



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
Τομέας Μηχανικής

**«Μελέτη και αξιολόγηση λειτουργικότητας στοιχείων
μηχανών με χρήση μη καταστροφικών ελέγχων»**



ΚΟΤΣΑΝΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
Σπουδαστής του ΔΠΜΣ
«Εφαρμοσμένη Μηχανική» του ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επικ. Καθηγητής κ. Σιδερίδης Αιμίλιος

ΑΘΗΝΑ 2012

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία που σκοπό είχε τη μελέτη και την αξιολόγηση της λειτουργικότητας στοιχείων μηχανών με χρήση μη καταστροφικών ελέγχων υλικών , εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μη καταστροφικών Ελέγχων του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου .

Το θέμα της εργασίας υποδείχτηκε από τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, κ. Σιδερίδη Αιμίλιο .

Ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, κ. Σιδερίδη Αιμίλιο για την επίβλεψη και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια των πειραμάτων . Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Επίτιμο Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, κ. Πρασιανάκη Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και γενικά καθ'όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον κ. Παπαδόπουλο Μυροφόρο τομεάρχη Υλικού και Αποθηκών της Δ.Ε.Η για τη βοήθεια και τη παροχή των δοκιμών . Οι ευχαριστίες επεκτείνονται στον Λέκτορα της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Πετρόπουλο Νικόλαο για την βοήθεια του στα πειράματα ραδιογραφίας και γενικότερα στον Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών . Ευχαριστώ επίσης την εταιρία Παντελής Κ. Δονούπογλου Α.Ε. για τη παροχή δοκιμών και την γενικότερη βοήθεια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων . Ευχαριστώ επίσης τον φοιτητή ης Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Κυριάκο Φλέντζερη για την συνεργασία μας όλους αυτούς τους μήνες και για την βοήθεια του χωρίς την οποία η παρούσα διπλωματική δεν θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί .Τέλος ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Άγγελο Πικράκη για τη βοήθεια και την συνεργασία μας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την βοήθεια, την συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Εισαγωγή

Η αναγκαιότητα του να ελέγχονται τα οι κατασκευές η ορισμένα σημαντικά στοιχεία τους , ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η ύπαρξη ή η δημιουργία απρόβλεπτων ανωμαλιών ή περιοχών συγκέντρωσης τάσεων που να προκαλέσουν την αστοχία τους, αλλά και η αναγκαιότητα του να μπορούν να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες ορισμένων υλικών όσο αυτά βρίσκονται σε λειτουργία , οδήγησε στην ανάπτυξη των μη καταστροφικών μεθόδων έλεγχου των υλικών.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να δώσουν σημαντικότερες πληροφορίες τόσο σχετικά με την ύπαρξη επικίνδυνων σημείων στα καταπονούμενα τμήματα των κατασκευών (σημεία συγκέντρωσης τάσεων όπως μικρορωγμές στο εσωτερικό ενός υλικού) , όσο και σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών , οι οποίες είναι δυνατόν να μεταβάλλονται σαν αποτέλεσμα των συνθηκών και του χρόνου λειτουργίας των κατασκευών. Οι πληροφορίες αυτές λαμβάνονται χωρίς να απαιτείται καμία πρόσθετη καταπόνηση του υλικού. Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι των υλικών αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στις περιπτώσεις κατασκευών ή μηχανών υψηλού κινδύνου για τον άνθρωπο όπως πυρηνικοί αντιδραστήρες , αεροπλάνα κτλ.

Οι μέθοδοι μη καταστροφικού έλεγχου των υλικών αναπτύχθηκαν μετά τον Β παγκόσμιο πόλεμο και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια , μετά την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και της ηλεκτρονικής και εφαρμόζονται ευρύτατα στον έλεγχο των υλικών , παράλληλα ή και σε αντικατάσταση των καταστροφικών μεθόδων (εφελκυσμός , κάμψη , στρέψη κτλ) .

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι ΜΚΕ των υλικών οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε δυο κύριες κατηγορίες , στις βασικές μεθόδους που εφαρμόζονται ευρύτατα στον έλεγχο των υλικών και στις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η μέθοδος των υπερήχων , η ακτινογραφική μέθοδος , η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων , η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών και η μέθοδος των δινορευμάτων .

Στη δεύτερη κατηγορία μεθόδων ΜΚΕ ανήκουν η μέθοδος της ξηροακτινογραφίας , των ακτινών πυρηνικών σωματιδίων νετρονίων , πρωτονίων , ραδιοϊσοτόπων , οι οπτικές μέθοδοι (άμεση και έμμεση , φωτοελαστικότητα , ολογραφία) , θερμογραφικές μέθοδοι , η μέθοδος των ψαθυρών επικαλύψεων , της ακουστικής εκπομπής , της διαρροής ρευστών κ.α. .

Από όλες τις παραπάνω μεθόδους αυτή που χρησιμοποιείται ευρύτατα στον έλεγχο των υλικών είναι η μέθοδος των υπερήχων . Ο ήχος και τα ηχητικά κύματα είχαν χρησιμοποιηθεί από αρχαιοτάτων χρόνων στον έλεγχο υλικών και κατασκευών. Με την εξέλιξη όμως των επιστημών και ιδιαίτερα της ηλεκτρονικής αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι και κατασκευάστηκαν προηγμένης τεχνολογίας συσκευές, μέσω των οποίων γίνεται ο έλεγχος των υλικών με γρήγορο , οικονομικό και ασφαλή τρόπο. Στην περίπτωση αυτή , επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα εάν αντί για τα ηχητικά κύματα χρησιμοποιηθεί μια άλλη κατηγορία κυμάτων , τα όποια λόγω της συχνότητας τους ονομάζονται υπέρηχοι. Η μέθοδος των υπερήχων δεν επηρεάζει τις ιδιότητες των υλικών και είναι απολύτως ακίνδυνη για την υγεία του ανθρώπου.

Η αρχή του υπερηχητικού ελέγχου των υλικών , στηρίζεται στην διέλευση δια του ελεγχόμενου υλικού ελαστικών κυμάτων πίεσης (ταλαντώσεων) υψηλής συχνότητας (0,5 MHz έως 50 MHz). Αυτές οι ταλαντώσεις , που διαδίδονται μέσα στα υλικά μέσω των μορίων τους έχουν αυστηρά καθορισμένη διεύθυνση και πολύ μικρό μήκος κύματος έτσι ώστε να είναι δυνατό να ανιχνεύουν με ευκρίνεια και να εντοπίζουν μικρές ατέλειες στο ελεγχόμενο δοκίμιο.

Η διείσδυση των υπερήχων είναι πολύ μεγάλη στα περισσότερα μέταλλα και στα κράματα τους (μερικά μέτρα στον χάλυβα και το αλουμίνιο) , μικρότερη στα πολυμερή και άμορφα υλικά και πολύ μικρότερη στα σύνθετα (κοκκώδη και ινώδη) υλικά.

Η υπερηχητική μέθοδος ΜΚΕ των υλικών είναι σήμερα μια από τις ευρύτατα χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την ανίχνευση ατελειών , τον προσδιορισμό τους πάχους και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών . Αυτή η μέθοδος μπορεί επίσης να προσφέρει μεγάλες δυνατότητες αυτόματου ελέγχου των υλικών . Μερικοί περιορισμοί της μεθόδου οφείλονται στη δομή του υπό δόκιμη υλικού , στο σχήμα του και στην τραχύτητα της επιφάνειας του .

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Μη καταστροφικός έλεγχος υλικών.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Οι κυριότερες μέθοδοι ΜΚΕ.....	2
1.2.1. Βιομηχανική Ακτινογραφία	3
1.2.2. Οπτικές μέθοδοι εξέτασης	5
1.2.3. Διεισδυτικά υγρά	6
1.2.4. Μαγνητικά σωματίδια	7
1.2.5. Δινορεύματα	9
1.2.6. Ακουστική εκπομπή	9
1.2.7. Θερμογραφία	10
1.2.8. Ροή ρευστών.....	11
1.2.9. Ξηροακτινογραφία	11
1.2.10. Ψαθυρές επικαλύψεις	12
1.2.11. Υπέρηχοι	13
 Κεφάλαιο 2 : Θεωρία κυμάτων και υπέρηχοι.....	15
2.1. Βασικοί ορισμοί.....	15
2.2. Είδη κυμάτων.....	16
2.3. Κάθετη πρόσπτωση κύματος.....	18
2.4. Πλάγια πρόσπτωση κύματος.....	19
2.5. Σκέδαση - περίθλαση -συμβολή ηχητικών κυμάτων.....	21
2.6. Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων στα στερεά σώματα	21
2.7. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	22
2.8. Πιεζοηλεκτρικές υπερηχητικές κεφαλές	24
2.8.1. Κεφαλές καθέτου δέσμης	24
2.8.2. Κεφαλές γωνιακής δέσμης	25
2.8.3. Εμβαπτιζόμενες κεφαλές	26
2.8.4. Κεφαλές διπλού κρυστάλλου	27
2.8.5. Κεφαλές ειδικού τύπου	28
2.9. Μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου.....	28
2.9.1. Γενικά	28
2.9.2. Η μέθοδος της διέλευσης	29
2.9.3. Η μέθοδος του συντονισμού	29
2.9.4. Η μέθοδος της παλμοηγούς	30
2.10. Περιοχές εφαρμογής του ΜΚΕ των υπερήχων	33
2.10.1. Εύρεση ελαστικών σταθερών	33

2.10.2. Ανίχνευση ατελειών.....	35
2.10.3. Παχυμέτρηση.....	36
2.10.4. Σκληρομέτρηση.....	39
Κεφάλαιο 3 : Ελαστικές σταθερές – σκληρότητα.....	41
3.1. Μέτρο ελαστικότητας – λόγος Poisson.....	43
3.2. Μέτρο διάτμησης	45
3.3. Σκληρότητα	47
Κεφάλαιο 4 : Ραδιογραφικές μέθοδοι	51
4.1. Ακτίνες X – Ακτίνες Γ	51
4.2. Οι Ιονίζουσες ακτινοβολίες	52
4.3. Οι Πηγές ακτίνων X και ακτίνων Γ	53
4.4. Κίνδυνοι και προφύλαξη.....	54
4.5. Ψηφιακή ραδιογραφία – Τομογραφία	55
4.6. Υποατομικά σωματίδια	56
Κεφάλαιο 5 : Πειραματικό Μέρος	57
5.1. Δοκίμια	57
5.2. Συσκευές	58
5.2.1. Η συσκευή USIP – 11	58
5.2.2. Υπερηχητικό σκληρόμετρο MIC – 2	60
5.3. Εύρεση ελαστικών σταθερών.....	63
5.4. Εύρεση σκληρότητας	69
5.5. Εύρεση Damage Parameter	75
5.6. Πειράματα βιομηχανικής ακτινογραφίας.....	79
5.7. Πειράματα Εφελκυσμού	82
Συμπεράσματα	85
Βιβλιογραφία.....	87

Θεωρητικό Μέρος

Κεφάλαιο 1

Μη-καταστροφικός έλεγχος υλικών

1.1. Εισαγωγή

Ο άνθρωπος έχει σχεδιάσει και έχει δημιουργήσει άπειρα αντικείμενα που εξυπηρετούν τις ανάγκες του σε καθημερινή βάση. Πρόκειται από μεγάλες κατασκευές μέχρι και πολύ μικρά εξαρτήματα μηχανών που επιτελούν πολύ χρήσιμο έργο. Για την ασφάλεια αυτών των δημιουργημάτων, αλλά κυρίως για την ασφάλεια του ανθρώπου, όλα αυτά πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά κατά την διάρκεια της κατασκευής τους αλλά και κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους για την παρακολούθηση της κατάστασής τους. Υπάρχουν λοιπόν δύο ειδών μέθοδοι για τον έλεγχο υλικών: Οι καταστροφικές και οι μη καταστροφικές μέθοδοι.

Με τις καταστροφικές μεθόδους μπορούμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των υλικών και να βρούμε τις μέγιστες καταπονήσεις πέρα από τις οποίες το υλικό μπαίνει σε στάδιο αστοχίας. Πρόκειται κυρίως για τις μεθόδους του εφελκυσμού, της στρέψης, της κάμψης, της σκληρομέτρησης κλπ. Οι μέθοδοι αυτές όμως προϋποθέτουν την κατασκευή ενός αριθμού δοκιμών με καθορισμένες διαστάσεις και στην συνέχεια την καταστροφή τους, με σκοπό την ανάλυση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η ανάγκη όμως να ελέγχονται κατασκευές και μηχανικά μέρη ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η ύπαρξη ανωμαλιών που μπορεί να προκαλέσουν την αστοχία τους αλλά και η αναγκαιότητα να προσδιορίζονται οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ορισμένων υλικών ενώ αυτά βρίσκονται σε λειτουργία, οδήγησε στην ανάπτυξη των μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου των υλικών (σε συντομογραφία αναφέρονται ως

M.K.E., ενώ ο διεθνής όρος είναι Non Destructive Testing, NDT). Δηλαδή, οι μέθοδοι M.K.E. είναι η διαδικασία που απαιτείται για τη διερεύνηση της ποιότητας, των ιδιοτήτων και διαστάσεων, την ανίχνευση ελαττωμάτων των υλικών και των μηχανικών εξαρτημάτων, χωρίς να προκαλείται καταστροφή ή ανεπανόρθωτη βλάβη.

1.2. Οι κυριότερες μέθοδοι ΜΚΕ

Η ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης ιδιαίτερα τον περασμένο αιώνα, οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων μη-καταστροφικού ελέγχου των υλικών. Κάθε μέθοδος έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και εφαρμόζεται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις και υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Οι μέθοδοι που κυριαρχούν είναι κυρίως οι εξής:

1. Βιομηχανική ακτινογραφία
2. Οπτικές μέθοδοι εξέτασης
3. Διεισδυτικά υγρά
4. Μαγνητικές μέθοδοι
5. Δινορεύματα
6. Ακουστική εκπομπή
7. Θερμογραφία
8. Ροή ρευστών
9. Ξηροακτινογραφία
10. Ψαθυρές επικαλύψεις
11. Υπέρηχοι

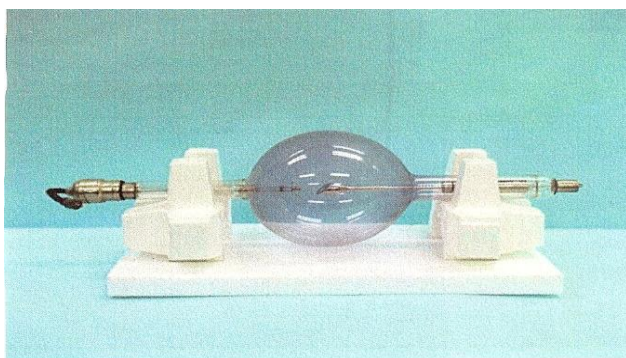
Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση της κάθε μεθόδου και των εφαρμογών της.

1.2.1. Βιομηχανική ακτινογραφία

Η Μη-καταστροφική μέθοδος της βιομηχανικής ακτινογραφίας (Industrial Radiography) εμφανίστηκε για πρώτη φορά σε πρώιμη μορφή στα τέλη του 19ου αιώνα από τον Γερμανό φυσικό *Γουλιέλμο Ρέντγκεν*. Η εφαρμογή της προϋποθέτει την χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως τις ακτίνες X, γ και σωμάτια α, β και νετρόνια. Οι ακτινοβολίες αυτές έχουν την εξής χρήσιμη ιδιότητα: Κατά την διέλευσή τους μέσα από ένα υλικό, αποσβένονται ανάλογα με την πυκνότητα και την «αντίσταση» που συναντούν. Η πειραματική διάταξη για την εφαρμογή της βιομηχανικής ακτινογραφίας, περιλαμβάνει την πηγή της ακτινοβολίας, το εξεταζόμενο αντικείμενο στην μέση και ένα φωτογραφικό φιλμ, όλα τοποθετημένα συνευθειακά. Μετά την σάρωση, μπορούμε να καταλήξουμε σε συμπεράσματα ανάλογα με την αμαύρωση που έχει υποστεί το φιλμ για τις διάφορες περιοχές του υλικού. Η βιομηχανική ακτινογραφία γίνεται κυρίως με ακτίνες X και με ραδιενέργεια.

➤ Ακτινογραφία με χρήση Ακτινών X

Οι ακτίνες X παράγονται όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπίπτουν πάνω στην ύλη. Μπορούν να παραχθούν είτε με την βοήθεια σωλήνων Coolidge, είτε με την βοήθεια ιοντικών σωλήνων. Στην επόμενη φωτογραφία μπορούμε να διακρίνουμε έναν σωλήνα Coolidge.

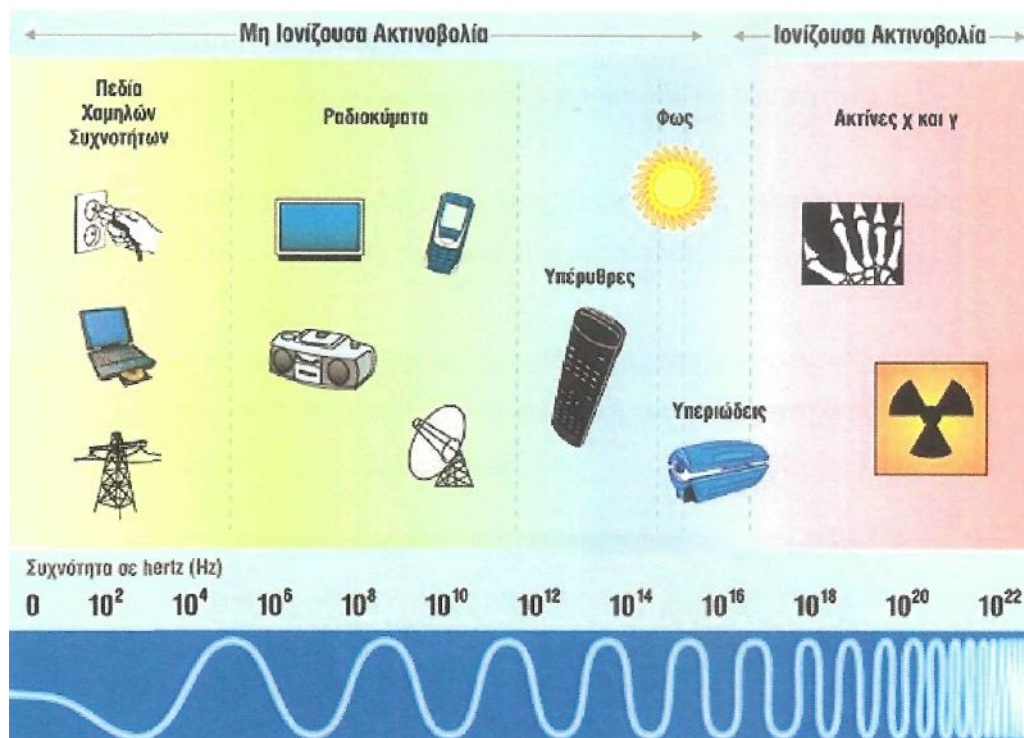


Εικόνα 1-1 Σωλήνας Coolidge

Οι ακτίνες X χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις μαλακές ακτίνες X και στις σκληρές ακτίνες X. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο λεπτών φύλλων υλικών με ασθενή απόσβεση, όπως το αλουμίνιο το πλαστικό κλπ. Οι δεύτερες, αντιθέτως, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο υλικών παχύτερων ή ισχυρότερης απόσβεσης, όπως ο σίδηρος, ο μπρούτζος κλπ.

➤ Ακτινογραφία με ραδιενέργεια

Η ραδιενέργεια εκπέμπεται από διάφορα ραδιενεργά στοιχεία όπως είναι το ουράνιο, το πλουτώνιο, τα ραδιοϊσότοπα κλπ. Η ραδιενέργεια ουσιαστικά είναι τα σωματία α, β, τα νετρόνια και οι ακτίνες γ, που είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πολύ μικρού μήκους κύματος., όπως φαίνεται στο παρακάτω φάσμα:



Εικόνα 1-2 Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Τα σωμάτια α είναι πυρήνες ηλίου. Τα σωμάτια β δεν προϋπάρχουν στους ραδιενεργούς πυρήνες, αλλά παράγονται κατά τη στιγμή της διάσπασης τους. Οι ακτίνες γ παράγονται κατά τη διάσπαση ορισμένων ραδιενεργών πυρήνων.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η εφαρμογή της ακτινογραφίας απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς οι ακτινοβολίες που προαναφέραμε εγκυμονούν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία. Επομένως, πρέπει να εφαρμόζονται αυστηρά μέτρα ακτινοπροστασίας του προσωπικού σε κάθε τέτοιο έλεγχο.

1.2.2. Οπτικές μέθοδοι εξέτασης

Η οπτική μέθοδος είναι η πιο απλή μέθοδος Μη -καταστροφικού ελέγχου ενός υλικού, που πραγματοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ελαττωμάτων είτε με γυμνό μάτι είτε με τη χρήση οργάνων, όπως ενδοσκόπια άκαμπτα και εύκαμπτα, μικροσκόπια, μεγεθυντικοί φακοί κλπ. Μια απλή οπτική εξέταση μπορεί να αποκαλύψει ατέλειες και επομένως να προστατέψει την ασφάλεια μιας κατασκευής, να εντοπίσει ατέλειες σε μια γραμμή παραγωγής κλπ.

Οι οπτικές μέθοδοι ελέγχου μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες:

- α) σε αυτές που χρησιμοποιούν όργανα, όπως μικροσκόπια, τηλεσκόπια και προβολείς, τα οποία βασίζονται τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής και
- β) σε αυτές όπου γίνεται χρήση της φυσικής οπτικής, λαμβάνοντας υπόψη την κυματική φύση του φωτός, όπως συμβαίνει με τη συμβολή του φωτός στη φωτοελαστικότητα, την ολογραφία και τις καυστικές.



Εικόνα 1-3 Οπτική εξέταση σωλήνων

Για τη σωστή εξέταση, θα πρέπει πριν από τον οπτικό έλεγχο οι επιφάνειες να προετοιμάζονται, απομακρύνοντας ακαθαρσίες, γράσα και σκουριές. Επιπλέον, θα πρέπει οι ελεγχόμενες επιφάνειες να φωτίζονται κατάλληλα, ώστε να εξασφαλίζονται οι ιδανικές κάθε φορά συνθήκες εξέτασης περιορίζοντας την πιθανότητα σφάλματος ή αδυναμίας παρατήρησης κάποιας ατέλειας.

1.2.3. Διεισδυτικά υγρά

Η εξέταση αυτή είναι σχεδιασμένη για να εντοπίζει επιφανειακές ρωγμές ή ρωγμές που καταλήγουν στην επιφάνεια ενός δοκιμίου. Μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια το μήκος μιας ρωγμής αλλά όχι το βάθος της.

Το δοκίμιο που θέλουμε να ελέγξουμε, ψεκάζεται με χρωματιστό διάλυμα το οποίο διεισδύει και εμποτίζει τις όποιες ρωγμές καταλήγουν στην επιφάνεια. Πλένοντας την επιφάνεια και στην συνέχεια με τη χρήση εμφανιστή, το διάλυμα, που έχει παραμείνει στις ρωγμές και στις διάφορες ατέλειες γίνεται αντιληπτό. Οι ατέλειες τότε φαίνονται σαν χρωματιστές γραμμές, χρώματος ανάλογου του χρησιμοποιούμενου υγρού, σε λευκό φόντο.



Εικόνα 1-4 Εφαρμογή μεθόδου διεισδυτικών υγρών

Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών εφαρμόζεται συνήθως με δύο τρόπους: Με την χρήση *χρωματιστών* ή με την χρήση *φθοριζόντων διαλυμάτων*. Η χρήση χρωματιστών, συνήθως κόκκινων διαλυμάτων, ενδείκνυται στον έλεγχο μεγάλων δοκιμίων που δεν έχουν ιδιαίτερα λείες επιφάνειες. Μετά τον καθαρισμό του διαλύματος, χρησιμοποιούμε ορατό φως το οποίο «προδίδει» την θέση και το σχήμα των ρωγμών ή ατελειών της επιφάνειας. Κατά την χρήση φθοριζόντων διαλυμάτων, όμως, η παρατήρηση γίνεται αφού η επιφάνεια φωτισθεί με υπεριώδη ακτινοβολία.

Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου μπορούμε να αναφέρουμε το γεγονός ότι είναι μια γρήγορη και οικονομική μέθοδος που εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος υλικών και δοκιμίων. Όμως, δεν προσφέρεται για πορώδη υλικά (σκυρόδεμα, σύνθετα υλικά) ενώ εντοπίζει μονάχα επιφανειακές ατέλειες. Τέλος, αδυνατεί να εντοπίσει μια ατέλεια εάν αυτή έχει καλυφθεί με μία ξένη ουσία.

1.2.4. Μαγνητικά Σωματίδια

Η τεχνική των *μαγνητικών σωματιδίων* χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και κατά προσέγγιση προσδιορισμό επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ευρισκόμενων ρωγμών σε μαγνητικά υλικά, οι οποίες δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι.

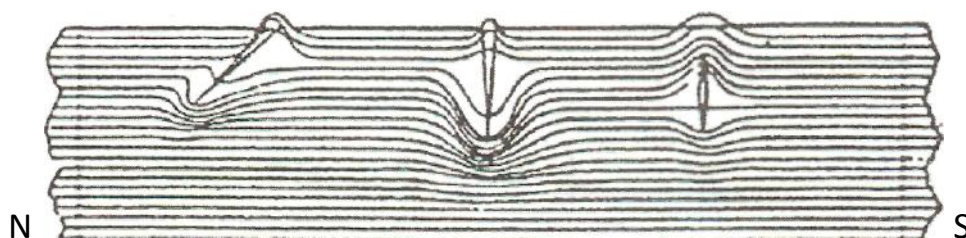
Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη μαγνητικά υλικά, όπως το γυαλί, τα κεραμικά, τα πλαστικά, το αλουμίνιο, ο χαλκός και άλλα υλικά.

Η διαδικασία ελέγχου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

1. Το εξεταζόμενο δοκίμιο εισάγεται στο κατάλληλο μαγνητικό πεδίο.
2. Εφαρμόζονται τα μαγνητιζόμενα σωματίδια υπό μορφή σκόνης ή επάλειψης με κατάλληλο υγρό (μελάνι).
3. Εξετάζεται το δοκίμιο αφού φωτιστεί κατάλληλα.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου, πρέπει η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου να είναι κάθετη προς τη διεύθυνση των ρωγμών. Δυσκολίες εμφανίζονται στην περίπτωση δοκιμών μεγάλων διαστάσεων, όπου απαιτούνται ισχυρά μαγνητικά πεδία, όπως και μερικές φορές στον απομαγνητισμό των δοκιμών.

Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδιότητα κατά την οποία η μαγνητική ροή σε ένα μαγνητιζόμενο υλικό διαταράσσεται τοπικά από την παρουσία ατελειών. Αυτή η διαταραχή αναγκάζει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές να «βγαίνουν» από το αντικείμενο και να επανεισάγονται σε αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «διαρροή μαγνητικής ροής». Η ύπαρξη μιας ατέλειας γίνεται ορατή με την απότομη αλλοίωση των χαρακτηριστικών γραμμών που σχηματίζουν πάνω στο αντικείμενο τα μικροσκοπικά σωματίδια της ειδικής σκόνης από οξείδια του σιδήρου που έχει τοποθετηθεί. Για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, χρησιμοποιούνται είτε μόνιμοι μαγνήτες είτε ηλεκτρομαγνήτες



Εικόνα 1-5 Επίδραση επιφανειακών ατελειών στο μαγνητικό πεδίο

1.2.5. Δινορρεύματα

Η μέθοδος των δινορρευμάτων ή επαγωγικών ρευμάτων είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ελέγχου μεταλλικών (ηλεκτρικά αγωγιμών) υλικών. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων και διαστάσεων των υλικών, καθώς και για τον εντοπισμό επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών.

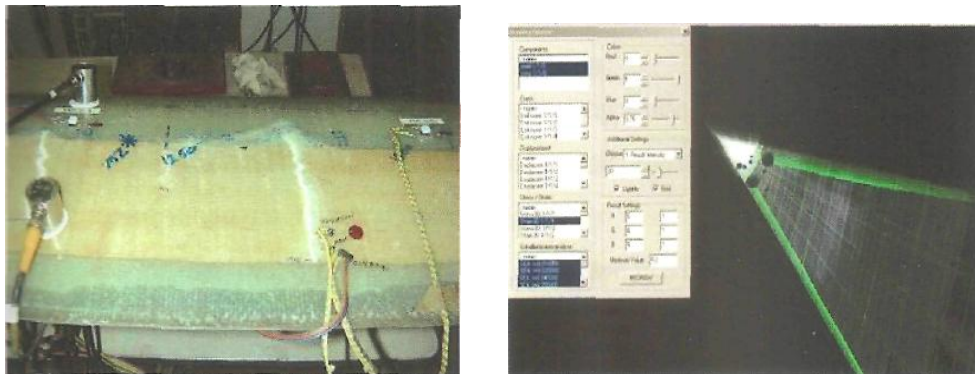
Κατά τον έλεγχο με δινορρεύματα, εναλλασσόμενο ρεύμα επιλεγμένης συχνότητας εφαρμόζεται σε ένα πηνίο. Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στο πηνίο. Έτσι, όταν το πηνίο έρθει σε επαφή με το αγωγίμο εξάρτημα, το μαγνητικό του πεδίο διαπερνά το υλικό και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ίδιας συχνότητας μέσα στο εξάρτημα, προκαλώντας ροή δινορρευμάτων σε αυτό. Η ροή αυτή των δινορρευμάτων στο εξάρτημα παράγει το δικό της μαγνητικό πεδίο, το οποίο επηρεάζει με τη σειρά του το αρχικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του πηνίου. Το επακόλουθο μαγνητικό πεδίο αποτελεί την πηγή πληροφοριών που αναλύεται ηλεκτρονικά για να δώσει το ζητούμενο αποτέλεσμα. Μια ασυνέχεια στο υλικό διαταράσσει τη συνεχή ροή των δινορρευμάτων και το σχετικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η διαταραχή αναλύεται ηλεκτρονικά και αποτυπώνεται στο μετρητή του οργάνου ή στην καθοδική λυχνία.

Η επιφάνεια που πρόκειται να ελεγχθεί πρέπει να είναι προσβάσιμη από τον αισθητήρα-κεφαλή. Βέβαια, έχουν κατασκευαστεί ειδικοί αισθητήρες ακόμη και για ελέγχους σε οπές ή σπειρώματα περικοχλίων με εγκατεστημένους τους κοχλίες.

1.2.6. Ακουστική εκπομπή

Πρόκειται για μια Μη-καταστροφική μέθοδο ελέγχου κατασκευών υψηλού κινδύνου, όπως μεταλλικές κατασκευές, αεροσκάφη, δεξαμενές εύφλεκτων υγρών, πυρηνικοί αντιδραστήρες κλπ. Η σημασία λοιπόν της μεθόδου αυτής είναι πολύ μεγάλη.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στο ότι όλα τα υλικά και ιδιαίτερα τα μέταλλα και τα κράματα τους, εκπέμπουν ήχο όταν συμβαίνει κάποια μεταβολή στο εσωτερικό τους. Έτσι, για να ελέγξουμε ένα υλικό με την μέθοδο της ακουστικής εκπομπής, το υποβάλλουμε είτε σε πίεση είτε σε άλλου είδους κόπωση και με ειδικά αισθητήρια (κυρίως πιεζοηλεκτρικές κεφαλές) εντοπίζουμε τα ηχητικά κύματα. Μάλιστα, έχει διαπιστωθεί ότι οι ηχητικές πηγές προέρχονται κυρίως από «αδύναμες» περιοχές, που είναι ευκολότερο να αστοχήσουν ή που περιέχουν κάποια ρωγμή ή ατέλεια. Εντοπίζονται λοιπόν τα πιο επικίνδυνα σημεία μιας κατασκευής, που στην συνέχεια μπορούν να εξεταστούν και με άλλες μεθόδους ΜΚΕ, για να καταλήξουμε σε ένα ασφαλέστερο συμπέρασμα.



Εικόνα 1-6 Δημιουργία διάταξης για εφαρμογή ακουστικού ελέγχου

Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα της ακουστικής μεθόδου είναι πως μας παρέχει την δυνατότητα να παρακολουθούμε ένα υλικό σε βάθος χρόνου, κάτι που δεν είναι εύκολο να γίνει με τις υπόλοιπες μη-καταστροφικές μεθόδους.

1.2.7. Θερμογραφία

Σύμφωνα με τον θερμοδυναμικό νόμο, κάθε σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία., της οποίας το φάσμα εξαρτάται από την θερμοκρασία του. Η μελέτη ενός σώματος γίνεται με την βοήθεια διαφόρων συσκευών (θερμοοπτική φωτογραφική μηχανή, πυροηλεκτρική συσκευή κλπ).

Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών περιλαμβάνει την καταγραφή των μεταβολών της θερμοκρασίας ενός σώματος από σημείο σε σημείο. Από την χωρική κατανομή της θερμοκρασίας προκύπτουν πληροφορίες για ενδεχόμενη ύπαρξη ατελειών. Οι εικόνες που παίρνουμε αποτελούν το θερμογράφημα ή το υπερερυθρογράφημα ενός σώματος.

Η θερμογραφία έχει εφαρμογές στην διάγνωση όγκων στην Ιατρική, στην διάγνωση του καιρού για την ναυσιπλοΐα αλλά και στην τέχνη, καθώς με αυτήν εξετάζονται πίνακες ζωγραφικής.

1.2.8. Ροή ρευστών

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον προσδιορισμό της διαφοράς πίεσεως μεταξύ δυο σημείων μιας κατασκευής, όταν προκαλέσουμε διαρροή ρευστού από το εσωτερικό προς το εξωτερικό τμήμα μιας κατασκευής ή αντίστροφα.

Μία ατέλεια, οπή ή ρωγμή πάνω στο εξεταζόμενο υλικό μετριέται από τον βαθμό της διαρροής του ρευστού κάτω από τις ίδιες κάθε φορά συνθήκες. Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών συσκευών Μη-καταστροφικού ελέγχου υλικών με την μέθοδο της διαρροής ρευστών. Κάθε συσκευή χαρακτηρίζεται από διαφορετική ευαισθησία, μετρητική ικανότητα καθώς και το είδος του ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία.

1.2.9. Ξηροακτινογραφία

Κατά την μέθοδο της ξηρό ακτινογραφίας γίνεται ξηρή επεξεργασία, χωρίς δηλαδή ορισμένα υλικά όπως το σελήνιο, που αφού φορτιστούν ηλεκτρικά, στην συνέχεια από φορτίζονται όταν εκτεθούν στις ακτίνες X ή στο φως.

Ένα τέτοιο υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωτογραφική πλάκα με την χρήση ακτίνων X και να αποδώσει ένα εξεταζόμενο δοκίμιο. Η ξηροακτινογραφία χρησιμοποιείται τελευταία και στην Ιατρική για τον έλεγχο των μαλακών μυών.

1.2.10. Ψαθυρές επικαλύψεις

Η μέθοδος των ψαθυρών επικαλύψεων περιλαμβάνει τον ψεκασμό της επιφάνειας ενός δοκιμίου με μια λεπτή επίστρωση ενός πολύ άκαμπτου, ψαθυρού υλικού το οποίο ρηγματώνεται πολύ εύκολα. Στην συνέχεια, εφαρμόζεται στο δοκίμιο τάση ή θερμική καταπόνηση και από την επεξεργασία του μεγέθους και της μορφής των ρωγμών μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως η τάση που ασκήθηκε.

Υπάρχουν δύο ειδών ψαθυρές επικαλύψεις: Αυτές που βασίζονται στις οργανικές ρυτίνες και είναι κατάλληλες για θερμοκρασίες περιβάλλοντος, καθώς και εκείνες που στηρίζονται στα κεραμικά, για έλεγχο σε συνθήκες υψηλότερων θερμοκρασιών μέχρι και 370°C.

1.2.11. Υπέρηχοι

Η ιστορία του υπερηχητικού ελέγχου ξεκινάει στο έτος 1929, όταν ο Solokov τον χρησιμοποίησε για τον εντοπισμό ατελειών και ελαττωμάτων. Στην συνέχεια, το 1942 ο Firestone έκανε εκτεταμένους ελέγχους σε υλικά με την χρήση αυτής της μεθόδου

Πρόκειται ίσως για την δημοφιλέστερη μέθοδο Μη-καταστροφικού ελέγχου υλικών, που βασίζεται στους νόμους της διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων. Και αυτό διότι πρόκειται για μέθοδο που είναι απλή, εύκολα εφαρμόσιμη με την χρήση φορητών και λιγότερο ακριβών συσκευών ελέγχου, ενώ είναι απόλυτα ασφαλής και ακίνδυνη για τον άνθρωπο.

Τα κύματα που χρησιμοποιούνται για έναν υπερηχητικό έλεγχο είναι ηχητικά κύματα, συχνότητα συνήθως μεγαλύτερης από 500 KHz. Αυτά διοχετεύονται στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υλικού και με την επεξεργασία του σήματος εξόδου μπορούμε να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα.



Εικόνα 1-7 Εφαρμογή υπερηχητικού ελέγχου

Σήμερα, η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ορισμένων από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (μέτρο ελαστικότητας E , λόγος του Poisson ν , μέτρο διάτμησης G , αντοχή σ , κ.ά.), χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και η θραύση ειδικών δοκιμιών, ενώ ακόμα μετράται με ικανοποιητική ακρίβεια το πάχος των κατασκευών. Η τελευταία εφαρμογή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μέτρηση πάχους κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως σε πλοία, σωλήνες, κλπ. Χρησιμοποιείται, ακόμη, για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και επιπλέον αποτελεί μια μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας, αφαίρεσης και κοπής μετάλλων.

Η μέθοδος προϋποθέτει την ύπαρξη μιας τουλάχιστον προσβάσιμης επιφάνειας του ελεγχόμενου υλικού. Οι επιφάνειες που ελέγχονται με υπερήχους, πρέπει να είναι απαλλαγμένες από ακαθαρσίες, σκουριές κλπ. Ανάμεσα στην επιφάνεια ελέγχου και την κεφαλή υπερήχων τοποθετείται ειδικό υγρό που επιτρέπει την διείσδυση των υπερηχητικών κυμάτων στο υλικό, καθώς εξαφανίζει το ενδιάμεσο στρώμα αέρα που θα ήταν εμπόδιο για την διέλευση του υπερήχου.

Στις επόμενες σελίδες θα αναφερθούμε εκτενώς στην υπερηχητική Μη-Καταστροφική μέθοδο.

Κεφάλαιο 2

Θεωρία κυμάτων και υπέρηχοι

2.1. Βασικοί Ορισμοί

Πριν αναλύσουμε τη μέθοδο των υπέρηχων είναι σκόπιμο να γίνει μία εισαγωγή σε βασικές έννοιες της κυματικής, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία της μεθόδου. Ο έλεγχος των υλικών με υπέρηχους χρησιμοποιεί μία δέσμη υπερηχητικών μηχανικών κυμάτων μεγάλης συχνότητας.

Μηχανικό Κύμα είναι μία διαταραχή στην κατάσταση ισορροπίας, η οποία διαδίδεται από μία περιοχή του χώρου σε μία άλλη. Απαιτείται ένα υλικό μέσο στο οποίο θα διαδίδεται η διαταραχή με ορισμένη ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης ή ταχύτητα κύματος** και καθορίζεται από τις ιδιότητες του μέσου. Ορίζεται ως το γινόμενο του μήκους κύματος επί την συχνότητα της πηγής, που προκαλεί τη διαταραχή, βάσει του τύπου

$$u = \lambda f$$

Το ίδιο το μέσο δεν μετακινείται στο χώρο αλλά τα επιμέρους μόρια κινούνται μπρος - πίσω ή πάνω - κάτω γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους. Η μορφή της κυματικής διαταραχής είναι αυτή που μεταφέρεται από την πηγή προς τα έξω,

Για να θέσουμε τα μόρια του μέσου σε κίνηση, πρέπει να προσφέρουμε ενέργεια με την παραγωγή μηχανικού έργου. Η κυματική κίνηση μεταφέρει αυτή την ενέργεια από μία περιοχή του μέσου σε άλλη.

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι το κύμα που μεταφέρει ενέργεια ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, η οποία και διαδίδεται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός $c = 3 \times 10^8$ m/sec.

Ως **ήχος** ορίζεται η περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα, της οποίας η συχνότητα είναι ικανή να ερεθίζει το αισθητήριο της ακοής και να προκαλεί το

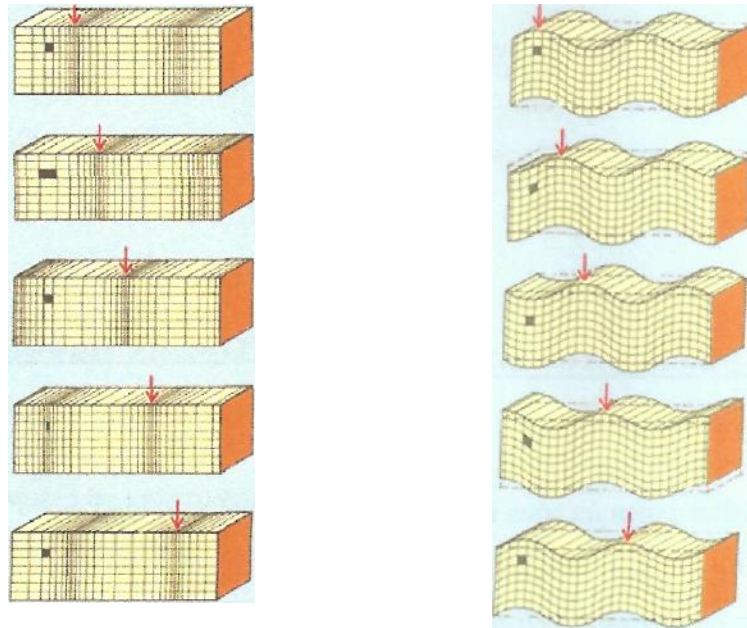
αντίστοιχο αίσθημα. Οι συχνότητες αυτές κυμαίνονται από 16 Hz έως 20.000 Hz και αποτελούν τους λεγόμενους **ακουστικούς ήχους**. Αντίθετα, αν η συχνότητα των κυμάτων είναι μικρότερη από 16Hz έχουμε τους **υπόηχους**, ενώ για συχνότητες μεγαλύτερες των 20kHz έχουμε την παραγωγή των **υπερήχων**.

Στη μέθοδο των υπερήχων για τη μελέτη των υλικών χρησιμοποιείται η περιοχή συχνοτήτων 0.5 - 40MHz. Στον έλεγχο του σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπέρηχοι συχνότητας μέχρι και 100 KHz, εξαιτίας της μεγάλης απόσβεσης που αυτό παρουσιάζει.

2.2. Είδη κυμάτων

Ανάλογα με τον τρόπο διαδόσεως τους μέσα σε ένα σώμα, τα κύματα διακρίνονται σε:

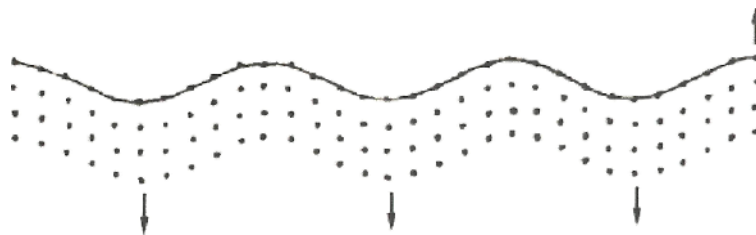
- **Διαμήκη κύματα** είναι τα κύματα εκείνα στα οποία η διεύθυνση κίνησης των μορίων του μέσου συμπίπτει με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα κύματα αυτά που παράγονται με κατάλληλες κεφαλές, έχουν τη δυνατότητα να διαδίδονται και στις τρεις μορφές της ύλης (στερεά, υγρή, αέρια).
- **Εγκάρσια κύματα** 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 μπορούν να παραλάβουν διατμητικές δυνάμεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, διαδίδονται και σε πολύ παχύρευστα υγρά, όπως για παράδειγμα το μέλι. Η παραγωγή τους γίνεται είτε χρησιμοποιώντας κατάλληλες κεφαλές παραγωγής εγκαρσίων κυμάτων είτε από κεφαλές διαμηκών κυμάτων ρυθμίζοντας κατάλληλα τις γωνίες πρόσπτωσης (νόμος του Snell) εξαφανίζοντας με τον τρόπο αυτό τα διαμήκη κύματα.



Σχήμα 2-1 Αριστερά: Διαμήκη κύματα. Δεξιά: Εγκάρσια κύματα.

- **Κύματα πλακών ή κύματα Lamb** είναι ένας τύπος κύματος που αποτελεί ουσιαστικά συνδυασμό διαμηκών και εγκαρσίων κυμάτων. Οι δύο τύποι κυμάτων Lamb είναι τα διασταλτικά και τα καμπτικά κύματα. Σε γενικές γραμμές, εμφανίζονται στην περίπτωση λεπτών πλακών πάχους λίγων μηκών κύματος.
- **Επιφανειακά κύματα** καλούνται τα κύματα που αναπτύσσονται στην επιφάνεια ενός υλικού, μέχρι και βάθος ενός μήκους κύματος. Έχουν την μορφή του σχήματος 2-2.

διεύθυνση διάδοσης →



Σχήμα 2-2 Επιφανειακό κύμα

- **Στρεπτικά κύματα** λέγονται αυτά που αναπτύσσονται σε σώματα που έχουν τη μορφή ράβδου και εκτελούν στρεπτική ταλάντωση γύρω από τον επιμήκη άξονα της ράβδου. Η διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων στρέψεως συμπίπτει με τη διεύθυνση του άξονα της ράβδου.

2.3. Κάθετη πρόσπτωση του κύματος

Όταν το κύμα συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, τότε ένα τμήμα του θα ανακλαστεί και ένα άλλο θα διαθλασθεί. 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 διάδοσης c του κύματος διαμέσου του υλικού αυτού:

$$Z = \rho c$$

Σημειώνεται ότι η ταχύτητα c συνιστά σταθερά ενός υλικού και έχει άλλη τιμή για κάθε υλικό.

Εφόσον έχει οριστεί η έννοια της ακουστικής αντίστασης Z , ορίζουμε τον *συντελεστή ανάκλασης* R ως :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

και το *συντελεστή διάθλασης* T ως:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

με

$$Z_1 = \rho_1 c_1 \text{ και } Z_2 = \rho_2 c_2$$

Οι συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης δίνουν το ποσοστό της ηχητικής πίεσης που ανακλάται ή διαθλάται στο δεύτερο υλικό. Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ισχύει η συνέχεια της ηχητικής πίεσης που εκφράζεται από τη σχέση:

$$p_0 + p_1 = p_2$$

όπου p_0 είναι η ακουστική πίεση του προσπίπτοντος κύματος, $p_1 = R p_0$ η ακουστική πίεση του ανακλώμενου κύματος και $p_2 = T p_0$ η ακουστική πίεση του διαθλώμενου κύματος. Οπότε ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

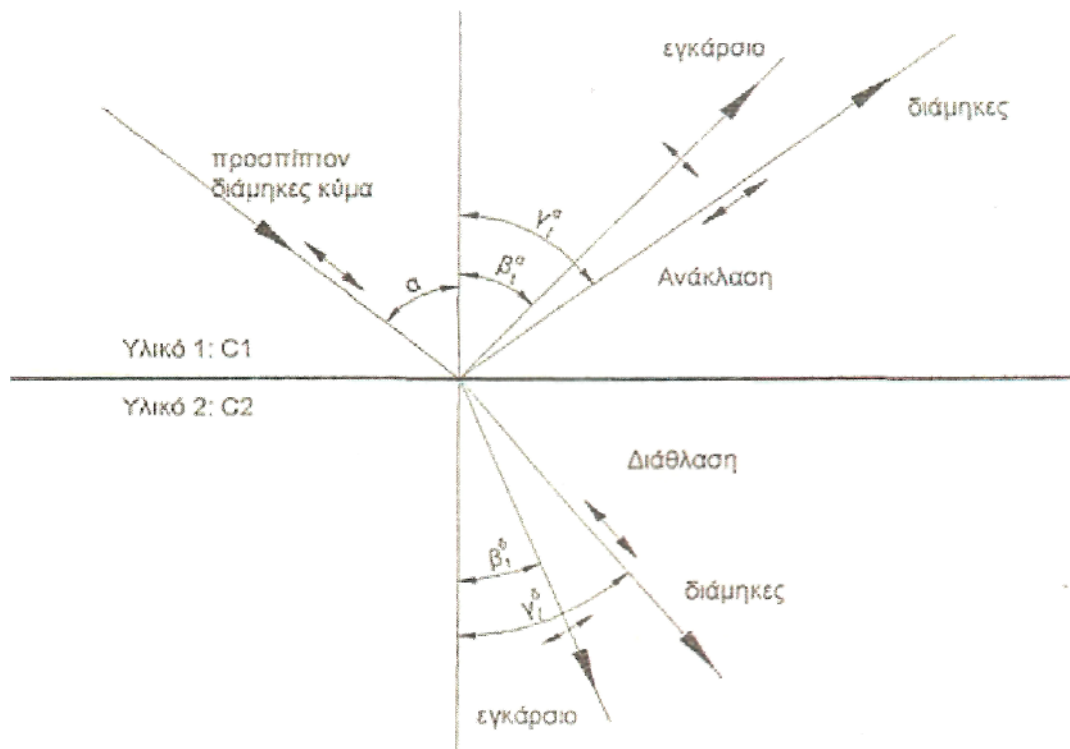
$$p_0 + R p_0 = T p_0 \text{ και } 1 + R = T$$

Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δύο υλικών είναι ίσες ($Z_1 = Z_2$), τότε δεν υπάρχει ανάκλαση ($R = 0$), ενώ όλος ο ήχος περνά ανεμπόδιστα μέσα από τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ($T = 1$). Έτσι, προκύπτει ότι κατά τη μετάβαση των υπερηχητικών κυμάτων από το χάλυβα στο αέρα ανακλάται το 99.96% της ενέργειάς τους, ενώ από χάλυβα σε Plexiglas το 68%, από αλουμίνιο σε νερό το 70% και τέλος από χαλαζία σε αλουμίνιο το 0.64% της ενέργειάς τους.

Για λόγους ακουστικής επαφής κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη κάποιου υγρού στη διεπιφάνεια κεφαλής - εξεταζόμενου υλικού, το οποίο θα εξουδετερώνει το στρώμα αέρα που κανονικά θα υπήρχε μεταξύ των δύο υλικών. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται διάφορες πάστες ή και μέλι, γράσο ή λάδι μηχανής.

2.4. Πλάγια πρόσπτωση κύματος

Όταν ένα κύμα προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών υπό γωνία, τότε παράγονται δύο κύματα λόγω ανάκλασης (διάμηκες και εγκάρσιο) και δύο λόγω διάθλασης (διάμηκες και εγκάρσιο). Προφανώς, όταν κάποιο από τα υλικά είναι υγρό ή αέριο, τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται και μένουν μόνο τα διαμήκη. 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. Παρακάτω ακολουθεί ένα πολύ χρήσιμο σχήμα:



Εικόνα 2-3 Πλάγια πρόσπτωση κύματος

Στην περίπτωση της πρόσπτωσης υπό γωνία, ισχύει ο **νόμος του Snell** που στη γενική του μορφή είναι:

$$\sin\alpha/\sin\beta = C_1/C_2$$

και αναλύοντάς τον προκύπτει:

$$\sin\alpha/C_L^1 = \sin\alpha_L/C_L^1 = \sin\alpha_T/C_T^1 = \sin\beta_L/C_L^2 = \sin\beta_T/C_T^2$$

Στη διεπιφάνεια δύο υλικών, υπάρχουν δύο κρίσιμες γωνίες πρόσπτωσης του κύματος, οι οποίες είναι αυτές που εξαφανίζουν το διαθλώμενο διάμηκες και το διαθλώμενο εγκάρσιο κύμα αντίστοιχα.

2.5. Σκέδαση - περίθλαση - συμβολή ηχητικών κυμάτων

Τα τρία φαινόμενα που μπορεί να υποστεί ένα κύμα, όταν κατά την διαδρομή του συναντήσει κάποιο εμπόδιο είναι η σκέδαση, η περίθλαση και η συμβολή.

- Εάν 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.
- Εάν $d = \lambda$, 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 εξασθένηση του. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται σκέδαση.
- Εάν $d > \lambda$ (και όχι $d \gg \lambda$), τότε το ηχητικό κύμα παρακάμπτει το εμπόδιο και διαδίδεται μέσα στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται περίθλαση.
- Στην περίπτωση που το εξ' ανακλάσεως ηχητικό κύμα υπερτίθεται στο αρχικό, έχουμε **το φαινόμενο της συμβολής** δύο κυμάτων. Αναλόγως με την διαφορά φάσης και συχνότητας των δύο κυμάτων, μπορούμε να έχουμε ενίσχυση ή εξασθένηση του τελικού κύματος.

2.6. Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων στα στερεά σώματα

Τα στερεά σώματα σε γενικές γραμμές εμφανίζουν αρκετά μεγάλη απόσβεση, η οποία οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους: στην απορρόφηση και στην διασπορά.

➤ Η **απορρόφηση** είναι η μετατροπή του υπερήχου σε θερμότητα και οφείλεται στην εσωτερική τριβή κλπ. Έχει αποδειχθεί πως σε ταλαντώσεις υψηλής συχνότητας η απώλεια ενέργειας και κατ' επέκταση η απόσβεση είναι μεγαλύτερη από ότι σε ταλαντώσεις χαμηλότερης συχνότητας.

➤ Η **διασπορά**, οφείλεται στην ανομοιογένεια και στην ανισοτροπία κάποιων υλικών, όταν αυτά περιέχουν εγκλείσματα, κόκκους ή πόρους. Η διασπορά λαμβάνει χώρα όταν το μήκος κύματος του υπερήχου πλησιάζει το μέγεθος ενός κόκκου ή ενός πόρου μέσα στο υλικό διάδοσης. Ουσιαστικά πρόκειται για μια ακανόνιστη

ανάκλαση και διάθλαση των κυμάτων, που οδηγεί στην εξασθένηση του αρχικού ήχου.

Και η απορρόφηση και η διασπορά, δυσχεραίνουν το έργο ενός υπερηχητικού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, χρειάζεται προσοχή κατά την επιλογή της καταλληλότερης δυνατής συχνότητας του υπερηχητικού κύματος κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας υπερηχητικού Μη-καταστροφικού ελέγχου. Μια ατέλεια μπορεί να ανιχνευθεί όταν το μέγεθος της είναι μεγαλύτερο ή ίσο προς το $1/5$ του μήκους κύματος λ του υπερηχητικού κύματος.

Τρεις βασικές κατηγορίες υλικών υπάρχουν, όσον αφορά το κατά πόσον αποσβένουν ένα υπερηχητικό κύμα.

Υλικά με **χαμηλή απόσβεση**, μικρότερη των 10 dB/m. Πρόκειται για τον χάλυβα και τα χαμηλά κράματα του, τον σφυρήλατο σίδηρο, το γυαλί, την πορσελάνη κα.

Υλικά με **μέση απόσβεση** μέχρι 100 dB/m, όπως τα υψηλά κράματα χάλυβα, ο χυτοσίδηρος, ο ορείχαλκος, ο μόλυβδος κα.

Υλικά με **υψηλή απόσβεση**, πάνω από 100 dB/m. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα πλαστικά, το λάστιχο, το σκυρόδεμα, το ξύλο κλπ. Αυτά τα υλικά είναι και τα πλέον δύσκολα για να εξεταστούν. Συνήθως χρησιμοποιούμε πολύ λεπτά δοκίμια αυτών των υλικών, έτσι ώστε η συνολική απόσβεση να είναι περιορισμένη και να μπορούμε να προβούμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

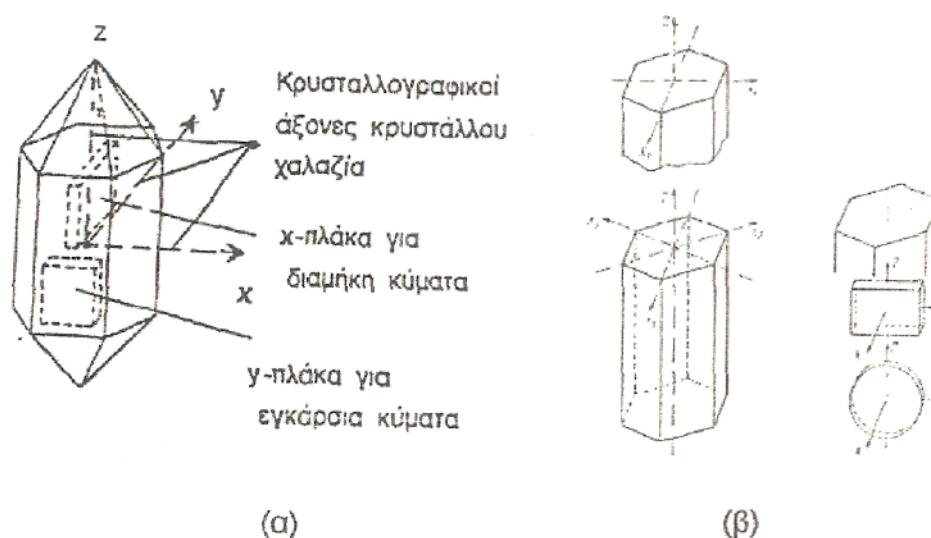
2.7. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φαινόμενο στο οποίο στηρίζουν τη λειτουργία τους οι κεφαλές παραγωγής υπερήχων είναι το *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*, το οποίο ανακαλύφθηκε από τα αδέρφια Pierre και Jacques Curie στα τέλη του 19ου αιώνα. Βασίζεται στην ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων, κατά την οποία όταν καταπονούνται εμφανίζουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία στις απέναντι επιφάνειές τους. Τα ηλεκτρικά αυτά φορτία αλλάζουν πρόσημο με τη συχνότητα που αλλάζει φορά η καταπόνηση.

Ισχύει όμως και το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος που διεγείρεται από ηλεκτρικό δυναμικό παραμορφώνεται ανάλογα με τη φορά του ηλεκτρικού δυναμικού.

Οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται για τον υπερηχητικό έλεγχο των υλικών μπορούν να είναι είτε μόνο πομποί υπερηχητικών κυμάτων, είτε μόνο δέκτες, είτε ταυτόχρονα και πομποί και δέκτες. Στην πρώτη περίπτωση, οι κεφαλές χρησιμοποιούν το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στη δεύτερη το ορθό και στην τρίτη ταυτόχρονα και το ορθό και το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.

Οι κρύσταλλοι που εμφανίζουν μία τέτοια συμπεριφορά και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι κυρίως από χαλαζία (SiO_2). Ο φυσικός αυτός κρύσταλλος έχει τη μορφή εξαγωνικού πρίσματος και διαθέτει τρεις πολικούς άξονες, τους X_1 , X_2 , X_3 , κάθε ένας από τους οποίους περνά από δύο απέναντι κορυφές της εξαγωνικής εγκάρσιας διατομής τους. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εμφανίζεται μόνο σε πλάκες που είναι κομμένες κάθετα προς τους άξονες X ή Y . Για το λόγο αυτό, η πιεζοηλεκτρική πλάκα που είναι κομμένη κατά τον άξονα X , ονομάζεται x -πλάκα ενώ αυτή που είναι κομμένη κατά τον άξονα Y ονομάζεται y -πλάκα.



Εικόνα 2-4 α) Ο κρύσταλλος του χαλαζία και β) τα πλακίδια x και y

Άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά που βρίσκουν εφαρμογή είναι το τιτανικό βάριο (BaTiO_3), το τιτανικό ζirkόνιο (PZT), ο μετανιοβικός μόλυβδος (PbNb_2O_6), το θειικό λίθιο (Li_2SO_4) και άλλα. Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά, όπως το άλας του Seignette ή Rochelle.

Μία άλλη κατηγορία υλικών που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο εφαρμογή είναι τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, τα οποία είναι πολυκρυσταλλικά σιδηροηλεκτρικά υλικά με κρυσταλλική δομή, που προσεγγίζει το κυβικό σύστημα. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι μπορούν να κατασκευαστούν πιεζοηλεκτρικοί δίσκοι μεγάλων διαστάσεων, που συνεπάγεται παραγωγή υπερήχων χαμηλών συχνοτήτων, κάτι πολύ σημαντικό στη μελέτη υλικών με μεγάλη απόσβεση όπως σκυρόδεμα, μάρμαρο κ.

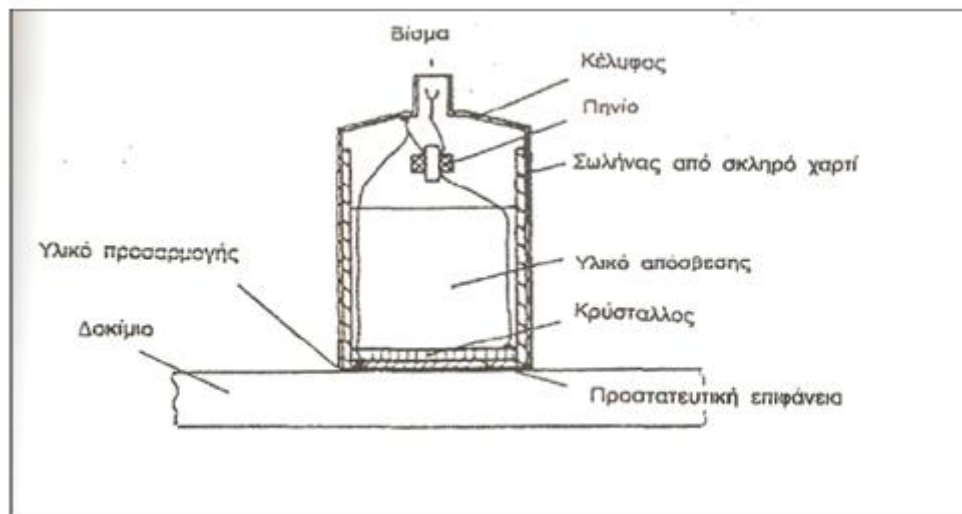
2.8. Πιεζοηλεκτρικές υπερηχητικές κεφαλές

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο τρόπος παραγωγής υπερήχων από τις υπερηχητικές κεφαλές βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Όλες οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο, περιέχουν έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο χαλαζία.

Η αναγκαιότητα μελέτης των υλικών επέβαλε τη δημιουργία μιας γκάμας κεφαλών, που περιλαμβάνει κεφαλές καθέτου δέσμης, κεφαλές πλαγίας δέσμης, εμβαπτιζόμενες κεφαλές, κεφαλές διπλού κρυστάλλου και κεφαλές ειδικού τύπου. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες μπορεί να περιλαμβάνει κεφαλές που είναι είτε πομποί, είτε δέκτες, είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

2.8.1. Κεφαλές καθέτου δέσμης

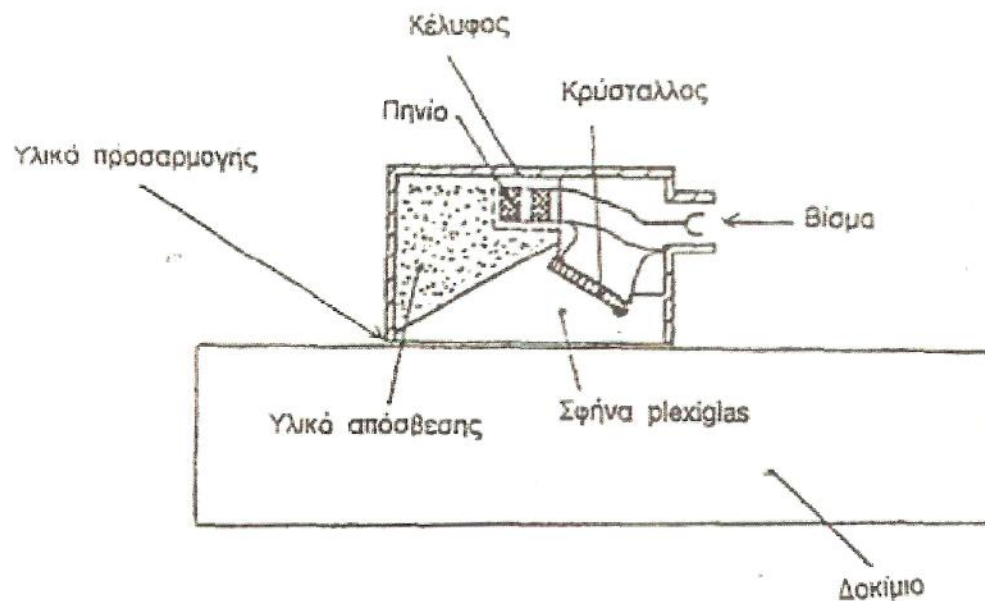
Οι κεφαλές καθέτου δέσμης εφαρμόζονται στην περίπτωση που επιθυμούμε να προβούμε στην παχυμέτρηση κάποιου υλικού, να εντοπίσουμε ατέλειες της δομής του ή να προσδιορίσουμε τις ελαστικές σταθερές και την απόσβεση του αρκεί να είναι επίπεδη η κάτω επιφάνειά του.



Εικόνα 2- 5 Λεπτομέρειες κεφαλής καθέτου δέσμης

2.8.2. Κεφαλές πλάγιας δέσμης

Σε περιπτώσεις, όπου είναι αδύνατη η χρήση της κεφαλής καθέτου δέσμης, χρησιμοποιούνται κεφαλές πλάγιας δέσμης. Για παράδειγμα, όταν θέλουμε να μελετήσουμε κάποια συγκόλληση, όπου μας ενδιαφέρει τι συμβαίνει στο εσωτερικό της (χοροί, εγκλείσματα, ρωγμές κτλ), δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κεφαλή καθέτου δέσμης διότι αφενός δεν θα υπάρχει καλή επαφή ανάμεσα στην κεφαλή και στην τραχιά αφάνεια της συγκόλλησης, κάτι που εμποδίζει την διείσδυση του υπερήχου στο υλικό και αφετέρου η κάτω επιφάνεια της συγκόλλησης που θα ανακλαστεί ο υπέρηχος είναι κεκλιμένη, οπότε και δεν θα έχουμε σήμα επιστροφής. Σε αυτή την περίπτωση βρίσκουν εφαρμογή οι κεφαλές πλάγιας δέσμης, όπου τοποθετούνται στην επιφάνεια του κυρίως υλικού και στέλνοντας τον υπέρηχο υπό γωνία μπορούμε να λάβουμε τη σημαντική πληροφορία για την κατάσταση της συγκόλλησης. Επίσης, μπορούμε να ανιχνεύσουμε ατέλειες κεκλιμένες ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου.



Εικόνα 2-6 Κεφαλή πλάγιας δέσμης

2.8.3. Εμβαπτιζόμενες κεφαλές

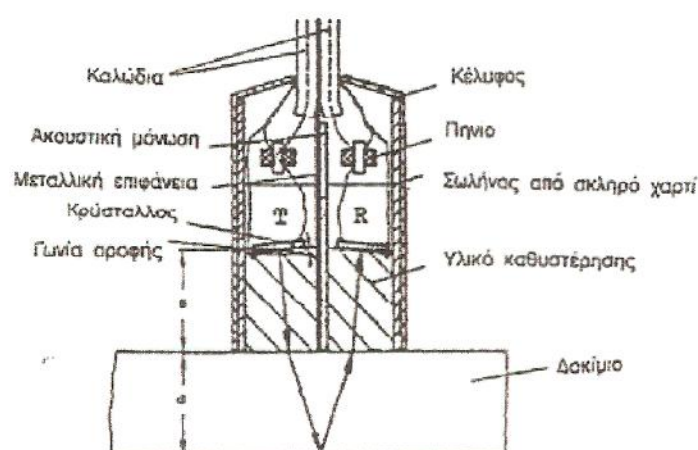
Οι εμβαπτιζόμενες κεφαλές είναι μία ειδική κατηγορία υπερηχητικών κεφαλών και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου, όπως η σάρωση σημείου προς σημείο (C-Scan). Επειδή η λειτουργία των εμβαπτιζόμενων κεφαλών προϋποθέτει την παρουσία κάποιου ρευστού που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην κεφαλή και στο δοκίμιο, παράγονται μόνο διαμήκη κύματα καθώς τα υγρά δεν μπορούν να μεταδώσουν εγκάρσια κύματα.

Όπως παρατηρούμε, η δομή των δύο κεφαλών είναι παρόμοια. Οι δύο επιφάνειες του κρυστάλλου είναι επιμεταλλωμένες για την εφαρμογή των ηλεκτρικών ταλαντώσεων. Στη μία πλευρά είναι προσαρμοσμένο το υλικό απόσβεσης, ενώ η άλλη είτε είναι ελεύθερη και προσαρμόζεται απ' ευθείας στο δοκίμιο, είτε προστατεύεται από μία στρώση πλαστικού ή κεραμικού. Οι αγωγοί

περνούν από το υλικό απόσβεσης και μέσω ενός πηνίου καταλήγουν στο βύσμα της κεφαλής.

2.8.4. Κεφαλές διπλού κρυστάλλου

Οι κεφαλές διπλού κρυστάλλου που παρουσιάζονται στα σχήματα έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν εμφανίζουν νεκρή ζώνη (περιοχή του υλικού για το οποίο δεν μπορούμε να πάρουμε καμία πληροφορία) και επομένως προσφέρονται για τον έλεγχο λεπτών δοκιμίων ή για την ανίχνευση ατελειών που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια των υλικών. Η γωνία που σχηματίζουν οι δύο κρύσταλλοι ονομάζεται *γωνία οροφής* και είναι το μέγεθός της καθορίζει το μέγεθος της νεκρής ζώνης και την ευαισθησία. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία, τόσο μικρότερη θα είναι η νεκρή ζώνη, αλλά μικρή θα είναι και η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας.



Εικόνα 2-7 Λεπτομέρειες κεφαλής διπλού κρυστάλλου

2.8.5. Κεφαλές ειδικού τύπου

Πέραν των παραπάνω κεφαλών, υπάρχουν επίσης και κεφαλές ειδικού τύπου, που χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τέτοιες είναι οι κεφαλές για δοκίμια υψηλών θερμοκρασιών που περιέχουν μια επαφή από κεραμικό υλικό, οι εστιαζόμενες κεφαλές που κατασκευάζονται με ορισμένη καμπυλότητα, οι κεφαλές που ελέγχουν δοκίμια πολύ μεγάλης απόσβεσης καθώς και οι κεφαλές που αποσκοπούν στον έλεγχο σωλήνων, σιδηροτροχιών ή ακόμα και ανθρώπων.

2.9. Μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου

2.9.1. Γενικά

Ο υπερηχητικός έλεγχος των υλικών βασίζεται στον τρόπο που τα ηχητικά κύματα επηρεάζονται κατά την διέλευσή τους από ένα δοκίμιο που ελέγχεται. Τα ηχητικά κύματα υφίστανται αισθητές αλλαγές, από τις οποίες μπορούμε να εκτιμήσουμε την κατάσταση ή τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού. Η παρεμπόδιση του ηχητικού κύματος μπορεί να προέλθει είτε από ενδιάμεσες επιφάνειες του δοκιμίου, είτε από την απορρόφηση του ήχου, λόγω της ανάπτυξης εσωτερικών τριβών. Βάσει των παραπάνω λοιπόν, έχουν αναπτυχθεί τρεις βασικές μέθοδοι υπερηχητικού ελέγχου: η μέθοδος της διελεύσεως, η μέθοδος του συντονισμού και η μέθοδος της παλμοχούς.

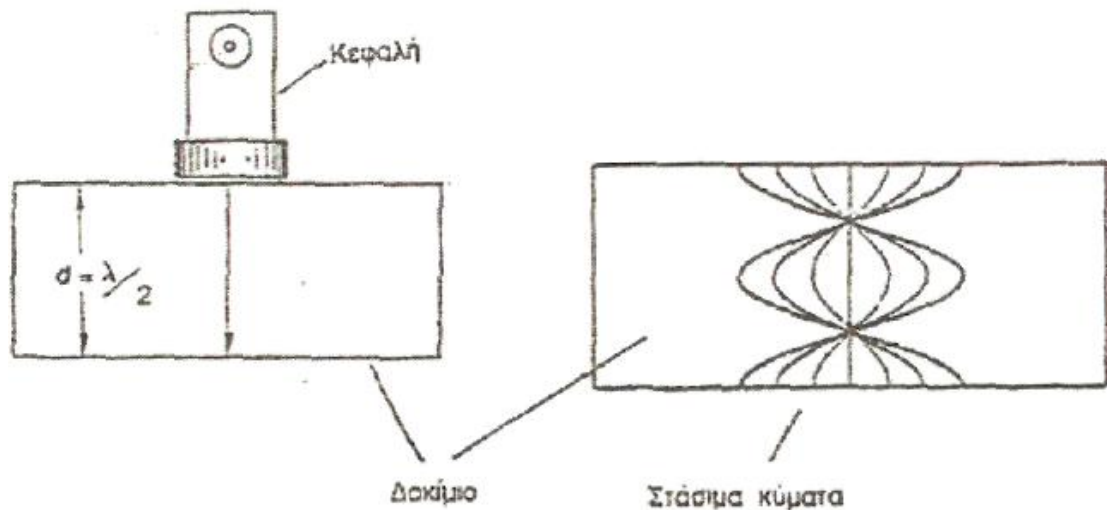
2.9.2. Η μέθοδος της διέλευσης

Πρόκειται για μέθοδο που απαιτεί την χρήση δύο διαφορετικών κεφαλών. Η μία κεφαλή που λειτουργεί σαν πομπός τοποθετείται στη μία πλευρά του υλικού, ενώ η άλλη που λειτουργεί ως δέκτης, τοποθετείται στην απέναντι επιφάνεια. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση που το εξεταζόμενο υλικό έχει τις δύο απέναντι επιφάνειες του επίπεδες και παράλληλες. Επίσης, πρέπει οι ατέλειες να έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από το μήκος κύματος για να γίνουν αντιληπτές. Από τη σύγκριση της έντασης του ήχου που διέρχεται από μία περιοχή του υλικού που δεν έχει ατέλειες με την αντίστοιχη μίας περιοχής που έχει ατέλειες, μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Με τη μέθοδο αυτή παίρνουμε πληροφορίες μόνο για την ύπαρξη ατελειών και όχι για το μέγεθός τους, το βάθος στο οποίο βρίσκονται ή τον προσανατολισμό τους. Εφαρμόζεται ευρέως σε λεπτές πλάκες.

2.9.3. Η μέθοδος του συντονισμού

Κατά την μέθοδο του συντονισμού, ένα συνεχές υπερηχητικό κύμα που διοχετεύεται σε μία επίπεδη πλάκα με επίπεδες επιφάνειες, μπορεί να διεγείρει σε ταλάντωση την πλάκα με την φυσική της συχνότητα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει η πλάκα να είναι σε θέση να πάλλεται ελεύθερα και στις δύο επιφάνειές της. Αυτό συμβαίνει όταν και στις δύο πλευρές της πλάκας υπάρχει υλικό με χαμηλή ακουστική αντίσταση. Έχει αποδειχθεί ότι ο συντονισμός μπορεί να περιγραφεί ως ένα στάσιμο κύμα, κατά το οποίο υπάρχουν κάποια μέρη του υλικού που παραμένουν συνεχώς ακίνητα. Η συχνότητα του προσπίπτοντος υπερηχητικού κύματος μεταβάλλεται μέχρι την στιγμή που εμφανίζεται μία ταλάντωση συντονισμού στην πλάκα. Σε αυτή την περίπτωση 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 $d = C / 2Df$. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του πάχους και των ελαστικών σταθερών ενός υλικού. Όμως, δεν προσφέρεται για την ανίχνευση ατελειών.



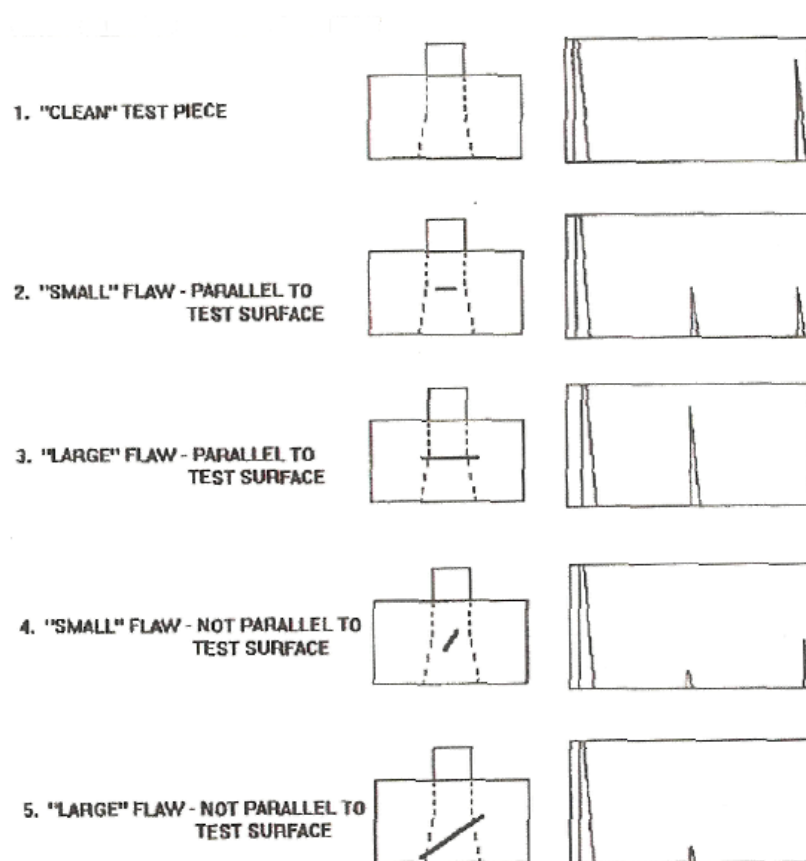
Εικόνα 2-8 Η μέθοδος του συντονισμού

2.9.4. Η μέθοδος της παλμοχούς

Είναι η πλέον διαδεδομένη σήμερα μέθοδος υπερηχητικού. Με αυτήν υπολογίζεται το ύψος της ηχούς που χαρακτηρίζει το μέγεθος του ανακλαστήρα (εμποδίου) καθώς και ο χρόνος διέλευσης του παλμού, που προδίδει το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ανακλαστήρας. Εάν το εμβαδόν του ανακλαστήρα είναι μικρότερο του εμβαδού της ηχητικής δέσμης, τότε ένα μέρος της δέσμης ανακλάται στο εμπόδιο και το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του μέχρι να ανακλαστεί από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Η πρώτη ανάκλαση θα μας δώσει έναν παλμό που

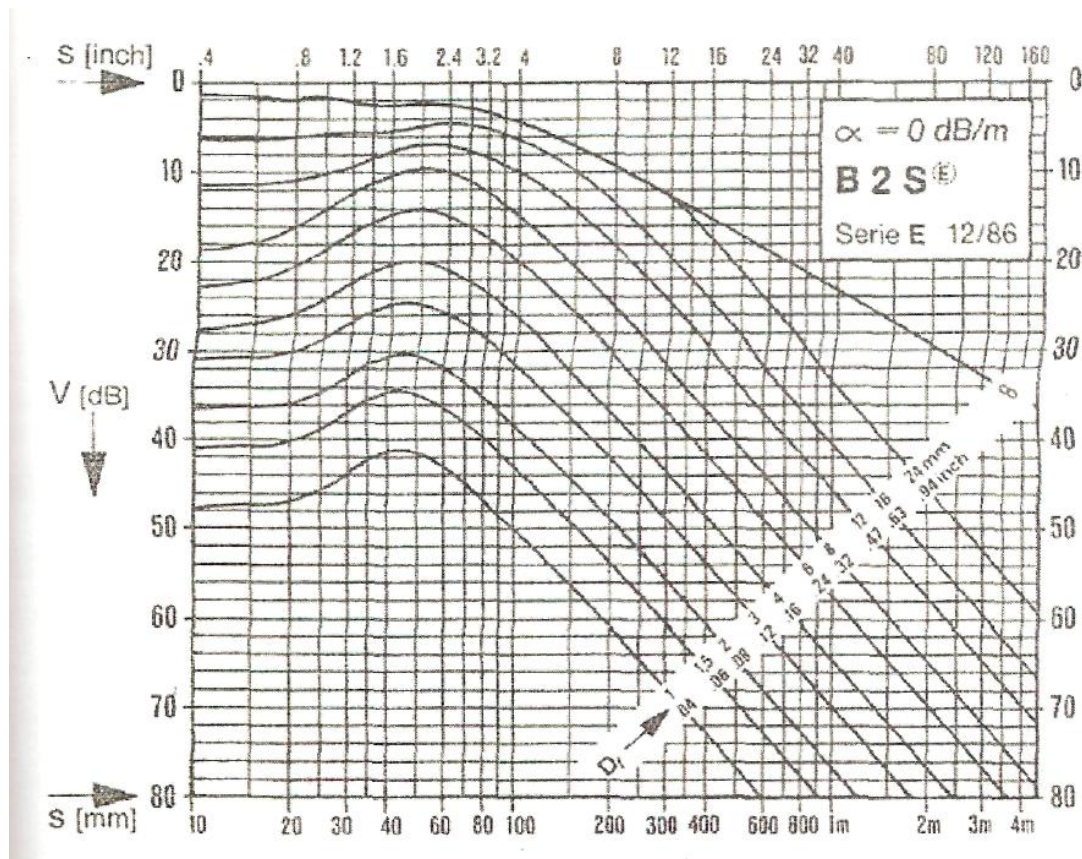
αντιστοιχεί στην θέση της ατέλειας, ενώ η ανάκλαση της κάτω επιφάνειας θα δώσει έναν παλμό που θα αντιστοιχεί στο πάχος του δοκιμίου. Γνωρίζοντας το χρόνο διέλευσης t , μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόσταση a της ατέλειας από την πάνω επιφάνεια μέσω της σχέσης: $a = Ct / 2$.

SINGLE ELEMENT STRAIGHT BEAM TEST



Εικόνα 2-9 Απεικόνιση των διαφόρων ελαττωμάτων με την μέθοδο της παλμοχούς

Για την μέθοδο της παλμοηγούς, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι με τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος μιας ατέλειας που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός υλικού. Έχοντας ως αποτελέσματα των μετρήσεων το βάθος της ατέλειας και την πτώση του ύψους του παλμού που αυτή επιφέρει, με την χρήση των λεγόμενων διαγραμμάτων DGS μπορούμε να προσδιορίσουμε προσεγγιστικά το μέγεθος της ατέλειας. Ένα διάγραμμα DGS αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη κεφαλή. Ακολουθεί ένα παράδειγμα στην παρακάτω φωτογραφία.



2.10. Περιοχές εφαρμογής της μη-καταστροφικής μεθόδου των υπερήχων

2.10.1 Εύρεση ελαστικών σταθερών

Ο πρωταρχικός σκοπός των δοκιμών με υπερήχους ήταν η ανίχνευση ατελειών και ο προσδιορισμός του μεγέθους και της θέσης, τους μέσα στο υλικό. Όμως με την εξέλιξη της μεθόδου και τον προσδιορισμό σχέσεων που εκφράζουν την εξάρτηση της συμπεριφοράς των ηχητικών κυμάτων από τις ιδιότητες των υλικών, αναπτύχθηκαν μέθοδοι υπερήχων για τη μη καταστροφική μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών, όπως και τον προσδιορισμό ορισμένων από τις μηχανικές ιδιότητές τους.

Οι κυριότερες εφαρμογές, που βρίσκει η μη καταστροφική μέθοδος των υπερήχων συνοψίζονται όπως φαίνεται παρακάτω:

1. Προσδιορισμός του πάχους υλικών. Με τη χρήση υπερήχων γνωστής ταχύτητας και τον προσδιορισμό του χρόνου που απαιτείται για την απλή ή με επιστροφή διέλευση του ηχητικού αυτού κύματος προσδιορίζεται σε κατάλληλα βαθμονομημένη οθόνη, ή ψηφιακό μετρητή, το άγνωστο πάχος.

2. Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών. Στην περίπτωση αυτή προσδιορίζεται η ταχύτητα των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων που διαδίδονται μέσα από ένα στερεό πυκνότητας ρ , και από τις σχέσεις (1), (2) και (3) υπολογίζονται οι ελαστικές σταθερές E , ν , G του υλικού.

$$\nu = \frac{1/2(c_l/c_t)^2 - 1}{(c_l/c_t)^2 - 1} = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2c_l^2 - 2c_t^2} \quad (1)$$

$$E = \rho c_t^2 \frac{3c_l^2 - 4c_t^2}{c_l^2 - c_t^2} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_l^2 = 1(1+\nu) \rho c_t^2 \quad (2)$$

$$G = \rho c_t^2 \quad (3)$$

3. Προσδιορισμός των τάσεων. Προσδιορίζεται η ταχύτητα των εγκάρσιων και διαμηκών κυμάτων κατά την ελαστική παραμόρφωση των υλικών και με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται οι τάσεις.

4. Εξέταση της δομής (structure examination) των υλικών. Είναι μια σπουδαία εφαρμογή της μεθόδου των υπερήχων, που στηρίζεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ήχου επηρεάζεται από τα διάφορα συστατικά του υλικού, αλλά και την ολκιμότητά του, τη σκληρότητά του όπως και τις μηχανικές του ιδιότητες.

5. Προσδιορισμός της ψαθυρότητας των υλικών. Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της ψαθυρότητας ενός υλικού χωρίς να απαιτείται η θραύση του. Η μέθοδος αυτή του μη καταστροφικού προσδιορισμού ονομάζεται διεθνώς *nil – ductility – transition temperature (NDT temperature)*. Είναι μέθοδος ταχεία και χαμηλού κόστους.

6. Προσδιορισμός της σκληρότητας. Η μέθοδος των υπερήχων εφαρμόζεται και για τον προσδιορισμό της σκληρότητας κατά Vickers. Η σκληρομέτρηση αυτή διεξάγεται με την εφαρμογή πολύ μικρών φορτίων τα οποία δημιουργούν αντίστοιχα πολύ μικρές ουλές χωρίς να απαιτείται λείανση της ελεγχόμενης επιφάνειας. Οι ενδείξεις της σκληρότητας λαμβάνονται απ' ευθείας με τη βοήθεια κατάλληλου μετρητή, χωρίς να είναι απαραίτητο να μετρηθούν οι διαστάσεις των ουλών με οπτικές διατάξεις όπως γίνεται στις συμβατικές σκληρομετρήσεις κατά Vickers. Με τη μέθοδο αυτή ο αδαμάντινος διεισδυτής προσαρμόζεται στην άκρη μιας ράβδου, η οποία διεγείρεται σε ταλάντωση με μια αρχική συχνότητα. Η ταλάντωση της ράβδου επιτυγχάνεται με βάση το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Καθώς ο διεισδυτής προχωράει στο ελεγχόμενο υλικό η συχνότητα της ταλάντωσης μεταβάλλεται. Το μέγεθος της διείσδυσης και η μεταβολή της συχνότητας εξαρτώνται από τη σκληρότητα του ελεγχόμενου υλικού. Έτσι μετρώντας τη συχνότητα ταλάντωσης της ράβδου προσδιορίζουμε την επιφανειακή σκληρότητα. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με κατάλληλο μετατροπέα, ώστε με την κίνηση ενός διακόπτη η σκληρότητα Vickers να μετατρέπεται σε σκληρότητα Rockwell.

Τα πλεονεκτήματα του προσδιορισμού της σκληρότητας με τη μέθοδο των υπερήχων (Ultrasonic Contact Impedance –USI), έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται μια εύχρηστη ελαφριά φορητή συσκευή, οι ενδείξεις της οποίας δίνουν αμέσως σε μια ψηφιακή οθόνη τη σκληρότητα Vickers ή Rockwell. Επίσης η μέθοδος προσφέρεται για πολύ μικρές επιφάνειες και για όλα τα είδη των μετάλλων.

7. Μη συμβατική κατεργασία υλικών (mechanical NTM process) με υπερήχους. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, κατάλληλη συσκευή που χρησιμοποιεί εργαλείο κατασκευασμένο συνήθως από μαλακό μέταλλο, που πάλλεται με υπερηχητική ταχύτητα, μπορεί με κατάλληλη διαδικασία να επεξεργάζεται (κόβει) οποιοδήποτε υλικό και ιδιαίτερα υλικό με σκληρότητα μεγαλύτερη από $HR_c = 40$.

8. Η μέθοδος των υπερήχων χρησιμοποιείται επίσης: α) στη βιομηχανία, για τη συγκόλληση των μετάλλων ή και πλαστικών, όπως σωλήνων από PVC, στον έλεγχο των συγκολλήσεων, τη λειτουργία και τον έλεγχο της λειτουργίας ολικά ή μερικά αυτοματοποιημένων μηχανών, τη μέτρηση του πάχους επικαλύψεων, την κατασκευή νομισμάτων κλπ. β) Στην κτηνοτροφία, για τον έλεγχο της ανάπτυξης των ζώων και τον καθορισμό της κατάλληλης διατροφής τους, και γ) χρησιμοποιείται ευρύτατα στην ιατρική επιστήμη.

2.10.2.Ανίχνευση ατελειών

Ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών (ultrasonic flaw detector), είναι συνήθως μια ηλεκτρονική συσκευή με μεγάλη σχετικά οθόνη η οποία μπορεί να παράγει τα υπερηχητικά ελαστικά κύματα, όπως επίσης να επεξεργάζεται τα επιστρέφοντα σήματα, από τα οποία προκύπτουν οι διάφορες πληροφορίες σχετικά με τις ατέλειες ή τα χαρακτηριστικά του υλικού. Η συσκευή αυτή, είναι κατάλληλη για ένα μεγάλο αριθμό χρήσεων. Αποτελείται δε, από το ηλεκτρονικό μέρος που περιλαμβάνει μια γεννήτρια συχνοτήτων, τον καθοδικό σωλήνα στην οθόνη του οποίου λαμβάνονται οι διάφοροι υπερηχητικοί παλμοί και τις κεφαλές (probes).

Με τη συσκευή αυτή παράγονται υψίσυχνα ρεύματα τα οποία διαβιβαζόμενα στις κεφαλές, μετατρέπονται σε υπερηχητικά ελαστικά κύματα, ίδιας συχνότητας, με τη βοήθεια πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, ενώ ταυτόχρονα τόσο τα εκπεμπόμενα σήματα όσο και τα επιστρέφοντα, εμφανίζονται στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα. Με κατάλληλη βαθμονόμηση της συσκευής και ανάλυση των λαμβανομένων παλμών στην οθόνη, παίρνουμε πληροφορίες για το μέγεθος των ατελειών, τη θέση τους μέσα στο υλικό, τα γεωμετρικά στοιχεία του υλικού (π.χ. το πάχος), ή ακόμη μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ελαστικές και ακουστικές σταθερές του υλικού. Τα βασικότερα

χαρακτηριστικά στοιχεία μιας τέτοιας συσκευής είναι, η περιοχή συχνοτήτων λειτουργίας της, η μέγιστη ενίσχυση, τα γεωμετρικά της στοιχεία και το βάρος της.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τέτοιων συσκευών. Το Ε.Α.Υ. του Ε.Μ.Π. διαθέτει δύο συσκευές υπερήχων κατασκευής της εταιρείας Krautkramer – Bronson Γερμανίας. Η μια είναι η USIP-11 και η άλλη USL-33. Θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή τους.

2.10.3. Παχυμέτρηση

Στον ποιοτικό και γενικότερα σε κάθε έλεγχο των υλικών, μια από τις βασικότερες μετρήσεις είναι ο έλεγχος των γεωμετρικών τους στοιχείων και ιδιαίτερα η μέτρηση του πάχους τους. Ο κλασικός τρόπος διεξαγωγής αυτών των μετρήσεων είναι να γίνονται με τη χρήση ειδικών μηχανικών παχυμέτρων και μικρομέτρων. Προϋπόθεση όμως για κάθε είδους μέτρηση γεωμετρικού στοιχείου ενός υλικού, είναι να είναι δυνατή η πρόσβαση και από τις δυο πλευρές του.

Τούτο είναι απλό σε ορισμένες περιπτώσεις, π.χ. σε περιπτώσεις εργαστηριακών δοκιμών. Είναι όμως πολύ δύσκολο και δαπανηρό σε άλλες περιπτώσεις όπως στον έλεγχο επιφανειών και κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως π.χ. σε λαμαρίνες, σωλήνες, λέβητες, δεξαμενές, πλοία κ.λ.π. Για τον έλεγχο π.χ. του πάχους πλοίων με μηχανικά παχύμετρα, πρέπει πρώτα το πλοίο αφού τεθεί εκτός λειτουργίας, να βγει σε δεξαμενή, να ανοιχθούν τρύπες στα σημεία της επιφάνειάς του όπου θα ελεγχθεί το πάχος, για να περάσει το παχύμετρο, και στη συνέχεια να κλείσουν αυτές οι τρύπες με ηλεκτροσυγκόλληση. Είναι προφανές το μεγάλο κόστος, όπως και η επίδραση στη στερεότητα της κατασκευής, αφού μια τέτοια επέμβαση θα δημιουργήσει πολλά ελαττώματα στην κατασκευή και θα απαιτήσει αρκετό χρόνο. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και για τις παχυμετρήσεις άλλων κατασκευών, όπως π.χ. εκείνες που προαναφέρθηκαν.

Όλες αυτές οι δυσκολίες αντιμετωπίζονται με τη χρήση του υπερηχητικού παχυμέτρου, μιας σύγχρονης συσκευής προηγμένης τεχνολογίας, που μας παρέχει τη δυνατότητα της εύκολης, ταχείας και με υψηλή ακρίβεια μέτρησης

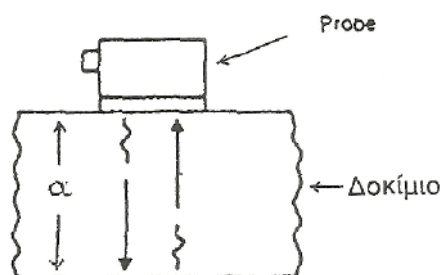
των γεωμετρικών στοιχείων των υλικών και ιδιαίτερα του πάχους τους. Ακόμα επειδή το χρησιμοποιούμενο αισθητήριο (κεφαλή υπερήχων) τοποθετείται από τη μια πλευρά της ελεγχόμενης επιφάνειας, όπως θα δούμε παρακάτω, οι παχυμετρήσεις μπορούν να γίνονται και όταν η κατασκευή βρίσκεται σε λειτουργία χωρίς να ανοίγονται τρύπες ή να κόβονται δοκίμια απ' αυτήν.

Η μέτρηση του πάχους των υλικών με τη μη καταστροφική μέθοδο των υπερήχων, μπορεί να γίνει με τη βοήθεια διαφόρων συσκευών όπως π.χ. με ένα απλό υπερηχητικό ανιχνευτή ατελειών, ή καλύτερα με ειδικές υπερηχητικές συσκευές όπως είναι το γνωστό υπερηχητικό ψηφιακό παχύμετρο που θα περιγραφεί εν συντομία παρακάτω.

Το υπερηχητικό παχύμετρο είναι μια ηλεκτρονική συσκευή μικρών διαστάσεων και βάρους, που 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.

Αρχή λειτουργίας υπερηχητικού παχυμέτρου

Συνήθως η λειτουργία του υπερηχητικού παχυμέτρου στηρίζεται στη χρήση υπερήχων και ιδιαίτερα της τεχνικής της παλμοηχούς, παρόμοιας εκείνης του ηχοσκοπίου (sonar), εικόνα 2-11 .



Εικόνα 2-11 Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του υπερηχητικού παχυμέτρου.

Η υπερηχητική κεφαλή (πομπός) εκπέμπει υπερηχητικό παλμό μικρής διάρκειας, ο οποίος διοχετεύεται στο δοκίμιο με το οποίο βρίσκεται σε επαφή στη μια πλευρά του. Όταν ο παλμός φτάσει στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου, ανακλάται και γυρίζει πίσω, όπου συλλαμβάνεται από τον πομπό, ο οποίος λειτουργεί τώρα ως δέκτης.

Ο χρόνος διέλευσης t του υπερηχητικού σήματος από τη στιγμή της εισόδου μέχρι την έξοδό του από το δοκίμιο, διαιρούμενος δια δύο και πολλαπλασιαζόμενος επί την ταχύτητα c του ήχου (σ' αυτό το υλικό) μας καθορίζει το ζητούμενο πάχος του δοκιμίου, από την επόμενη σχέση που είναι:

$$\alpha = \frac{tc}{2} \quad (4)$$

Για να γίνει αυτή η μέτρηση, πρέπει να είναι γνωστή η ταχύτητα του ήχου c στο ελεγχόμενο υλικό. Τότε ο χρόνος t διέλευσης μετρείται από το παχύμετρο και από τη σχέση (4) προσδιορίζεται εύκολα το πάχος α . Τα χρησιμοποιούμενα υπερηχητικά παχύμετρα είναι συνήθως ψηφιακά και εκτελούν αυτόματα αυτή τη διαδικασία, αφού προηγουμένως έχουμε εισαγάγει σ' αυτά την ταχύτητα του ήχου στο υλικό, παρέχοντας στην ψηφιακή οθόνη τους την ένδειξη του πάχους.

Η ταχύτητα του ήχου για κάθε υλικό δίδεται από ειδικούς πίνακες. Εάν όμως η ταχύτητα του ήχου στο ελεγχόμενο υλικό, είναι άγνωστη μπορούμε με το ίδιο όργανο να την προσδιορίσουμε χρησιμοποιώντας ένα σημείο του υλικού στο οποίο να μπορούμε να μετρήσουμε με μηχανικό παχύμετρο το ακριβές του πάχος. Στη συνέχεια τοποθετούμε στο σημείο την κεφαλή υπερήχων του παχυμέτρου και με κατάλληλη ρύθμιση αφού προηγουμένως εισαγάγουμε το προσδιορισθέν πάχος, παίρνουμε στην οθόνη του παχυμέτρου την τιμή της άγνωστης ταχύτητας.

Συνήθως το υπερηχητικό παχύμετρο λειτουργεί με διαμήκη κύματα και προσφέρεται για οποιοδήποτε υλικό μέταλλο, πολυμερές, μάρμαρο, σκυρόδεμα, σύνθετο υλικό, γυαλί, κεραμικό υλικό κ.ά. Ανάλογα με την απόσβεση όμως του ελεγχόμενου υλικού, πρέπει να τοποθετείται και η κατάλληλη κεφαλή. Το μεγάλο πλεονέκτημα του υπερηχητικού παχυμέτρου (εκτός της μεγάλης ακρίβειας και της μεγάλης ταχύτητας στο πείραμα). είναι ότι τοποθετείται μόνο από τη μια πλευρά του δοκιμίου και γι' αυτό το λόγο προσφέρεται για παχυμετρήσεις μεγάλων επιφανειών, όπως είναι οι λέβητες, οι δεξαμενές, οι σωλήνες, τα πλοία και άλλες κατασκευές.

2.10.4 Σκληρομέτρηση

Για να γίνει ο προσδιορισμός της σκληρότητας των υλικών με κλασσικές μεθόδους, όπως είναι η Brinell, η Vickers, η Rockwell κ.α. όπως είναι γνωστό απαιτούνται εκτός από τα κατάλληλα σκληρόμετρα και ειδικά δοκίμια. Οι συσκευές αυτές είναι βαρείες κατασκευές, μόνιμα εγκατεστημένες στο εργαστήριο. Ενώ, τα δοκίμια είναι κομμάτια που κόβονται από την κατασκευή και τα οποία αφού υποστούν προηγουμένως κατάλληλη επεξεργασία ελέγχονται στο σκληρόμετρο. Κατά τον έλεγχο για τον προσδιορισμό της σκληρότητας, με μια από τις παραπάνω μεθόδους ένας διεισδυτής χαλύβδινος ή κατασκευασμένος από διαμάντι, κατάλληλου σχήματος, συμπιέζεται με κατάλληλο μεταβλητό, ανάλογα με τη μέθοδο και το υλικό, φορτίο. Με αυτή τη διαδικασία σχηματίζεται μια μόνιμη ουλή στο ελεγχόμενο υλικό, τα γεωμετρικά στοιχεία της οποίας μετρούμενα στη συνέχεια καταλλήλως, συνήθως με τη βοήθεια μιας ενσωματωμένης στο σκληρόμετρο οπτικής διάταξης, μέσω κάποιων μαθηματικών τύπων μας παρέχουν την αντίστοιχη σκληρότητα του υλικού.

Απ' όλα αυτά προκύπτει, ότι ο προσδιορισμός της σκληρότητας με τα μηχανικά σκληρόμετρα, είναι μια χρονοβόρος και ταυτόχρονα δαπανηρή εργασία, που απαιτεί ειδικά δοκίμια και συσκευές και μεγάλη προσοχή για να είναι ακριβής και τα αποτελέσματα αξιόπιστα.

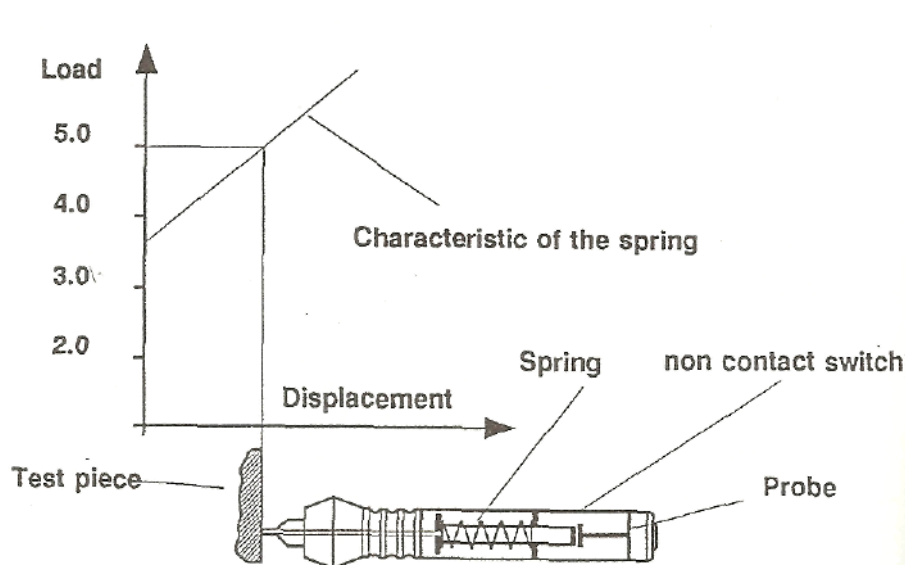
Όλες αυτές οι δυσκολίες εξουδετερώνονται εάν η σκληρομέτρηση γίνει με τη βοήθεια του υπερηχητικού σκληρόμετρου. Το υπερηχητικό σκληρόμετρο είναι μια ηλεκτρονική συσκευή προηγμένης τεχνολογίας, που η λειτουργία της στηρίζεται στη μέθοδο σκληρομέτρησης κατά Vickers, χρησιμοποιώντας όμως υπερηχητικά κύματα.

Η υπερηχητική μέθοδος σκληρομέτρησης όπως και ένας τύπος υπερηχητικού σκληρόμετρου με το οποίο είναι εφοδιασμένο το Ε.Α.Υ. του Ε.Μ.Π. περιγράφεται παρακάτω.

Αρχή λειτουργίας υπερηχητικού σκληρόμετρου

Η βασική διαφορά στον τρόπο της υπερηχητικής μέτρησης της σκληρότητας από τις συμβατικές μεθόδους σκληρομέτρησης, είναι η τεχνική Ultra Sonic Contact Impedance (UCI), η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διείσδυσης του διεισδυτή και κατ' επέκταση της τιμής της σκληρότητας.

Στο υπερηχητικό σκληρόμετρο ο διεισδυτής τύπου Vickers είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός κυλινδρικού μεταλλικού στελέχους, το οποίο ταλαντώνεται ημιτονοειδώς από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, στη συχνότητα των 78 KHz, σχήμα 2.12. Καθώς ο διεισδυτής πιέζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου, ένα ειδικά διαμορφωμένο ελατήριο εφαρμόζει μια συνεχώς αυξανόμενη δύναμη. Όταν η δύναμη αυτή φτάσει την προκαθορισμένη τιμή των 5 Kgr, χαρακτηριστικό φορτίο της σκληρομέτρησης, η συχνότητα ταλάντωσης του στελέχους μεταβάλλεται. Αυτή η μεταβολή της συχνότητας είναι ανάλογη με την επιφάνεια της διείσδυσης και η οποία κατ' επέκταση προσδιορίζει την τιμή της σκληρότητας.



Εικόνα 2-12

Η τιμή της σκληρότητας διαβάζεται άμεσα στην ψηφιακή οθόνη του σκληρόμετρου στην κλίμακα Vickers, αλλά εύκολα μετατρέπεται και στις άλλες κλίμακες Brinell και Rockwell A, B, C, F, σύμφωνα με το DIN 50150 ή ASTM – E – 140.

Κεφάλαιο 3

Ελαστικές Σταθερές – Σκληρότητα

Οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών είναι βασικής σημασίας για την επιστήμη και την τεχνολογία. Από την μέτρησή τους παίρνουμε πληροφορίες που αφορούν τις δυνάμεις που ενεργούν μεταξύ των ατόμων ή των ιόντων τα οποία αποτελούν ένα στερεό, πληροφορίες που είναι βασικής σημασίας για την ερμηνεία και την κατανόηση της φύσης του στερεού.

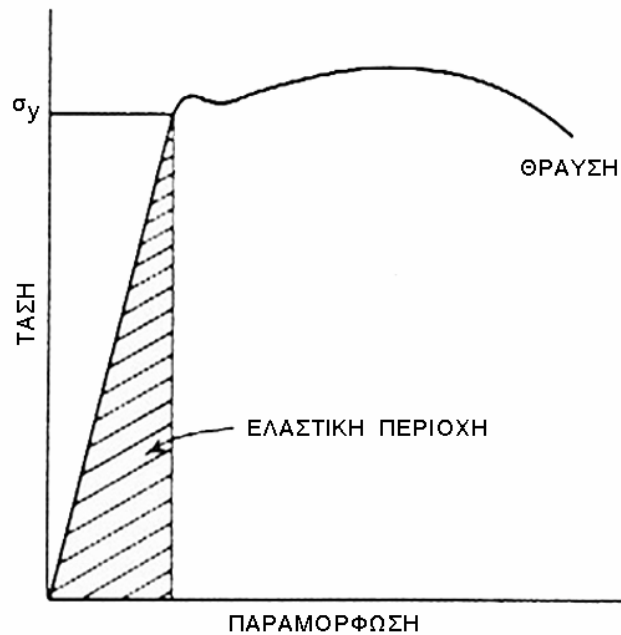
Επειδή οι ελαστικές ιδιότητες περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών, η μελέτη τους είναι σημαντική σε περιπτώσεις μηχανολογικού σχεδιασμού. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτεί τη γνώση της μηχανικής του συμπεριφοράς.

Όταν σε ένα υλικό επιδρούν εξωτερικές δυνάμεις, τότε αυτό παραμορφώνεται. Δηλαδή, εάν εφαρμόσουμε σε αυτό εξωτερικές δυνάμεις, μπορούμε να μεταβάλλουμε το σχήμα και το μέγεθος του. Μολονότι οι παραμορφώσεις αυτές είναι μακροσκοπικές, οι εσωτερικές δυνάμεις που αντιδρούν στην παραμόρφωση οφείλονται στις δυνάμεις των ατόμων.

Για την μελέτη των ελαστικών ιδιοτήτων των στερεών χρησιμοποιούνται οι έννοιες τις τάσης και της παραμόρφωσης. Η τάση είναι ποσότητα ανάλογη προς την δύναμη στην οποία οφείλεται η παραμόρφωση, είναι η εξωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας διατομής.

Παραμόρφωση είναι το μέτρο της μεταβολής του αρχικού σχήματος και μεγέθους. Γνωρίζουμε πειραματικά ότι για μικρές τάσεις, η τάση είναι ανάλογη προς την παραμόρφωση.

Ελαστικές είναι οι ιδιότητες αυτές που διέπουν τη συμπεριφορά ενός υλικού που υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις μέσα σε ένα πεδίο τάσης όπου το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Ο τρόπος με τον οποίο ένα υλικό παραμορφώνεται σε ένα πεδίο εφαρμοσμένης τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.:

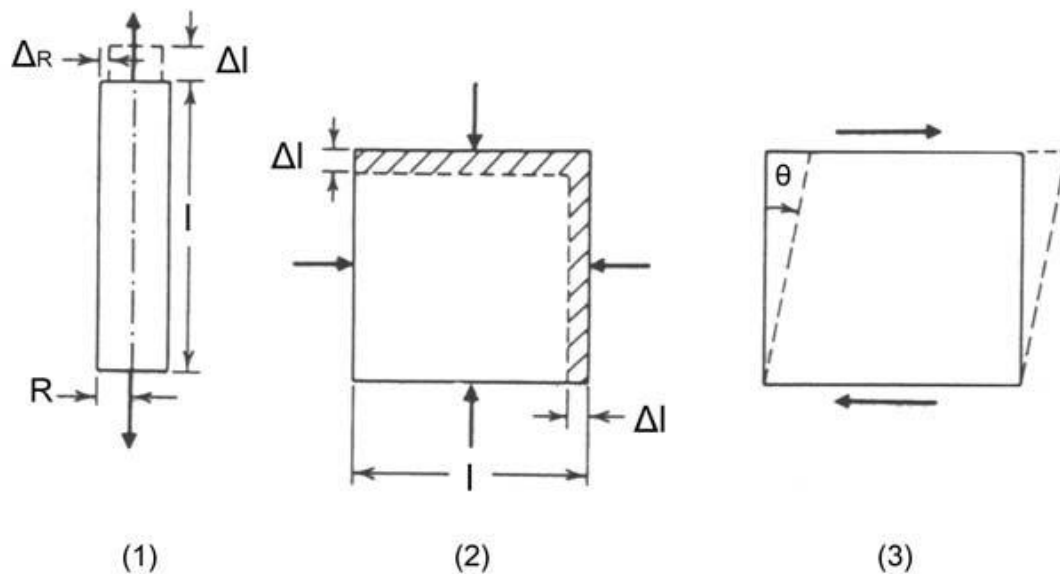


Σχήμα 3-1 Τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.

Παρατηρούμε ότι στο πεδίο φόρτισης μέχρι το σημείο όπου η τάση έχει την τιμή σ_y , η τάση ανταποκρίνεται γραμμικά. Αν η εφαρμοζόμενη εξωτερική δύναμη μειωθεί, η τάση ελαττώνεται αντιστρεπτά και σύμφωνα με τη μετακίνηση της εξωτερικής δύναμης, η τάση φτάνει στο 0. Σε ένα αρκετά υψηλό βαθμό φόρτισης (πάνω από το σημείο σ_y), η τάση δεν παραμένει γραμμική, και η μετακίνηση ή ελάττωση της δύναμης δεν ακολουθείται στην αντιστρεπτή τάση. Προκύπτει μια μόνιμη παραμόρφωση. Το υλικό συμπεριφέρεται πλαστικά. Επιπλέον η αύξηση της εφαρμοζόμενης δύναμης στο υλικό δημιουργεί πρόσθετη πλαστική παραμόρφωση που οδηγεί τελικά στη θραύση.

Η συμπεριφορά είναι τυπική για τα περισσότερα στερεά εκτός αυτών που είναι ιδιαίτερα ασταθή και που σπάνε στο πεδίο της ελαστικής συμπεριφοράς. Η σταθερά της αναλογίας, εξαρτάται από το υλικό που παραμορφώνεται και από την φύση της παραμόρφωσης.

Στο σχήμα 3.2. δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα ελαστικής παραμόρφωσης κάτω από διάφορους τύπους εφαρμοζόμενης εξωτερικής δύναμης:



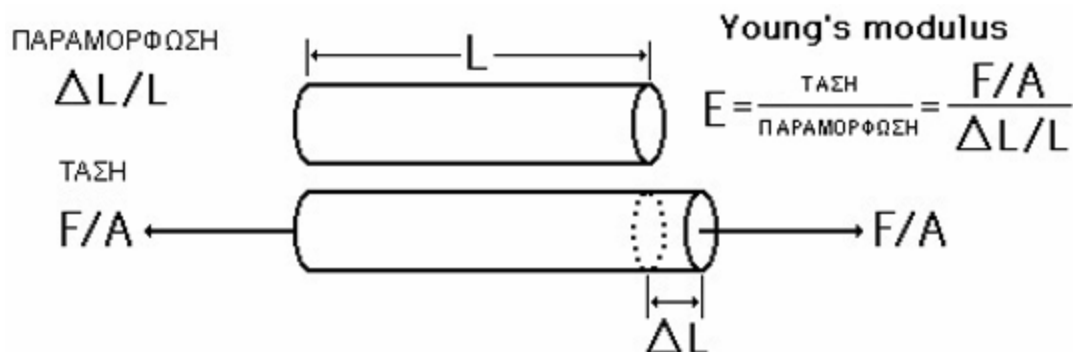
Σχήμα 3-2 Παραδείγματα ελαστικής παραμόρφωσης κάτω από διάφορους τύπους εφαρμοζόμενης εξωτερικής δύναμης : (1) μονοαξονική φόρτιση, (2) υδροστατική πίεση, (3) διάτμηση

3.1. Μέτρο Ελαστικότητας (E) και λόγος του Poisson (ν)

Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young (E) είναι μεταξύ των πιο στοιχειωδών μεγεθών όσον αφορά την αντοχή ενός υλικού. Σε μηχανολογικές εφαρμογές, τα υλικά χρησιμοποιούνται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας να είναι μια πολύ σημαντική σχεδιαστική παράμετρος, διότι σχετίζει μια μονοαξονική φόρτιση με την εφελκυστική τάση. Η σταθερά αυτή εκφράζει δηλαδή το μέτρο της αντίστασης του υλικού σε καθαρό εφελκυσμό. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του E τόσο μικρότερη είναι η εφελκυστική παραμόρφωση ϵ_x για μια εφελκυστική τάση σ_x . Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται με απλά λόγια, ως το μέτρο της αντίστασης στην έλξη κατά μήκος του άξονα μιας λεπτής ράβδου ή βέργας.

Μια ράβδος υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση (ελαστική στο παράδειγμα του σχ. 3.3.) και ως αποτέλεσμα τεντώνεται. Η απορρέουσα τάση δηλώνεται μέσω μιας επιμήκυνσης στη διεύθυνση της εφαρμοσμένης δύναμης και μια μείωση στη διάμετρο της ράβδου. Η διαφορά μήκους διαιρούμενη από το αρχικό μήκος είναι η

παραμόρφωση, και η αναλογία της τάσης με την παραμόρφωση μας δίνει το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus):



Σχήμα 3-3 Ελαστική παραμόρφωση ράβδου διατομής A στην οποία ασκείται μονοαξονική φόρτιση F . Η τιμή της απορρέουσας τάσης λόγω της δύναμης F είναι F/A και η τιμή της παραμόρφωσης είναι $\Delta L/L$. Το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση.

Ένας άλλος τρόπος για να υπολογίσουμε το μέτρο ελαστικότητας είναι προσδιορίζοντας την κλίση του ελαστικού τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του σχήματος 3.1.

Επιπλέον στην επιμήκυνση κατά την διεύθυνση της αξονικά εφαρμοσμένης δύναμης, η ράβδος στενεύει. Αυτή η διαφορά μεγέθους σε μια κατεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση της εφαρμοσμένης δύναμης, οφείλεται στην αλληλεπίδραση των συνιστωσών τάσεων που παράγονται μέσα στο υλικό ως αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης δύναμης.

Χρειάζεται ένα πρόσθετο ελαστικό όριο για να περιγραφεί αυτή η συμπεριφορά. Το ελαστικό όριο αυτό είναι ο λόγος του Poisson (ν), ο οποίος ορίζεται ως το μέτρο της παραμόρφωσης ενός υλικού κατά την εγκάρσια διεύθυνση όταν κατά την διαμήκη διεύθυνση υφίσταται μια δεδομένη παραμόρφωση. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του ν , τόσο πιο μεγάλη είναι και η εγκάρσια παραμόρφωση e_y ή e_z για μια δεδομένη διαμήκης παραμόρφωση e_x . Για αυτό το λόγο το ν ονομάζεται και μέτρο εγκάρσιας παραμόρφωσης.

Πολλά τεχνολογικά προβλήματα αντιμετωπίζονται συχνά επαρκώς μόνο με τη γνώση του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson. Αυτά όμως είναι χρήσιμα,

μόνο αν το υλικό είναι ομογενές και ισότροπο. Για το λόγο αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία κυρίως σε επιστημονικούς κλάδους των μηχανικών, αφού εκεί τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ή μπορούν θεωρητικά να χαρακτηριστούν ως ομογενή και ισότροπα.

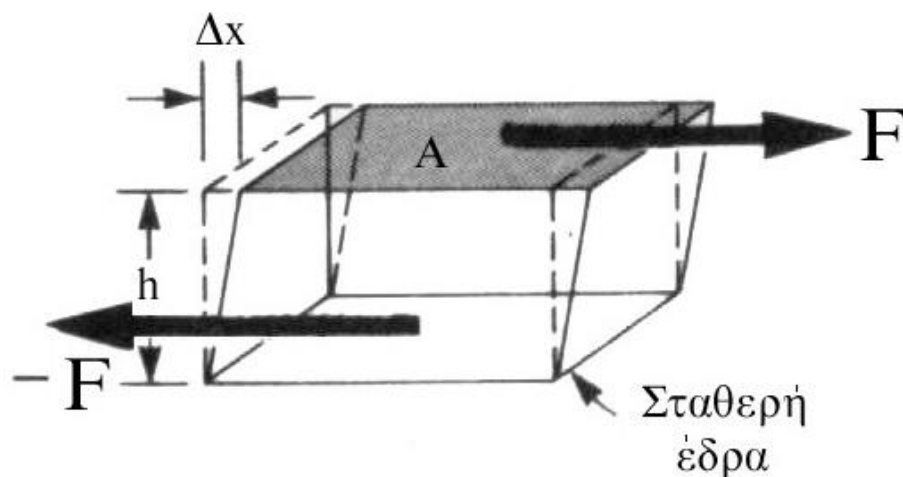
3.2. Μέτρο διάτμησης (G)

Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν) δεν είναι εύκολος ακόμη και για ισότροπα υλικά. Ενώ στην εφαρμοσμένη τεχνολογία τα ελαστικά όρια προκύπτουν ως εμπειρικές σταθερές στον νόμο του Hooke σε μεγάλα σώματα, είναι πολύ μεγαλύτερης επιστημονικής σημασίας η μαθηματική τους σχέση ως δεύτερη παράγωγος της ελαστικής ενέργειας σε σχέση με την τάση.

Για ισότροπα υλικά δύο ακόμη ελαστικές σταθερές ορίζονται ως αποτέλεσμα της καταπόνησης του υλικού κάτω από δυο διαφορετικές καταστάσεις εξωτερικής φόρτισης. Αυτές είναι το μέτρο ελαστικότητας όγκου ή μέτρο συμπίεσεως (Bulk Modulus - B), όπου οι τάσεις κάθετες στις κατευθύνσεις της φόρτισης είναι ίσες (π.χ. η περίπτωση αντίδρασης στην υδροστατική πίεση) το οποίο μας δίνει το μέτρο της μεταβολής του όγκου ενός απειροελάχιστου στοιχείου το οποίο υπόκειται σε υδροστατική πίεση και εκφράζει την αντίσταση που προβάλλει το υλικό στην μεταβολή του όγκου του.

Ένα αντικείμενο που υφίσταται τέτοια παραμόρφωση μεταβάλλεται ως προς το μέγεθος (δηλαδή σε όγκο), αλλά όχι ως προς το σχήμα.

Ένα είδος παραμόρφωσης ορίζεται όταν εφαρμόσουμε δύναμη στην εφαπτομενική διεύθυνση μιας έδρας ή επιφάνειας του σώματος, ενώ διατηρούμε την απέναντι έδρα σταθερή, χρησιμοποιώντας την δύναμη της τριβής:



Σχήμα 3-4 Ελαστική παραμόρφωση παραλληλόγραμμου σώματος στο οποίο ασκείται δύναμη F στην εφαπτομενική διεύθυνση της επάνω έδρας του (εμβαδού A) ενώ η κάτω έδρα του διατηρείται σταθερή.

Κατά την παραμόρφωση αυτή δεν μεταβάλλεται ο όγκος. Η διατμητική τάση ισούται με F/A . Ορίζεται έτσι το μέτρο διάτμησης ή μέτρο ακαμψίας σε διάτμηση (Shear Modulus - G), όπου οι κάθετες τάσεις στις κατευθύνσεις της εφαρμοζόμενης δύναμης είναι παντού μηδέν (καθαρή διάτμηση) και επομένως εκφράζει το μέτρο αντίστασης του υλικού σε καθαρή διάτμηση. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο διάτμησης (G), τόσο μικρότερη είναι η διατμητική παραμόρφωση (γ_{xy}) για μια δοσμένη διατμητική τάση (τ_{xy}).

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους τα μέτρα ελαστικότητας όγκου (B) και διάτμησης (G) προτιμούνται των μέτρων ελαστικότητας (E) και του λόγου Poisson (ν). Ένας από τους πιο σημαντικούς λόγους είναι ότι το μέτρο ελαστικότητας όγκου παρουσιάζει τον καλύτερο συνδετικό κρίκο μεταξύ θερμοδυναμικής και ελαστικής θεωρίας, όπου αναπτυσσόμενο στις βάσεις ατομιστικών αντιλήψεων όπως οι δυνάμεις πλέγματος - κρυσταλλικής δομής, σχετίζεται με τη συμπεριφορά σε μικροσκοπική κλίμακα.

Στην θερμοδυναμική, οι μεταβλητές είναι συνήθως πίεση, θερμοκρασία και όγκος. Σε πολλές σχέσεις η θερμοδυναμική θεώρηση του μέτρου ελαστικότητας του όγκου σε σταθερή θερμοκρασία είναι:

$$B = -V \left(\frac{dP}{dV} \right)_T$$

η οποία συνδέει τις μεταβλητές της πίεσης (P) και όγκου (V) σε σταθερή θερμοκρασία (T).

Στην περίπτωση δε που έχουμε καθαρή διάτμηση, η παραμόρφωση δεν αφορά καμία αλλαγή στον όγκο του σώματος, παρά μόνο αλλαγή του σχήματός του. Υπάρχουν φυσικά και άλλοι σημαντικοί λόγοι για τη θεώρηση του μέτρου διάτμησης και του μέτρου ελαστικότητας όγκου ως θεμελιώδους σημασίας, εφόσον η συμπεριφορά του μέτρου ελαστικότητας όγκου είναι αρκετά διαφορετική από αυτή του μέτρου διάτμησης. Σε άκαμπτα υλικά, οι τιμές των μέτρων διόγκωσης και διάτμησης είναι υψηλές, δεδομένου ότι σε εύκαμπτα υλικά η τιμή του μέτρου ελαστικότητας όγκου παραμένει υψηλή και η τιμή του μέτρου διάτμησης μειώνεται αξιοσημείωτα. Η θερμοκρασία έχει μια σημαντική επίδραση στο μέτρο διάτμησης αλλά μια αρκετά μικρότερη επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας όγκου. Επίσης στο σημείο τήξης η τιμή του πρώτου πηγαίνει στο μηδέν, ενώ η τιμή του δεύτερου μπορεί να επηρεαστεί μόνο ελαφρά. Επιπλέον η εφαρμογή πολύ υψηλών πιέσεων επιδρά στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας όγκου. Δηλαδή πάνω από κάποιο επίπεδο τιμής της εφαρμοζόμενης δύναμης, το σώμα δεν είναι πια ελαστικό, αλλά αρχίζει να ρέει. Από την άλλη μεριά, κάτω από μια καθαρή διάτμηση, ένα σώμα παραμένει ελαστικό ακόμα και σε υπερβολικά μεγάλες τιμές εφαρμοζόμενης δύναμης.

3.3. Σκληρότητα

Εμπειρικά διακρίνουμε τα υλικά σε σκληρά και μαλακά. Για παράδειγμα το διαμάντι είναι σκληρό υλικό, ενώ η κιμωλία χαρακτηρίζεται ως μαλακό. Ο εμπειρικός όμως χαρακτηρισμός των υλικών όσον αφορά στη σκληρότητά τους δεν ικανοποιεί επιστημονικά. Γι' αυτό έχει θεμελιωθεί ο παρακάτω ορισμός για τη σκληρότητα των υλικών.

Σκληρότητα ονομάζεται η ιδιότητα των υλικών να αντιστέκονται στη διείσδυση άλλων σκληρότερων σωμάτων σ' αυτά.

Πρώτος ο Hertz για την εκτίμηση αυτής της αντιστάσεως χρησιμοποίησε το μέτρο της ορθής τάσεως στην επιφάνεια επαφής των σωμάτων. Έτσι κατά τον Hertz σκληρότητα είναι η ορθή τάση που αναπτύσσεται στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας επαφής δύο συνθλιμμένων σφαιρών τη στιγμή που αρχίζει να εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση. Ευνόητο είναι ότι η πρακτική εφαρμογή του ορισμού αυτού είναι αδύνατη.

Η δοκιμή της σκληρομέτρησης είναι μεγάλης σπουδαιότητας, γιατί εκτός από τον προσδιορισμό της σκληρότητας, παρέχει και μια μη καταστροφική ταχεία προσεγγιστική μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό ενός υλικού.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι σκληρομέτρησης, που παρέχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού της σκληρότητας σε οποιοδήποτε υλικό, όλκιμο ή ψαθυρό, μέταλλο ή αμέταλλο. Οι μέθοδοι αυτές αντιστοιχούν και σε ανάλογους ορισμούς της σκληρότητας όπως:

Σκληρότητα είναι η αντίσταση που παρουσιάζει ένα υλικό στη διείσδυση ενός κατάλληλα διαμορφωμένου σκληρότερου σώματος (διεισδυτής) ή στη χάραξη του με αιχμηρό εργαλείο.

Επίσης ως σκληρότητα ορίζεται, σύμφωνα με μια άλλη μέθοδο σκληρομέτρησης, το ύψος αναπήδησης κατάλληλης μάζας όταν προσπέσει από ορισμένο ύψος στην επιφάνεια του ελεγχόμενου υλικού.

Όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας λοιπόν χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο διεισδυτή, από διαμάντι ή χάλυβα υψηλής αντοχής, ο οποίος κατά τη σκληρομέτρηση παραμορφώνεται ελαστικά, ενώ δημιουργεί στο ελεγχόμενο υλικό πλαστικές τοπικές παραμορφώσεις.

Η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από τη φύση του, τη συνοχή του, όπως και από τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματός του. Η Χημεία και η Μεταλλουργία ασχολούνται με τη δομή της ύλης του υλικού και το ρόλο τους στη σκληρότητα.

Η σκληρότητα, ιδιαίτερα για τα μέταλλα, μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για:

1. Να ελέγξουμε την ποιότητα της θερμικής κατεργασίας των μετάλλων.
2. Το αν μπορούμε να διαμορφώσουμε τα υλικά σε τóρνους χρησιμοποιώντας κατάλληλα κοπτικά εργαλεία.
3. Να ξέρουμε την ταχύτητα επεξεργασίας των μετάλλων στις εργαλειομηχανές.
4. Να ξέρουμε την περιοχή των θερμοκρασιών εργασίας των εργαλείων.
5. Να συγκρίνουμε όμοια υλικά όσον αφορά τη σύνθεση και αντοχή τους.

6. Να καθορίζουμε την ποιότητα των συγκολλήσεων.

7. Να προσδιορίζουμε την αντοχή τους σε εφελκυσμό.

Επειδή τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο, κάθε ένδειξη της σκληρότητας πρέπει να συνοδεύεται και από τα χαρακτηριστικά της δοκιμής.

Σχετική με την έννοια της σκληρότητας είναι και η έννοια της κατεργασιμότητας (machinability) των μετάλλων. Όσο σκληρότερο είναι ένα υλικό τόσο δυσκολότερα κατεργάζεται.

Για κάθε τεχνικό είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της συμπεριφοράς, κατά τη λειτουργία, των εξαρτημάτων που έχουν ελεγχθεί με σκληρομέτρηση.

Οι διάφορες μέθοδοι σκληρομέτρησης χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

α. Τις μεθόδους **στατικής** δοκιμής της σκληρότητας.

β. Τις μεθόδους **δυναμικής** δοκιμής της σκληρότητας.

γ. Τη μέτρηση της σκληρότητας μ' **εγχάραξη**.

Οι σημαντικότερες από τις δοκιμές αυτές είναι οι πρώτες και ιδιαίτερα η μέθοδος του σταθερού φορτίου, που βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στον προσδιορισμό της σκληρότητας των μετάλλων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι μετρήσεως της σκληρότητας **Brinell**, **Vickers** και **Rockwell**, γι' αυτό και θα ασχοληθούμε στη συνέχεια λεπτομερέστερα μ' αυτές.

Ως μέτρο σκληρότητας στις δοκιμές αυτές, παίρνεται είτε το βάθος διείσδυσης του διεισδυτή, είτε η εφαρμοζόμενη τάση στην επιφάνεια της σχηματιζόμενης ουλής.

Διαφορετικές μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα, γιατί μετρούν διαφορετικές ποσότητες με διαφορετικούς διεισδυτές και με διαφορετικό τρόπο. Δεν υπάρχει απόλυτη κλίμακα για τη σκληρότητα. Κάθε τύπος δοκιμής έχει τη δική του κλίμακα προσδιορισμού της σκληρότητας.

Για την ακριβή διεξαγωγή μιας σκληρομέτρησης είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες για κάθε περίπτωση μηχανές σκληρομέτρησης και να εξασφαλίζεται η κατάλληλη στήριξη, με ειδικές βάσεις στηρίξεως, των δοκιμίων κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Τούτο είναι αναγκαίο γιατί οποιαδήποτε μετακίνηση του δοκιμίου κατά τη διαδικασία της φόρτισης και στη συνέχεια της μέτρησης του βάθους της ουλής, θα επηρεάσει την πλαστική παραμόρφωση ή το μέγεθος της μετρούμενης ποσότητας αντίστοιχα. Έτσι είναι δυνατό να εισαχθούν σημαντικά σφάλματα στον προσδιορισμό της σκληρότητας.

Ο τρόπος στήριξης κάθε δοκιμίου στη μηχανή σκληρομέτρησης καθορίζεται κυρίως από τη γεωμετρία και το μέγεθος του δοκιμίου.

Στις προδιαγραφές (DIN 51200) αναφέρονται διάφοροι τρόποι στήριξης δοκιμίων, όπως και οι αντίστοιχες διατάξεις για τη στήριξη δοκιμίων οποιασδήποτε γεωμετρίας και για τις μηχανές προσδιορισμού της σκληρότητας με τις μεθόδους Brinell, Vickers και Rockwell.

Κεφάλαιο 4

Ραδιογραφικές Μέθοδοι

4.1. Ακτίνες X (X-rays) και Ακτίνες Γάμα (Gamma rays)

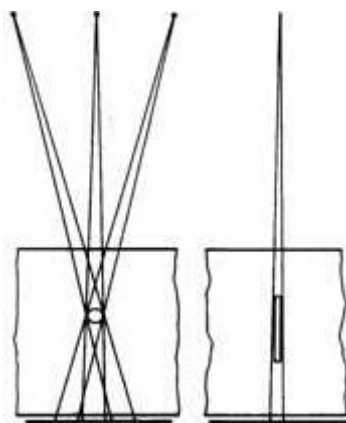
Από την ανακάλυψή τους το 1895 μέχρι σήμερα, οι ακτίνες-X χρησιμοποιούνται για τον ΜΚΕ ανθρώπων και υλικών. Οι ακτίνες-X έχουν τέτοιο μήκος κύματος που τους επιτρέπει να διαπερνούν όλα τα υλικά με κάποιο ποσοστό απορρόφησης που εξαρτάται από το υλικό. Το μήκος κύματος ποικίλει από τα 10nm (Grenz ή «απαλές» ακτίνες-X) έως τα 10⁻⁴nm («σκληρές» ακτίνες-X) που μπορούν να διαπεράσουν ακόμη και ατσάλι πάχους μισού μέτρου!

Οι ακτίνες-Γάμα εκπέμπονται από ραδιενεργές πηγές σε παρόμοια μήκη κύματος, είναι και αυτές ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις ακτίνες-X και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική ραδιογραφία.

Οι ακτίνες-X και Γάμα ταξιδεύουν πάντα σε ευθείες γραμμές και δεν εστιάζονται γι' αυτό και η διάταξη λειτουργίας είναι πάντοτε: πηγή-εξεταζόμενο δείγμα-ραδιογραφική πλάκα.

Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι ότι η πηγή της ακτινοβολίας αν και μικρή δεν είναι σημειακή. Το αποτέλεσμα είναι μια ελαφρά θολή εικόνα στα όρια των ελαττωμάτων και ιδιαίτερα αυτών που είναι μικρότερα σε μέγεθος από την πηγή. Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί συχνά να βελτιωθεί με την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων.

Οι ραδιογραφικές μέθοδοι, όπως και όλες οι αποτυπώσεις σε φιλμ, αποτελούν την 2-διάστατη προβολή 3-διάστατων αντικειμένων. Αυτό σημαίνει ότι το σχήμα που προκύπτει εξαρτάται από τη κατεύθυνση των ακτινών και την θέση του ελαττώματος στο υλικό. Για να μπορέσουμε να έχουμε δεδομένα σχετικά με τη 3η διάσταση απαιτούνται δυο αποτυπώσεις από διαφορετική γωνία για να δημιουργηθεί μια στερεοσκοπική εικόνα του υλικού.



Εικόνα 4-1 : Απλή (2-διάστατη) προβολή σε ραδιογραφία.

Όταν μελετάμε την παρουσία ατελειών σε ένα υλικό η μεγαλύτερη «ποιότητα» ή «ευαισθησία» μιας ραδιογραφικής μεθόδου σημαίνει την ικανότητα της να διακρίνει μια μικρότερων διαστάσεων ατέλεια.

Για να μετρηθεί αυτή η ικανότητα της μεθόδου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι δείκτες που είναι σύρματα ή ελάσματα, διαφορετικού πάχους και διαμέτρου, με συγκεκριμένη βαθμονόμηση και τυποποίηση. Η ραδιογραφίες αυτών των δεικτών μας δείχνει απ' ευθείας την ικανότητα κάθε μεθόδου ή συσκευής.



Εικόνα 4-2 : Δείκτες μέτρησης της ευαισθησίας των Ραδιογραφικών μεθόδων.

4.2.Οι Ιονίζουσες Ακτινοβολίες

Οι ακτίνες-X δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι ακτίνες-Γάμα προέρχονται από τον πυρήνα ραδιενεργών

στοιχείων. Και οι δυο ακτινοβολίες ταξιδεύουν με ταχύτητα φωτός, σε ευθείες γραμμές και είναι αόρατες.

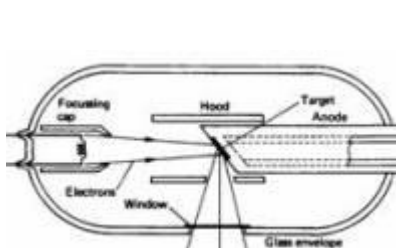
Οι ηλεκτρομαγνητικές αυτές ακτινοβολίες δεν είναι συνεχείς (θεωρία Planck) αλλά εκπέμπονται σε μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα (quanta). Η ενέργεια ενός quantum μετριέται σε eV (electron-Volts). Η ενέργεια των ακτίνων-X και των ακτίνων-Γάμα εξαρτάται από το μήκος κύματος και αναφέρεται σε keV και MeV.

Σήμερα συνυπάρχουν ακόμα το παλαιό με το μετρικό σύστημα μονάδων. Με το παλαιότερο σύστημα η ποσότητα ή «έκθεση» σε ακτινοβολία μετριέται σε Roentgens ή mR, η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το rad, και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το rem. Στο μετρικό σύστημα η «έκθεση» σε ακτινοβολία σαν ενέργεια που είναι μετριέται σε Coulomb/kg ($1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$), η μονάδα «αποροφούμενης δόσης» είναι το gray ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$), και η μονάδα «ισοδύναμης αποροφούμενης δόσης» το sievert ($1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$).

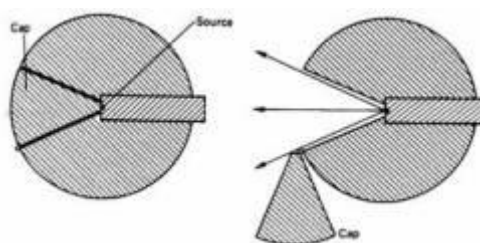
Στη πρακτική ραδιογραφία η έξοδος μιας συσκευής ακτίνων-X αναφέρεται σε mA και μιας ακτίνων-Γάμα σε curie (Ci). Στο μετρικό σύστημα το Ci θεωρήθηκε πολύ μεγάλο και αντικαταστάθηκε από το Becquerel (Bq) ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$).

4.3.Οι Πηγές Ακτίνων-X & Γάμα

Οι ακτίνες-X δημιουργούνται όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας χτυπούν ένα μεταλλικό αντικείμενο. Οι λυχνίες ακτίνων-X περιέχουν τη κάθοδο που παράγει τα ηλεκτρόνια και την μεταλλική άνοδο στην οποία προσπίπτουν τοποθετημένες μέσα σε κενό αέρος και τροφοδοτούνται με υψηλή τάση (kV-MV).



Εικόνα 4-3 : Λυχνία ακτίνων-X



Εικόνα 4-4: Κάψουλα φύλαξης

ραδιενεργών πηγών.

Οι πηγές των ακτίνων-Γάμα επιλέγονται μέσα από τα λίγα φυσικά ραδιενεργά υλικά και τις εκατοντάδες τεχνητά ραδιοϊσότοπα που εκπέμπουν συνδυασμούς από ακτίνες α, β, γ και νετρόνια. Μόνο λίγα από αυτά έχουν ιδιότητες που να τα κάνουν κατάλληλα για βιομηχανικές ραδιογραφικές εφαρμογές.

Μέχρι το 1955 χρησιμοποιούσαν φυσικές πηγές όπως το Ράδιο και το Ράδον τα οποία όμως ήταν επικίνδυνα και έχουν αντικατασταθεί σήμερα από ραδιοϊσότοπα όπως τα πλέον χρησιμοποιούμενα Cobalt-60, Iridium-192, ή, Ytterbium-169 και τα λιγότερο διαδεδομένα Caesium-137, Thulium-170, ή, Sodium-24. Ο αριθμός που ακολουθεί το όνομα είναι η ατομική μάζα του ισοτόπου. Τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα κατασκευάζονται σε ατομικούς αντιδραστήρες ή εξάγονται από τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι όταν ένα τέτοιο υλικό αρχίσει να λειτουργεί δε μπορεί να σταματήσει ή να σβήσει. Το υλικό ακτινοβολεί συνέχεια μέχρι να εξαντληθεί. Τον ρυθμό εξάντλησης ενός ραδιενεργού υλικού τον μετράμε με το «χρόνο ημιζωής» που είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί στο μισό η ακτινοβολία του. Άλλα υλικά έχουν ημιζωή μερικές ώρες και άλλα μερικές εκατοντάδες χρόνια.

Οι πηγές ακτίνων-Γάμα απαιτούν αυστηρά προσεκτικό και ασφαλή χειρισμό. Αφού ενεργοποιηθούν σφραγίζονται σε ειδικές κάψουλες, οι κάψουλες περιβάλλονται από απορροφητικό υλικό, τηρούνται αποστάσεις ασφαλείας, και, όλες οι ενέργειες πρέπει να είναι σύντομες και ταχύτατες.

4.4.Κίνδυνοι και Προφύλαξη

Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και καταστρέφει τους ζωντανούς ιστούς, γι' αυτό απαιτεί τη λήψη κατάλληλων μέτρων προφύλαξης και ειδικές εγκαταστάσεις. Η ετήσια δόση ακτινοβολίας σε ολόκληρο το σώμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 mSv (= 0.5 rem) για το κοινό και τα 15 mSv για τους εργαζόμενους σε σχετικές εγκαταστάσεις.

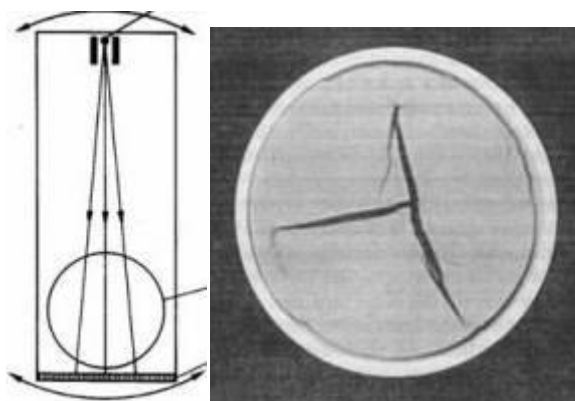
Η κυριότερη αρχή που πρέπει να τηρείται είναι αυτή της ελάχιστης δυνατής έκθεσης (ALARP – As Low As Reasonably Possible). Οι οδηγίες προφύλαξης

γίνονται όλο και πιο αυστηρές με τη πάροδο του χρόνου καθώς διαπιστώνεται το πραγματικό επίπεδο βλάβης που μπορούν να προξενήσουν οι ιονίζουσες ακτινοβολίες ακόμη και σε χαμηλές δόσεις.

4.5. Ψηφιακή Ραδιογραφία – Τομογραφία (Computed Tomography)

Η τομογραφία είναι ένα σύνολο από ραδιογραφίες που αποτυπώνονται ψηφιακά και τις επεξεργαζόμαστε με Η/Υ. Αντί του ραδιογραφικού φιλμ, κάθε ραδιογραφία αποτυπώνεται σαν ψηφιακή πληροφορία μετατρέποντας τη φωτεινότητα κάθε κόκκου του φιλμ σε bytes.

Για να δημιουργηθεί η 3-διάστατη τομογραφία συνθέτουμε δεκάδες ψηφιακές ραδιογραφίες. Κάθε ραδιογραφία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο, είτε περιστρέφοντας το αντικείμενο είτε περιστρέφοντας τη συσκευή ραδιογραφίας. Η σύνθεση γίνεται από τα πρόγραμμα του Η/Υ που ελέγχει τη συσκευή και γνωρίζει ακριβώς τις θέσεις και τις γωνίες λήψης των εικόνων.



Εικόνα 4.5. : Τομογραφία με περιστροφή της πηγής. **Εικόνα 4.6. :**
Τομογραφία υλικού με ρωγμή.

4.6.Υποατομικά Σωματίδια (νετρόνια, πρωτόνια, κλπ.) (Neutron radiography)

Νετρόνια κατάλληλης ενέργειας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες απορρόφησης από τα υλικά, παρ' όλο που είναι ατομικά σωματίδια και όχι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η χρήση υποατομικών σωματιδίων (νετρονίων ή πρωτονίων) έχει καθιερωθεί ευρέως σαν τεχνική και συνήθως αναφέρεται με το όνομα «νετρονική ραδιογραφία».

Η αξία της μεθόδου οφείλεται στο ότι η απορρόφηση των νετρονίων από τα υλικά δεν είναι ίδια με την απορρόφηση των ακτίνων-X που αυξάνει ομαλά με τον ατομικό αριθμό του στοιχείου. Υλικά όπως το Υδρογόνο και το Λίθιο έχουν πολύ μεγάλο συντελεστή απορρόφησης ενώ υλικά όπως το Αλουμίνιο και ο Σίδηρος έχουν 500-2000 φορές μικρότερο συντελεστή απορρόφησης. Η ιδιότητα αυτή κάνει τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό ατελειών, ειδικά όσων περιέχουν υδρογόνο όπως το νερό, λάδι, πλαστικό, κλπ., ακόμα και σε πολύ παχιές πλάκες μετάλλου ή άλλων υλικών.

Στη πράξη οι κύρια πηγή νετρονίων είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας. Άλλες πηγές που χρησιμοποιούνται είναι το ραδιοϊσότοπο Californium-252, ή, συνδυασμός ακτίνων-X με Uranium ή Beryllium.

Πειραματικό Μέρος

Κεφάλαιο 5

5.1. Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή δόθηκαν από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού και πιο συγκεκριμένα από τη διεύθυνση υλικού, αποθηκών ,προμηθειών και μεταφορών . Πρόκειται για ένσφαιρους τριβείς (ρουλεμάν) διαφόρων μεγεθών και τύπου που αποτελούν μέρη μειωτήρων , τροφοδοτικών αντλιών και πτερυγίων αεροστροβίλων.

Τα ρουλεμάν αυτά είναι κατασκευασμένα από χάλυβα τύπου SAE 52100 ή κατά DIN 100Cr6 , με χημική σύσταση :

Carbon, C 0.980 - 1.10 %

Chromium, Cr 1.30 - 1.60 %

Iron, Fe 96.5 - 97.32 %

Manganese, Mn 0.250 - 0.450 %

Phosphorous, P 0.0250 %

Silicon, Si 0.150 - 0.300 %

Sulfur, S 0.0250 %

Από τη βιβλιογραφία αλλά και από τις κατασκευάστριες εταιρίες γνωρίζουμε ότι οι ελαστικές σταθερές έχουν τις εξής τιμές :

μέτρο ελαστικότητας $E = 200 - 220 \text{ GPa}$

μέτρο διάτμησης $G = 75-95 \text{ GPa}$

λόγο Poisson $\nu = 0.27 - 0,33$

Επίσης γνωρίζουμε ότι η πυκνότητα του συγκεκριμένου τύπου χάλυβα είναι $7,89 \text{ gr/cm}^3$, η σκληρότητα σε Vickers 810 Hv , η αντοχή 2240 MPa και το όριο διαρροής 2033 MPa .



Εικόνες 5-1 Μερικά από τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν

5.2. Συσκευές

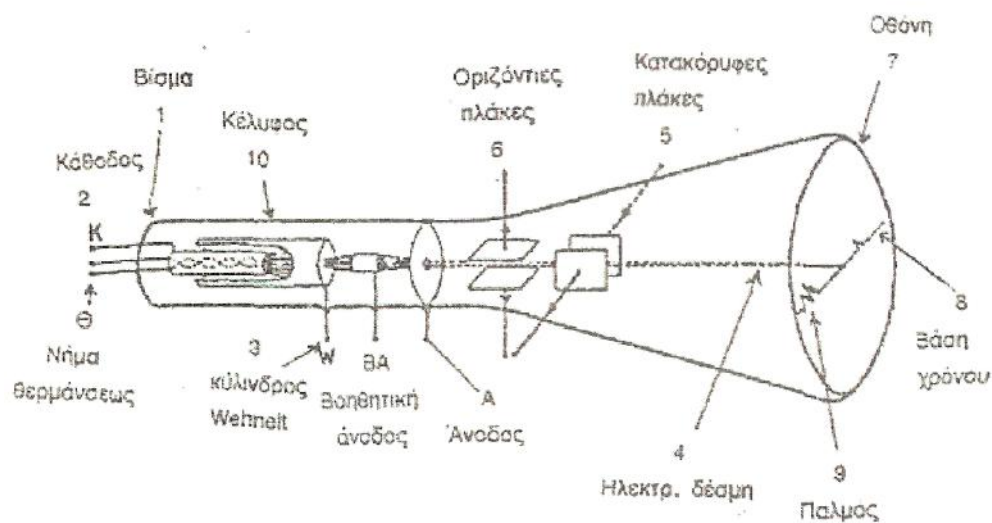
5.2.1. Η συσκευή USIP -11



Εικόνα 5-2 Η συσκευή USIP -11

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η USIP -11 της εταιρείας Krautkramer. Πρόκειται για μία γεννήτρια παλμών που διεγείρουν τους

πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους των κεφαλών, παράγοντας μηχανικά κύματα. Στη συνέχεια, οι κεφαλές συλλαμβάνουν το ανακλώμενο σήμα και στην οθόνη της συσκευής εμφανίζεται ένας παλμός. Ο στόχος είναι να προσδιορισθεί ο πολύ μικρός χρόνος που χρειάζεται ο παλμός να διατρέξει δύο φορές το πάχος του προς εξέταση δοκιμίου. Επειδή αυτός ο χρόνος είναι πολύ μικρός για να μετρηθεί με μηχανικά μέσα, χρησιμοποιείται μια διάταξη που ονομάζεται **καθοδικός σωλήνας Braun**.



Εικόνα 5-3 Ο καθοδικός σωλήνας Braun

Ο σωλήνας Braun εκπέμπει από την κάθοδό του μία λεπτή δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία αφού εστιαστεί και επιταχυνθεί, προσπίπτει στη φθορίζουσα επιφάνεια της οθόνης, φωτίζοντας την. Η γεννήτρια παράγει μία περιοδική πριονωτή τάση, η οποία αφού περάσει από τον καθοδικό σωλήνα Braun, δίνει ένα φωτεινό σημείο στην οθόνη της συσκευής. Με αύξηση της πριονωτής τάσης έχουμε μετακίνηση του φωτεινού σημείου προς τα δεξιά, έως ότου η τάση επανέλθει στη αρχική της τιμή και η διαδικασία επαναληφθεί. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 1000 φορές το δευτερόλεπτο και προφανώς δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Τότε, στην οθόνη εμφανίζεται μία οριζόντια φωτεινή γραμμή.

Την ίδια στιγμή που η πριονωτή τάση αυξάνεται, η γεννήτρια στέλνει παλμό ελέγχου στο κύκλωμα του πομπού, το οποίο παράγει ένα βραχύ παλμό 300-1000V. Αυτή η τάση αφού ανορθωθεί και ενισχυθεί κατάλληλα, οδηγείται στον καθοδικό σωλήνα, όπου δέχεται την κατακόρυφη απόκλιση. Εκείνη τη στιγμή έχουμε την εμφάνιση του αρχικού παλμού στην οθόνη, ενώ ταυτόχρονα δημιουργείται ο υπερηχητικός παλμός στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο της κεφαλής. Όσο ο υπερηχητικός παλμός διαπερνά το υλικό, το φωτεινό σημείο της οθόνης προχωρά προς τα δεξιά. Τη στιγμή που ο παλμός επιστρέφει στην επιφάνεια του υλικού, δημιουργεί μία τάση στον κρύσταλλο. Αυτή η τάση ενισχύεται, ανορθώνεται και δημιουργεί μία κατακόρυφη απόκλιση του φωτεινού σημείου στην οθόνη. Αυτό το σήμα ονομάζεται ηχώ της πίσω επιφάνειας, μιας και παριστάνει τον υπερηχητικό παλμό που ανακλάται στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου.

Η θέση της ήχους της πίσω επιφάνειας στην οθόνη, παριστάνει το χρόνο της διπλής διαδρομής στο υλικό. Γνωρίζοντας ότι η ταχύτητα των υπερήχων μέσα από το υλικό είναι σταθερή, η θέση αυτή αντιστοιχεί στο πάχος του εξεταζόμενου δοκιμίου.

5.2.2. Υπερηχητικό σκληρόμετρο MIC- 2

Το Ε.Α.Υ. διαθέτει ένα υπερηχητικό σκληρόμετρο, το MicroDur κατασκευής της Krautcramer – Branson Γερμανίας. Στο σχήμα 5-3 φαίνεται η μπροστινή όψη του, με μια ένδειξη σκληρότητας στην οθόνη του, όπως και η χρησιμοποιούμενη για τη σκληρομέτρηση κεφαλή. Ο: διαστάσεις του είναι 200 mm x 76 mm x 200 mm και το βάρος του 2,5 kg. Η κεφαλή φέρει στην κορυφή της αδαμάντινο διεισδυτή, τύπου Vickers γωνίας 136 μοιρών.

Υπάρχει η δυνατότητα φορητής χρήσης της συσκευής καθώς εκτός από το ηλεκτρικό ρεύμα 6-9/VDC, μπορεί να χρησιμοποιεί και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες NiCd ή AIMn. Το MIC-2 συνδέεται και με περιφερειακά συστήματα καταγραφής και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της SHARP (CE-125 και PC-1262) καθώς και με οποιοδήποτε συμβατό υπολογιστή I.B.M. PC-XT/AT.

Καθοριστικό ρόλο σε κάθε δοκιμή σκληρομέτρησης, που γίνεται με τη μέθοδο UCI, παίζει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Το MIC-2 μπορεί να κάνει έλεγχο της σκληρότητας σε υλικά που το μέτρο ελαστικότητάς τους κυμαίνεται στην περιοχή 70.000 – 300.000 N/mm².

Ο χειρισμός του MIC-2 είναι σχετικά εύκολος. Αφού προηγηθεί η βαθμονόμηση και προετοιμασία της συσκευής, ο διεισδυτής συμπιέζεται κάθετα στο δοκίμιο και ύστερα από 3 sec ολοκληρώνεται η μέτρηση και εμφανίζεται η τιμή της σκληρότητας στην οθόνη. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται στη μνήμη της συσκευής (χωρητικότητας 2970 τιμών) για περαιτέρω επεξεργασία ή εκτύπωση. Η τιμή αυτή της σκληρότητας είναι κατά Vickers και εύκολα μετατρέπεται και στις άλλες μεθόδους.



Εικόνα 5-4 Η συσκευή MIC-2

**Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα του MIC-2 έναντι των
συμβατικών σκληρόμετρων.**

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της υπερηχητικής μεθόδου υπολογισμού της σκληρότητας είναι:

1. Η σκληρομέτρηση γίνεται με την επιβολή συγκεκριμένου, μικρού φορτίου 5 kgf.
2. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την επιφάνεια διείσδυσης και μόνο τη διαγώνιο ή τη διάμετρο της ουλής, όπως συμβαίνει με συμβατικά σκληρόμετρα.
3. Δε χρησιμοποιούνται οπτικές διατάξεις για την εκτίμηση των γεωμετρικών στοιχείων της ουλής, όπως όλα τα συμβατικά σκληρόμετρα, απλουστεύοντας έτσι τη δοκιμή.
4. Δεν απαιτούνται ειδικά δοκίμια και η συσκευή λόγω του μικρού βάρους της μπορεί να μεταφερθεί οπουδήποτε και να εκτελεί σκληρομετρήσεις σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής, χωρίς να δημιουργεί μεγάλα τραύματα.

Για παράδειγμα μέταλλα που οι επιφάνειες τους είναι ανωδιωμένες ή στιλβωμένες είναι δυνατό να ελεγχθούν με το MIC - 2, ενώ κάτι τέτοιο είναι αδύνατο με τα συμβατικά σκληρόμετρα.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου μπορούν να αναφερθούν, η απαίτηση της γνώσης κατά προσέγγιση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, όπως και σε ορισμένες περιπτώσεις ο προσδιορισμός πρώτα της σκληρότητας με μια από τις συμβατικές μεθόδους.

5.3. Εύρεση ελαστικών σταθερών

Η πρώτη σειρά πειραμάτων αποσκοπούσε στο να βρούμε τις ελαστικές σταθερές των δοκιμίων με τη μη-καταστροφική μέθοδο έλεγχου υλικών των υπερήχων και να συγκρίνουμε τις τιμές αυτές με τις τιμές που μας δόθηκαν από τον κατασκευαστή.

Αρχικά κάθε δοκίμιο καθαρίστηκε από σκουριές, ακαθαρσίες κ.λ. και μετρήθηκε το πάχος του με χρήση συμβατικού παχύμετρου (d_x). Στη συνέχεια απλώθηκε ένα στρώμα υλικού σύζευξης (στη συγκεκριμένη περίπτωση γλυκερίνη) ώστε να έχουμε καλή διέλευση του υπερήχου στο εσωτερικό του δοκιμίου. Μετρήθηκε το πάχος του δοκιμίου τόσο με κάθετη κεφαλή συχνότητας 4 MHz (d_{gl}) όσο και με γωνιακή κεφαλή συχνότητας 2 MHz και γωνίας 60 μοιρών (d_{gt}).

Στην περίπτωση αυτή προσδιορίζεται η ταχύτητα των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων που διαδίδονται μέσα από ένα στερεό πυκνότητας ρ , και από τις σχέσεις (1), (2) και (3) υπολογίζονται οι ελαστικές σταθερές E , ν , G του υλικού.

$$C_l = C_{\text{διαμ}} d_x / d_{gl} \text{ και } C_t = C_{\text{εγκ}} d_x / d_{gt}$$

Όπου C_l η ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων και C_t η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων, d_x το πάχος του δοκιμίου μετρημένο με παχύμετρο, d_{gl} το πάχος του δοκιμίου μετρημένο με κάθετη κεφαλή και d_{gt} το πάχος του δοκιμίου μετρημένο με γωνιακή κεφαλή 60 μοιρών.

$$C_{\text{διαμ}} = 5920 \text{ m/sec (ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων στο χάλυβα)}$$

$$C_{\text{εγκ}} = 3250 \text{ m/sec (ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων στο χάλυβα)}$$

$$\nu = \frac{1/2(c_l / c_t)^2 - 1}{(c_l / c_t)^2 - 1} = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2c_l^2 - 2c_t^2} \quad (1)$$

$$E = \rho c_t^2 \frac{3c_l^2 - 4c_t^2}{c_l^2 - c_t^2} = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \rho c_l^2 = 1(1+\nu) \rho c_t^2 \quad (2)$$

$$G = \rho c_t^2 \quad (3)$$

Δοκίμιο 1

Το δοκίμιο 1 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU 228 και διαστάσεις 42 mm στο πλάτος και 14,2 mm στο πάχος του.

$$dx = 42\text{mm}$$

$$dgl = 41\text{ mm}$$

$$dgt = 44\text{ mm}$$

$$Ct = 3102\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6064\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,32	
E	201	Gpa
G	76	Gpa

Δοκίμιο 2

Το δοκίμιο 1 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU222 και διαστάσεις 64 mm στο πλάτος και 7,9 mm στο πάχος του.

$$dx = 64\text{mm}$$

$$dgl = 63\text{ mm}$$

$$dgt = 62\text{ mm}$$

$$Ct = 3355\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6014\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,27	
E	223	Gpa
G	89	Gpa

Δοκίμιο 3

Το δοκίμιο 3 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU314 και διαστάσεις 35 mm στο πλάτος και 1,17 mm στο πάχος του.

$$dx = 35\text{mm}$$

$$dgl = 34\text{ mm}$$

$$dgt = 36\text{ mm}$$

$$Ct = 3160\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6094\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,32	
E	208	Gpa
G	79	Gpa

Δοκίμιο 4

Το δοκίμιο 4 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU318 και διαστάσεις 62 mm στο πλάτος και 20 mm στο πάχος του.

$$dx = 62\text{mm}$$

$$dgl = 61\text{ mm}$$

$$dgt = 63\text{ mm}$$

$$Ct = 3198\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6017\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,30	
E	211	Gpa
G	81	Gpa

Δοκίμιο 5

Το δοκίμιο 5 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU230 και διαστάσεις 45 mm στο πλάτος και 16 mm στο πάχος του.

$$dx = 45\text{mm}$$

$$dgl = 44\text{ mm}$$

$$dgt = 47\text{ mm}$$

$$Ct = 3112\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6055\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,32	
E	202	Gpa
G	76	Gpa

Δοκίμιο 6

Το δοκίμιο 6 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU230C3 και διαστάσεις 45 mm στο πλάτος και 16 mm στο πάχος του.

$$dx = 45\text{mm}$$

$$dgl = 44\text{ mm}$$

$$dgt = 44\text{ mm}$$

$$Ct = 3324\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6055\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,28	
E	224	Gpa
G	87	Gpa

Δοκίμιο 7

Το δοκίμιο 7 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU318 και διαστάσεις 43 mm στο πλάτος και 10,7 mm στο πάχος του.

$$dx = 43\text{mm}$$

$$dgl = 42\text{ mm}$$

$$dgt = 44\text{ mm}$$

$$Ct = 3176\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6061\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,31	
E	209	Gpa
G	80	Gpa

Δοκίμιο 8

Το δοκίμιο 8 είναι ρουλεμάν με κωδικό NU328 και διαστάσεις 65 mm στο πλάτος και 20 mm στο πάχος του.

$$dx = 65\text{mm}$$

$$dgl = 62\text{ mm}$$

$$dgt = 64\text{ mm}$$

$$Ct = 3076\text{ m/sec}$$

$$Cl = 6064\text{ m/sec}$$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,30	
E	207	Gpa
G	79	Gpa

Δοκίμιο 9

Το δοκίμιο είναι ρουλεμάν με κωδικό 2NU30 και διαστάσεις 31 mm στο πλάτος και 16,5 mm στο πάχος του.

$dx = 31\text{mm}$

$dgl = 31\text{ mm}$

$dgt = 33\text{ mm}$

$Ct = 3053\text{ m/sec}$

$Cl = 5920\text{ m/sec}$

Ελαστικές σταθερές δοκιμίου		
ν	0,32	
E	194	Gpa
G	74	Gpa



Εικόνα 5-5 Διεξαγωγή πειράματος

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές :

δοκίμιο	E (Gpa)	G(Gpa)	ν
1	201	76	0,32
2	223	89	0,27
3	208	79	0,32
4	211	81	0,3
5	202	76	0,32
6	224	87	0,28
7	209	80	0,31
8	207	79	0,3
9	194	74	0,32
βιβλιογραφία	200-220	75-85	0,27-0,32

5.4. Εύρεση Σκληρότητας

Η δεύτερη σειρά πειραμάτων έγινε με σκοπό να βρεθεί η σκληρότητα των δοκιμίων και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τις τιμές που μας δόθηκαν από τη κατασκευάστρια εταιρία. Τα πειράματα έγιναν με τη χρήση του υπερηχητικού σκληρόμετρου MIC-2 της Krautcramer – Branson Γερμανίας .

Αρχικά κάθε δοκίμιο καθαρίστηκε από ακαθαρσίες , σκουριές κ.λ. και απλώθηκε σε αυτό γλυκερίνη ως υλικό σύζευξης . Στη συνέχεια πήραμε τη τιμή σκληρότητας σε διάφορα σημεία του κάθε δοκιμίου έτσι ώστε να έχουμε μια καλή και παραστατική άποψη για τη σκληρότητα τους , αυτό έγινε γιατί πολλά από τα δοκίμια έχουν περιοχές με φθορές ή θερμικά καταπονημένες περιοχές .

Δοκίμιο 1

Δοκίμιο 1A NU228
751
736
723
665
732
693
718
706
715Hv



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρσία
φθορές

Δοκίμιο 1 Β ΝU228	
έξω	μέσα
856	662
717	712
687	623
697	679
661	552
629	
561	
649	
680	
772	
742	
695Hv	

Δοκίμιο 2

Δοκίμιο 2 ΝU 222	
πάχος	πλάτος
735	737
728	494
732	453
709	489
701	498
696	487
688	
668	
280	
386	
490	
425	
404	
493	
595Hv	

Δοκίμιο 3

Δοκίμιο 3 NU314	
πάχος	πλάτος
675	644
657	667
695	690
675	548
700	653
659	678
704	690
698	
709	
628 Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρότητα
φθορές

Δοκίμιο 4

Δοκίμιο 4 NU318 κυλίνδρους	
πάχος	πλάτος
686	748
671	684
671	688
684	675
682	662
673	666
652	695
676	685
640	671
614	672
670	
649	
678	
683	
693	
674 Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρότητα
φθορές

Δοκίμιο 5

Δοκίμιο 5 NU230C3	
πάχος	πλάτος
701	509
669	659
672	716
716	717
668	722
701	749
668	727
793	721
742	703
	695
	675
696 Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρσία
φθορές

Δοκίμιο 6

Δοκίμιο 6 NU230	
πάχος	πλάτος
720	670
697	683
693	718
687	649
708	701
711	695
718	676
392	560
381	520
416	583
371	
448	
608 Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρσία
φθορές

Δοκίμιο 7

Δοκίμιο 7 NU318 άνευ κυλ	
πάχος	πλάτος
675	751
666	747
652	742
758	739
757	740
756	718
756	741
757	719
728	728
754	716
757	720
749	743
771	
733Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρσία
φθορές

Δοκίμιο 8

Δοκίμιο 8 NU 328	
πάχος	πλάτος
647	746
538	756
503	761
738	768
739	738
722	755
631	792
403	696
532	753
684	699
761	687
689	709
724	
686 Hv	



σκουριά
Θ.Κ.Π.
ακαθαρσία
φθορές

Δοκίμιο 9

Δοκίμιο 9 2NU30	
πάχος	πλάτος
729	709
719	722
690	717
718	723
741	732
690	749
709	754
703	715
676	771
693	724
686	740
697	728
755	741
673	743
731	682
721	
718 Hv	

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές :

δοκίμιο	Σκληρότητα (Hv)
1	715 - 695
2	595
3	628
4	674
5	696
6	608
7	733
8	686
9	682
βιβλιογραφία	810

5.5. Εύρεση Damage Parameter

Η τρίτη σειρά πειραμάτων αποσκοπούσε στην εύρεση του D δηλαδή της παραμέτρου damage , θα μπορούσαμε να πούμε ότι το damage parameter είναι ένας δείκτης κοπώσεως του κάθε δοκιμίου αφού μας δείχνει την **εσωτερική φθορά** του υλικού η οποία οφείλεται στις καταπονήσεις που προκύπτουν από τη χρήση του. Στα πειράματα που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν τόσο τα δοκίμια μας όσο και τα αντίστοιχα αχρησιμοποίητα ρουλεμάν. Τα πειράματα διεξήχθησαν στους χώρους της εταιρίας ΔΟΝΟΥΠΟΓΛΟΥ ΠΑΝΤΕΛΗΣ Κ ΑΕ στον Πειραιά.

Αρχικά καθαρίστηκαν τα δοκίμια και στη συνέχεια με τη χρήση της συσκευής υπερήχων μετρήθηκε το ύψος του πρώτου παλμού στην οθόνη της συσκευής . Σύγκριση των δυο υψών μας οδηγεί στην παράμετρο damage :

$$D = 1 - H_2 / H_1$$

Όπου H_1 και H_2 είναι τα ύψη της ηχούς στην οθόνη της συσκευής για την μη φθαρμένη κατάσταση και για την φθαρμένη αντίστοιχα.



Εικόνα 5-6 Αριστερά το αχρησιμοποίητο ρουλεμάν και δεξιά το χρησιμοποιημένο

Τα δοκίμια για τα οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα εύρεσης της παραμέτρου damage είναι τα παρακάτω : NU 228 , NU 314 , NU 230 , NU 318 και NU 328 .

ΝΥ 228 [2 τεμάχια]					
ΠΛΑΤΟΣ			ΠΛΑΤΟΣ		
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ 1	ΠΑΛΑΙΟ 2	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ 1	ΠΑΛΑΙΟ
1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή
5,7	4,3	4,9	5,9	4,8	4,3
6	4,6	4,7	5,2	5,2	4,9
5,6	4,7	4,9	5,5	4,65	4,6
5,9	4,5	4,8	5,8	4,8	4,5
5,9	4,6	4,7	5,5	4,9	4,7
5,82	4,54	4,8	5,58	4,86	4,6
	22%	18,60%		13%	18,60%
ΠΑΧΟΣ			ΠΑΧΟΣ		
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ 1	ΠΑΛΑΙΟ 2	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ 1	ΠΑΛΑΙΟ 2
2η επιστροφή	2η επιστροφή	2η επιστροφή	2η επιστροφή	2η επιστροφή	2η επιστροφή
1,8	1,7	1,75	2,8	1,6	1,3
2,6	1,5	1,25	2,7	1,8	1,5
2,4	1,85	2,5	3,1	2,4	2,6
3,1	1,7	1,8	3,35	1,9	1,8
2,9	1,6	1,9	2,4	2	1,9
2,56	1,67	1,61	2,87	1,94	1,82
	35%	38%		33,50%	36,40%

ΝΥ 314			
ΠΛΑΤΟΣ		ΠΑΧΟΣ	
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ
1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή
5,6	5,3	5	4,4
5,3	5,2	5,9	4
5,8	5,8	5,5	4,2
6,2	6,3	6	4,7
6,4	5,8	5,1	5,3
6,6	6,2		
6,0	5,8	5,5	4,5
5,36%		12,00%	

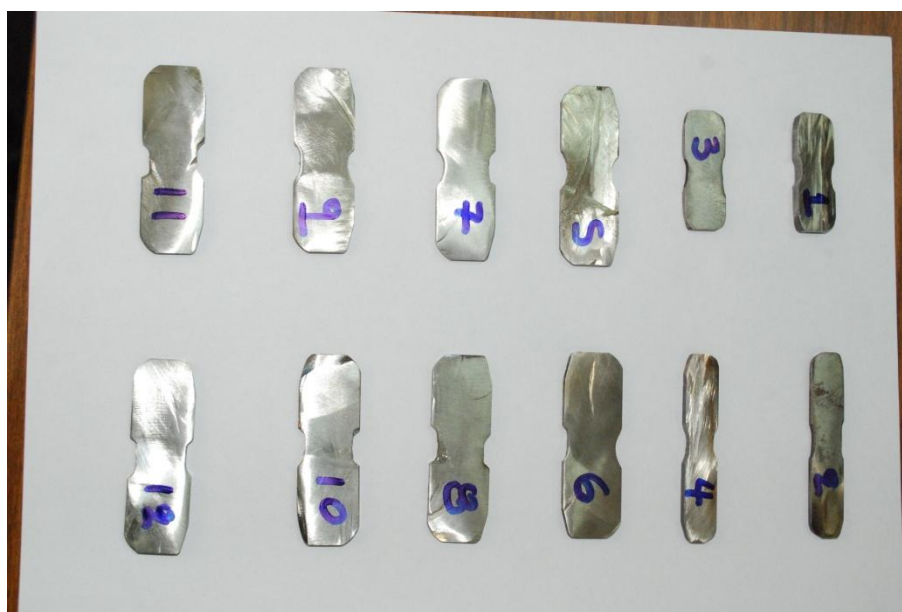
NU 318			
ΠΛΑΤΟΣ		ΠΑΧΟΣ	
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ
1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή
5,6	5,9	5,6	6,3
5,8	6,1	5,2	4,9
5,5	6,1	5	5,1
5,5	5,8	4,9	5,2
5,7	5,9	5,2	6,2
5,7	5,9	5,6	5,4
5,6	5,6	5,7	5,3
5,6	5,9	5,3	5,2
5,6	5,9	5,3	5,5
4,88%		2,50%	

NU 230 [2 τεμάχια]					
ΠΛΑΤΟΣ			ΠΑΧΟΣ		
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ
1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή
5	5,3	5,2	4,85	4,5	4,8
5,4	5,5	4,7	5	4,5	4,3
5,6	5,1	4,6	5,2	4,2	4,4
6	4,6	4,7	5,4	4,6	4
5,8	5	5,9	5,5	4,6	3,8
5,6	5,1	5,0	5,2	4,5	4,3
	8,27%	9,71%		13,68%	4,91%

NU 328			
ΠΛΑΤΟΣ		ΠΑΧΟΣ	
ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ	ΝΕΟ	ΠΑΛΑΙΟ
1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή	1η επιστροφή
6,6	6,2	5,6	5,7
5,8	6,6	5,8	6,4
6,9	6,5	5,6	5,8
6,9	6,4	5,9	6,1
6,5	6	5,6	6,6
6,4	6,3	5,6	6,1
5,8	6	5,8	6
6,5	6,2	5,8	6
7	6,1	5,6	5,7
6	6,1		
6,4	6		
6,4	6,2	5,7	6,0
3,39%		6,04%	

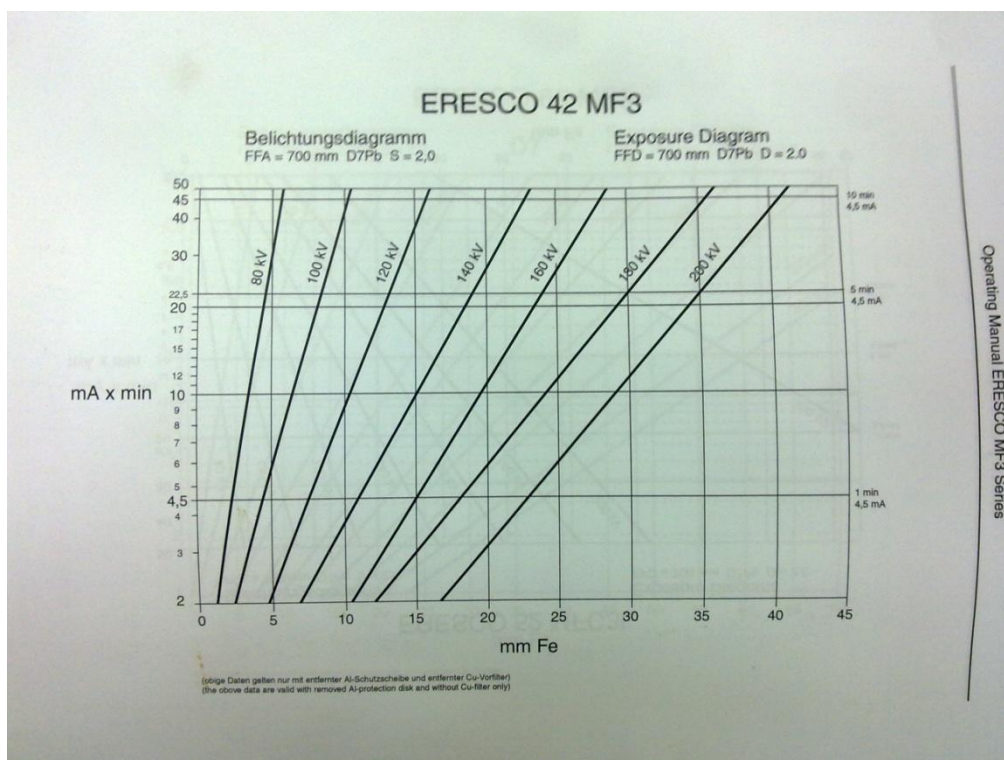
5.6. Πειράματα Βιομηχανικής Ακτινογραφίας (Ραδιογραφία)

Από τα αρχικά δοκίμια πρόεκυψαν δευτερεύοντα δοκίμια κατόπιν επεξεργασίας των σε ειδικευμένο μηχανουργείο . Σκοπός της δημιουργίας αυτών των δοκιμίων ήταν να γίνει μια σειρά πειραμάτων βιομηχανικής ακτινογραφίας (ραδιογραφίας) για την εύρεση τυχόν εσωτερικών ασυνεχειών , ατελειών ή ρωγμών και κατόπιν διεξαγωγή πειραμάτων εφελκυσμού για την ταυτοποίηση των τιμών του Μέτρου Ελαστικότητας , του Μέτρου Διάτμησης και λόγου Poisson που βρέθηκαν από τα πειράματα με τη χρήση υπερήχων .

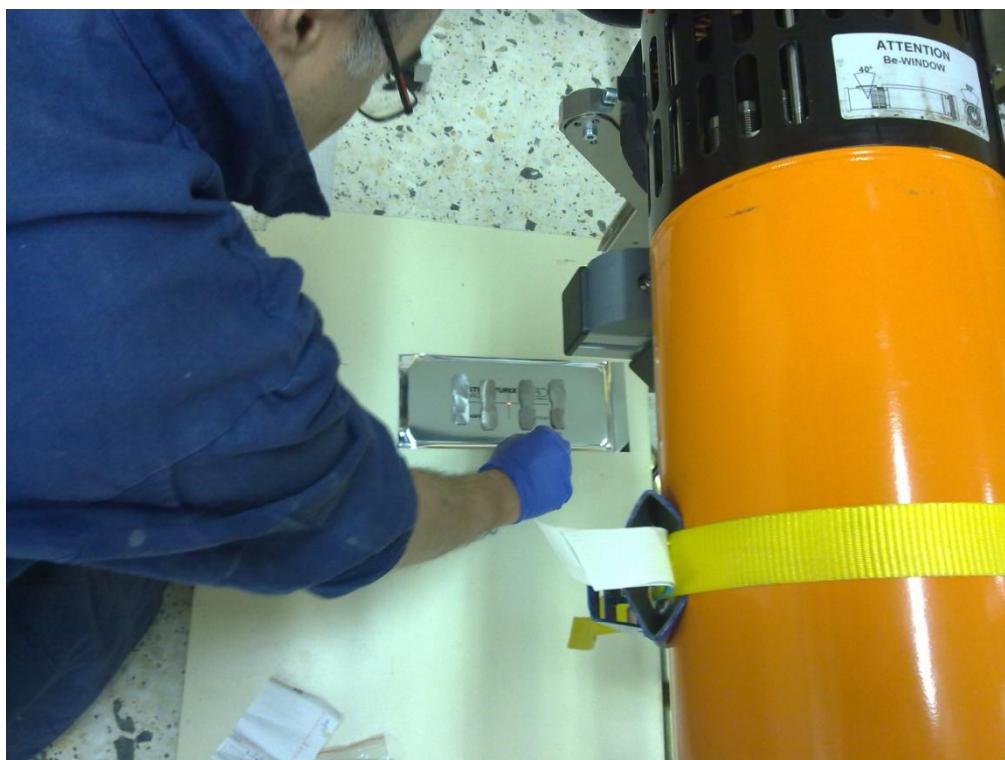


Εικόνα 5-7

Τα παραπάνω δοκίμια είναι κομμάτια των αρχικών δοκιμίων και έχουν πάχος 4 mm. Από τον παρακάτω πίνακα πήραμε τις τιμές χρόνου έκθεσης και έντασης ακτινοβολίας για την διεξαγωγή των πειραμάτων ραδιογραφίας. Έτσι για ένα δοκίμιο 4 mm έχουμε 100 kv και 3,5 mA x min .

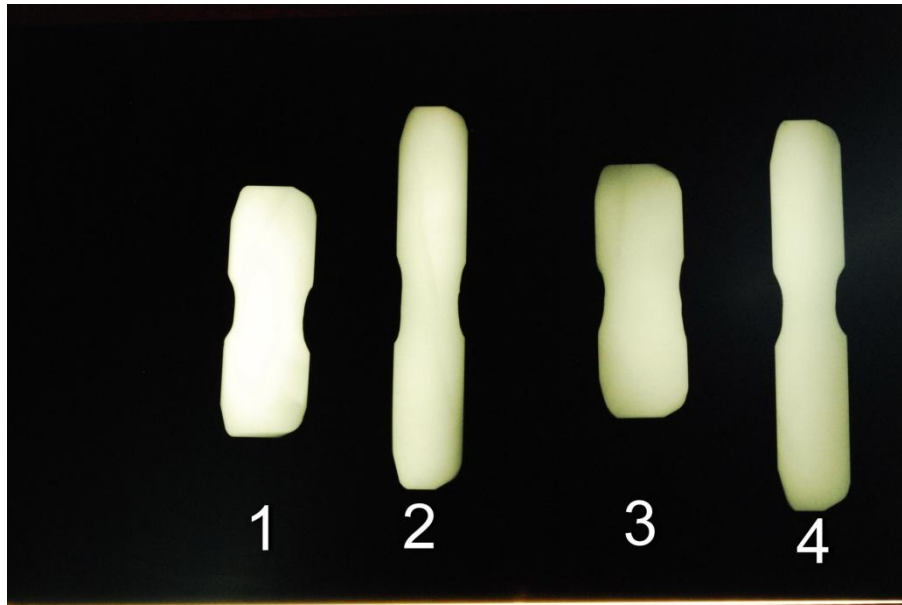


Εικόνα 5-8

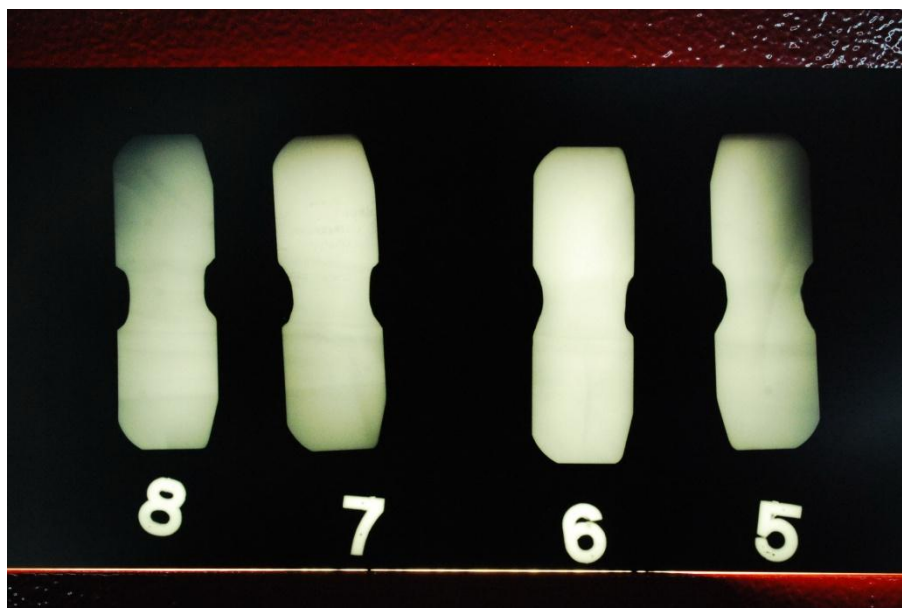


Εικόνα 5-9 Διεξαγωγή πειράματος ραδιογραφίας

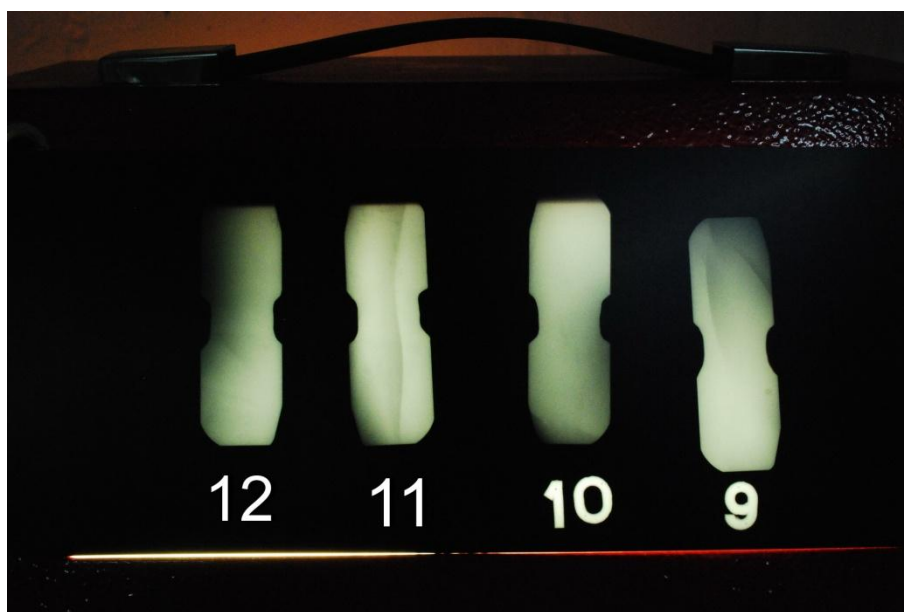
Παρακάτω βλέπουμε τα φιλμ ραδιογραφίας που δείχνουν ότι δεν υπάρχει καμιά εσωτερική ατέλεια . Οι γραμμές που φαίνονται στα δοκίμια 9 και 11 δεν αποτελούν ένδειξη για την παρουσία ρωγμής , είναι απλά επιφανειακά σημάδια που προέκυψαν από την κοπή των αρχικών δοκιμίων.



Εικόνα 5-10 Δοκίμια 1,2,3,4



Εικόνα 5-11 Δοκίμια 5,6,7,8



Εικόνα 5-12 Δοκίμια 9,10,11,12

Σε αυτή τη στιγμή κρίνω σημαντικό να τονίσω ότι όλα τα παραπάνω πειράματα ραδιογραφίας έγιναν στις εγκαταστάσεις Ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό τη καθοδήγηση του Λέκτορα κ. Νίκου Πετρόπουλου .

5.7. Πειράματα Εφελκυσμού

Μερικά από τα παραπάνω δοκίμια και πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια 2 και 4 χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα εφελκυσμού που σκοπό είχαν αφενός την ταυτοποίηση των τιμών του μέτρου ελαστικότητας και λογού Poisson με τις τιμές που βρήκαμε με τον υπέρηχο και αφετέρου την εύρεση των τιμών της αντοχής σε θραύση και του ορίου διαρροής και η σύγκριση τους με τις τιμές που μας δόθηκαν από τις κατασκευάστριες εταιρίες αλλά και με τις τιμές που γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία για το συγκεκριμένο τύπο χάλυβα (SAE 52100) .

Τα πειράματα εφελκυσμού παρουσίασαν μεγάλη δυσκολία γιατί τα δοκίμια κοπήκαν χειροκίνητα όπως αναφέρουμε παραπάνω σε μηχανουργείο οπότε η τελική τους διαμόρφωση έπρεπε να γίνει με χρήση ρεκτιφιέ κ.λ. στους χώρους του κτιρίου Αντοχής Υλικών.



Εικόνα 5-13 Τα δοκίμια εφελκυσμού



Εικόνα 5-14 Η συσκευή πειραμάτων εφελκυσμού

Από τα πειράματα εφελκυσμού μπορέσαμε να βγάλουμε τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας , του λόγου Poisson , την αντοχή σε θραύση και το όριο διαρροής.

Τα μέτρα ελαστικότητας που βρήκαμε ήταν αυτά που βρήκαμε και με τη μέθοδο των υπερήχων και πιο συγκεκριμένα στο πρώτο δοκίμιο το E βρέθηκε 223 GPa με τον υπέρηχο και με τον εφελκυσμό βρέθηκε 222,9 GPa ενώ στο δεύτερο με

τον υπέρηχο βρήκαμε 224 GPa ενώ με το πείραμα του εφελκυσμού 223 GPa. Ο λόγος Poisson βρέθηκε με μεγάλη απόκλιση και πιο συγκεκριμένα από 0,3 που περιμέναμε πήραμε τιμές περίπου στο μισό, αυτό οφείλεται στο μικρό ελεύθερο μήκος των δοκιμίων και στην ακόμα μικρότερη απόσταση των αρπάγων της συσκευής.

Η αντοχή των δοκιμίων βρέθηκε 1541 MPa στο πρώτο δοκίμιο και 1640 MPa στο δεύτερο ενώ από τη βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι η αντοχή του συγκεκριμένου τύπου χάλυβα είναι 2240 MPa.

Τέλος το όριο διαρροής των δοκιμίων βρέθηκε 1490 MPa στο πρώτο δοκίμιο και 1460 MPa στο δεύτερο ενώ από η βιβλιογραφία μας δίνει 2023 MPa για το συγκεκριμένο τύπο χάλυβα.



Εικόνα 5-15 Το δοκίμιο 1 πριν και μετά το πείραμα εφελκυσμού.

Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είχε σκοπό τη μελέτη και την αξιολόγηση της λειτουργικότητας στοιχείων μηχανών με χρήση μη καταστροφικών ελέγχων υλικών και εκπονήθηκε στο Εργαστήριο μη καταστροφικών ελέγχων του Τομέα Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου .

Πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας , μέτρου διάτμησης , λόγο Poisson , σκληρότητας και damage parameter των ρουλεμάν που δόθηκαν από τη ΔΕΗ με χρήση συσκευής υπερήχων και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις τιμές που μας δόθηκαν τόσο από τη ΔΕΗ όσο και από τις κατασκευάστριες εταιρίες . Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν κάποια νέα δοκίμια από τα αρχικά ρουλεμάν τα οποία πρώτα ακτινογραφήθηκαν και μετά αποτέλεσαν δοκίμια εφελκυσμού ώστε να ταχτοποιηθούν οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson με πειράματα εφελκυσμού . Τα πειράματα εφελκυσμού είχαν δευτερεύοντα σκοπό την εύρεση της αντοχής σε θραύση και του ορίου διαρροής των ρουλεμάν και τη σύγκριση της με την βιβλιογραφική τιμή.

Από τα πειράματα των υπερήχων οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας , μέτρου διάτμησης και λόγου Poisson βρεθήκαν κοντινές με αυτές που μας δόθηκαν από την ΔΕΗ και τη κατασκευάστρια εταιρία πράγμα λογικό αφού δεν περιμέναμε μεγάλη απόκλιση λόγω ιδιοτήτων του χάλυβα . Συγκεκριμένα οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας ήταν από 190 GPa έως 225 GPa , του λόγου Poisson από 0,27 έως 0,32 και του μέτρου διάτμησης από 75 GPa έως 85 GPa .

Στα πειράματα μέτρησης της σκληρότητας των δοκιμίων με χρήση υπερηχητικού σκληρόμετρου βρήκαμε τιμές φανερά μικρότερες από την τιμή που γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία (820 Hv) και ειδικά σε περιοχές σκουριάς ή φθοράς και ακόμα περισσότερο σε θερμικά καταπονημένες ζώνες η τιμή της σκληρότητας είχε πέσει ακόμα και στο μισό . Λεπτομέρειες για όλα τα παραπάνω βρίσκονται στο πειραματικό μέρος της διατριβής και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 5.

Μέσω του ΜΚΕ του υπέρηχου μετρήσαμε και το damage parameter δηλαδή τη εσωτερική φθορά του κάθε δοκιμίου . Στα περισσότερα δοκίμια το D ήταν της τάξης του 3 % με 12 % ενώ στο δοκίμιο 1 το D ήταν από 18 % έως 38% πράγμα το οποίο

δικαιολογείται από το γεγονός ότι ήταν το μοναδικό δοκίμιο το οποίο ήταν κομμένο σε δυο μέρη .

Από τα πειράματα της ραδιογραφίας καταλάβαμε ότι δεν είχαμε κάποια εσωτερική ασυνέχεια ή ρωγμή και γενικά οποιαδήποτε ατέλεια στο εσωτερικό των δοκιμίων και μπορούσαμε έτσι να συνεχίσουμε στα πειράματα εφελκυσμού.

Τα πειράματα εφελκυσμού έδειξαν αφενός ότι οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που βρεθήκαν με τους υπέρηχους ήταν σωστές και εντός των προβλεπόμενων περιοχών και αφετέρου ότι είχαμε μεγάλη πτώση στις τιμές της αντοχής σε θραύση και του ορίου διαρροής . Συγκεκριμένα η αντοχή σε θραύση από 2240 MPa έπεσε στα 1600 MPa περίπου και το όριο διαρροής από 2033 MPa σε 1500 MPa (οι παραπάνω τιμές αποτελούν μέσο όρο των δοκιμίων) . Όσον για το λόγο Poisson με τα πειράματα εφελκυσμού βρέθηκαν τιμές της τάξης του 0,15 και όχι 0,3 που είναι η προβλεπόμενη τιμή για ένα χάλυβα. Αυτό οφείλεται στο μικρό μέγεθος του δοκιμίου και στην επίσης πολύ μικρή απόσταση των αρπαγών της συσκευής , θα μπορούσαμε να πούμε ότι το δοκίμιο δεν έχει χώρο να παραμορφωθεί στον άξονα ψ και γι' αυτό βρίσκουμε πολύ μικρό λόγο Poisson ($\epsilon_x = - \nu \epsilon_\psi$) .

Βιβλιογραφία

- Μη καταστροφικοί έλεγχοι υλικών – Η μέθοδος των υπερήχων [Ιωάννης Πρασιανάκης , Καθηγητής Ε.Μ.Π.]
- Έλεγχος συνθετών υλικών με τη μη-καταστροφική μέθοδο c-scan [Κωνσταντίνος Καραίσκος , διπλωματική εργασία , Ε.Μ.Π.]
- Εργαστήρια πειραματικής αντοχής υλικών [Ι. Πρασιανάκης Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Β. Κωνσταντέλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.]
- The NDT , Evaluation of material's modulus of Elasticity E , using ultrasound [I.N. Prasianakis , NTUA]
- Ελαστικές ιδιότητες κεραμικών υλικών υψηλής τεχνολογίας [Λεμής – Πετρόπουλος Παναγιώτης , διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών]
- Εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης μέτρου ελαστικότητας με τη βοήθεια υπερήχων [Πατεράκης Ιωάννης , διπλωματική εργασία , Α.Π.Θ.]
- Bearing damage analysis by calculation of capacitive coupling between inner and outer races of a ball bearing [Jafar Abadi , Firuz Zare , Gerard Ledwich , Arindam Ghosh ,Robert Lorenz, Queensland University of Technology Australia]
- Guide to qualification and certification [Australian Institute for non destructive testing]
- Μελέτη και τεκμηρίωση Εγκαταστάσεων βιομηχανικής ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας [Χρυσικόπουλος Σπυρίδων , μεταπτυχιακή Εργασία , Ε.Μ.Π]
- Εμφάνιση και ψηφιοποίηση φιλμ στην Εγκατάσταση βιομηχανικής ραδιογραφίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας με πρακτικές εφαρμογές [Έξαρχος Γρηγόριος , Διπλωματική Εργασία , Ε.Μ.Π]
- Μελέτη και κατασκευή συσκευής υπερήχων για μέτρηση ελαστικών ιδιοτήτων άμορφων μετάλλων και ημιαγωγών συναρτήσει της θερμοκρασίας [Κωβαίος Ιωάννης , διπλωματική εργασία Πανεπιστήμιο Πατρών]
- Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization [Peter b. Nagy , University of Cincinnati]
- NDE of metal damage : ultrasonic with a damage mechanics model [Hung Yang Yeh , Jung Ho Cheng , National Taiwan University]

- Εισαγωγή στις μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου [Θεόδωρος Τσαγκάρης , Τεχνικό γραφείο Βρεσκοσις]
- Non destructive material testing with ultrasonic [Krautkramer]