No	Discontinuity	Length	Distance from point of reference	Evaluation	Remarks

Εικόνα 10.28 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς

[4], [5], [29], [30], [31], [49], [51]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ D: ΟΔΗΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΟΡΗΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΓΡΑΦΙΑΣ

D.1. Αρχές Λειτουργίας και Πεδίο Εφαρμογής

Η φορητή μεταλλογραφία (In-Situ Metallography / Field Metallography) αποτελεί μία ιδιότυπη κατηγορία μη καταστροφικού ελέγχου, η οποία προσφέρει την δυνατότητα παρατήρησης της μικροδομής ενός υλικού είτε στο πεδίο, είτε σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Η λειτουργία της βασίζεται στην προετοιμασία μέρους της επιφανείας του υπό εξέταση δοκιμίου για αποκάλυψη της μικροδομής του, διαδικασία η οποία περιλαμβάνει λείανση, στίλβωση και χημική προσβολή, προκειμένου να παραχθεί μία λεία και επίπεδη επιφάνεια. Η λείανση ακολουθείται από τη χημική προσβολή, με την οποία αναδεικνύονται τα όρια των κόκκων, οι φάσεις των κραμάτων (λ.χ. ο περλίτης στον χάλυβα) και τυχόν εγκλείσματα.

Με την ανωτέρω διεργασία αναδεικνύεται η μικροδομή του υλικού και στο σημείο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί με φορητό μικροσκόπιο. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ρέπλικας, η οποία αποτελεί ένα ακριβές αποτύπωμα της μεταλλογραφίας του δοκιμίου και μπορεί να μεταφερθεί στο εργαστήριο για παρατήρηση και αρχειοθέτηση. Εκτός της μικροδομής, αποτυπώνονται στη ρέπλικα και επιφανειακές ατέλειες του υλικού.

Η περιγραφόμενη διαδικασία υπάγεται στον μη καταστροφικό έλεγχο, καθώς η αλλοίωση των ιδιοτήτων του εξεταζόμενου μέρους εξαιτίας της αφαίρεσης υλικού και της χημικής προσβολής είναι αμελητέα. Εφόσον απαιτείται, θα πρέπει να εφαρμοστεί εκ νέου βαφή της επιφάνειας στα σημεία που αφαιρέθηκε κατά τη λείανση.

D.2. Ασφάλεια και Συνθήκες στο Χώρο Εργασίας

Κατά την προετοιμασία της επιφάνειας ενός υλικού για εξέταση της μικροδομής του εγείρονται ζητήματα ασφαλείας.

Αφενός, κατά τη λείανση της επιφάνειας (ειδικά κατά τα πρώτα, επεμβατικότερα στάδια) εκσφενδονίζονται ρινίσματα μετάλλου και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται προστατευτικά γυαλιά από τον εργαζόμενο.

Αφετέρου, για την χημική προσβολή της εξεταζόμενης επιφανείας χρησιμοποιούνται αντιδρώντα τα οποία χαρακτηρίζονται από πτητικές και καυστικές ιδιότητες, ενώ είναι εύφλεκτα και εκρηκτικά. Απαιτείται η χρήση μέτρων ατομικής προστασίας για την αποφυγή της εισπνοής τους και της επαφής με το δέρμα και τα μάτια, ενώ ο καλός εξαερισμός του χώρου, στον οποίο λαμβάνει χώρα η αντίδραση, είναι απαραίτητος.

D.3. Περιγραφή Διαδικασίας

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μεταλλογραφικού ελέγχου με την παραγωγή ρέπλικας με τον εξοπλισμό του εργαστηρίου.

D.3.1. Προετοιμασία Επιφάνειας

Σε πρώτο στάδιο διενεργείται η λείανση και στίλβωση μέρους της επιφάνειας του εξεταζόμενου μετάλλου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η συσκευή Transpol της Struers. Αυτή παρέχει στον ελεγκτή τη δυνατότητα να προετοιμάσει την επιφάνεια στο πεδίο, εφόσον διατίθεται παροχή ρεύματος.

Διαθέτει κεντρικό διακόπτη ρεύματος και διακόπτη λειτουργίας τροχίσκου, ενώ παρέχει την δυνατότητα επιλογής της ταχύτητας περιστροφής του τελευταίου.

D.3.1.1. Διαχείριση τραχιάς επιφάνειας

Σε πρώτο στάδιο, διενεργείται λείανση του τραχύτερου μέρους της επιφάνειας. Η διαδικασία είναι πιο επεμβατική και αφαιρεί ταχύτερα υλικό.

Εικόνα 10.29 Flapper Wheel

Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο τροχός πτερυγίων (flapper wheel), ο οποίος προσαρμόζεται στο τσοκ της ίσιας επέκτασης της λαβής του τριβείου (Εικόνα 10.29). Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιείται η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του τροχού.

Εφόσον το εξεταζόμενο μηχανολογικό μέρος έχει λεία επιφάνεια χωρίς βαφή, το παρόν στάδιο μπορεί να παραληφθεί.

D.3.1.2. Λείανση

Στη συνέχεια, λειαίνεται η επιφάνεια του μετάλλου. Για αυτό το σκοπό κρίνεται επαρκές να χρησιμοποιηθούν 4 δισκία διαφορετικού grit. Συγκεκριμένα, Grit 60, 120, 240 και 500. Αυτά μπορούν να προσαρμοστούν στις κεφαλές καουτσούκ οι οποίες συνδέονται με την γωνιακή επέκταση της λαβής (Εικόνα 10.30)

Εικόνα 10.30 Γωνιακή επέκταση τρόχισης

Η ταχύτητα περιστροφής ξεκινά μεγάλη και σταδιακά μειώνεται, ενώ εφαρμόζεται ελαφρά πίεση στον τροχό.

Χρησιμοποιείται η εξωτερική επιφάνεια των δίσκων λείανσης.

Μετά το πέρας της διαδικασίας, δεν θα πρέπει να εμφανίζονται παρά μόνο πολύ λεπτές γραμμές στην επιφάνεια.

D.3.1.3. Στίλβωση

Ακολουθεί, η στίλβωση της επιφάνειας (Εικόνα 10.31). Η διαδικασία της στίλβωσης διενεργείται με διάλυμα σωματιδίων διαμαντιού και κάποιο λιπαντικό μέσο. Τα παραπάνω μπορεί να βρίσκονται στο ίδιο διάλυμα ή να προστίθενται ξεχωριστά στην εξεταζόμενη επιφάνεια.

Εικόνα 10.31 Στίλβωση λειασμένης επιφάνειας

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί διάλυμα με σωματίδια διαφορετικής διαμέτρου, ενώ θα πρέπει να συνοδεύεται και από το αντίστοιχο πανί, το οποίο προσαρμόζεται (αντίστοιχα με τις προηγούμενες περιπτώσεις) στις καουτσουκένιες κεφαλές. Σε αυτό το στάδιο, επιλέγονται μικρές ταχύτητες περιστροφής. Για διαφορετικά διαλύματα διαμαντιού χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος τύπος πανιού, ο οποίος για τα προϊόντα του εν προκειμένω κατασκευαστή, φαίνεται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 10.5). Συνήθως αρκεί η στίλβωση με διάλυμα σωματιδίων διαμέτρου 3 μm.

Σημειώνεται πως τα πανάκια θα πρέπει να διατηρούνται σε ξεχωριστό δοχείο προκειμένου να αποφεύγεται η ρύπανσή τους με ξένα στοιχεία, τα οποία ενδέχεται να προσκολληθούν σε αυτά και κατά τη χρήση τους να τραυματίσουν την λειασμένη επιφάνεια.

Πίνακας 10.5 Συνδυασμός πανιού – διαμέτρου σωματιδίων διαλύματος

Cloth	Diamond
DP-Dur / DP-Dac	15 / 6 μm
DP-Mol	3 / 1 μm
DP-Nap	¼ μm

Τελικά, θα πρέπει να προκύπτει λεία επιφάνεια, χωρίς ανωμαλίες, η οποία θα ομοιάζει σε καθρέπτη.

D.3.2. Χημική Προσβολή

Προκειμένου η μικροδομή του υλικού να καταστεί παρατηρήσιμη θα πρέπει να διενεργηθεί χημική προσβολή της προετοιμασμένης (λειασμένης και στιλβωμένης) επιφάνειας (etching). Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται κατάλληλο διάλυμα (αντιδραστήριο) το οποίο δύναται να αποδώσει τα καλύτερα κατά περίπτωση αποτελέσματα. Το ιδανικό διάλυμα για το εκάστοτε υλικό καθώς και ο χρόνος που χρειάζεται να παραμείνει σε αυτό μπορεί να βρεθεί στην διεθνή βιβλιογραφία ή και στα αντίστοιχα πρότυπα των οργανισμών ISO, ASM, κλπ.

Το αντιδραστήριο επαλείφεται με βαμβάκι στην προετοιμασμένη επιφάνεια και στη συνέχεια αφήνεται να δράσει (Εικόνα 10.32). Η διάρκεια που πρέπει να παραμείνει σε αυτή διαφέρει κατά περίπτωση. Ωστόσο, σημειώνεται πως για την παραγωγή ρέπλικας ενδείκνυται η εκτεταμένη χημική προσβολή, η οποία προσφέρει καλύτερη αποτύπωση της μεταλλογραφίας του υλικού. Η διάρκεια της χημικής προσβολής θα πρέπει είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της παρατήρησης μικροδομής απευθείας στο μικροσκόπιο.

Εικόνα 10.32 Χημική Προσβολή με αντιδραστήριο

Το διάλυμα απομακρύνεται με βαμβάκι από την επιφάνεια μετά την πάροδο του ορισμένου για την χημική προσβολή χρόνου. Στη συνεχεία, αυτή διαβρέχεται με αιθανόλη, η οποία αφήνεται να εξατμιστεί, στεγνώνεται με

θερμοπίστολο ή σκουπίζεται με μία μπατονέτα. Σε αυτό το στάδιο, η μέχρι πρότινος κατοπτρική επιφάνεια θα πρέπει να έχει αποκτήσει μία θαμπή όψη.

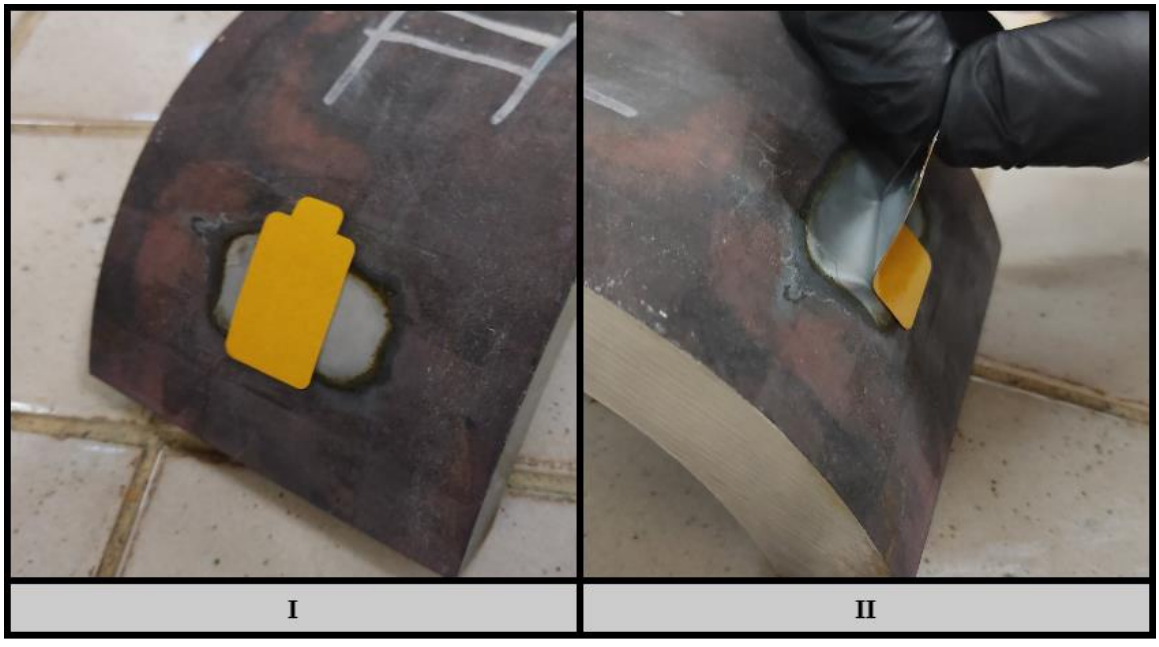
Καθώς είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ιδανική διάρκεια προσβολής του υλικού, κρίνεται σκόπιμο να γίνεται σε στάδια, μεταξύ των οποίων παράγονται ρέπλικες.

D.3.3. Παραγωγή Ρέπλικας

Για την παραγωγή ρέπλικας χρησιμοποιείται ο εξοπλισμός Struers Transcopy. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Απόθεση 1-2 σταγόνων υγρού “Transcopy fluid” στο φιλμ (plastic foil) (Εικόνα 10.33).
2. Αναμονή 10-30 δευτερολέπτων και, προτού εξατμιστεί το υγρό, απόθεσή του στην προετοιμασμένη επιφάνεια (Εικόνα 10.34 – I).
3. Πίεση της ρέπλικας στην επιφάνεια για 30 δευτερόλεπτα.
4. Μετά την πάροδο 3-5 λεπτών, αφαίρεση της ρέπλικας (Εικόνα 10.34 – II) και εφαρμογή της κολλώδους επιφάνειάς της σε γυαλί μικροσκοπίου.

Εικόνα 10.33 Διαβροχή φιλμ



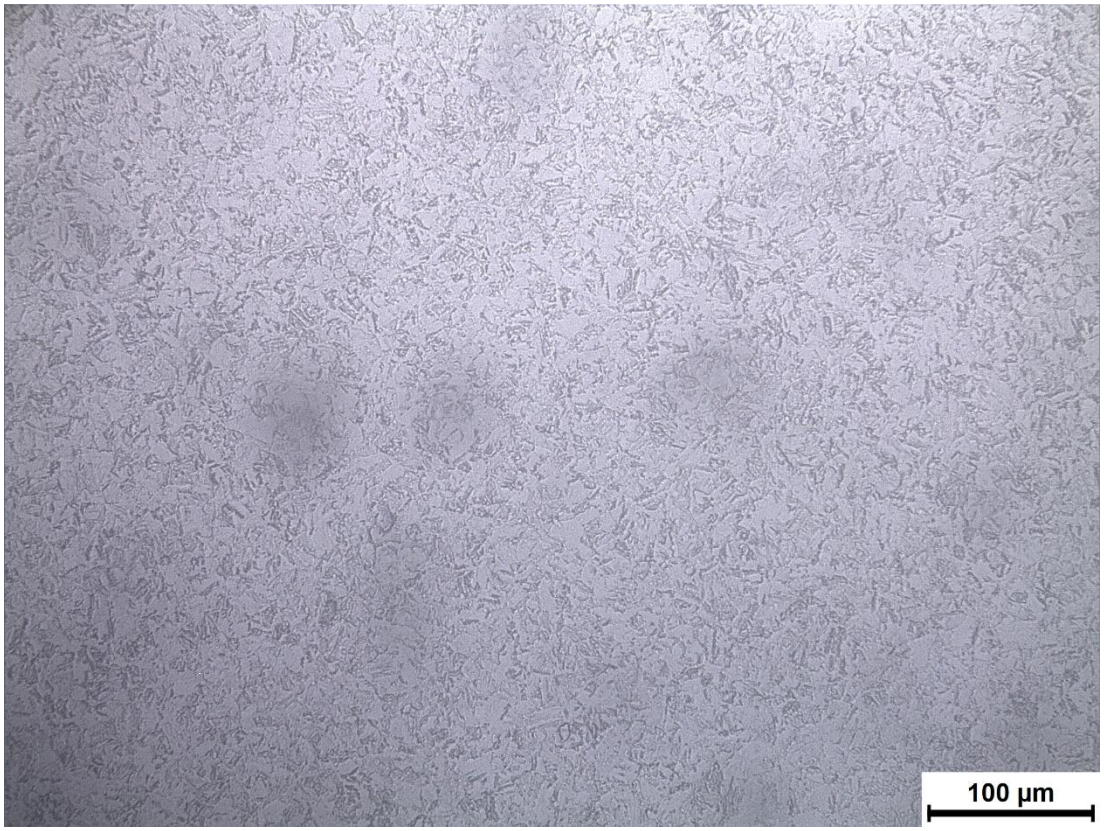
Εικόνα 10.34 (I) Εφαρμογή στην επιφάνεια, (II) Αφαίρεση ρέπλικας μετά την πάροδο ορισμένου χρόνου

D.3.4. Παρατήρηση στο Μικροσκόπιο

Η ρέπλικα μπορεί στη συνέχεια να εξεταστεί στο οπτικό μικροσκόπιο του εργαστηρίου. Εφόσον η προηγούμενη διαδικασία είναι επιτυχής, θα μπορεί να παρατηρηθεί η μικροδομή του υλικού, ώστε να χαρακτηριστεί μεταλλογραφικά (Εικόνα 10.35).

Οι αναζητούμενες ενδείξεις αφορούν:

- Το σχήμα, μέγεθος και προσανατολισμό των κόκκων
- Την μεταλλική φάση (ή φάσεις) παρούσες στο υλικό
- Την παρουσία καρβιδίων
- Τον εντοπισμό πόρων και εγκλεισμάτων



Εικόνα 10.35 Απεικόνιση μικροδομής σε ρέπλικα Struers Transcopy

D.4. Σύνταξη Αναφοράς

Η εκπόνηση της μεθόδου ελέγχου θα πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αναφορά, η οποία θα περιγράφει την ακολουθούμενη διαδικασία και τα ευρήματα. Σε αυτήν περιλαμβάνονται:

- Πληροφορίες για το ελεγχόμενο δοκίμιο (υλικό, κατάσταση επιφανείας, χρόνος και συνθήκες λειτουργίας του).
- Σκοπός ελέγχου και χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός (στοιχεία συσκευής και αναλωσίμων).
- Περιγραφή της διαδικασίας προετοιμασίας της επιφάνειας (στάδια λείανσης / στίλβωσης, αντιδραστήριο και διάρκεια χημικής προσβολής).
- Περιγραφή ευρημάτων, συνοδευόμενη με φωτογραφίες από το μικροσκόπιο.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

[1] International Organization for Standardization. (2021). ISO 3834: Quality requirements for fusion welding of metallic materials.

[2] Παντελής, Δ., Παπάζογλου, Β., & Χαϊδεμενόπουλος, Γ. (2017). Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων. Εκδόσεις Τζιόλα.

[3] Farrar , J., & Dolby, R. (1972). Lamellar tearing in welded steel fabrication. Abington Hall: The Welding Institute.

[4] International Organization for Standardization. (2007). ISO 6520-1: Welding and allied processes — Classification of geometric imperfections in metallic materials, Part 1: Fusion welding.

[5] International Organization for Standardization. (2023). ISO 5817: Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections.

[6] Hellier, C. (2001). HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION.

[7] International Organization for Standardization. (2016). ISO 17637: Non-destructive testing of welds — Visual testing of fusion-welded joints.

[8] Halmshaw , R. (1996). Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints. Abington Publishing.

[9] GENERAL. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from generaltools.com: https://generaltools.com/rugged-video-inspection-camera-borescope-with-3-5-in-screen-and-12mm-probe

[10] FARWEST CORROSION CONTROL COMPANY. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from farwestcorrosion.com: https://www.farwestcorrosion.com/g-a-l-gage-cat-4-bridge-cam-gauge.html

[11] FARWEST CORROSION CONTROL COMPANY. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from farwestcorrosion.com: https://www.farwestcorrosion.com/g-a-l-gage-cat-6-automatic-weld-size-weld-gauge.html

[12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY . (2013). TRAINING GUIDELINES IN NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNIQUES: MANUAL FOR VISUAL TESTING AT LEVEL 2. VIENNA: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY .

[13] Prakash, R. (2012). Non -Destructive Testing Techniques. New Academic Science.

[14] Cartz, L. (1995). Nondestructive testing : radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current . ASM International.

[15] Wikipedia. (2024, Οκτώβριος 16). Retrieved from wikipedia.org: https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action

[16] American Society for Nondestructive Testing. (1979). Nondestructive testing : liquid penetrant : classroom training handbook. American Society for Nondestructive Testing.

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (2000). Liquid Penetrant and Magnetic Particle Testing at Level 2. Retrieved from iaea.org: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-11.pdf

[18] NDT Supply.com, Inc. (2024, Οκτώβριος). CHAPTER 2 LIQUID PENETRANT INSPECTION METHOD. Retrieved from ndtsupply.com: https://content.ndtsupply.com/media/Dye-%20Penetrant-USAF-Tech-Manual-NR.pdf

[19] Μοίρας, Π. (2024, Οκτώβριος). Educational Mentoring & Coaching. Retrieved from pmoiras.weebly.com: https://pmoiras.weebly.com/uploads/4/2/4/0/42405031/%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%87%CE%BF%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CE%AE_%CE%A6%CE%B1%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%B1.pdf

[20] JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from johnsonandallen.co.uk: https://www.johnsonandallen.co.uk/product/penetrant-inspection-line

[21] International Organization for Standardization. (2021). ISO 3452-2: Non-destructive testing — Penetrant testing, Part 2: Testing of penetrant materials.

[22] International Organization for Standardization. (n.d.). ISO 3452: Non-destructive testing — Penetrant testing.

[23] NDT Supply.com, Inc. (2024, Οκτώβριος). CHAPTER 3 MAGNETIC PARTICLE INSPECTION METHOD. Retrieved from https://ndtsupply.com/: https://content.ndtsupply.com/media/Magnetic%20Partice-USAF-Tech-Manual-NR.pdf

[24] JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from johnsonandallen.co.uk: https://www.johnsonandallen.co.uk/product/pistol-prods-mpi-power-pack

[25] JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from johnsonandallen.co.uk: https://www.johnsonandallen.co.uk/product/mbu-mpi-bench-unit

[26] JOHNSON & ALLEN - ndt experts since 1938. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from johnsonandallen.co.uk: https://www.johnsonandallen.co.uk/product/mc260-ac-demagnetizer-coil

[27] International Organization for Standardization. (n.d.). ISO 9934: Non-destructive testing — Magnetic particle testing.

[28] Πρασιανάκης, Ι. (2002). Μη καταστροφικοί έλεγχοι : η μεθοδος των υπερήχων. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[29] International Organization for Standardization. (2017). ISO 22825: Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Testing of welds in austenitic steels and nickel-based alloys.

[30] International Organization for Standardization. (2017). ISO 23279: Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Characterization of discontinuities in welds.

[31] International Organization for Standardization. (2018). ISO 17640: Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Techniques, testing levels, and assessment.

[32] ONE STOP NDT. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from onestopndt.com: https://www.onestopndt.com/ndt-articles/radiography-testing

[33] TiaT Europe - NDT Inspection, Training & Engineering. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from https://tiat.nl: https://tiat.nl/en/inspections/aerospace-inspections/wervelstroom-onderzoek-2/

[34] NASA. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from nasa.gov: https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/white-sands/acoustic-emissions-ae-testing/

[35] Vander Voort, G. (2004). Metallography and Microstructures, Volume 9. ASM INTERNATIONAL.

[36] Bruce, T., Hyatt, C., & Kavanaugh, T. (1996). REPLICATION FOR FIELD METALLOGRAPHIC EXAMINATION. Canada: National Defence, Research and Development Branch.

[37] Χρυσουλάκης, Γ., & Παντελής, Δ. (2008). Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

[38] Struers. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from struers.com: https://www.struers.com/en/Products/Grinding-and-Polishing/Grinding-and-polishing-equipment/TransPol#

[39] Struers. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from struers.com: https://www.struers.com/en/Products/Electrolytic-Preparation/Electrolytic-equipment/MoviPol

[40] Marder, A. (1989). Replication Microscopy Techniques for NDE. Energy Research Center, Lehigh University .

[41] EIWAA. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from eiwaagroup.com: https://eiwaagroup.com/service/marine-non-destructive-testing-ndt-testing-uae/

[42] American Bureau of Shipping. (2022). Requirements for Materials and Welding for Stainless Steels. American Bureau of Shipping.

[43] IACS. (2021). Guidelines for non-destructive testing of hull and machinery steel forgings . International Association of Classification Societies.

[44] Indian Register of Shipping. (2021). CLASSIFICATION NOTES: Requirements for Non-Destructive Testing. Indian Register of Shipping.

[45] American Bureau of Shipping. (2020). Guide for Nondestructive Inspection.

[46] American Bureau of Shipping. (2024). Rules for Survey After Construction. American Bureau of Shipping.

[47] WESTERN CENTRAL LABORATORY. (2024, Οκτώβριος). Retrieved from wcl.lt: https://wcl.lt/en/activities-list/ultrasonic-thickness-measurement-utm/

[48] International Organization for Standardization. (2015). ISO 23277: Non-destructive testing of welds — Penetrant testing — Acceptance levels.

[49] International Organization for Standardization. (2016). ISO 17635: Non-destructive testing of welds — General rules for metallic materials.

[50] International Organization for Standardization. (2015). ISO 23278: Non-destructive testing of welds — Magnetic particle testing — Acceptance levels.

[51] International Organization for Standardization. (2018). ISO 11666: Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Acceptance levels.

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 2.1 Ενδοσκόπιο Κάμερας 22
Εικόνα 2.2 Bridge Cam Gauge 23
Εικόνα 2.3 V-WAC Single Weld Gauge 23
Εικόνα 3.1 Γωνίες συνεπαφής (οξεία και αμβλεία) 30
Εικόνα 3.2 Γωνία συνεπαφής στα κάθετα τοιχώματα δοχείου 30
Εικόνα 3.3 Επίδραση γωνίας συνεπαφής στη στάθμη υγρού σε σωλήνα μικρής οπής 31
Εικόνα 3.4 Μεταβολή στάθμης υγρού σε "ανοιχτό" και "κλειστό" σωλήνα 31
Εικόνα 3.5 Φούρνος από γραμμή ελέγχου σταθερής εγκατάστασης 34
Εικόνα 3.6 (I) Ανεπαρκής προκαταρκτικός καθαρισμός δοκιμίου, (II) Εύρημα κατόπιν επανάληψης του ελέγχου μετά από σχολαστικότερο καθαρισμό 36
Εικόνα 3.7 (I) Αρχική οπτική ένδειξη γραμμικής ατέλειας, (II) Επιβεβαίωση ύπαρξης ρωγμής με εφαρμογή της μεθόδου 37
Εικόνα 3.8 Αποτέλεσμα εναπομείνασας υγρασίας 38
Εικόνα 3.9 (I) Ρωγμή στον πόδα, (II) Ρωγμή στη ρίζα, (III) Εγκάρσια ρωγμή στη ραφή, (IV) Επιφανειακό πορώδες 39
Εικόνα 4.1 Στάδια παραγωγής διαγράμματος βρόχου υστέρησης 44
Εικόνα 4.2 Βρόχος μαγνητικής υστέρησης 44
Εικόνα 4.3 Βρόχος Υστέρησης: (I) Μαγνητικώς μαλακού υλικού, (II) Μαγνητικώς σκληρού υλικού 45
Εικόνα 4.4 Διαρροή μαγνητικού πεδίου 46
Εικόνα 4.5 Ακροδέκτες (pistol prods) Πηγή: Johnson & Allen NDT [johnsonandallen.co.uk] 47
Εικόνα 4.6 Μονάδα πάγκου 48
Εικόνα 4.7 Πεταλοειδής ηλεκτρομαγνήτης (yoke) 49
Εικόνα 4.8 Πηνίο εναλλασσόμενου ρεύματος 49
Εικόνα 4.9 (I) Αρχική οπτική ένδειξη γραμμικής ατέλειας, (II), (III) Επιβεβαίωση ύπαρξης ρωγμής με εφαρμογή της μεθόδου 52
Εικόνα 4.10 (I) Στρώση βαφής υπερβολικού πάχους, (II) Αποκάλυψη ασυνέχειας που απέκρυπτε με επανάληψη της μεθόδου 53
Εικόνα 4.11 (I) Διάφορες ενδείξεις στη ραφή αυχενικής συγκόλλησης, (II) Απομόνωση της σχετικής ένδειξης 54
Εικόνα 4.12 (I) Ρωγμή στον πόδα, (II) Εγκάρσια ρωγμή στη ραφή, (III) Ρωγμή στη ρίζα, (IV) Ατελής τήξη 55
Εικόνα 5.1 Διάδοση διαμήκους κύματος 60
Εικόνα 5.2 Διάδοση εγκάρσιου κύματος 60
Εικόνα 5.3 Ζώνες ηχητικής δέσμης 62
Εικόνα 5.4 Γωνίες ανάκλασης και διάθλασης 63
Εικόνα 5.5 Περίθλαση ηχητικού κύματος 63
Εικόνα 5.6 Κλιμακωτό δοκίμιο VW 68
Εικόνα 5.7 Δοκίμιο βαθμονόμησης IIW-Type 1 69
Εικόνα 5.8 Miniature angle beam block 69
Εικόνα 5.9 Προσέγγιση ρωγμής από δύο πλευρές (I και II) 72
Εικόνα 5.10 Προσέγγιση ασυνέχειας ατελούς τήξης από δύο πλευρές (I και II) 72
Εικόνα 6.1 Ραδιογραφικός Έλεγχος 76
Εικόνα 6.2 Eddy Current Testing 78
Εικόνα 6.3 Έλεγχος με ακουστική εκπομπή σε δοχείο πιέσεως από σύνθετο υλικό 80
Εικόνα 7.1 Μικροδομή χάλυβα P91 αποτυπωμένη σε ρέπλικα. Αποτελείται από φερρίτη, καρβίδια του χρωμίου και νησίδες περλίτη. 85
Εικόνα 7.2 Συσκευή λείανσης 86
Εικόνα 7.3 Συσκευή ηλεκτρολυτικής στίλβωσης 86

Εικόνα 7.4 Ρέπλικα επιφανείας - οξικού άλατος: Struers Transcopy Replica Foil 87
Εικόνα 7.5 Συσκευή Struers Transpol 88
Εικόνα 7.6 Προετοιμαζόμενη επιφάνεια (I) Μετά τη στίλβωση, (II) Μετά τη χημική προσβολή 89
Εικόνα 7.7 Ρέπλικα υπό μορφοποίηση, τοποθετημένη σε προετοιμασμένη επιφάνεια 90
Εικόνα 8.1 Μαγνητικός έλεγχος συγκόλλησης γάστρας 93
Εικόνα 8.2 Παχυμέττρηση ελάσματος με συσκευή υπερήχων 94
Εικόνα 10.1 Ανύψωση ρευστού σε τριχοειδή σωλήνα 98
Εικόνα 10.2 Γωνίες συνεπαφής 98
Εικόνα 10.3 Χώρος εργασίας 99
Εικόνα 10.4 Στάδια ελέγχου με διεισδυτικά υγρά 99
Εικόνα 10.5 (I) Διεισδυτής TIEDE-PEN, (II) Περιοχή εφαρμογής 100
Εικόνα 10.6 (I) Απόπλυση πλεονάσματος διεισδυτή, (II) Στέγνωμα επιφάνειας 101
Εικόνα 10.7 (I) Εμφανιστής TIEDE-PEN, (II) Εφαρμογή εμφανιστή 101
Εικόνα 10.8 Εντοπισμός ενδείξεων επιφανειακού πορώδους 102
Εικόνα 10.9 (I) Καθαριστικό, (II) Εφαρμογή στα σημεία παραμονής διεισδυτή 102
Εικόνα 10.10 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς 105
Εικόνα 10.11 Διαρρέον μαγνητικό πεδίο σε ρωγμή 106
Εικόνα 10.12 Χώρος Εργασίας 107
Εικόνα 10.13 Εφαρμογή βαφής υποστρώματος 108
Εικόνα 10.14 (I) AC Yoke, (II) Εξέταση της συγκόλλησης 109
Εικόνα 10.15 Ένδειξη ρωγμής στον πόδα της συγκόλλησης 109
Εικόνα 10.16 Καθαρισμός βαφής υποστρώματος με ακετόνη 111
Εικόνα 10.17 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς 114
Εικόνα 10.18 Συσκευή υπερήχων Pocket UT 116
Εικόνα 10.19 Διαδρομή γωνιακής δέσμης κάθετης πρόσπτωσης στο σώμα της συγκόλλησης 116
Εικόνα 10.20 Διαδρομή δέσμης για εξέταση της ρίζας 117
Εικόνα 10.21 Διαδρομή δέσμης για εξέταση του καπακιού 117
Εικόνα 10.22 Σκαρίφημα θέσεων Half Skip και Full Skip 117
Εικόνα 10.23 119
Εικόνα 10.24 Δοκίμιο βαθμονόμησης VW 119
Εικόνα 10.25 Δοκίμιο βαθμονόμησης IIW - Type 1 121
Εικόνα 10.26 Τοποθέτηση για προσδιορισμό σημείου εξόδου δέσμης 122
Εικόνα 10.27 Τοποθέτηση για βαθμονόμηση συσκευής 122
Εικόνα 10.28 Ενδεικτική φόρμα αναφοράς 129
Εικόνα 10.29 Flapper Wheel 131
Εικόνα 10.30 Γωνιακή επέκταση τρόχισης 131
Εικόνα 10.31 Στίλβωση λειασμένης επιφάνειας 132
Εικόνα 10.32 Χημική Προσβολή με αντιδραστήριο 132
Εικόνα 10.33 Διαβροχή φιλμ 133
Εικόνα 10.34 (I) Εφαρμογή στην επιφάνεια, (II) Αφαίρεση ρέπλικας μετά την πάροδο ορισμένου χρόνου 133
Εικόνα 10.35 Απεικόνιση μικροδομής σε ρέπλικα Struers Transcopy 134

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Κατηγοριοποίηση Ρωγμών κατά ISO 6520-1 14
Πίνακας 2.1 Εξέταση κατά την προετοιμασία της συγκόλλησης..... 24
Πίνακας 2.2 Γεωμετρική εξέταση προφίλ συγκόλλησης 25
Πίνακας 2.3 Εργαλεία εξέτασης ατελειών συγκόλλησης..... 26
Πίνακας 5.1 Υπολογισμός Half & Full Skip 70
Πίνακας 5.2 Απεικονίσεις ατελειών 71
Πίνακας 5.3 Διάκριση ασυνεχειών ρίζας συγκόλλησης 73
Πίνακας 10.1Συσχέτιση πάχους δοκιμίου και γωνίας αισθητήρα 116
Πίνακας 10.2 Ρύθμιση παραμέτρων υλικού και κεφαλής 122
Πίνακας 10.3 Χαρακτηριστικά ενδείξεων διαφορετικών ασυνεχειών 124
Πίνακας 10.4 Χαρακτηριστικά μορφής ενδείξεων ασυνεχειών 126
Πίνακας 10.5 Συνδυασμός πανιού – διαμέτρου σωματιδίων διαλύματος..... 132