ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΣΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ

Παναγιώτης Χατζηφώτης

Επιβλέπων Καθηγητής: καθ. Ευάγγελος Χριστοφόρου

ΑΘΗΝΑ ΜΑΡΤΙΟΣ 2013

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου. Σαν πιο διαδεδομένες μπορούμε να αναφέρουμε τις μεθόδους με υπερήχους, τις μεθόδους με δινορρεύματα καθώς και τις μεθόδους με ακτίνες x και γ. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου, η θεωρία των κυμάτων και των υπερήχων, οι μέθοδοι και οι τεχνικές ενός υπερηχητικού ελέγχου καθώς και ο απαραίτητος εξοπλισμός που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου με υπέρηχο. Συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση ατελειών όπως ρωγμές, πόροι και εγκλείσματα, σε σιδηροτροχιές και ελάσματα πλοίου, με τη μέθοδο των υπερήχων. Ο έλεγχος με υπέρηχο έχει πλήθος εφαρμογών σε διάφορους τομείς και ανήκει στις μη επιφανειακές τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου καθώς μπορεί να εντοπίσει μια ατέλεια σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο των πέντε χιλιοστών. Πραγματοποιήθηκαν παχυμετρήσεις με συσκευή υπερήχων σε σιδηροτροχιές και ελάσματα πλοίου, με τη χρήση κάθετων διπλών κεφαλών και στη συνέχεια έγινε έλεγχος των δειγμάτων και των συγκολλήσεων που υπήρχαν στα δείγματα αυτά, με τη χρήση γωνιακών κεφαλών. Οι σιδηροτροχιές στις οποίες έγινε έλεγχος προέρχονται από το metro της Αθήνας. Η μελέτη και ο έλεγχος των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών του Ε.Κ.ΕΦ.Ε. Δημόκριτος. Τέλος, έγινε παρακολούθηση σεμιναρίου για τον τρόπο και τις συνθήκες που πρέπει να γίνεται ο έλεγχος με υπέρηχο στο metro από πιστοποιημένο προσωπικό και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος σε υποσταθμό του metro. Οι μετρήσεις του συγκεκριμένου ελέγχου δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Abstract

A large number of crack detection techniques, which are applied on metallic items have been developed. We can refer to the most widespread of them which are ultrasonic methods, the gamma and x-ray methods and eddy current methods. The most important methods of non-destructive testing, the theory of waves and ultrasound, the methods and techniques of an ultrasonic inspection and the necessary equipment needed to perform the inspection presented in this thesis. This Master's thesis deals with the non destructive testing by ultrasound. Specifically the purpose of the task is the finding of defects, such as cracks, breakdowns and inclusions in railroads and ship's plates, by ultrasounds. Ultrasonic testing has a large number of appliances in many areas and belongs to the non surface methods of non destructive testing. This is due to the fact, that this method can detect a defect which is below than or equal to five millimeters in dept. Initially, the thickness of railroads and ship's plates was measured by ultrasound devices using straight beam transducers and then the weldings of these samples were checked by using angle beam transducers. The railroads that were subjected to control come from Athens metro station. The research and inspection of the samples were done by the National Research Centre of Science Demokritos. Finally, it has been accomplished the attendance of a seminar which explained the way and the conditions under which the ultrasound testing should be applied in metro. The seminar was held by certified personnel including and the control process that took place in a metro's substation. The measurements of this specific control are not included in this Master's thesis.

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος κατά το διάστημα Οκτώβριος 2012 – Μάρτιος 2013. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθηγητή του ΕΜΠ κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την καθοδήγηση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Ινστιτούτου για το δημιουργικό και ευχάριστο περιβάλλον που έχουν δημιουργήσει. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γιώργο Διαμαντόπουλο, επιστημονικό συνεργάτη του Ινστιτούτου, για την άψογη συνεργασία και για την πολύτιμη βοήθειά του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Βουρνά Πολυξένη, υποψήφια διδάκτωρ, για την σημαντική βοήθεια καθώς και για τις χρήσιμες συμβουλές και υποδείξεις.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 11

1.1 Σκοπός Εργασίας 11

1.2 Δομή Εργασίας 11

2 Στοιχεία Θεωρίας 12

2.1 Καταστροφικοί και μη – Καταστροφικοί Μέθοδοι χαρακτηρισμού υλικών 12

2.1.1 Καταστροφικές Μέθοδοι (Destructive Testing) 12

2.1.2 Μη - Καταστροφικές μέθοδοι 12

2.2 Θεωρία κυμάτων 26

2.2.1 Γενικές έννοιες 26

2.2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη για την περιγραφή των κυμάτων 27

2.2.3 Είδη κυμάτων 28

2.2.4 Ηχητικά κύματα 33

2.3 Μη Καταστροφική Μέθοδος με Υπέρηχους 39

2.3.1 Εισαγωγή 39

2.3.2 Συσκευή υπερήχων 41

2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων 45

2.3.4 Ακουστική αντίσταση (Acoustic impedance) 45

2.3.5 Αποδυνάμωση του ήχου (Attenuation) 46

2.3.6 Υλικό σύζευξης (Couplant) 46

2.3.7 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο 46

2.3.8 Κατηγορίες κεφαλών 49

2.3.9 Επιλογή κεφαλής 53

2.3.10 Μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου 54

2.3.11 Τύποι σαρώσεων 57

2.3.12 Σάρωση τύπου A 58

2.3.13 Σάρωση τύπου B 58

2.3.14 Σάρωση τύπου C 59

2.3.15 Τρόποι σάρωσης με κεφαλές 0^0 59

2.3.16 Σάρωση με κάθετη κεφαλή – Βαθμονόμιση 60

2.3.17 Σάρωση με γωνιακές κεφαλές – Βαθμονόμηση 60

2.3.18 Παχυμέτρηση 61

2.3.19 Έλεγχος συγκολλήσεων 62

3 Πειραματικό μέρος 68

3.1 Συσκευή υπερήχων 68

3.2 Βαθμονόμηση της συσκευής υπερήχων 69

3.2.1 Γενικά 69

3.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης της συσκευής υπερήχων 70

3.2.3 Κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των δοκιμίων 72
3.2.4 Μέσω σύζευξης 73

3.3 Έλεγχος με υπέρηχο σε σιδηροτροχιές και ελάσματα πλοίου 73
3.3.1 Σιδηροτροχιές 73
3.3.2 Συγκολλήσεις σιδηροτροχιών 76
3.3.3 Έλεγχος δειγμάτων σιδηροτροχιών με υπέρηχο 77
3.3.4 Ελάσματα πλοίου 85

4 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία 91

5 Βιβλιογραφία..... 92

6 Παράρτημα Α .....

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1: Χρήση της Ραδιογραφίας ακτινών-Χ σε αντικείμενα από μέταλλο και κεραμικό **14**
Εικόνα 2-2: *Ραδιογραφικός έλεγχος συγκόλλησης.* **15**
Εικόνα 2-3: *Τομογραφία ακτίνων Χ σε ψηφιακό κύκλωμα.* **15**
Εικόνα 2-4: *Έλεγχος με υπέρηχους.* **16**
Εικόνα 2-5: *Εντοπισμός ατελειών με τη χρήση υπερήχων (A scan).* **17**
Εικόνα 2-1: *Εκπομπή και ανίχνευση ακουστικών κυμάτων.* **17**
Εικόνα 2-7: *Έλεγχος σωλήνων με τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής.* **18**
Εικόνα 2-8: *Δινορρεύματα επαγόμενα σε αγώγιμο υλικό από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο* **19**
Εικόνα 2-9: *Έλεγχος συγκόλλησης με τη χρήση δινορρευμάτων.* **20**
Εικόνα 2-10: *Εμφάνιση και ανίχνευση με τη χρήση διεισδυτικών υγρών.* **20**
Εικόνα 2-11: *Εφαρμογή της μεθόδου διεισδυτικών υγρών.* **21**
Εικόνα 2-12: *Οπτική εξέταση σωλήνων* **22**
Εικόνα 2-13: *Κατανομή μαγνητικής ροής γύρω από ασυνέχεια* **23**
Εικόνα 2-14: *Εφαρμογή της μεθόδου μαγνητικών σωματιδίων για τον εντοπισμό ρωγμών.* **23**
Εικόνα 2-14: *Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος της καμπύλης μαγνήτισης.* **24**
Εικόνα 2-14: *Κεντρική μονάδα τροφοδοσίας σήματος και επεξεργασίας δεδομένων. Κεφαλή της διάταξης Barkhausen.* **25**
Εικόνα 2-14: *Εύρεση ρωγμών με τη μέθοδο της θερμογραφίας.* **26**
Εικόνα 2-14: *Εφαρμογή της μεθόδου ολογραφίας.* **26**
Εικόνα 2-19: *Στιγμιότυπο ενός κύματος όπου απεικονίζεται η ταλάντωση των μορίων και το μήκος κύματος.* **28**
Εικόνα 2-20: *Διαμήκη κύματα.* **29**
Εικόνα 2-21: *Εγκάρσια κύματα.* **29**
Εικόνα 2-22: *Επιφανειακό κύμα.* **30**
Εικόνα 2-23: *Διάταξη γωνιακών κεφαλών για τον έλεγχο με υποεπιφανειακά κύματα.* **30**
Εικόνα 2-24: *Κύματα Lamp.* **31**
Εικόνα 2-25: *Δημιουργία κύματος πλάκας με διάθλαση.* **31**
Εικόνα 2-26: *Περίθλαση κύματος.* **34**
Εικόνα 2-27: *Διάθλαση κυμάτων.* **37**
Εικόνα 2-28: *Σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και των σχετικών πλατών των διαθλώμενων εγκαρσίων, διαμηκών και επιφανειακών κυμάτων.* **38**
Εικόνα 2-29: *Ακουστικό φάσμα.* **39**
Εικόνα 2-30: *Εύρεση ατελειών με υπέρηχο* **39**
Εικόνα 2-28: *Συσκευή Υπερήχων.* **41**
Εικόνα 2-29: *Διάταξη συσκευής υπερήχων.* **42**
Εικόνα 2-30: *Γενικά χαρακτηριστικά της δέσμης υπερήχων.* **42**
Εικόνα 2-31: *Δέσμη υπερήχων.* **43**
Εικόνα 2-32: *Τρεις ζώνες της δέσμης υπερήχων.* **44**
Εικόνα 2-33: *Πλευρικοί λοβοί.* **44**
Εικόνα 2-34: *Υλικό σύζευξης.* **46**
Εικόνα 2-35: *Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο* **47**

Εικόνα 2-36: *Τυπική δομή κρυστάλλου.* **48**
Εικόνα 2-37: *Χαρακτηριστικά κεφαλής υπερήχων* **48**
Εικόνα 2-38: *Κεφαλές υπερήχων.* **49**
Εικόνα 2-39: *Κάθετες κεφαλές υπερήχων.* **49**
Εικόνα 2-40: *Δίδυμες κεφαλές υπερήχων.* **50**
Εικόνα 2-41: *Γωνιακές κεφαλές υπερήχων.* **50**
Εικόνα 2-42: *Κεφαλές μαλακού άκρου υπερήχων.* **51**
Εικόνα 2-43: *Κεφαλές Delay Line υπερήχων.* **51**
Εικόνα 2-44: *Ενισχυμένες κεφαλές υπερήχων.* **51**
Εικόνα 2-45: *Κεφαλές εμβάπτισης υπερήχων.* **52**
Εικόνα 2-46: *Κεφαλές υψηλής συχνότητας υπερήχων.* **52**
Εικόνα 2-47: *Τεχνική παλμού-ηχούς.* **55**
Εικόνα 2-48: *Τεχνική διέλευσης.* **55**
Εικόνα 2-49: *Τεχνική δίδυμων κεφαλών.* **56**
Εικόνα 2-50: *Δοκιμή με καταβύθιση.* **57**
Εικόνα 2-51: *Παραδείγματα σαρώσεων.* **58**
Εικόνα 2-52: *Σάρωση τύπου Α.* **58**
Εικόνα 2-53: *Σάρωση τύπου Β.* **59**
Εικόνα 2-54: *Σάρωση τύπου C.* **59**
Εικόνα 2-55: *Τρόποι σάρωσης με κεφαλές 0^0* **60**
Εικόνα 2-56: *Δοκίμιο V2 Block.* **61**
Εικόνα 2-56: *Παχυμέτρηση με χρήση υπερήχων.* **61**
Εικόνα 2-56: *Παχυμέτρηση με κάθετη διπλή κεφαλή* **61**
Εικόνα 2-59: *Ρωγμές σε συγκολλήσεις* **63**
Εικόνα 2-60: *Έλεγχος συγκόλλησης.* **64**
Εικόνα 2-61: *Έλεγχος συγκόλλησης.* **64**
Εικόνα 2-62: *Σχήμα και μέγεθος σήματος.* **66**
Εικόνα 2-63: *Σήματα μεγάλου εύρους και οξείας μορφής, καταδεικνύουν λείους και επίπεδους ανακλαστήρες όπως τα μεγάλα επίπεδα σφάλματα που είναι κάθετα στη δέσμη των υπερήχων.* **66**
Εικόνα 2-64: *Φαινόμενο διασκορπισμού.* **67**
Εικόνα 2-65: *Πόροι και εγκλείσματα.* **67**
Εικόνα 3-1: *Πόροι και εγκλείσματα OLYMPUS EPOCH 4PLUS NDT-Panametrics* **68**
Εικόνα 3-2: *Γεωμετρία δοκιμίου V2* **69**
Εικόνα 3-3: *Η θέση της κεφαλής κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης* **70**
Εικόνα 3-4: *Οθόνη συσκευής υπερήχων.* **70**
Εικόνα 3-5: *Η θέση της κεφαλής κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.* **71**
Εικόνα 3-6: *Οθόνη συσκευής υπερήχων.* **72**
Εικόνα 3-7: *Δίδυμη κεφαλή* **72**
Εικόνα 3-7: *Γωνιακές κεφαλές α)45^0,β) 60^0 και γ) 70^0* **73**
Εικόνα 3-7: *Υλικό σύζευξης* **73**
Εικόνα 3-10: *Σιδηροτροχιές.* **74**
Εικόνα 3-11: *Αστοχία του υλικού εξαιτίας των κύκλων φόρτισης κατά την κόπωση* **74**
Εικόνα 3-12: *Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής σιδηροτροχιάς UIC54* **75**
Εικόνα 3-13: *Δομικά μέρη σιδηροτροχιάς.* **76**
Εικόνα 3-14: *Σιδηροτροχιές που συνδέονται με βιδωτούς αρμούς.* **76**
Εικόνα 3-15: *Σιδηροτροχιές πριν από τη διαδικασία της συγκόλλησης.* **76**

Εικόνα 3-16: *Συγκόλληση σιδηροτροχιών με τη μέθοδο της αλουμινοθερμικής.* **.....77**
Εικόνα 3-17: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά No1)* **.....78**
Εικόνα 3-18: *Παχυμέτρηση με κάθετη κεφαλή.* **.....79**
Εικόνα 3-19: *Έλεγχος συγκόλλησης με γωνιακή κεφαλή 45^0.* **.....79**
Εικόνα 3-20: *Έλεγχος συγκόλλησης με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών.* **.80**
Εικόνα 3-21: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά No2)* **.....80**
Εικόνα 3-21: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά No3)* **.....81**
Εικόνα 3-21: *Λόγοι πλευρών τριγώνων* **.....83**
Εικόνα 3-24: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά No4)* **.....84**
Εικόνα 3-25: *Αλουμινοθερμική συγκόλληση σιδηροτροχιάς.* **.....85**
Εικόνα 3-26: *Συγκολλημένα ελάσματα πλοίου* **.....86**
Εικόνα 3-27: *Εικόνα Συγκόλληση τύπου V.* **.....86**
Εικόνα 3-28: *Μορφολογία συγκόλλησης* **.....86**
Εικόνα 3-29: *Παχυμέτρηση σε διαβρωμένο έλασμα πλοίου* **.....88**
Εικόνα 3-30: *Ζώνη τήξης της συγκόλλησης* **.....89**

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία και συντήρηση κάθε εξαρτήματος και κατασκευής. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να εντοπίσουμε την ύπαρξη ατελειών, να προβλέψουμε τη επέκταση τυχόν ρωγμών και να υπολογίσουμε τον κίνδυνο αστοχίας του υλικού με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων.

1.2 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από εφτά κεφάλαια. Ακολουθεί σύντομη αναφορά στο περιεχόμενο του καθενός.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται αρχικά κάποιες βασικές έννοιες του μη καταστροφικού ελέγχου και στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι σημαντικότερες μέθοδοι. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα είδη και οι ιδιότητες των κυμάτων. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται η θεωρία των υπερήχων, η αρχή λειτουργίας της συσκευής υπερήχων, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, οι κεφαλές που εκπέμπουν τη δέσμη υπερήχων, οι μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου και οι τρόποι σάρωσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι παράμετροι και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον έλεγχο με υπέρηχο σε σιδηροτροχιές και τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπερηχητικό έλεγχο σε ελάσματα πλοίου και τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη αξιολόγηση της συμβολής της διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται τα σημεία που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας. Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας αναφέρεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2 Στοιχεία Θεωρίας

2.1 Καταστροφικοί και Μη Καταστροφικοί Μέθοδοι χαρακτηρισμού υλικών

Για κάθε υλικό ή κατασκευή, η ανίχνευση εσωτερικών ή εξωτερικών ελαττωμάτων που είναι οι κύριες αιτίες αστοχίας τους, συνεπάγεται ποιοτικό έλεγχο με Καταστροφικές και Μη Καταστροφικές Μεθόδους (ΜΚΜ). Με τη χρήση του απαραίτητου εξοπλισμού οι έλεγχοι πραγματοποιούνται από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό και αφορούν τη διάγνωση της κατάστασης του υλικού και σε περιπτώσεις διάγνωσης αστοχίας, την αντικατάστασή του.

2.1.1 Καταστροφικές Μέθοδοι (Destructive Testing)

Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι καταστροφικές μέθοδοι (DT) απαιτούν την καταστροφή τμήματος του υλικού προκειμένου να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητές του, όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα και η σκληρότητα.

Ορισμένοι τύποι των καταστρεπτικών δοκιμών:

- Δοκιμές εφαρμογής μηχανικής τάσης στο υπό εξέταση υλικό (stress tests)
- Δοκιμές σκληρότητας (hardness tests)
- Μικρογραφικός - Μικροδομικός έλεγχος (microstructure tests)
- Charpy Impact Testing
- Χημικές Αναλύσεις (Chemical Analysis)
- Stress Rupture Testing

2.1.2 Μη - Καταστροφικές μέθοδοι (Non Destructive Testing)

Ο μη καταστροφικός έλεγχος (ΜΚΕ) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους ελέγχου ασφαλείας υλικών και κατασκευών. Ως μη καταστροφικός έλεγχος θεωρείται η εξέταση ενός αντικειμένου με τεχνολογίες οι οποίες δεν επηρεάζουν τη μελλοντική χρησιμότητα του.

Κύριος στόχος του είναι ο εντοπισμός ατελειών στη δομή του υλικού που οδηγούν στην αστοχία του και σε βλάβη της κατασκευής στην οποία ανήκει. Παραδείγματα τέτοιων ατελειών είναι οι ρωγμές, η ύπαρξη πόρων και εγκλεισμάτων στο εσωτερικό του υλικού, η διάβρωση, η αποκόλληση επιφανειών σε σύνθετα υλικά κλπ.

Επίσης, οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της δομής και της σύνθεσης του υλικού, για τον υπολογισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του

υλικού καθώς και για τον προσδιορισμό αρκετών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού όπως η σκληρότητα, η ελαστικότητα, η αγωγιμότητα, και η αντοχή.

Οι ΜΚΕ συνήθως υπαγορεύονται από διεθνή πρότυπα και ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και διαδικασίες ενώ εκτελούνται από εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό.

Τα πρότυπα, οι κανονισμοί και οι κώδικές καλύπτουν όλο το φάσμα της εφαρμογής των ΜΚΕ στην βιομηχανία και στις κατασκευές.

Η ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων ΜΚΕ των υλικών. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι έχουν μεγάλη απήχηση σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας και εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις, του σχεδιασμού, της κατασκευής και της συντήρησης ενός προϊόντος. Αποτελούν απαραίτητο εργαλείο για τον ποιοτικό έλεγχο και τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας κατασκευών και εξαρτημάτων.

Οι τεχνολογικοί κλάδοι στους οποίους χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν: Υλικά, τρόφιμα, ναυπηγική, αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, ιατρική, πληροφορική, κλπ. Οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους βρίσκουν εφαρμογή οι τεχνολογίες των ΜΚΕ, είναι η ναυτική – αεροναυπηγική βιομηχανία, τα διυλιστήρια, οι χημικές βιομηχανίες, οι βιομηχανίες τροφίμων, οι μεταφορές, η παραγωγή και διανομή ενέργειας καθώς και οι βιομηχανίες κατασκευής εξοπλισμού και συστημάτων ελέγχου ποιότητας.

Η διεθνής κοινότητα του ΜΚΕ έχει υιοθετήσει ένα σύστημα το οποίο ταξινομεί τις μεθόδους του ΜΚΕ στις εξής κατηγορίες :

- Οπτικής (Visual)
- Διείσδυσης (Penetrating)
- Ακτινοβολίας (Radiation)
- Μαγνητικής –Ηλεκτρικής (Magnetic-Electrical)
- Μηχανικής ταλάντωσης (Mechanical vibration)
- Θερμικής (Thermal),
- Χημικής-Ηλεκτροχημικής (Chemical-Electrochemical)

Από τις παραπάνω κατηγορίες, οι σημαντικότερες και δημοφιλέστερες μέθοδοι ΜΚΕ, τόσο για τα υλικά όσο και για τις κατασκευές είναι οι ακόλουθες :

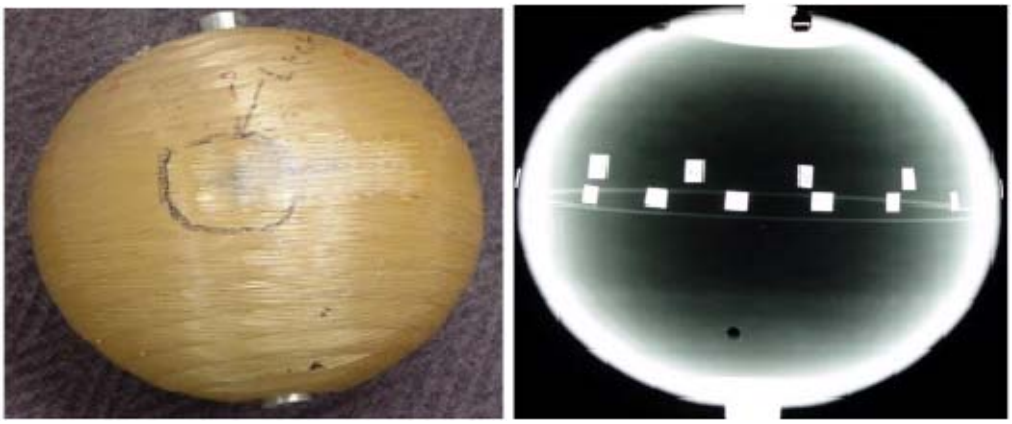
- Ραδιογραφία με ακτίνες x ή γ (X, Gamma ray radiography)
- Υπέρηχοι (Ultrasonics)

- Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)
- Δινορρεύματα (Eddy current)
- Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant)
- Επικός έλεγχος (Visual inspection)
- Μαγνητισμένα σωματίδια (Magnetic particle)
- Έλεγχος θορύβου Barkhausen
- Θερμογραφία (Thermographic)
- Ολογραφία (Holography)

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των δημοφιλέστερων μεθόδων.

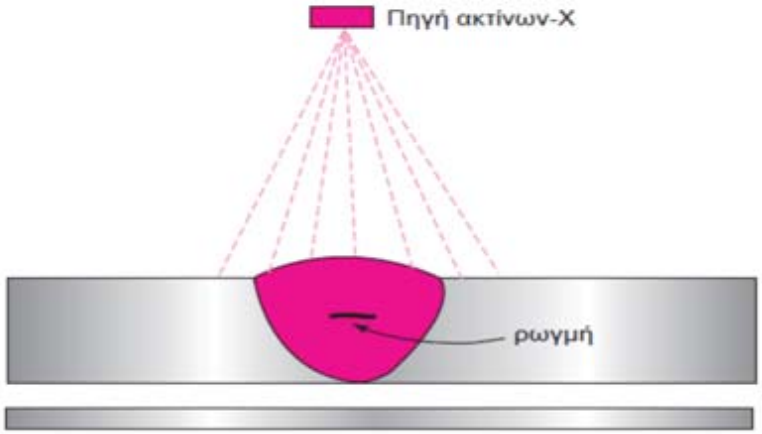
2.1.2.1 Ραδιογραφία με ακτίνες Χ ή Γ (X, Gamma ray radiography)

Ακτίνες Χ ή ακτίνες Ρέντγκεν (Röntgen) αποκαλείται ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με περιοχή μήκους κύματος μεταξύ 10 nm με 10 pm. Ανακαλύφθηκαν το 1895 και μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται για τον ΜΚΕ ανθρώπων και υλικών. Το μήκος κύματος των ακτινών Χ τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που είναι διαφορετικό για κάθε υλικό. Χωρίζονται σε δυο κατηγορίες στις μαλακές και στις σκληρές ακτίνες Χ. Οι μαλακές ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο λεπτών φύλλων υλικών με ασθενή απόσβεση όπως το αλουμίνιο και το πλαστικό. Οι σκληρές ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο υλικών με μεγαλύτερο πάχος ή ισχυρότερης απόσβεσης όπως ο σίδηρος και ο μπρούτζος.



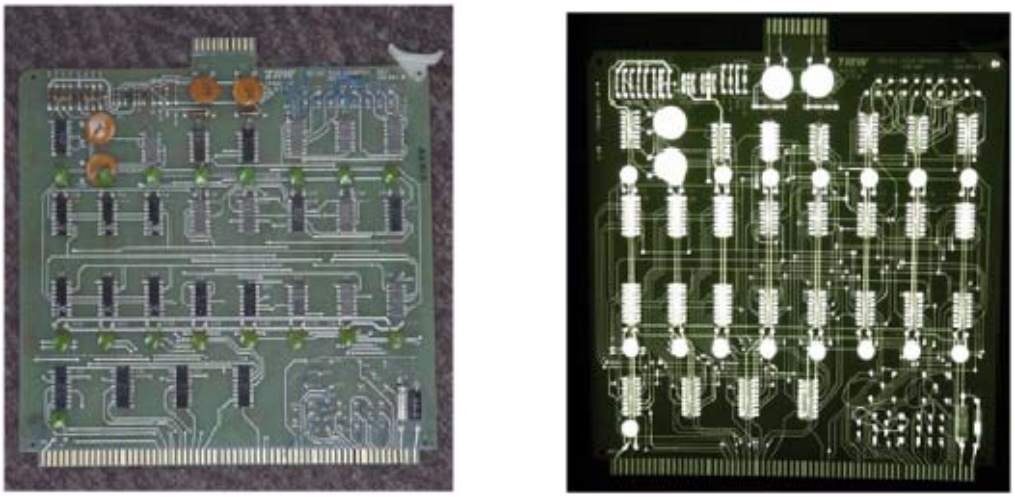
Εικόνα 2-1: *Χρήση της Ραδιογραφίας ακτινών-Χ σε αντικείμενα από μέταλλο και κεραμικό*

Οι ακτίνες Χ δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας συγκρούονται με τα μόρια ενός μεταλλικού αντικειμένου. Οι πηγές ακτίνων Χ περιέχουν την κάθοδο που παράγει τα ηλεκτρόνια και τον μεταλλικό στόχο στον οποίο προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια. Είναι τοποθετημένα μέσα σε κενό και τροφοδοτούνται με υψηλή τάση.



Εικόνα 2-2: *Ραδιογραφικός έλεγχος συγκόλλησης.*

Οι ακτίνες Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος με τις ακτίνες Χ και έχουν τις ίδιες ιδιότητες. Οι πηγές των ακτίνων Γ επιλέγονται μέσα από τα λίγα φυσικά ραδιενεργά υλικά και τα εκατοντάδες τεχνητά ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν συνδυασμούς από ακτίνες α, β, γ και νετρόνια. Μονό λίγα από αυτά έχουν ιδιότητες που τα κάνουν κατάλληλα για βιομηχανικές ραδιογραφικές εφαρμογές.



Εικόνα 2-3: *Τομογραφία ακτίνων Χ σε ψηφιακό κύκλωμα.*

Οι ακτίνες Χ και Γ διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός, σε ευθείες γραμμές και είναι αόρατες. Επίσης, δεν εστιάζονται και για το λόγο αυτό η διάταξη λειτουργίας τους είναι πάντα : πηγή – εξεταζόμενο δείγμα – ραδιογραφική πλάκα.

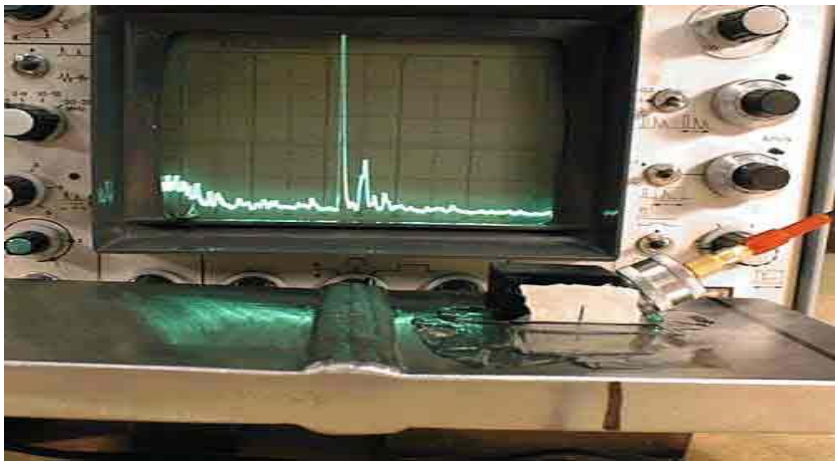
Πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή της ραδιογραφίας απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή επειδή οι ακτινοβολίες που προαναφέρθηκαν εγκυμονούν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Για το λόγο αυτό πρέπει να εφαρμόζονται αυστηρά μέτρα ακτινοπροστασίας σε κάθε τέτοιο έλεγχο.

2.1.2.2 Υπέρηχοι (Ultrasonics)

Η τεχνική των υπερήχων βασίζεται στη μελέτη της διαταραχής του εκπεμπόμενου στο υλικό κύματος, λόγω της ύπαρξης ατελειών. Η ύπαρξη ατελειών όπως ρωγμές, πόροι, εγλκείσματα, η ύπαρξη διεπειφανειών όπως τα εξωτερικά σύνορα του αντικειμένου και οι φυσικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης επηρεάζουν τη διάδοση των υπερήχων στα στερεά σώματα. Για τον χαρακτηρισμό της βλάβης χρησιμοποιείται πρότυπο ανακλώμενο ή διαθλώμενο κύμα. Σε έναν έλεγχο με υπέρηχο τα κύματα που χρησιμοποιούνται είναι ηχητικά κύματα με συχνότητα συνήθως μεγαλύτερη από 500 KHz.

Εικόνα 2-4: *Έλεγχος με υπέρηχους.*

Η λειτουργία της μεθόδου των υπερήχων βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων μέσα στο υλικό και την καταγραφή των ανακλάσεων που επιστρέφουν. Ο παλμός υπερήχων δημιουργείται με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης σε ένα πιεζοηλεκτρικό δίσκο. Οι ανακλάσεις δονούν τον ίδιο ή άλλο πιεζοηλεκτρικό δίσκο ο όποιος τις μετατρέπει πάλι σε τάσεις. Κάθε επιφάνεια ανακλά μια ηχώ του παλμού, με πρώτη απ' όλες την επιφάνεια στην οποία εφάπτεται ο δίσκος και τελευταία την απέναντι επιφάνεια του υλικού. Ανάμεσα στις δύο ανακλάσεις θα βρίσκεται η ηχώ από οποιαδήποτε ατέλεια υπάρχει μέσα στο υλικό και με εύρος που εξαρτάται από το μέγεθος κάθε ατέλειας. Με τη διαδικασία αυτή οι συσκευές υπερήχων μετράνε πρακτικά το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να διανύσει την απόσταση από το σημείο που μπαίνει μέχρι να συναντήσει κάποια ατέλεια και έχοντας δεδομένη την ταχύτητα που ταξιδεύει ο ήχος μέσα στο υλικό, υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων. Επίσης, λόγω της μεγάλης ακουστικής αντίστασης που παρουσιάζει ο αέρας είναι απαραίτητη η τοποθέτηση υλικού σύζευξης (couplant) μεταξύ της κεφαλής, από την οποία εκπέμπεται η δέσμη υπερήχων και του δοκιμίου.

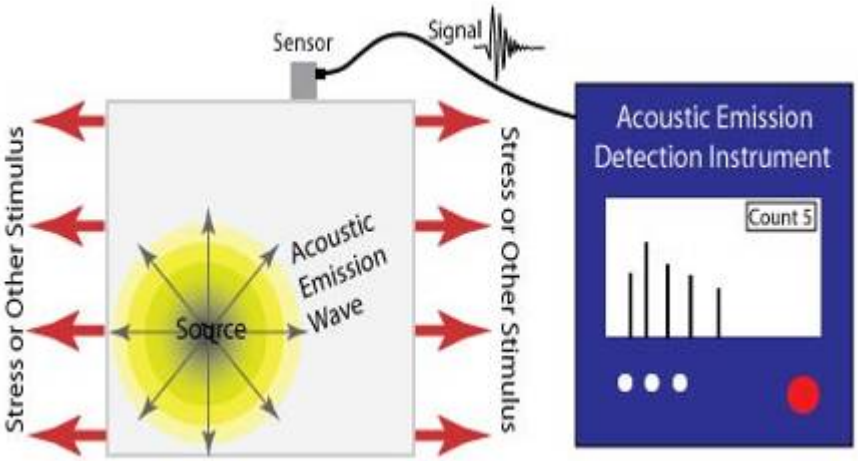


Εικόνα 2-5: *Εντοπισμός ατελειών με τη χρήση υπερήχων (A scan).*

Είναι μια σημαντική μέθοδος για την μέτρηση πάχους κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως πλοία, σιδηροδρομικές γραμμές, σωλήνες κλπ. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι το γεγονός ότι μπορεί να εντοπίσει τόσο επιφανειακές όσο και εσωτερικές ασυνέχειες και ατέλειες, παρέχοντας μας με μεγάλη ακρίβεια το βάθος στο οποίο βρίσκονται. Επίσης, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και αποτελεί μια μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας, αφαίρεσης και κοπής μετάλλων.

2.1.2.3 Ακουστική εκπομπή (Acoustic emission)

Η τεχνική της ακουστικής εκπομπή βασίζεται στο οτι όλα τα υλικά και ιδιαίτερα τα μέταλλα και τα κράματά τους εκπέμπουν ήχο όταν συμβαίνει κάποια μεταβολή στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 2-6: *Εκπομπή και ανίχνευση ακουστικών κυμάτων.*

Η μέθοδος που ακολουθούμε για να ελέγξουμε ένα υλικό με την τεχνική αυτή είναι να το υποβάλλουμε είτε σε πίεση, είτε σε άλλου είδους κόπωση και με τους κατάλληλους αισθητήρες (κυρίως πιεζοηλεκτρικές κεφαλές) να εντοπίσουμε τα ηχητικά κύματα. Έχει διαπιστωθεί ότι οι ηχητικές πηγές προέρχονται κυρίως από περιοχές που περιέχουν κάποιου είδους ατέλεια.

Εικόνα 2-7: *Έλεγχος σωλήνων με τη μέθοδο ακουστικής εκπομπής.*

Επίσης, η ακουστική εκπομπή βασίζεται στην τροποποίηση των ρυθμών παραγωγής, διάδοσης και ανίχνευσης ελαστικών κυμάτων μέσα στο υπό εξέταση υλικό, λόγο των ατελειών που υπάρχουν στη μικροδομή του. Εφαρμόζεται σε υλικά που είναι δυνατό να παρουσιάσουν εσωτερικές και επιφανειακές ατέλειες χρησιμοποιώντας τα μεταβατικά τασικά κύματα που δημιουργούνται στο υλικό λόγω απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Λειτουργούν κατά προτίμηση στην περιοχή χαμηλότερων συχνοτήτων, ενώ η ανίχνευση των ρωγμών και των ατελειών βασίζεται στην αρμονική ανάλυση των ανιχνευόμενων σημάτων.

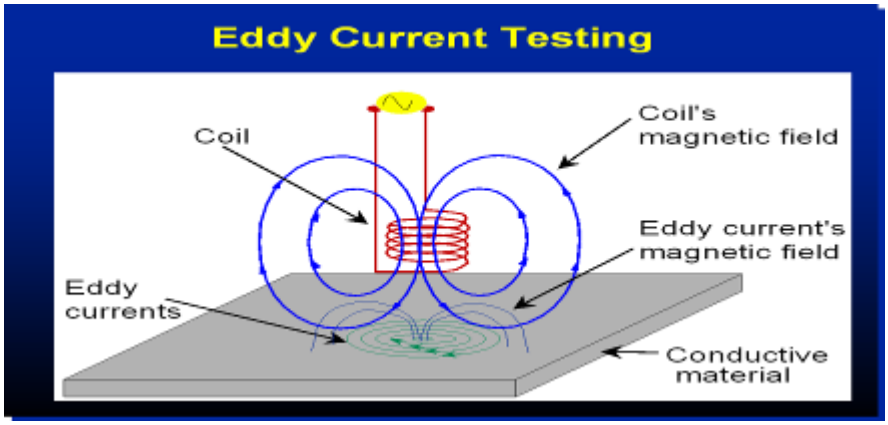
Είναι μια μη καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου κατασκευών υψηλού κινδύνου όπως μεταλλικές κατασκευές, αεροσκάφη, δεξαμενές εύφλεκτων υγρών, πυρηνικοί αντιδραστήρες κλπ.

Τέλος μια ιδιαίτερη εφαρμογή της τεχνικής ακουστικής εκπομπής είναι η τεχνική μαγνητικής ακουστικής εκπομπής (magnetic acoustic emission).

2.1.2.4 Δινορρεύματα (Eddy current)

Η μέθοδος των δινορρευμάτων είναι μια από τις πιο κοινές τεχνικές χαρακτηρισμού επιφάνειας σε μέταλλα και αποτελεί επιφανειακή τεχνική χαρακτηρισμού ακριβείας. Η τεχνική είναι βασισμένη στην δημιουργία δινορρευμάτων στην επιφάνεια του υπό δοκιμή μέταλλου, τα οποία δημιουργούνται για να αναχαιτίσουν το εξωτερικώς επιβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο επιβάλλεται στην επιφάνεια του υπό δοκιμή υλικού. Το εξωτερικώς επιβαλλόμενο

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δημιουργεί δινορρεύματα με βάθος διείσδυσης δ αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της επιβαλλόμενης συχνότητας, της αγωγιμότητας και της μαγνητικής διαπερατότητας του υπό δοκιμή μέταλλου. Οι ηλεκτρικές γραμμές αυτών των δινορρευμάτων διαφοροποιούνται λόγο της παρουσίας ρωγμών στην επιφάνεια και στην υπό-επιφάνεια του μέταλλου με αποτέλεσμα το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο τους να είναι ανομοιόμορφο στην γειτονία των ατελειών. Αυτή η ανομοιόμορφη κατανομή του πεδίου, πρακτικά εμφανίζεται σαν μείωση πεδίου η οποία υπαγορεύει την παρουσία ρωγμών στην επιφάνεια ή κάτω από την επιφάνεια. Επίσης, από το φαινόμενο της υστέρησης φάσης του σήματος είναι δυνατό να προσδιοριστεί με ακρίβεια το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ατέλεια. Η μέθοδος των δινορρευμάτων μπορεί να οδηγήσει σε ευαισθησίες της τάξεως των μm.



Εικόνα 2-8: *Δινορρεύματα επαγόμενα σε αγώγιμο υλικό από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο*

Δεδομένου ότι τα δινορρεύματα έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του υλικού, η μέθοδος περιορίζεται στον εντοπισμό επιφανειακών και υπο-επιφανειακών ατελειών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του υλικού. Η μεγάλη ευαισθησία της μεθόδου σε μικρές ρωγμές και ατέλειες, έχει συμβάλλει αρκετά στην ευρεία χρήση της για τον επιφανειακό έλεγχο γεωμετρικά περίπλοκων αντικειμένων κατασκευασμένων από αγώγιμο υλικό.

Εικόνα 2-9: *Έλεγχος συγκόλλησης με τη χρήση δινορρευμάτων.*

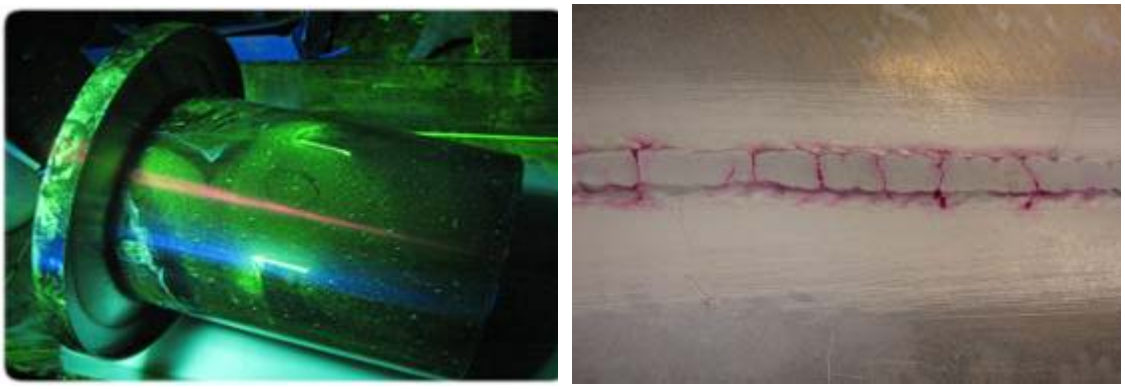
Κάποια από τα πλεονεκτήματα του ελέγχου με δινορρεύματα είναι η ανίχνευση επιφανειακών και μικρού βάθους ελαττωμάτων, ο έλεγχος πολύπλοκων σχημάτων και μεγεθών, η εύκολη μετακίνηση του απαραίτητου εξοπλισμού, κλπ. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι μόνο αγώγιμα υλικά μπορούν να εξεταστούν και ότι οι ατέλειες που είναι παράλληλες στο επίπεδο των περιελίξεων του πηνίου δεν μπορούν να προσδιοριστούν.

2.1.2.5 Διεισδυτικά υγρά (Liquid penetrant)

Η τεχνική των διεισδυτικών υγρών είναι σχεδιασμένη για να εντοπίζει επιφανειακές ρωγμές ή ρωγμές που καταλήγουν στην επιφάνεια του δοκιμίου. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια το μήκος μιας ρωγμής αλλά όχι το βάθος της.

Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών εφαρμόζεται συνήθως με δύο τρόπους, με την χρήση χρωματιστών ή με τη χρήση φθοριζόντων διαλυμάτων.

α) β)



Εικόνα 2-10: *Εμφάνιση και ανίχνευση με τη χρήση διεισδυτικών υγρών.*

Τα βασικά σταδία της μεθόδου είναι τα έξης:

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

Εικόνα 2-11: *Εφαρμογή της μεθόδου διεισδυτικών υγρών.*

Τέλος, η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών δεν προσφέρεται για πορώδη υλικά ενώ αδυνατεί να εντοπίσει μια ατέλεια εάν αυτή έχει καλυφθεί από κάποια ξένη ουσία.

2.1.2.6 Οπτικός έλεγχος (Visual inspection)

Παραδοσιακή οπτική τεχνική ΜΚΕ είναι η επιθεώρηση με το ανθρωπινό μάτι. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να αντικατασταθεί και χρησιμοποιείται ουσιαστικά σε όλα τα συστήματα. Μια απλή οπτική εξέταση μπορεί να αποκαλύψει ατέλειες και επομένως να προστατέψει την ασφάλεια μιας κατασκευής ή να εντοπίσει ατέλειες σε μια γραμμή παραγωγής.

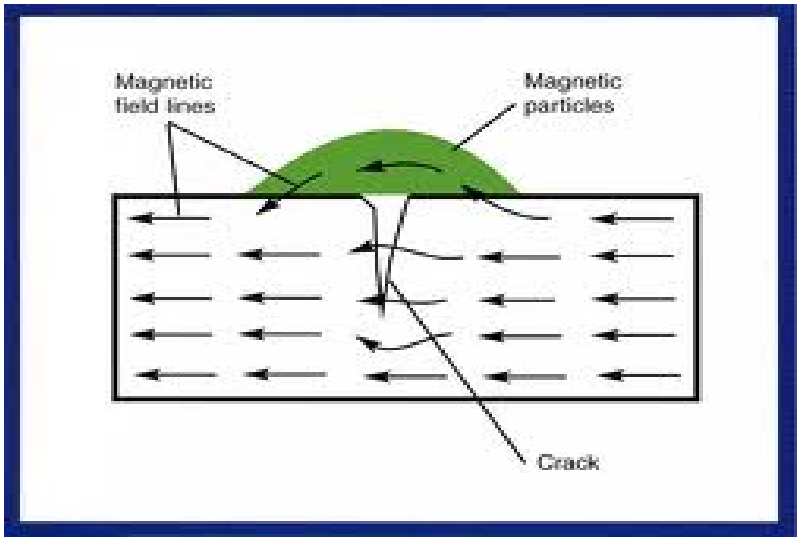
Εικόνα 2-12: *Οπτική εξέταση σωλήνων*

Η οπτική παρατήρηση έχει βελτιωθεί με την ενίσχυση του οπτικού μικροσκοπίου, με κάμερες υψηλής ανάλυσης. Οι κάμερες υψηλής ανάλυσης στα αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να επεξεργαστούν ταχέως οπτική πληροφορία και να ενημερώσουν για ρωγμές επίπεδου 100μm. Πριν από τον οπτικό έλεγχο οι επιφάνειες θα πρέπει να προετοιμάζονται απομακρύνοντας ακαθαρσίες, γράσα και σκουριές. Οι ελεγχόμενες επιφάνειες θα πρέπει να φωτίζονται κατάλληλα, περιορίζοντας έτσι την πιθανότητα σφάλματος ή αδυναμίας παρατήρησης κάποιας ατέλειας.

Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου συγκαταλέγονται ο εντοπισμός μόνο επιφανειακών ατελειών και η σχολαστική εξέταση της συνολικής επιφάνειας του αντικειμένου σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ενδείξεις για κάποια βλάβη, που σημαίνει ότι η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.

2.1.2.7 Μαγνητισμένα σωματίδια (Magnetic particle)

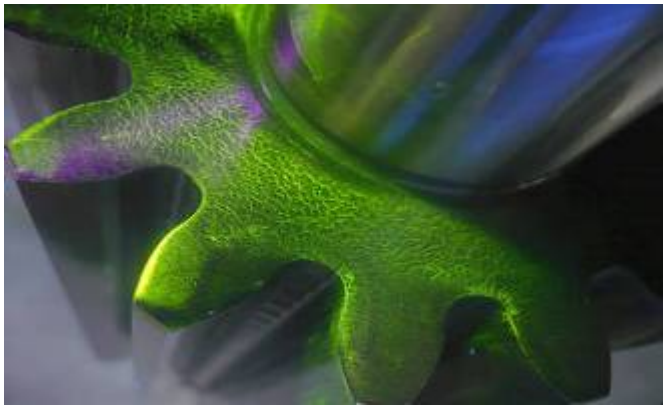
Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε μαγνητιζόμενα υλικά για να αναδείξει επιφανειακές ρωγμές οι οποίες δεν φαίνονται με γυμνό μάτι.



Εικόνα 2-13: *Κατανομή μαγνητικής ροής γύρω από ασυνέχεια*

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου είναι αρκετά απλή και βασίζεται στη μαγνήτιση του υλικού και την ταυτόχρονη εφαρμογή κάποιου μέσου που περιέχει μαγνητικά σωματίδια. Η μαγνήτιση αυτή πρέπει να γίνεται σε όσο το δυνατό περισσότερες από τις διαστάσεις του ώστε σε κάθε εφαρμογή η φορά του μαγνητικού πεδίου να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετη στις ρωγμές. Στα σημεία που υπάρχει ρωγμή δημιουργείται τοπικά ένα έντονο μαγνητικό πεδίο το οποίο έλκει τα σωματίδια αυτά και τα συγκεντρώνει κατά μήκος της ρωγμής. Τα σωματίδια αυτά είναι είτε φθορίζοντα και υποδεικνύονται με τη χρήση λάμπας UV, είτε περιέχονται σε υγρά με έντονη χρωματική αντίθεση ώστε να είναι δυνατό να τα δούμε στο φώς της ημέρας. Για τη μαγνήτιση των εξεταζόμενων επιφανειών χρησιμοποιούνται φορητοί μαγνήτες όταν εξετάζονται μεγάλα κομμάτια με απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως άξονες, σωλήνες κλπ.

Αν τα κομμάτια είναι μικρά συστήνεται η χρήση σταθερών σταθμών με ειδικά στηρίγματα που βοηθούν στη γρήγορη εξέτασή τους.



Εικόνα 2-14: *Εφαρμογή της μεθόδου μαγνητικών σωματιδίων για τον εντοπισμό ρωγμών.*

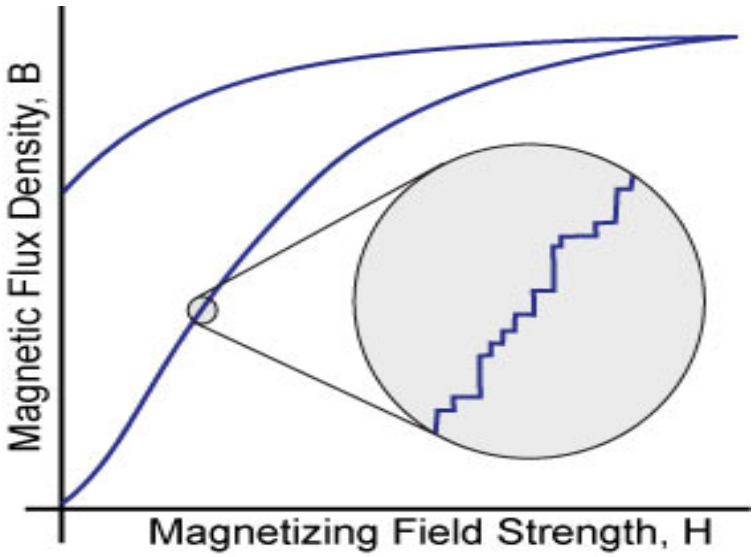
Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σύγκριση με άλλες είναι ότι δεν χρειάζεται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία, οι ρωγμές αναδεικνύονται ευκρινώς και τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι ξεκάθαρα και αναπαραγόμενα. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι βρίσκει εφαρμογή μόνο στα μαγνητιζόμενα υλικά.

2.1.2.8 Έλεγχος θορύβου Barkhausen

Στην κρυσταλλική δομή ενός υλικού υπάρχουν ατέλειες οι οποίες επηρεάζουν τις μηχανικές αλλά και τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η μεταξύ τους σχέση δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητή αλλά έχει διαπιστωθεί ότι οι μετρήσεις του μαγνητικού θορύβου Barkhausen παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ο μαγνητισμός των υλικών συμβαίνει με μια σειρά μικρών βημάτων από τον ένα κόκκο στον άλλο. Αν συνδέσουμε το πηνίο μαγνητισμού με ένα ηχείο, τα βήματα αυτά ακούγονται σαν μια σειρά από κλικ και συνθέτουν ένα θόρυβο. Ο θόρυβος Barkhausen επηρεάζεται από την παρουσία τάσεων, ρωγμών, μικρο-ατελειών, θερμικής κατεργασίας και πλαστικής παραμόρφωσης και παρουσιάζει αιχμές και ακραίες τιμές που βοηθούν στον εντοπισμό τους.

Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών πρώτον με την αλλαγή της δομής του τομέα λόγο παραγωγής κλειστών τομέων στα σύνορα του κόκκου και δεύτερον με την αλλαγή των συνθηκών κίνησης καθώς παρουσιάζονται εμπόδια στην κίνηση.

Το σήμα Barkhausen επηρεάζεται από τις συνθήκες διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος στο υλικό καθώς και από τις ιδιότητες του αισθητήρα.



Εικόνα 2-15: *Ασυνέχειες Barkhausen κατά μήκος της καμπύλης μαγνήτισης.*

Λόγω των δινορρευμάτων που προκαλούν τα άλματα Barkhausen, ο μαγνητικός θόρυβος αφορά στην επιδερμική μαγνήτιση. Τα εσωτερικά άλματα Barkhausen, αν και υπάρχουν δεν μπορούν να μετρηθούν λόγω περιορισμού τους (screen effect). Αυτό επιτρέπει την μη καταστροφική και ακριβή μέτρηση των αλμάτων Barkhausen στην επιφάνεια του υπό δοκιμή υλικού.

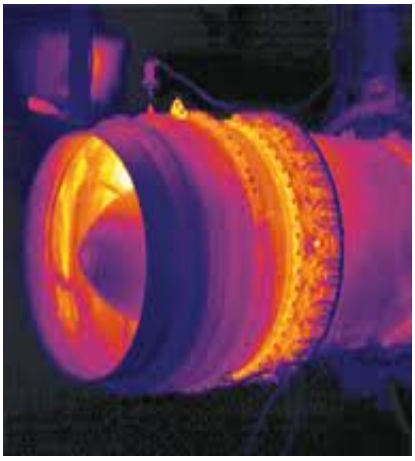
Εικόνα 2-16: *Κεντρική μονάδα τροφοδοσίας σήματος και επεξεργασίας δεδομένων. Κεφαλή της διάταξης Barkhausen.*

Ο έλεγχος του θορύβου Barkhausen αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές μαγνητικές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου για την διερεύνηση των εγγενών ιδιοτήτων μαγνητικών υλικών.

Η μαγνητοακουστική εκπομπή και το φαινόμενο Barkhausen έχουν εδραιωθεί ως μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου για αξιολόγηση αλλαγών στη μικροδομή των υλικών.

2.1.2.9 Θερμογραφία (Thermographic)

Η μέθοδος της θερμογραφίας βασίζεται στην τοπική μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της ύπαρξης ατελειών στο υπό εξέταση αντικείμενο. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή θερμαίνοντας τη μια επιφάνεια του αντικειμένου και μετρώντας την κατανομή της θερμοκρασίας στην ίδια ή στην απέναντι επιφάνεια εντοπίζεται η ύπαρξη και η θέση ατελειών. Η ανάπτυξη νέων τεχνικών μέτρησης θερμοκρασίας, υπερευαίσθητων στην υπεριώδη ακτινοβολία, έχει αυξήσει κατά πολύ τις δυνατότητες των μεθόδων ΜΚΕ που βασίζονται στην Θερμογραφία.

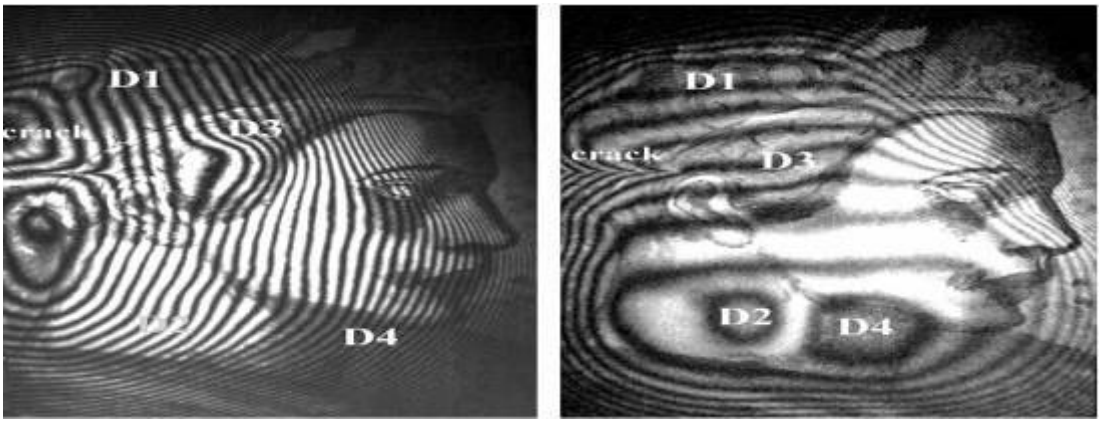


Εικόνα 2-17: *Εύρεση ρωγμών με τη μέθοδο της θερμογραφίας.*

2.1.2.10 Ολογραφία (Holography)

Με τη μέθοδο της ολογραφίας μπορούν να καταγραφούν πολύ μικρές μετατοπίσεις της τάξεως του ¼ του μήκους του κύματος που χρησιμοποιείται στη περίπτωση του laser. Η ύπαρξη ατελειών εντοπίζεται από την παρατήρηση τοπικά μεγαλύτερων επιφανειακών μετατοπίσεων απ` ότι σε αντίστοιχα υλικά χωρίς ατέλεια.

Η μέθοδος της ολογραφίας προϋποθέτει προσεκτική ευθυγράμμιση της οπτικής διάταξης, λόγω του ότι η διάταξη αυτή είναι πολύ ευαίσθητη σε μικροδονήσεις, ταλαντώσεις και γενικότερα σε εξωτερικές διεγέρσεις.



Εικόνα 2-18: *Εφαρμογή της μεθόδου ολογραφίας.*

2.2 Θεωρία κυμάτων

2.2.1 Γενικές έννοιες

Κύμα ονομάζεται μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο. Η μεταφορά αυτή (μετάδοση) γίνεται, στα υλικά μέσα, ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου (μέσω των ταλαντώσεων των μορίων), όμως ορισμένα είδη κυμάτων, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά, μπορούν να διαδίδονται και στο κενό.

Τα κύματα είναι περιοδικά φαινόμενα, δηλαδή επαναλαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση των κυμάτων αυτό που επαναλαμβάνεται είναι η διαταραχή. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ειδών των κυμάτων είναι ότι μεταφέρουν ενέργεια και όχι ύλη. Κάθε κύμα μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικό τρόπο από την κυματική του εξίσωση.

2.2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη για την περιγραφή των κυμάτων

Στη φυσική έχουν οριστεί τα εξής μεγέθη που αφορούν όλα τα κύματα:

- Περίοδος: Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών. Συμβολίζεται με T και μετριέται σε sec.
- Συχνότητα: Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ή πέρασαν από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδα χρόνου. Συμβολίζεται με f (frequency) και μετριέται σε s^{-1}, ή Hz.

$$f = 1/T$$

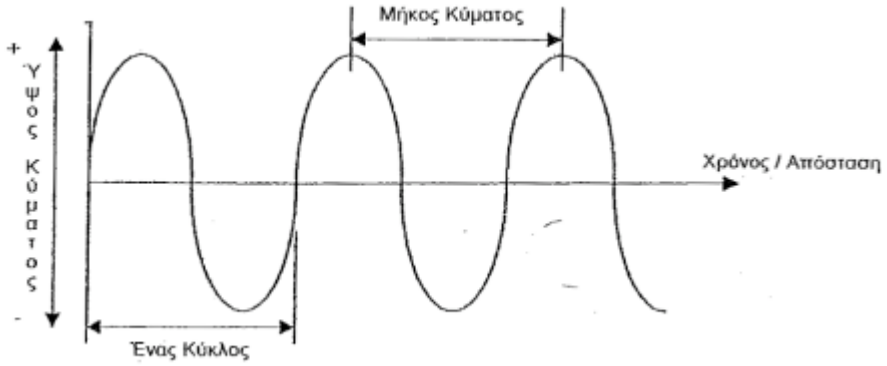
- Πλάτος κύματος: Είναι αδύνατον να διαταράσσεται περιοδικά ένα μέγεθος, δηλαδή να είναι περιοδικό φαινόμενο, χωρίς να λαμβάνει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή. Πλάτος του κύματος ονομάζεται η μέγιστη απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας. Συμβολίζεται με A και μετριέται σε μονάδες μήκους. Το πλάτος ενός κύματος δεν είναι πάντα σταθερό και συνήθως εξαρτάται από τη θέση και το χρόνο στον οποίο μελετάμε ένα σημείο. Το πλάτος του κύματος σε ένα σημείο έχει άμεση σχέση με την ενέργεια του κύματος σε αυτό το σημείο.
- Μήκος κύματος: Μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Είναι, δηλαδή, η απόσταση, κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, μεταξύ γειτονικών σωματιδίων του μέσου διάδοσης, που έχουν το ίδιο πλάτος μετατόπισης από τη θέση ισορροπίας. Συμβολίζεται με λ και μετριέται σε μονάδες μήκους. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = c/f$$

- Ταχύτητα κύματος: Η ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής στο χώρο ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με υ, και μετριέται ανάλογα με τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών μήκος κύματος και περιόδου, συνήθως σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Από τον ορισμό του μήκους κύματος προκύπτει ότι:

$$\upsilon = \lambda/T = \lambda f.$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής και ισχύει σε όλα τα κύματα. Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο διάδοσης έχουν ταχύτητα χαρακτηριστική του συγκεκριμένου μέσου και του συγκεκριμένου είδους κύματος. Αυτό το γεγονός είναι υπεύθυνο για διάφορα φαινόμενα στην κυματική κατά την αλλαγή μέσου διάδοσης ή κατά τη διάδοση στο ίδιο μέσο κυμάτων με ίδια όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά που διαφέρουν στον τρόπο μετάδοσης.

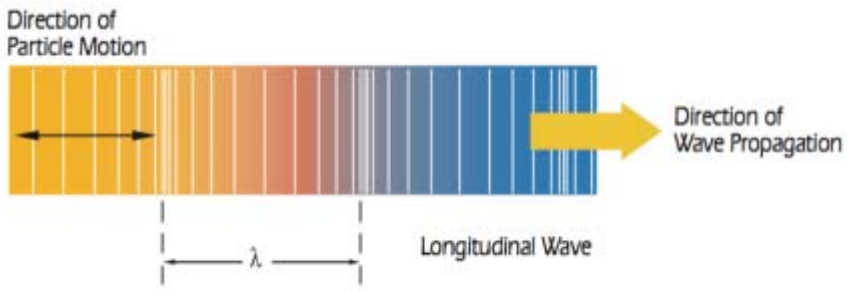


Εικόνα 2-19: *Στιγμιότυπο ενός κύματος όπου απεικονίζεται η ταλάντωση των μορίων και το μήκος κύματος.*

2.2.3 Είδη κυμάτων

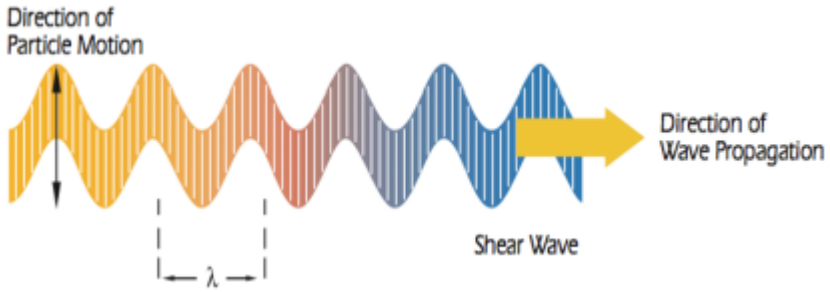
2.2.3.1 Ως προς την κατεύθυνση διάδοσης των κυμάτων

- <u>Διαμήκη κύματα (longitudinal/compression waves)</u>: Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα στα οποία η κατεύθυνση του διαταρασσόμενου μεγέθους είναι παράλληλη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος δηλαδή είναι τα κύματα εκείνα στα οποία η διεύθυνση κίνησης των μορίων του μέσου συμπίπτει με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Έχουν τη δυνατότητα να διαδίδονται και στις τρεις μορφές της ύλης (στέρεα, υγρή, αέρια). Στα διαμήκη κύματα ορίζονται πυκνώματα και αραιώματα.
    - Πύκνωμα είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η μέγιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους.
    - Αραίωμα είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η ελάχιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους.



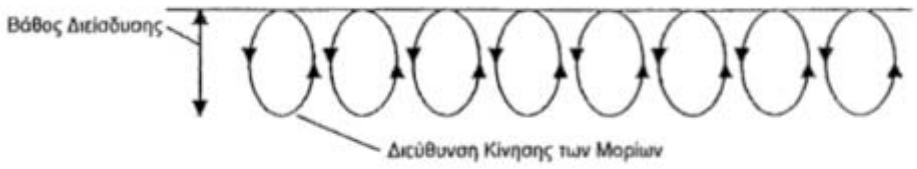
Εικόνα 2-20: *Διαμήκη κύματα.*

- <u>Εγκάρσια κύματα (transverse/shear waves)</u>: Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα στα οποία η κατεύθυνση του διαταρασσόμενου μεγέθους είναι κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος δηλαδή είναι τα κύματα των οποίων οι μετατοπίσεις του μέσου γίνονται σε διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής. Τα κύματα αυτά έχουν την ιδιότητα να διαδίδονται μόνο στα στερεά και όχι στα υγρά και στα αέρια, διότι αυτά δεν παρουσιάζουν ελαστικότητα σε εγκάρσια φόρτιση. Τα εγκάρσια κύματα χαρακτηρίζονται από τα όρη και τις κοιλάδες.
    - Όρος είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η μέγιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους.
    - Κοιλάδα είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η ελάχιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους.



Εικόνα 2-21: *Εγκάρσια κύματα.*

- <u>Επιφανειακά κύματα (surface) ή κύματα Rayleigh</u>: Επιφανειακά κύματα καλούνται τα κύματα που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ενός υλικού, μέχρι και βάθος ενός μήκους κύματος. Η παραγωγή των επιφανειακών κυμάτων γίνεται με κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης έτσι ώστε το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα να σχηματίζει γωνία 90^0 με τον κάθετο στη διεπιφάνεια άξονα. Οι τροχιές της κίνησης των μορίων είναι ελλειπτικές, δηλαδή τα δονούμενα σωματίδια που μεταδίδουν επιφανειακά κύματα κινούνται σε ελλειπτική τροχιά.

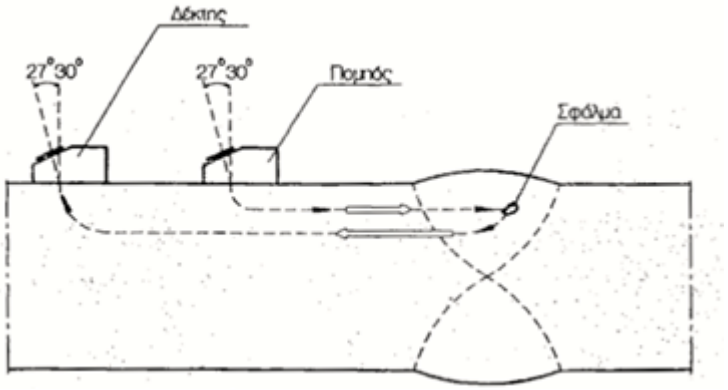


Εικόνα 2-22: *Επιφανειακό κύμα.*

Τα επιφανειακά κύματα ανακλώνται όπου συναντούν ακμές ή γωνίες και διαδίδονται στην επιφάνεια ακόμη και αν αυτή παρουσιάζει ελαφρά καμπυλότητα. Επίσης, διαδίδονται επί της ελεύθερης επιφάνειας στερεού μέσου το πάχος του οποίου είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος του κύματος.

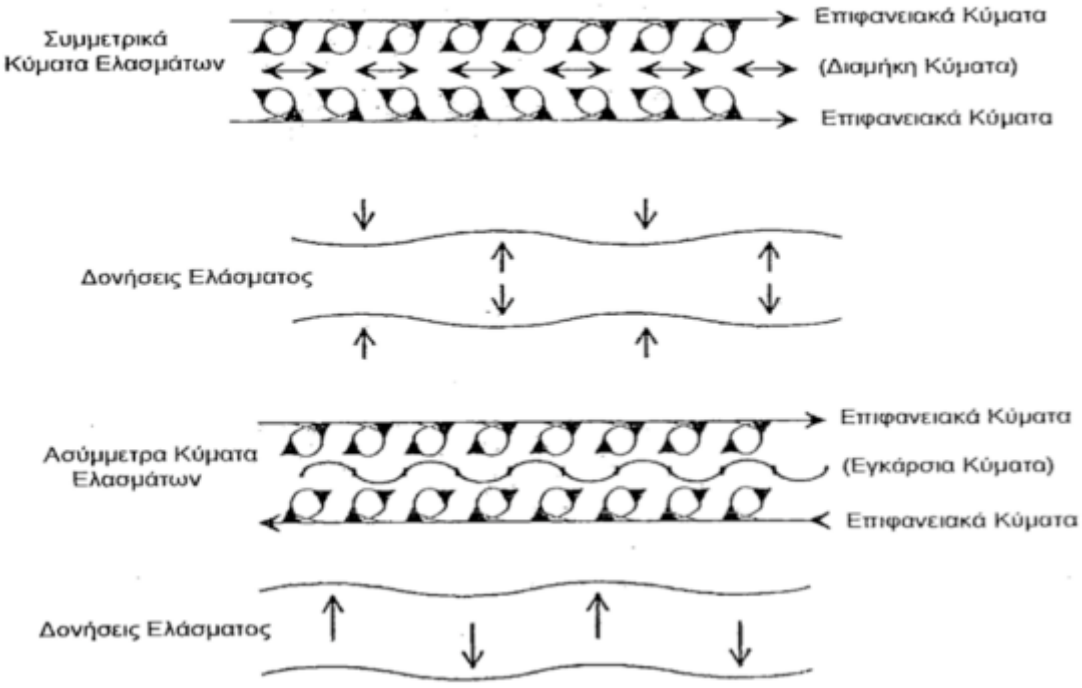
Η ταχύτητα των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου 10% μικρότερη από αυτή των εγκάρσιων κυμάτων. Για τους χάλυβες ισούται με 3050 m/s.

Η έλλειψη ευαισθησίας στις ανώμαλες επιφάνειες είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των υποεπιφανειακών κυμάτων και αξιοποιείται για την ανίχνευση ελαττωμάτων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.



Εικόνα 2-23: *Διάταξη γωνιακών κεφαλών για τον έλεγχο με υποεπιφανειακά κύματα.*

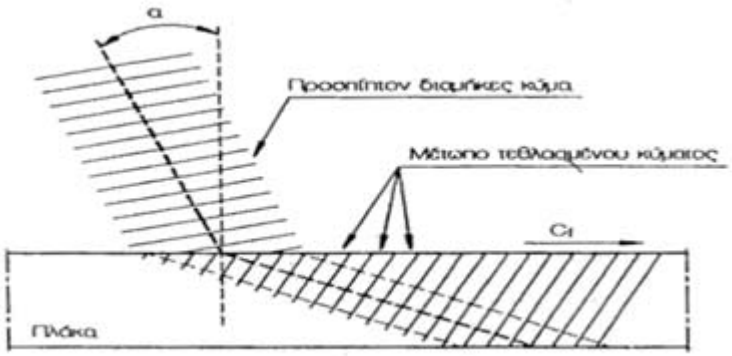
- <u>Κύματα πλακών ή κύματα Lamb</u> : Κύματα πλακών ή κύματα Lamb είναι ένας τύπος κύματος που αποτελεί ουσιαστικά συνδυασμό διαμηκών και εγκάρσιων κυμάτων. Τα κύματα Lamb διακρίνονται σε δύο βασικές μορφές : συμμετρικά και αντισυμμετρικά. Η διαφοροποίηση αυτή βασίζεται στη συμμετρική ή ασύμμετρη κίνηση των μορίων ως προς το κεντρικό επίπεδο του εξαρτήματος. Μια χαρακτηριστική ιδιότητα των κυμάτων Lamb με ασύμμετρη μορφή είναι η διαμήκης ταλάντωση των μορίων στην κεντρική περιοχή.



Εικόνα 2-24: *Κύματα Lamp.*

Σε γενικές γραμμές, εμφανίζονται στην περίπτωση λεπτών πλακών πάχους λίγων μηκών κύματος. Τα κύματα Lamb είναι κύματα τα οποία μπορούν να ταξιδέψουν σε μέσο λεπτού τοιχώματος με πολλούς τρόπους ανάλογα με τον τρόπο διέγερσής τους.

Η διέγερση των κυμάτων Lamb γίνεται με λοξή πρόσπτωση των διαμηκών κυμάτων στην ελεγχόμενη επιφάνεια. Τα διαμήκη κύματα που προσπίπτουν στην πλάκα διαθλώνται σχηματίζοντας διαθλασμένες δέσμες διαμήκεις και εγκάρσιες οι οποίες ταξιδεύουν προς τη διεύθυνση του μήκους της πλάκας ανακλώμενες στη συνέχεια στην άνω και στην κάτω επιφάνεια. Τα κύματα Lamb είναι το αποτέλεσμα της επαλληλίας αυτών των δεσμών.



Εικόνα 2-25: *Δημιουργία κύματος πλάκας με διάθλαση.*

2.2.3.2 Ως προς το σχήμα των κυμάτων

Ανεξάρτητα από τη μορφή του κύματος αποδεικνύεται ότι όλα τα κύματα αναλύονται σε επαλληλία άπειρων ή πεπερασμένο το πλήθος αρμονικών κυμάτων. Το σχήμα των κυμάτων εξαρτάται από την ταλάντωση του διαταρασσόμενου μεγέθους στην πηγή ή τις πηγές. Στις διάφορες περιοχές που θα διαδοθεί το κύμα, το διαταρασσόμενο μέγεθος ταλαντώνεται όπως οι πηγές. Το πλάτος, όμως θα μειωθεί ή θα αυξηθεί ανάλογα με την ενέργεια που μεταδίδεται στο συγκεκριμένο σημείο. Ακολουθούν μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις κυμάτων:

- Αρμονικά κύματα: Είναι το κύμα το οποίο παράγεται όταν το διαταρασσόμενο μέγεθος στην πηγή εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση.
- Στάσιμα κύματα: Αν και κυματικό φαινόμενο δε θεωρείται κύμα. Είναι το αποτέλεσμα της διάδοσης σε γραμμικό μέσο δύο αρμονικών κυμάτων σε αντίθετες κατευθύνσεις.
- Τετραγωνικά κύματα: Το Τετραγωνικό κύμα είναι περιοδική μη ημιτονική κυματομορφή η οποία έχει την μορφή διαδοχικών παλμών σταθερού πλάτους και διάρκειας. Το τετραγωνικό κύμα μπορεί να προκύψει ως άθροισμα ημιτονικών κυμάτων των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της δικής του συχνότητας. Οι συχνότητες αυτές ονομάζονται αρμονικές, οπότε το τετραγωνικό κύμα μπορεί να αναλυθεί σε ένα άθροισμα απείρων όρων, οπού οι όροι είναι οι αρμονικές.
- Εκρηκτικά κύματα: Η διαταραχή είναι βίαιη και στιγμιαία. Από εκρήξεις παράγονται κύματα που μεταφέρουν τέτοια ενέργεια, ώστε να μπορούν να εκσφενδονίσουν αντικείμενα που βρίσκονται στην πορεία τους.

2.2.3.3 Ως προς το μέσο διάδοσης των κυμάτων

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διάδοση ενός κύματος σε κάποια περιοχή είναι να μπορεί να διαταραχθεί το διαταρασσόμενο μέγεθος, που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο κύμα. Τα είδη των κυμάτων με βάση το μέσο διάδοσης στο οποίο μπορούν να διαδοθούν είναι:

- Μηχανικά κύματα: Διαδίδονται σε ελαστικό μέσο. Το διαταρασσόμενο μέγεθος είναι η θέση των μορίων του μέσου. Τα κύματα αυτά μπορούν να είναι εγκάρσια, διαμήκη ή επιφανειακά.
- Ηλεκτρομαγνητικά κύματα: Διαδίδονται στην ύλη και το κενό. Το διαταρασσόμενο μέγεθος είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η

ένταση του μαγνητικού πεδίου. Οι διαταραχές στα δύο πεδία είναι συμφασικές, ώστε να λαμβάνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους. Τα κύματα αυτά είναι εγκάρσια.

- Υλικά κύματα: Αυτού του είδους τα κύματα μελετώνται από την κβαντική φυσική.

2.2.4 Ηχητικά κύματα

2.2.4.1 Γενικά

Ο ήχος είναι η υποκειμενική εντύπωση (αίσθημα) που προκαλείται στον εγκέφαλο, εξαιτίας της διέγερσης των αισθητήριων οργάνων της ακοής, από ταχείες μεταβολές της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτές οι μεταβολές της πίεσης, διαδίδονται με τη μορφή ηχητικών κυμάτων. Τα ηχητικά κύματα παράγονται από σώματα που εκτελούν μηχανικές ταλαντώσεις (δονήσεις) και τα οποία στη συνέχεια διαδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια μέσα. Στο απόλυτο κενό η ηχητική ενέργεια δεν διαδίδεται. Επομένως τα ηχητικά κύματα είναι μηχανικά κύματα, τα οπαία μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Στα υγρά και τα αέρια η ηχητική ενέργεια μπορεί να διαδίδεται με τη μορφή διαμηκών κυμάτων ενώ στα στερεά μπορεί να διαδίδεται επιπρόσθετα με τη μορφή των εγκάρσιων κυμάτων.

Συνοψίζοντας, ο ήχος σαν ελαστικό κύμα που είναι διαδίδεται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα αλλά όχι στο κενό. Ο ήχος μεταδίδεται υπό μορφή ζωνών συμπίεσης (compression zones) και υποπίεσης (rarefied zones) των μορίων του μέσου στο οποίο διαδίδεται. Η ικανότητα του ήχου να διέρχεται από κάποιο μέσο εξαρτάται από την ελαστικότητα και την πυκνότητα του μέσου. Η πυκνότητα και η ελαστικότητα είναι οι κύριες παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η ταχύτητα του ήχου.

2.2.4.2 Ένταση του ήχου

Ο ήχος εφόσον είναι κύμα που μεταφέρει ενέργεια πιέσεως έχει σαν χαρακτηριστικό του την ένταση. Ως ένταση του ήχου ορίζεται η ισχύς του ηχητικού κύματος ανά μονάδα επιφανείας ή αλλιώς η ενέργεια που μεταφέρει το ηχητικό κύμα ανά μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου. Για να συγκριθεί η ηχητική ένταση δύο ήχων χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα με βάση το 10 και ως μονάδα το Bell. Στην πράξη η στάθμη της έντασης του ήχου μετράται σε Ντεσιμπέλ (decibel). Η μονάδα Ντεσιμπέλ εκφράζει την διαφορά στάθμης ενός ήχου έντασης I προς την ένταση του κατωφλίου ακουστότητας (10-12 W/m^2). Ως στάθμη έντασης σε dB ορίζεται το δεκαπλάσιο του δεκαδικού λογάριθμου της έντασης του ήχου προς την ένταση του κατωφλίου ακουστότητας, και περιγράφεται μαθηματικά από την σχέση :

$$I = 10\log(P_2^2/P_1^2)$$

Όπου P_1 : ήχος πίεσης P_1 και P_2 : ήχος πίεσης P_2

2.2.4.3 Φαινόμενα στα όρια των κόκκων

Τα ακόλουθα φαινόμενα μπορούν να εμφανισθούν στα όρια των μέσων :

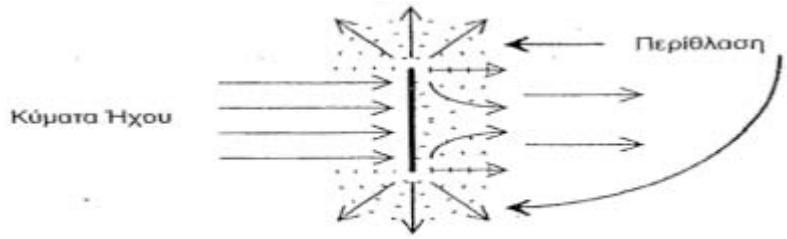
- Ανάκλαση κυμάτων
- Διάθλαση κυμάτων
- Συμβολή κυμάτων
- Μετασχηματισμός κυμάτων
- Διασπορά κυμάτων
- Σκέδαση κυμάτων
- Περίθλαση κυμάτων
- Μεταβολή της γεωμετρίας της δέσμης των κυμάτων

Ένα διαδιδόμενο κύμα όταν συναντήσει ένα μέσο με διαφορετικές μέσες τιμές ακουστικών ιδιοτήτων θα ανακλαστεί μερικώς ενώ, ένα μέρος του κύματος θα συνεχίζει και θα διαδοθεί μέσα στο δεύτερο μέσο, πιθανόν σε μια νέα διεύθυνση.

Όταν η διάμετρος d του εμποδίου είναι μικρότερη από το μήκος κύματος λ του ηχητικού κύματος ($d << \lambda$), τότε το εμπόδιο δεν επηρεάζει τη διάδοση του κύματος.

Όταν $d=\lambda$, τότε το εμπόδιο επηρεάζει έντονα τη διάδοση του κύματος. Ανάλογα με τον προσανατολισμό των εμποδίων, το κύμα υφίσταται ανακλάσεις και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις με αποτέλεσμα την εξασθένησή του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκέδαση.

Όταν $d > \lambda$, τότε το ηχητικό κύμα παρακάμπτει το εμπόδιο και διαδίδεται μέσα στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση.



Εικόνα 2-26: *Περίθλαση κύματος.*

Το φαινόμενο της συμβολής δύο κυμάτων συμβαίνει στην περίπτωση που το εξ' ανακλάσεως ηχητικό κύμα υπερτίθεται στο αρχικό.

Η μετατροπή του υπερήχου σε θερμότητα ονομάζεται απορρόφηση και οφείλεται στη εσωτερική τριβή. Επίσης, σε ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας η απώλεια ενέργειας είναι μεγαλύτερη από ότι σε ταλαντώσεις χαμηλότερης ενέργειας.

Η διασπορά είναι μια ακανόνιστη ανάκλαση και διάθλαση της δέσμης υπερήχων που οδηγεί στην εξασθένηση της και οφείλεται στην ανομοιογένεια και στην ανισοτροπία κάποιων υλικών, όταν αυτά περιέχουν εγκλείσματα ή πόρους.

Τόσο η απορρόφηση όσο και η διασπορά δυσχεραίνουν το έργο ενός υπερηχητικού ελέγχου.

2.2.4.4 Κάθετη πρόσπτωση ηχητικού κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

Όταν ένα ηχητικό κύμα συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, ένα μέρος του θα ανακλαστεί και ένα άλλο θα διαθλαστεί. Στην περίπτωση των υπερήχων, όταν ένα υπερηχητικό κύμα που διαδίδεται στο μέσο σύζευξης, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια, τότε ένα μέρος του διαδίδεται στο εξεταζόμενο υλικό, ενώ το υπόλοιπο ανακλάται πίσω προς το μέσο σύζευξης. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στα σύνθετα υλικά, επειδή κάθε στρώση έχει μια διαχωριστική επιφάνεια με την προηγούμενη και την επόμενη στρώση.

Τα ποσοστά ανάκλασης και διάθλασης εξαρτώνται από ένα μέγεθος που ονομάζεται ακουστική αντίσταση Z του υλικού και ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας ρ του υλικού επί την ταχύτητα διέλευσης του κύματος διάμεσου του υλικού αυτού. Η ακουστική αντίσταση δίνεται από την ακόλουθη σχέση και η τιμή της είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό :

$$Z = \rho \times c$$

όπου ρ : η πυκνότητα του υλικού και c : η ταχύτητα του ήχου στο υλικό

Ο συντελεστής ανάκλασης R (Reflection coefficient), δηλαδή το ποσοστό της ενεργείας μιας δέσμης υπερήχων, που ανακλάται, όταν η δέσμη προσκρούσει κάθετα σε μια επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων, με ειδικές ακουστικές αντιστάσεις Z_1 και Z_2, αντίστοιχα, δίνεται από τη σχέση:

$$R = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1)$$

όπου $Z_1=\rho_1 c_1$ και $Z_2=\rho_2 c_2$

Από την παραπάνω εξίσωση βγαίνει εύκολα το συμπέρασμα ότι, στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων διάδοσης με ίσες περίπου ειδικές ακουστικές αντιστάσεις ($Z_1 \sim Z_2$), ο συντελεστής ανάκλασης είναι πολύ μικρός και ελάχιστη ενέργεια ανακλάται προς τα πίσω. Αντίθετα, όταν η μια ειδική ακουστική αντίσταση είναι πολύ μεγαλύτερη της άλλης ($Z_1 >> Z_2$ ή $Z_2 >> Z_1$), ο συντελεστής

ανάκλασης είναι πολύ μεγάλος (~ 100%) και το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας της δέσμης ανακλάται.

Ο συντελεστής διάδοσης T (Transmission coefficient), εκφράζει το ποσοστό της ακουστικής πίεσης που εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό και δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$T = 2Z_2/(Z_2 + Z_1)$$

όπου $Z_1=\rho_1 c_1$ και $Z_2=\rho_2 c_2$

Οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης δίνουν το ποσοστό της ηχητικής πίεσης που ανακλάται στο δεύτερο υλικό.

Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ισχύει η συνέχεια της ακουστικής πίεσης σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση :

$$\rho_0 + \rho_1 = \rho_2$$

όπου ρ_0 : η ακουστική πίεση από το προσπίπτον κύμα, $\rho_1 = R\rho_o$: η ακουστική πίεση από το ανακλώμενο κύμα, $\rho_2 = T\rho_0$: η ακουστική πίεση από το διαθλώμενο κύμα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η ισότητα που συνδέει τους δύο συντελεστές :

$$1 + R = T$$

Κατά τη μετάβαση υπερηχητικών κυμάτων από το χάλυβα στον αέρα ανακλάται το 99.96% της ενέργειας τους, ενώ από χάλυβα σε Plexiglas το 68%, από αλουμίνιο σε νερό το 70% και τέλος από χαλαζία σε αλουμίνιο το 64% της ενέργειάς τους.

2.2.4.5 Πλάγια πρόσπτωση ηχητικού κυμάτος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

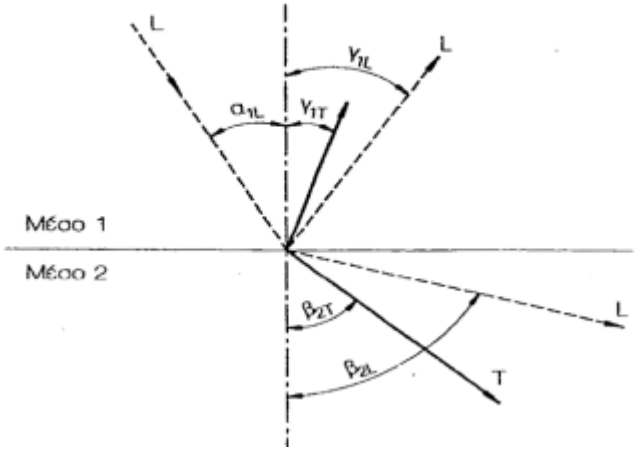
Στην πλάγια πρόσπτωση κύματος δεν έχουμε μόνο διάδοση και ανάκλαση όπως συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, αλλά έχουμε αλλαγή στη διεύθυνση και στο είδος των κυμάτων που διαδίδονται, τόσο στο ανακλώμενο μέρος του υπερηχητικού κύματος όσο και στο διαθλώμενο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μετασχηματισμός κυμάτων.

Το φαινόμενο μετασχηματισμού κυμάτων παρατηρείται όταν διαμήκες ή εγκάρσιο κύμα προσπίπτει λοξά στο όριο δύο μέσων. Σ'αυτό το όριο δημιουργούνται δύο τύποι κυμάτων (διαμήκη και εγκάρσια), τα οποία μπορούν να διαδίδονται στα δύο μέσα. Οι διευθύνσεις όλων των κυμάτων, τόσο του προσπίπτοντος όσο και των ανακλώμενων και διαθλώμενων κυμάτων, καθορίζονται από τη γωνία που σχηματίζει κάθε ένα από αυτά με την κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών. Οι διευθύνσεις διάδοσης αυτών των κυμάτων συνδέονται με τις ταχύτητές τους με το νόμο του Snell που στη γενική του μορφή είναι :

Τύπος του Snell : $\sin\alpha/\sin\beta = V_1/V_2$

Όπου α : γωνία πρόσπτωσης, β : γωνία διάθλασης, V_1 : ταχύτητα στο μέσο διάδοσης 1, V_2 : ταχύτητα στο μέσο διάδοσης 2

Από τον τύπο του Snell προκύπτει ότι αυξάνοντας τη γωνία πρόσπτωσης α_{1L} του διαμήκους κύματος L στο μέσο 1, μπορεί να προκύψει γωνία β_{2L} με τιμή 90^0. Μετά από την υπέρβαση της γωνίας πρόσπτωσης α'_{1L} στο μέσο 2 δε διεγείρεται διαμήκες κύμα, και η γωνία αυτή λέγεται πρώτη κρίσιμη γωνία. Εάν αυξηθεί η γωνία πρόσπτωσης α_{1L} άνω της α'_{1L} στο μέσο 2, θα διεγερθεί μόνο εγκάρσιο κύμα. Η μέγιστη γωνία διάθλασης $\beta_{2T} = 90^0$ εμφανίζεται για τη γωνία πρόσπτωσης α''_{1L}. Μετά από την υπέρβαση της γωνίας πρόσπτωσης α''_{1L} στο μέσο 2, δεν διεγείρεται εγκάρσιο κύμα και η γωνία αυτή λέγεται δεύτερη κρίσιμη γωνία.



Εικόνα 2-27: *Διάθλαση κυμάτων.*

Με την αξιοποίηση του νόμου του Snell, παρότι από τον κρύσταλλο εκπέμπονται μόνο διαμήκη κύματα, με συγκεκριμένη γωνία διάθλασης παράγονται και διαδίδονται μόνο εγκάρσια κύματα σε ένα υλικό.

Οι γωνίες που παράγονται τα εγκάρσια κύματα στο χάλυβα είναι μεταξύ 38^0 και 80^0 και συνήθως σε τυποποιημένες τιμές 45^0, 60^0 και 70^0.

Υπολογισμός κρίσιμων γωνιών για prespex και χάλυβα:

α = γωνία πρόσπτωσης

β = γωνία διάθλασης

V_1 = ταχύτητα σε prespex = 2740 m/s

V_2 = ταχύτητα σε χάλυβα , για διαμήκη = 5960 m/s

, για εγκάρσια = 3240 m/s

1η κρίσιμη γωνία

$\sin\alpha = (V_1/ V_2)\sin\beta$

$\sin\alpha = 2740/5960 \times \sin 90 \Rightarrow \sin\alpha = 0.459731543$

α = 27,40

2η κρίσιμη γωνία

sinα = (V_1/ V_2)sinβ

sinα = 2740/3240 x sin90 ⇒ sinα = 0.845679012

α = 57,70

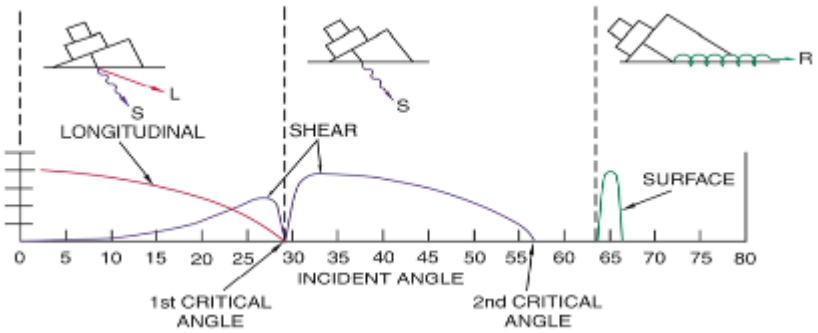
Στην πρώτη κρίσιμη γωνία διαμήκη και εγκάρσια κύματα συνυπάρχουν, επομένως η ελάχιστη γωνία για εγκάρσια κύματα είναι μικρότερη από την 1η κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης την 29^0, η οποία δίνει γωνία διάθλασης 35^0.

sinβ = V_2/ V_1 x sinα

sinβ = 3240/2740 x sin90 ⇒ sinα = 1.182481752x0.4848096

α = 350

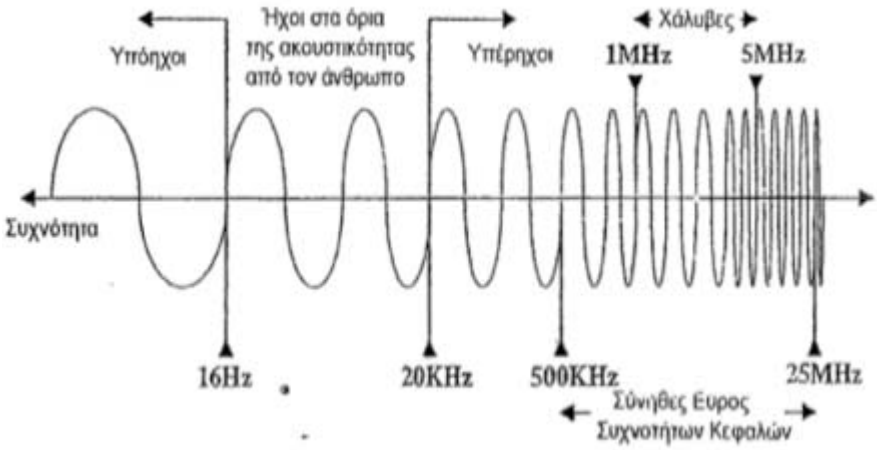
Στη δεύτερη κρίσιμη γωνία εμφανίζονται επιφανειακά κύματα επομένως η γωνία ανάκλασης που χρησιμοποιούμε για εγκάρσια κύματα 56^0 δίνουν γωνία 80^0. Επομένως για το χάλυβα το εύρος των γωνιακών κεφαλών είναι από 35^0 έως 80^0, οι οποίες προέρχονται από γωνίες ανάκλασης από 29^0 έως 56^0 σε prespex.



Εικόνα 2-28: *Σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και των σχετικών πλατών των διαθλώμενων εγκαρσίων, διαμηκών και επιφανειακών κυμάτων.*

2.2.4.6 Ακουστικό φάσμα

Για να γίνεται αντιληπτός ένας ήχος από το ανθρώπινο αυτί, πρέπει να έχει συχνότητα από 16Hz έως 20KHz και βέβαια κατάλληλη ένταση. Ήχοι με συχνότητα μικρότερη των 16Hz λέγονται υπόηχοι και με συχνότητα πάνω από 20KHz υπέρηχοι.



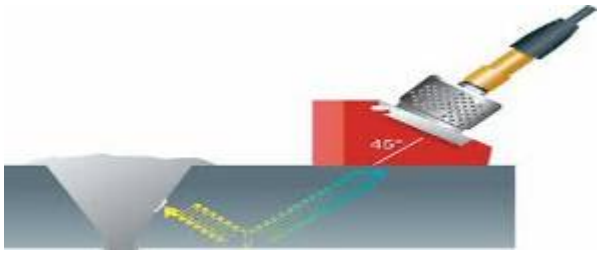
Εικόνα 2-29: *Ακουστικό φάσμα.*

Οι υπέρηχοι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε πλήθος επιστημών αλλά χρησιμοποιούνται επίσης σαν μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου (ΜΚΕ) για την εύρεση ασυνεχειών μεταλλικών και άλλων κατασκευών, τη μέτρηση του πάχους υλικών και άλλες εφαρμογές. Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται σε ΜΚΕ με συχνότητες 100KHz – 25MHz. Για χάλυβες το εύρος των συχνοτήτων είναι 1MHz – 5MHz.

2.3 Μη Καταστροφικός Έλεγχος με Υπέρηχους

2.3.1 Εισαγωγή

Ο υπέρηχος είναι μια μηχανική ταλάντωση/δόνηση της ύλης με συχνότητα πάνω από το ακουστικό όριο. Το κύμα διαδίδεται μέσα στο μέσο σαν μια διαταραχή των σωματιδίων του μέσου που συντηρεί τη διάδοση του κύματος. Η ταλάντωση είναι κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, καθιστώντας το ένα διαμήκες κύμα. Δεν υφίστανται ουσιαστικά συνολική μετατόπιση των σωματιδίων και μεταφορά μάζας. Το υπερηχητικό κύμα επιδρά ως απλή διαταραχή στο μέσο.



Εικόνα 2-30: *Εύρεση ατελειών με υπέρηχο*

Μία από τις παλαιότερες μη καταστροφικές μεθόδους δοκιμής αποτελεί ο έλεγχος των υλικών με τη χρήση υπερήχων.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τους υπερήχους ως το μέσο μέτρησης, διάγνωσης και εύρεσης ατελειών έχουν εφαρμογή σε όλα τα αποκαλούμενα ηχοαγώγιμα υλικά. Η αρχή λειτουργίας είμαι αρκετά απλή και συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιούνται αισθητήρες με τη δυνατότητα εκπομπής και λήψης υπερήχων οι οποίοι εισάγουν παλμούς μέσα στο εξεταζόμενο υλικό. Ακριβώς όπως συμβαίνει και με τους ήχους που μπορούμε να ακούσουμε, μόλις κάποιος από τους παλμούς αυτούς βρει κάποιο εμπόδιο το οποίο ιδανικά είναι κάθετο σε αυτόν (π.χ. την επιφάνεια άλλου μη ηχοαγώγιμου υλικού) ανακλάται προς τα πίσω και ο μετατροπέας που εμπεριέχεται στον αισθητήρα που τον εξέπεμψε τον μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια και ούτω καθεξής. Με τη διαδικασία αυτή οι συσκευές υπερήχων μετράνε πρακτικά το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να διανύσει την απόσταση από το σημείο που μπαίνει μέχρι το εμπόδιο και έχοντας δεδομένη την ταχύτητα που ταξιδεύει ο ήχος μέσα στο υλικό υπολογίζουν και μας δίνουν την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων. Λόγω του γεγονότος ότι ενδέχεται να υπάρχουν πολλών ειδών ατέλειες, με διάφορα σχήματα, γεωμετρίες και θέση μέσα στα υλικά που εξετάζονται, βρίσκονται στην διάθεση του ελεγκτή πολλών ειδών αισθητήρες οι οποίοι επιλέγονται κατά περίπτωση.

Οι κύριες εφαρμογές των ΜΚΕ με χρήση υπερήχων είναι :

- Η εύρεση ατελειών σε συγκολλήσεις μικρών και μεγάλων κατασκευών (σωλήνες, πλάκες κλπ)
- Η εύρεση εσωτερικών ατελειών σε χυτά (πόροι, εγκλείσματα κλπ)
- Η μέτρηση πάχους τοιχωμάτων σε σημεία που δεν είναι δυνατή η χρήση των κλασικών οργάνων (παχύμετρα)
- Ο προσδιορισμός της ψαθυρότητας των υλικών
- Η εξέταση της δομής των υλικών
- Η μέτρηση του πάχους των επικαλύψεων
- Ο προσδιρισμός της σκληρότητας των υλικών
- Ο έλεγχος της λειτουργίας αυτοματοποιημένων μηχανών

Επίσης, η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία για τη συγκόλληση των μετάλλων ή πλαστικών όπως σωλήνων από PVC, στην κατασκευή νομισμάτων, στην κτηνοτροφία για τον έλεγχο της ανάπτυξης των ζώων και τον καθορισμό της κατάλληλης διατροφής τους καθώς και σε πολλές εφαρμογές στον ιατρικό τομέα.

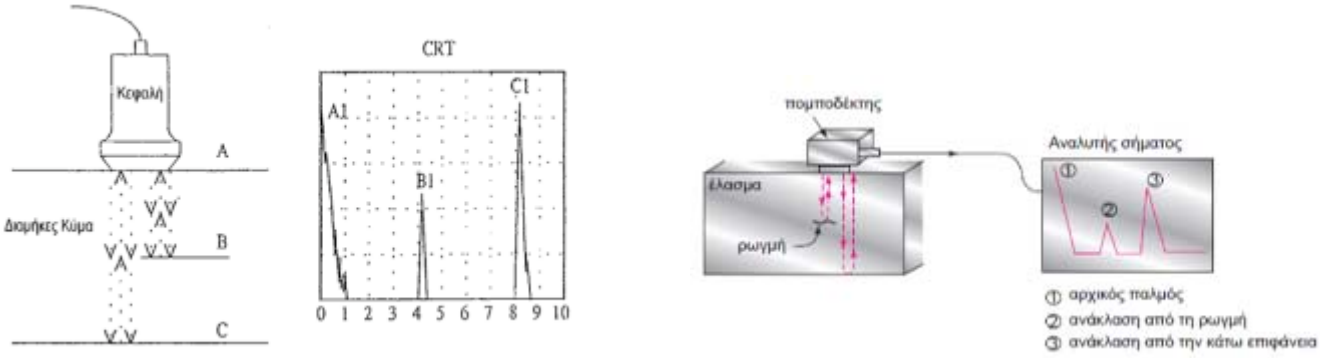
Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους που έχουν παρόμοιο πεδίο εφαρμογής οι υπέρηχοι πλεονεκτούν στο ότι :

- δεν παρουσιάζουν κανένα κίνδυνο για το προσωπικό

- εφαρμόζονται ακόμα και αν το δοκίμιο έχει μεγάλο πάχος
- εντοπίζουν όλων των ειδών τις ατέλειες
- δεν αποτελούν ιδιαίτερα δαπανηρή επένδυση

2.3.2 Συσκευή υπερήχων

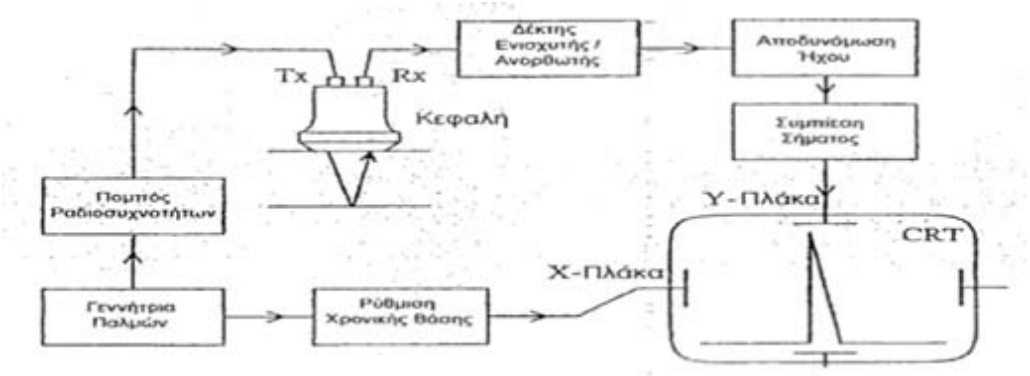
Οι υπέρηχοι εκπέμπονται από κατάλληλη συσκευή και η παρουσίαση των παλμών γίνεται σε οθόνη καθοδικών κρυστάλλων (CRT). Αρχικά από τον κρύσταλλο της κεφαλής εκπέμπεται το ηχητικό κύμα το οποίο διαπερνά την επιφάνεια Α αναπαράγοντας ένα παλμό Α1. Το ηχητικό κύμα στη συνέχεια ανακλάται στην ασυνέχεια Β αναπαράγοντας τον παλμό Β1. Το υπόλοιπο μέρος του ηχητικού κύματος συνεχίζει μέχρι να φθάσει στον πυθμένα C από όπου δίνει τον παλμό C1. Στη συσκευή θα πρέπει να έχει γίνει καλιμπράρισμα με πρότυπο δοκίμιο γνωστού πάχους και θα απεικονίζεται στη οθόνη το βάθος του σφάλματος από την επιφάνεια Α έως Β (Εικόνα 2-28).



Εικόνα 2-31: *Συσκευή Υπερήχων.*

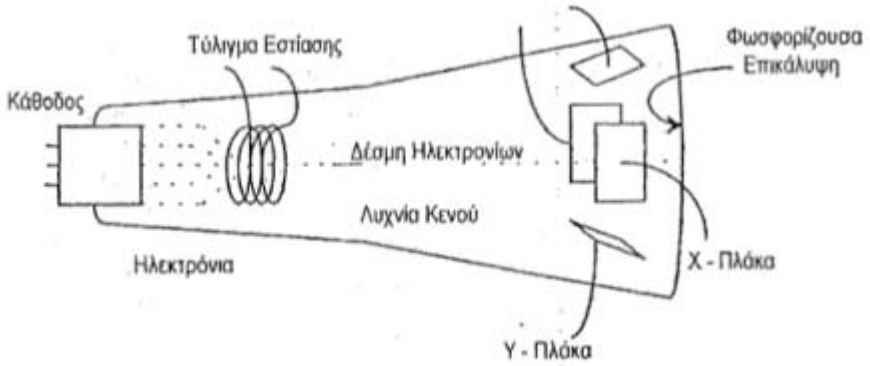
Η σκανδάλη (trigger/timer), δίνει το έναυσμα για κάθε παλμό σε μία γεννήτρια παλμών (pulse generator), ο οποίος με τη σειρά του ενεργοποιεί τον πομπό ραδισυχνοτήτων (που προκαλεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στον κρύσταλλο της κεφαλής και άρα έχουμε εκπομπή υπερήχων).

Ταυτόχρονα η σκανδάλη ενεργοποιεί τη ρύθμιση χρονικής βάσης του παλμογράφου καθοδικών ακτίνων (CRT) αλλά και προξενεί την εμφάνιση του αρχικού παλμού (initial pulse) στην οθόνη του παλμογράφου. Εάν επιστρέφει ο ήχος στην κεφαλή, μετατρέπεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε ηλεκτρική τάση, η οποία ενισχύεται και οδηγείται στις πλάκες Y του παλμογράφου. Το χρονικό διάστημα που παρήλθε από το έναυσμα ως την επιστροφή του ήχου, μέσω των πλακών X, τοποθετεί το σήμα στην οριζόντια κλίμακα.

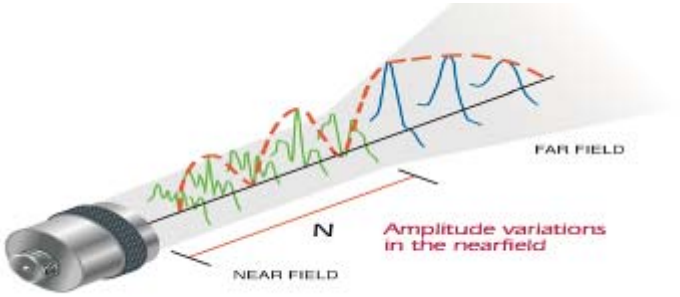


Εικόνα 2-32: *Διάταξη συσκευής υπερήχων.*

Ο συγχρονιστής εκπέμπει παλμούς διέγερσης για τη λειτουργία της γεννήτριας υψηλής συχνότητας. Η γεννήτρια υψηλής συχνότητας για μικρό χρονικό διάστημα διεγείρει την πιεζοηλεκτρική κεφαλή σε ταλαντώσεις και προκαλεί την προσαγωγή στο ελεγχόμενο αντικείμενο της δέσμης υπερηχητικών κυμάτων. Συγχρόνως ο ηλεκτρικός παλμός από το συγχρονιστή μεταδίδεται στον ενισχυτή και κατόπιν προσάγεται στον παλμογράφο, όπου αποτυπώνεται στην οθόνη με μορφή διάθλασης. Κατά τη διάρκεια του διαλείμματος μεταξύ των παλμών, προσάγεται η δέσμη των υπερηχητικών κυμάτων στο δοκίμιο και ανακλάται από το σφάλμα και από τον πυθμένα του. Τα ανακλώμενα υπερηχητικά κύματα διεγείρουν την κεφαλή εκπομπής λήψης για ταλαντλωσεις. Η διεγερμένη κεφαλή εκπομπής λήψης για ταλαντώσεις εκπέμπει διαμέσου του ενισχυτή ηλεκτρικό παλμό στον παλμογράφο. Η κίνηση της ταλαντωσκοπικής κηλίδας προς την οριζόντια κατεύθυνση ελέγχεται από τη γεννήτρια ρύθμισης του χρόνου.



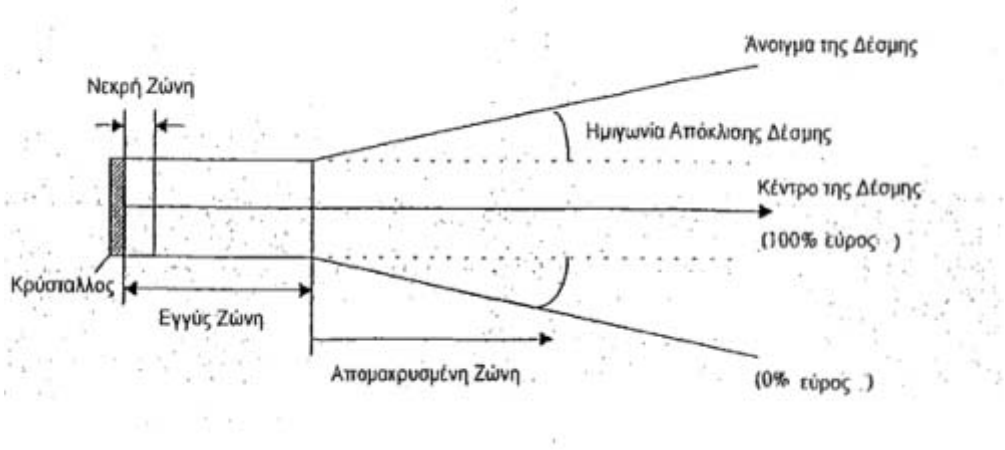
Εικόνα 2-33: *Γενικά χαρακτηριστικά της δέσμης υπερήχων.*



Εικόνα 2-34: *Δέσμη υπερήχων.*

Από κάθε παλμό παράγεται μια δέσμη υπερήχων η οποία έχει συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως προς την έντασή της. Η δέσμη υπερήχων που εκπέμπεται από μια κεφαλή παρουσιάζει τρεις ζώνες :

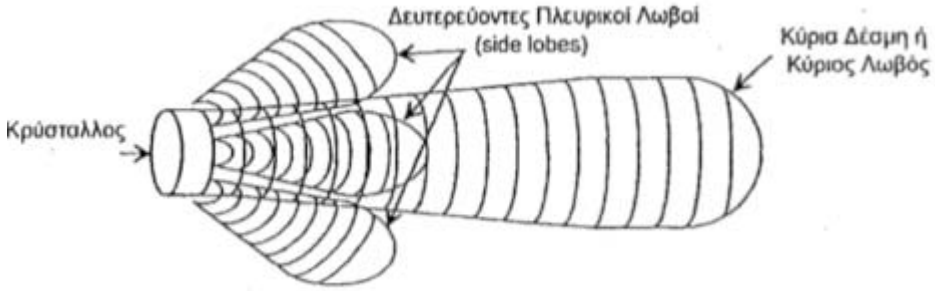
1. Την νεκρή ζώνη: Η νεκρή ζώνη εμφανίζεται στην οθόνη σαν προέκταση του αρχικού παλμού. Είναι ο χρόνος κρούσης του κρυστάλλου και ελαχιστοποιείται από τον αποσβεστήρα πίσω από τον κρύσταλλο. Αυξάνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ήχου ή μειώνεται η συχνότητα της κεφαλής. Είναι δηλαδή τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η συχνότητα των υπερήχων. Στην νεκρή ζώνη είναι αδύνατο να γίνει ανίχνευση ασυνεχειών. Το φαινόμενο της νεκρής ζώνης μπορεί να εξουδετερωθεί με την χρήση διπλών κεφαλών.
2. Την εγγύς ζώνη (ζωνη Fresnel): Τα χαρακτηριστικά του κρυστάλλου και το υλικό υποστήριξης πίσω από τον κρύσταλλο είναι υπεύθυνα για την ανομοιομορφία στην κατανομή της εντάσης και της πίεσης. Στην εγγής ζώνη τα ύψη των ανακλάσεων από ασυνέχειες των ίδιων διαστάσεων μπορεί να αυξάνονται με την απόστασή τους από τον κρύσταλλο, λόγω συμβολής. Μειώνοντας τη συχνότητα της δέσμης ή τη διάμετρο του κρυστάλλου η εγγύς ζώνη μπορεί να μειωθεί.
3. Την απομακρισμένη ζώνη (ζώνη Fraunhoffer): Σε αυτή τη ζώνη η πίεση του ήχου παραμένει σταθερή στον άξονα, αλλά μειώνεται όταν απομακρύνεται από αυτόν. Στην απομακρυσμένη ζώνη τα ύψη των ανακλάσεων από ασυνέχειες του ίδιου μεγέθους είναι αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της απόστασής τους από τον κρύσταλλο. Πιο αναλυτικά για μεγάλες επίπεδες ασυνέχειες το ύψος του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης ενώ για μικρές επίπεδες ασυνέχειες το ύψος του σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης.



Εικόνα 2-35: *Τρεις ζώνες της δέσμης υπερήχων.*

Άλλα χαρακτηρίστηκα της δέσμης είναι:

Πλευρικοί λωβοί: Οι πλευρικοί λωβοί παράγονται στο εμπρόσθιο τμήμα της κεφαλής. Ως προς την κύρια δέσμη είναι δευτερεύοντα ηχητικά κύματα. Μπορεί να προκαλέσουν μη επιθυμητούς παλμούς κυρίως σε τραχιές επιφάνειες και ασαφείς ενδείξεις στη οθόνη της συσκευής υπερήχων.



Εικόνα 2-36: *Πλευρικοί λοβοί.*

Για εγκάρσια κύματα η ελάχιστη διαθλώμενη γωνία σε χάλυβα είναι περίπου 33^0 έως 35^0. Σε αυτό το εύρος γωνιών είναι πιθανόν να δημιουργηθούν πλευρικοί λωβοί. Για το λόγο αυτό προτιμούνται οι γωνίες κεφαλών > 40^0. Οι πλευρικοί λωβοί γίνονται πιο δυνατοί όσο πιο στενή είναι η δέσμη υπερήχων.

Διακριτική ικανότητα: Η ικανότητα διαχωρισμού στον άξονα του χρόνου δύο ή περισσότερων ανακλαστήρων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους ως προς την πορεία της δέσμης, λέγεται διακριτική ικανότητα. Όσο μικρότερο είναι το μήκος του παλμού, τόσο καλύτερη η διαχωριστική ικανότητα και τόσο μικρότερη η διείσδυση και η ενέργεια.

Συχνότητα επαναλήψεως παλμού: Η συχνότητα επαναλήψεως παλμού ή ρυθμός παλμού είναι ο αριθμός των παλμών της υπερηχητικής ενέργειας που εγκαταλείπει την κεφαλή στη μονάδα του χρόνου. Κάθε ενεργειακός παλμός που

αφήνει την κεφαλή πρέπει να επιστρέψει πριν φύγει ο επόμενος παλμός, αλλιώς συγκρούονται δημιουργώντας απατηλές αντιχήσεις που εμφανίζονται στην οθόνη.

Ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει ο παλμός όλη την απόσταση από την κεφαλή μέχρι την επιστροφή του, λέγεται χρόνος μετάβασης. Ο χρόνος μεταξύ δύο συνεχών παλμών που αφήνουν την κεφαλή, είναι γνωστός σαν μεσοδιάστημα. Θα πρέπει ο χρόνους μετάβασης να είναι μικρότερος από το μεσοδιάστημα αλλιώς θα εμφανισθούν στην οθόνη ενδείξεις που μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα. Πρακτικά το μεσοδιάστημα πρέπει να είναι πενταπλάσιο από το χρόνο μετάβασης.

2.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των υπερήχων

Η μετάδοση των υπερήχων σε ένα υλικό εξαρτάται από την πυκνότητα, τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, τον τύπο του μεταδιδόμενου κύματος και επηρεάζεται από τις ακόλουθες μεταβλητές :

- την ακουστική αντίσταση του υλικού του δοκιμίου
- την χαρακτηριστική αντίσταση εγκλεισμάτων
- την εξασθένηση
- την περίθλαση
- το μέγεθος των κόκκων του υλικού του δοκιμίου
- την απόσταση
- την ανισοτροπία του υλικού
- την έλλειψη ομοιογένειας

2.3.4 Ακουστική αντίσταση (Acoustic impedance)

Ακουστική αντίσταση είναι η αντίσταση που παρουσιάζει ένα υλικό στη διέλευση των ηχητικών κυμάτων. Η ακουστική αντίσταση Z είναι το γινόμενο της πυκνότητας ρ και της ταχύτητας διάδοσης του κύματος c :

$$Z = \rho \times c$$

Μεταξύ δύο μέσων διαφορετικής αντίστασης ένα μέρος της συνολικής ενέργειας (R_0) ανακλάται και επιστρέφει στο μέσον 1 (R) και ένα μέρος συνεχίζει τη μετάδοσή του στο μέσον 2 (Rt).

$$R/R_0 = [(Z_2-Z_1)/(Z_2+Z_1)]2 \times 100$$

Ισχύει ότι:

- Υψηλός λόγος ακουστικών αντιστάσεων → Περισσότερο ανακλώμενη ενέργεια
- Χαμηλός λόγος ακουστικών αντιστάσεων → Περισσότερο εκπεμπόμενη ενέργεια

2.3.5 Αποδυνάμωση του ήχου (Attenuation)

Η απώλεια της έντασης της δέσμης υπερήχων κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα υλικό, ονομάζεται αποδυνάμωση του ήχου. Η αποδυνάμωση του ήχου εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και οι κυριότερες αιτίες που την προκαλούν είναι ο διασκορπισμός και η απορρόφηση. Το φαινόμενο του διασκορπισμού προκαλείται από την αλλαγή διευθύνσεως των ηχητικών κυμάτων καθώς αυτά ανακλώνται σε ατέλειες. Στο φαινόμενο της απορρόφησης καθώς η δέσμη υπερήχων διαπερνά ένα υλικό μια ποσότητα ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω τριβής.

2.3.6 Υλικό σύζευξης (Couplant)

Σε κάθε περίπτωση και ανεξαρτήτως του τι είδους αισθητήρας χρησιμοποιείται, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ενδιάμεσου υλικού γνωστού ως couplant (gel,νερό, γράσο κλπ) το οποίο αντικαθιστά τον αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, διότι αυτός παρουσιάζει μεγάλη ακουστική αντίσταση μην επιτρέποντας την εισαγωγή του παλμού στο υλικό.

Το υλικό σύζευξης πρέπει να γεμίζει όλες τις επιφανειακές ατέλειες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομαλό γλίστρημα της κεφαλής πάνω στην προς έλεγχο επιφάνεια. Επιπλέον, συμβάλει στο να μην προκαλείται γρήγορη φθορά στην κεφαλή.

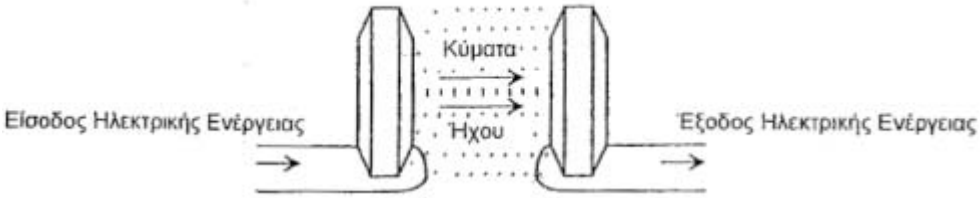
Οι κυριότερες ιδιότητες ενός καλού υλικού σύζευξης είναι οι εξής :

- Ακουστική αντίσταση ενδιάμεση με εκείνη της κεφαλής και του δοκιμίου
- Εύκολη εφαρμογή και απομάκρυνση από και προς το δοκίμιο.
- Να μην είναι διαβρωτικό
- Να μην είναι τοξικό ή επικίνδυνο για την υγεία
- Να διαβρέχει καλά όλες τις επιφάνειες και να μην επιτρέπει τη δημιουργία ακόμα και πολύ μικρών φυσαλίδων.

Εικόνα 2-37: *Υλικό σύζευξης.*

2.3.7 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους αδελφούς Jacques και Pierre Curie το 1880, οι οποίοι παρατήρησαν ότι υποβάλλοντας σε μηχανική πίεση συγκεκριμένα κρυσταλλικά υλικά, αυτά πολώνονται ηλεκτρικά και ο βαθμός πόλωσης είναι ανάλογος με την εφαρμοσμένη πίεση.



Εικόνα 2-38: *Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι η γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων σε μη συμμετρικούς κρυστάλλους. Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να ορισθεί ως το φορτίο της ηλεκτρικής πόλωσης που είναι ανάλογο με την παραμόρφωση. Ένα υλικό ονομάζεται πιεζοηλεκτρικό όταν μια εξωτερική μηχανική τάση αυξάνει την διηλεκτρική μετατόπιση μέσα στο υλικό. Η ηλεκτρική μετατόπιση εμφανίζεται σαν εσωτερική ηλεκτρική πόλωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται σημαντικά από την συμμετρία του κρυστάλλου. Ένας κρύσταλλος με αρκετά χαμηλή συμμετρία εμφανίζει πόλωση κάτω από την επίδραση μηχανικού φορτίου. Οι κρύσταλλοι που έχουν κεντρική συμμετρία δεν μπορούν να εμφανίσουν πιεζοηλεκτρισμό.

Σχετικό είναι επίσης και το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται όταν εφαρμοστεί σε αυτόν εξωτερική ηλεκτρική τάση.

Πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες εμφανίζουν οι κρύσταλλοι χαλαζία (Quartz), το θειικό λίθιο, το τιτανικό βάριο κτλ.

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο λαμβάνεται από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο που έχει κοπεί σε πλάκες.

2.3.7.1 Πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι

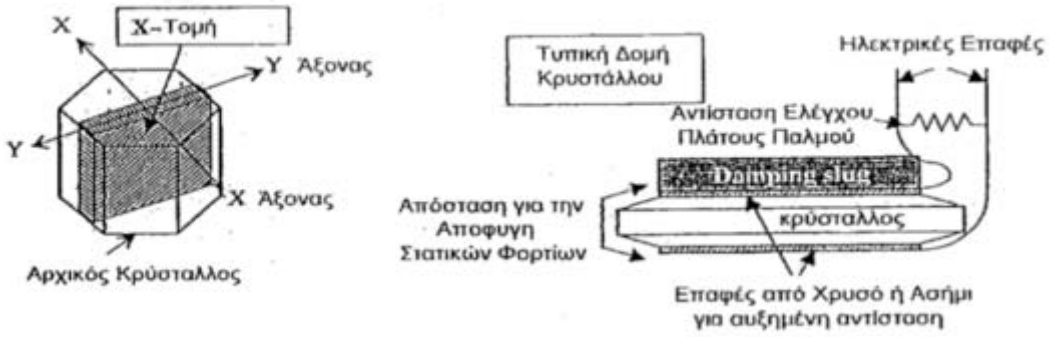
Αυτοί οι κρύσταλλοι έχουν κοπεί κατά τον άξονα των X ή κατά τον άξονα των Y, ανάλογα με τον αρχικό τεμαχισμό του κρυσταλλικού υλικού.

Στις δοκιμές υπερήχων χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι που έχουν κοπεί κατά τον άξονα των X, λόγω του είδους της δόνησης που παράγουν. Αυτό σημαίνει ότι ο κρύσταλλος έχει κοπεί με τη μεγαλύτερη του όψη, κάθετα προς τον άξονα των X του κρυσταλλικού υλικού.

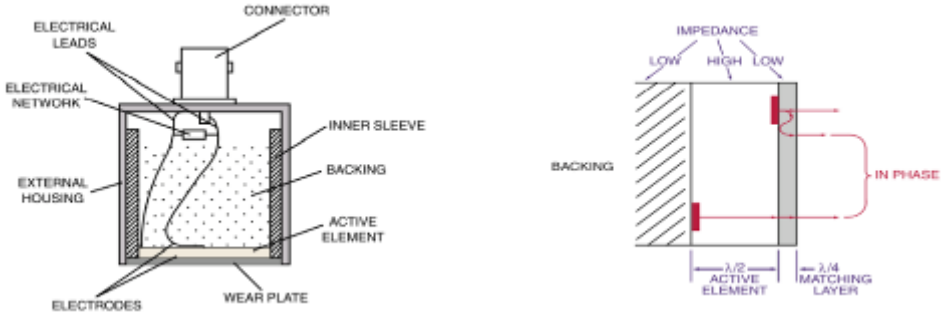
Σε κάθε κρύσταλλο το πάχος και η ακουστική ταχύτητά του καθορίζουν τη συχνότητά του. Όσο πιο λεπτός είναι ο κρύσταλλος, τόσο υψηλότερη είναι η εκπεμπόμενη συχνότητα. Το πάχος του κρυστάλλου δίνεται από τη σχέση:

$$t = c/2f$$

όπου t: το πάχος κρυστάλλου, c: η ταχύτητα του ήχου στο υλικό του κρυστάλλου και f: η συχνότητα με την οποία πάλλεται ο κρύσταλλος.



Εικόνα 2-39: *Τυπική δομή κρυστάλλου.*



Εικόνα 2-40: *Χαρακτηριστικά κεφαλής υπερήχων*

Για να επιτυγχάνεται μικρή διάρκεια παλμού ο κρύσταλλος βρίσκεται σε επαφή με το υλικό υποστήριξης το οποίο είναι πλαστικό με ισχυρή απορρόφηση. Επίσης, για να διαφυλάσσεται ο κρύσταλλος από τριβή, φθορά ή σπάσιμο υπάρχει μπροστά του ακρυλικό υλικό το οποίο μπορεί να έχει τη μορφή σφήνας έτσι ώστε να μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης στην προς έλεγχο επιφάνεια.

2.3.7.2 Υλικά πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων

Υπάρχουν τριών ειδών πιεζοηλεκτρικά στοιχεία :

1. Κρύσταλλοι χαλαζία
2. Πολωμένα κεραμικά
3. Στοιχεία από Lithium Sulphate

Φυσικής Προέλευσης	Τεχνητά Κατασκευασμένοι	Κεραμικοί
Χαλαζίας (SiO2) Τουρμαλίνης Na (Mg, Fe)$_3$Al$_6$B$_3$Si$_6$O$_{27}$ (OH,F)$_4$	Θειικό Λίθιο ($LiSO_4$)	Τιτανικό Βάριο ($BaTiO_3$) Ζιρκονικός Μόλυβδος ($PbZrO_3$) Ζιρκονικοτιτανικός Μόλυβδος (PZT) Μετανιοβικός Μόλυβδος ($PbNb_2O_6$)

2.3.8 Κατηγορίες κεφαλών

Κάθε μία από τις παρακάτω κατηγορίες μπορεί να περιλαμβάνει κεφαλές που είναι είτε πομποί, είτε δέκτες, είτε και τα δύο ταυτόχρονα :

- Κάθετες κεφαλές
- Δίδυμες κεφαλές
- Γωνιακές κεφαλές
- Κεφαλές Delay Line
- Ενισχυμένες κεφαλές
- Κεφαλές εμβάπτισης (Immersion)
- Κεφαλές υψηλής συχνότητας

Εικόνα 2-41: *Κεφαλές υπερήχων.*

2.3.8.1 Κάθετες κεφαλές

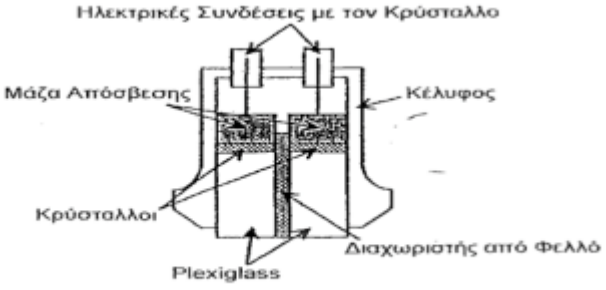
Οι κάθετες κεφαλές αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που παράγει συνήθως ένα διάμηκες κύμα και το οποίο προορίζεται για την άμεση επαφή με το προς έλεγχο υλικό. Όλες οι κάθετες κεφαλές είναι εξοπλισμένες με ένα κάλυμμα WC5 που προσφέρει άριστη αντοχή για μακροχρόνια χρήση. Παρέχουν επίσης άριστη σύνθετη ακουστική αντίσταση που ταιριάζει στα περισσότερα μέταλλα.

Εικόνα 2-42: *Κάθετες κεφαλές υπερήχων.*

Εφαρμόζονται στην περίπτωση που επιθυμούμε να προβούμε στην παχυμέτρηση κάποιου υλικού, να εντοπίσουμε ατέλειες της δομής του ή να προσδιορίσουμε τις ελαστικές σταθερές και την απόσβεση του αρκεί να είναι επίπεδη η κάτω επιφάνειά του.

2.3.8.2 Δίδυμες κεφαλές

Μια δίδυμη κεφαλή υπερήχων αποτελείται από δύο πιεζοηλεκτρικά στοιχεία διαμηκών κυμάτων (ένας πομπός και ένας δέκτης κυμάτων) που απομονώνονται μεταξύ τους από ένα ακουστικό εμπόδιο. Τα στοιχεία ενώνονται ελαφρώς μεταξύ τους για να μεταδώσουν ένα σήμα σε σχήμα V.



Εικόνα 2-43: *Δίδυμες κεφαλές υπερήχων.*

Οι δίδυμες κεφαλές προσφέρουν πολύ καλές μετρήσεις σε έντονα διαβρωμένα μέρη και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλον.

2.3.8.3 Γωνιακές κεφαλές

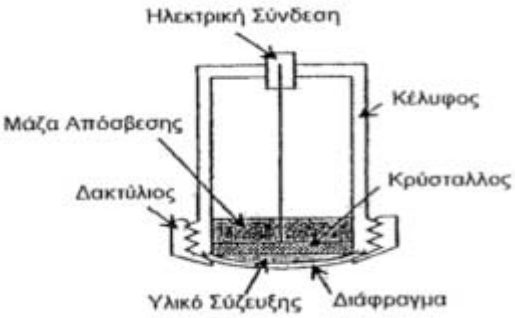
Οι γωνιακές κεφαλές αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο και συνδυάζονται με ένα ειδικό γωνιακό "παπουτσάκι" για να εισάγουν διαμήκη ή εγκάρσια κύματα σε ένα υλικό σε συγκεκριμένη γωνία. Επιτρέπουν ελέγχους σε περιοχές, που δεν είναι εύκολο να προσεγγιστούν από το μονοπάτι του υπέρηχου μιας κάθετης κεφαλής.

Μια συνήθης χρήση των κεφαλών αυτών είναι στον έλεγχο συγκολλήσεων, όπου δεν είναι δυνατή η χρήση μιας κάθετης κεφαλής.

Εικόνα 2-44: *Γωνιακές κεφαλές υπερήχων.*

2.3.8.4 Κεφαλές μαλακού άκρου

Οι κεφαλές αυτού του τύπου αποτελούνται από μαλακό διάφραγμα προσαρμοσμένο στην εμπρόσθια όψη του κρυστάλλου με τη βοήθεια βιδωτού δακτυλίου. Ο χώρος μεταξύ του διαφράγματος και του κρυστάλλου καταλαμβάνεται από υλικό σύζευξης για την απομάκρυνση του αέρα.



Εικόνα 2-45: *Κεφαλές μαλακού άκρου υπερήχων.*

Το μαλακό διάφραγμα προσαρμόζεται στις ανωμαλίες της επιφάνειας του δοκιμίου, κάνοντας την κεφαλή αυτή ιδανική για τραχιές ή ανομοιόμορφες επιφάνειες.

2.3.8.5 Κεφαλές Delay Line

Οι κεφαλές delay line αποτελούνται από ένα ευρυζωνικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και έχουν ενσωματωμένο ένα μικρό κομμάτι πλαστικού ή εποξικού υλικού στην άκρη τους. Προσφέρουν καλύτερη εικόνα των ατελειών που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του προς εξέταση υλικού. Οι κεφαλές delay line μπορούν να καμπυλωθούν για να ταιριάξουν με τη γεωμετρία της επιφάνειας και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Εικόνα 2-46: *Κεφαλές Delay Line υπερήχων.*

2.3.8.6 Ενισχυμένες κεφαλές

Οι ενισχυμένες κεφαλές υπερήχων έχουν ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο διαμήκων κυμάτων με ειδικό κάλυμα. Είναι εξαιρετικά ευπροσάρμοστες και ικανές να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως κάθετες κεφαλές σε υλικά με χαμηλότερη σύνθετη αντίσταση, όπως το λάστιχο ή το πλαστικό.

Εικόνα 2-47: *Ενισχυμένες κεφαλές υπερήχων.*

2.3.8.7 Κεφαλές εμβάπτισης (Immersion)

Οι κεφαλές εμβάπτισης αποτελούνται από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο διαμηκών κυμάτων και το καλυμμά τους είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να συμφωνεί με τη σύνθετη αντίσταση του νερού.

Εικόνα 2-48: *Κεφαλές εμβάπτισης υπερήχων.*

Οι κεφαλές αυτές είναι σφραγισμένες και μπορούν να βυθιστούν στο νερό όταν χρησιμοποιούνται με αδιάβροχο καλώδιο. Με τη χρήση του νερού ως υλικού σύζευξης, οι κεφαλές αυτές είναι ιδανικές για εφαρμογές ανίχνευσης ατελειών όπου η καλή σύζευξη είναι ουσιαστική. Σαν πρόσθετη επιλογή, οι μετατροπείς βύθισης μπορούν επίσης να εστιασθούν για να αυξήσουν την ένταση του κύματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή και να μειώσουν το μέγεθος του σημείου που ανακλά στο προς εξέταση υλικό.

2.3.8.8 Κεφαλές υψηλής συχνότητας

Οι κεφαλές υψηλών συχνοτήτων διατίθενται είτε σαν delay line, είτε σαν εμβάπτισης και είναι διαθέσιμες στις συχνότητες από 20 MHz έως 225 MHz.

Εικόνα 2-49: *Κεφαλές υψηλής συχνότητας υπερήχων.*

Οι κεφαλές delay line αυτού του είδους είναι σε θέση να μετρήσουν λεπτά πάχη (π.χ. 0,010mm, εξαρτώμενο πάντα από το υλικό, την κεφαλή, τη θερμοκρασία κλπ.), ενώ οι κεφαλές εμβάπτισης υψηλών συχνοτήτων είναι ιδανικές για την υψηλής ανάλυσης απεικόνιση και ανίχνευση ατελειών σε πολύ λεπτά και χαμηλής εξασθένισης κομμάτια όπως είναι τα μικροτσίπ πυριτίου.

2.3.8.9 Κυλιόμενη κεφαλή – κεφαλή με τροχίσκους

Ο κρύσταλλος στην κεφαλή αυτή βρίσκεται στον άξονα του τροχίσκου και ο ήχος μεταδίδεται μέσα από το μαλακό υλικό του τροχίσκου στο υλικό του δοκιμίου. Ένας σύνδεσμος με φορτισμένο ελατήριο υποχρεώνει την κεφαλή να ακολουθεί το

σχήμα του δοκιμίου, και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τραχείες ή ανώμαλες επιφάνειες.

Το κυριότερο πλεονέκτημα της κεφαλής αυτής είναι ότι δεν χρειάζεται υλικό σύζευξης. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

2.3.8.10 Πομπός και δέκτης

Οι κεφαλές που είναι είτε πομποί είτε δέκτες λέγονται κεφαλές μονού κρυστάλλου ενώ οι κεφαλές που είναι και τα δύο ταυτόχρονα λέγονται κεφαλές διπλού κρυστάλλου. Τα πλεονεκτήματα της κεφαλής μονού κρυστάλλου, είναι η καλύτερη διεισδυτικότητα για ίδιο μέγεθος κεφαλής και επειδή η διάμετρος του πομπού κρυστάλλου είναι μεγαλύτερη, δεν υπάρχει σημείο εστιάσεως, δηλαδή λειτουργεί αποδοτικά σε μεγαλύτερο πεδίο. Επίσης, είναι φθηνότερη. Το πλεονέκτημά της κεφαλής διπλού κρυστάλλου, είναι ότι δεν υπάρχει νεκρή ζώνη στην οθόνη, πράγμα που σημαίνει περισσότερη διακριτική ικανότητα για σφάλματα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια.

2.3.9 Επιλογή κεφαλής

Σε έναν υπερηχητικό έλεγχο η επιλογή κεφαλής επηρεάζεται από τις παραμέτρους της δοκιμής και του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το δοκίμιο. Το μέγεθος και το είδος των ελαττωμάτων που θα ανιχνευθούν, το είδος του υλικού και η απόσταση που πρέπει να διανύσει ο ήχος μέσα στο υλικό είναι μερικές από τις παραμέτρους αυτές.

Κεφαλές μικρού και μεγάλου εύρους πεδίου.

ΚΕΦΑΛΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΔΙΟΥ	ΚΕΦΑΛΕΣ ΜΙΚΡΟΥ ΕΥΡΟΥΣ ΠΕΔΙΟΥ
Υψηλή απόσβεση	Χαμηλή απόσβεση
Μικρό μήκος παλμού (συνήθως 1 έως 2 κύκλοι)	Μεγαλύτερο μήκος παλμού (συνήθως 3 έως 4 κύκλοι)
Μικρή νεκρή ζώνη	Μεγάλη νεκρή ζώνη
Μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα	Ανεπαρκής διακριτική ικανότητα
Ανεπαρκής διείσδυση	Καλή διείσδυση

Οι δύο πίνακες που ακολουθούν δείχνουν τις ιδιότητες της κεφαλής σύμφωνα με δύο κριτήρια επιλογής, τη συχνότητα και τη διάμετρο.

Επίδραση της συχνότητας στην κεφαλή.

ΧΑΜΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΥΨΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
Μεγάλο μήκος κύματος	Μικρό μήκος κύματος
Περισσότερος διασκορπισμός δέσμης	Λιγότερος διασκορπισμός δέσμης
Βραχύτερη εγγύς ζώνη	Μακρύτερη εγγύς ζώνη
Καλύτερη διεισδυτικότητα	Χειρότερη διεισδυτικότητα
Λιγότερη αποδυνάμωση	Περισσότερη αποδυνάμωση
Μεγαλύτερη νεκρή ζώνη	Μικρότερη νεκρή ζώνη
Λιγότερη ευαισθησία	Περισσότερη ευαισθησία

Η κεφαλή υπερήχων, μεταδίδει ήχο διαφόρων συχνοτήτων και όχι μόνο μίας συχνότητας. Για παράδειγμα μια κεφαλή 5 MHz παράγει συχνότητες από 4 MHz έως 6 MHz. Αυτό ονομάζεται πεδίο συχνοτήτων. Το πεδίο συχνοτήτων είναι ενδεικτικό και του συντελεστή απόσβεσης.

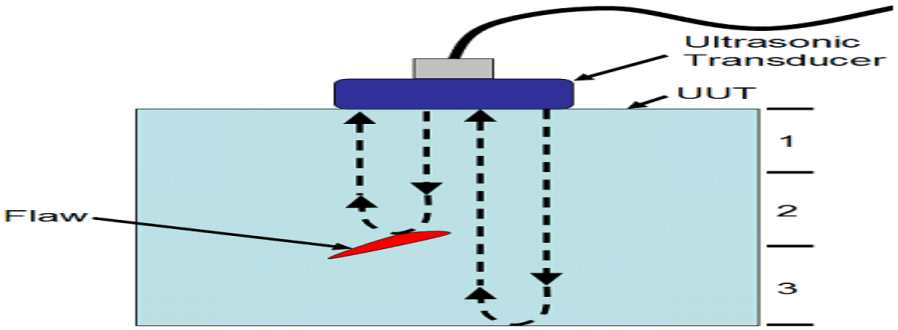
Επίδραση της διαμέτρου στη δέσμη υπερήχων

ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	ΜΙΚΡΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ
Λιγότερος διασκορπισμός δέσμης	Περισσότερος διασκορπισμός δέσμης
Μακρύτερη εγγύς ζώνη	Βραχύτερη εγγύς ζώνη
Μεγαλύτερη διεισδυτικότητα	Χειρότερη διεισδυτικότητα
Λιγότερη αποδυνάμωση (λόγω διασκορπισμού)	Περισσότερη αποδυνάμωση
Δυσκολία σύζευξης σε καμπύλες επιφάνειες	Ευκολότερη σύζευξη σε καμπύλες επιφάνειες
Περισσότερη κάλυψη σε επίπεδες επιφάνειες	Λιγότερη επικάλυψη σε επίπεδες επιφάνειες

2.3.10 Μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου

2.3.10.1 Σύστημα παλμού-ηχούς (Pulse Echo Method)

Η τεχνική αυτή αποτελεί την πιό διδεδομένη μέθοδο για έλεγχο με υπέρηχο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι απαιτείται η πρόσβαση μόνο σε μια επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Στηρίζεται στην ανίχνευση ανακλάσεων της υπερηχητικής δέσμης, που προκαλούνται από ατέλειες-βλάβες και διεπιφάνειες μέσα στα ελεγχόμενα υλικά. Στη μέθοδο της παλμοηχούς μικρής διάρκειας υπερηχητικοί παλμοί εισάγονται στο εξεταζόμενο υλικό, σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Εάν οι υπερηχητικοί παλμοί στην πορεία τους συναντήσουν μια επιφάνεια ανάκλασης, ολόκληρο το ποσό της ενέργειας τους ή μέρος της ανακλάται. Το ποσό της ανακλώμενης ενέργειας καταγράφεται καθώς και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του αρχικού παλμού και της λαμβανόμενης ανάκλασης.

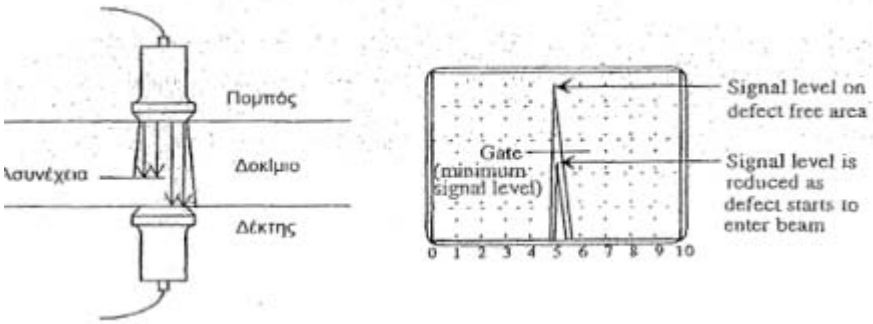


Εικόνα 2-50: *Τεχνική παλμού-ηχούς.*

Η μέθοδος της παλμοηχούς χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών-βλαβών και για την εκτέλεση παχυμετρήσεων. Οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι μονού ή διπλού κρυστάλλου. Τα πλεονεκτήματα του συστήματος παλμού ήχου είναι ότι οι θέσεις των ελαττωμάτων μπορούν να εντοπιστούν με ακρίβεια και απαιτείται πρόσβαση μόνο από τη μία πλευρά του δοκιμίου. Το μειονέκτημά της μεθόδου είναι ότι ο ήχος πρέπει να διατρέξει το υλικό δύο φορές πράγμα που προκαλεί μεγαλύτερη αποδυνάμωση.

2.3.10.2 Μέθοδος της διέλευσης (Through Transmission)

Η μέθοδος της διέλευσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών-βλαβών, για τον χαρακτηρισμό υλικών και για την παχυμέτρηση κατασκευών με μεγάλο πάχος και υψηλό συντελεστή απόσβεσης. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην καταγραφή της έντασης της υπερηχητικής δέσμης, που διέρχεται μέσα από το υλικό που εξετάζεται. Μετράται δηλαδή η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων, που μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως είναι η ύπαρξη ατελειών-βλαβών, η ύπαρξη διαχωριστικών επιφανειών και η ακουστική αντίσταση του υλικού. Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος πρέπει οι ανιχνευόμενες ατέλειες να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης, γιατί διαφορετικά λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως η δέσμη περνά κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της πίσω από τα εμπόδια.



Εικόνα 2-51: *Τεχνική διέλευσης.*

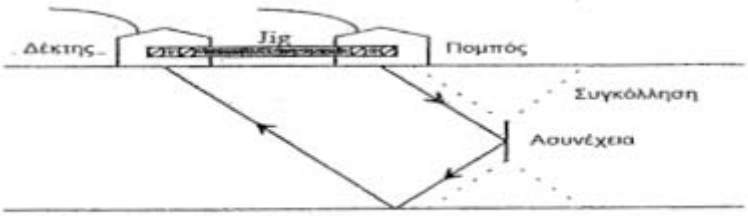
Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής, βασίζονται στο γεγονός ότι ο ήχος πρέπει να διατρέξει το υλικό μόνο κατά την μία διεύθυνση. Το μειονέκτημα είναι ότι οι κεφαλές πρέπει να είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες και υπάρχει το ενδεχόμενο η μεταβολή των συνθηκών σύζευξης να εκτιμηθεί λανθασμένα ως ελάττωμα.

2.3.10.3 Η μέθοδος του συντονισμού

Η μέθοδος του συντονισμού είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του πάχους και των ελαστικών σταθερών ενός υλικού όμως δεν προσφέρεται για την ανίχνευση ατελειών. Ο συντονισμός μπορεί να περιγραφεί ως ένα στάσιμο κύμα, κατά το οποίο υπάρχουν κάποια μόρια του υλικού που παραμένουν συνεχώς ακίνητα. Η συχνότητα του προσπίπτοντος υπερηχητικού κύματος μεταβάλλεται μέχρι την στιγμή που εμφανίζεται μία ταλάντωση συντονισμού στην πλάκα. Στην περίπτωση αυτή απορροφά από τον πομπό περισσότερη ισχύ από ότι θα απορροφούσε εάν δεν είχε συντονιστεί. Στη συνέχεια, η συχνότητα αυξάνει μέχρι να εμφανιστεί ο επόμενος πρώτος συντονισμός. Τότε από τη διαφορά των δύο συχνοτήτων συντονισμού Δf, υπολογίζεται το πάχος του εξεταζόμενου δοκιμίου από τον τύπο $d = C / 2Df$.

2.3.10.4 Τεχνική των δίδυμων κεφαλών

Στην τεχνική των δίδυμων κεφαλών χρησιμοποιείται μια κεφαλή εκπομπής ήχου και μια λήψεως. Και οι δύο κεφαλές πρέπει να βρίσκονται στην ίδια επιφάνεια του δοκιμίου και σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους έτσι ώστε οι παλμοί από την κεφαλή εκπομπής, που θα ανακλαστούν από ένα ελάττωμα, να κατευθυνθούν προς την κεφαλή λήψεως και έτσι να εμφανισθεί το σήμα στην οθόνη. Το βάθος των ελαττωμάτων, το πάχος του υλικού και η γωνία της κεφαλής καθορίζουν την απόσταση μεταξύ των κεφαλών.

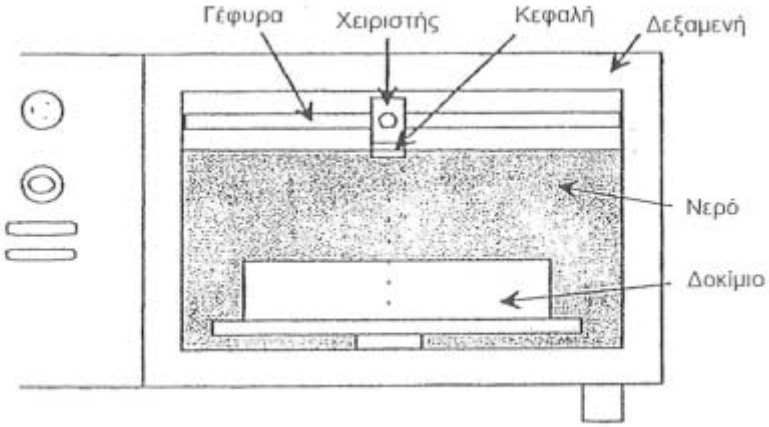


Εικόνα 2-52: *Τεχνική δίδυμων κεφαλών.*

2.3.10.5 Δοκιμή με καταβύθιση

Η τεχνική της δοκιμής με καταβύθιση διενεργείται αυτόματα σε εργαστήρια ή εξειδικευμένα τμήματα βιομηχανίας. Το σύστημα χρησιμοποιεί κεφαλή συμπιεστικών κυμάτων προσαρμοσμένη σε ένα φορέα που ολισθαίνει σε οδηγό πάνω από ενα

δοχείο με νερό στο οποίο βρίσκεται βυθισμένο το δοκίμιο. Ο φορέας επιτρέπει στην κεφαλή να παίρνει κλίση κατά διάφορες γωνίες. Με μεταβολή της γωνίας κατά τιμές μεγαλύτερες από αυτές των κρίσιμων γωνιών, δημιουργούνται ποικίλες γωνίες διαθλάσεως εγκαρσίων κυμάτων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της δοκιμής.

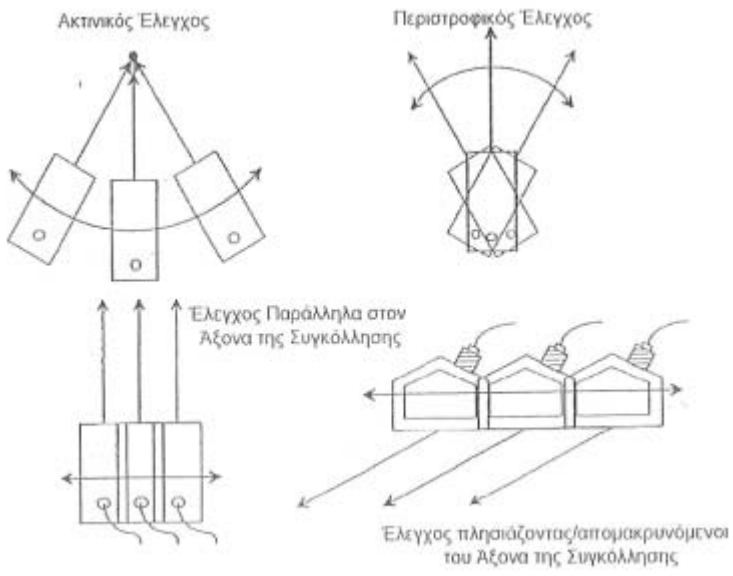


Εικόνα 2-53: *Δοκιμή με καταβύθιση.*

2.3.11 Τύποι σαρώσεων

Οι τύποι σαρώσεως για τις γωνιακές κεφαλές αφορούν τον τρόπο χειρισμού της κεφαλής καθώς και τον τρόπο κινήσεως της κεφαλής. Οι συνηθέστεροι τύποι, που αναφέρονται σε πρότυπα και διαδικασίες εφαρμογής είναι :

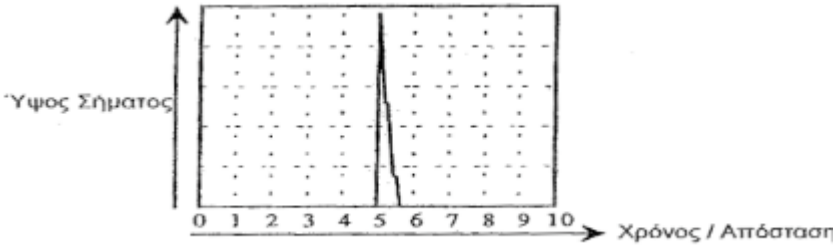
- Τροχιακή σάρωση: Ο χειρισμός της κεφαλής γίνεται κατά τοξοειδή κίνηση με προσπάθεια συνεχούς εστίασης της δέσμης σε σταθερό ανακλαστήρα. Συχνά χρησιμοποιείται για την ανίχνευση πορώδους όταν υπάρχει δυνατότητα διατήρησης του σήματος με τροχιακή σάρωση.
- Περιστροφική σάρωση: Εδώ η κεφαλή ταλαντεύεται επάνω σε ένα σταθερό σημείο, εκπέμποντας αποτελεσματικά την δέσμη γύρω από αυτό το σημείο. Χρησιμοποιείται για αναγνώριση πολυεδρικών, επιπεδόμορφων ή πολλαπλών σφαλμάτων.
- Πλευρική σάρωση: Η κεφαλη κινείται πλαγίως κατά μήκος προκαθορισμένης σταθερής γραμμής. Χρησιμοποιείται για αναγνώριση πολυεδρικών, επιπεδόμορφων ή πολλαπλών σφαλμάτων, καθώς και για την διαμήκη σάρωση συγκολλήσεων.
- Σάρωση βάθους: Η κεφαλή κινείται εμπρός πίσω, στο επίπεδο της δέσμης, όπως στον προσδιορισμό της θέσεως ενός ελαττώματος, ή στην μεγιστοποίηση του σήματος μίας εγκάρσιας οπής για ρύθμιση της ευαισθησίας.



Εικόνα 2-54: *Παραδείγματα σαρώσεων.*

2.3.12 Σάρωση τύπου Α

Η σάρωση τύπου Α είναι το συνηθέστερο σύστημα που χρησιμοποιείται στην χειροκίνητη μέθοδο επιθεώρησης με χρήση υπερήχων. Απεικονίζει την ανακλώμενη ενέργεια σε μια οθόνη σημάτων. Ο οριζόντιος άξονας της οθόνης παριστάνει τον παρερχόμενο χρόνο ή την απόσταση, ενώ ο κατακόρυφος άξονας το εύρος σήματος ή την ηχητική ενέργεια που επιστρέφει στην κεφαλή.



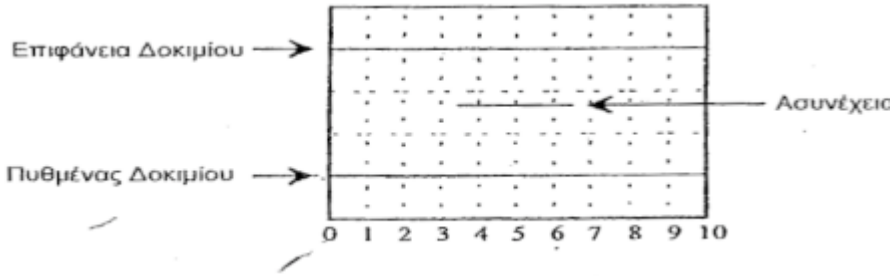
Εικόνα 2-55: *Σάρωση τύπου Α.*

Το σύστημα μπορεί να εξασφαλίσει ένδειξη για το μέγεθος του σφάλματος από το εύρος του σήματος, τη θέση του ελαττώματος από την θέση του σήματος επί του άξονα της βάσεως του χρόνου και για τον τύπο του σφάλματος από το σχήμα και την συμπεριφορά του σήματος κατά την κίνηση της κεφαλής. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ευκολία μεταφοράς και η σχετικά γρήγορη βαθμονόμηση του οργάνου.

2.3.13 Σάρωση τύπου Β

Η σάρωση τύπου Β παρέχει απεικόνιση της κατά πάχος τομής του δοκιμίου με σάρωση κατά μήκος της επιφάνειας. Με τη χρήση φωσφορίζουσας επικάλυψης

μεγάλης διάρκειας στην οθόνη, το είδωλο διατηρείται για κάποια χρονική περίοδο και μπορεί να φωτογραφηθεί για μόνιμη καταγραφή. Το εύρος του λαμβανόμενου σήματος είναι ανάλογο με τη λαμπρότητα του ειδώλου, ενώ ο συγχρονισμός της κίνησης της κεφαλής με την απεικόνιση μπορεί να αναπαραστήσει πραγματικά τις διαστάσεις του σφάλματος.

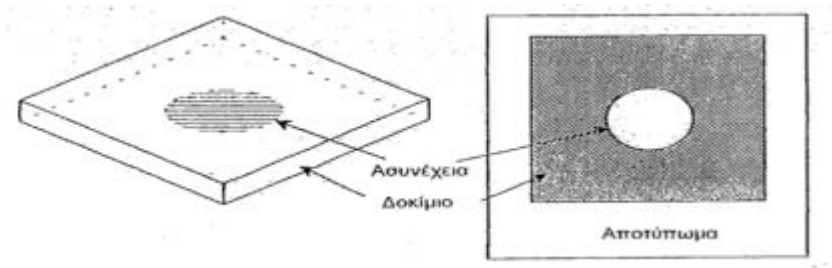


Εικόνα 2-56: *Σάρωση τύπου Β.*

2.3.14 Σάρωση τύπου C

Η σάρωση τύπου C μας δίνει την κάτοψη της επιφάνειας σαρώσεως, δείχνοντας ελαττώματα σαν περιοχές διαφορετικής φωτεινότητας σε σύστημα εκτύπωσης ή αποτύπωσης το οποίο συγχρονίζεται με την κίνηση της κεφαλής καθώς αυτή διατρέχει την επιφάνεια του υλικού. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η άμεση και μόνιμη καταγραφή.

Το μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει ένδειξη του βάθους ή του προσανατολισμού του σφάλματος και ότι η προετοιμασία εγκατάστασης είναι αρκετά χρονοβόρα.



Εικόνα 2-57: *Σάρωση τύπου C.*

2.3.15 Τρόποι σάρωσης με κεφαλές 0^0

Όταν κάνουμε σάρωση για ανίχνευση σφαλμάτων ο τρόπος της σάρωσης που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται πολλές φορές από το μέγεθος των αναμενόμενων ασυνεχειών. Οι δύο κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι η απόσταση μεταξύ των σαρώσεων (βήμα) και η επικάλυψη καθώς και ο τρόπος ή η διεύθυνση της σάρωσης. Εάν το βήμα είναι μικρότερο από το μέγεθος της κεφαλής, τότε θα υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των σαρώσεων. Εάν το βήμα είναι μεγαλύτερο από το

μέγεθος της κεφαλής, τότε μεταξύ των σαρώσεων θα υπάρχει κενό. Για παράδειγμα σε μεγάλο δοκίμιο όπου τα πρός ανίχνευση σφάλματα είναι άνω των 100 mm το βήμα μεταξύ των σαρώσεων μπορεί να είναι 75 mm.

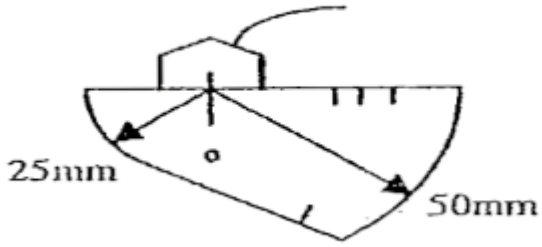
Εικόνα 2-58: *Τρόποι σάρωσης με κεφαλές 0^0*

2.3.16 Σάρωση με κάθετη κεφαλή – Βαθμονόμιση

Όταν μία κεφαλή υπερήχων τοποθετηθεί στην πλάγια όψη ενός δοκιμίου χάλυβα η δέσμη υπερήχων ανακλάται στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-χάλυβα και επιστρέφει στην διαχωριστική επιφάνεια χάλυβα-κεφαλής, από όπου ένα μέρος της δέσμης προσπίπτει στον κρύσταλλο που βρίσκεται μέσα στην κεφαλή. Με αυτόν τον τρόπο παράγεται το πρώτο σήμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η ενέργεια να αποσβεσθεί και δημιουργούνται έτσι τα υπόλοιπα διαδοχικά σήματα. Ο αρχικός παλμός είναι ένα σήμα που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της οθόνης της συσκευής υπερήχων και δεν έχει καμία σημασία για τη βαθμονόμηση. Τα διαστήματα μεταξύ των σημάτων αναπαριστούν το πάχος του δοκιμίου. Επομένως, αν χρησιμοποιήσουμε δοκίμιο βαθμονόμισης τύπου V2 και τοποθετήσουμε την κεφαλή στο πάχος των 25 mm τα διαδοχικά σήματα θα πρέπει να βρίσκονται μεταξύ τους σε απόσταση 25 mm.

2.3.17 Σάρωση με γωνιακές κεφαλές – Βαθμονόμηση

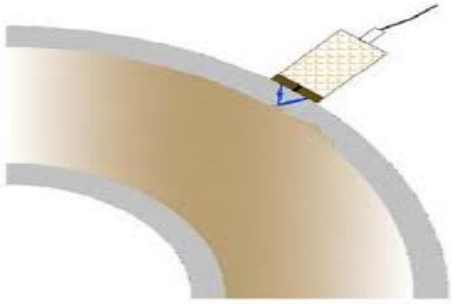
Στη σάρωση με γωνιακή κεφαλή ο ανακλαστήρας θα πρέπει να είναι κάθετος στη δέσμη υπερήχων. Για τη βαθμονόμηση της οθόνης χρησιμοποιούμε το δοκίμιο V2 το οποίο διαθέτει δύο ομόκεντρα τόξα κύκλου, το ένα 25 mm και το άλλο 50 mm. Από το ένα τόξο στο άλλο με αντηχήσεις που επαναλαμβάνονται γίνεται παλινδρομική μετάδοση του ήχου μέσω του κέντρου. Μετά την πρώτη ηχώ, οι αντηχήσεις συμβαίνουν κάθε 75 mm. Η απαιτούμενη κλίμακα καθορίζει τη διεύθυνση που αντικρίζει η κεφαλή. Για κλίμακα από 0 έως 100 mm η κεφαλή πρέπει να αντικρίζει το τόξο ακτίνας 25 mm, όπου το σήμα των 25 mm και των 100 mm είναι εύκολο να ευθυγραμμιστούν.



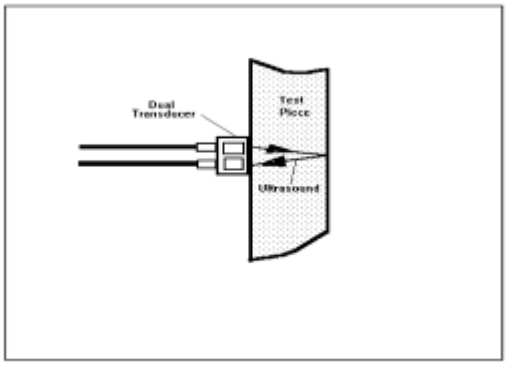
Εικόνα 2-59: *Δοκίμιο V2 Block.*

2.3.18 Παχυμέτρηση

Η παχυμέτρηση με τη χρήση υπερήχων είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική η οποία επιτρέπει τη μέτρηση του πάχους διαφορετικών υλικών, χωρίς να απαιτεί πρόσβαση και από τις δύο πλευρές του υλικού όπως οι κλασικές μέθοδοι μέτρησης (πχ. μηχανικά παχύμετρα).



Εικόνα 2-60: *Παχυμέτρηση με χρήση υπερήχων.*



Εικόνα 2-61: *Παχυμέτρηση με κάθετη διπλή κεφαλή*

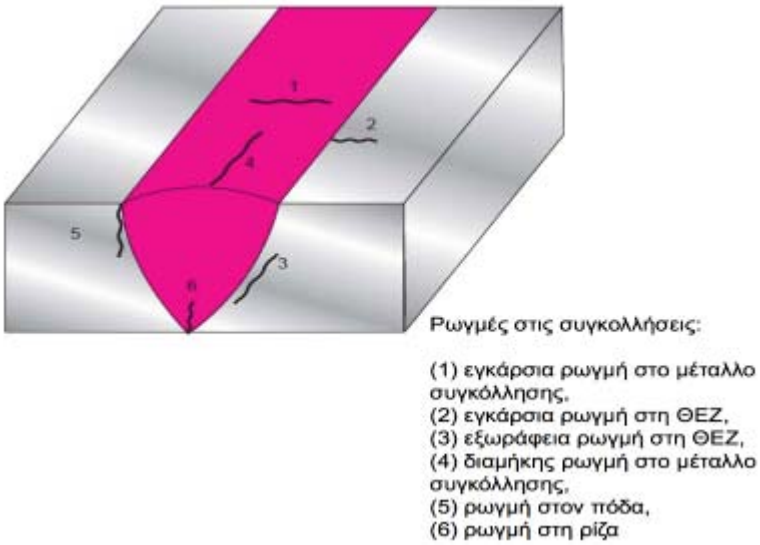
Η μέτρηση του πάχους των υλικών με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια διαφόρων συσκευών όπως με ένα απλό υπερηχητικό ανιχνευτή ατελειών ή με ειδικές υπερηχητικές συσκευές όπως είναι το υπερηχητικό ψηφιακό παχύμετρο. Το υπερηχητικό παχύμετρο είναι μια ηλεκτρονική συσκευή μικρών διαστάσεων και βάρους, η οποία μετράει το πάχος των υλικών κάθε

είδους με μεγάλη ακρίβεια. Η λειτουργία του στηρίζεται στα υπερηχητικά ελαστικά κύματα που παράγει, εκπέμπει, λαμβάνει και επεξεργάζεται κατάλληλα αυτή η συσκευή.

2.3.19 Έλεγχος συγκολλήσεων

Τα βασικά στάδια που πρέπει να ακολουθήσουμε για να κάνουμε έναν σωστό έλεγχο συγκόλλησης αναφέρονται παρακάτω :

- Οπτική επιθεώρηση: Γίνεται οπτική επιθεώρηση του δοκιμίου και αναφέρεται η οπτική εμφάνιση των συγκολλήσεων καθώς και η καμπυλότητα της επιφάνειας.
- Προετοιμασία της επιφάνειας : Οι επιφάνειες του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τη διαδικασία της σάρωσης θα πρέπει να επιτρέπουν ελεύθερη κίνηση των κεφαλών και βέβαια να είναι έτσι ώστε να υπάρχουν ικανοποιητικές συνθήκες για τη μετάδοση των υπερηχητικών κυμάτων. Επιπλέον, οι επιφάνειες και από τις δύο πλευρές της συγκόλλησης, θα πρέπει να είναι ελεύθερες από σκόνες, χρώματα, σωματίδια λείανσης και μηχανικής κατεργασίας.
- Μέσο σύζευξης: Μεταξύ της κεφαλής και της επιφάνειας τοποθετείται μέσω σύζευξης ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά της ακουστικής ενέργειας από τον πομπό στο υπό έλεγχο υλικό. Κάποια τυπικά μέσα σύζευξης είναι: γράσο, γλυκερίνη, νερό, ελαφρύ μηχανικό λάδι.
- Έλεγχος των περιοχών της σάρωσης: Η περιοχή του μετάλλου βάσης μέσω της οποίας ο ήχος υπό τη μορφή εγκάρσιων κυμάτων θα ταξιδέψει κατά τον έλεγχο της συγκόλλησης θα πρέπει προηγουμένως να ελεγχθεί με κεφαλή διαμηκών κυμάτων (κάθετη κεφαλή) ώστε να ανιχνευθούν τυχόν ασυνέχειες του μετάλλου βάσης, όπως διαστρωματώσεις, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων γωνιακής κεφαλής, με το να εμποδίζουν την πορεία του ήχου. Η προκαταρκτική αυτή διαδικασία γίνεται για να επιβεβαιωθεί το πάχος του υλικού καθώς και η απόσβεση των υπερήχων, αλλά και η επίδραση της μορφής της επιφάνειας στη μετάδοση των κυμάτων.
- Επιλογή κεφαλής: Η επιλογή των κεφαλών θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να αποκτηθεί η μέγιστη πληροφόρηση στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Επίσης, η συχνότητα των κεφαλών που θα επιλεχθεί εξαρτάται από τη δομή και το μέγεθος των κόκκων του υλικού, την απόσταση που διασχίζει η δέσμη, τη θέση των αναμενόμενων ελαττωμάτων, την ακρίβεια των μετρήσεων κλπ.



Εικόνα 2-62: *Ρωγμές σε συγκολλήσεις*

Σε έναν υπερηχητικό έλεγχο συγκολλήσεων σημαντικό ρόλο έχει η μελέτη των παρακάτω παραμέτρων:

- Η γεωμετρία της συγκόλλησης. Δηλαδή, η μορφή των μετάλλων που συγκολλήθηκαν καθώς και το πάχος και το υλικό των συγκοληθέντων μετάλλων.
- Το υλικό του ηλεκτροδίου
- Η μέθοδος της συγκόλλησης
- Αν έγινε προθέρμανση ή όχι
- Αν επακολούθησε ανόπτηση

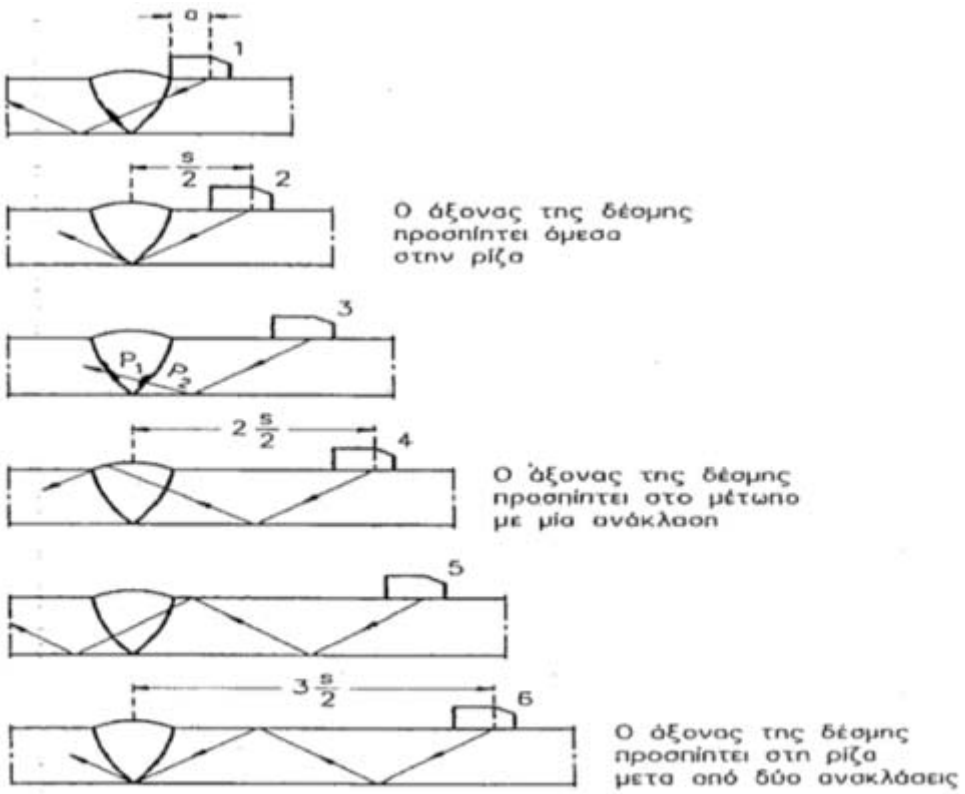
Μία ασυνέχεια μπορεί να προσδιοριστεί με μια γωνιακή κεφαλή κατά δύο τρόπους:

1. με την πρώτη ανάκλαση
2. με τη δεύτερη ανάκλαση

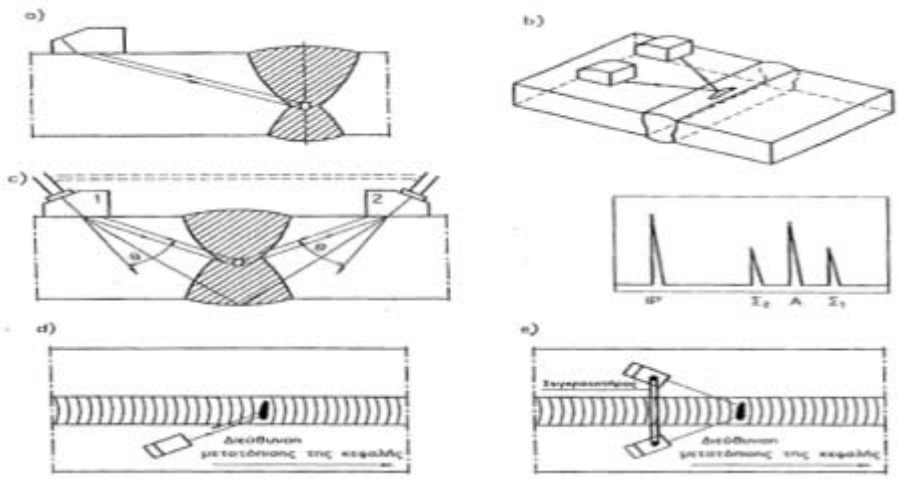
Ο έλεγχος των συγκολλήσεων γίνεται σε τρία διακεκριμένα βήματα:

- Έλεγχος με κάθετη κεφαλή για την εύρεση ανακλαστήρων στο μέταλλο βάσεως.
- Έλεγχος της ρίζας της συγκόλλησης
- Έλεγχος του σώματος της συγκόλλησης

Για τον έλεγχο μίας συγκόλλησης αρχίζουμε από την θέση 1 και προχωρούμε στη θέση 2 σε κάποια απόσταση από τη συγκόλληση. Συνεχίζουμε στη θέση 3 έως ότου σταματήσουμε στη θέση 4. Τότε θα έχουμε ελέγξει όλη τη συγκόλληση. Η εργασία αυτή επαναλαμβάνεται και για την άλλη πλευρά ή και για την αποκάτω πλευρά. Η σάρωση της συγκόλλησης με υπερήχους γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 2-63: *Έλεγχος συγκόλλησης.*



Εικόνα 2-64: *Έλεγχος συγκόλλησης.*

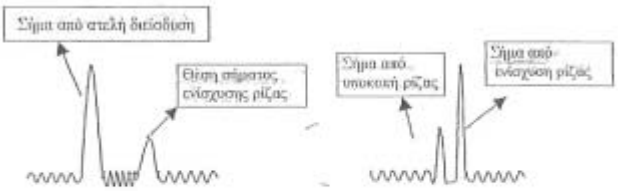
Όταν χρησιμοποιούνται οι γωνιακές κεφαλές για έλεγχο συγκολλήσεων, το οξύ σήμα υψηλού εύρους που ελαττώνεται αισθητά, καθώς η κεφαλή περιστρέφεται ελαφρά, καταδεικνύει ατελή τήξη. Εάν το ελάττωμα εντοπίζεται στο χείλος του μητρικού μετάλλου πριν από τη συγκόλληση, αυτό καταδεικνύει ατελή τήξη του πλευρικού τοιχώματος. Εάν το σήμα εντοπίζεται στην μία κάτω γωνία του προσώπου της ρίζας, αυτό καταδεικνύει ατελή τήξη ρίζας. Εάν εντοπίζεται και στις δύο κάτω

γωνίες του προσώπου της ρίζας, μπορεί να είναι ατελής διείσδυση στη ραφή της ρίζας.

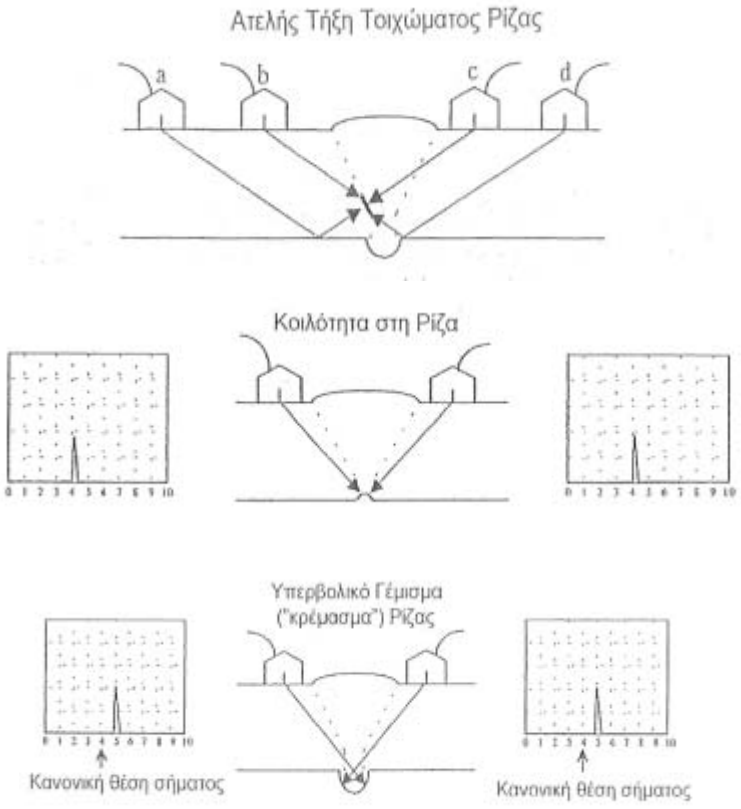
Στην περίπτωση που η ρίζα έχει ενίσχυση (δεν είναι τροχισμένη) παρατηρούμε συνεχώς το σήμα της ενίσχυσης. Εάν υπάρχει ατελής διείσδυση τότε το σήμα της ενίσχυσης θα πέφτει σταδιακά ενώ ταυτόχρονα θα εμφανίζεται μεγιστοποιούμενος ένας οξύς παλμός αρκετά νωρίτερα από το σήμα της ενίσχυσης.

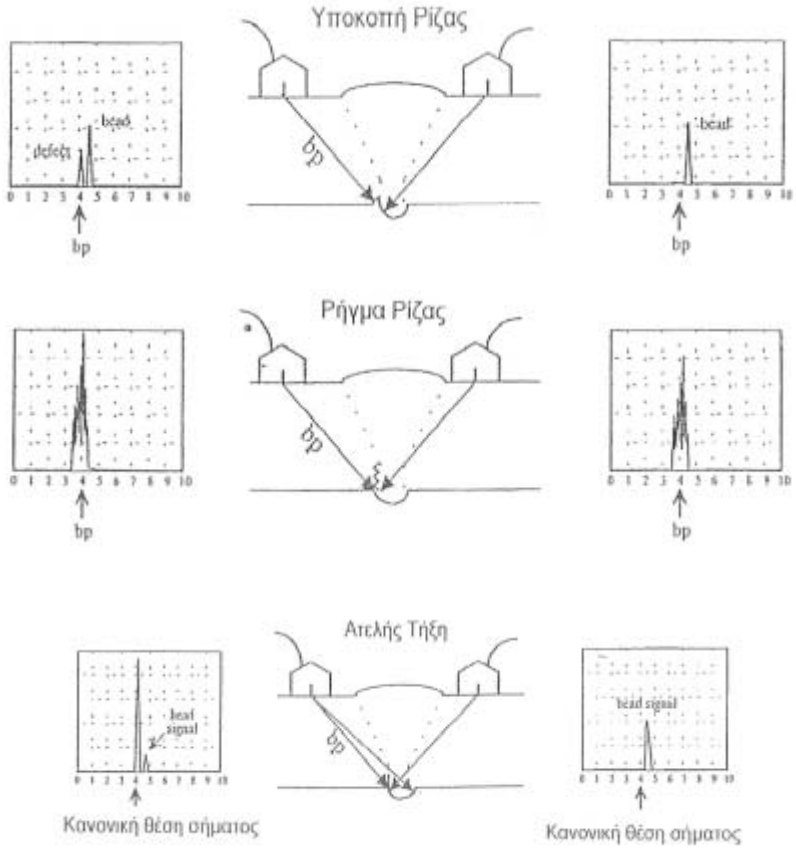
Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να παρατηρηθεί είτε και από τις δύο πλευρές του άξονα της συγκόλλησης είτε μόνο από τη μία, οπότε η ρίζα έχει μείνει ακόλλητη μόνο στη μία ακμή της (μονόπλευρη ατελής διείσδυση).

Επίσης, συχνά παρατηρούμε τον παλμό της ενίσχυσης της ρίζας να αλλάζει και βέβαια να μεταβάλλεται σε ύψος.



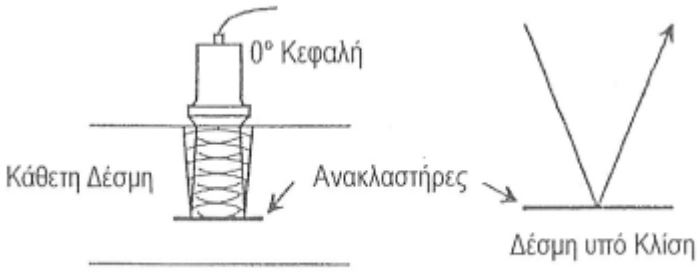
Στιγμιότυπα Α-σάρωσης σε περίπτωση ατελούς διείσδυσης και υποκοπής ρίζας





Εικόνα 2-65: *Σχήμα και μέγεθος σήματος.*

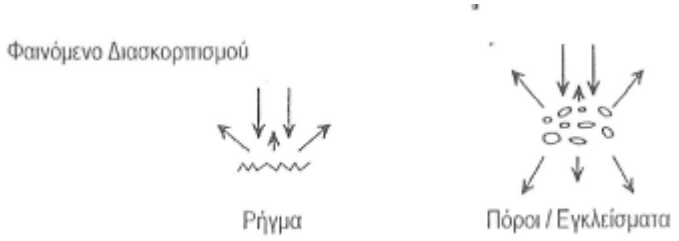
Σήματα μεγάλου εύρους και οξείας μορφής, καταδεικνύουν λείους και επίπεδους ανακλαστήρες όπως τα μεγάλα επίπεδα σφάλματα που είναι κάθετα στη δέσμη των υπερήχων.



Εικόνα 2-66: *Σήματα μεγάλου εύρους και οξείας μορφής, καταδεικνύουν λείους και επίπεδους ανακλαστήρες.*

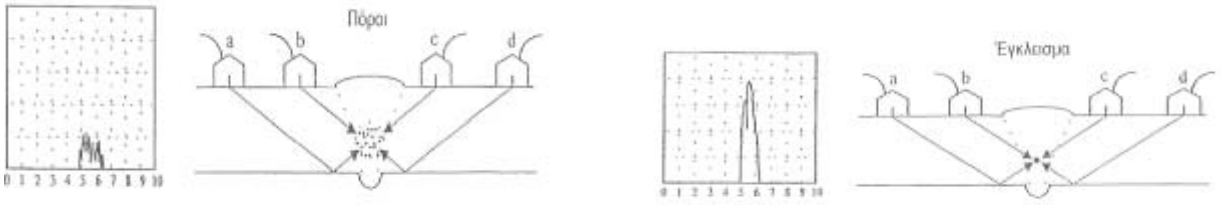
Σήματα χαμηλού εύρους είναι ενδεικτικά ανακλαστήρων χαμηλής ή υψηλής αποδυνάμωσης, ή μη κάθετων στη δέσμη υπερήχων. Παραδείγματα ανακλαστήρων χαμηλής αποδυνάμωσης, είναι οι διαχωριστικές επιφάνειες υλικών των οποίων η ακουστική αντίσταση είναι χαμηλή, όπως π.χ. τα υλικά επικάλυψης, που εφαρμόζονται για βελτίωση των ιδιοτήτων της επιφάνειας.

Ανακλαστήρες υψηλής αποδυνάμωσης είναι εκείνοι που έχουν τραχείες επιφάνειες όπως οι ρωγμές, ή μικρά και πολλαπλά σφάλματα όπως είναι το πορώδες ή τα εγκλείσματα, τα οποία διασκορπίζουν τον ήχο, σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Λείοι ανακλαστήρες οι οποίοι δεν είναι κάθετοι στη δέσμη, έστω και κατά λίγες μοίρες κατευθύνουν τον ήχο μακριά από την κεφαλή με αποτέλεσμα να έχουμε μικρή ή καθόλου επιστροφή του ήχου.



Εικόνα 2-67: *Φαινόμενο διασκορπισμού.*

Τα πολλαπλά σήματα προέρχονται συχνά από πολυεδρικά ή πολλαπλά σφάλματα όπως είναι οι ρωγμές, το πορώδες και τα εγκλείσματα σκουριάς ή πάστας. Συνήθως οι ρωγμές δίνουν υψηλότερη απόκριση από το πορώδες ή τη σκουριά. Τα σήματα μίας ρωγμής ή ενός πορώδους αυξομειώνονται καθώς η κεφαλή περιστρέφεται. Το σήμα από μία ρωγμή ελαττώνεται κατά εύρος εάν η κεφαλή περιφέρεται γύρω από αυτό, ενώ το σήμα από το πορώδες ή τα εγκλείσματα, μπορεί να διατηρηθεί όταν περιφέρεται η κεφαλή.



Εικόνα 2-68: *Πόροι και εγκλείσματα.*

3 Πειραματικό μέρος

3.1 Συσκευή υπερήχων

Η συσκευή υπερήχων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η EPOCH 4PLUS της εταιρίας OLYMPUS και ανήκει στο εθνικό κέντρο έρευνας φυσικών επιστημών Δημόκριτος.

Εικόνα 3-1: *OLYMPUS EPOCH 4PLUS NDT-Panametrics*

Βασικές παράμετροι της συσκευής υπερήχων ήταν:

- Μέγιστο βάθος για χάλυβα είναι 3-6 m.
- Η νεκρή ζώνη (το ελάχιστο βάθος σφάλματος που δεν μπορεί να ανιχνευθεί) είναι 3-5 mm.
- Η ελάχιστη επιφάνεια ενός σφάλματος που εντοπίζεται από τον ανιχνευτή είναι 0,72-2 mm^2 σε βάθος 100-200 mm και 3-4 mm^2 σε βάθος μεγαλύτερο του 1 m.
- Η ακρίβεια της θέσης του σφάλματος 1-3 % του βάθους.
- Οι βασικές συχνότητες λειτουργίας 0,5-10 μsec.
- Το βάρος της διάταξης είναι 10-15 kg.

3.2 Βαθμονόμηση της συσκευής υπερήχων

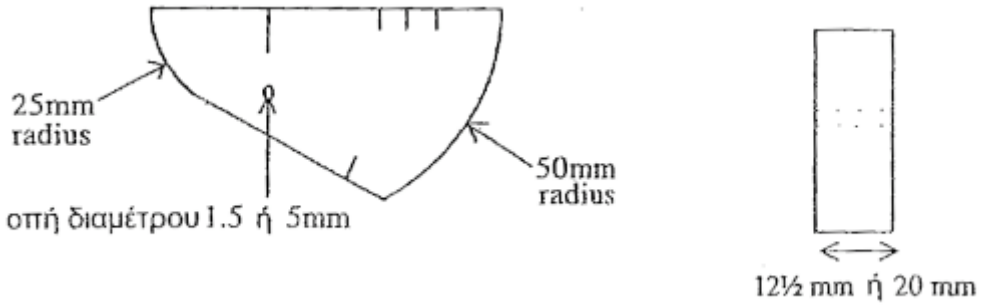
3.2.1 Γενικά

Για να είναι αξιοποιήσιμες οι πληροφορίες που παίρνουμε από μια υπερηχητική συσκευή, κατά τον έλεγχο των υλικών πρέπει προηγουμένως η συσκευή να έχει βαθμονομηθεί έχοντας ως βάση ένα πρότυπο αναφοράς (reference standard). Όπως κάθε άλλη διαδικασία διασφάλισης ποιότητας, ο έλεγχος με υπερήχους συγκρίνει το γνωστό με το άγνωστο. Για παράδειγμα οι διαστάσεις ενός αντικειμένου καθορίζονται συγκρινόμενες με τις διαστάσεις ενός βαθμονομημένου οργάνου (παχύμετρο, μικρόμετρο).

Αναλόγως και στον έλεγχο με υπερήχους οι άγνωστες ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ενός υλικού συγκρίνονται με τα γνωστά και βαθμονομημένα χαρακτηριστικά ενός προτύπου αναφοράς.

Η σωστή επιλογή προτύπου αναφοράς αποτελεί το κλειδί για τον επιτυχημένο έλεγχο και επιτρέπει την χρήση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενός ελέγχου. Εάν κατά τον έλεγχο δεν χρησιμοποιηθούν πρότυπα αναφοράς ή χρησιμοποιηθούν ακατάλληλα πρότυπα, τα αποτελέσματα είναι λανθασμένα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος για την κατάσταση του εξεταζόμενου υλικού.

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμιση της συσκευή υπερήχων είναι της εταιρίας KRAUTKRAMER, ονομάζεται V2, A4, DIN 54/122 ή Kidney block και είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα. Έχει πολλαπλές χρήσεις αλλά κυρίως χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμιση κάθετων και γωνιακών κεφαλών. Η χρήση του γενικά προτιμάται λόγω του μικρού όγκου και βάρους.



Εικόνα 3-2: *Γεωμετρία δοκιμίου V2*

3.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης της συσκευής υπερήχων

3.2.2.1 Για κάθετη κεφαλή

Εικόνα 3-3: *Η θέση της κεφαλής κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης*

Τοποθετούμε την κεφαλή στην πλάγια όψη του δοκιμίου V2 και κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στη συσκευή υπερήχων .

Δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό και αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα από τη διάταξη :

Gain=27,3 dB

Range=84,717 mm

Vel=5920 m/s

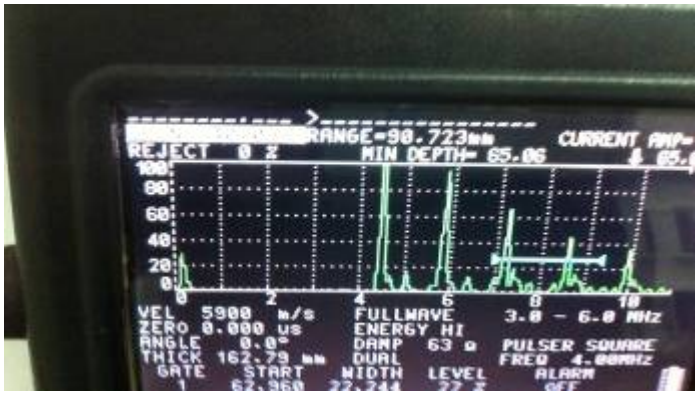
Thick=25,0 mm

Fullwave=3,0 – 6,0 MHz

Frequency=4,0 MHz

Energy Hi

Dual



Εικόνα 3-4: *Οθόνη συσκευής υπερήχων.*

Στην οθόνη της συσκευής εμφανίζονται κάποιοι παλμοί.

Απο την επιλογή Gate τοποθετούμε την μπάρα επάνω στον πρώτο παλμό, πατάμε Cal, Zero και σημειώνουμε στο πλαίσιο τον αριθμό 12,5. Στη συνέχεια τοποθετούμε την μπάρα στο δεύτερο παλμό, πατάμε Cal, Vel και σημειώνουμε στο πλαίσιο τον αριθμό 25.

Η συσκευή μετά από τη διαδικασία της βαθμονομησης είναι έτοιμη να πάρει αξιόπιστες μετρήσεις.

3.2.2.2 Για γωνιακές κεφαλές

Τοποθετούμε την κεφαλή στην πάνω όψη του δοκιμίου V2 και κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στη συσκευή υπερήχων.

Εικόνα 3-5: *Η θέση της κεφαλής κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.*

Δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό και αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα από τη διάταξη :

Gain=14,5 dB

Range=131,0 mm

Vel=3240 m/s

Thick=116 mm

Fullwave=3,0 – 6,0 MHz

Frequency=4,0 MHz

Energy Hi

P/E

Angle=45^0, 60^0,70^0

Εικόνα 3-6: *Οθόνη συσκευής υπερήχων.*

Στην οθόνη της συσκευής εμφανίζονται δύο παλμοί.

Απο την επιλογή Gate τοποθετούμε την μπάρα επάνω στον πρώτο παλμό, πατάμε Cal, Zero και σημειώνουμε στο πλαίσιο τον αριθμό 25. Στη συνέχεια τοποθετούμε την μπάρα στο δεύτερο παλμό, πατάμε Cal, Vel και σημειώνουμε στο πλαίσιο τον αριθμό 100. Η συσκευή είναι πλέον βαθμονομημένη.

Οι διάφορες ρυθμίσεις παρουσιάστηκαν με την σειρά που πρέπει να εκτελεστούν, ώστε να πραγματοποιηθεί αξιόπιστη μέτρηση σε κάθε περίπτωση.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης επαναλαμβανεται κάθε φορά που συνδέουμε άλλη κεφαλή στη συσκευή. Στην περίπτωση του ελέγχου με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών, γίνεται βαθμονόμηση του οργάνου στη μία από τις δύο κεφαλές και αφού βαθμονομηθεί απλά συνδέουμε και τη δεύτερη.

3.2.3 Κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των δοκιμίων

Στα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι κεφαλών :

Κάθετη διπλή κεφαλή (4 Hz) η οποία είναι ταυτόχρονα πομπός και δέκτης, για παχυμέτρηση και εύρεση ατελειών όπως ρωγμές, εγκλείσματα και πόροι. Η κεφαλή αυτή επίσης προσφέρει πολύ καλές μετρήσεις και σε έντονα διαβρωμένα μέρη.

Εικόνα 3-7: *Δίδυμη κεφαλή*

Γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0 (4 Hz) για την εύρεση ατελειών (ρωγμές, εγκλείσματα, πόροι) και γιά τον έλεγχο συγκολλήσεων. Οι γωνιακές κεφαλές επιτρέπουν ελέγχους σε περιοχές, που δεν είναι εύκολο να προσεγγιστούν από το μονοπάτι του υπέρηχου μιας κάθετης κεφαλής.

α β γ

Εικόνα 3-8: *Γωνιακές κεφαλές α)45^0,β) 60^0 και γ) 70^0*

Όλες οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο περιέχουν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο χαλαζία.

3.2.4 Μέσω σύζευξης

Σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν μεταξύ κεφαλής και δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε μέσο σύζευξης (couplant) το οποίο απομονώνει τον αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ του αισθητήρα και του δοκιμίου, διότι παρουσιάζει μεγάλη ακουστική αντίσταση μην επιτρέποντας έτσι την εισαγωγή του παλμού στο υλικό.

Εικόνα 3-9: *Υλικό σύζευξης*

3.3 Έλεγχος με υπέρηχο σε σιδηροτροχιές και ελάσματα πλοίου

Τα δοκίμια που εξετάστηκαν με τη χρήση υπερήχων ήταν σιδηροτροχιές και δύο συγκολλημένα ελάσματα πλοίου.

3.3.1 Σιδηροτροχιές

Οι σιδηροτροχιές πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε κόπωση και ικανοποιητικό βαθμό σκληρότητας. Κύριο μικροδομικό συστατικό είναι ο περλίτης, δηλαδή επαλληλία πλακιδίων φερρίτη (μαλακό μαγνητικό υλικό) και σεμεντίτη

(καρβίδιο). Όσο μικρότερη είναι η απόσταση των πλακιδίων του περλίτη, τόσο υψηλότερη αντοχή παρουσιάζει ο χάλυβας.

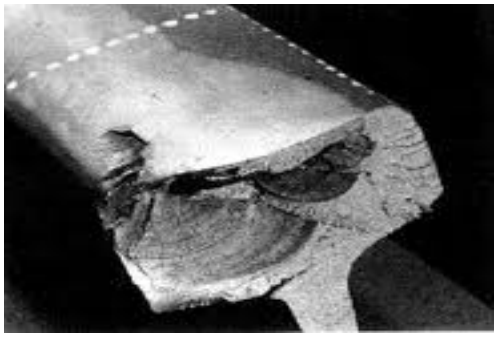
Κάθε σιδηροδρομικό δίκτυο υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις με αποτέλεσμα να προκαλούνται φθορές στην επιφάνεια των σιδηροτροχιών.

Εικόνα 3-10: *Σιδηροτροχιές.*

Οι σιδηροτροχιές αυτές από τη διαδικασία παραγωγής τους έχουν παραμένουσες τάσεις, η κατανομή των οποίων αλλάζει εξαιτίας πλαστικών παραμορφώσεων που δημιουργούνται από την επαφή του τροχού και της ράγας.

Οι τάσεις που εμφανίζονται είναι τάσεις επαφής και είναι αρκετά μεγάλες. Οι κύριοι λόγοι που εμφανίζονται τάσεις επαφής είναι το φορτίο που φέρει ο κάθε τροχός και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο της περιοχής επαφής τροχού-ράγας λόγω πρόσφυσης φρεναρίσματος, και αλλαγής διεύθυνσης.

Οι τάσεις αυτές συγκεντρώνονται κυρίως στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς, είναι εφελκύστηκες στο κέντρο της ενώ μπορεί να προκαλέσουν ασυνέχειες, ρωγμές, θρυμματισμό, εγχάραξη καθώς και διάκενα στους αρμούς.



Εικόνα 3-11: *Αστοχία του υλικού εξαιτίας των κύκλων φόρτισης κατά την κόπωση*

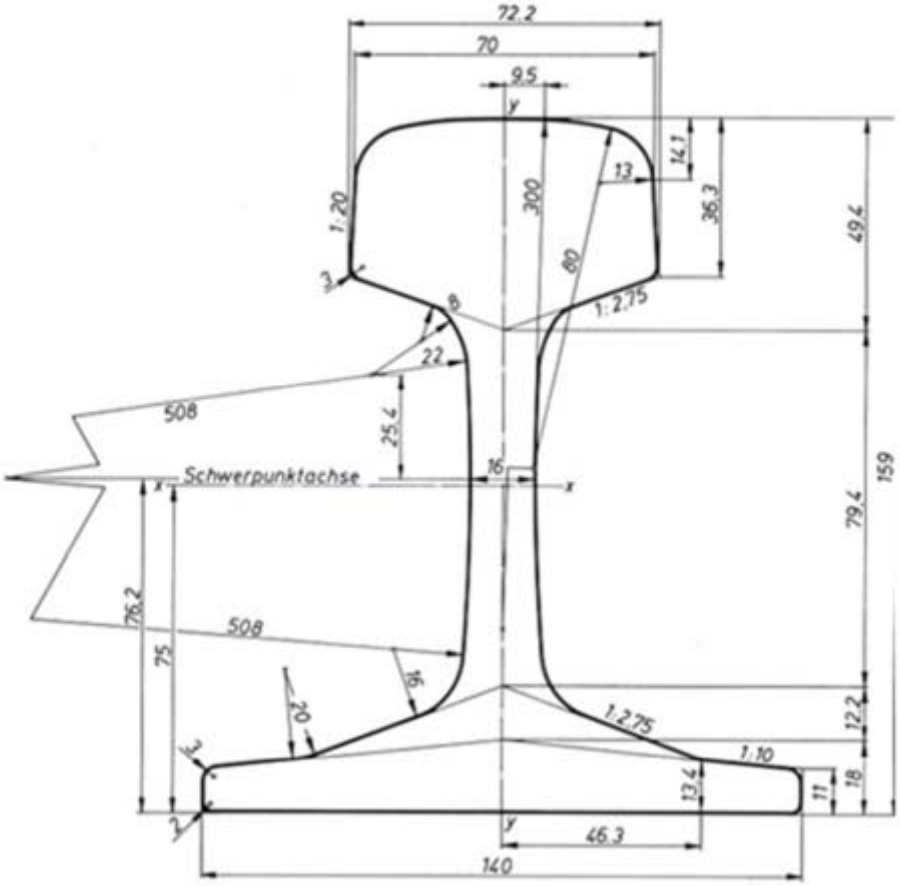
Η μέγιστη κάθετη τάση μπορεί να φτάσει τα 1500 MPa υπό θλίψη. Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν τροχοί ή κομμάτια ράγας που δεν είναι σύμμορφα, μπορεί να προκληθούν τάσεις πάνω από 4000 MPa.

Η διάρκεια ζωής μιας σιδηροτροχιάς εξαρτάται από το φαινόμενο της κόπωσης κατά το οποίο μια μικρή ατέλεια μπορεί να εξελιχθεί σε ρωγμή ή ακόμα να προκαλέσει αστοχία του υλικού.

Επομένως, για την ασφάλεια και την αξιοπιστία των μετακινήσεων μέσω του σιδηροδρομικού δικτύου είναι αναγκαίος ο έλεγχος των σιδηροτροχιών.

Οι σιδηροτροχιές που μελετάμε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι τύπου UIC54, προέρχονται από το metro της Αθήνας και μελετήθηκαν στο εθνικό κέντρο έρευνας φυσικών επιστημών Δημόκριτος.

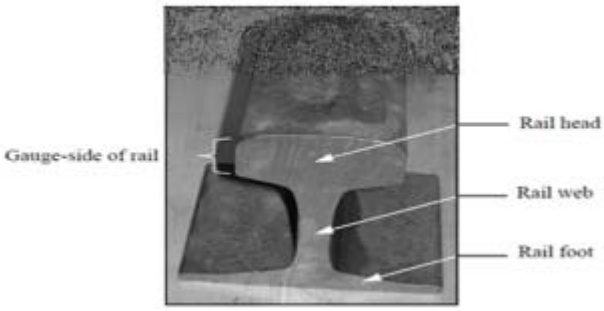
Ο αριθμός 54 υποδηλώνει τα Kg που ζυγίζει κάθε μέτρο της συγκεκριμένης σιδηροτροχιάς.



Εικόνα 3-12: *Γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομής σιδηροτροχιάς UIC54*

Μία σιδηροτροχιά αποτελείται από τρία μέρη :

1. Την κεφαλή
2. Τον κορμό
3. Το πέλμα



Εικόνα 3-13: *Δομικά μέρη σιδηροτροχιάς.*

3.3.2 Συγκολλήσεις σιδηροτροχιών

3.3.2.1 Τρόποι σύνδεσης σιδηροτροχιών

Η χρήση βιδωτών αρμών αποφεύγεται στους περισσότερους σιδηρόδρομους καθώς αστοχούν λόγω κόπωσης (από δυναμικά φαινόμενα) και διάβρωσης.

Εικόνα 3-14: *Σιδηροτροχιές που συνδέονται με βιδωτούς αρμούς.*

Για αυτό το λόγο γίνονται συγκολλήσεις στις ράγες που απαρτίζουν ένα σιδηροδρομικό δίκτυο. Οι συγκολλήσεις γίνονται υπό συνθήκες που προσομοιώνουν υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και έτσι αποφεύγεται ο κίνδυνος στρέβλωσης.

Εικόνα 3-15: *Σιδηροτροχιές πριν από τη διαδικασία της συγκόλλησης.*

Κατά τη χύτευση του χάλυβα η παρουσία ατομικού υδρογόνου μπορεί να συντελέσει στην εμφάνιση πόρων και ρωγμών λόγω του θρυμματισμού και ακόμα να οδηγήσει σε αστοχία του υλικού.

3.3.2.2 Αλουμινοθερμική συγκόλληση

Οι αλουμινοθερμικές συγκολήσεις χρησιμοποιούνται για την συγκόλληση σιδηροτροχιών της ίδιας ή διαφορετικής (μεταβατικές συγκολλήσεις) διατομής.

Η αλουμινοθερμική συγκόλληση αφορά την ένωση των επιμέρους μεγάλων τμημάτων σιδηροτροχιάς, που είχαν ήδη διαμορφωθεί με συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου. Για την πραγματοποίηση της αλουμινοθερμικής συγκόλλησης απαιτείται οι προς συγκόλληση σιδηροτροχιές να απέχουν απόσταση 25 mm μεταξύ τους.

Η περιοχή συγκόλλησης εσωκλείεται σε ειδικές πυρίμαχες θήκες και προθερμαίνεται με φλόγιστρο επί 4 λεπτά. Στη συνέχεια εγχύεται στη θήκη μίγμα σιδήρου - αργιλίου και η συγκόλληση εκκινείται με σπίρτο πυριτίου - μαγνησίου.

Όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται για μία συγκόλληση είναι αναλώσιμα (χρησιμοποιούνται μία φορά). Μία αλουμινοθερμική συγκόλληση διαρκεί περίπου 20 λεπτά.

Εικόνα 3-16: *Συγκόλληση σιδηροτροχιών με τη μέθοδο της αλουμινοθερμικής.*

Το τρόχισμα που εκτελείται με την ειδική συσκευή τρόχισης των σιδηροτροχιών, έχει ως σκοπό να αποκαταστήσει όσο το δυνατό τελειότερα τη συνέχεια της διατομής στην επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών.

3.3.3 Έλεγχος δειγμάτων σιδηροτροχιών με υπέρηχο

Αρχικά έγινε οπτική επιθεώρηση των δειγμάτων, για την παρατήρηση ατελειών ή ρωγμών οι οποίες καταλήγουν στην επιφάνεια των δοκιμίων και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος με υπέρηχο. Η οπτική επιθεώρηση γίνεται γιατί ο υπέρηχος μπορεί να εντοπίσει μία ατέλεια σε βάθος μεγαλύτερο από τα 5 mm από την επιφάνεια μίας σιδηροτροχιάς.

Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας που έχει η σιδηροτροχιά καθιστά δύσκολο τον έλεγχο με υπέρηχο, διότι η δέσμη υπερήχων ανάλογα με την περιοχη που θέλουμε να ελέγξουμε μπορεί να ανακλάται σε αρκετά σημεία. Γιά το λόγο αυτό ο έλεγχος επικεντρώνεται στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς που είναι άλλωστε και η

περιοχή που μας ενδιαφέρει περισσότερο γιατί εκεί συγκεντρώνονται όλες οι τάσεις επαφής που όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι πολύ ισχυρές.

Στις περιπτώσεις που στη σιδηροτροχιά έχει γίνει συγκόλληση, γίνεται έλεγχος της συγκόλλησης.

Συνολικά, έγινε μελέτη και έλεγχος σε τέσσερις σιδηροτροχιές.

3.3.3.1 Σιδηροτροχιά Νο 1

Το δείγμα έχει μήκος 95 cm. Ακολουθώντας τα βασικά στάδια για το σωστό έλεγχο της συγκόλλησης εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Εικόνα 3-17: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά Νο1)*

Οπτική επιθεώρηση του δείγματος: Στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς υπάρχουν επιφανειακές μικρές ρωγμές, σπασίματα και μερική διάβρωση.

Παχυμέτρηση: Στη συνέχεια έγινε παχυμέτρηση του δείγματος με κάθετη διπλή κεφαλή ανά 10cm και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Αποτελέσματα παχυμέτρησης

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**157.4**
2	**156.82**
3	**156.27**
4	**156.42**
5	**156.28**
6	**156.01**
7	**156.46**
8	**156.62**
9	**156.74**
10	**156.83**

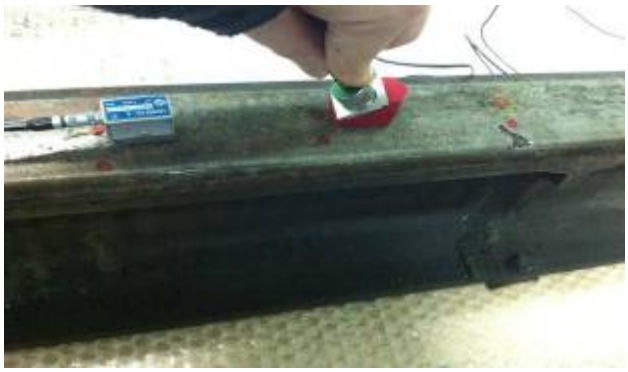
Εικόνα 3-18: *Παχυμέτρηση με κάθετη κεφαλή.*

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές των σιδηροτροχιών το αρχικό ύψος κάθε σιδηροτροχιάς είναι 160 cm (Εικόνα 3-12). Από τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης συμπεραίνουμε ότι η σιδηροτροχιά έχει χάσει κάποια mm από το αρχικό της ύψος, λόγω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ κεφαλής και τροχού, επομένως συμπεραίνουμε ότι έχει χρησιμοποιηθεί.

Έλεγχος με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0: Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με γωνιακές κεφαλές, σε όλο το μήκος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, για τον εντοπισμό ατελειών στο εσωτερικό της. Δεν βρέθηκαν ατέλειες στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς.

Έλεγχος συγκόλλησης : Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συγκόλλησης που είχε η σιδηροτροχιά με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0 καθώς και με την τεχνική των διδυμων κεφαλών. Με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών έχουμε τη δυνατότητα κρατώντας σταθερή τη μία γωνιακή κεφαλή και μετακινώντας αργά την άλλη προς το μέρος της πρώτης να ελέγξουμε όλο το μήκος της συγκόλλησης. Δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στη συγκόλληση.

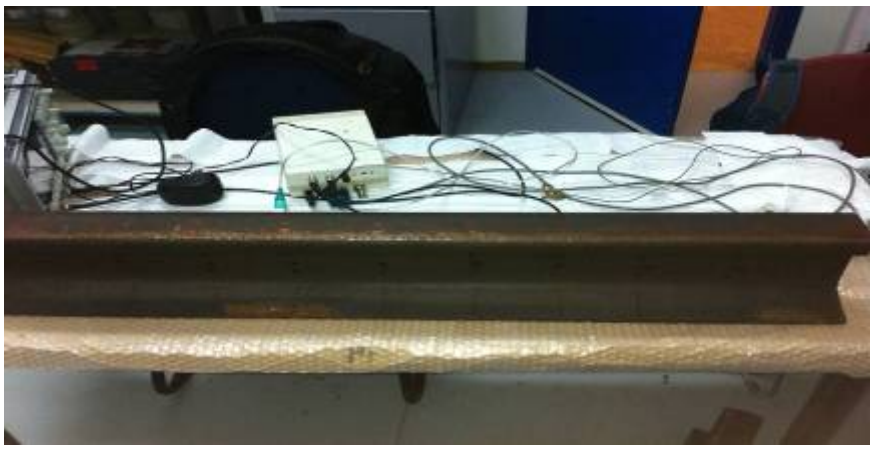
Εικόνα 3-19: *Έλεγχος συγκόλλησης με γωνιακή κεφαλή 45^0.*



Εικόνα 3-20: *Έλεγχος συγκόλλησης με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών.*

3.3.3.2 Σιδηροτροχιά Νο 2

Το δείγμα έχει μήκος 99 cm. Ακολουθώντας τα βασικά στάδια για το σωστό έλεγχο της συγκόλλησης εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:



Εικόνα 3-21: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά Νο2)*

Οπτική επιθεώρηση του δείγματος: Στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς υπάρχουν επιφανειακές ρωγμές, σπασίματα και μερική διάβρωση.

Παχυμέτρηση: Στη συνέχεια έγινε παχυμέτρηση του δείγματος με κάθετη διπλή κεφαλή ανά 10 cm και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Αποτελέσματα παχυμέτρησης

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**157.32**
2	**157.25**
3	**157.26**
4	**157.14**
5	**157.32**
6	**157.19**

7	**157.13**
8	**157.24**
9	**157.07**
10	**156.48**

Από τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης συμπεραίνουμε ότι η σιδηροτροχιά έχει χάσει κάποια mm από το αρχικό της ύψος (160 mm), λόγω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ κεφαλής και τροχού, επομένως συμπεραίνουμε ότι έχει χρησιμοποιηθεί.

Έλεγχος με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0: Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με γωνιακές κεφαλές, σε όλο το μήκος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, για τον εντοπισμό ατελειών στο εσωτερικό της. Δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς.

3.3.3.3 Σιδηροτροχιά Νο 3

Το δείγμα έχει μήκος 36.5 cm. Ακολουθώντας τα βασικά στάδια για το σωστό έλεγχο της συγκόλλησης εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Εικόνα 3-22: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά Νο3)*

Οπτική επιθεώρηση του δείγματος: Η οπτική επιθεώρηση του δείγματος έδειξε ότι στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς δεν υπάρχουν επιφανειακές ατέλειες ή διάβρωση.

Παχυμέτρηση: Στη συνέχεια έγινε παχυμέτρηση του δείγματος με κάθετη διπλή κεφαλή ανά 10 cm και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Αποτελέσματα παχυμέτρησης

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**160.58**
2	**160.52**
3	**160.27**
4	**160.72**

Από τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης συμπεραίνουμε ότι το αρχικό ύψος της σιδηροτροχιάς δεν έχει ελαττωθεί. Επομένως πιθανόν να μην έχει χρησιμοποιηθει καθόλου ή έχει χρησιμοποιηθεί για μικρό χρονικό διάστημα.

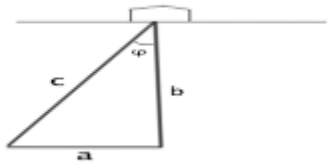
Έλεγχος με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0: Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με γωνιακές κεφαλές, σε όλο το μήκος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, για τον εντοπισμό ατελειών στο εσωτερικό της.

Με τη γωνιακή κεφαλή των 45^0, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να εντοπίζουμε ατέλειες σε μεγαλύτερο βάθος απο ότι αυτές των 60^0 και 70^0, εντοπίστηκαν κάποιες ατέλειες στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς. Οι ατέλειες αυτές από το σήμα που έδωσε ο υπέρηχος καταλαβαίνουμε ότι είναι ρωγμές.

- Το πρώτο σφάλμα εντοπίστηκε σε βάθος 66.01 mm με μήκος δέσμης 93.35 mm σε οριζόντια απόσταση 66.01 mm από την θέση της κεφαλής.
- Το δεύτερο σφάλμα εντοπίστηκε σε βάθος 98.19 mm με μήκος δέσμης 138.85 mm σε οριζόντια απόσταση 98.19 mm από την θέση της κεφαλής .
- Το τρίτο σφάλμα εντοπίστηκε σε βάθος 116.15 mm με μήκος δέσμης 164.28 mm σε οριζόντια απόσταση 116.15 mm από την θέση της κεφαλής.

Το μήκος δέσμης είναι η απόσταση από το σημείο της κεφαλής που εκπέμπεται η δέσμη υπερήχων μέχρι το σημείο που βρίσκεται η ατέλεια.

Στη σάρωση γωνιακών κεφαλών, χρησιμοποιούνται συστήματα αποτύπωσης για την εμφάνιση του βάθους και της θέσης σφαλμάτων, από το κέντρο εκπομπής της κεφαλής, με γνωστό το μήκος της δέσμης που εμφανίζεται στην οθόνη και την επιφανειακή απόσταση από ένα σημείο αναφοράς πάνω στο δοκίμιο. Το σύστημα βασίζεται στον υπολογισμό των στοιχείων ορθογωνίων τριγώνων. Έτσι τα βάθη και οι θέσεις μπορούν να προσδιορισθούν τριγωνομετρικά, με χρήση της γωνίας της κεφαλής και του μήκους της δέσμης που εμφανίζεται στην γραμμή της βάσεως χρόνου επάνω στην οθόνη.



Για υπολογισμό του αναμενόμενου μήκους δέσμης ενός ανακλαστήρα, του οποίου γνωρίζουμε το βάθος και τη γωνία κεφαλής εφαρμόζουμε τον τύπο των συνημιτόνων.

$$c = b/\cos\varphi$$

Για τον τον υπολογισμό του βάθους ενός ανακλαστήρα, του οποίου γνωρίζουμε το μήκος της δέσμης και την γωνία κεφαλής χρησιμοποιούμε πάλι τον τύπο των συνημιτόνων.

$$b = c \times \cos\varphi$$

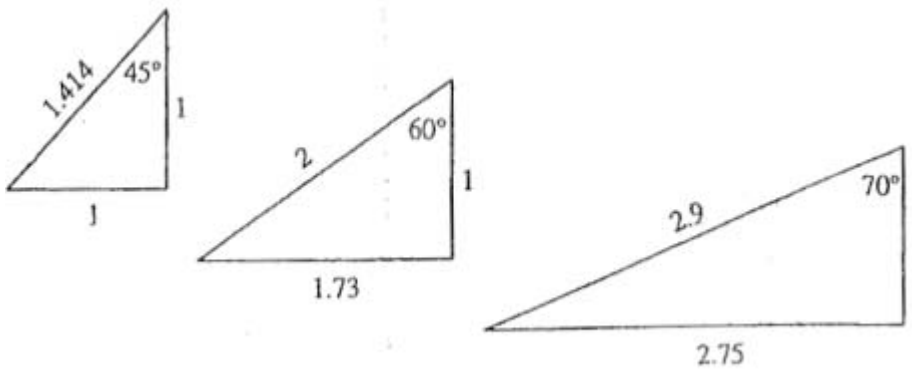
Για τον υπολογισμό της οριζόντιας απόστασης (ίχνος της δέσμης) όταν γνωρίζουμε το μήκος δέσμης και την γωνία κεφαλής εφαρμόζουμε τον τύπο των ημιτόνων.

$$a = c \times \sin\varphi$$

Αν θέλουμε να υπολογίσουμε τη γωνία δέσμης ενός ανακλαστήρα του οποίου γνωρίζουμε το βάθος και την οριζόντια απόσταση χρησιμοποιούμε τον τύπο της εφαπτομένης.

$$\tan\varphi = a/b$$

Οι λόγοι των πλευρών των τριγώνων που απαντώνται στις κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0.



Εικόνα 3-23: *Λόγοι πλευρών τριγώνων*

3.3.3.4 Σιδηροτροχιά Νο 4

Το δείγμα έχει μήκος 38 cm. Ακολουθώντας τα βασικά στάδια για το σωστό έλεγχο της συγκόλλησης εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Εικόνα 3-24: *Δείγμα σιδηροτροχιάς τύπου UIC54 από το metro της Αθήνας (σιδηροτροχιά No4)*

Οπτική επιθεώρηση του δείγματος: Η οπτική επιθεώρηση του δείγματος έδειξε οτι στην κεφαλή της σιδηροτροχιάς υπήρχαν κάποιες επιφανειακές ρωγμές και αρκετή σκουριά λόγω διάβρωσης.

Παχυμέτρηση: Στη συνέχεια έγινε παχυμέτρηση του δείγματος με κάθετη διπλή κεφαλή ανά 10 cm και τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.

Αποτελέσματα παχυμέτρησης

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**156.92**
2	**156.54**
3	**156.02**
4	**156.23**

Από τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης συμπεραίνουμε ότι η σιδηροτροχιά έχει χάσει κάποια mm από το αρχικό της ύψος (160 mm), λόγω της τριβής που δημιουργείται μεταξύ κεφαλής και τροχού, επομένως συμπεραίνουμε ότι έχει χρησιμοποιηθεί.

Έλεγχος με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0 : Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με γωνιακές κεφαλές, σε όλο το μήκος της κεφαλής της σιδηροτροχιάς, για τον εντοπισμό ατελειών στο εσωτερικό της. Δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στο εσωτερικό της σιδηροτροχιάς.

Έλεγχος συγκόλλησης : Πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συγκόλλησης που είχε η σιδηροτροχιά με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0 καθώς και με την τεχνική των διδυμων κεφαλών. Με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών έχουμε τη δυνατότητα κρατώντας σταθερή τη μία γωνιακή κεφαλή και μετακινώντας αργά την άλλη προς το μέρος της πρώτης να ελέγξουμε όλο το μήκος της συγκόλλησης. Δεν εντοπίστηκαν ατέλειες στη συγκόλληση.

Εικόνα 3-25: *Αλουμινοθερμική συγκόλληση σιδηροτροχιάς.*

3.3.4 Ελάσματα πλοίου

Η αντοχή των ανοξείδωτων χαλύβων έναντι της διάβρωσης βασίζεται στην ακεραιότητα του λεπτού παθητικού στρώματος, το οποίο προσδίδει χαμηλούς ρυθμούς διάβρωσης σε υδατικό περιβάλλον. Η αστοχία του παθητικού στρώματος έχει ως αποτέλεσμα εντοπισμένες μορφές διάβρωσης όπως οι βελονισμοί και η διάβρωση χαραγής, αλλά και ρωγμάτωση από διάβρωση λόγω μηχανικής καταπόνησης.

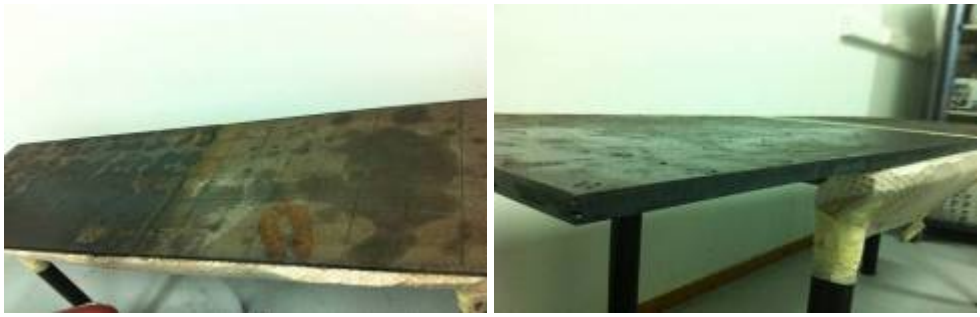
Στις περιπτώσεις αυτές δημιουργείται ένα στρώμα οξειδίων το οποίο δεν προστατεύει το μέταλλο έναντι του περιβάλλοντος. Ο βαθμός της προστασίας εξαρτάται από το πάχος των οξειδίων, τη συνέχειά του, τη συνοχή και τη συνάφειά του με το μέταλλο, καθώς και με τη δυνατότητα διάχυσης του οξυγόνου και του μετάλλου στο στρώμα των οξειδίων.

Εικόνα 3-26: *Διαβρωμένη πλάκα συγκόλλησης.*

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία προέρχονται από την εταιρία ABS EUROPE - AMERICAN BUREAU OF SHIPPING και μελετήθηκαν στο εθνικό κέντρο έρευνας φυσικών επιστημών Δημόκριτος.

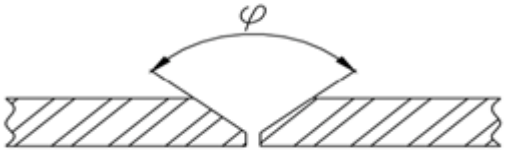
3.3.4.1 Περιγραφή συγκολλημένου δείγματος

Το δείγμα αποτελείται από ένα καθαρό έλασμα πλοίου με εμβαδό 99 cm x 60 cm και ένα διαβρωμένο έλασμα πλοίου με εμβαδό 99 cm x 60 cm. Τα δύο ελάσματα έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους και το συνολικό εμβαδό το δείγματος είναι 200 cm x 60 cm.

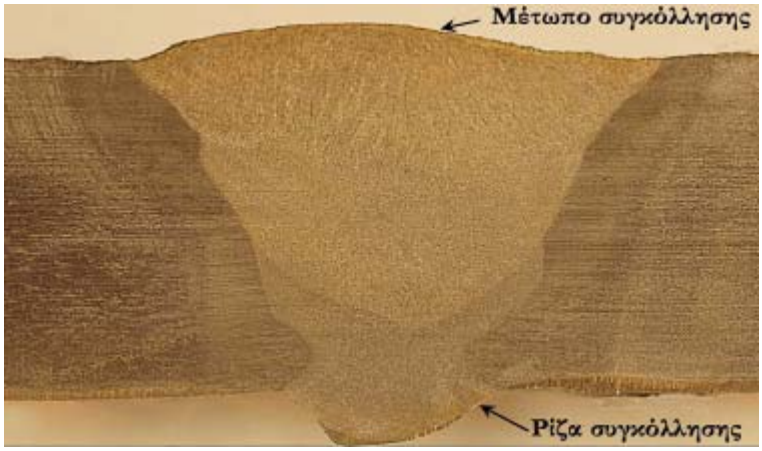


Εικόνα 3-27: *Συγκολλημένα ελάσματα πλοίου*

Σε μεγάλα πάχη ελασμάτων, η συγκόλληση μπορεί να γίνει μόνο με κατάλληλη διαμόρφωση των ακμών των ελασμάτων. Η συνηθέστερη διαμόρφωση είναι η V.



Εικόνα 3-28: *Εικόνα Συγκόλληση τύπου V.*



Εικόνα 3-29: *Μορφολογία συγκόλλησης*

Τόσο ο τύπος όσο και οι παράμετροι της συγκόλλησης είναι άγνωστα. Αυτό που γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία είναι ότι υπάρχει διαφοροποίηση της μικροδομής στην εκάστοτε ζώνη της συγκόλλησης.

3.3.4.2 Παχυμέτρηση του καθαρού και του διαβρωμένου ελάσματος

Αρχικά έγινε παχυμέτρηση με τη συσκευή υπερήχων στο καθαρό έλασμα ανά 10cm. Για την παχυμέτρηση χρησιμοποιήθηκε κάθετη διπλή κεφαλή 4Hz. Τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης έδειξαν ότι το πάχος του καθαρού ελάσματος κυμαίνεται μεταξύ 19.25mm (μικρότερη τιμή) και 19.62mm (μέγιστη τιμή).

Αποτελέσματα παχυμέτρησης καθαρού ελάσματος

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**19.3**	23	**19.34**	45	**19.47**	67	**19.46**
2	**19.31**	24	**19.43**	46	**19.35**	68	**19.33**
3	**19.35**	25	**19.48**	47	**19.46**	69	**19.46**
4	**19.37**	26	**19.33**	48	**19.43**	70	**19.34**
5	**19.41**	27	**19.31**	49	**19.38**	71	**18.46**
6	**19.35**	28	**19.32**	50	**19.44**	72	**18.76**
7	**19.4**	29	**19.35**	51	**19.34**	73	**18.88**
8	**19.34**	30	**19.41**	52	**19.35**	74	**17.78**
9	**19.5**	31	**19.42**	53	**19.31**	75	**18.73**
10	**19.37**	32	**19.38**	54	**19.34**	76	**18.27**
11	**19.55**	33	**19.53**	55	**19.46**	77	**17.7**
12	**19.4**	34	**19.55**	56	**19.43**		
13	**19.38**	35	**19.62**	57	**19.37**		
14	**19.42**	36	**19.44**	58	**19.46**		
15	**19.4**	37	**19.35**	59	**19.38**		
16	**19.34**	38	**19.43**	60	**19.4**		
17	**19.35**	39	**19.4**	61	**19.34**		
18	**19.44**	40	**19.38**	62	**19.41**		
19	**19.37**	41	**19.37**	63	**19.33**		
20	**19.34**	42	**19.35**	64	**19.34**		
21	**19.25**	43	**19.34**	65	**19.4**		
22	**19.37**	44	**19.35**	66	**19.44**		

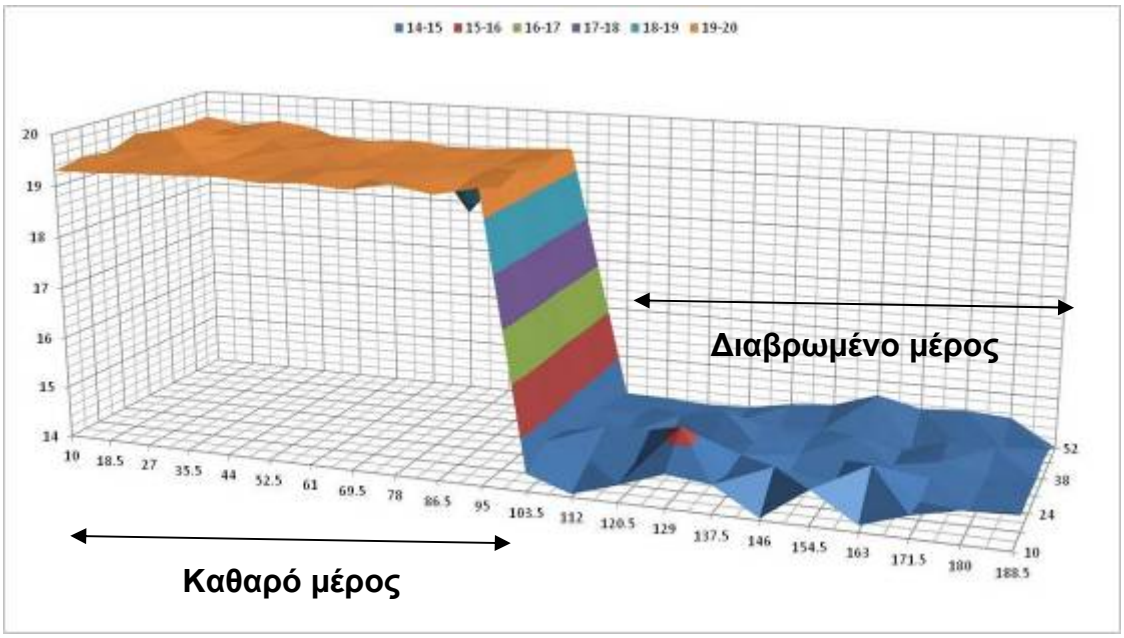
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παχυμέτρηση με κάθετη διπλή κεφαλή, ανά 10 cm, στο διαβρωμένο έλασμα. Τα αποτελέσματα της παχυμέτρησης έδειξαν ότι το πάχος του καθαρου ελάσματος κυμαίνεται μεταξύ 13.95 mm (μικρότερη τιμή) και 14.92 mm (μέγιστη τιμή).

Εικόνα 3-30: *Παχυμέτρηση σε διαβρωμένο έλασμα πλοίου*

Αποτελέσματα παχυμέτρησης διαβρωμένου ελάσματος

Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)	Σημείο μέτρησης	Αποτέλεσμα παχυμέτρησης (cm)
1	**14.34**	23	**14.56**	45	**14.43**	67	**14.21**
2	**14.06**	24	**14.77**	46	**14.37**	68	**14.19**
3	**14.33**	25	**14.79**	47	**14.5**	69	**14.15**
4	**14.64**	26	**14.46**	48	**14.68**	70	**14.18**
5	**14.55**	27	**14.49**	49	**14.45**	71	**14.34**
6	**14.04**	28	**14.15**	50	**14.34**	72	**14.42**
7	**14.67**	29	**14.13**	51	**14.46**	73	**14.71**
8	**14.13**	30	**14.59**	52	**14.27**	74	**14.52**
9	**14.42**	31	**14.45**	53	**14.53**	75	**14.58**
10	**14.62**	32	**14.33**	54	**14.52**	76	**14.52**
11	**14.68**	33	**14.34**	55	**14.36**	77	**14.02**
12	**14.65**	34	**14.31**	56	**14.31**		
13	**14.4**	35	**14.28**	57	**14.28**		
14	**14.43**	36	**14.09**	58	**14.25**		
15	**15.23**	37	**14.31**	59	**14.18**		
16	**14.42**	38	**14.43**	60	**14.12**		
17	**14.68**	39	**14.3**	61	**14.19**		
18	**14.36**	40	**14.28**	62	**14.12**		
19	**14.92**	41	**14.24**	63	**13.95**		
20	**14.33**	42	**14.45**	64	**14.15**		
21	**14.27**	43	**14.28**	65	**14.19**		
22	**14.31**	44	**14.3**	66	**14.28**		

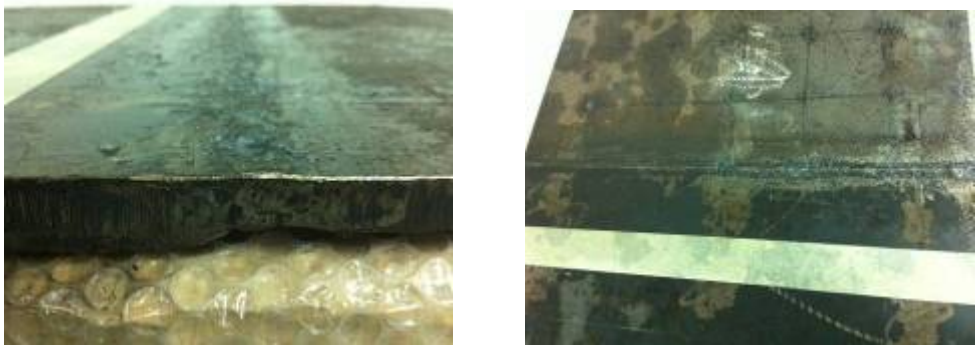
Από τα αποτέλεσα των παχυμετρήσεων που έγιναν στο καθαρό και στο διαβρωμένο έλασμα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το αρχικό πάχος του διαβρωμένου ελάσματος έχει μειωθεί. Η μείωση αυτή οφείλεται στη διάβρωση που έχει υποστεί, η οποία οδηγεί σταδιακά σε αστοχία του υλικού.



Εικόνα 3-30: *Συνολική διακύμανση του πάχους του ελάσματος σε όλη την επιφάνειά του*

3.3.4.3 Έλεγχος Συγκόλλησης

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος με γωνιακές κεφαλές 45^0, 60^0 και 70^0 σε όλο το μήκος της συγκόλλησης (60 cm) για τον εντοπισμό ατελειών στο εσωτερικό της.



Εικόνα 3-31: *Ζώνη τήξης της συγκόλλησης*

Ο έλεγχος της συγκολλήσης έγινε σε τρία διακεκριμένα βήματα:

- Έλεγχος με κάθετη κεφαλή για την εύρεση ανακλαστήρων στο μέταλλο βάσεως.
- Έλεγχος της ρίζας της συγκόλλησης
- Έλεγχος του σώματος της συγκόλλησης

Στην επιφάνεια του διαβρωμένου ελάσματος η σάρωση με γωνιακή κεφαλή ήταν αρκετά δύσκολη λόγω της μη ομαλής επιφάνειας του δοκιμίου.

Ο έλεγχος με γωνιακή κεφαλή 45^0, 4Hz έδειξε τα ακόλουθα αποτελέσματα :

- Στα 5 cm κατά μήκος της συγκόλλησης : Εντοπίστηκε η ρίζα της συγκόλλησης σε βάθος 12.81 cm με μήκος δέσμης 18.11 cm.
- Στα 10 cm κατά μήκος της συγκόλλησης : Εντοπίστηκε η ρίζα της συγκόλλησης σε βάθος 12.90 cm με μήκος δέσμης 18.24 cm.
- Στα 30 cm κατά μήκος της συγκόλλησης : Εντοπίστηκε η ρίζα της συγκόλλησης σε βάθος 13.84 cm με μήκος δέσμης 19.76 cm.

4 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στο σημείο αυτό θα γίνει ανακεφαλαίωση της συνολικής προσπάθειας και θα παρατεθούν οι στόχοι που επιτεύχθησαν.

Πρωταρχικός στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν ο εντοπισμός ατελειών όπως ρωγμές, πόροι και εγκλείσματα σε σιδηροτροχιές και ελάσματα πλοίου, με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων. Παρουσιάστηκαν η ακριβής διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται σε έναν υπερηχητικό έλεγχο καθώς και ο κατάλληλος εξοπλισμός και οι παράμετροι που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος.

Ο έλεγχος σε σιδηροτροχιές, αρχικά με τη διαδικασία της παχυμέτρησης, έδειξε τη φθορά που υφίστανται στην κεφαλή λόγω της μεγάλης τριβής που δημιουργείται μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς. Επίσης, ο έλεγχος των σιδηροτροχιών με γωνιακές κεφαλές οδήγησε στον ακριβή προσδιορισμό των σημείων όπου υπήρχαν ατέλειες. Αντίστοιχα στα ελάσματα πλοίου η παχυμέτρηση έδειξε την σημαντική διαφορά πάχους μεταξύ του καθαρού και του διαβρωμένου ελάσματος. Στις συγκολλήσεις που είχαν τα δοκίμια ο υπερηχητικό έλεγχος πραγματοποιήθηκε με γωνιακές κεφαλές καθώς και με την τεχνική των δίδυμων κεφαλών όμως δεν υπήρχαν ατέλειες στο εσωτερικό τους.

Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο υπέρηχος αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και κυρίως αξιόπιστη μέθοδο εντοπισμού ατελειών σε χάλυβες ακόμα και κάτω από δύσκολες συνθήκες. Επίσης, εφαρμόζεται ακόμα και αν το δοκίμιο έχει μεγάλο πάχος και μπορεί εντοπίσει όλων των ειδών τις ατέλειες που βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο των πέντε χιλιοστών. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές με πολύπλοκη γεωμετρία λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων που υφίσταται η δέσμη των υπερήχων.

5 Βιβλιογραφία

[1] Krautkramer, J. Krautkramer and H. Ultrasonic Testing of Materials (1983)

[2] J. G. Sesssler and V. Weiss Crack Detection and Method (1975)

[3] R. Halmshaw, Edward Arnold Non-destructive testing

[4] Paul E. Mix, John Wiley & Sons, Inc Introduction to nondestructive testing, A training guide

[5] Robert C. McMaster, The Roland Press Company Nondestructive tesing Handbook, Second Volume

[6] Ιωάννης Πρασιανάκης Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών-Η μέθοδος των υπερήχων

[7] Κων/νος Ν. Κοσμάς Ανάπτυξη Ηλεκτρομαγνητικών Τεχνικών Μη Καταστροφικών Δοκιμών σε Μαγνητικά Μεταλλικά Υλικά

[8] Θεόδωρος Τσαγκάρης Εισαγωγή στις Μεθόδους Μη Καταστροφικού Ελέγχου

[9] Κωνσταντίνος Σταϊκούρας Μελέτη της τάσης για διάβρωση συγκολλήσεων ανοξείδωτου χάλυβα 316L με χρήση ηλεκτροχημικών μεθόδων

[10] Ενχειρίδιο Acucert 2010 για υπερήχους

[11] http://www.envirocoustics.gr/products/ultrasonic/ut_trans_gr.htm

[12] http://www.olympus-ims.com/en/epoch-4plus/