



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ & ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μηχανικές Ιδιότητες και Έλεγχος Εξαρτημάτων με Μη Καταστροφικές και Καταστροφικές Μεθόδους

Φλέντζερης Κυριάκος

Επιβλέπων Επίκουρος Καθηγητής Κυτόπουλος Βίκτωρ

Αθήνα, 2013

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	9
Εισαγωγή.....	9
Κεφάλαιο I	19
Οπτικές μέθοδοι εξέτασης.....	20
Οπτική επιθεώρηση (Visual Inspection).....	20
Φωτοελαστικότητα	20
Μέθοδος των καυστικών.....	21
Οπτική Ολογραφία	22
Θερμογραφία.....	24
Τεχνικές Ρεπλίκας	26
Επιφανειακές τεχνικές	29
Δινορεύματα ή επαγωγικά ρεύματα (Eddy Current).....	29
Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particle)	31
Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant)	32
Μέθοδος ψαθυρών επικαλύψεων	34
Ογκομετρικές μέθοδοι	35
Βιομηχανική ακτινογραφία-ραδιογραφία (Industrial Radiography)	35
Ακουστική εκπομπή	38
Ροή ρευστών	41
Υπέρηχοι.....	42
Κεφάλαιο II	47
Μεγέθη των κυμάτων.....	47
Εξίσωση του αρμονικού κύματος	49
Τύποι μηχανικών κυμάτων.....	51
Κύματα χώρου.....	51

Κύματα επιφάνειας.....	54
Ιδιότητες ηχητικών κυμάτων.....	56
Κεφάλαιο III.....	59
Ορισμός υπερήχων	59
Μέθοδοι παραγωγής υπερήχων	59
Μηχανικές μέθοδοι.....	59
Μαγνητοσυστολή	60
Πιεζοηλεκτρική μέθοδος	60
Υπερηχητικές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές	62
Κεφαλές καθέτου δέσμης.....	64
Κεφαλές γωνιακής δέσμης	65
Κεφαλές διπλού κρυστάλλου (transmitter-receiver probes-TR).....	65
Εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές.....	66
Τοπολογία και χαρακτηριστικά δέσμης υπερήχων	66
Τοπολογία ηχητικής δέσμης.....	67
Κεφάλαιο IV.....	71
Πεδίο εφαρμογών υπερήχων	71
Προσδιορισμός της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων	71
Μέτρηση πάχους	71
Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών E, G, ν.....	72
Ανίχνευση ατελειών	72
Προσδιορισμός των τάσεων	73
Έλεγχος και εξέταση της δομής του υλικού.....	73
Έλεγχος της ψαθυρότητας	73
Μη συμβατική κατεργασία των υλικών	73
Προσδιορισμός σκληρότητας-σκληρομέτρηση	73

Συγκόλληση αλουμινίου	74
Υπερηχητικός καθαρισμός υλικών	74
Αποπαραφίνωση του πετρελαίου.....	74
Εξαέρωση υγρών και λιωμένων μετάλλων	74
Άλλες σπουδαίες εφαρμογές των υπέρηχων	74
Βασικές μέθοδοι ελέγχου των υλικών.....	75
Μέθοδος της διελεύσεως	76
Μέθοδος του συντονισμού.....	78
Μέθοδος της παλμοηχούς	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ V	83
Εφελκυσμός	83
Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων	84
Εσωτερική μηχανική φθορά(Damage)	87
Σκληρότητα	90
Στατικές μέθοδοι σκληρομέτρησης	93
Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Brinell.....	93
Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Vickers	94
Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Rockwell	96
Δυναμικές μέθοδοι	97
Μέτρηση της σκληρότητας με εγχάραξη	98
Μέτρηση της σκληρότητας με υπέρηχους.....	98
Υπερηχητικό σκληρόμετρο Microdur 2	98
Τρόπος λειτουργίας	99
Περιοχή εφαρμογής.....	100
Διαδικασία σκληρομέτρησης	101
Κεφάλαιο VI.....	103

Υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11	103
Βαθμονόμηση συσκευής	105
Κεφάλαιο VII	109
Κατεργασία του φιλμ	109
Καθαριότητα	109
Χειρισμός Φιλμ	109
Στάδια Κατεργασίας Φιλμ.....	110
Εμφάνιση	110
Λουτρό Διακοπής	111
Σταθεροποιητής.....	111
Πλύσιμο	112
Στέγνωμα	113
Σκοτεινός θάλαμος	113
Υλικά των δεξαμενών επεξεργασίας.....	115
Αυτόματη εμφάνιση του φιλμ	115
Ελαττώματα του ραδιογραφήματος	116
Ελαττώματα που προκαλούνται πριν από την εμφάνιση.....	116
Ελαττώματα που προξενούνται κατά την εμφάνιση	119
Επιλογή παραμέτρων ραδιογράφισης.....	120
Διαγράμματα έκθεσης.....	120
Συντελεστής ισοδυναμίας	123
Κεφάλαιο VIII	125
Έδρανα και κατηγορίες εδράνων.....	125
Είδη εδράνων κύλισης	127
Υλικά εδράνων κύλισης.....	130
Φθορές στα έδρανα κύλισης	130

Διάρκεια ζωής εδράνων κύλισης	132
Παράγοντες που προκαλούν φθορά στα έδρανα κύλισης.....	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΧ	137
Εύρεση ελαστικών σταθερών	138
Σκληρομέτρηση	150
Εσωτερική μηχανική φθορά	158
Ραδιογραφική επιθεώρηση	162
Πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού	169
Βιβλιογραφία.....	172
Διαδικτυακές πηγές.....	174
Φωτογραφικό υλικό	175

Εικόνα 1: Επιγραφή του 4ου π.Χ. αιώνα, που αναγράφει ψήφισμα με το οποίο καθορίζονται οι τεχνικές και χημικές προδιαγραφές για την κατασκευή μπρούτζινων συνδέσμων των σπονδύλων, κίωνων της Φιλώνειας Στοάς.	11
Εικόνα 2:α) Το πείραμα εφελκυσμού μεταλλικών συρμάτων του Leonardo da Vinci.	12
Εικόνα 3:Οι ΜΚΕ και ΜΚΧ έχουν σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια πρόβλεψης, ανάλυσης και επιδιόρθωσης βλαβών.....	14
Εικόνα 4: Οι κλασικές δεκαπέντε μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα καθώς και η κατάταξή τους σε ομάδες.....	19
Εικόνα 5:Πείραμα με καυστικές.....	21
Εικόνα 6: Βασικό οπτικό σύστημα ολογραφίας.....	24
Εικόνα 7: Θερμογράφημα με το οποίο ροσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της....	25
Εικόνα 8: Χαρακτηριστικοί τύποι θερμικών γεφυρών (κακή μόνωση).....	26
Εικόνα 9: Στοιχειώδης καμπύλη πυκνότητας ρεύματος- τάσης ηλεκτροστίλβωσης.....	28
Εικόνα 10: Διάδοση διαφόρων τύπων ρωγμών α) Ερπυσμός β) Κόπωση γ) Μηχανική διάβρωση δ) Περικρυσταλλική διάβρωση.....	29
Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση επιθεώρησης με δινορεύματα.....	30
Εικόνα 12.....	31
Εικόνα 13: Βήματα εφαρμογής της μεθόδου των διεισδυτικών υγρών.....	34
Εικόνα 14: Εικονική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της βιομηχανικής λειτουργίας και των βασικών στοιχείων της μεθόδου.....	37
Εικόνα 15: Εικονική απεικόνιση μεθόδου ακουστικών εκπομπών.....	39
Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης ενός δείκτη διαφορικής πίεσης μεταξύ ενός δοχείου αναφοράς και ενός υπό εξέταση δοχείου για τον εντοπισμό διαρροής.....	41
Εικόνα 17: Από την πρώτη δημοσίευση για την εφαρμογή των υπερήχων στους ΜΚΕ.....	44
Εικόνα 18: Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός κύματος.....	48
Εικόνα 19: Κανονική τρόποι ταλάντωσης στάσιμων κυμάτων.....	49

Εικόνα 20: Γραφική αναπαράσταση διαμήκων κυμάτων	52
Εικόνα 21: Γραφική αναπαράσταση εγκαρσίων κυμάτων	53
Εικόνα 22: Γραφική αναπαράσταση κυμάτων Rayleigh	55
Εικόνα 23: Γραφική αναπαράσταση κυμάτων Love	56
Εικόνα 24: Ανάκλαση και διάθλαση ενός προσπίτοντος διαμήκους κύματος	58
Εικόνα 25: Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού.....	61
Εικόνα 26: Διάφορες υπερηχητικές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές που χρησιμοποιούνται στους ΜΚΕ αναλόγως την εφαρμογή	62
Εικόνα 27: Γραφική αναπαράσταση μιας τυπικής πιεζοηλεκτρικής κεφαλής καθέτου δέσμης	64
Εικόνα 28: Πιεζοηλεκτρική κεφαλή η οποία εκπέμπη 'σεσημη υπερήχων υπό γωνία.....	65
Εικόνα 29: Γραφική αναπαράσταση μιας κεφαλής διπλού κρυστάλλου	66
Εικόνα 30: Τοπολογία υπερηχητικής δέσμης	67
Εικόνα 31: Νεκρή ζώνη όπως φαίνεται στην οθόνη της συσκευής.....	68
Εικόνα 32: Λήψη στην οθόνη ατέλειας η οποία ανιχνεύεται δύσκολα δεδομένου ότι βρίσκεται στην νεκρή ζώνη και καλύπτεται από τον αρχικό παλμό	68
Εικόνα 33: Απεικόνιση στην οθόνη ατέλειας η οποία βρίσκεται στην νεκρή ζώνη. Στην περίπτωση αυτή υποπτευόμαστε την ύπαρξή της λόγω της πτώσης του παλμού	69
Εικόνα 34: Στην περίπτωση όπου υπάρχει ατέλεια στην νεκρή ζώνη η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό του εμβαδού της διατομής του υπερήχου τότε στην οθόνη λαμβάνουμε μια καμπύλη αυτής της μορφής	69
Εικόνα 35: Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου διελεύσεως ή σκιάς. Η μια κεφαλή η οποία λειτουργεί και σαν πομπός βρίσκεται στην μια πλευρά του υλικού, ενώ η άλλη η οποία λειτουργεί σαν δέκτης τοποθετείται στην απέναντι επιφάνεια.....	76
Εικόνα 36: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της διέλευσης με κεφαλές καθέτου δέσμης	77
Εικόνα 37: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της διέλευσης με κεφαλές γωνιακής δέσμης.....	77
Εικόνα 38: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος του συντονισμού.....	78

Εικόνα 39: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της παλμοηγούς	79
Εικόνα 40: Γραφική αναπαράσταση ανίχνευσης ατελειών σε δοκίμιο με την μέθοδο της παλμοηγούς	80
Εικόνα 41: Τυπικό διάγραμμα DGS με το οποίο υπολογίζουμε το βάθος και το μέγεθος κάποιας ατέλειας.....	81
Εικόνα 42: Τυπική συσκευή εφελκυσμού εργαστηρίου	83
Εικόνα 43: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων	85
Εικόνα 44: Εγκάρσια διατομή αναπαράστασης της μεθόδου κατά VVickers.....	93
Εικόνα 45: Γραφική αναπαράσταση του διαμαντιού σχήματος τετράπλευρης πυραμίδας που χρησιμοποιείται στην δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Vickers ...	95
Εικόνα 46: Τυπικό σκληρόμετρο κατά Vickers σταθερού τύπου.....	96
Εικόνα 47: Το υπερηχητικό σκληρόμετρο του εργαστηρίου	99
Εικόνα 48: Ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11 του εργαστηρίου ..	103
Εικόνα 49: Πρόσοψη της υπερηχητικής συσκευής και κομβία λειτουργιών	104
Εικόνα 50: Διάφορων τύπου πλάκες βαθμονόμησης.....	106
Εικόνα 51: Σχεδιάγραμμα δοκιμίου αναφοράς V1.....	106
Εικόνα 52: Η CRT οθόνη της υπερηχητικής συσκευής μετά από την βαθμονόμηση της συσκευής	108
Εικόνα 53: Διάγραμμα έκθεσης	122
Εικόνα 54: Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν).	126
Εικόνα 55: Έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα).....	127
Εικόνα 56: Εξάρτηση διάρκειας ζωής εδράνων με το ποσοστό εδράνων.....	135

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε σκοπό αφενός την μελέτη και τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων στοιχείων μηχανών και αφετέρου την αξιολόγηση της λειτουργικότητάς τους κάνοντας χρήση κυρίως μη καταστρεπτικών μεθόδων. Η εκπόνησή της έγινε στο Εργαστήριο Μη Καταστροφικών Ελέγχων του Τομέα Μηχανικής της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αισθάνομαι υποχρεωμένος να ευχαριστήσω ολόκληρη την ομάδα καθηγητών με τους οποίους συνεργάστηκα. Ευχαριστώ λοιπόν τον κ Κυτόπουλο Βύρωνα επίκουρο καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών ο οποίος ήταν και ο επιβλέπων καθώς και τον κ. Σιδερίδη Αιμίλιο επίκουρο καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών για την επίβλεψη και καθοδήγησή τους κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Ειδικές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να εκφράσω στον ομότιμο καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, κ. Πρασιανάκη Ιωάννη. Η βοήθεια και καθοδήγηση του οποίου ήταν πολύ σημαντική.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον κ. Παπαδόπουλο Μυροφόρο τομεάρχη Υλικών και Αποθηκών ο οποίος μας παρείχε και τα δοκίμια που χρησιμοποιήσαμε. Ένα ευχαριστώ επίσης στην εταιρεία ΔΟΝΟΥΠΟΓΛΟΥ ΠΑΝΤΕΛΗΣ Κ ΑΕ η οποία ειδικεύεται στο εμπόριο ρουλεμάν και βιομηχανικών ειδών η οποία μας παρείχε όλα τα απαιτούμενα δοκίμια που χρειαστήκαμε.

Ένα θερμό ευχαριστώ στον επίκουρο καθηγητή κ. Πετρόπουλο Νικόλαο επίβλεψη και καθοδήγηση του στις εγκαταστάσεις Βιομηχανικής Ραδιογραφίας στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας στην σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

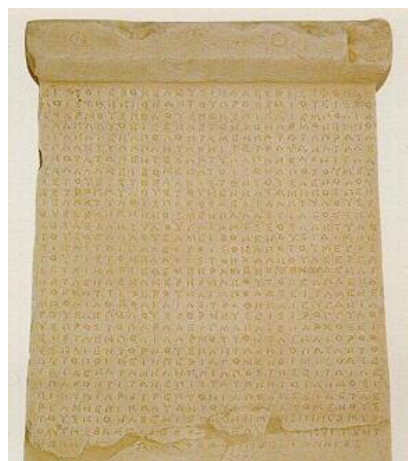
Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό φοιτητή του ΔΠΜΣ Εφαρμοσμένης Μηχανικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών Κοτσανάκη Παναγιώτη για την αγαστή συνεργασία μας όλο

αυτό το διάστημα. Επίσης ένα ευχαριστώ στον υποψήφιο διδάκτορα Πετράκη Άγγελο για την βοήθεια του.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ειδικά τους γονείς μου για την στήριξή τους, την βοήθειά τους, την ηθική τους συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και την επίτευξη των στόχων μου.

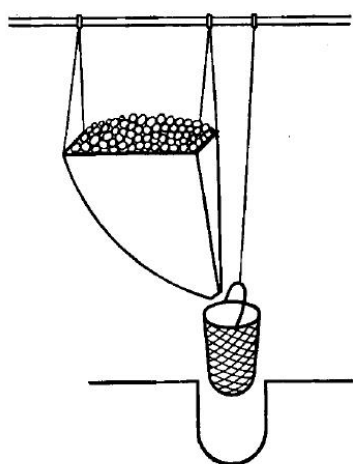
Εισαγωγή

Ο άνθρωπος κατά την πορεία του μέσα στους αιώνες βελτίωσε την ποιότητα ζωής του. Σχεδίασε και υλοποίησε αντικείμενα και κατασκευές με κύριο σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών του. Ανάγκες όχι μόνο προσωπικές αλλά και συλλογικές σε επίπεδο κοινωνίας ολόκληρης. Αναφερόμενοι σε αυτά τα επιτεύγματα μπορούμε να συμπεριλάβουμε από πολύ μικρά εξαρτήματα και εργαλεία μέχρι τεράστιες και ογκώδης κατασκευές που άντεξαν στον χρόνο. Η ανάγκη για ανθεκτικές κατασκευές και προϊόντα που να αντέχουν στα βάθη των αιώνων, απαιτούσε τον έλεγχο ακόμη και με υποκειμενικό ή εμπειρικό τρόπο. Προτού ο άνθρωπος αναπτύξει τεχνολογία μπορούσε να χρησιμοποιήσει ως μέσα τα αισθητήριά του όργανα. Με το πέρασμα των αιώνων κατάφερε να αναπτύξει τεχνικές δημιουργώντας έτσι πιο περίπλοκες και αντικειμενικές μορφές ελέγχου. Αδιαμφισβήτητη απόδειξη για την αξία που είχε ο έλεγχος και η αξιολόγηση των κατασκευών από αρχαιοτάτων χρόνων, αποτελεί το αρχαιότερο ευρωπαϊκό πρότυπο ποιότητας που καταρτίσθηκε και έχει βρεθεί, το οποίο βρίσκεται στο μουσείο της Ελευσίνας. Πρόκειται για μια επιγραφή του 4ου π.Χ. αιώνα, που αναγράφει ψήφισμα με το οποίο καθορίζονται οι τεχνικές και χημικές προδιαγραφές για την κατασκευή μπρούτζινων συνδέσμων των σπονδύλων, κίωνων της Φιλώνειας Στοάς.

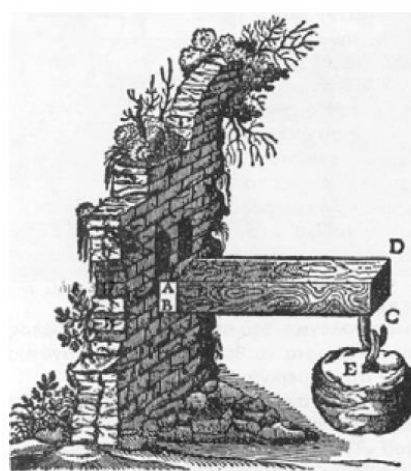


Εικόνα 1: Επιγραφή του 4ου π.Χ. αιώνα, που αναγράφει ψήφισμα με το οποίο καθορίζονται οι τεχνικές και χημικές προδιαγραφές για την κατασκευή μπρούτζινων συνδέσμων των σπονδύλων, κίωνων της Φιλώνειας Στοάς.

Για τον καλύτερο έλεγχο και την δημιουργία ασφαλών κατασκευών απαιτείται αφενός η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και της δομής των υλικών και αφετέρου η γνώση της αντοχής τους. Ο πρώτος επιστήμονας ο οποίος συνέβαλλε προς αυτή την κατεύθυνση ήταν ο Λεονάρντο ντα Βίντσι(1452-1519) και λίγο αργότερα ο Γαλιλαίος(1562-1642). Από τότε μέχρι σήμερα πολλοί επιστήμονες έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη της επιστήμης της μηχανικής και της αντοχής των υλικών μέσω της ανάπτυξης καταστρεπτικών μεθόδων οδηγώντας έτσι στην πλήρη κατανόηση των αρχών λειτουργίας και συμπεριφοράς των υλικών.



(α)



(β)

Εικόνα 2:α) Το πείραμα εφελκυσμού μεταλλικών συρμάτων του Leonardo da Vinci.

β) Το πείραμα της κάμψης του G.L. Galileo

Με τις καταστροφικές μεθόδους, έχουμε πλέον την δυνατότητα να εξάγουμε πλήρως όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες και ιδιότητες για κάποιο υλικό με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης προσδιορίζουμε τις μέγιστες εκείνες καταπονήσεις τις οποίες μπορεί να φέρει ένα υλικό πέραν των οποίων μεταβαίνει στο στάδιο της αστοχίας. Τα βασικότερα πειράματα της συγκεκριμένης οικογένειας είναι εκείνα του εφελκυσμού, της θλίψης, της κάμψης και της στρέψης. Φυσικά υπάρχουν και άλλοι έλεγχοι αναλόγως τις απαιτούμενες πληροφορίες για δεδομένη εφαρμογή που απαιτούνται. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μεθόδων είναι όπως αναφέραμε παραπάνω ότι καθορίζουν πλήρως και με σαφήνεια την συμπεριφορά του υλικού. Σημαντική λεπτομέρεια την οποία και

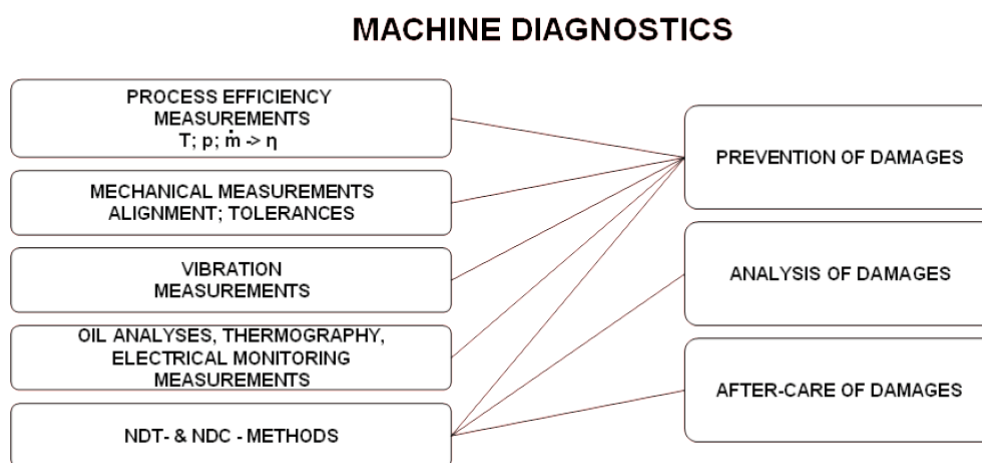
πρέπει να λάβουμε υπόψη μας, είναι, πώς για να εκτελεσθούν τέτοιοι έλεγχοι θα πρέπει τα υπό εξέταση δοκίμια να καταπονηθούν μέχρις ότου να αστοχήσουν. Επίσης απαιτείται η παρασκευή συνήθως μεγάλου αριθμού δοκιμίων με αυστηρά καθορισμένες τις διαστάσεις τους οι οποίες και θα πρέπει να βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα απαιτούμενα από την εφαρμογή πρότυπα. Είναι λοιπόν μια διαδικασία χρονοβόρα, αρκετές φορές πολυέξοδη και το κυριότερο είναι πρόκειται για ένα επεμβατικό έλεγχο ο οποίος επηρεάζει την λειτουργικότητα του υλικού καθιστώντας έτσι αδύνατη την μελλοντική του χρήση. Επίσης ατέλειες στο εσωτερικό του υλικού οι οποίες ενδεχομένως να οφείλονται για παράδειγμα σε κατασκευαστικό σφάλμα δεν μπορούν άμεσα να γίνουν αντιληπτές και πόσο μάλλον να διορθωθούν.

Από την άλλη στις μέρες μας, όπου στους κλάδους της βιομηχανίας και των κατασκευών επικρατεί τεράστιος ανταγωνισμός, η παγκόσμια αγορά θέτει ολοένα και περισσότερες απαιτήσεις για αύξηση της παραγωγής με υψηλή και σταθερή ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων και ταυτόχρονη μείωση του κόστους επενδύσεων σε ακριβό εξοπλισμό και των χρονικών πλαισίων απόσβεσής τους. Ακόμη, θεσπίζονται προδιαγραφές για την εξασφάλιση της ασφάλειας των εργαζομένων καθώς και της τεχνογνωσίας που αυτοί πρέπει να έχουν. Μεγάλο βάρος δίνεται επίσης στην δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις και στόχοι μπορούν να επιτευχθούν και οι κλάδοι αυτοί να είναι απόλυτα εναρμονισμένοι με τις αντίστοιχες προδιαγραφές, μόνο αν η γραμμή παραγωγής συντηρείται ομαλά, ο εξοπλισμός βρίσκεται εν λειτουργία και διατηρείται στις σωστές συνθήκες λειτουργίας. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται αν εφαρμόζεται μια λειτουργική φιλοσοφία συντήρησης και εφαρμόζονται σωστές διαγνωστικές μέθοδοι προς αποφυγή βλαβών σε εξοπλισμό με αποτέλεσμα την μείωση των κερδών. Σε αυτή την προσπάθεια πρόληψης τα σημαντικότερα εργαλεία αποτελούν οι ανθρώπινες αισθήσεις, η επαγρύπνηση των μηχανικών και η απαραίτητη τεχνογνωσία σε διαγνωστικές μεθόδους.

Οι διαγνωστικές μέθοδοι ασφαλείας είναι όλες εκείνες οι μέθοδοι ασφαλείας με τις οποίες ελέγχονται τμήματα του εξοπλισμού ή της παραγωγής

χωρίς αυτά να καταστρέφονται. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί αμέσως μετά την κατασκευή τους, στο στάδιο όπου ελέγχονται για την έγκριση ή όχι του προϊόντος, ή ακόμα και κατά την διάρκεια λειτουργίας-χρήσης τους στα πλαίσια κάποιας προληπτικής συντήρησης. Επίσης έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί για εντοπισμό βλαβών, μελέτη καταστροφών έτσι ώστε να αναλυθούν και βέβαια να σχεδιαστούν οι μετέπειτα διεργασίες αποκατάστασης.



Εικόνα 3: Οι ΜΚΕ και ΜΚΧ έχουν σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια πρόβλεψης, ανάλυσης και επιδιόρθωσης βλαβών.

Ο μη καταστροφικός έλεγχος ανήκει στις πιο σημαντικές μεθόδους ελέγχου ασφαλείας. Στην εικόνα 3 φαίνεται πως παίζει σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια πρόβλεψης, ανάλυσης και επιδιόρθωσης βλαβών. Πρόκειται για έναν ταχέως αναπτυσσόμενο ευρύτατο διεπιστημονικό τομέα μεταξύ της μηχανικής και της φυσικής. Διαδραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο στη βεβαίωση ότι τα δομικά συστατικά και συστήματα εκτελούν τη λειτουργία τους με έναν αξιόπιστο και οικονομικώς αποδοτικό τρόπο.

Η βασική ιδέα στην εφαρμογή των ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΩΝ (ΜΚΕ ή NDT methods) είναι ο προσδιορισμός ασυνεχειών και ο καθορισμός των θέσεων τους μέσα στο υλικό. Τέτοιες ασυνέχειες είναι κυρίως ρωγμές αλλά μπορούν εμφανιστούν και άλλα είδη (εγκλείσματα, φυσαλίδες κ.α.) και δημιουργούνται είτε κατά το στάδιο της παραγωγής είτε κατά την λειτουργία. Τα αίτια εμφάνισης τους μπορεί να είναι εσφαλμένες τεχνικές παραγωγής, μηχανική

καταπόνηση κατά την διάρκεια λειτουργίας που οδηγεί σε αστοχία καθώς και χημική καταπόνηση με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση λόγω διάβρωσης. Το αρχικό στάδιο ενός μη καταστροφικού ελέγχου περιλαμβάνει τον εντοπισμό της θέσης μιας ατέλειας. Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της αποτίμησης ή διαφορετικά Non Destructive Evaluation(NDE) όπου η έννοια του NDE είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον όρο NDT. Εν συνεχεία γίνεται υπολογισμός του μεγέθους της και της γεωμετρίας της. Ακολουθεί αξιολόγηση της επικινδυνότητάς της συγκρίνοντάς την με κρίσιμα μεγέθη και τέλος προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπισή και την επισκευή της καθώς επίσης και μέτρα για την αποφυγή μιας κάποιας ανάλογης περίπτωσης στο μέλλον. Κύριος σκοπός λοιπόν των ΜΚΕ είναι η έγκαιρη εύρεση ατελειών προτού προλάβουν να επεκταθούν οδηγώντας έτσι σε μια ξαφνική κατάρρευση με πιθανά αποτελέσματα απώλειες σε ανθρώπινο δυναμικό και αύξηση των εξόδων.

Μη καταστροφικοί χρησιμοποιούνται επίσης και για τον χαρακτηρισμό των υλικών ΜΚΧ ή αλλιώς Nondestructive Characterization ο οποίος συνήθως δεν αναφέρεται ξεχωριστά από τους ΜΚΕ ως αναπόσπαστο κομμάτι. Πρόκειται για μεθόδους οι οποίες έχουν σαν στόχο να προσεγγίσουν μηχανικές ιδιότητες του υλικού οι οποίες ως γνωστόν μεταβάλλονται μέσα στο χρόνο. Αναλύοντας μετρήσεις όπως σκληρότητα, μέτρο ελαστικότητας, αγωγιμότητα κ.α. μας δίνεται η δυνατότητα να προβλέψουμε την συμπεριφορά του υλικού και δει μια μελλοντική του αστοχία.

Οι τεχνικοί και οι μηχανικοί που χρησιμοποιούν τους ΜΚΕ, καθορίζουν και εφαρμόζουν δοκιμές οι οποίες προδίδουν τα χαρακτηριστικά και να εντοπίζουν τις ατέλειες ενός υλικού που ειδάλλως θα ανάγκαζαν αεροπλάνα να συντριβούν, αντιδραστήρες να αστοχήσουν, τρένα να εκτροχιαστούν, σωληνώσεις να εκραγούν, και άλλα ποικίλα, κάποια λιγότερο ακραία όμως εξίσου επικίνδυνα, γεγονότα. Αυτοί οι έλεγχοι διενεργούνται με τρόπο που δεν έχει επιπτώσεις στη μελλοντική χρηστικότητα του υπό εξέταση, αντικειμένου ή υλικού. Με άλλα λόγια οι ΜΚΕ επιτρέπουν τον έλεγχο και τη μέτρηση εξαρτημάτων και υλικών χωρίς να οδηγούν στην καταστροφή τους, όπως άλλωστε δικαιολογεί και το όνομά τους. Αυτή η ιδιότητα, τους καθιστά ένα

εξαιρετικό εργαλείο για την ισορροπία μεταξύ του αποτελεσματικού ποιοτικού ελέγχου και της οικονομικής αποδοτικότητας. Μάλιστα αυτές οι μέθοδοι αποκτούν ιδιαίτερη σημασία και ενδιαφέρον σε περιπτώσεις κατασκευών ή μηχανών υψηλού κινδύνου για τον άνθρωπο και το περιβάλλον όπως για παράδειγμα πυρηνικοί αντιδραστήρες.

Η ραγδαία ανάπτυξη των επιστημών και ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων για τον ποιοτικό έλεγχο με ΜΚΕ των υλικών. Στις επόμενες γραμμές θα αναπτύξουμε εν συντομία και επιγραμματικά μερικές από τις κυριότερες μεθόδους ΜΚΕ που βρίσκουν σήμερα εφαρμογή στην βιομηχανία. Η προτυποποίηση και πιστοποίηση των πρώτων κλασικών μεθόδων ξεκίνησε πριν από μισό αιώνα στις ΗΠΑ, την Γερμανία, την Μεγάλη Βρετανία και την Ιαπωνία. Πέραν των εθνικών προτύπων άρχισαν να εμφανίζονται τα πρότυπα ISO. Σήμερα οι διαδικασίες των ΜΚΕ υπαγορεύονται από διεθνή πρότυπα, ακολουθούν συγκεκριμένες διαδικασίες και προδιαγραφές ενώ μπορούν να εκτελεστούν από κατάλληλα εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό. Στις μέρες μας στις περισσότερες βιομηχανικά προηγμένες χώρες ακολουθείται ένα σύστημα όπου τα πιστοποιητικά δίδονται σε τρία level (Ivl 1, Ivl 2, Ivl 3) για κάθε μέθοδο. Στην Ελλάδα η Ελληνική Εταιρεία Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΕΛΕΜΚΕ) δραστηριοποιείται από το 1987. Σύμφωνα με το καταστατικό της εταιρείας, και τις διεθνείς συμφωνίες που έχει υπογράψει τόσο με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Μη Καταστροφικών Ελέγχων (EFNDT), όσο και με την Διεθνή Ένωση Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ICNDT) είναι ένα Εθνικό Επιστημονικό Σωματείο μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα, του οποίου οι κύριοι σκοποί είναι να μεριμνά για την εκπαίδευση και πιστοποίηση των μελών της και άλλων στους ΜΚΕ, να προάγει την τεχνολογία των ΜΚΕ στην Ελλάδα και να παρέχει συμβουλές επί ποιοτικού ελέγχου και ΜΚΕ

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ εξαιτίας της μη παρεμβατικής φύσης τους είναι ευρύτατες. Κάποια παραδείγματα εφαρμογών είναι τα ακόλουθα

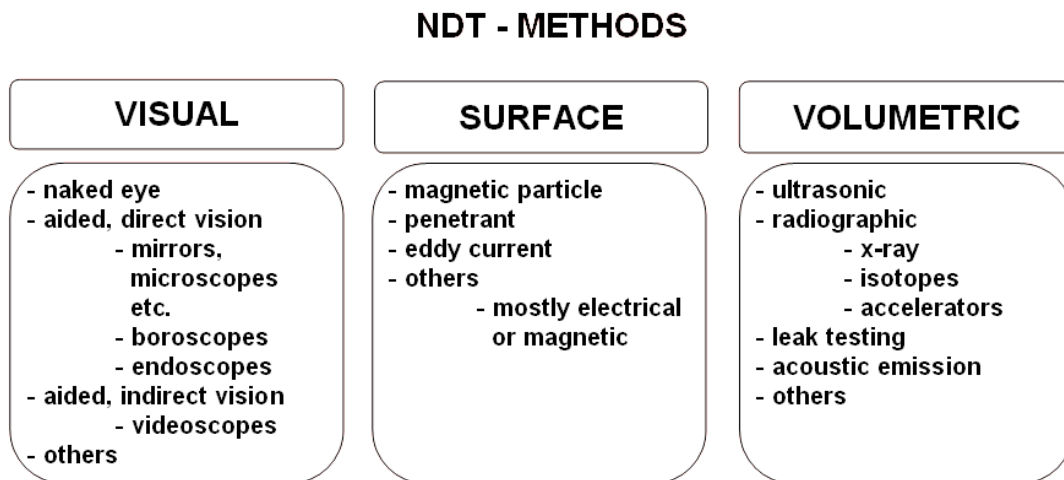
- ❖ Αυτοκινητοβιομηχανία & Ναυπηγεία (μηχανές, πλαίσια, ελάσματα κτλ)
- ❖ Κατασκευές (γέφυρες, κτίρια, φράγματα)
- ❖ Πετροχημικές, Πυρηνικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας

- ❖ Ορυχεία
- ❖ Σιδηρόδρομο
- ❖ Πετρελαϊκή βιομηχανία
- ❖ Ιατρική
- ❖ Καθώς και πολλές άλλες

Κεφάλαιο I

Στο ακόλουθο κεφάλαιο κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν τεχνικές Μη Καταστροφικών Ελέγχων. Θα περιγράψουμε επιγραμματικά και με τρόπο συνοπτικό τις κυριότερες τεχνικές οι οποίες βρίσκουν κατά κόρον εφαρμογή σήμερα στην βιομηχανία, τις κατασκευές και τον κλάδο της έρευνας.

Για να διαχωρίσουμε τις μεθόδους ΜΚΕ τις χωρίζουμε σε τρεις βασικές κατηγορίες: οπτικές, επιφανειακές και ογκομετρικές μεθόδους. Αυτός ο διαχωρισμός πιθανότατα να ξεκίνησε από τα πρότυπα δοχείων πίεσης από την ASME (ASME pressure vessel codes). Η βασική ιδέα πάνω σε αυτή την κατηγοριοποίηση είναι ότι ένα εξάρτημα όσο περισσότερο καταπονηθεί τόσο περισσότερες κατηγορίες χρειάζονται. Οι κλασικές δεκαπέντε μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα καθώς και η κατάταξή τους σε ομάδες φαίνονται στην εικόνα 4 που ακολουθεί.



Εικόνα 4: Οι κλασικές δεκαπέντε μέθοδοι που βρίσκουν εφαρμογή σήμερα καθώς και η κατάταξή τους σε ομάδες

Οπτικές μέθοδοι εξέτασης

Οπτική επιθεώρηση (Visual Inspection)

Είναι καταρχάς η πιο απλή και οικονομική μέθοδος και συνεπώς ο πιο διαδεδομένος τρόπος ΜΚΕ. Παράλληλα όμως είναι και η λιγότερο αξιόπιστη μέθοδος εύρεσης οποιονδήποτε ατελειών ειδικά αυτών στο μέγεθος των ρωγμών. Η μέθοδος εξαρτάται κυρίως από την επαγρύπνηση, την εμπειρία κι την διακριτική ικανότητα του μηχανικού καθώς ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εύρεση και την αξιολόγηση ατελειών. Τα εργαλεία που απαιτούνται για την εκτέλεση αυτών των ελέγχων πέραν του γυμνού ματιού είναι κυρίως οπτικά βοηθήματα όπως ενδοσκόπια, εύκαμπτα ή άκαμπτα μικροσκόπια, καθρέπτες και μεγεθυντικοί φακοί.

Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου απαραίτητη είναι η σωστή προετοιμασία των προς εξέταση επιφανειών έτσι ώστε να εξασφαλιστούν οι ιδανικές συνθήκες οι οποίες θα ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα εσφαλμένης γνωμάτευσης. Τυχόν ακαθαρσίες, γράσα και σκουριές για παράδειγμα θα πρέπει να απομακρύνονται. Απαραίτητος είναι επίσης ο κατάλληλος φωτισμός κατά την ώρα της εξέτασης.

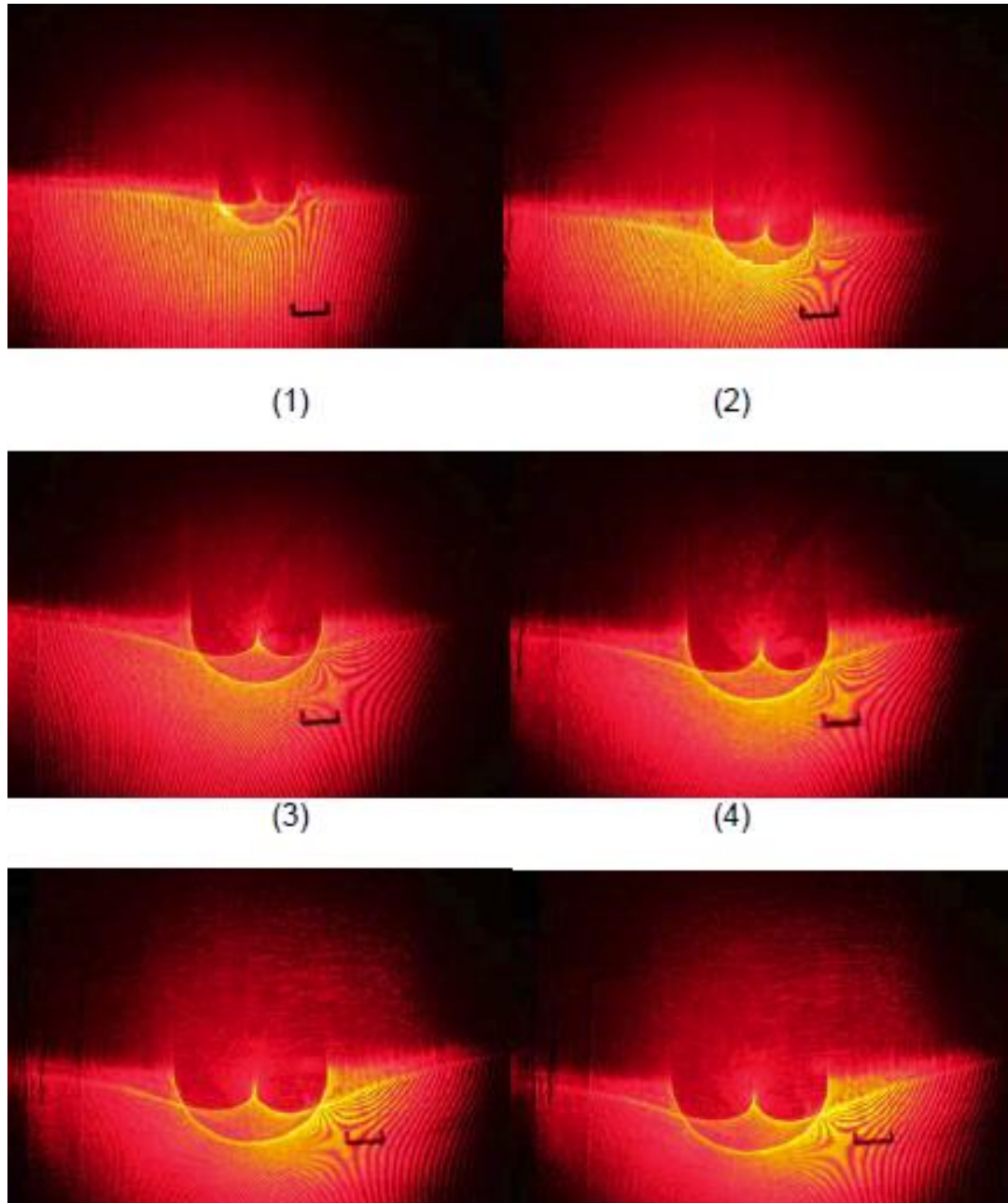
Μπορούμε να χωρίσουμε τους οπτικούς ελέγχους σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι αυτή που βασίζεται στην γεωμετρική οπτική και η δεύτερη στην φυσική οπτική. Έτσι λοιπόν στην πρώτη κατηγορία εμπεριέχονται εργαλεία όπως μικροσκόπια, μεγεθυντικοί φακοί κτλ. Στην δεύτερη ανήκουν μέθοδοι οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την κυματική φύση του φωτός, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με την συμβολή του φωτός στην φωτοελαστικότητα, την ολογραφία και τις καυστικές.

Φωτοελαστικότητα

Πρόκειται για μια ιδιαίτερα χρήσιμη πειραματική μέθοδο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων.

Ενδείκνυται για κατασκευές οι οποίες έχουν πολύπλοκο σχήμα ή καταπονούνται σε σύνθετη φόρτιση.

Μέθοδος των καυστικών



Εικόνα 5: Πείραμα με καυστικές

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην κλασική καυστική, η οποία είναι μια ιδιόμορφη καμπύλη. Σχηματίζεται από την συγκέντρωση των αποκλινόντων ανακλωμένων ακτινών οι οποίες προέρχονται από την πρόσπτωση μιας φωτεινής δέσμης πάνω σε κοίλο ή κυρτό κάτοπτρο. Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι μια τασική ιδιομορφία ενός σώματος για παράδειγμα γύρω από το άκρο μιας ρωγμής είναι δυνατόν, μέσω μιας απλής οπτικής διάταξης και εφαρμογή νόμων της οπτικής, να μετατραπεί σε οπτική ιδιομορφία δηλαδή σε μια φωτεινή καμπύλη στο χώρο την οποία καλούμε καυστική. Μέσω της μελέτης της καυστικής μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες και συμπεράσματα για τις τασικές ιδιομορφίες. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Τέτοια μπορεί να είναι η μελέτη του συντελεστή εντάσεως σε ισότροπα και ανισότροπα υλικά, υπολογισμός οπτικών σταθερών, μελέτη φορτίων εφαρμοζόμενων στο σύνορο ελαστικών σωμάτων, προβλήματα επαφής κ.α.

Οπτική Ολογραφία

Είναι μια μέθοδος παραγωγής εικόνας η οποία δίνει την δυνατότητα τρισδιάστατης προβολής ενός σχετικά ανακλαστικού αντικειμένου αυθαίρετου σχήματος μέσω μιας κατάλληλα φωτιζόμενης φωτογραφικής πλάκας. Αυτή η αποτύπωση γίνεται με μορφή κροσσών συμβολής. Οι κροσσοί δημιουργούνται μέσω του φαινομένου της συμβολής δύο δεσμών σύμφωνου φωτός. Οι δύο δέσμες προέρχονται από την ίδια φωτεινή πηγή. Η μία όμως προέρχεται απευθείας από αυτήν, ενώ η δεύτερη προσπίπτει ταυτόχρονα στην φωτογραφική πλάκα αφού προηγουμένως ανακλαστεί στο προς εξέταση αντικείμενο. Αναγκαία συνθήκη να υπάρξει συμβολή είναι τα δύο κύματα που συμβάλλουν να είναι σύμφωνα.

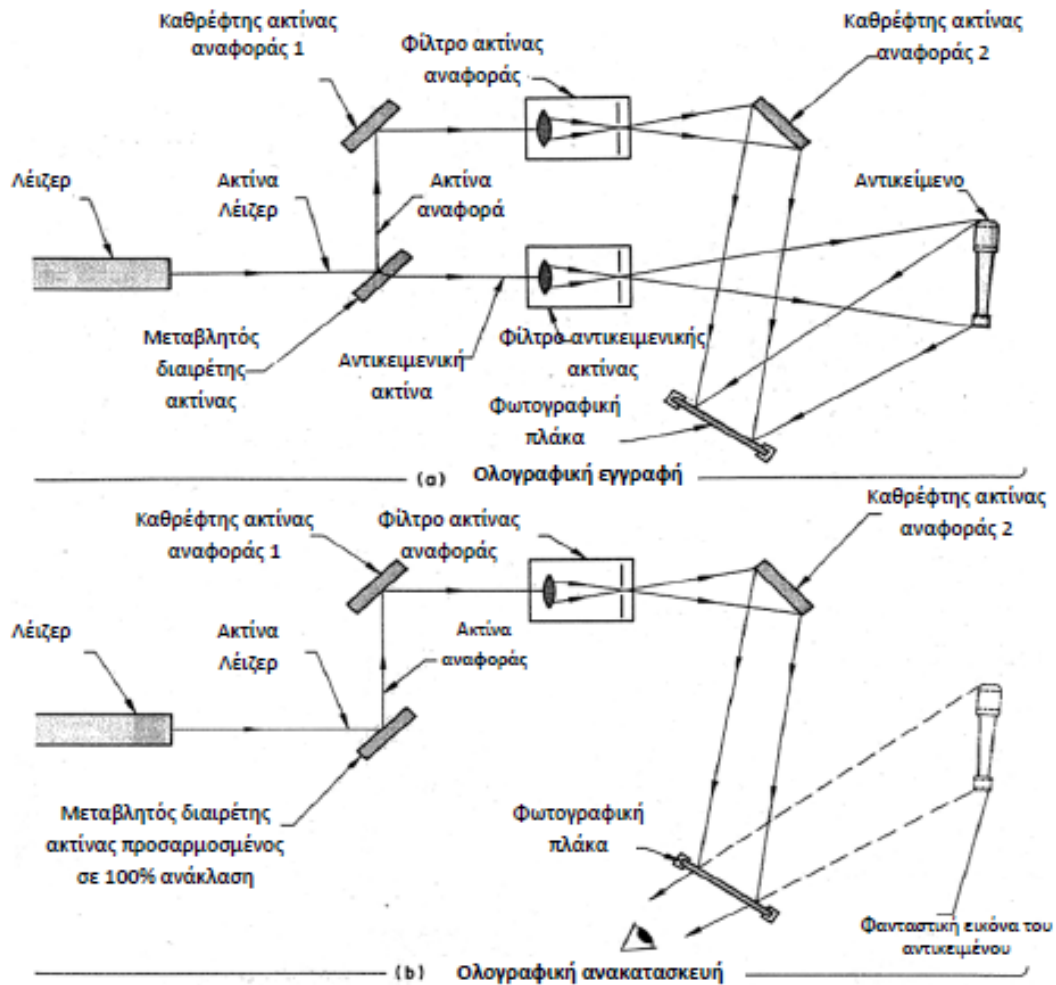
Η μέθοδος στηρίζεται στην σύγκριση δύο ολογραμμάτων του ίδιου αντικειμένου από τα οποία το ένα λαμβάνεται προτού εφαρμοσθεί στο δοκίμιο ένα αίτιο μεταβολής της εντατικής κατάστασης και το δεύτερο μετά. Για την λήψη δύο χρήσιμων ολογραμμάτων θα πρέπει η φωτογραφική πλάκα να φωτισθεί με ίδια οπτική διάταξη.

Στο ολόγραμμα καταγράφεται τόσο η φάση, όσο και η ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Μέσω της σύγκρισης δύο ολογραμμάτων κάποιου υλικού,

τα οποία φυσικά έχουν κατασκευασθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, όπως εξηγείται και παραπάνω, έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε τυχούσες μεταβολές στο σχήμα της επιφάνειας του. Πιο συγκεκριμένα το κάθε ολόγραμμα είναι χαρακτηριστικό του εντατικού πεδίου μέσα στο οποίο βρίσκεται το σώμα. Αποτυπώνοντας λοιπόν την μορφή του πεδίου των μετατοπίσεων μέσω αυτού μπορούμε να εξάγουμε και το εντατικό.

Στην ολογραφία όταν γίνεται χρήση ορατού φωτός το ολόγραμμα εγγράφεται με ένα οπτικό σύστημα το οποίο καλείται ολοκάμερα. Μια μονοχρωματική ακτίνα laser διαιρείται σε δύο ακτίνες. Η μια λέγεται αντικειμενική και η άλλη αναφορά. Η διαίρεση επιτυγχάνεται με έναν μεταβλητό διαιρέτη ακτίνας. Η αντικειμενική ακτίνα είναι εκείνη που φωτίζει ομοιόμορφα το αντικείμενο αφού πρώτα φιλτραριστεί μέσω ενός φακού ο οποίος περιορίζει την επίδραση ρύπων και σκόνης στην δέσμη. Μέσω μιας φωτογραφικής πλάκας υψηλής ανάλυσης συλλέγεται ένα ποσοστό της ακτίνας που ανακλάται. Η ακτίνα αναφοράς κατευθύνεται μέσω ενός φίλτρου και από ένα σύστημα καθρεπτών στην φωτογραφική πλάκα. Με τις δύο αυτές συνεκτικές ακτίνες να εκτίθενται πάνω στην φωτογραφική πλάκα παράγεται ένα μοντέλο παρεμβολής. Αυτό το μοντέλο καταγράφεται και περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την ανακατασκευή υψηλής τρισδιάστατης εικόνας του αντικειμένου. Η διάταξη που περιγράφουμε φαίνεται στην εικόνα 6.

Για την ανακατασκευή, το μοντέλο παρεμβολής του ολογράμματος φωτίζεται από την ακτίνα αναφοράς η οποία φιλτράρεται όπως προηγουμένως. Η δέσμη που προσπίπτει στο μοντέλο το οποίο λειτουργεί σαν κιγκλίδωμα αναφοράς παράγει τρεις ακτίνες με διαφορετικές γωνίες. Η μία είναι πρώτης τάξης και η δύο άλλες δευτέρας τάξης περιθλώμενες ακτίνες. Αυτές οι δύο παράγουν φανταστικά και αληθινά είδωλα του αντικειμένου. Η αληθινή εικόνα είναι ψευδοσκοπική και το αντίθετο η φανταστική. Για τον λόγο αυτό η φανταστική εικόνα είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος.

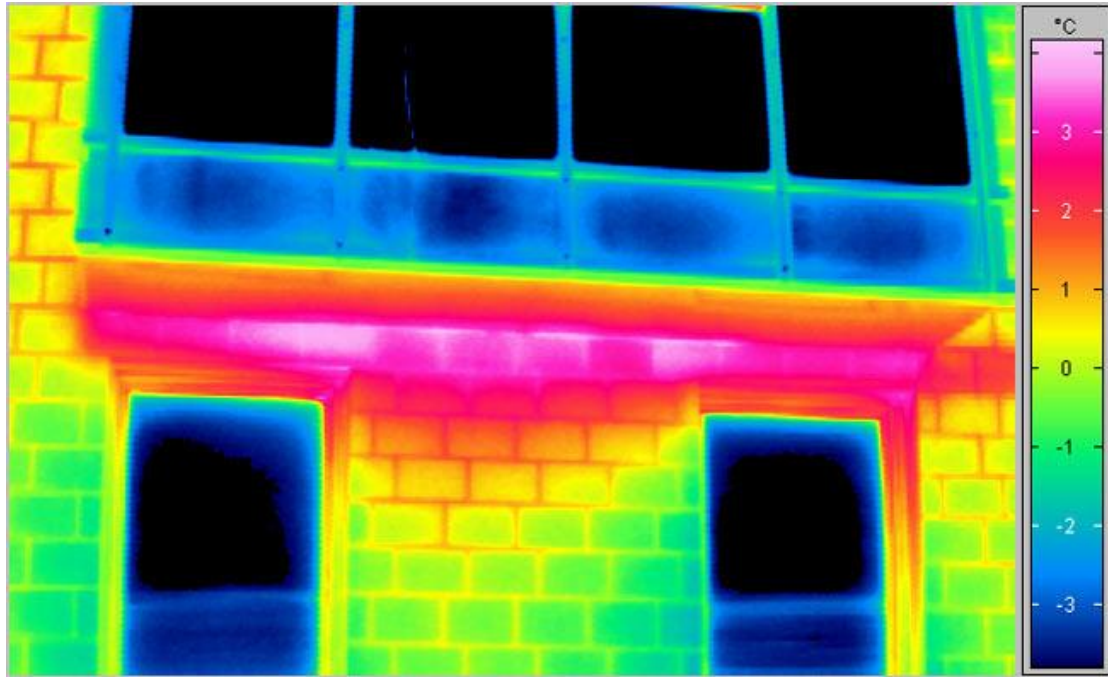


Εικόνα 6: Βασικό οπτικό σύστημα ολογραφίας

Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει μια πληθώρα εφαρμογών σε πεδία όπως την μέτρηση παραμορφώσεων, την φωτογραμμετρία, την υποβρύχια φωτογραφία, την ολογραφική ακτινογραφία, την μικροσκοπία, την ακουστική ολογραφία κ.α.

Θερμογραφία

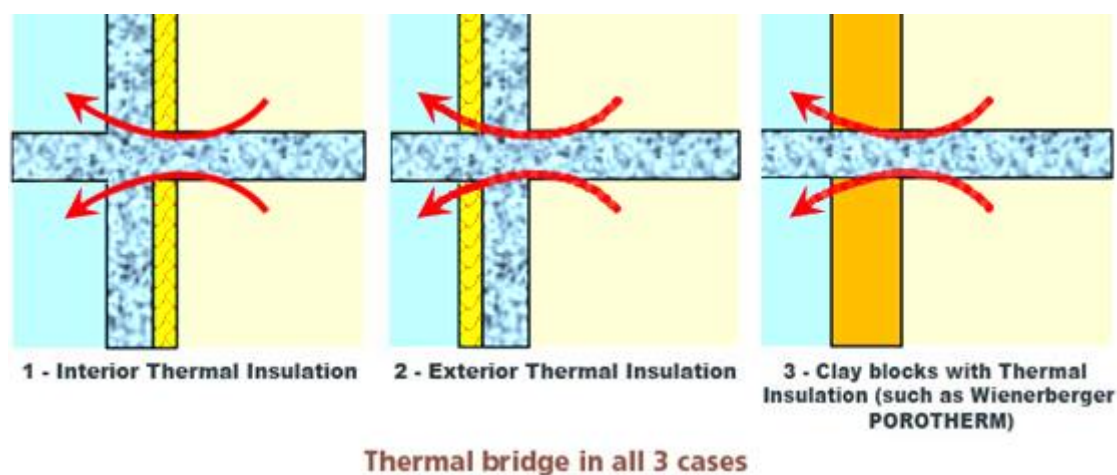
Η θερμογραφία είναι μία μέθοδος με την οποία ανιχνεύουμε τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις επιφάνειες διαφόρων υλικών. Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της.



Εικόνα 7: Θερμογράφημα με το οποίο προσδιορίζουμε και ερμηνεύουμε τις θερμοκρασιακές διαφορές που εμφανίζονται στα υλικά και στην κατασκευή εν γένει και εξάγουμε συμπεράσματα ως προς την ορθή θερμική θωράκισή της.

Η θερμογραφία ή η υπέρυθρη φωτογράφιση, ανιχνεύει την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας και προκύπτει οπτική απεικόνιση του θερμικού σήματος (θερμογράφημα). Με την θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας αλλά η μεταβολή της επιφανειακής ακτινοβολίας.

Η θερμογραφία βασίζεται στην αρχή ότι κάθε επιφάνεια εκπέμπει ενέργεια με την μορφή της θερμοκρασιακής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος που εκπέμπεται εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας το μήκος κύματος γίνεται βραχύτερο και στην περίπτωση πολύ μεγάλων θερμοκρασιών βρίσκεται στο ορατό φάσμα (π.χ. πυρακτωμένη άκρη βελόνας). Στην θερμοκρασία δωματίου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι της τάξεως των 10 μm (στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος). Η ακτινοβολία ανιχνεύεται με κατάλληλες ανιχνευτικές διατάξεις (θερμοκάμερες) οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας το οποίο με κατάλληλη βαθμονόμηση εκφράζεται σε θερμοκρασία.



Εικόνα 8: Χαρακτηριστικοί τύποι θερμικών γεφυρών (κακή μόνωση)

Με την θερμογραφία εντοπίζουμε θερμικές γέφυρες (κακή μόνωση) στο κέλυφος του κτηρίου, σημεία διαφυγής θερμού αέρα από το κτήριο, αγωγούς θερμού κρύου νερού ή αέρα μέσα στην κατασκευή ενός κτηρίου, διαφορετικά υλικά μέσα σε μία κατασκευή, ύπαρξη νερού μέσα στα υλικά και υποεπιφανειακές ανωμαλίες στα υλικά. Οι φυσικές παράμετροι που επηρεάζουν την υπέρυθη ακτινοβολία που μετράται κατά την θερμογράφιση είναι: η ικανότητα εκπομπής υπέρυθρης ακτινοβολίας της επιφάνειας (εκφράζεται από τον συντελεστή εκπομπής και συγκρίνεται με εκείνη του μέλανος σώματος) η επιφανειακή θερμοκρασία, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμοχωρητικότητα, το πάχος του θερμαινόμενου στρώματος και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι μετρήσεις επηρεάζονται από τον συντελεστή εκπομπής του υλικού. Γενικά τα δομικά υλικά έχουν μεγάλο συντελεστή εκπομπής (μεγαλύτερο από 0,8).

Τεχνικές Ρεπλίκας

Η ρεπλίκα είναι μια πολύ ανεπτυγμένη μέθοδος ηλεκτρονικής μικροσκοπίας η οποία χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση επιτόπου μετρήσεων της μικροδομής δομικών στοιχείων μιας κατασκευής. Η «επί τόπου» εξέταση της φθοράς στην μικροδομή και της καταστροφής των υλικών τα οποία εκτίθενται σε διάφορα περιβάλλοντα είναι ο σκοπός της μη καταστροφικής αξιολόγησης των δομικών στοιχείων. Η ανάγκη για έλεγχο της κατάστασης γραμμών παραγωγής και πετροχημικών μεταλλικών εξαρτημάτων οδήγησε στην

εφαρμογή των μεθόδων της ρεπλίκας. Η κλασική μέθοδος της μεταλλογραφικής παρατήρησης προϋποθέτει τεμαχισμό σχετικά μεγάλων κομματιών από την κατασκευή που επιθεωρούμε για την προετοιμασία και εκτέλεση του εργαστηριακού ελέγχου. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το αντικείμενο καθίσταται ακατάλληλο για χρήση ή στην καλύτερη των περιπτώσεων χρήζει επισκευής οδηγώντας έτσι σε αύξηση του κόστους. Αποτέλεσμα, οι μεταλλογραφικοί έλεγχοι να αποφεύγονται και σημαντικές πληροφορίες για την δομή των υλικών να χάνονται και να μην αξιολογούνται. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.

Προετοιμασία των δειγμάτων

Η προετοιμασία των αντικειμένων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε δηλαδή με μηχανική προετοιμασία είτε με ηλεκτρολυτική.

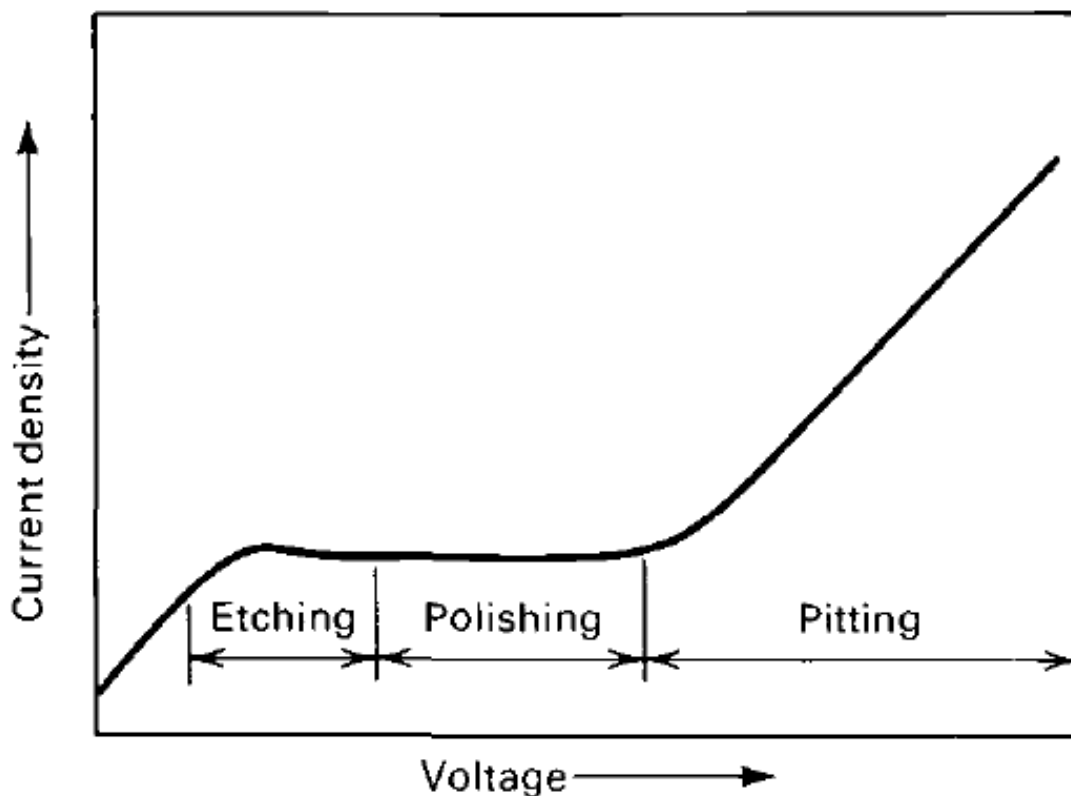
Μηχανική προετοιμασία

Τα περισσότερα εξαρτήματα μετά από κάποιο χρόνο λειτουργίας τους αναπτύσσουν στην επιφάνειά τους προϊόντα οξείδωσης, διάβρωσης ή ακόμη και απανθρακωμένα στρώματα. Όλα αυτά πρέπει να απομακρυνθούν πριν την εφαρμογή της μεθόδου. Λειαντικά χαρτιά με διαφόρων μεγέθους κόκκους μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αναγκαία προϋπόθεση είναι η μη πρόκληση ανεπιθύμητης υπερθέρμανσης ή πλαστικής παραμόρφωσης. Επίσης, αμμοβολή, τροχοί με σύρμα ή περύγια και λειαντικοί δίσκοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της στίλβωσης. Εδώ γίνεται χρήση λειαντικών τροχών καρβιδίου του πυριτίου σε συνδυασμό με πάστα διαμαντιού ή αλουμινίου. Στο τελικό στάδιο απαιτείται η απαραίτητη προσβολή ώστε να αναπτυχθεί η μικροδομή.

Ηλεκτρολυτική προετοιμασία

Η τεχνική της ηλεκτροστίλβωσης μέσω μιας ηλεκτρολυτικής αντίδρασης επιτυγχάνει την απομάκρυνση υλικού αφήνοντας μια επιφάνεια χωρίς γρατζουνιές. Αυτό πραγματοποιείται μέσω μιας διαδικασίας όπου το δείγμα παίζει τον ρόλο της ανόδου. Η κάθοδος συνδέεται με την άνοδο μέσω ενός ηλεκτρολύτη. Στα δείγματα υπάρχει δυνατότητα να εφαρμοσθεί είτε στίλβωση είτε προσβολή. Αυτό ελέγχεται μέσω της εφαρμοζόμενης τάσης και πυκνότητας

του ρεύματος η εξάρτηση των οποίων φαίνεται στην εικόνα 9. Στην ίδια εικόνα παρατηρούμε ότι σε περίπτωση όπου ξεπεραστούν κάποιες κρίσιμες τιμές τότε αρχίζει να προκαλείται διάβρωση. Θα πρέπει κάτι τέτοιο να αποφεύγεται γιατί σε αυτό το στάδιο αρχίζουν να εισχωρούν ακαθαρσίες ή καλύτερα ανεπιθύμητα στοιχεία στην μικροδομή. Αυτό γίνεται μόνο με πολύ ακριβείς και λεπτούς χειρισμούς.



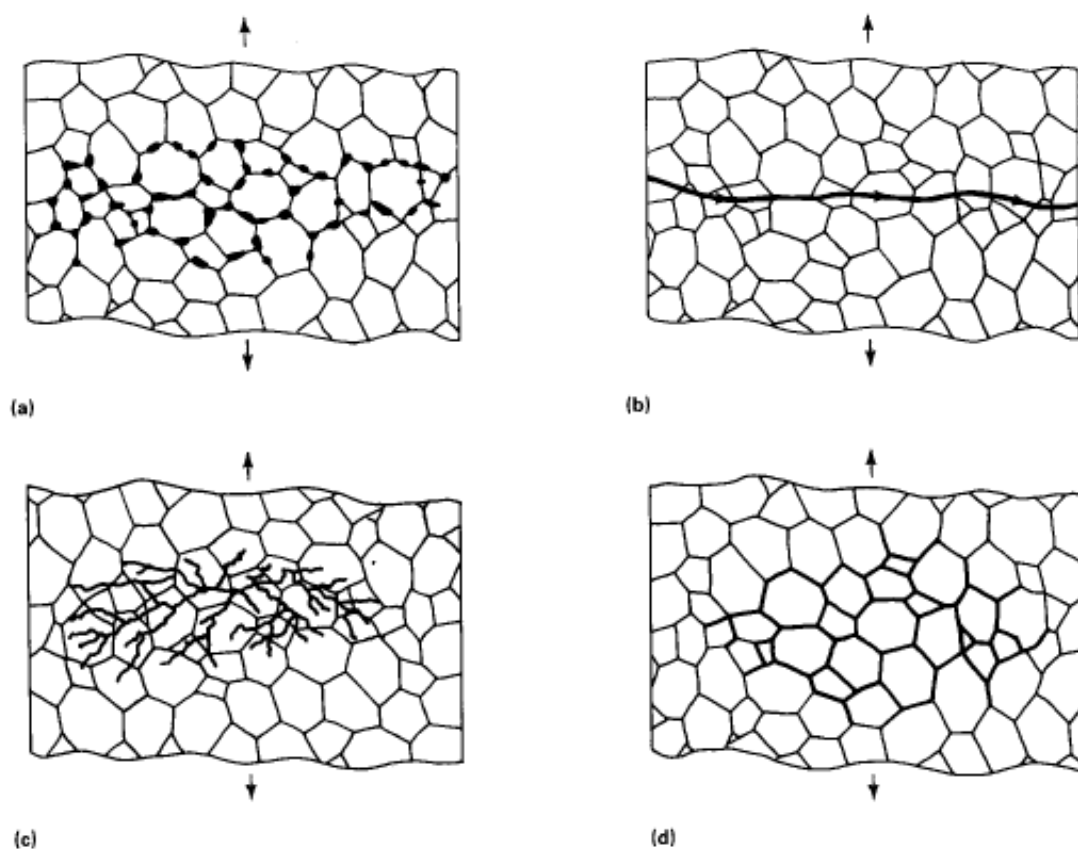
Εικόνα 9: Στοιχειώδης καμπύλη πυκνότητας ρεύματος- τάσης ηλεκτροστίλβωσης

Να σημειώσουμε ότι υπάρχουν περιοχές, όπως οι χημικές βιομηχανίες καθώς και οι πυρηνικές εγκαταστάσεις στις οποίες δεν επιτρέπεται να εφαρμοστούν ηλεκτροστιλβωτικές διαδικασίες. Ο λόγος είναι ότι δημιουργούνται οι δυνατότητες για εμφάνιση ενδόκοκκης ρωγμάτωσης λόγω διαβρωτικών δυνάμεων(intergranular stress-corrosion cracking).

Τεχνικές ρεπλίκας

Μπορούμε να ταξινομήσουμε αυτές τις τεχνικές σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι εκείνη της επιφάνειας και λέγεται ρεπλίκας επιφανείας και η δεύτερη ρεπλίκας εξαγωγής. Η ρεπλίκας επιφανείας δίνει μια εικόνα της επιφανειακής

τοπογραφίας του δείγματος, ενώ η ρεπλίκα εξαγωγής αποσπά σωματίδια από το δείγμα και τα τοποθετεί σε μια άλλη επιφάνεια. Στόχος και των δύο μεθόδων ουσιαστικά είναι να παράγουν ένα ακριβές αντίγραφο της εξεταζόμενης επιφάνειας. Στη συνέχεια μπορούμε να τα μελετήσουμε μέσω οπτικού μικροσκοπίου, ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης(SEM) ή διέλευσης(TEM) ανάλογα με την διακριτική ικανότητα που επιθυμούμε. Τα αποτελέσματα που περιμένουμε έχουν σαν σκοπό την ανεύρεση ρωγμών ενώ οι εικόνες που λαμβάνουμε από τον μικροσκοπικό έλεγχο φαίνονται ενδεικτικά στην εικόνα 10.



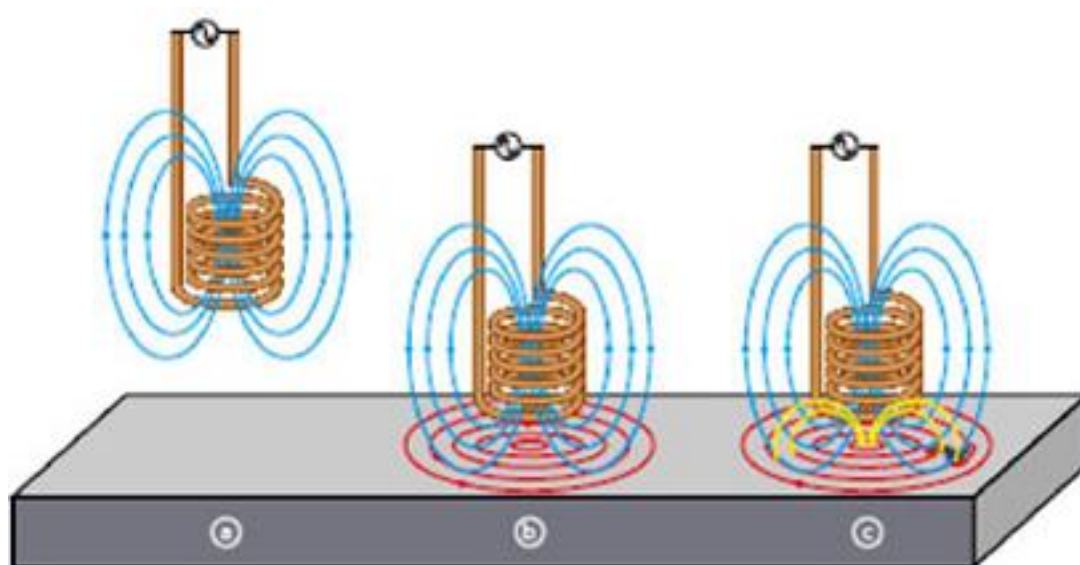
Εικόνα 10: Διάδοση διαφόρων τύπων ρωγμών α) Ερπυσμός β) Κόπωση γ) Μηχανική διάβρωση δ) Περικρυσταλλική διάβρωση

Επιφανειακές τεχνικές

Δινορεύματα ή επαγωγικά ρεύματα (Eddy Current)

Πρόκειται για μια επίσης διαδεδομένη μέθοδο που βρίσκει εφαρμογή σε μεταλλικά ηλεκτρικά αγωγικά υλικά. Προσδιορίζει, πέρα από τις περιεχόμενες σε ένα υλικό ατέλειες, τις ιδιότητες και της διαστάσεις του υλικού. Επίσης με

αυτή την μέθοδο εξάγονται πληροφορίες πάνω σε μια πλειάδα αλλαγών των φυσικών και χημικών αλλαγών που εκτυλίσσονται στα υλικά. Ο συγκεκριμένος έλεγχος βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Ένα πηνίο το οποίο ονομάζεται πηνίο ελέγχου (inspection coil) διεγείρεται με εναλλασσόμενο ρεύμα και επάγει τα δινορρεύματα στο υπό επιθεώρηση τεμάχιο. Τα δινορρεύματα στη συνέχεια παράγουν με την σειρά τους ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο αντιτάσσεται και τροποποιεί το αρχικό πεδίο του πηνίου. Το τελικό μαγνητικό πεδίο περιέχει τις πληροφορίες περί ύπαρξης ατέλειες εντός του δοκιμίου.

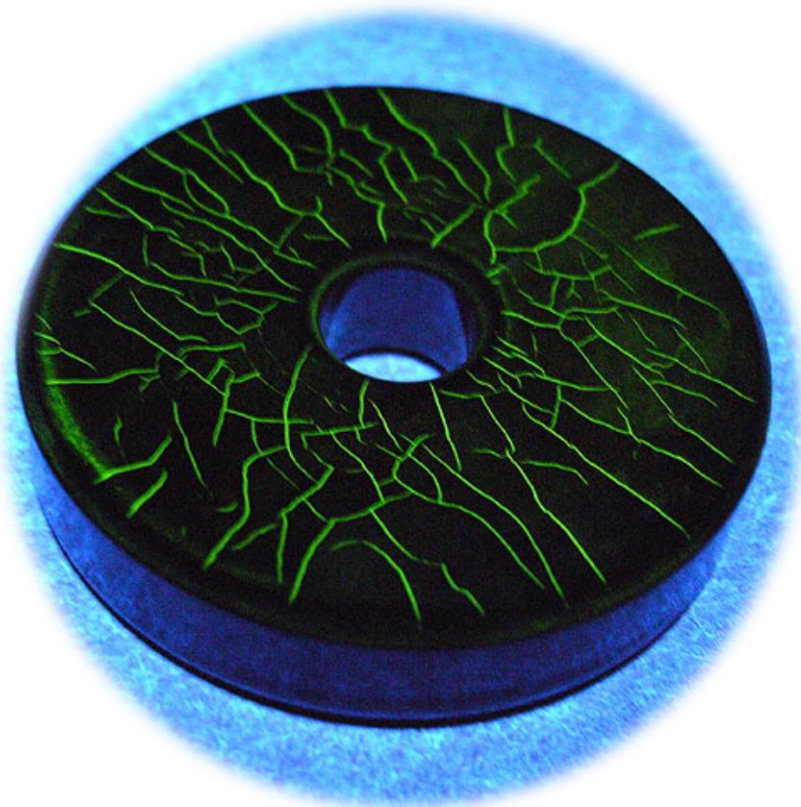


Εικόνα 11: Σχηματική αναπαράσταση επιθεώρησης με δινορρεύματα

Η ροή των δινορρευμάτων επηρεάζεται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη μαγνητική επιδεκτικότητα των ελεγχόμενων υλικών, την γεωμετρία και την ύπαρξη ατελειών στο εσωτερικό τους. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σχετίζεται με την σύνθεση των κραμάτων, την μεταβολή της σκληρότητας ή της θερμοκρασίας. Επίσης μπορεί με την μέθοδο αυτή να υπολογιστεί το πάχος της επικάλυψης σε κάποιο υλικό

Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως ο χάλυβας, εξαιτίας του ότι με την επίδραση του εφαρμοζόμενου πεδίου αυτά μετατρέπονται σε μαγνήτες. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος επιτρέπει την ανίχνευση σε τέτοια υλικά ατέλειες σε βάθος 2-3mm.

Μαγνητικά Σωματίδια (Magnetic Particle)



Εικόνα 12

Πρόκειται για μια μέθοδο με την οποία εντοπίζονται, κατά προσέγγιση, τόσο επιφανειακές όσο και υποεπιφανειακές ασυνέχειες. Εφαρμόζεται μόνο σε σιδηρομαγνητικά υλικά όπως για παράδειγμα είναι τα περισσότερα σιδηρούχα κράματα, τα κράματα νικελίου και κοβαλτίου. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη μαγνητιζόμενα υλικά όπως είναι τα κεραμικά, το γυαλί, κράματα αλουμινίου και χαλκού, τους ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες και διάφορα άλλα.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου πρέπει η διεύθυνση του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου να είναι κάθετη προς την διεύθυνση των ρωγμών. Αυτό γιατί όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητίζεται τότε τυχούσες ρωγμές-ατέλειες εγκάρσιες στο μαγνητικό πεδίο προκαλούν διαρροή του μαγνητικού πεδίου (πεδίο διαρροής, leakage field). Συνεπώς ο προσδιορισμός τέτοιων τοπικών σημείων διαρροής μας υποδηλώνει την ύπαρξη ατέλειας. Ο εντοπισμός τους γίνεται με την χρήση πολύ λεπτών μαγνητικών σωματιδίων. Όταν αυτά εφαρμόζονται πάνω στην υπό εξέταση

επιφάνεια, συγκεντρώνονται και αναπροσανατολίζονται σύμφωνα με το πεδίο διαρροής. Κατ' αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται το περίγραμμα της ατέλειας και κατά συνέπεια επιτρέπεται ο προσδιορισμός τόσο της θέσης της όσο και το μέγεθος και ο προσανατολισμός της.

Για την εξέταση του δοκιμίου απαιτείται αρχικά η εισαγωγή του σε μαγνητικό πεδίο. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την χρήση μόνιμων μαγνητών είτε με ηλεκτρομαγνήτες. Τα μαγνητικά σωματίδια ταξινομούνται σε ξηρά και υγρά. Τα ξηρά περιλαμβάνουν μαγνητικές σκόνες ενώ τα υγρά μαγνητικά μελάνια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μελανιών τα οποία είτε είναι ορατά με το φως της ημέρας είτε πρέπει να φωτισθούν με κατάλληλη λυχνία υπεριώδους ακτινοβολίας για να γίνουν ορατά.

Το βάθος στο οποίο μια ατέλεια μπορεί να ανιχνευθεί μπορεί να καθοριστεί επίσης και από το είδος του μαγνητικού πεδίο που εφαρμόζεται. Πιο συγκεκριμένα με εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, οι δυναμικές γραμμές έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του δοκιμίου. Έτσι προσδιορίζονται επιφανειακές ατέλειες. Στην περίπτωση όμως που εφαρμοστεί συνεχές μαγνητικό πεδίο τότε δίνεται η δυνατότητα να ανιχνευτούν ατέλειες οι οποίες βρίσκονται σε βάθος μέχρι και 8-10mm.

Διεισδυτικά Υγρά (Liquid Penetrant)

Ο ΜΚΕ με διεισδυτικά υγρά είναι επίσης μία πολύ συχνή μέθοδος. Η συγκεκριμένη μέθοδος, ενδείκνυται για εξεύρεση ασυνεχειών που είναι ανοιχτές στην επιφάνεια εξαρτημάτων τα οποία είναι κατασκευασμένα από μη πορώδη υλικά. Το βάθος της ανιχνεύσιμης ατέλειας που δύναται να ανιχνευθεί είναι στα 0,1mm το πλάτος 1μm και αν πρόκειται για ρωγμή 1cm μήκος. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην διείσδυση ενός υγρού μέσα σε μια ασυνέχεια λόγω τριχοειδούς έλξης. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό επιφανειακών ρωγμών, κενών, πόρων, περιοχών συρρίκνωσης, φολίδων και παρομοίων ασυνεχειών.

Η επιτυχία αυτής της μεθόδου εξαρτάται σχεδόν από μια μόνο παράμετρο. Την σωστή προετοιμασία της επιφάνειας, του προς εξέταση αντικειμένου. Έτσι λοιπόν απαραίτητος είναι ο διεξοδικός καθαρισμός της εξεταζόμενης επιφάνειας από οποιασδήποτε μορφής ακαθαρσία όπως για παράδειγμα γράσο, λάδια κτλ. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται περιμετρικά πέραν του εξεταζόμενου σημείου. Η αφαίρεση γίνεται με χρησιμοποίηση διαφόρων διαλυτικών όπως τριχλωραιθυλένιο, τετραχλωραιθυλένιο, τολουόλη, κ.τ.λ. ή με ατμό. Σε περίπτωση που υπάρχει χρώμα στην περιοχή αφαιρείται και αυτό κάνοντας χρήση συρματόβουρτσας, λειαντικού τροχού ή ακόμα και αμμοβολής. Σημαντικό είναι επίσης να αφαιρεθούν με χημικά μέσα το οξείδια που δημιουργούνται στις επιφάνειες του μετάλλου. Επίσης, πρέπει να ελεγχθεί η τραχύτητα της περιοχής και βεβαίως σε περίπτωση που δεν είναι ικανοποιητική έστω και σε πολύ μικρό βαθμό πρέπει να λειανθεί. Τέλος αφότου έχουν γίνει τα προηγούμενα βήματα σωστά, θα πρέπει η επιφάνεια της εξέτασης να είναι απολύτως στεγνή. Κάτι τέτοιο μπορεί να εξασφαλισθεί με θέρμανση, με εφαρμογή πεπιεσμένου αέρα ή απλά με σκούπισμα.

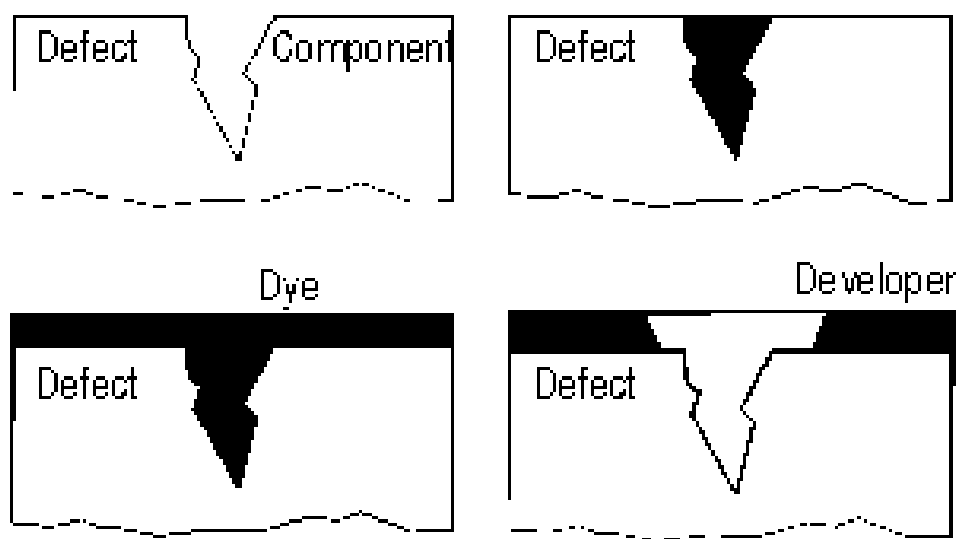
Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το διάλυμα του διεισδυτή στην εξεταζόμενη επιφάνεια η οποία και καλύπτεται ολόκληρη. Στις περισσότερες εφαρμογές αυτό γίνεται με ψεκασμό αλλά συναντούνται πιο σπάνια μέθοδοι με επάλειψη ή και βούρτσισμα. Την στιγμή αυτή λόγω του φαινομένου τριχοειδούς έλξης το υγρό εισέρχεται σε οποιαδήποτε ασυνέχεια του υλικού και την γεμίζει. Ο χρόνος διείσδυσης, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρωση των ατελειών, είναι ένα κρίσιμο μέγεθος το οποίο ποικίλει και εξαρτάται από τον κατασκευαστή του διαλύματος. Με το πέρας του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος απαιτείται διεξοδικός καθαρισμός της επιφάνειας. Χρησιμοποιούνται καθαριστικά πανιά με διαλύτη ή νερό. Με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος, σημαντικό είναι να εξασφαλιστεί, όπως προηγουμένως, ότι η επιφάνεια είναι απολύτως στεγνή.

Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας εφαρμόζεται ο εμφανιστής. Ανάλογα με τον τύπο διεισδυτή που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να είναι υγρός ή σε ξηρή μορφή. Στο συγκεκριμένο στάδιο δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα το

οποίο λειτουργεί σαν σφουγγάρι και «τραβάει» προς τα έξω οποιαδήποτε ποσότητα διεισδυτή έχει εγκλωβιστεί σε κάποια ρωγμή, πόρο ή ατέλεια γενικότερα.

Έτσι αναλόγως το σχήμα και το σημείο εμφάνισης μιας κηλίδας τα αρμόδια όργανα μπορούν να αποφανθούν για το είδος της ατέλειας, την ακριβή της θέση και βέβαια την επικινδυνότητά της.

Δύο είναι οι τύποι διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται ανάλογα την εφαρμογή. Η πρώτη είναι για δοκίμια μεγάλων διαστάσεων με επιφάνειες μη εντελώς λείες. Σε τέτοιες περιπτώσεις εφαρμόζεται χρωματιστό διεισδυτικό διάλυμα και υγρός εμφανιστής. Τα χρώματα άπτονται στην επιλογή της εταιρίας που τα κατασκευάζει. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται φθορίζοντα διεισδυτικά διαλύματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τα δύο είδη εμφανιστών. Για την ανίχνευση της ατέλειας απαιτείται υπεριώδες φως.



Εικόνα 13: Βήματα εφαρμογής της μεθόδου των διεισδυτικών υγρών

Μέθοδος ψαθυρών επικαλύψεων

Πρόκειται για μια πολύ απλή τόσο στην σύλληψη όσο και στην εφαρμογή, μέθοδο. Το προς εξέταση δοκίμιο καλύπτεται με ένα πολύ λεπτό στρώμα ενός

πολύ άκαμπτου και ψαθυρού υλικού. Ως γνωστό τέτοια υλικά έχουν την τάση να ρηγματώνονται πολύ εύκολα. Έπειτα αν στο δοκίμιο εφαρμοστεί μια κάποια μορφή καταπόνησης τότε στην εξωτερική επίστρωση θα δημιουργηθούν ρωγμές. Από την παρατήρηση και επεξεργασία του μεγέθους και της μορφής των ρωγμών μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα όπως για παράδειγμα η τάση που εφαρμόστηκε. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτούνται πρότυπα επίπεδα δοκίμια από το ίδιο υλικό με εκείνο που εξετάζεται, την ίδια επίστρωση και στα οποία έχει εφαρμοστεί γνωστό και πλήρως καθορισμένο τασικό πεδίο. Μετά από σύγκριση των ρωγμών μεταξύ τους εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Αναλόγως την εφαρμογή μπορούμε να χωρίσουμε τέτοιες επικαλύψεις σε δύο κατηγορίες. Για εφαρμογές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε επικαλύψεις με βάση οργανικές ρητίνες. Αντίθετα σε υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται επικαλύψεις με βάση τα κεραμικά

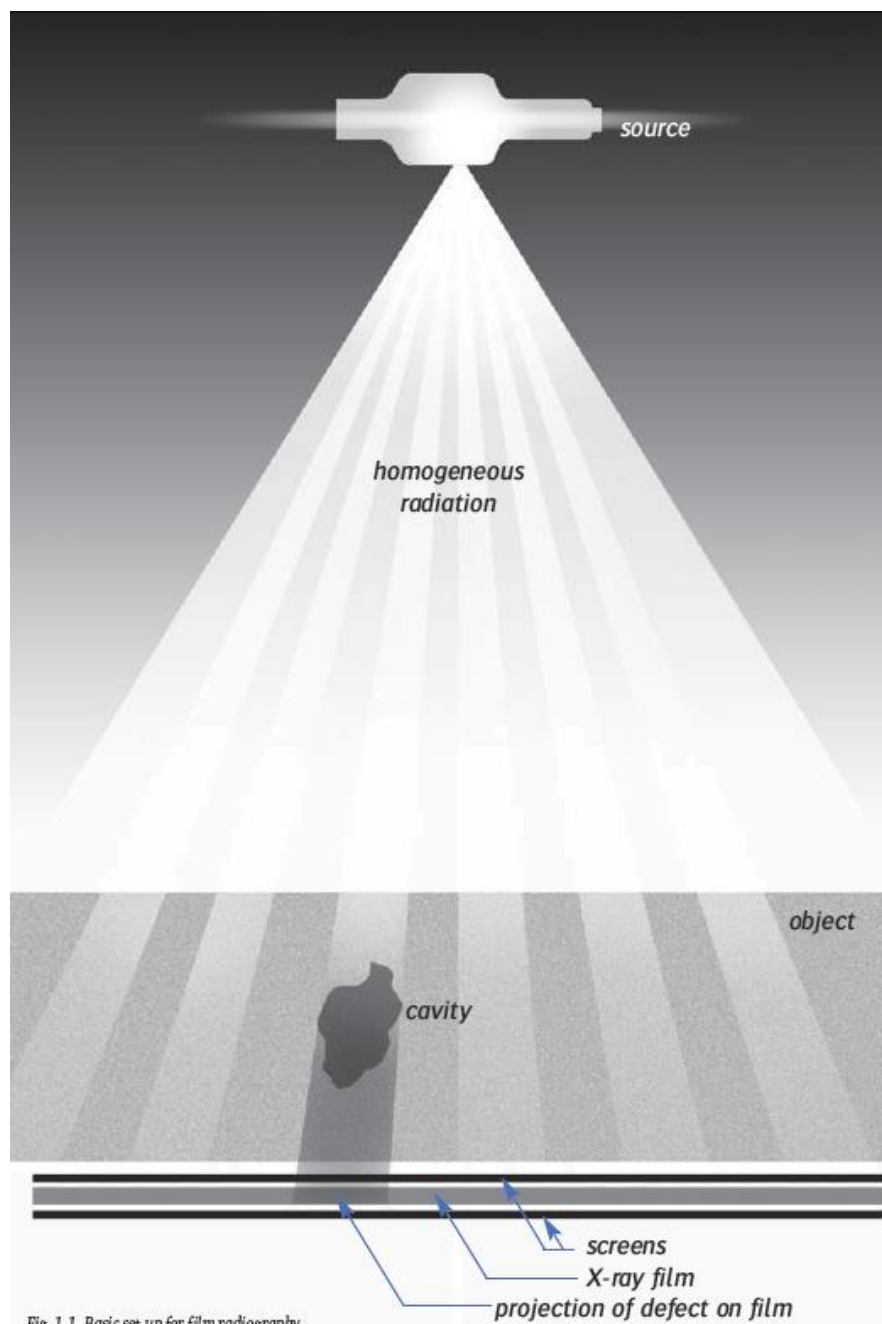
Ογκομετρικές μέθοδοι

Βιομηχανική ακτινογραφία-ραδιογραφία (Industrial Radiography)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επιθεώρηση εξαρτημάτων. Βασίζεται στην διαφορική απορρόφηση διεισδύουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το υπό-επιθεώρηση αντικείμενο. Δίνει την δυνατότητα σε έναν μηχανικό να επιθεωρήσει εύκολα και σχετικά γρήγορα το εσωτερικό τμημάτων οποιουδήποτε υλικού για ατέλειες όπως κακή τοποθέτηση στρώσεων, ρηγματώσεις, κατακρημνίσεις, παραλείψεις τμημάτων, ζημιές, ξένα σώματα, υγρασία κλπ. σε σημεία που το ανθρώπινο μάτι όπως είναι φυσικό δεν μπορεί να φτάσει.

Χρησιμοποιείται ουσιαστικά μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για την παροχή ισχυρής ενέργειας προς το εξέταση κομμάτι και ένα φιλμ. Ένα τμήμα της ενέργειας απορροφάται από το εξεταζόμενο εξάρτημα, ενώ το υπόλοιπο περνάει μέσω αυτού και αποτυπώνεται στον ειδικό υμένα (φιλμ) που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά του εξαρτήματος. Ανάλογα με το ποσοστό της ακτινοβολίας η οποία απορροφάται κατά τόπους αποτυπώνεται και μια

διαφορετική απόχρωση. Αυτή η διαφορετική απορρόφηση οφείλεται σε διαφορές της πυκνότητας, της σύστασης και του πάχους του υλικού. Τέτοιες διαφορές, μας υποδεικνύουν εσωτερικές ατέλειες. Το αποτέλεσμα που εξάγεται είναι μία δισδιάστατη ασπρόμαυρη σκιά ολοκλήρου του όγκου του τεμαχίου. Η εκτίμηση κατάστασης με την ακτινογραφία βασίζεται στη σύγκριση των διαφορών της φωτογραφικής πυκνότητας με γνωστά χαρακτηριστικά του αντικειμένου ή με δεδομένα που είχαν εξαχθεί από ακτινογραφίες ίδιων αντικειμένων αποδεκτής ποιότητας.



Εικόνα 14: Εικονική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της βιομηχανικής λειτουργίας και των βασικών στοιχείων της μεθόδου

Γενικά με την ραδιογραφική εξέταση μπορεί να ανιχνευτούν ασυνέχειες με αξιόλογο πάχος σε μια διεύθυνση παράλληλη με την δέσμη ακτινοβολίας. Συνεπώς η ανίχνευση ρωγμής εξαρτάται άμεσα από τον προσανατολισμό της δέσμης σε σχέση με το υπό εξέταση κομμάτι. Τρισδιάστατες ασυνέχειες οι οποίες έχουν υπολογίσιμο πάχος μπορούν να αποτυπωθούν-ανιχνευθούν, με την

προϋπόθεση αυτές να έχουν πάνω από 1% διαφορά στην απορρόφηση της ακτινοβολίας σε σχέση με το περιβάλλον μέταλλο.

Οι πηγές ακτινοβολίας οι οποίες και χρησιμοποιούνται είναι δύο ειδών, ακτίνες-Χ και ακτίνες-γ. Οι ακτίνες-Χ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μέσω φορητών πηγών. Για τον έλεγχο με ακτίνες-γ χρησιμοποιούνται κυρίως τα ραδιενεργά ισότοπα ιρίδιο-192 και κοβάλτιο-60.

Στα μειονεκτήματά της θα πρέπει να αναφερθεί το υψηλό, αλλά όχι απαγορευτικό κόστος των αρνητικών (φιλμ). Η μέθοδος έχει τη δυνατότητα εφαρμογής με τη χρήση φορητών συσκευών, αλλά πρέπει να τηρούνται πολύ αυστηροί κανόνες ασφαλείας, λόγω των επικίνδυνων ακτινοβολιών που εκπέμπονται. Επίσης είναι αργή και δεν έχει ευαισθησία σε αρκετούς τύπους ατελειών, όπως το ότι ρωγμές δύσκολα ανιχνεύονται σε περίπτωση που δεν είναι παράλληλες προς την κατεύθυνση των ακτινών ενώ μικρές ρωγμές σε πυκνούς τομείς συνήθως δεν γίνονται αντιληπτές ακόμα και αν είναι στην κατάλληλη κατεύθυνση. Ανεπιθύμητες στρωματώσεις σχεδόν ποτέ δεν γίνονται αντιληπτές. Μικρές ασυνέχειες όπως εγκλείσματα σε σφυρήλατα υλικά, φολίδες, μικροπόροι, μικροσχισμές δεν μπορούν να εντοπιστούν εκτός και αν απομονωθούν ικανοποιητικά για να δώσουν ικανοποιητική συνολική αντίθεση.

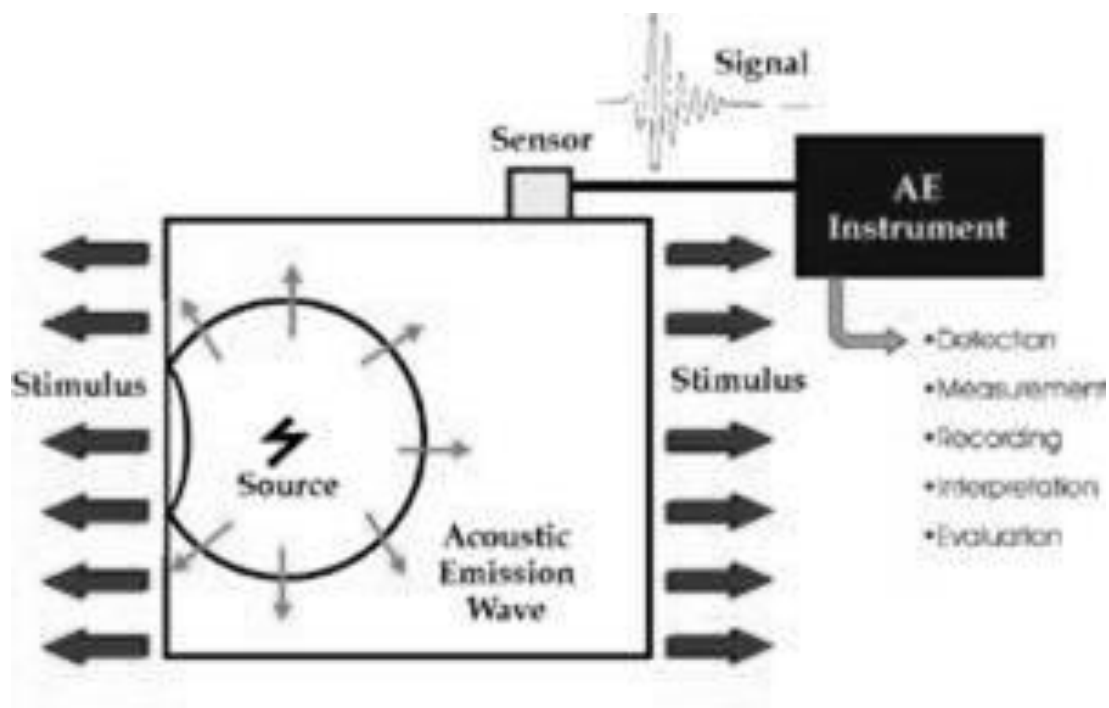
Μία παραλλαγή της μεθόδου είναι τα συστήματα ακτινογραφικού ελέγχου πραγματικού χρόνου (Real-time). Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι η μεγαλύτερη ταχύτητα εξέτασης και η δραστική μείωση του κόστους λειτουργίας λόγω της μη χρησιμοποίησης φιλμ (τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στην οθόνη.)

Ακουστική εκπομπή

Πρόκειται για μια μέθοδο ελέγχου η οποία εφαρμόζεται σε κατασκευές υψηλού κινδύνου. Τέτοιες μπορεί να είναι μεταλλικές κατασκευές, αεροσκάφη, δεξαμενές έφλεκτων υγρών, πυρηνικοί αντιδραστήρες κλπ. Συνεπώς πρόκειται για μια μέθοδο πολύ μεγάλης σημασίας.

Με βάση τον ορισμό της ASTM, η Ακουστική Εκπομπή (AE) περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτών των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό. Πηγές ακουστικής εκπομπής μπορεί να δημιουργηθούν και κατά την τήξη του υλικού και την αλλαγή φάσεως, λόγω θερμικών τάσεων.

Η ακουστική εκπομπή ως μέθοδος ΜΚΕ, βασίζεται στο ότι όλα τα υλικά και ειδικά τα μέταλλα όταν συμβαίνει κάποια μεταβολή στο εσωτερικό τους, τότε αυτά εκπέμπουν ήχο. Σε μικροσκοπικό επίπεδο η παραμόρφωση προκαλεί μετακίνηση των συνόρων των κόκκων και των ατελειών και αποχωρισμό των εγκλεισμάτων.



Εικόνα 15: Εικονική απεικόνιση μεθόδου ακουστικών εκπομπών

Συνεπώς αν υποβάλλουμε κάποιο υλικό σε ένα οποιοδήποτε τασικό πεδίο και χρησιμοποιώντας-προσαρμόζοντας πάνω στο υλικό κατάλληλους

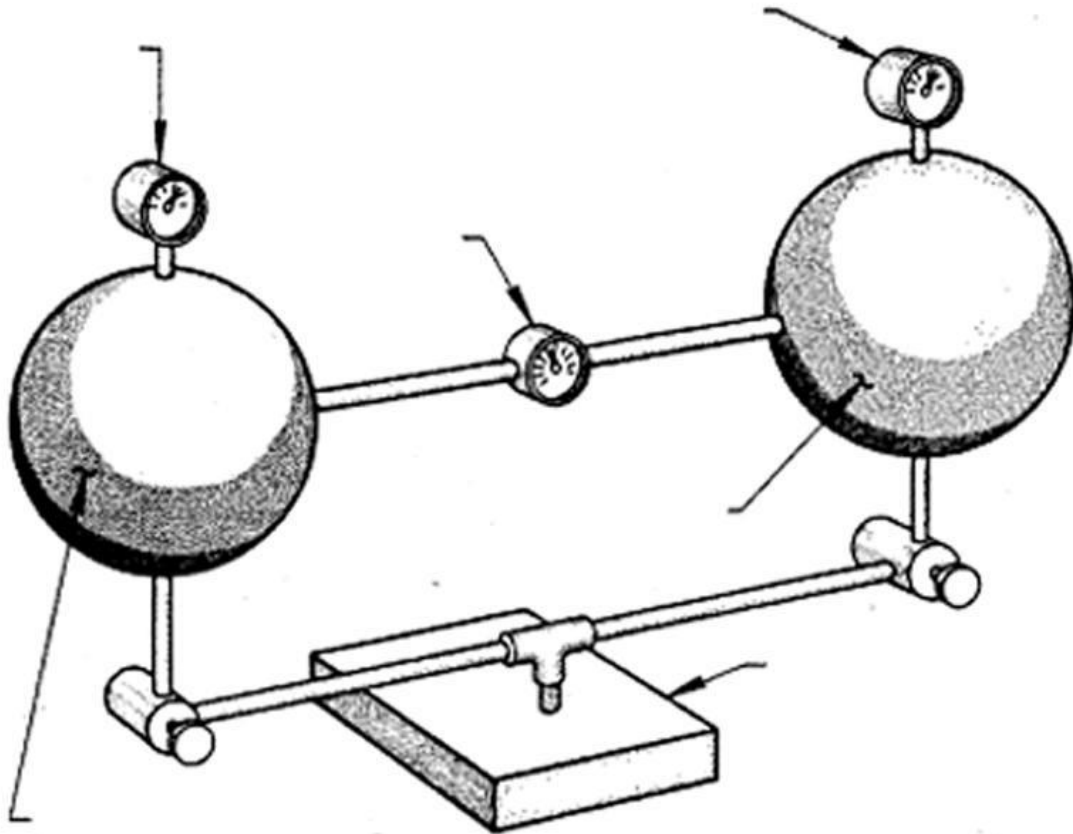
πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να εντοπίζουμε τα ηχητικά κύματα που δημιουργούνται. Στη συνέχεια τα εκπεμπόμενα σήματα καταγράφονται από την κατάλληλη συσκευή ακουστικής εκπομπής. Είναι διαπιστωμένο πως τέτοια ηχητικά κύματα παράγονται σε σημεία τα οποία μπορούν να θεωρηθούν αδύναμα και είναι ευκολότερο είτε να αστοχήσουν είτε να περιέχουν κάποια ρωγμή ή ατέλεια. Έτσι λοιπόν εντοπίζονται τέτοια σημεία σε μια κατασκευή, και εν συνεχεία κάνοντας χρήση κάποιου ΜΚΕ μπορούμε να αποφανθούμε σε ασφαλέστερο συμπέρασμα.

Ο εντοπισμός θέσης, βασίζεται στις αρχές της διάδοσης των ελαστικών κυμάτων μέσα στα υλικά και πραγματοποιείται με μέτρηση του χρόνου άφιξης του σήματος σε κάθε αισθητήρα. Γραμμικός (μονοδιάστατος) εντοπισμός θέσης χρησιμοποιείται σε μεγάλου μήκους κυλίνδρους αερίου, σωληνώσεις και, γενικά, σε κατασκευές των οποίων η μία διάσταση υπερισχύει σημαντικά έναντι των άλλων δύο. Επίπεδος (δισδιάστατος) εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται σε μεγάλες επιφάνειες, σε μεγάλου πάχους δοχεία και δεξαμενές, ενώ τρισδιάστατος εντοπισμός θέσης πραγματοποιείται κατά τον έλεγχο μετασχηματιστών και κατασκευών σκυροδέματος.

Σε κατασκευές που έχουν επικαλυφθεί με μονωτικό υλικό δεν απαιτείται αφαίρεση της μόνωσης για τη διενέργεια του ελέγχου παρά μόνο στα σημεία τοποθέτησης των αισθητήρων. Συνεπώς, το κέρδος σε χρόνο και κόστος είναι πολύ μεγάλο, όπως στην περίπτωση ελέγχου διάβρωσης κάτω από προστατευτικό υλικό ή μόνωση.

Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις διεργασιών υψηλής θερμοκρασίας, δεν απαιτείται διακοπή της λειτουργίας για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος, αλλά χρησιμοποιούνται κυματοδηγοί (waveguides) μικρής επιφάνειας που κολλώνται στη θερμή επιφάνεια, ενώ στην άλλη πλευρά τους τοποθετείται ο αισθητήρας ακουστικής εκπομπής. Τέλος, σε μεγάλου όγκου κρυογενικές δεξαμενές τοποθετούνται μόνιμα αισθητήρες κάτω από τη μόνωση και συνδέονται με κεντρικό πίνακα που χρησιμοποιείται για κάθε προγραμματισμένο έλεγχο.

Ροή ρευστών



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση της χρήσης ενός δείκτη διαφορικής πίεσης μεταξύ ενός δοχείου αναφοράς και ενός υπό εξέταση δοχείου για τον εντοπισμό διαρροής

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον προσδιορισμό της διαφοράς πίεσεως μεταξύ δύο σημείων μιας κατασκευής ή της πίεσεως με την οποία ένα ρευστό περνά το τοίχωμα μιας κατασκευής όταν η πίεση επιβάλλεται είτε από το εσωτερικό είτε το εξωτερικό τμήμα μιας κατασκευής. Ο έλεγχος αναφέρεται είτε στη μικρότερη οπή ή πέρασμα που μπορεί να ανιχνευθεί είτε στη μικρότερη ανιχνεύσιμη ροή ρευστού που χρησιμοποιείται.

Υπέρηχοι

Στην παρούσα διπλωματική η μέθοδος ΜΚΕ που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των υπερήχων. Για λόγους πληρότητας αυτού του κεφαλαίου δεν μπορούμε να μην συμπεριλάβουμε την εν λόγω μέθοδο. Στα επόμενα κεφάλαια θα υπάρξουν αναλυτικές πληροφορίες για τις αρχές λειτουργίας της. Στο παρών κεφάλαιο θα παρατεθούν κάποιες πληροφορίες για την εξέλιξη της μεθόδου καθώς και τις εφαρμογές που αυτή βρίσκει.

Ο έλεγχος των υλικών γίνεται με ελαστικά τασικά κύματα, τα οποία παράγονται από εφελκυστικές, θλιπτικές, διατμητικές ή καμπτικές δυνάμεις πολύ μικρής εντάσεως. Τα υπερηχητικά κύματα που χρησιμοποιούνται είναι μηχανικά κύματα υψηλής συχνότητας τα οποία διοχετεύονται μέσα στα ελεγχόμενα υλικά και από την ανάλυση των εξερχόμενων κυμάτων προσδιορίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.

Η χρήση της μεθόδου των υπερήχων για τον μη καταστρεπτικό έλεγχο αποτελεί σήμερα μια από τις πιο διαδεδομένες και αξιόπιστες μεθόδους. Το ευρύ πεδίο εφαρμογών περιλαμβάνει συγκολλητές συνδέσεις, εξαρτήματα μηχανών και βιομηχανικές κατασκευές. Δίνει την δυνατότητα ανίχνευσης ατελειών στη δομή των υλικών. Τέτοιες μπορεί να είναι ρηγματώσεις, ατελείς τήξεις (κυρίως στις συγκολλήσεις), εγκλείσματα, πόροι και διάφορα άλλα σφάλματα.

Το 1847 ο James Precott ανακάλυψε την μέθοδο εκπομπής των υπερήχων. 30 χρόνια αργότερα, το 1880 τα αδέρφια Pierre Curie και Paul Jacques εξέλιξαν την μέθοδο. Το γνωστό ναυάγιο του Τιτανικού το 1912, οδήγησε τον Richardson να χρησιμοποιήσει την μέθοδο στην πράξη με την προοπτική του εντοπισμού παγόβουνων. Ο πρώτος παγκόσμιος πόλεμος και η ανάγκη εντοπισμού υποβρυχίων οδήγησε τους Chilowski και Langevin στην περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου.

Η χρήση των υπερήχων για ελέγχους στην βιομηχανία ήρθε μερικά χρόνια αργότερα. Το 1942 ο Floyd Firestone υλοποίησε ένα όργανο ελέγχου με

κεφαλή το οποίο μπορούσε να λειτουργεί σαν πομπός και δέκτης. Εφαρμόστηκε αρχικά σε βιομηχανίες της Αμερικής, Αγγλίας και τη Γερμανίας.

Το 1949 ο Josef Krautkrämer και ο αδελφός του Herbert από την Κολωνία βασισμένοι στις δημοσιεύσεις των Firestone-Sperry αρχίζουν να αναπτύσσουν τις δικές τους συσκευές υπερήχων στη Γερμανία. Μετά από ένα χρόνο υλοποιούν την πρώτη τους συσκευή εμπορικής χρήσης. Παραλλαγές της συσκευής άρχισαν άμεσα να χρησιμοποιούνται για ελέγχους σιδηροτροχιών στους γερμανικούς σιδηροδρόμους, σε σωληνουργεία και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Έκτοτε ακολούθησαν σημαντικές αλλαγές στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο με υπερήχους. Οι βασικές όμως αρχές της μεθόδου παραμένουν ίδιες. Αυτό το οποίο άλλαξε είναι στον τρόπο που οι συσκευές διαχειρίζονται παραμέτρους όπως ο τύπος των κυμάτων και οι γωνίες εκπομπής. Επίσης, με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και ιδιαίτερα της ηλεκτρονικής, βελτιώθηκε το ηλεκτρονικό μέρος των συσκευών και κατά συνέπεια κάποιες καθοριστικές παράμετροι λειτουργίας, όπως ο ρυθμός ανανέωσης σήματος (PRF) και η ποιότητα του σήματος. Έτσι, οι συσκευές υπερήχων εξελίχθηκαν από απλά οσιλοσκόπια (παλμογράφοι) με οθόνες καθοδικών σωλήνων CRT σε σύγχρονες συσκευές με οθόνες LCD και δυνατότητα ανάκτησης πληροφοριών και αποθήκευσης σε κάρτες μνήμης.

Αλλα χαρακτηριστικά των συσκευών που βελτιώθηκαν με την πάροδο του χρόνου είναι: η σημαντική μείωση των διαστάσεων και του βάρους τους για εύκολη χρήση σε δυσπρόσιτα προς έλεγχο σημεία, η αύξηση της αυτονομίας των συσκευών με τη χρήση μπαταριών Λιθίου, η βελτίωση της ποιότητας της οθόνης με χρήση υψηλής ανάλυσης τεχνολογίας LCD που εξασφαλίζει την ορθή ανάγνωση των παλμών και υψηλή ορατότητα, η ανάπτυξη λογισμικού για τις συσκευές με χρήσιμα για τον έλεγχο εργαλεία όπως καμπύλες αξιολόγησης σχετικής έντασης/ύψους σήματος (DAC, DGS κτλ.). Επίσης βελτιώθηκε ο εργονομικός σχεδιασμός των συσκευών και η ευχρηστία τους με την προσθήκη περιστροφικών κομβίων και joysticks στη θέση των παλαιού τύπου χειριστηρίων.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας, χρησιμοποιήθηκε από τη βιομηχανία η τεχνολογία της ιατρικής, μέσω της χρήσης των συσκευών υπερήχων phased array. Ο έλεγχος συγκολλητών συνδέσεων πραγματοποιείται με κεφαλή που διαθέτει συστοιχία κρυστάλλων και παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της κατασκευής και καταγραφής των ασυνεχειών τόσο με την τεχνική A-scan όσο και με τεχνικές C-scan και B-scan (κάτοψη και τομή του υπό εξέταση δοκιμίου αντίστοιχα). Μέσω της χρήσης της μεθόδου των phased array νέες προοπτικές αναπτύσσονται στον έλεγχο των κατασκευών με υπερήχους, και ήδη η εφαρμογή τους έχει αρχίσει να προβλέπεται και από τους αντίστοιχους κώδικες.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε πως με την αυξανόμενη απαίτηση για μη καταστρεπτικούς ελέγχους και την εφαρμογή της σύγχρονης τεχνολογίας οι συσκευές υπερήχων έχουν γίνει σήμερα από τα πλέον μοντέρνα και "ευφυή" εργαλεία ελέγχου των υλικών και ταυτόχρονα οικονομικώς προσιτά.

Κλείνοντας πρέπει να επισημάνουμε πως καμία συσκευή, όσο εξελιγμένη και αν είναι δεν μπορεί να υποκαταστήσει την εμπειρία και την κρίση του τεχνικού προσωπικού που πρέπει να είναι σε θέση να αξιολογήσει τις ενδείξεις και να ανατρέξει στη βασική θεωρία της μεθόδου όταν αυτό χρειαστεί.

FIG. 4. Type A sweeping and timing system. This is the pattern which appears on the screen when the crystal is not being energized. It consists essentially of a time scale which is formed by the green spot of the oscilloscope traveling along the zigzag path A, B, C, D, etc. Each microsecond the spot is deflected slightly upward so as to notch the line and thereby form a timing scale. Every eighth notch is made higher in order to assist in counting. There are eight of these higher marks per zigzag so that it requires 64 microseconds to traverse one zigzag.

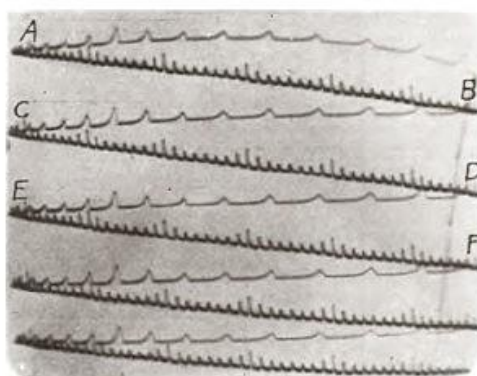


FIG. 2a. Type A supersonic reflectoscope.

Εικόνα 17: Από την πρώτη δημοσίευση για την εφαρμογή των υπερήχων στους ΜΚΕ

Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν θα αναπτυχθεί αναλυτικότερα η μη καταστρεπτική μέθοδος ελέγχου των υλικών με υπερήχους. Θα αναφερθούν στοιχεία από την κυματική και ακουστική, θα περιγραφούν οι τρόποι παραγωγής δέσμης υπερήχων, πεδία εφαρμογής και μέθοδοι καθώς και ο τρόπος λειτουργίας των συσκευών.

Κεφάλαιο II

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε την βασική θεωρία στην οποία στηρίζεται η μέθοδος των υπερήχων. Θα αναλυθούν φυσικές έννοιες που έχουν αναπτυχθεί από τον κλάδο της κυματικής.

Μεγέθη των κυμάτων

Όταν σε ένα ελαστικό σώμα εφαρμοσθεί ένας εξωτερικός παράγοντας φόρτισης, το σώμα θα παραμορφωθεί για το χρονικό διάστημα που εφαρμόζεται αυτή. Η επίδραση δηλαδή θα είναι παροδική. Με το πέρας της επίδρασης το σώμα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Τα σώματα σε μικροσκοπικό επίπεδο συνίστανται από στοιχειώδη σωματίδια όπως είναι τα μόρια και τα άτομα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για τα ελαστικά σώματα αυτή η σύνδεση επιτυγχάνεται με ελαστικούς συνδέσμους.

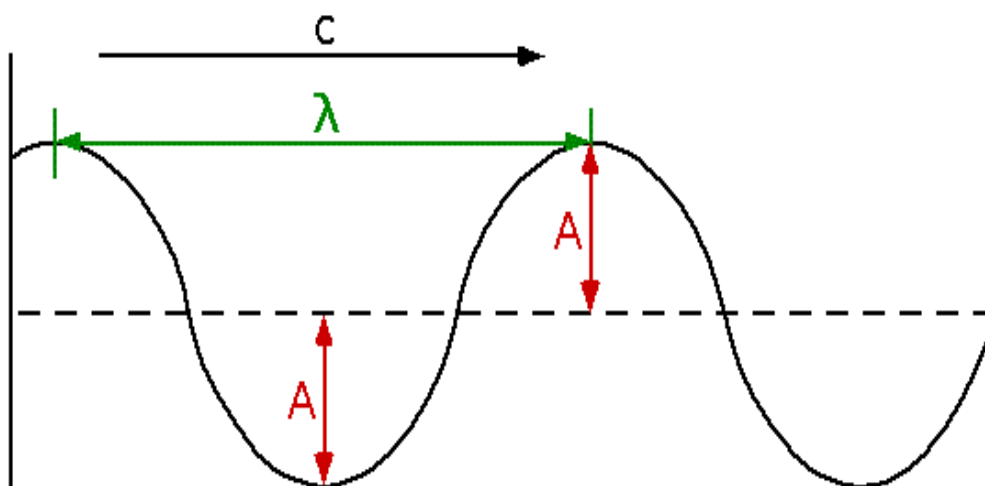
Αν ένα μόριο ενός ελαστικού σώματος εκτελεί μια αρμονική ταλάντωση συχνότητας f τότε συμπαρασύρει και τα γειτονικά του μόρια να εκτελέσουν επίσης την ίδια ταλάντωση. Κατ' αυτόν τον τρόπο εντός ενός υλικού διαδίδεται ενέργεια μεταξύ των μορίων χωρίς την διάδοση ύλης. Αυτός ο μηχανισμός ταλάντωσης καλείται ελαστικό ή μηχανικό κύμα ενώ το υλικό μέσα στο οποίο διαδίδεται καλείται ελαστικό μέσο. Το ελαστικό μέσο μπορεί να έχει μία διάσταση όπως στην περίπτωση ενός νήματος, δύο διαστάσεις στην περίπτωση μιας επίπεδης πλάκας και τέλος τρεις διαστάσεις όπως στην περίπτωση του εδάφους. Βάσει των ιδιοτήτων του μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ομογενές, ισότροπο και ανισότροπο. **Ομογενές**, ονομάζεται ένα μέσο το οποίο παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες καθ' όλη την έκταση της μάζας του. **Ισότροπο** είναι το μέσο που παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες προς μια κατεύθυνση ενώ το **ανισότροπο** παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.

Γενικότερα, ως **κύμα** ορίζουμε μια διαταραχή γύρω από μια θέση ισορροπίας, η οποία διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα μέσα από ένα ή περισσότερα υλικά από μια περιοχή στην άλλη κατά την διάρκεια της οποίας

υπάρχει μεταφορά ενέργειας, χωρίς μεταφορά ύλης. Η ταχύτητα που διαδίδεται το κύμα ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης (c)** και δίνεται από την σχέση

$$c = \lambda \cdot f.$$

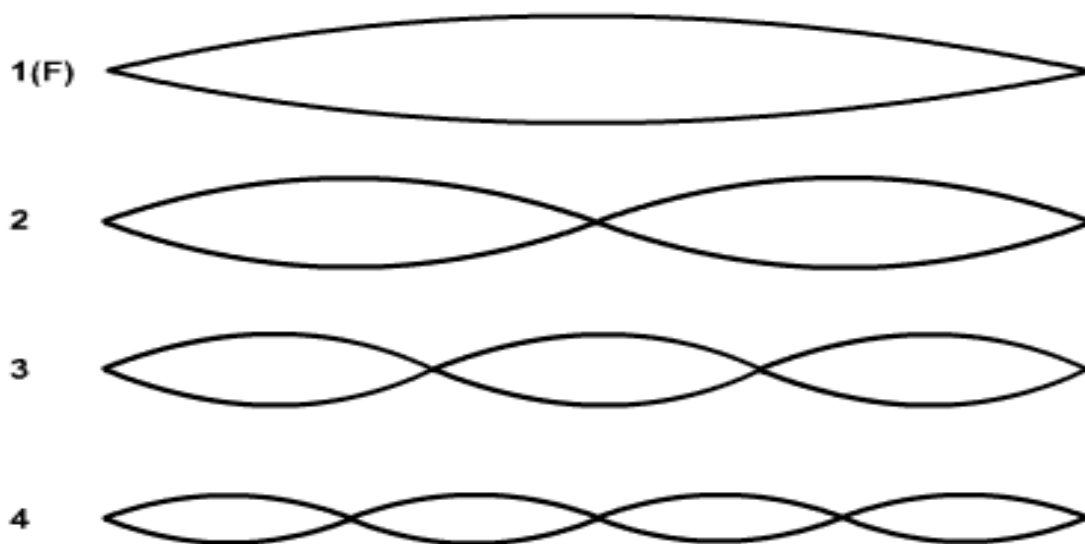
Το λ είναι το **μήκος κύματος**, δηλαδή η απόσταση στην οποία διαδίδεται μία ταλάντωση σε μία περίοδο. Το f είναι η **συχνότητα**, δηλαδή ο αριθμός των πλήρων ταλαντώσεων που εκτελεί ένα υλικό σημείο στην μονάδα του χρόνου. Η συχνότητα του κύματος δεν εξαρτάται από το μέσο διάδοσης αλλά όντας χαρακτηριστικό γνώρισμα της πηγής εξαρτάται αποκλειστικά από αυτή. Άλλα φυσικά μεγέθη που συναντάμε στα κύματα είναι τα εξής. Η **περίοδος (T)** η οποία είναι αντίστροφο μέγεθος της συχνότητας και προσδιορίζει το χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών διαταραχών σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην μονάδα του χρόνου. Το **πλάτος (A)** του κύματος καλείται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της διαταραχής. Η απόλυτη τιμή των δύο τιμών ισούται μεταξύ τους. Το πλάτος σε ένα σημείο μπορεί να μην παραμένει σταθερό ενώ έχει άμεση σχέση από την ενέργεια του κύματος.



Εικόνα 18: Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός κύματος

Το **μέτωπο του κύματος** είναι τα σημεία εκείνα στα οποία μόλις έφτασε μια διαδιδόμενη διαταραχή. Τέλος η **φάση (φ)** του κύματος είναι ένα επίσης βασικό μέγεθος. Εξαρτάται από το σημείο και το χρόνο για το οποίο μελετάμε

και δείχνει σε ποιο σημείο του τριγωνομετρικού κύκλου άρχισε η κίνηση. Δύο σημεία τα οποία απέχουν απόσταση έστω d_1 ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, δηλαδή $d_1 = k \cdot \lambda$ λέγονται **συμφασικά**. Αντίθετα αν δύο σημεία τα οποία έχουν απόσταση έστω d_2 και ισχύει η σχέση $d_2 = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ τότε τα σημεία αυτά βρίσκονται **αντίθεση φάσης**.



Εικόνα 19: Κανονική τρόποι ταλάντωσης στάσιμων κυμάτων

Όταν ένα κύμα διαδίδεται σε ένα άπειρο μέσο τότε το κύμα λέγεται **οδεύον**. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το μέσο έχει όρια που απέχουν απόσταση l τότε από τον συνδυασμό των κυμάτων θα προκύψουν τα **στάσιμα** κύματα. Τα κύματα που δημιουργούνται έχουν μήκος κύματος ανάλογο της απόστασης των ορίων. Η δημιουργία τους είναι αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων αντίθετης κατεύθυνσης αλλά ίδιας συχνότητας, ίδιο πλάτος, την ίδια ταχύτητα και την ίδια διεύθυνση. Για να δημιουργηθεί στάσιμο πρέπει η απόσταση l να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος. Δηλαδή $l = n \cdot \frac{\lambda}{2}$.

Εξίσωση του αρμονικού κύματος

Έστω ένα κύμα διαδίδεται κατά την διεύθυνση $x x'$ σε ένα μέσο. Έστω για χρονική στιγμή $t_0=0$ και για το υλικό σημείο O στην αρχή των αξόνων είναι πηγή κυμάτων και ξεκινά να εκτελεί αρμονική ταλάντωση συχνότητας f . Η

απομάκρυνση από την θέση ισορροπίας την χρονική στιγμή t_1 θα δίνεται από την σχέση

$$y = A \cdot \sin \omega t_1 \quad [2.1]$$

Θεωρούμε τώρα ένα σημείο έστω X_1 δεξιά του O που απέχει απόσταση x . Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης παραμένει σταθερή μέσα στο μέσο τότε το μέτωπο του κύματος θα φτάσει στο σημείο X_1 μετά από χρόνο $t' = \frac{x}{c}$ [2.2]. Την συγκεκριμένη χρονική στιγμή το σημείο θα αρχίσει να εκτελεί ταλάντωση όμοια με εκείνη του O . Η απομάκρυνση που θα έχει το X_1 θα είναι ίδια με την απομάκρυνση την οποία είχε το O τη χρονική στιγμή $t-t'$ δεδομένου ότι η ταλάντωση στο X_1 ξεκινά μετά από χρόνο t' . Αντικαθιστώντας λοιπόν στην σχέση [2.1] θα πάρουμε

$$y = A \cdot \sin \omega(t - t') \quad [2.3]$$

Δεδομένου όμως ότι $\omega = \frac{2\pi}{T}$ και της [2.2] η [2.3] θα γραφεί υπό την μορφή

$$y = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad [2.4]$$

Εάν θελήσουμε να εισάγουμε και την διαφορά φάσης στην σχέση μας τότε δεδομένου ότι γνωρίζουμε πως για ένα σημείο το οποίο απέχει απόσταση λ από την πηγή η διαφορά φάσης θα είναι 2π τότε για ένα σημείο X_1 που απέχει απόσταση x η διαφορά φάσης θα είναι φ . Πιο απλά προκύπτει ότι $\varphi = 2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}$. Με αντικατάσταση τελικά στην [2.4] θα έχουμε.

$$y = A \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi \right) \quad [2.5]$$

Μπορούμε επίσης να γράψουμε την εξίσωση στην μορφή

$$y = A \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad [2.6a]$$

$$\text{ή } y = A \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad [2.6b]$$

Εάν θεωρήσουμε ένα σημείο X_1 αριστερά του O τότε το κύμα διαδίδεται προς τα αριστερά. Ακολουθώντας παρόμοια προσέγγιση με προηγουμένως θα προκύψει ότι

$$y = A \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad [2.7\alpha]$$

$$\text{ή } y = A \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \quad [2.7\beta]$$

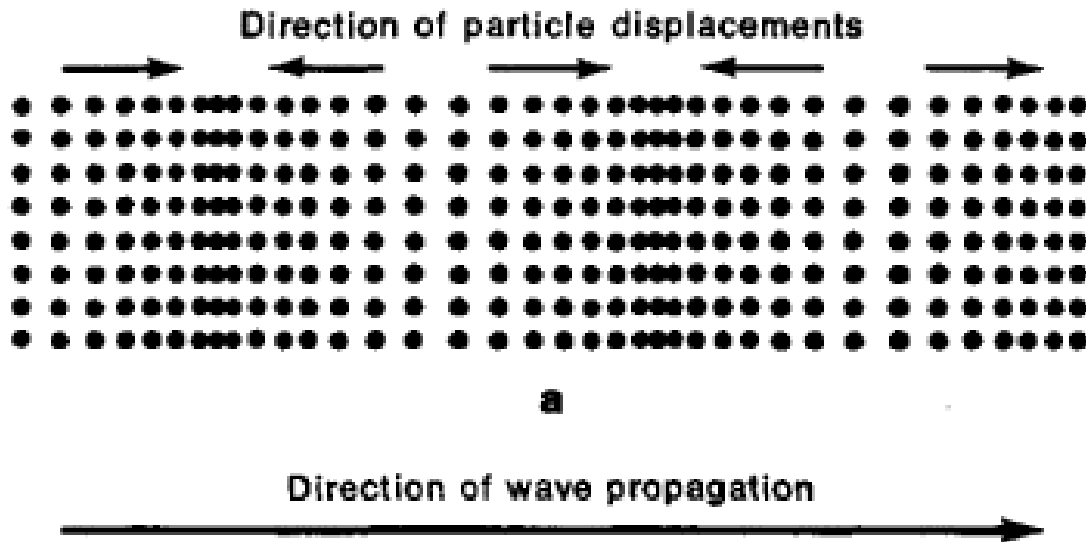
$$\text{ή } y = A \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct + x) \quad [2.7\gamma]$$

Τύποι μηχανικών κυμάτων

Κύματα χώρου

Στην διάδοση των κυμάτων υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές διευθύνσεις. Αυτές είναι οι διεύθυνση ταλαντώσεως των σωματιδίων και η διεύθυνση διαδόσεως του κύματος. Έτσι προκύπτουν δύο βασικές κατηγορίες κυμάτων. Τα διαμήκη και τα εγκάρσια.

Τα **διαμήκη κύματα (longitudinal waves)** λέγονται αλλιώς και κύματα πίεσεως. Πρόκειται για τα κύματα στα οποία η διεύθυνση ταλάντωσης των σωματιδίων και η διεύθυνση διαδόσεως του κύματος συμπίπτουν. Τέτοια κύματα διαδίδονται σε όλες τις μορφές της ύλης .



Εικόνα 20: Γραφική αναπαράσταση διαμήκων κυμάτων

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα τέτοιου κύματος έχουμε αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα ελατήριο με το ένα του άκρο ακλόνητα στερεωμένο. Αν αναγκάσουμε το ελεύθερο άκρο σε αρμονική ταλάντωση παράλληλα προς το ελατήριο θα παραχθεί ένα αρμονικό κύμα που θα διαδοθεί κατά μήκος του ελατηρίου αναγκάζοντας κάθε σημείο του σε ταλάντωση του ίδιου πλάτους και διεύθυνσης με το ελεύθερο άκρο.

Κατά την διάδοση ενός διαμήκους κύματος δημιουργούνται πυκνώματα και αραιώματα. Αυτό πρακτικά σημαίνει περιοδική μεταβολή του όγκου του ελαστικού σώματος. Για τον λόγο αυτόν απαιτείται ελαστικότητα όγκου την οποία έχουν και τα στερεά και τα υγρά και τα αέρια. Τέλος τα διαμήκη κύματα δεν υφίστανται πόλωση.

Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται ένα διαμήκες κύμα σε μία άπειρη λεπτή ράβδο διαμέτρου d , για $d \ll \lambda$ θα ισχύει

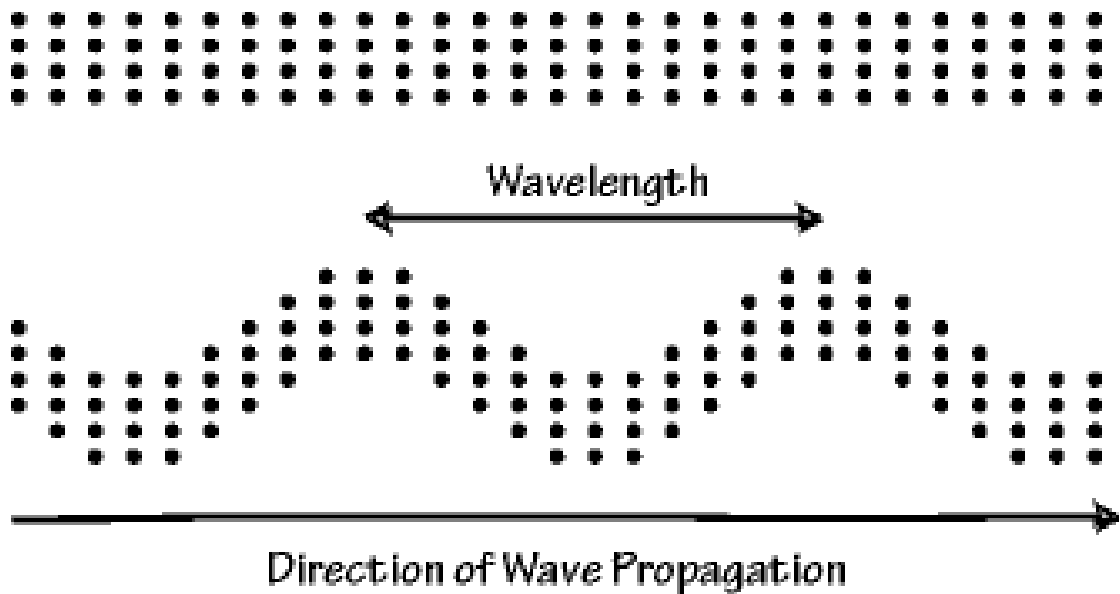
$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Σε περίπτωση όπου έχουμε στερεό σώμα απείρων διαστάσεων τότε η ίδια σχέση έχει την μορφή

$$c_l^\infty = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

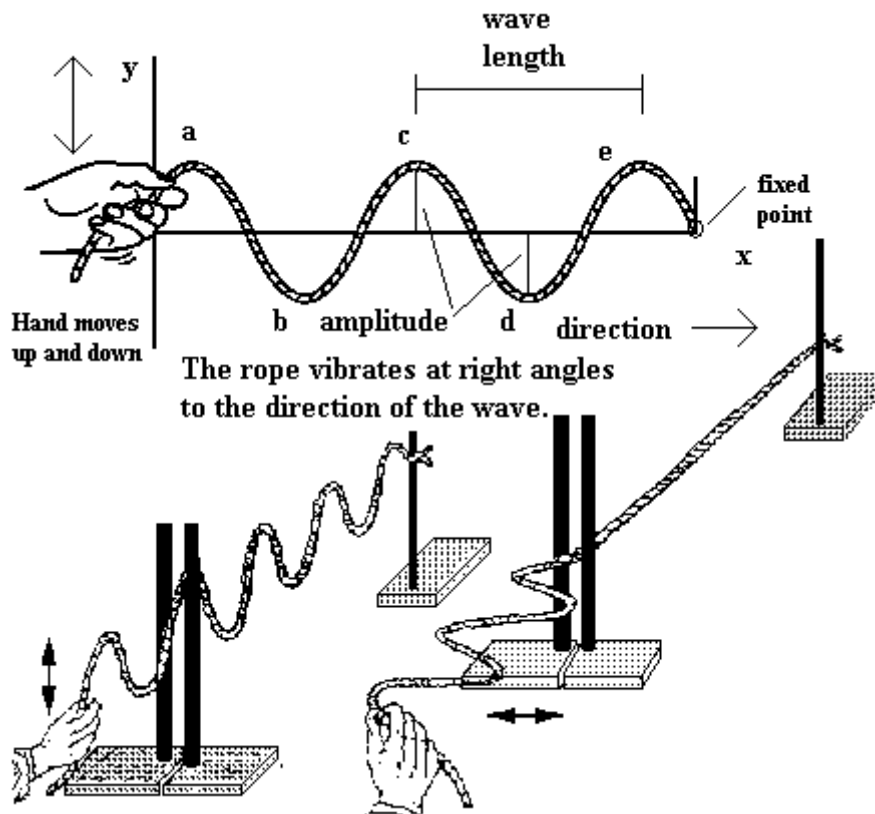
όπου E το μέτρο ελαστικότητας & ρ ο λόγος *POISSON*

Τα **εγκάρσια κύματα (transverse waves)** είναι εκείνα τα κύματα στα οποία η ταλάντωση των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου στο οποίο διαδίδονται γίνεται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης.



Εικόνα 21: Γραφική αναπαράσταση εγκαρσίων κυμάτων

Για την συγκεκριμένη κατηγορία κύματος είναι χορδή με το ένα άκρο ακλόνητα στερεωμένο. Αναγκάζοντας το ελεύθερο άκρο της χορδής σε ταλάντωση κάθετα σε αυτή τότε θα δημιουργηθεί ένα κύμα το οποίο και θα διαδοθεί στη χορδή. Αν παρατηρήσουμε οποιοδήποτε υλικό σημείο πάνω στην χορδή θα δούμε ότι αυτό εκτελεί ταλάντωση ίσου πλάτους με το σημείο στο οποίο προκαλέσαμε την διαταραχή.



Τα κύματα αυτά διαδίδονται μόνο στα στερεά. Ο λόγος είναι γιατί στα υγρά και τα αέρια τα στοιχειώδη σωματίδια δεν μπορούν να παραλάβουν διατμητικές δυνάμεις. Παρόλα αυτά μπορεί να υπάρξει διάδοση τους σε παχύρρευστα υγρά με υψηλό ιξώδες. Επίσης κύματα αυτής της κατηγορίας μπορούν να πολωθούν σε αντίθεση με τα διαμήκη.

Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων δίνεται από την σχέση

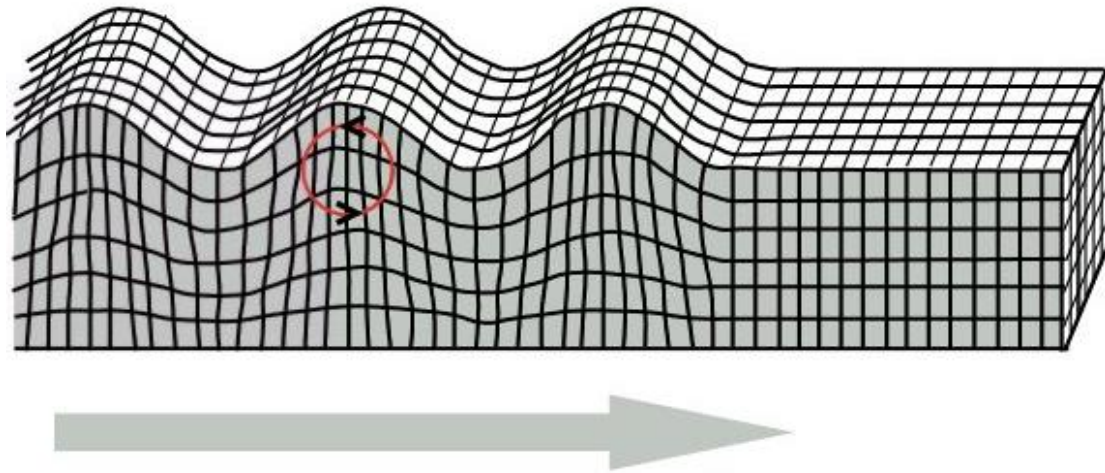
$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

όπου G το μέτρο διάτμησης & ρ ο λόγος POISSON

Κύματα επιφάνειας

Πρόκειται για κύματα που δημιουργούνται και ακολουθούν την επιφάνεια του μέσου. Έχουν μεγάλα πλάτη στην επιφάνεια και μειώνονται σταδιακά με το βάθος. Τα διακρίνουμε σε δύο είδη τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

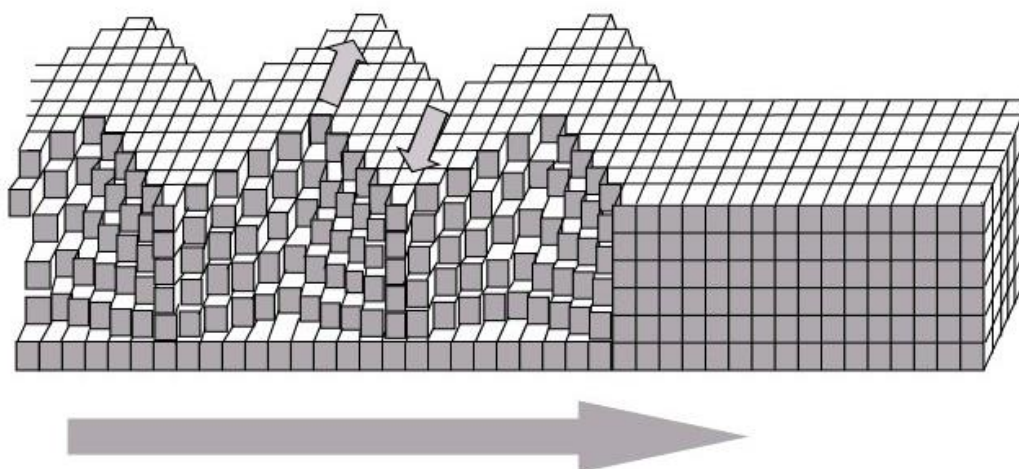
Κύματα Rayleigh



Εικόνα 22: Γραφική αναπαράσταση κυμάτων Rayleigh

Τα κύματα αυτά προκαλούν ελλειπτικής τροχιάς κίνηση στα σωματίδια του μέσου. Κοντά στην επιφάνεια ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης είναι παράλληλος της διεύθυνσης της μετατόπισης και ο μεγάλος κάθετα σε αυτήν και στην επιφάνεια του μέσου. Η φορά της ελλειπτικής τροχιάς είναι αντίστροφα από εκείνη της μετατόπισης. Τα πλάτη της ταλάντωσης μειώνονται με το βάθος και χαρακτηριστικά σε βάθος ίσο με το μήκος κύματος λ τα πλάτη σχεδόν μηδενίζονται. Η φορά της τροχιάς σε βάθος ίσο με $0,192\lambda$ αντιστρέφεται. Η ταχύτητα διάδοσης(c_s) τους είναι ίση με $c_s = 0,9c_t$, για διάδοση σε ράβδο ισχύει $c_s = 0,9194 \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ και για μέσο απείρων διαστάσεων $c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(n+1)}}$. Τέλος τα κύματα Rayleigh σκεδάζονται.

Κύματα Love



Εικόνα 23: Γραφική αναπαράσταση κυμάτων Love

Τα κύματα αυτά δημιουργούνται όταν ένα στρώμα ορισμένου πάχους υπέρκειται ενός ημιχώρου που έχει διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων. Κατά τη διάδοση τέτοιου κύματος τα υλικά σημεία ταλαντώνονται στο οριζόντιο επίπεδο, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στην πράξη εμφανίζεται ένα γραμμικά πολωμένο εγκάρσιο κύμα παράλληλο στην επιφάνεια.

Ιδιότητες ηχητικών κυμάτων

Έστω ένα κύμα προσπίπτει κάθετα σε διαχωριστική επιφάνεια διαφορετικών υλικών με κατεύθυνση από το υλικό 1 στο υλικό 2. Τότε ένα μέρος της ηχητικής ενέργειάς του περνά στο υλικό 2 ενώ κάποιο άλλο μέρος ανακλάται πίσω στο υλικό 1. Το ποσοστό του ανακλώμενου και του διερχόμενου κύματος εξαρτάται από την **ακουστική σταθερά Z** η οποία ορίζεται ως $Z = \rho c$, όπου ρ η πυκνότητα του υλικού και c η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος.

Για ένα ηχητικό κύμα το οποίο προέρχεται από ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1 και προσπίπτει κάθετα ένα άλλο ακουστικής αντίστασης Z_2 τότε το ποσοστό το οποίο ανακλάται δίνεται από τον συντελεστή ανάκλασης και το ποσοστό που διαθλάται από τον συντελεστή διάθλασης. Αναλυτικότερα ο **συντελεστής ανάκλασης** ορίζεται ως

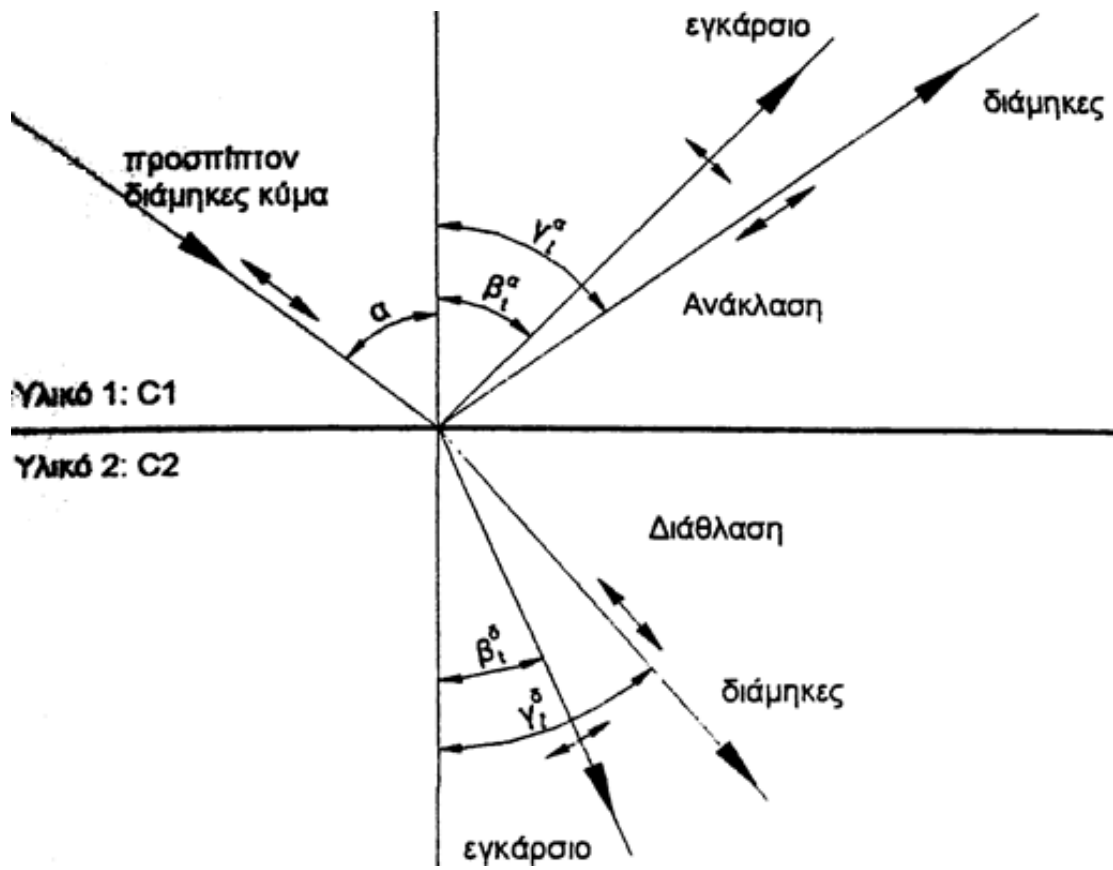
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

και ο **συντελεστής διάθλασης** ορίζεται ως

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

Αυτές οι σχέσεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω της $1 + R = T$ η οποία στηρίζεται στην συνέχεια της ηχητικής πίεσεων. Αναλυτικότερα η σχέση προκύπτει από την $P_0 + P_1 = P_2$ όπου $P_1 = R \cdot P_0$ και $P_2 = T \cdot P_0$. Όπου με απλή αντικατάσταση προκύπτει η συνθήκη. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι εάν δύο υλικά έχουν τις ίδιες ακουστικές αντιστάσεις τότε έχουμε $R=0$ και $T=1$. Δηλαδή όλος ο ήχος περνάει από το ένα στο άλλο υλικό ανεμπόδιστα.

Σε περίπτωση που ένα διαμήκες κύμα προσπέσει υπό γωνία σε μια λεία επιφάνεια τότε, όπως ακριβώς ισχύει στην οπτική, θα υπάρξει ανάκλαση και διάθλαση. Με την μόνη διαφορά ότι θα δημιουργηθούν εγκάρσια και διαμήκη κύματα έχοντας τελικά τέσσερα συνολικά νέα κύματα. Σε περίπτωση υγρού ή αερίου τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται.



Εικόνα 24: Ανάκλαση και διάθλαση ενός προσπίτοντος διαμήκους κύματος
 Οι γωνίες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης σχετίζονται μεταξύ τους μέσω του νόμου του Snell ως εξής.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2} \Rightarrow \frac{\sin\alpha}{c_1^1} = \frac{\sin\gamma_1^\alpha}{c_1^1} = \frac{\sin b_1^\alpha}{c_1^1} = \frac{\sin\gamma_1^\delta}{c_2^2} = \frac{\sin b_1^\delta}{c_2^2}$$

Κεφάλαιο III

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τον τρόπο παραγωγής υπερήχων καθώς και τα μέσα με τα οποία το επιτυγχάνουμε, την τοπολογία των ηχητικών δεσμών που παράγονται και τις ιδιότητες τους.

Ορισμός υπερήχων

Γενικότερα ως ήχος ονομάζεται το περιοδικό φαινόμενο της μεταβολής της πίεσης του αέρα η συχνότητα του οποίου είναι ικανή να ερεθίσει το αισθητήριο όργανο της ακοής προκαλώντας και το αντίστοιχο ερέθισμα. Από το ανθρώπινο αυτί γίνονται αντιληπτά ηχητικά κύματα που βρίσκονται μόνο στο εύρος των 16Hz με 20KHz τα οποία ονομάζουμε ακουστικούς ήχους. Υπάρχουν και άλλες ομάδες ήχων με βάση την συχνότητά τους. Πιο συγκεκριμένα το φάσμα των μηχανικών ελαστικών κυμάτων το χωρίζουμε στις εξής 4 κατηγορίες.

- Υπόηχους, με συχνότητες μικρότερες των 16Hz
- Ακουστικούς ήχους, με συχνότητες 16Hz με 20KHz
- Υπέρηχους, με συχνότητες 20KHz με 20MHz
- Υπερυπέρηχους, με συχνότητες μεγαλύτερες των 20MHz

Προφανώς λοιπόν με τον όρο υπέρηχοι αναφερόμαστε στα ηχητικά κύμα τα οποία έχουν συχνότητα μεγαλύτερη των 20KHz και μικρότερη των 20MHz.

Μέθοδοι παραγωγής υπερήχων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την παραγωγή υπερήχων και κατά την διάρκεια του περασμένου αιώνα έγιναν πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη και τη βελτίωση τέτοιων μεθόδων. Οι σημαντικότερες είναι η μηχανική μέθοδος καθώς και οι μέθοδοι που βασίζονται στα φαινόμενα της μαγνητοσυστολής και του πιεζοηλεκτρισμού.

Μηχανικές μέθοδοι

Σε αυτή την κατηγορία παράγονται υπέρηχοι χαμηλών κυρίως συχνοτήτων και για αυτό τον λόγο δεν χρησιμοποιούνται στον τομέα των ΜΚΕ. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για δημιουργία τέτοιων υπερήχων είναι συνήθως

σφυρίχτρες, γεννήτριες ακροφυσίου και σειρήνες. Δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω στην συγκεκριμένη κατηγορία, μιας και οι επόμενες παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στον τομέα των ΜΚΕ.

Μαγνητοσυστολή

Σιδηρομαγνητικά υλικά λέγονται εκείνα τα οποία έχουν σαν ιδιότητα να μαγνητίζονται εύκολα όταν εισέρχονται εντός μαγνητικού πεδίου και διατηρούν τον μαγνητισμό τους μετά την απομάκρυνσή τους από το πεδίο. Αν θεωρήσουμε μια ράβδο σιδηρομαγνητικού υλικού την οποία και τοποθετούμε εντός ενός πηνίου. Στην περίπτωση επιμήκυνσης ή βράχυνσης της ράβδου τότε παρατηρούμε την εμφάνιση μιας ηλεκτρεργετικής δύναμης στα άκρα του πηνίου. Επίσης στην αντίστροφη περίπτωση στην οποία εφαρμόσουμε στο πηνίο ένα εναλλασσόμενο δυναμικό τότε θα παρατηρήσουμε ταλάντωση της ράβδου. Το φαινόμενο αυτό λέγεται φαινόμενο μαγνητοσυστολής. Η ανηγμένη παραμόρφωση της ράβδου είναι πολύ μικρή και κυμαίνεται στην τάξη 10^{-4} με 10^{-6} .

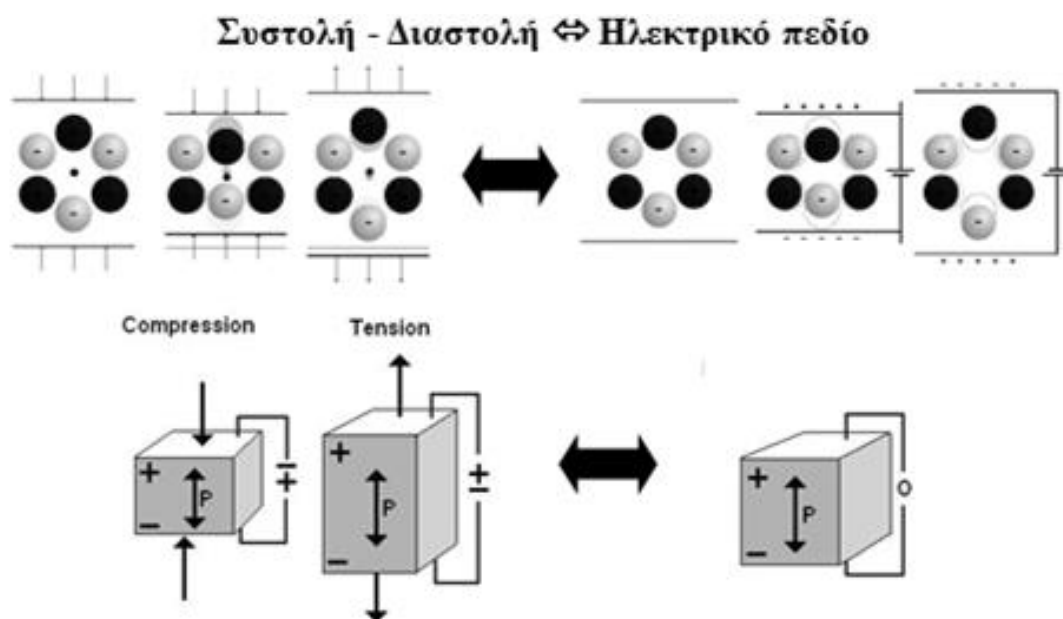
Με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής παράγονται υψηλής ενέργειας ταλαντώσεις με μικρές συχνότητες που δεν ξεπερνούν τα 100 KHz. Τέτοιοι ταλαντωτές κατασκευάζονται από λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικών υλικών τα οποία μετά από επεξεργασία διαμορφώνονται σε μορφή σωλήνων για να έχουν μικρότερες απώλειες από επαγωγικά ρεύματα ή ρεύματα μαγνητικής υστέρησης.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ενδείκνυται για την εξέταση του σκυροδέματος. Αυτό γιατί εξαιτίας της μεγάλης ανομοιογένειας του σκυροδέματος υπάρχει υψηλή απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων και έτσι υπάρχει περιορισμός έως τα 100 KHz.

Πιεζοηλεκτρική μέθοδος

Σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται η λειτουργία των κεφαλών παραγωγής υπερήχων. Ανακαλύφθηκε από τα αδέρφια Pierre και Jacques Curie στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Πρόκειται για μια ιδιότητα που έχουν μερικά μη αγώγιμα κρυσταλλικά υλικά χωρίς κέντρο συμμετρίας ή με πολικούς άξονες να παράγουν ηλεκτρική τάση μεταξύ των απέναντι εδρών τους όταν δέχονται κάποια

μηχανική τάση. Τα ηλεκτρικά φορτία αλλάζουν πρόσημο με την συχνότητα που αλλάζει φορά η καταπόνηση.



Εικόνα 25: Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού

Εάν δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις στον πιεζοκρύσταλλο τότε τα ηλεκτρικά φορτία είναι διατεταγμένα σε μια τέτοια συμμετρία ώστε να εξουδετερώνονται μεταξύ τους. Όταν όμως εφαρμοστεί εξωτερική πίεση τότε υπάρχει μεταβολή στο πάχος και κατά συνέπεια μεταβολή στην εσωτερική ισορροπία που συνεπάγεται την ανάπτυξη ενός άμεσα μετρήσιμου ηλεκτρικού πεδίου.

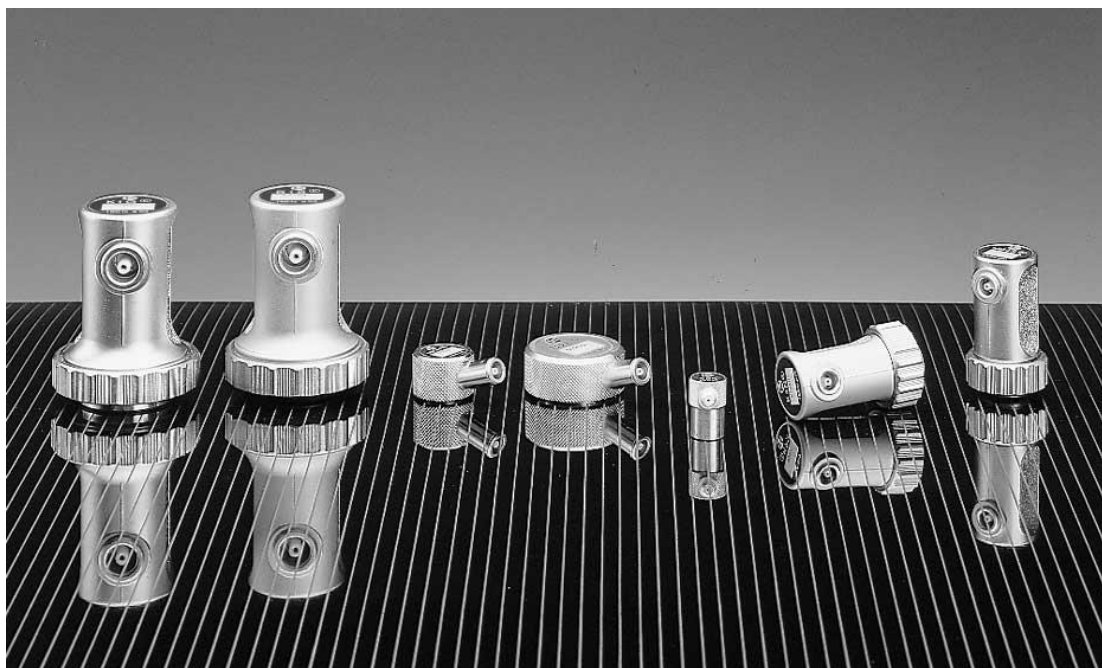
Ισχύει και το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Δηλαδή όταν ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος διεγείρεται από ηλεκτρικό δυναμικό παραμορφώνεται ανάλογα με την φορά του ηλεκτρικού πεδίου. Η παραμόρφωση εκφράζεται από την σχέση $S = \delta V$, όπου S η παραμόρφωση [cm], V η διαφορά δυναμικού [Volt] και δ η πιεζοηλεκτρική σταθερά [cm/Volt]. Σε περίπτωση που εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση με συχνότητα f τότε ο κρύσταλλος θα πάλλεται με την ίδια συχνότητα.

Ο χαλαζίας είναι ένα διαδομένο κρυσταλλικό υλικό το οποίο και εμφανίζει τέτοια συμπεριφορά. Ο φυσικός αυτός κρύσταλλος έχει την μορφή εξαγωνικού πρίσματος και διαθέτει τρεις πολικούς άξονες, τους X_1, X_2, X_3 , κάθε

έναν από τους οποίους περνά από δύο απέναντι κορυφές της εξαγωνικής εγκάρσιας διατομής τους. Οι πολικοί αυτοί άξονες εμφανίζουν την μέγιστη συγκέντρωση ηλεκτρικών φορτίων κατά την διάρκεια της παραμόρφωσης του κρυστάλλου. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού εμφανίζεται μόνο σε πλάκες οι οποίες είναι κομμένες κάθετα προς τους άξονες X ή Y οι οποίοι λέγονται και ηλεκτρικοί άξονες. Έτσι λοιπόν έχουμε την χ-πλάκα που είναι κομμένη κάθετα στον άξονα των X και την y-πλάκα η οποία είναι κομμένη κάθετα στον Y.

Πέραν του χαλαζία άλλα υλικά τα οποία βρίσκουν εφαρμογή είναι, το άλας του Rochelle($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$), το τιτανικό βάριο(BaTiO_3), ο μετανιοβικός μόλυβδος(PbNb_2O_6) και άλλα.

Υπερηχητικές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές



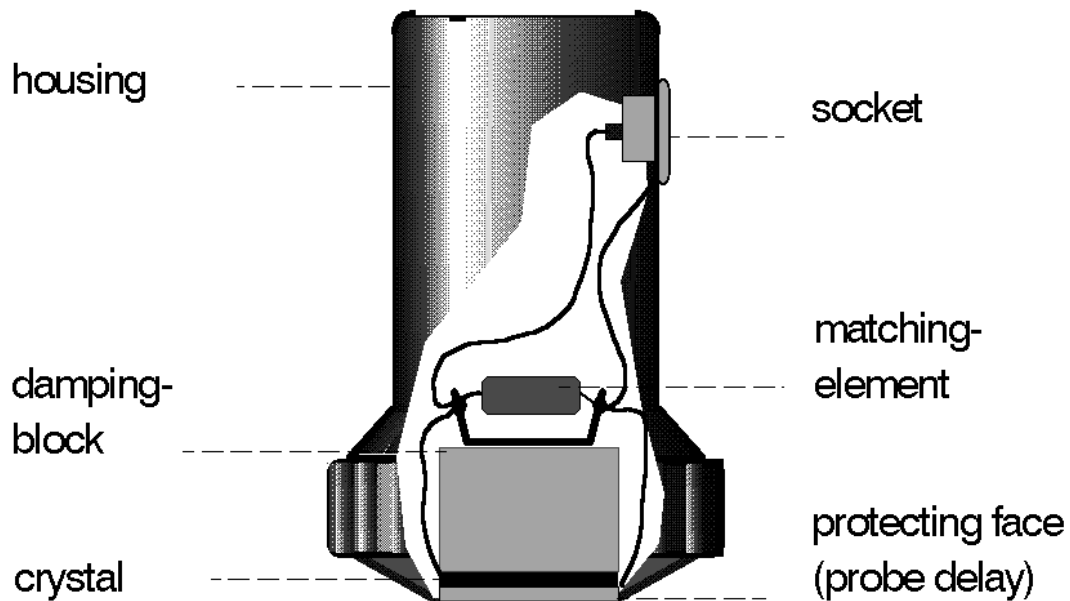
Εικόνα 26: Διάφορες υπερηχητικές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές που χρησιμοποιούνται στους ΜΚΕ αναλόγως την εφαρμογή

Στις κεφαλές που χρησιμοποιούνται στους ΜΚΕ η γεννήτρια των υπερήχων είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Πρόκειται για ένα λεπτό δίσκο ο οποίος κόβεται από έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο κάθετα στους ηλεκτρικούς του άξονες και στη συνέχεια καθαρίζεται με υπερήχους. Από το πάχος d του πλακιδίου εξαρτάται τελικά η συχνότητα ταλάντωσης η οποία δίνεται από την σχέση $f_0 = \frac{c}{2d}$.

Δεν θα αναπτύξουμε περαιτέρω τον τρόπο κατασκευής μιας κεφαλής δεδομένου ότι δεν πρόκειται για το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Αυτό που πραγματικά μας ενδιαφέρει σε μια κεφαλή είναι το είδος της, τα χαρακτηριστικά της, η συχνότητα λειτουργίας της, τα γεωμετρικά στοιχεία του πλακιδίου και η γωνία εκπομπής της στην περίπτωση γωνιακής δέσμης. Όλα αυτά τα στοιχεία αναγράφονται επάνω σε κάθε κεφαλή από τον κατασκευαστή της.

Οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται στους ΜΚΕ μπορεί να είναι πομποί, δέκτες ή ταυτόχρονα και πομποί και δέκτες. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, στην δεύτερη το ορθό και στην τρίτη ταυτόχρονα το ορθό και το ανάστροφο. Επίσης η ανάγκη μελέτης των υλικών οδήγησε στην δημιουργία μιας πλούσιας ποικιλίας κεφαλών. Έτσι λοιπόν έχουν δημιουργηθεί κεφαλές καθέτου και πλάγιας δέσμης καθώς και μεταβλητής γωνίας. Υπάρχουν επίσης εμβαπτιζόμενες κεφαλές, κεφαλές διπλού κρυστάλλου και κεφαλές ειδικού τύπου. Ανάλογα την εφαρμογή, ο μηχανικός των ΜΚΕ κρίνει τον τύπο της κεφαλής που απαιτείται να χρησιμοποιηθεί. Στις επόμενες σειρές θα περιγράψουμε τις υπάρχουσες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές.

Κεφαλές καθέτου δέσμης



Εικόνα 27: Γραφική αναπαράσταση μιας τυπικής πιεζοηλεκτρικής κεφαλής καθέτου δέσμης

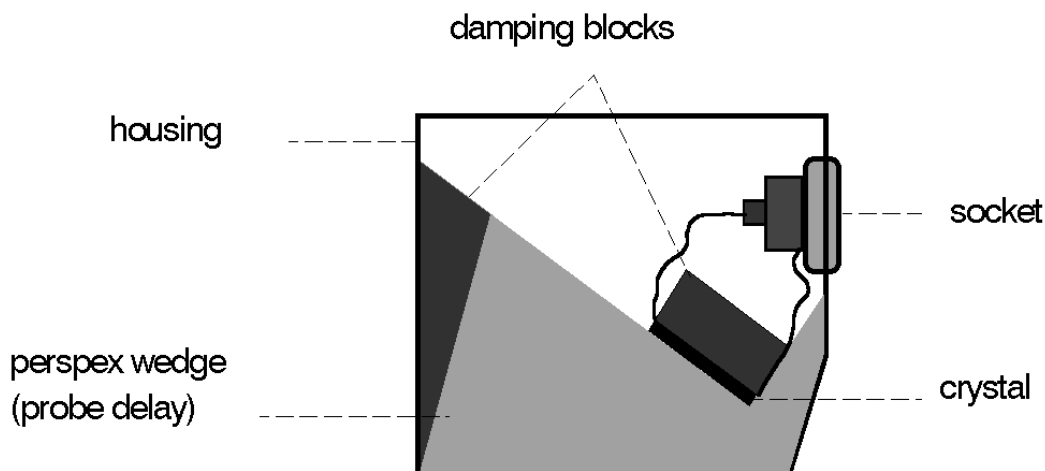
Πρόκειται για τον τύπο κεφαλής που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική. Στις συγκεκριμένες κεφαλές η ηχητική δέσμη προσπίπτει κάθετα στο προς εξέταση δοκίμιο. Υπάρχουν διαφορετικές κεφαλές που εκπέμπουν είτε διαμήκη είτε εγκάρσια κύματα. Υπάρχει επίσης μεγάλη ποικιλία στην συχνότητα της ηχητικής δέσμης που εκπέμπεται. Στην συσκευή του εργαστηρίου που θα περιγράψουμε στο επόμενο κεφάλαιο το εύρος εφαρμογής κυμαίνεται στην περιοχή των 0,5MHz-15MHz.

Για την παραγωγή διαμηκών κυμάτων τότε ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος της κεφαλής κατά την κατασκευή της τέμνεται κατά τον άξονα x . Αντίθετα για την παραγωγή εγκαρσίων κυμάτων ο κρύσταλλος τέμνεται κατά τον άξονα y .

Τέτοιες κεφαλές ενδείκνυνται για την ανεύρεση ατελειών οι οποίες είναι παράλληλες στην επιφάνεια εφαρμογής. Επίσης χρησιμοποιούνται και για παχυμετρήσεις ελασμάτων. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των ταχυτήτων των εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων από τα οποία προκύπτουν όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο οι ελαστικές σταθερές του υλικού όπως

επίσης και διάφορα άλλα χρήσιμα μεγέθη. Τέλος υπολογίζονται και οι αποσβέσεις των ηχητικών κυμάτων τα οποία διέρχονται από ένα υλικό.

Κεφαλές γωνιακής δέσμης

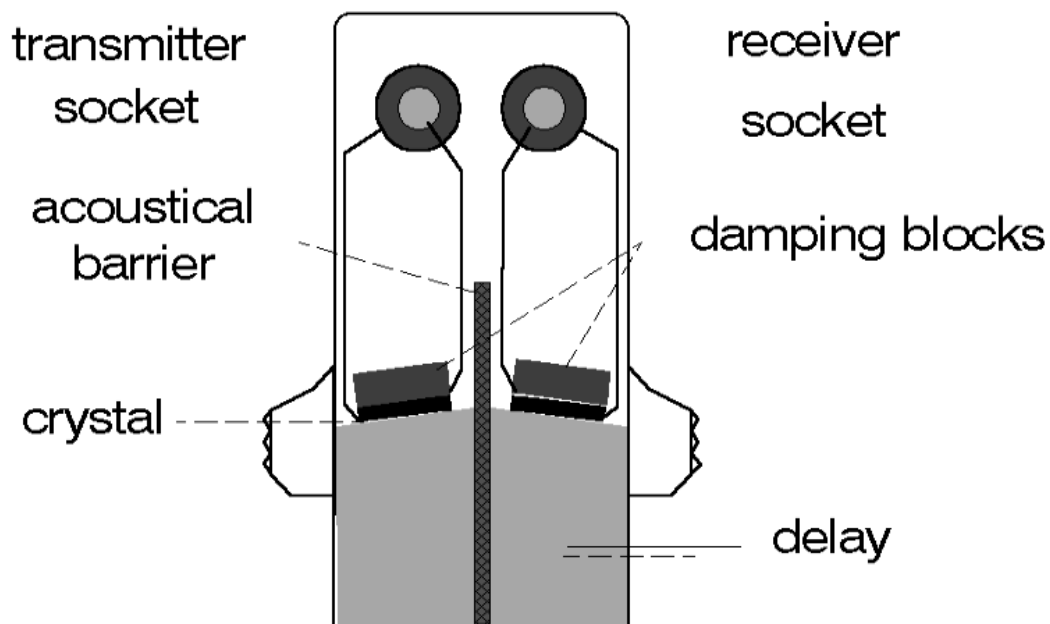


Εικόνα 28: Πιεζοηλεκτρική κεφαλή η οποία εκπέμπει έσσημη υπερήχων υπό γωνία

Πρόκειται για κεφαλές οι οποίες έχουν το πιεζοηλεκτρικό πλακίδιο να εκπέμπει υπό γωνία. Αυτό γίνεται γιατί πολλές φορές υπάρχουν εφαρμογές οι οποίες καθιστούν αδύνατη την εφαρμογή μιας κεφαλής καθέτου δέσμης καθώς και για την ανεύρεση κεκλιμένων ως προς την επιφάνεια ατελειών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής τέτοιων κεφαλών είναι αυτό του ελέγχου συγκολλήσεων. Μια συγκόλληση αφενός δεν επιτρέπει την απευθείας εφαρμογή κεφαλής πάνω σε αυτή λόγω της τραχιάς επιφάνειας που έχει και αφετέρου η γεωμετρία των συνηθέστερων ατελειών που προκύπτουν είναι υπό γωνία στην επιφάνεια.

Κεφαλές διπλού κρυστάλλου (transmitter-receiver probes-TR)

Σε αυτού του τύπου τις κεφαλές υπάρχουν δύο πιεζοηλεκτρικά πλακίδια. Το ένα παίζει το ρόλο του πομπού και το άλλο του δέκτη. Οι συγκεκριμένες κεφαλές, λόγω κατασκευής τους, δεν παρουσιάζουν νεκρή ζώνη οπότε ενδείκνυνται για την επιθεώρηση λεπτών δοκιμίων και την ανεύρεση ατελειών πολύ κοντά στην επιφάνεια ή ακόμα και επιφανειακών ατελειών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης και για παχυμετρήσεις και τον έλεγχο των διαστάσεων λεπτών δοκιμίων. Ενδείκνυται επίσης για την σάρωση μεγάλων ατελειών.



Εικόνα 29: Γραφική αναπαράσταση μιας κεφαλής διπλού κρυστάλλου

Η γωνία που σχηματίζουν τα δύο πλακίδια μεταξύ τους καλείται γωνία οροφής. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία τόσο πιο μικρή είναι η νεκρή ζώνη καθώς και η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας.

Εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές

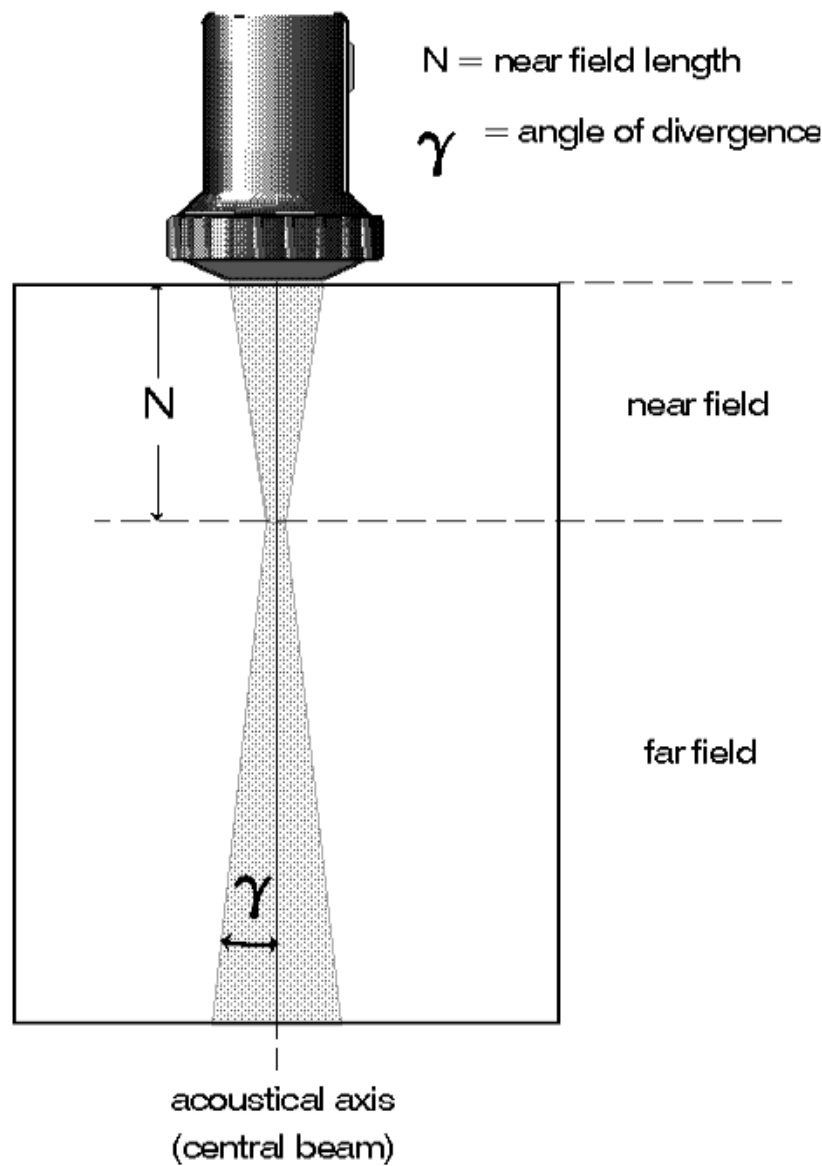
Τέτοιες κεφαλές χρησιμοποιούνται για δοκιμές σε υγρό περιβάλλον. Συνήθως πρόκειται για αυτοματοποιημένους ελέγχους, όπου τα προς εξέταση προϊόντα παράγονται σε σειρά. Χαρακτηριστική εφαρμογή τέτοιων κεφαλών γίνεται στην c-scan στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

Τοπολογία και χαρακτηριστικά δέσμης υπερήχων

Οι πιεζοκρύσταλλοι συνήθως έχουν διαμορφωθεί σε κυκλική και ορθογωνική διατομή. Αντί όμως η εκπεμπόμενη δέσμη να έχει την μορφή κυλίνδρου ή πρίσματος έχει την μορφή του σχήματος.

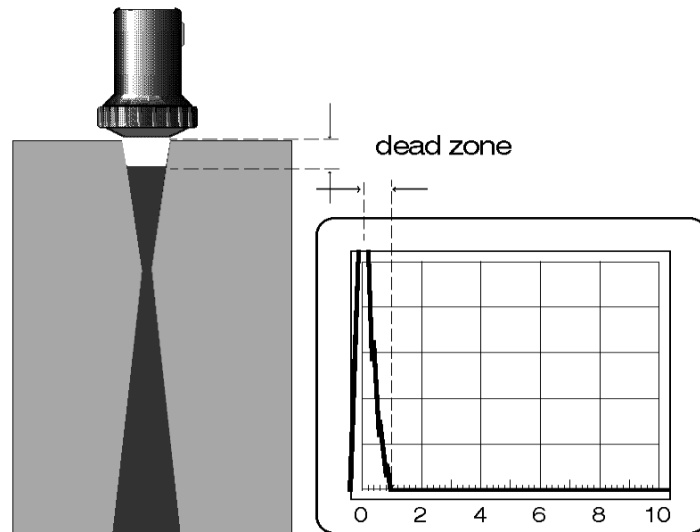
Τοπολογία ηχητικής δέσμης

Η δέσμη χωρίζεται σε τρεις βασικές ζώνες.

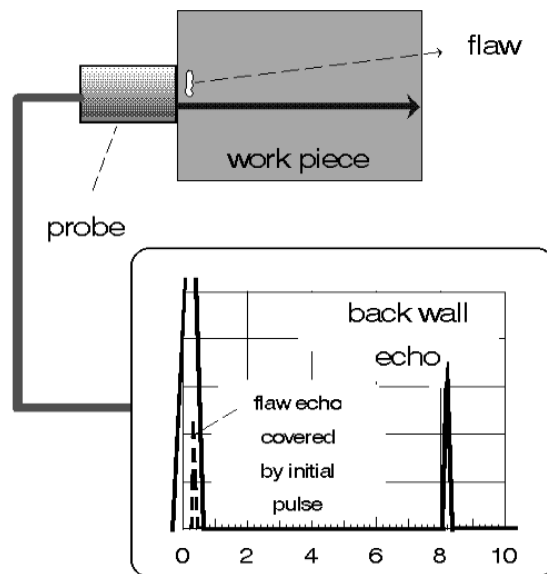


Εικόνα 30: Τοπολογία υπερηχητικής δέσμης

Η πρώτη ζώνη που συναντάμε μετά την επιφάνεια εκπομπής του πιεζοηλεκτρικού είναι η **νεκρή ζώνη**. Το μέγεθος της είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Σε αυτή την περιοχή δεν υπάρχει δυνατότητα να ανιχνευθούν ασυνέχειες μιας και καταλαμβάνεται από τον αρχικό παλμό.

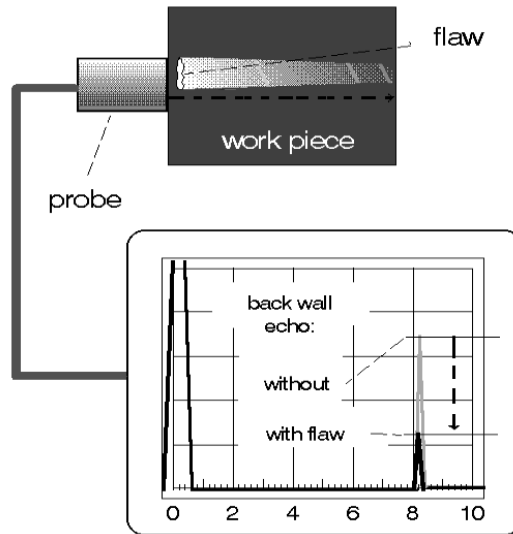


Εικόνα 31: Νεκρή ζώνη όπως φαίνεται στην οθόνη της συσκευής

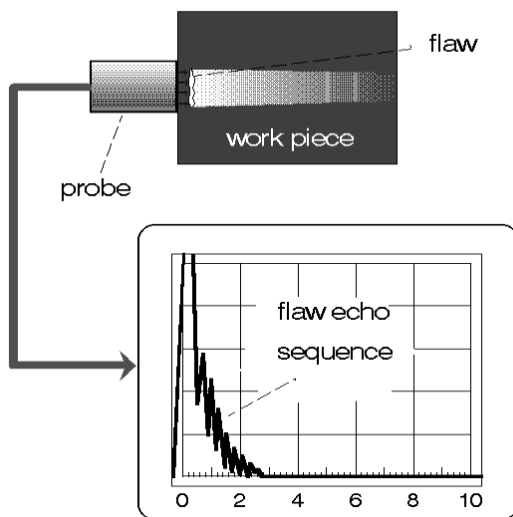


Εικόνα 32: Λήψη στην οθόνη ατέλειας η οποία ανιχνεύεται δύσκολα δεδομένου ότι βρίσκεται στην νεκρή ζώνη και καλύπτεται από τον αρχικό παλμό

Μπορούμε όμως σε κάποιες περιπτώσεις να αντιληφθούμε ότι υπάρχει κάποιο είδος ατέλειας στην περιοχή αυτή. Σε περίπτωση όπου η ατέλειά μας είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καλύπτει ένα αξιόλογο ποσοστό της διατομής της δέσμης τότε θα έχουμε ως ένδειξη μια πτώση στο πλάτος του παλμού. Εξαιτίας επίσης ανακλάσεων μεταξύ της ατέλειας και του άνω ορίου του δοκιμίου θα δημιουργηθούν ηχώ.



Εικόνα 33: Απεικόνιση στην οθόνη ατέλειας η οποία βρίσκεται στην νεκρή ζώνη. Στην περίπτωση αυτή υποπτευόμαστε την ύπαρξή της λόγω της πτώσης του παλμού



Εικόνα 34: Στην περίπτωση όπου υπάρχει ατέλεια στην νεκρή ζώνη η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό του εμβαδού της διατομής του υπερήχου τότε στην οθόνη λαμβάνουμε μια καμπύλη αυτής της μορφής

Η επόμενη είναι η εγγύς ζώνη. Σε αυτή λόγω της συμβολής τα ύψη των ανακλάσεων από τις ασυνέχειες των ίδιων διαστάσεων μπορεί να αυξάνονται με την απόστασή τους από τον κρύσταλλο. Το μήκος της εγγύς ζώνης N δίνεται από την σχέση

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

Όπου D η διάμετρος του κρυστάλλου, f η συχνότητα σε MHz, λ το μήκος κύματος σε mm και c η ταχύτητα του ήχου σε km/s.

Τέλος έχουμε την **απομακρυσμένη ζώνη**. Στην περιοχή αυτή τα ύψη των ανακλάσεων που δημιουργούνται από ίδιου μεγέθους ατέλειες είναι αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασης τους από τον κρύσταλλο.

Κεφάλαιο IV

Πεδίο εφαρμογών υπερήχων

Στο παρών κεφάλαιο θα περιγράψουμε τις εφαρμογές που συναντάμε την χρήση των υπερήχων καθώς επίσης και της μεθόδους ελέγχου των υλικών με υπερήχους

Ο αρχικός στόχος των δοκιμών με υπερήχους υπήρξε η ανίχνευση ατελειών και ο προσδιορισμός του μεγέθους και της θέσης τους στο εσωτερικό ενός υλικού. Όμως με την εξέλιξη της μεθόδου και της εισαγωγής σχέσεων οι οποίες συνδέουν την εξάρτηση της συμπεριφοράς των ηχητικών κυμάτων από τις ιδιότητες των υλικών επιτεύχθηκε η ανάπτυξη υπερηχητικών μεθόδων τέτοιων ώστε να είναι εφικτή η μη καταστρεπτική μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών.

Ακολουθεί η αναλυτική χρήση των υπερήχων παρακάτω.

Προσδιορισμός της ταχύτητας των ηχητικών κυμάτων

Εάν έχουμε ένα δοκίμιο γνωστού πάχους d_x μπορούμε να προσδιορίσουμε την ταχύτητα διάδοσης C_x του ήχου μέσα στο συγκεκριμένο υλικό. Για να το επιτύχουμε αυτό σημαντικό είναι να έχουμε βαθμονομήσει την CRT-οθόνη με την βοήθεια της πλάκας βαθμονόμησης (αναλυτικά θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο) η οποία έχει γνωστό πάχος και γνωστή ταχύτητα διέλευσης του ήχου C . Τα μεγέθη αυτής της παραγράφου συνδέονται μέσω της σχέσης

$$C_x = C \cdot \frac{d_x}{d_g}$$

Όπου d_g είναι η τιμή στην οθόνη.

Μέτρηση πάχους

Ένας από τους πιο διαδεδομένους μη καταστροφικούς ελέγχους σε μηχανολογικό εξοπλισμό βιομηχανικών εγκαταστάσεων για το χαρακτηρισμό διάβρωσης και φθοράς είναι η μέτρηση του πάχους με τη μέθοδο των υπερήχων.

Ο προσδιορισμός τους πάχους ή αλλιώς παχυμέτρηση γίνεται με την χρήση δέσμης υπερήχων γνωστής ταχύτητας και τον προσδιορισμό του χρόνου

που απαιτείται για την απλή ή με επιστροφή διέλευση του ηχητικού αυτού κύματος και την βοήθεια κατάλληλα βαθμονομημένης οθόνης ή ψηφιακού μετρητή. Αυτός ο έλεγχος βρίσκει εφαρμογή στο προσδιορισμό του πάχους λεβήτων, σε δεξαμενές, τοιχώματα πλοίων, συγκολλήσεις κ.α.

Προσδιορισμός των ελαστικών σταθερών E, G, ν

Για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την διαμήκη και εγκάρσια ταχύτητα του ήχου στο υπό εξέταση υλικό καθώς και την πυκνότητά του. Εφαρμόζοντας τις σχέσεις που ακολουθούν προκύπτουν οι ζητούμενες σταθερές.

$$E = 4\rho C_t^2 \cdot \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} = \rho C_t^2 \cdot \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2} = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \cdot \rho C_l^2$$

$$G = \rho C_t^2$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 2C_t^2}$$

Όπου C_l η διαμήκης και C_t η εγκάρσια ταχύτητα του ήχου.

Ανίχνευση ατελειών

Όπως αναφέραμε αρχικά ο πρωταρχικός σκοπός της ανάπτυξης υπερηχητικών μεθόδων ήταν η ανάγκη ανίχνευσης ατελειών στο εσωτερικό της δομής ενός υλικού οι οποίες δεν είναι ορατές από το εξωτερικό του. Κατά την διαδικασία παραγωγής ενός εξαρτήματος ή κατά το στάδιο λειτουργίας του είναι δυνατόν να υπάρξουν κάποιες μορφής ασυνέχειες οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν την μετέπειτα σωστή λειτουργικότητα μιας κατασκευής. Τέτοιες ασυνέχειες μπορεί να είναι ρωγμές διαφόρων μεγεθών και κατευθύνσεων, φυσαλίδες, εγκλείσματα σκωρίας, ατελής προσκολλήσεις σε σύνθετα υλικά και άλλα. Βασιζόμενοι στην ανακλαστική ιδιότητα των υπερήχων μπορούμε να ανακαλύψουμε τέτοια πιθανά σημεία που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία μιας κατασκευής και πρόωρα να τα επισκευάσουμε ή να αντικαταστήσουμε τα

προβληματικά εξαρτήματα. Αναλυτικότερη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας θα αναφερθεί σε επόμενη παράγραφο.

Προσδιορισμός των τάσεων

Ο προσδιορισμός των εσωτερικών και των εξωτερικών τάσεων που εφαρμόζονται σε ένα δοκίμιο επιτυγχάνεται μέσω του προσδιορισμού της ταχύτητας των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων κατά την ελαστική παραμόρφωση του υλικού.

Έλεγχος και εξέταση της δομής του υλικού

Η εν λόγω εξέταση βασίζεται στο δεδομένο ότι η ταχύτητα μιας ηχητικής δέσμης η οποία διέρχεται μέσα από ένα υλικό επηρεάζεται από τα διάφορα συστατικά του υλικού. Επηρεάζεται επίσης και από τις μηχανικές του ιδιότητες, την ολκιμότητα αλλά και την σκληρότητά του.

Έλεγχος της ψαθυρότητας

Η εν λόγω εφαρμογή δεν απαιτεί θραύση του υλικού. Αυτή η μη καταστρεπτική μέθοδος προσδιορισμού ονομάζεται διεθνώς *nilductility – transition temperature*. Πρόκειται για ταχεία και χαμηλού κόστους μέθοδο.

Μη συμβατική κατεργασία των υλικών

Σύμφωνα με αυτήν την τεχνική, κατάλληλη συσκευή που χρησιμοποιεί εργαλείο κατασκευασμένο από μαλακό μέταλλο, το οποίο πάλλεται με υπερηχητική ταχύτητα, δύναται με κατάλληλη διαδικασία να επεξεργάζεται, κόβει και διαμορφώνει οποιοδήποτε υλικό και ιδιαίτερα υλικά τα οποία έχουν σκληρότητα μεγαλύτερη από $HRc=40$. Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμογή στην οδοντιατρική όπου το μηχανικό τρυπάνι τείνει να αντικατασταθεί από το υπερηχητικό.

Προσδιορισμός σκληρότητας-σκληρομέτρηση

Για την εν λόγω μέθοδο θα υπάρξει εκτενέστερη αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο δεδομένου ότι συμπεριλήφθη στα πειράματα της εργασίας.

Συγκόλληση αλουμινίου

Στις συγκολλήσεις των μετάλλων για να επιτευχθεί μια σωστή κόλληση πρέπει να απομακρύνονται διεξοδικά λεπτά στρώματα οξειδωσης, η οποία σχηματίζεται στις επιφάνειες των προς συγκόλληση μετάλλων και η οποία παρεμποδίζει την επαφή μεταξύ του συμπληρωματικού μετάλλου και των ελασμάτων. Η απομάκρυνση τέτοιων στρωμάτων για μέταλλα διαφορετικά του αλουμινίου όπως το ατσάλι και ο χαλκός είναι εύκολο να επιτευχθεί με την βοήθεια διαφόρων διαλυμάτων οξέων. Όμως στην περίπτωση του αλουμινίου κάτι τέτοιο είναι αδύνατο ως και ακατόρθωτο. Έτσι λοιπόν γίνεται χρήση ενός υπερηχητικού κολλητηριού, με το οποίο θραύεται το σκληρό στρώμα σκωρίας.

Υπερηχητικός καθαρισμός υλικών

Με την τοποθέτηση ενός υλικού σε ένα διάλυμα το οποίο διεγείρεται με υπερηχητικές ταλαντώσεις είναι δυνατή η απομάκρυνση οξειδίων, λιπαντικών και άλλων ακαθαρσιών

Αποπαραφίνωση του πετρελαίου

Λόγω της αύξησης της διαλυτότητας της παραφίνης με την επίδραση υπερήχων και της διασκορπιστικής ικανότητας των υπερήχων, η παραφίνη του πετρελαίου διαλύεται κάτω από την επίδραση υπερήχων όταν σε κανονικές συνθήκες παραμένει αδιάλυτη.

Εξαέρωση υγρών και λιωμένων μετάλλων

Για την απομάκρυνση των αερίων από ένα υγρό διοχετεύονται υπερηχητικές ταλαντώσεις στα υγρά, οπότε τα αιωρούμενα σωματίδια ενός αερίου συσσωρεύονται στους δεσμούς των στάσιμων κυμάτων που σχηματίζονται από ανακλάσεις. Εκεί σχηματίζονται κατ' αρχάς μικρές φυσαλίδες, που όσο στην συνέχεια μεγαλώνουν τόσο ευκολότερα κινούνται προς την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται και στην μεταλλουργία για την εξαέρωση τηγμένων μετάλλων.

Άλλες σπουδαίες εφαρμογές των υπέρηχων

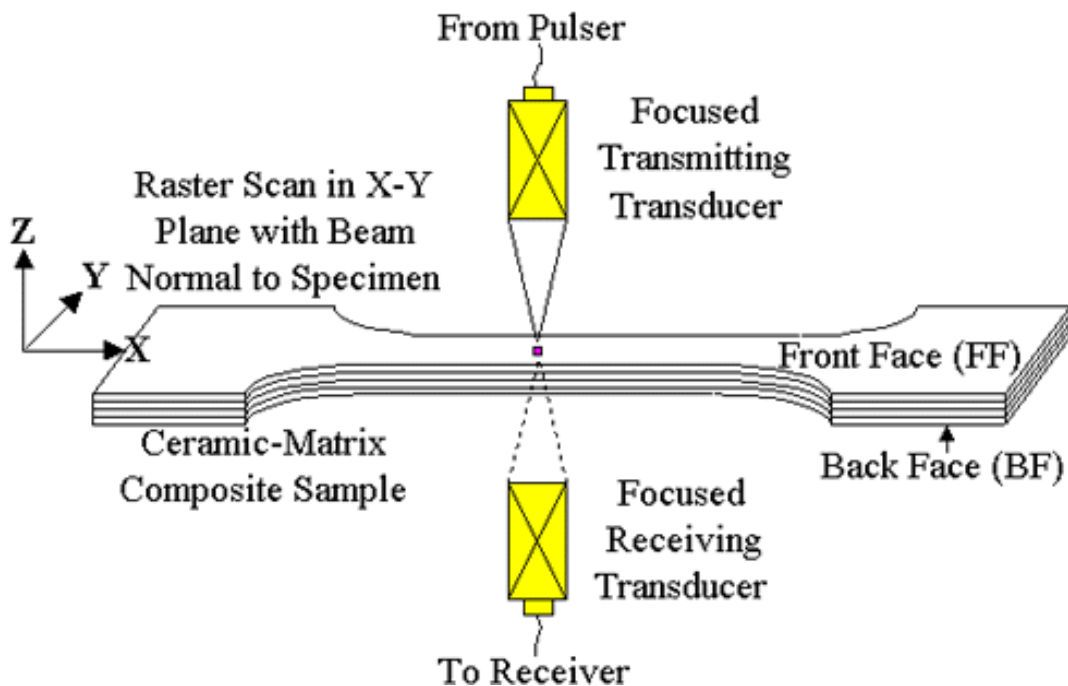
Σπουδαίες εφαρμογές των υπέρηχων συναντάμε στην Ιατρική (υπερηχογραφήματα, αξονικός υπερηχογράφος κ.α.) όπου σαν διαγνωστική

μέθοδος τείνει να αντικαταστήσει τις επικίνδυνες ακτινογραφίες με ακτίνες X ή άλλες μεθόδους με επικίνδυνες για τον άνθρωπο ακτινοβολίες. Σε άλλες περιπτώσεις δίνει λύσεις χωρίς να απαιτείται χειρουργική επέμβαση όπως στην περίπτωση της λιθοτριψίας της πέτρας των δοντιών καθώς και της εξωσωματικής λιθοτριψίας όπου οι πέτρες των νεφρών θρυμματίζονται και μπορούν να πολύ εύκολα να αποβληθούν από τον οργανισμό. Χρησιμοποιούνται επίσης οι υπέρηχοι στην ξυλουργική για τον έλεγχο ξύλων και ξύλινων κατασκευών και δέντρων για την ανίχνευση ατελειών. Στην κτηνοτροφία ακόμη γίνεται χρήση για την μέτρηση του πάχους του λίπους και των μυών των ζώων.

Βασικές μέθοδοι ελέγχου των υλικών

Υπάρχουν τρεις κύριοι μέθοδοι για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών. Η μέθοδος της διέλευσης (through transmission method), η μέθοδος του συντονισμού (resonance method) και η μέθοδος της παλμοηχούς (pulse echo method).

Μέθοδος της διελεύσεως



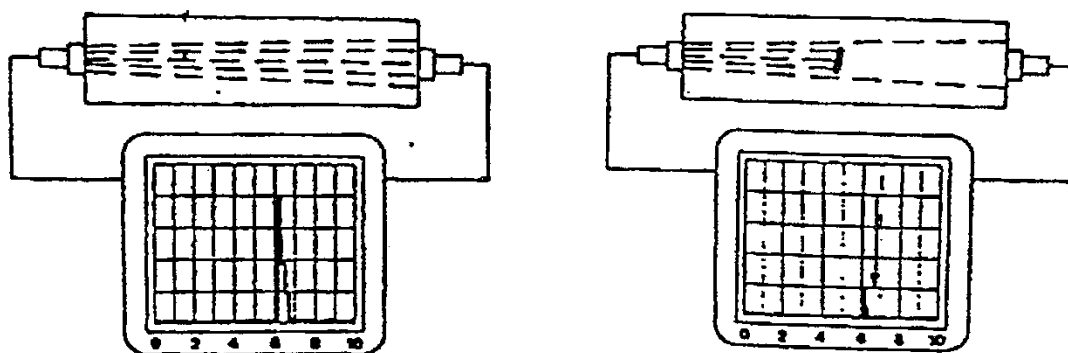
Εικόνα 35: Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου διελεύσεως ή σκιάς. Η μια κεφαλή η οποία λειτουργεί και σαν πομπός βρίσκεται στην μια πλευρά του υλικού, ενώ η άλλη η οποία λειτουργεί σαν δέκτης τοποθετείται στην απέναντι επιφάνεια

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο η οποία είναι και γνωστή σαν μέθοδος της σκιάς (shadow method), χρησιμοποιούνται δυο κεφαλές. Η μια κεφαλή η οποία λειτουργεί και σαν πομπός βρίσκεται στην μια πλευρά του υλικού, ενώ η άλλη η οποία λειτουργεί σαν δέκτης τοποθετείται στην απέναντι επιφάνεια.

Με την συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχουμε την ένταση του ήχου που λαμβάνουμε από την κεφαλή-δέκτη και την συγκρίνουμε με εκείνη που εξέπεμψε η κεφαλή-πομπός. Έτσι λοιπόν συγκρίνουμε την ένταση του ήχου όταν διέρχεται από ένα υλικό χωρίς ατέλειες, με την ένταση του ήχου όταν διέρχεται από περιοχή που περιέχει ατέλειες.

Για να είναι αποτελεσματική η συγκεκριμένη μέθοδος πρέπει οι ανιχνευόμενες ατέλειες να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης διότι σε αυτή την περίπτωση λόγω του φαινομένου

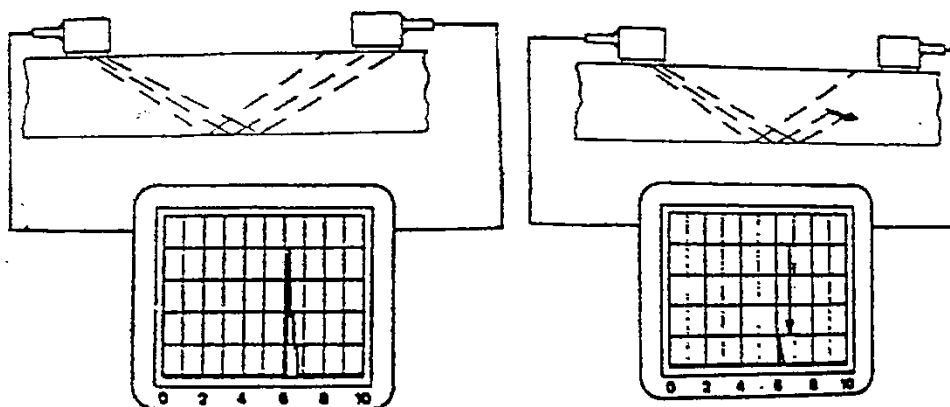
περιθλάσεως η δέσμη θα υπερπηδά κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τα εμπόδια. Για να είναι εφικτό να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος πρέπει το εξεταζόμενο υλικό να έχει τις δυο απέναντί του επιφάνειες παράλληλες. Συνεπώς σε αρκετές περιπτώσεις μεγάλων κατασκευών και όταν ειδικά δεν υπάρχει πρόσβαση στην πίσω επιφάνεια η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι εφικτή. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως δεν δίνει πληροφορίες για το βάθος που βρίσκεται η ατέλεια, τον προσανατολισμό της και το μέγεθός της.



Εικόνα 36: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της διέλευσης με κεφαλές καθέτου δέσμης

Παρόλα τα μειονεκτήματα της μεθόδου πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο και εφαρμόζεται ακόμα και σήμερα με μεγάλη επιτυχία σε ιδιαίτερα λεπτές πλάκες και όταν οι ατέλειες είναι παράλληλες προς την επιφάνειά τους.

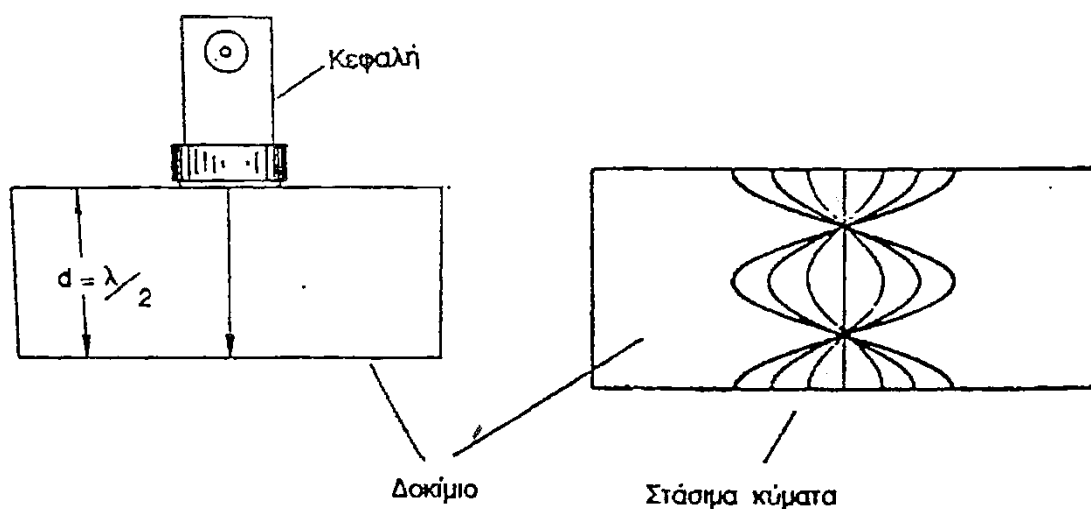
Με παρόμοιο τρόπο λειτουργούν και οι κεφαλές γωνιακής δέσμης



Εικόνα 37: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της διέλευσης με κεφαλές γωνιακής δέσμης

Μέθοδος του συντονισμού

Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφέρει από τις υπόλοιπες στο γεγονός ότι δουλεύει με συνεχή υπερηχητικά κύματα. Σύμφωνα με αυτή, ένα συνεχές υπερηχητικό κύμα, το οποίο και διοχετεύεται σε μια επίπεδη, με παράλληλες επιφάνειες πλάκα, μπορεί να διεγείρει σε ταλάντωση την πλάκα με τη φυσική της συχνότητα. Ο συντονισμός της πλάκας εμφανίζεται μόνο εάν η συχνότητα του κύματος γίνει ίση με μια από τις χαρακτηριστικές συχνότητες της πλάκας. Πρόκειται για συγκεκριμένες συχνότητες στις οποίες δημιουργούνται στάσιμα κύματα και οι οποίες είναι γνωστές σαν φυσικές συχνότητες συντονισμού.

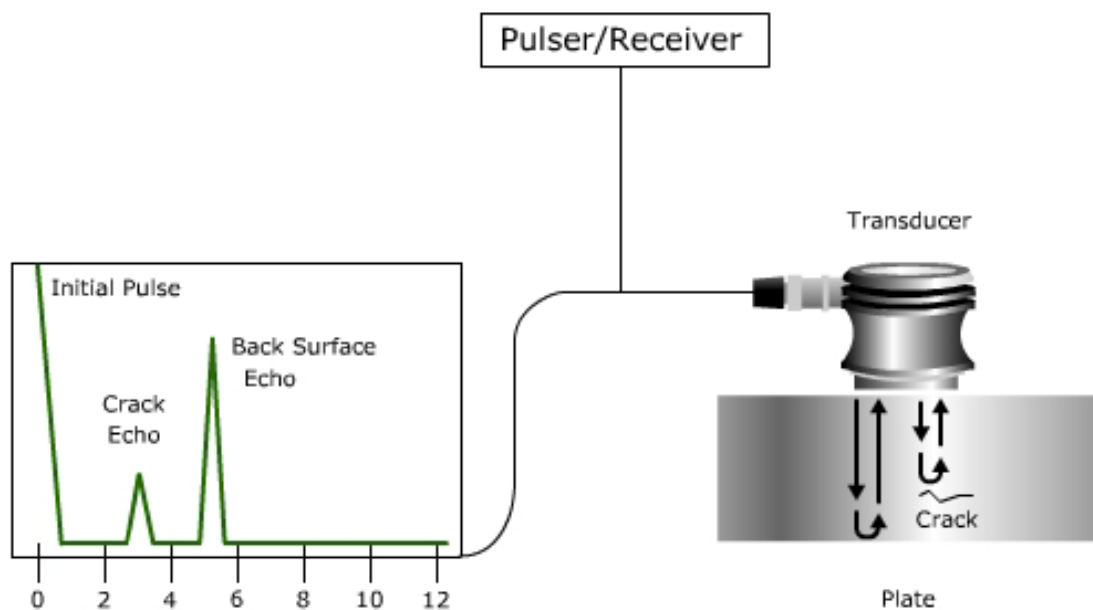


Εικόνα 38: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος του συντονισμού

Η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του πάχους και των ελαστικών σταθερών των υλικών. Αντιθέτως δεν ενδείκνυται για την ανίχνευση ατελειών.

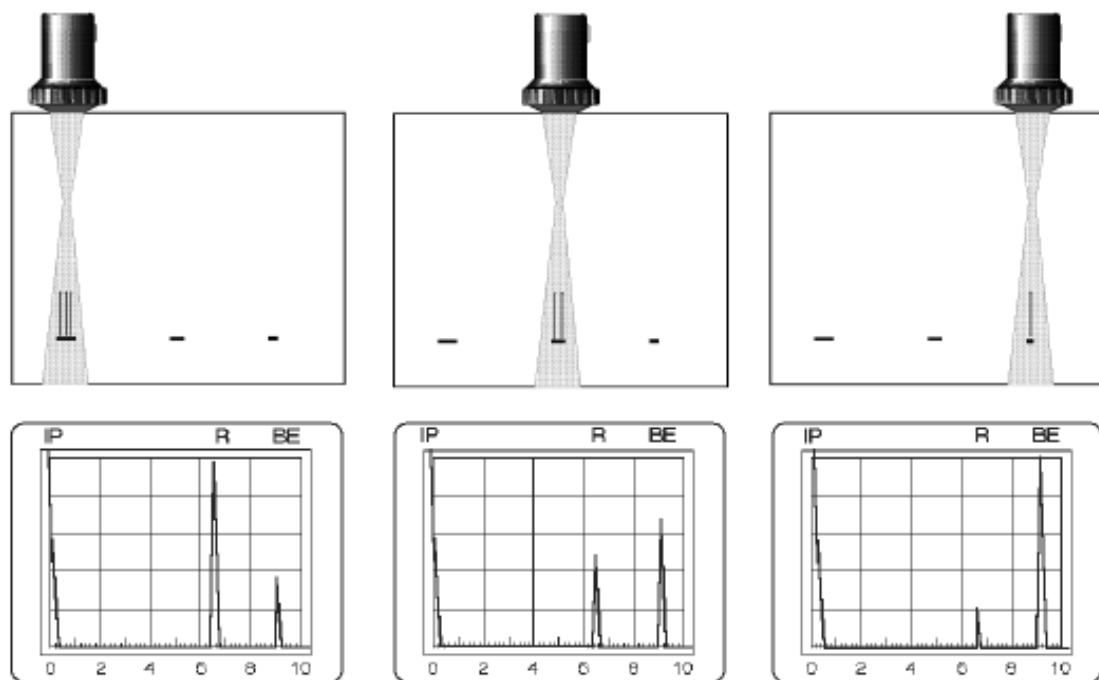
Μέθοδος της παλμοχούς

Είναι η σημαντικότερη από όλες τις μεθόδους. Λέγεται επίσης και σαν η μέθοδος του χρόνου διελεύσεως (time of flight- TOF) του παλμού. Σε αυτήν την μέθοδο υπολογίζεται τόσο το ύψος της ηχούς, που χαρακτηρίζει το μέγεθος του ανακλαστήρα, όσο και ο χρόνος διέλευσης του παλμού, ο οποίος χαρακτηρίζει το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ανακλαστήρας. Επίσης με αυτό τον τρόπο δυνάμεθα να υπολογίσουμε τις ελαστικές αλλά και τις ακουστικές ιδιότητες καθώς επίσης και το πάχος ενός υπό εξέταση δοκιμίου.



Εικόνα 39: Σχηματικά η υπερηχητική μέθοδος της παλμοηχούς

Από έναν πομπό παράγεται ένας ηχητικός παλμός ο οποίος οδηγείται μέσα στο υλικό. Σε περίπτωση που συναντήσει μια ατέλεια (ανακλαστήρας) τότε, εάν το εμβαδόν του ανακλαστήρα είναι μικρότερο από το εμβαδόν της ηχητικής δέσμης, μέρος της δέσμης ανακλάται από τον ανακλαστήρα, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του για να ανακληθεί στη συνέχεια από τα πίσω τοιχώματα του δοκιμίου. Σε περίπτωση βέβαια που η ηχητική δέσμη συναντήσει μετά τον πρώτο ανακλαστήρα έναν δεύτερο ή έναν τρίτο ανακλαστήρα θα συμβεί ακριβώς το ίδιο. Μέρος δηλαδή της ηχητικής δέσμης θα ανακληθεί και η υπόλοιπη θα συνεχίσει μέχρι τα πίσω τοιχώματα. Η ηχώ που θα εκπεμφθεί από τον ανακλαστήρα προφανώς διανύει μικρότερη απόσταση από την ηχώ που εκπέμπεται από την πίσω επιφάνεια. Συνεπώς επιστρέφει πρώτη στον δέκτη και ακολουθεί η ηχώ της πίσω επιφάνειας. Ο πομπός και ο δέκτης συνήθως είναι η ίδια κεφαλή. Όμως αυτό δεν είναι απόλυτο μιας και υπάρχουν και κεφαλές οι οποίες λειτουργούν ξεχωριστά και όχι σαν ενιαίος πομποδέκτης.

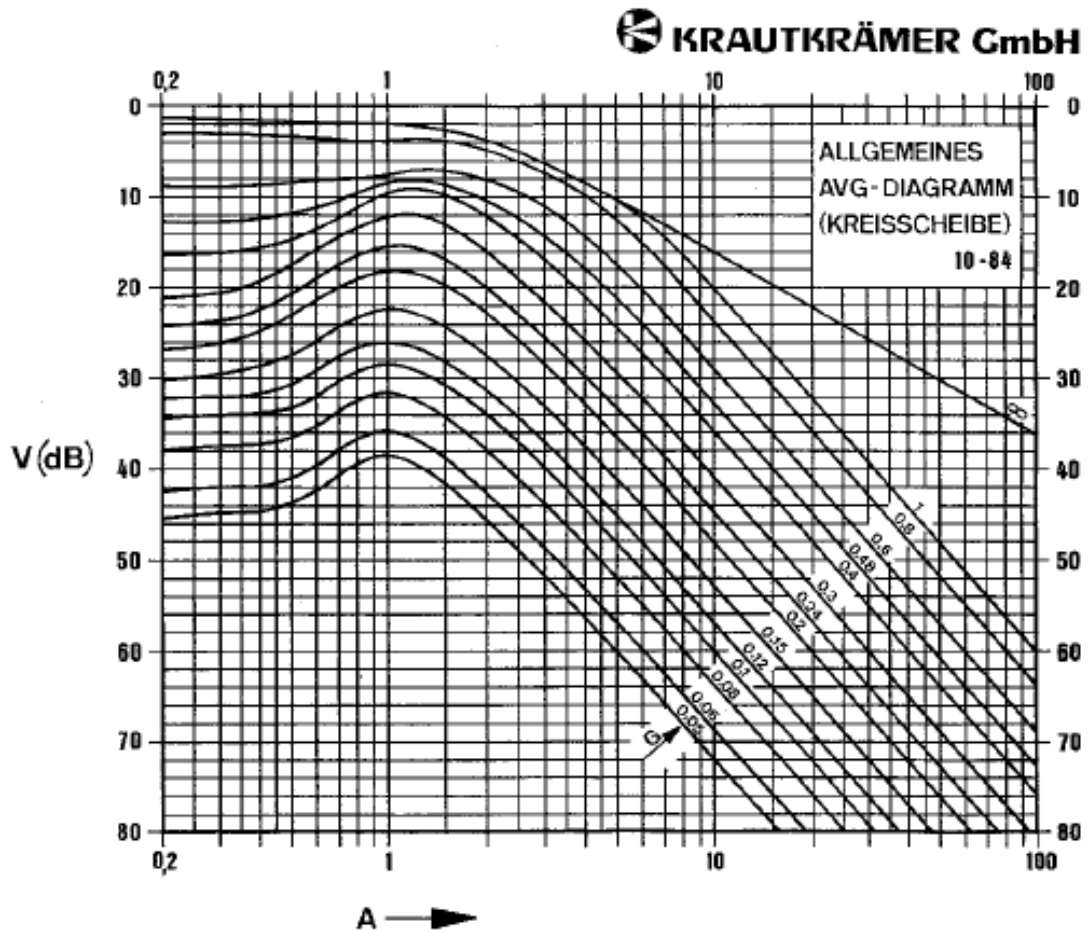


Εικόνα 40: Γραφική αναπαράσταση ανίχνευσης ατελειών σε δοκίμιο με την μέθοδο της παλμοηχούς

Τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζονται σε μια οθόνη CRT (Cathod Ray Tube) ή αλλιώς οθόνη καθοδικού σωλήνα. Στην συγκεκριμένη οθόνη, η οποία είναι εφοδιασμένη με κατάλληλη κλίμακα, εμφανίζεται πρώτα η ηχώ της ατέλειας και στην συνέχεια η ηχώ της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου. Και οι δυο εμφανίζονται σύμφωνα με την έντασή τους ή το ύψος τους και αναφέρονται ως ύψος της ηχούς (echo height). Στον άξονα των X απεικονίζονται οι αποστάσεις ενώ στον άξονα των Y τα ύψη. Με τον χρόνο διέλευσης t προσδιορίζεται η απόσταση a της ατέλειας, που είναι το μισό της διαδρομής του παλμού, όταν είναι γνωστή η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος c στο υλικό, από την σχέση $a = c \cdot \frac{t}{2}$.

Από την εικόνα της ηχούς που λαμβάνουμε στην οθόνη και κάνοντας χρήση των διαγραμμάτων DGS μπορούμε να εξάγουμε πληροφορίες για το βάθος και το μέγεθος μιας ατέλειας. Κάθε τέτοιο διάγραμμα είναι μοναδικό για την κεφαλή που χρησιμοποιούμε και η οποία συνοδεύεται από το διάγραμμα της. Πρόκειται για χαραγμένες καμπύλες σε διαφανείς πλακέτες οι οποίες τοποθετούνται μπροστά από την οθόνη της συσκευής. Απεικονίζουν, την

εξάρτηση του πλάτους V της ηχούς από μεγάλους και μικρούς ανακλαστήρες συναρτήσει της απόστασεως. Τα αρχικά DGS συμβολίζουν, το D την απόσταση, το G την ενίσχυση σε db και το S το μέγεθος, του ισοδύναμου προς δίσκο διαμέτρου D_f ανακλαστήρα σε mm.



Εικόνα 41: Τυπικό διάγραμμα DGS με το οποίο υπολογίζουμε το βάθος και το μέγεθος κάποιας ατέλειας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε βασικές έννοιες οι οποίες απασχολούν την παρούσα διπλωματική εργασία

Εφελκυσμός

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή μιας και πρόκειται για την σημαντικότερη δοκιμή της Πειραματικής Αντοχής των Υλικών. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου σε εφελκυστική μονοαξονική φόρτιση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση. Με την δοκιμή αυτή κατασκευάζουμε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων από το οποίο προσδιορίζουμε αφενός τις ελαστικές σταθερές του υλικού και αφετέρου σημαντικά χαρακτηριστικά του όπως είναι το όριο αναλογίας, το όριο ελαστικότητας, το όριο διαρροής, το όριο θραύσης και η μέγιστη αντοχή. Προσδιορίζουμε κατ' αυτόν τον τρόπο την ολκιμότητα ενός υλικού, την επιμήκυνση, την ελαστική ανάπαυση και την στερότητά του.



Εικόνα 42: Τυπική συσκευή εφελκυσμού εργαστηρίου

Μια τυπική συσκευή εφελκυσμού είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να προκαλεί μια ελεγχόμενη επιμήκυνση του υλικού με έναν σταθερό ρυθμό και να μετράει συνεχώς την αντίσταση του υλικού στην παραμόρφωση σαν επιβαλλόμενο φορτίο που του ασκείται καθώς επίσης και την αντίστοιχη επιμήκυνση. Οι τιμές του φορτίου μετρώνται από την κλίμακα του δυναμόμετρου της μηχανής, ενώ οι αντίστοιχες επιμηκύνσεις του αρχικού δοκιμίου υπολογίζονται με την βοήθεια ειδικών οργάνων, των μηκυσιομέτρων. Στη συνέχεια με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που συλλέξαμε κατασκευάζουμε το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων.

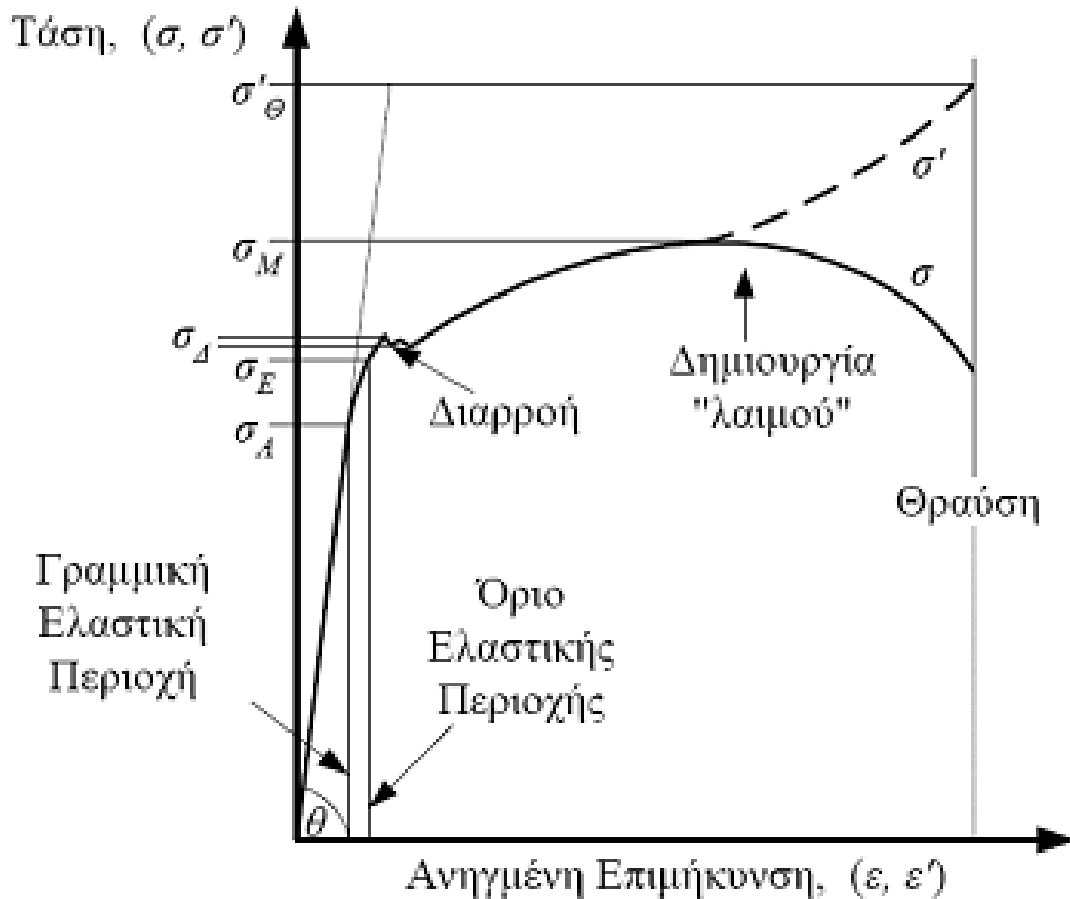
Πρόκειται για μια καταστροφική μέθοδο, δεδομένου ότι το υλικό παραμορφώνεται μόνιμα και θραύεται επηρεάζοντας προφανώς την μετέπειτα μελλοντική λειτουργικότητα του δοκιμίου. Οι δοκιμές εφελκυσμού μπορεί να γίνουν σε υλικά με την μορφή που έχουν όταν χρησιμοποιούνται στην πράξη. Παρ' όλα αυτά είναι συνήθως ράβδοι κυκλικής διατομής ή πρισματικά ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων σύμφωνα με συγκεκριμένα πρότυπα και προδιαγραφές με τα ακραία τους τμήματα διαμορφωμένα κατάλληλα έτσι ώστε η σύνθετη καταπόνηση που επικρατεί στις περιοχές αυτές όταν προσαρμόζονται στις αρπάγες της μηχανής ελέγχου να μετατρέπεται σε απλή εφελκυστική καταπόνηση στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου μιας και είναι αυτό το οποίο μας ενδιαφέρει.

Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων

Σκοπός των πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού είναι να εξάγουμε το διάγραμμα τάσεων- παραμορφώσεων ή πιο ορθά συμβατικών τάσεων και συμβατικών παραμορφώσεων. Κάνοντας την παραδοχή ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι μακροσκοπικά ομοιόμορφες σε όλο το μήκος του δοκιμίου και από το διάγραμμα $P=f(\Delta l)$, όπου υπενθυμίζουμε ότι πρόκειται για τα δύο μετρούμενα μεγέθη κατά την εξέλιξη της δοκιμής, και χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις για την τάση και την παραμόρφωση σχεδιάζουμε το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων.

$$\sigma = \frac{P}{A} (\text{συμβατική τάση}) \text{ ή } \sigma' = \frac{P}{A'} (\text{πραγματική τάση})$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{L - L_0}{l_0} = a - 1 \text{ όπου } a \text{ ο λόγος έκτασης}$$



Εικόνα 43: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων

Σε ένα διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης διακρίνουμε την περιοχή OA. Σε αυτήν την περιοχή η καμπύλη μας είναι ένα ευθύγραμμο σχήμα το οποίο και ξεκινά από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο όριο αναλογίας. Αυτή η περιοχή λέγεται ελαστική περιοχή και εδώ τα υλικά συμπεριφέρονται με μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων. Δηλαδή ισχύει η σχέση $\sigma = e \cdot E$. Πρόκειται δηλαδή για την απλή μορφή του γενικευμένου νόμου του Hooke για τον μονοαξονικό εφελκυσμό με ομογενές και ισότροπο υλικό. Το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young E παρατηρούμε πως ορίζεται ως $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, ενώ αν παρατηρήσουμε το διάγραμμα είναι προφανές ότι

πρόκειται για την εφαπτομένη της γωνιάς κλίσης του τμήματος OA ως προς τον άξονα των παραμορφώσεων. Η ακρίβεια προσδιορισμού του σημείου A, δηλαδή του ορίου αναλογίας το οποίο και ισούται με την μέγιστη τιμή της τάσης σ για την οποία ισχύει ακόμη η γραμμική εξάρτηση εξαρτάται από την ευαισθησία των οργάνων.

Το μέτρο ελαστικότητας E εκφράζει το βαθμό ακαμψίας του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής, όπως και το E, έχει μεγάλη πρακτική σημασία. Εκφράζει την αντίσταση του υλικού σε μόνιμη παραμόρφωση και δείχνει την ευκολία με την οποία ένα μέταλλο μπορεί να διαμορφωθεί.

Ο λόγος Poisson ν μπορεί να προσδιοριστεί με την βοήθεια δύο ηλεκτρικών μηκυνσιομέτρων (strain gauges) κάθετα μεταξύ τους τοποθετημένα πάνω στο δοκίμιο τα οποία θα μετράνε την εγκάρσια και αξονική παραμόρφωση. Ο λόγος του Poisson ισούται με την απόλυτη τιμή της εγκάρσιας προς την αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση.

Κατά την εκτέλεση ενός πειράματος απλού εφελκυσμού η μηχανική τάση αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου. Μετά αυτήν την μέγιστη τάση σ_M , το δοκίμιο αρχίζει να δημιουργεί μια στένωση η οποία καλείται λαιμός και ορίζεται ως ο εντοπισμός της παραμόρφωσης σε μια μικρή περιοχή του δοκιμίου και η μηχανική τάση στο διάγραμμα του σχήματος μειώνεται. Αυτή η μείωση της τάσης συμβαίνει διότι η μηχανική τάση και η παραμόρφωση ορίζονται σε σχέση με τις αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου. Η πραγματική τάση σ' συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι ότου επέλθει θραύση του δοκιμίου. Μια άλλη σημαντική μηχανική ιδιότητα που προσδιορίζεται με τη δοκιμασία του εφελκυσμού είναι η **ολκιμότητα**, που εκφράζει το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης που μπορεί να υποστεί ένα υλικό πριν θραυτεί. Η ολκιμότητα εκφράζεται είτε ως επί τοις εκατό επιμήκυνση μέχρι τη θραύση ή επί τοις εκατό μείωση της διατομής μέχρι τη θραύση. Ο συνδυασμός ολκιμότητας και αντοχής καθορίζει τη **δυσθραυστότητα**, η οποία προσδιορίζεται από την δοκιμή εφελκυσμού, ως το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μέχρι το

σημείο θραύσης. Η δυσθραυστότητα εκφράζει την ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια μέχρι τη θραύση.

Το **όριο διαρροής** είναι συνήθως η μέγιστη τάση που επιτρέπεται να παραλάβει μια κατασκευή, διότι πέρα από αυτό υπάρχει μόνιμη παραμόρφωση. Για ασφάλεια χρησιμοποιείται ο λεγόμενος Συντελεστής Ασφαλείας, ο οποίος είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να υποβαθμίσει το όριο διαρροής κατά συγκεκριμένο ποσοστό, ανάλογα με τις εκάστοτε λειτουργικές συνθήκες. Κατά αυτό το τρόπο ελαττώνεται η πιθανότητα αστοχίας υλικού σε περίπτωση καταπόνησης που θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή τάση λόγω βλάβης ή λάθους οδηγώντας σε ατύχημα. Το όριο διαρροής εξαρτάται από τη φύση του υλικού και παίρνει διάφορες τιμές, από πολύ μικρές για κάποια πλαστικά, έως πολύ μεγάλες για υλικά όπως το τιτάνιο και διάφορα κράματα χάλυβα. Δεν έχουν όλα τα υλικά όριο διαρροής, παρά μόνο τα σχετικά όλκιμα, όπως τα μέταλλα, τα κράματα και τα πολυμερή. Τα ψαθυρά υλικά, όπως τα κεραμικά και τα μεγάλης σκληρότητας κράματα είναι δυνατόν να παρουσιάζουν ταχεία διάδοση ρωγμών και ψαθυρή αστοχία με θραύση αμέσως μόλις η τάση ξεπεράσει την ελαστική περιοχή. Τέλος, πολλές φορές σε διάφορα κράματα ή σε διάφορους τύπους χαλύβων παρατηρείται διαφορετικής μορφής καμπύλη $\sigma=f(\epsilon)$, στη γειτονιά του σημείου διαρροής, δηλαδή κατά το πέρασμα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, παρουσιάζεται μια ασυνέχεια του σημείου διαρροής και εμφανίζεται ένα ανώτερο και ένα κατώτερο σημείο διαρροής (πλατό διαρροής). Το φαινόμενο αυτό πολλές φορές οφείλεται στην ύπαρξη διαταραχών στις διεπιφάνειες των κόκκων. Γενικά, τα κράματα είναι ανθεκτικότερα, αλλά λιγότερο όλκιμα από τα καθαρά μέταλλα. Η θερμοκρασία, οι προσμίξεις, η θερμομηχανική διαμόρφωση του υλικού, η ταχύτητα φόρτισης του υλικού και το μέγεθος των κόκκων επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο κράματα και μέταλλα.

Εσωτερική μηχανική φθορά(Damage)

Η μηχανική των θραύσεων κάποιες φορές χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αστοχιών σε κατασκευές οι οποίες φορτίζονται είτε στατικά είτε δυναμικά. Η βασική ιδέα οφείλεται στον Katchanov ο οποίος πρώτος παρουσίασε την μεταβλητή D της εσωτερικής φθοράς. Η εσωτερική μηχανική

φθορά D είναι ένα μέγεθος που συνδέεται με την έννοια της καταπόνησης. Ορίζεται ως η ιδιότητα εκείνη κατά την οποία η αντοχή των υλικών μειώνεται μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται κυρίως στην δημιουργία και ανάπτυξη ατελειών στα στερεά υλικά όπως για παράδειγμα εμφάνιση μικρορωγμών (micro cracks), μικρο-κοιλοτήτων (micro cavities), θραύση αλυσίδων στα πολυμερή και άλλα. Υπάρχουν επίσης διάφορα είδη εσωτερικής φθοράς εξαρτώμενα από τον μηχανισμό φόρτισης όπως όγκιμη, ερπυσμού και κόπωσης.

Ο κλασικός ορισμός της παραμέτρου της εσωτερικής φθοράς είναι $D = 1 - \frac{S_e}{S_a} = \frac{S_d}{S_a}$ όπου S_d είναι το τμήμα της εγκάρσιας διατομής που καταλαμβάνεται από μικροατέλειες, S_e το τμήμα της διατομής που δεν καταλαμβάνεται από ατέλειες και S_a η συνολική διατομή. Κατ' αυτόν τον τρόπο για $D=0$ αναφερόμαστε στο αρχικό ακαταπόνητο υλικό το οποίο δεν έχει ατέλειες δηλαδή ισχύει $S_d=0$ και συνεπώς δεν υπάρχει εσωτερική μηχανική φθορά, ενώ για $D=1$ αναφερόμαστε στο υλικό το οποίο έχει αστοχήσει.

Με βάση τον ορισμό της εσωτερικής μηχανικής φθοράς μπορούν να προκύψουν διάφορες σχέσεις προσδιορισμού της. Σαν παράδειγμα εξετάζουμε την απλή περίπτωση ισότροπου και ομογενούς μέσου. Αντικαθιστάμε την τάση σ σε ένα παρθένο με καταπονημένο υλικό από την ενεργή τάση $\sigma' = \frac{\sigma}{1-D}$ όπου σ' είναι το φορτίο προς το εμβαδόν της ενεργούς διατομής η οποία παραλαμβάνει το φορτίο. Από τον νόμο του Hooke θα ισχύει $\sigma = E \cdot e$ και $\sigma' = E' \cdot e$. Έτσι θα έχουμε

$$\sigma = E \cdot e$$

$$\text{ή } \sigma = \frac{\sigma'}{1-D} = E \cdot e$$

$$\text{ή τελικά } \sigma' = E(1-D) \cdot e$$

Μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ότι στην τελευταία σχέση ο όρος $E \cdot (1-D)$ παίζει τον ρόλο του 'νέου' μέτρου ελαστικότητας. Έτσι λοιπόν θα έχουμε $E' = E \cdot (1-D)$ ή να καταλήξουμε στην πιο χρήσιμη σχέση

$$D = 1 - \frac{E'}{E}$$

Σε περίπτωση που συνεχίσουμε την καταπόνηση υποχρεώνοντας το δοκίμιο σε μια κυκλική φόρτιση τότε οι νέες μηχανικές φθορές θα υπολογιστούν από τις σχέσεις

$$D' = 1 - \frac{E''}{E}$$

$$D'' = 1 - \frac{E'''}{E}$$

$$D^{(v)} = 1 - \frac{E^{(v+1)}}{E}$$

Όπου τα E'' , E''' , $E^{(v+1)}$ τα καινούργια μέτρα ελαστικότητας που προκύπτουν μετά από κάθε καταπόνηση.

Ο προσδιορισμός της εσωτερικής φθοράς μπορεί να γίνει και μέσω της υπερηχητικής μεθόδου. Έτσι εάν η ταχύτητα των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων σε ένα υγιές παρθένο υλικό ισούται με C_1^0 και στο ίδιο υλικό μετά την επιβολή καταπόνησης είναι C_1 . Η σχέση μεταξύ διαμήκους κύματος και μέτρου ελαστικότητας E είναι $C_l^2 = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{\rho \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}$. Έτσι με μια απλή αντικατάσταση θα καταλήξουμε στην σχέση $D = 1 - \left(\frac{\rho C_l}{\rho_0 C_l^0} \right)^2$.

Εάν όμως για το ίδιο υλικό αντί για την ταχύτητα των διαμήκων κυμάτων θεωρηθεί η μεταβολή του ύψους H της ηχούς στην οθόνη CRT, για τις δύο καταστάσεις του υλικού, δηλαδή την μη φθαρμένη έστω H_1 και την φθαρμένη έστω H_2 τότε η εσωτερική φθορά D αποδεικνύεται ότι ισούται με

$$D = 1 - \frac{H_2}{H_1}$$

Στην περίπτωση όπου $H_2=H_1$ βρισκόμαστε στην περίπτωση όπου το υλικό μας είναι μη καταπονημένο και η παραπάνω σχέση δίνει $D=0$. Στην εντελώς αντίθετη κατάσταση όπου το ύψος του παλμού H_2 μηδενίζεται και δηλαδή το

υλικό έχει αποχωρισθεί πλήρως, τότε η παράμετρος της εσωτερικής φθοράς δίνει $D=1$. Η παραπάνω σχέση, μας παρέχει την δυνατότητα προσδιορισμού της εσωτερικής φθοράς ενός υλικού μέσω της μεταβολής της ηχητικής αποσβέσεως και είναι περισσότερο ευαίσθητη από τον προσδιορισμό της με την μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων κυμάτων.

Η μεγάλη αξία αυτής της μεθόδου, του προσδιορισμού δηλαδή της εσωτερικής φθοράς ενός υλικού με την ΜΚΜ ελέγχου με υπέρηχο έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται ούτε η παρασκευή αλλά ούτε κυρίως η καταστροφή δοκιμίων.

Σκληρότητα

Η σκληρότητα ήταν πάντοτε αντικείμενο συζητήσεων τεχνικών, που είχε σαν αποτέλεσμα μια ευρύτατη γκάμα απαντήσεων.

Οι ιδιότητες της σκληρότητας περιλαμβάνουν ιδιότητες όπως αντίσταση σκληρότητας, αντίσταση πλαστικής παραμόρφωσης, υψηλό επίπεδο ελαστικότητας, απουσία ελαστικότητας, βαθμό ευθραυστότητας ή ευπλαστότητας. Η δοκιμή της σκληρομέτρησης είναι μεγάλης σπουδαιότητας, γιατί εκτός από τον προσδιορισμό της σκληρότητας, παρέχει και μια ταχεία προσεγγιστική μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό ενός υλικού.

Για έναν τεχνικό, σκληρότητα είναι η αντίσταση που προβάλλει το υλικό αυτό στην κάθετη διείδυση ενός άλλου σώματος μεγαλύτερης σκληρότητας ενός υλικού σε πιθανό εμβολισμό του.

Τα υλικά διακρίνονται εμπειρικά σε σκληρά και μαλακά. Για παράδειγμα το διαμάντι είναι σκληρό υλικό, ενώ η κιμωλία χαρακτηρίζεται ως μαλακό. Ο εμπειρικός όμως χαρακτηρισμός των υλικών σχετικά με την σκληρότητά τους δεν ικανοποιεί επιστημονικά. Γι' αυτό και έχουν δοθεί οι παρακάτω ορισμοί:

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

Κατά τον Hertz: « Σκληρότητα είναι η ορθή τάση που αναπτύσσεται στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας επαφής δύο συνθλιβομένων σφαιρών τη στιγμή που αρχίζει να εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση ».

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

Η σκληρότητα ενός υλικού εξαρτάται από τη φύση του, τη συνοχή του και από τη μορφή του κρυσταλλικού πλέγματός του. Η σκληρότητα, ιδιαίτερα για τα μέταλλα, μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για:

- Να ελέγξουμε την ποιότητα της θερμικής κατεργασίας των μετάλλων
- Να ελέγξουμε τη δυνατότητα διαμόρφωσης των υλικών σε τόνους χρησιμοποιώντας κατάλληλα κοπτικά εργαλεία.
- Να ξέρουμε την ταχύτητα επεξεργασίας των μετάλλων στις εργαλειομηχανές.
- Να ξέρουμε την περιοχή των θερμοκρασιών εργασίας των εργαλείων.
- Να συγκρίνουμε όμοια υλικά όσον αφορά τη σύνθεση και την αντοχή τους.
- Να καθορίζουμε την ποιότητα των συγκολλήσεων.
- Να προσδιορίζουμε την αντοχή τους σε εφελκυσμό.

Η σκληρομέτρηση παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της σκληρότητας σε οποιοδήποτε υλικό, όλκιμο ή ψαθυρό, μέταλλο ή αμέταλλο. Συνήθως οι μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο διεισδυτή, κατασκευασμένο από διαμάντι ή χάλυβα υψηλής αντοχής, ο οποίος κατά τη σκληρομέτρηση παραμορφώνεται ελαστικά, ενώ δημιουργεί στο ελεγχόμενο υλικό πλαστικές τοπικές παραμορφώσεις.

Επειδή τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο, κάθε ένδειξη της σκληρότητας πρέπει να συνοδεύεται και από τα χαρακτηριστικά της δοκιμής. Οι διάφορες μέθοδοι σκληρομέτρησης χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- ✓ Τις μεθόδους στατικής μετρήσεως της σκληρότητας .
- ✓ Τις μεθόδους δυναμικής μετρήσεως της σκληρότητας .
- ✓ Τη μέτρηση της σκληρότητας με εγχάραξη.
- ✓ Την μέτρηση της σκληρότητας με υπερηχητικό σκληρόμετρο

Οι σημαντικότερες από τις δοκιμές αυτές, είναι εκείνη με το υπερηχητικό σκληρόμετρο και αυτή της στατικής μέτρησης της σκληρότητας, και ιδιαίτερα η μέθοδος του σταθερού φορτίου, που βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στον προσδιορισμό της σκληρότητας των μετάλλων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι σκληρομέτρησης Brinell, Vickers και Rockwell.

Οι διαφορετικές μέθοδοι και οι ιδιόσχημοι εισβολείς που χρησιμοποιούνται από την μέθοδο Brinell και Rockwell παράγουν ανόμοια αποτελέσματα σε υλικά προς έλεγχο. Δεν υπάρχουν μαθηματικές εξισώσεις που μετατρέπουν τιμές σκληρότητας, μεταξύ διαφορετικών πινάκων.

Οι πίνακες μετατροπής ορίζονται εμπειρικά με πειραματική βαθμολόγηση της σκληρότητας ενός υλικού με διαφορετικές μεθόδους. Για να συγκρίνουμε την σκληρότητα δύο διαφορετικών δειγμάτων, πρέπει και τα δύο να μετρηθούν με την ίδια κλίμακα σκληρότητας και να δημιουργηθεί κάποια κλίμακα για να μετατρέψει το ένα σύστημα μετρήσεων στο άλλο.

Ο προσδιορισμός της σκληρότητας για τις μεθόδους Brinell, Vickers και Rockwell και όχι μόνο καθορίζεται από κανονισμούς. Στις προδιαγραφές αναφέρονται διάφοροι τρόποι στηρίξεως 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.

Εφαρμοζόμενοι Κανονισμοί	
Brinell	ASTM E 10-78, ASTM A-370, DIN 50351, ASTM E 140-79, DIN 51225, DIN 51200
Vickers	ASTM E 92-72, DIN 50133, DIN 51200, ASTM E 140-79

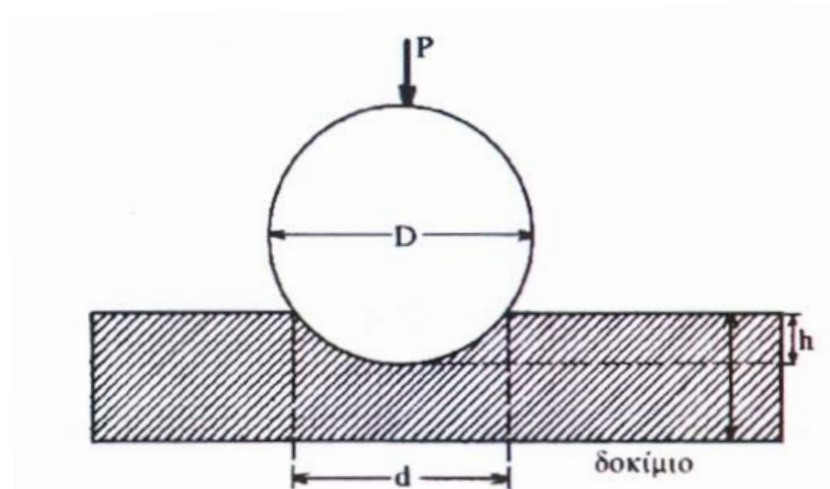
Rockwell	ASTM E 18-79, ASTM A-370, DIN 50103, DIN 51200, BSS-891, BSS-860/67, ASTM E 140-79
-----------------	---

Στην προδιαγραφή **DIN 50351** περιγράφονται τρόποι στηρίξεως των δοκιμίων και για τις τρεις προαναφερθείσες δοκιμές ενώ στην προδιαγραφή **ASTM E 140-79** περιέχονται συγκριτικοί πίνακες της σκληρότητας των μετάλλων.

Στατικές μέθοδοι σκληρομέτρησης

Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Brinell

Η στατική μέθοδος για τον προσδιορισμό της σκληρότητας που χρησιμοποιείται περισσότερο σήμερα είναι η μέθοδος Brinell. Στη μέθοδο αυτή ως διεισδυτής χρησιμοποιείται σφαίρα διαμέτρου D κατασκευασμένη από χάλυβα υψηλής αντοχής. Η σφαίρα αυτή πιέζεται ομαλά και κάθετα με φορτίο P στη λειασμένη επιφάνεια του δοκιμίου που πρόκειται να ελεγχθεί.



Εικόνα 44: Εγκάρσια διατομή αναπαράστασης της μεθόδου κατά Brinell

Η σκληρότητα κατά Brinell, **BHN** ή **HB** (Brinell Hardness Number ή Harte Brinell), ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου δοκιμής προς την επιφάνεια της ουλής σε (kp / mm^2) και δίνεται από τη σχέση:

$$BHN = \frac{P}{\pi D h} = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

- P** : το στατικό φορτίο σε kN
D : η διάμετρος του διεισδυτή σε mm
D : η διάμετρος της ουλής σε mm
H : το βάθος διείσδυσης σε mm

Στην πράξη για να αποφύγουμε τους υπολογισμούς, υπολογίζουμε τη σκληρότητα από κατάλληλους πίνακες.

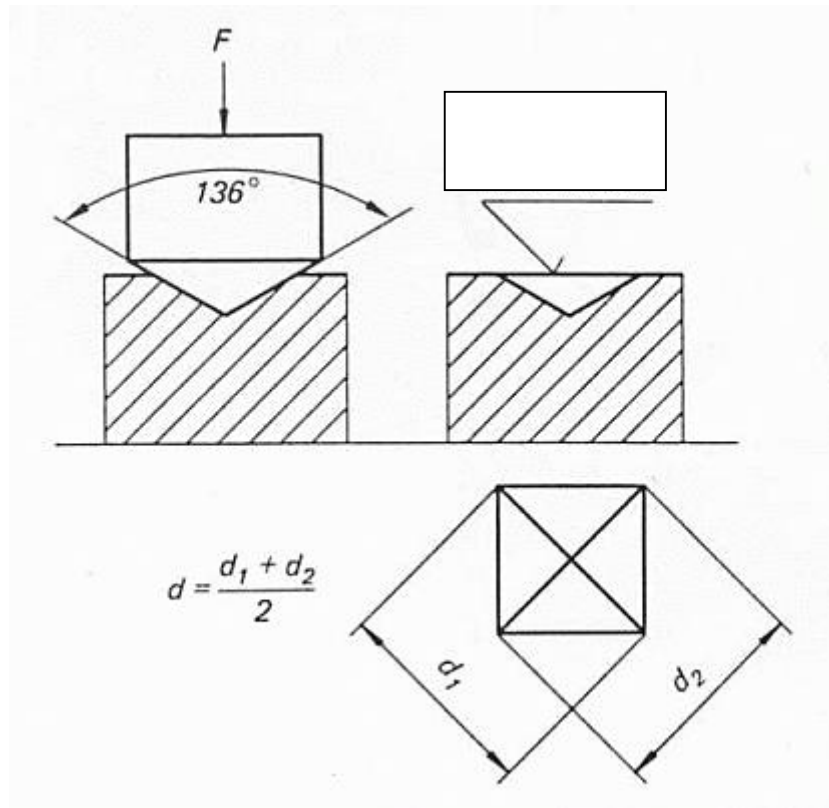
Για την καλή εκτέλεση των μετρήσεων πρέπει να τηρούνται οι παρακάτω κανόνες:

- Η σκληρομετρούμενη επιφάνεια να είναι κάθετη προς το φορτίο και να έχει λειανθεί καλά.
- Το φορτίο να επιβάλλεται ομαλά, κατά συνεχή τρόπο χωρίς κρούσεις .
- χρόνος να είναι αρκετός ώστε να ολοκληρώνεται η δημιουργούμενη πλαστική παραμόρφωση.

Η μέθοδος Brinell είναι πολύ ακριβής γιατί στον προσδιορισμό της σκληρότητας συμμετέχει μεγάλη μάζα του υλικού. Προσφέρεται για υλικά με μικρή σκληρότητα και μεγάλων διαστάσεων. Επίσης προσφέρεται για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό του ελεγχόμενου υλικού.

Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Vickers

Σε αυτήν την μέθοδο χρησιμοποιείται σαν διεισδυτής το σκληρότερο όλων των υλικών, ένα διαμάντι, σχήματος τετράπλευρης πυραμίδας με τετραγωνική βάση και γωνία 136°. Ως εκ τούτου, αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της σκληρότητας από πολύ μαλακά έως πολύ σκληρά υλικά καθώς και για πολύ μικρά και λεπτά δοκίμια.



Εικόνα 45: Γραφική αναπαράσταση του διαμαντιού σχήματος τετράπλευρης πυραμίδας που χρησιμοποιείται στην δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Vickers

Η σκληρότητα κατά Vickers (VHN-Vickers Hardness Number, HV-Härte Vickers) ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου P προς το εμβαδόν της ουλής S.

$$VHN = \frac{P}{S} \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

Όπου $S = \frac{d}{2\cos(22^\circ)}$

$$VHN = 1.8544 \cdot \frac{P}{d^2} \left[\frac{kp}{mm^2} \right]$$

Από την γεωμετρία της πυραμίδας προκύπτει ότι το βάθος h της ουλής είναι $h=d/7$ mm. τα επιβαλλόμενα φορτία μπορούν να μεταβάλλονται στην περιοχή 0,1-60 kp. Έτσι μπορούμε να εκλέξουμε το κατάλληλο φορτίο ώστε το βάθος να είναι πολύ μικρότερο του πάχους του δοκιμίου. Ο χρόνος συμπίεσης του διεισδύτη εξαρτάται από την συμπεριφορά σε ερπυσμό του ελεγχόμενου

υλικού και πρέπει να είναι αρκετός ώστε να ολοκληρώνεται η πλαστική παραμόρφωση. Η δοκιμή γίνεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, 18-28 °C. η απόσταση κάθε ουλής από τα σύνορα του δοκιμίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 2,5 d.



Εικόνα 46: Τυπικό σκληρόμετρο κατά Vickers σταθερού τύπου

Δοκιμή σκληρομέτρησης κατά Rockwell

Στις προηγούμενες μεθόδους προσδιορισμού της σκληρότητας κατά Brinell και κατά Vickers, απαιτείται η διαμόρφωση του δοκιμίου και πρέπει να γίνουν διάφορες μετρήσεις ακριβείας και επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό του αριθμού της αντίστοιχης σκληρότητας. Με την μέθοδο του Rockwell αίρονται τέτοιου είδους μειονεκτήματα και η σκληρότητα δίνεται απ' ευθείας απ' την μηχανή σε κατάλληλη κλίμακα.

Ο διεισδύτης μπορεί να είναι χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου $D=1.59\text{mm}$ ή αδαμάντινος κώνος γωνίας 120° οπότε η σκληρότητα δίδεται αντίστοιχα ως

$(\text{RHN})_B$ ή HR_B (:Rockwell Hardness Number Ball)

$(RHN)_C$ ή HR_C (:Rockwell Hardness Number Cone)

Η μέθοδος λειτουργεί ως εξής. Αρχικά ο διεισδύτης συμπιέζεται με ένα μικρό φορτίο P_0 και δημιουργεί μια μικρή ουλή. Ενώ το φορτίο P_0 δρα ακόμη ασκείται και ένα δεύτερο κύριο φορτίο P_1 . Στη συνέχεια απομακρύνεται και παραμένει μόνο το αρχικό.

Η μέθοδος Rockwell χρησιμοποιεί την παραδοχή ότι μέχρι ένα βάθος η σκληρότητα ισούται με μηδέν. Έτσι για την Rockwell-C αυτό το βάθος ορίστηκε στα $e=0,2mm$ ενώ για την Rockwell-B ορίστηκε στα $e=0,26mm$. Οπότε για την σκληρότητα έχουμε αντίστοιχα

$$(RHN)_B = \frac{0,26mm - e}{0.002mm} = 130 - e'$$

$$(RHN)_C = \frac{0,2mm - e}{0.002mm} = 100 - e'$$

Όπου τα e και e' το βάθος της διεισδύσης με μονάδες mm ή 2μ αντίστοιχα.

Η μέθοδος Rockwell είναι μια ταχεία μέθοδος. Παρέχει απ' ευθείας την σκληρότητα χωρίς υπολογισμούς, δημιουργεί μικρές ουλές, δεν απαιτείται λείανση της ελεγχόμενης επιφάνειας και προσφέρεται για οποιαδήποτε σκληρότητα αφού μπορεί να χρησιμοποιήσει και διεισδυτή και από διαμάντι. Ιδιαίτερα η μέθοδος αυτή προσφέρεται για σκληρομετρήσεις σε θερμοκρασίες δοκιμίου διάφορες από αυτή του περιβάλλοντος.

Δυναμικές μέθοδοι

Σε αρκετές περιπτώσεις μετρήσεως της σκληρότητας χρησιμοποιείται η δυναμική μέθοδος. Αυτή έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου για παράδειγμα πρέπει να υπολογίσουμε την σκληρότητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται πολύ μικρός χρόνος και επομένως περιορίζονται οι πιθανότητες σφαλμάτων λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Γι' αυτό τον λόγο οι δυναμικές μέθοδοι σκληρομέτρησης έχουν βρει εφαρμογή στην πράξη.

Οι κύριες μέθοδοι δυναμικής μετρήσεως είναι τρεις. Οι μέθοδοι Martel, η μέθοδος του σκληροσκοπίου shore και η μέθοδος Helbert.

Μέτρηση της σκληρότητας με εγχάραξη

Πρόκειται για μια μέθοδο κατά την οποία όταν δυο μέταλλα τριφτούν μεταξύ τους το ένα να εγχαράσσει το άλλο. Στην κλίμακα του Mohs 10 μέταλλα έχουν κατανεμηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε καθένα απ' αυτά να εγχαράσσεται από το προηγούμενό του και να εγχαράσσει το επόμενο.

Μέτρηση της σκληρότητας με υπέρηχους

Υπερηχητικό σκληρόμετρο Microdur 2

Πρόκειται για το υπερηχητικό σκληρόμετρο το οποίο χρησιμοποιείται από το εργαστήριο Αντοχής Υλικών. Είναι μια συσκευή η οποία έχει σχετικά μικρό βάρος (2,5kg) και διαστάσεις (200mmx76mmx200mm). Αποτελείται, από την κύρια συσκευή και την κεφαλή η οποία φέρει στην κορυφή της αδαμάντινο διεισδύτη 136°, σύμφωνα με την μέθοδο Vickers.

Η λειτουργία του πέραν του ρεύματος πόλεως (6V/9V DCC) με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες καθιστά την συσκευή εύκολη στην μεταφορά αυξάνοντας έτσι τις επιχειρησιακές της δυνατότητες.

Οι τιμές της σκληρότητας εμφανίζονται ψηφιακά στην οθόνη. Είναι μετατρέψιμες από κλίμακα Vickers σε Rockwell A,B,C,F καθώς και Brinell, σύμφωνα με τους κανονισμούς DIN 50150 και ASTM E140.



Εικόνα 47: Το υπερηχητικό σκληρόμετρο του εργαστηρίου

Τα δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν σε μαγνητικά μέσα δεδομένου ότι η συσκευή επιτρέπει την σύνδεση με υπολογιστή.

Τρόπος λειτουργίας

Η κύρια διαφορά με τις υπόλοιπες συσκευές είναι ότι εφαρμόζει την μέθοδο USI (ultrasound contact impedance) η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διείσδυσης και κατ' επέκταση της σκληρότητας. Ο διεισδύτης Vickers τοποθετείται στην κορυφή ενός μεταλλικού κυλινδρικού στελέχους το οποίο ταλαντώνεται ημιτονοειδώς, από ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στην υπερηχητική συχνότητα των 78 kHz.

Καθώς ο διεισδύτης πιέζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου, ένα ειδικά διαμορφωμένο ελατήριο εφαρμόζει μια συνεχώς αυξανόμενη δύναμη. Όταν η δύναμη φτάσει την προκαθορισμένη τιμή των 5 kg, η οποία τιμή είναι χαρακτηριστική της σκληρομέτρησης, η συχνότητα ταλάντωσης του στελέχους μεταβάλλεται. Αυτή η μεταβολή της συχνότητας είναι ανάλογη με την επιφάνεια διείσδυσης και οποία κατ' επέκταση προσδιορίζει την τιμή της σκληρότητας.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου UCI είναι τα εξής:

- Η σκληρομέτρηση γίνεται με την επιβολή ενός πολύ μικρού και συγκεκριμένου φορτίου
- Η μέτρηση χρησιμοποιεί την επιφάνεια της διείσδυσης και όχι μόνο την διαγώνιο, όπως γίνεται με τα συμβατικά σκληρόμετρα
- Δεν χρησιμοποιούνται οι οπτικές διατάξεις για την εκτίμηση του βάθους διείσδυσης που χρησιμοποιούν τα συμβατικά σκληρόμετρα απλουστεύοντας έτσι την δοκιμή

Περιοχή εφαρμογής

Το μέτρο ελαστικότητας παίζει καθοριστικό ρόλο σε κάθε δοκιμή σκληρομέτρησης, που γίνεται με την μέθοδο UCI. Έτσι το MIC-2 μπορεί να κάνει μετρήσεις σε υλικά που το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 70000-300000 N/mm². Στην περιοχή αυτή λοιπόν μπορούν να ελεγχθούν υλικά όπως χάλυβες, κράματα χαλύβων, αλουμίνια, χαλκός κ.α.

Το MIC-2 μπορεί να αποθηκεύσει μέχρι 2970 μετρήσεις που συνίστανται σε 30 σειρές μετρήσεων που η κάθε μια αποτελείται από 99 μετρήσεις. Έχει δε δυο θέσεις μετρήσεων, την «STANDARD» και την «SELECT». Η πρώτη έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την απόδοση του οργάνου όταν αυτό χρησιμοποιείται φορητά, και υπάρχει απαίτηση μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Οι μετρήσεις σε αυτή την θέση απαιτούν ελάχιστα δευτερόλεπτα η κάθε μία και δεν χρειάζεται να βαθμονομηθεί η συσκευή στο υπό εξέταση δοκίμιο. Με την συγκεκριμένη επιλογή όμως μπορούμε να σκληρομετρήσουμε μόνο καθαρούς χάλυβες ή έστω χάλυβες με ελάχιστες προσμίξεις άλλων υλικών που δεν έχουν μεγάλη διαφορά όσο αφορά το μέτρο ελαστικότητάς τους απ' αυτό του καθαρού χάλυβα. Σε περίπτωση που εξετάζουμε δοκίμιο με μεγάλη απόκλιση από τον καθαρό χάλυβα τότε αναγκαστικά πρέπει να εργαστούμε στην δεύτερη επιλογή λειτουργίας, την «SELECT».

Στην δεύτερη θέση λειτουργίας της συσκευής για να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα απαιτείται υποχρεωτικά βαθμονόμηση. Η συσκευή έχει την δυνατότητα να αποθηκεύσει αυτήν την νέα σταθερά βαθμονόμησης ενώ σε αυτή την επιλογή εκτελούμε σκληρομετρήσεις οι οποίες απαιτούν διάρκεια από 1 έως

99 δευτερόλεπτα και χρησιμοποιούνται σε μαλακά υλικά. Αυτό γίνεται για να αποφύγουμε μια ανεπιθύμητη διείδυση της κεφαλής εντός του εξεταζόμενου δοκίμιου. Για να έχουμε ορθές και αξιόπιστες μετρήσεις στην εξέτασή μας οφείλουμε να κάνουμε σωστή βαθμονόμηση της συσκευής η οποία και πρέπει να γίνεται από σωστά ειδικευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό.

Διαδικασία σκληρομέτρησης

Ο χειρισμός της συσκευής είναι σχετικά πολύ εύκολος και γίνεται από τα μπροστινά πλήκτρα. Στην θέση «STANDARD», εφαρμόζουμε κάθετα την κεφαλή στο δοκίμιο και εντός 3 δευτερολέπτων έχουμε την τιμή της σκληρότητας η οποία και αναγράφεται στην οθόνη της συσκευής.

Στην θέση «SELECT» εισαγάγουμε την σταθερά βαθμονόμησης του υλικού και τον χρόνο της μέτρησης 1 έως 99 δευτερολέπτων. Μετά το πέρας του προκαθορισμένου χρόνου της μέτρησης αναγράφεται στην οθόνη η τιμή της μετρούμενης σκληρότητας. Δεδομένου ότι σε αυτή την επιλογή απαιτείται η παρατεταμένη επαφή της κεφαλής με το δοκίμιο σκόπιμη είναι η χρήση ειδικής θήκης τοποθέτησης της κεφαλής. Με αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνουμε ότι η κεφαλή θα είναι μόνιμα κάθετη και σε επαφή με το δοκίμιο καθ' όλη την διάρκεια της μέτρησης.

Σε περιπτώσεις δοκιμίων τα οποία είναι πολύ μικρά, τότε απαιτείται η τοποθέτησή τους σε ατσάλινη βάση με χρήση λαδιού ανάμεσά τους. Μειώνουμε έτσι τους κραδασμούς στο δοκίμιο πετυχαίνοντας ακριβέστερη μέτρηση.

Υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11



Εικόνα 48: Ο υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών USIP-11 του εργαστηρίου

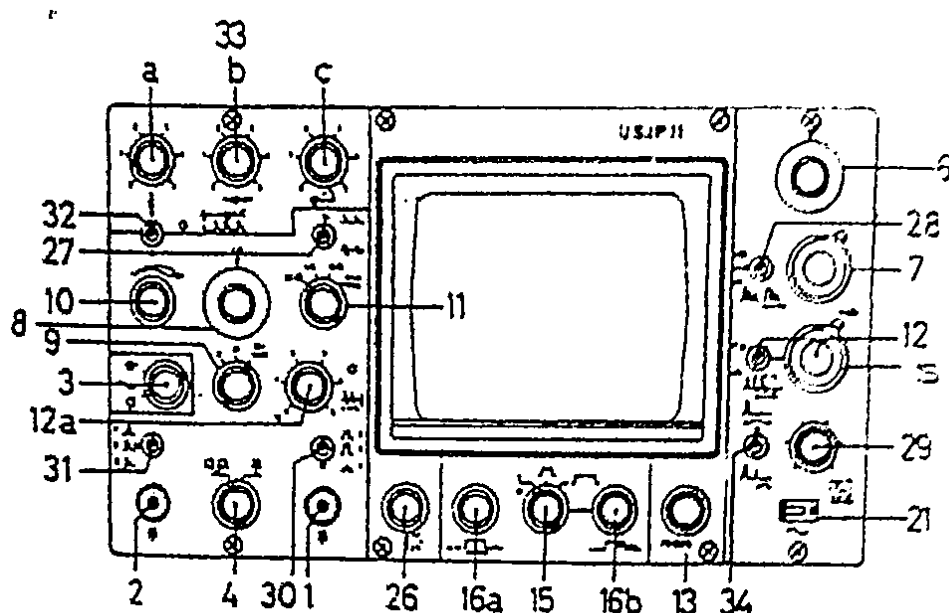
Η συσκευή με την οποία εργαστήκαμε ήταν ένας υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών γενικής χρήσεως, γερμανικής κατασκευής από την εταιρεία Krautkrämer. Πρόκειται για μια συσκευή εξαιρετικά αξιόπιστη και ακριβής. Προορίζεται κυρίως για εργαστηριακή χρήση σε ερευνητικά θέματα μιας και περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Ενδείκνυται επίσης και για την εκπαιδευτική διαδικασία.

Το εύρος συχνοτήτων μεταξύ 0,5 έως 25 MHz επιτρέπει την χρήση της σε ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων και εφαρμογών. Οι περιοχές συχνοτήτων χωρίζονται σε τέσσερα τμήματα και μέσω ενός διακόπτη μπορούμε να επιλέξουμε την περιοχή στην οποία επιθυμούμε να εργασθούμε.

Έχει την δυνατότητα να υπολογίζει ατέλειες σε βάθη τα οποία κυμαίνονται από 5mm έως 15m. Χρησιμοποιείται κυρίως από εργαστήρια Έχει σχετικά μικρό όγκο. Οι ακριβείς της διαστάσεις είναι 36x18x40cm. Δεν

θεωρείται φορητή συσκευή δεδομένου ότι πλέον κυκλοφορούν στην αγορά πολύ μικρότερες και ελαφρύτερες. Στην πραγματικότητα όμως τόσο το βάρος όσο και το μέγεθός της δεν αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για κάποια επιτόπου μέτρηση σε ένα εργοτάξιο ή ένα μηχανουργείο.

Η συσκευή έχει τέσσερις περιοχές συχνοτήτων (0.5-2.5, 2-8, 10-15, 20-25 MHz). Η ενίσχυση μεταβάλλεται στην περιοχή 0-80dB. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συσκευή για μετρήσεις σε πολλά διαφορετικά υλικά ενώ ταυτόχρονα παρέχει υψηλή διακριτικότητα ατελειών, όταν εξετάζονται εξαρτήματα υψηλών απαιτήσεων.



Εικόνα 49: Πρόσψη της υπερηχητικής συσκευής και κομβία λειτουργιών

1. Βύσμα κεφαλής πομπού ή πομπού-δέκτη.
2. Βύσμα κεφαλής δέκτη ή πομπού-δέκτη.
3. Διακόπτης on/off.
4. Διακόπτης επιλογής μεθόδου λειτουργίας.
- 5-6-7. Επιλογή και ρύθμιση πάχους μετρήσεως.
8. Διακόπτης ρυθμίσεως ενισχύσεως (2dB).
9. Διακόπτης ρυθμίσεως ενισχύσεως (20dB).
10. Μικρομετρική ρύθμιση ενισχύσεως (0-5dB).
11. Διακόπτης ρυθμίσεως συχνότητας.
12. Διακόπτης ρυθμίσεως καθυστερήσεως.
13. Ρύθμιση εστιάσεως.
21. Έλεγχος μπαταρίας.
26. Ρύθμιση φωτεινότητας οθόνης.
27. Επιλογέας κανονικής / υψηλής συχνότητας.
28. Επιλογέας ρυθμού επαναλήψεως.
29. Ρύθμιση μηδενός.
30. Ρύθμιση ενέργειας παλμού.
31. Διακόπτης διακριτικής ικανότητας παλμού.

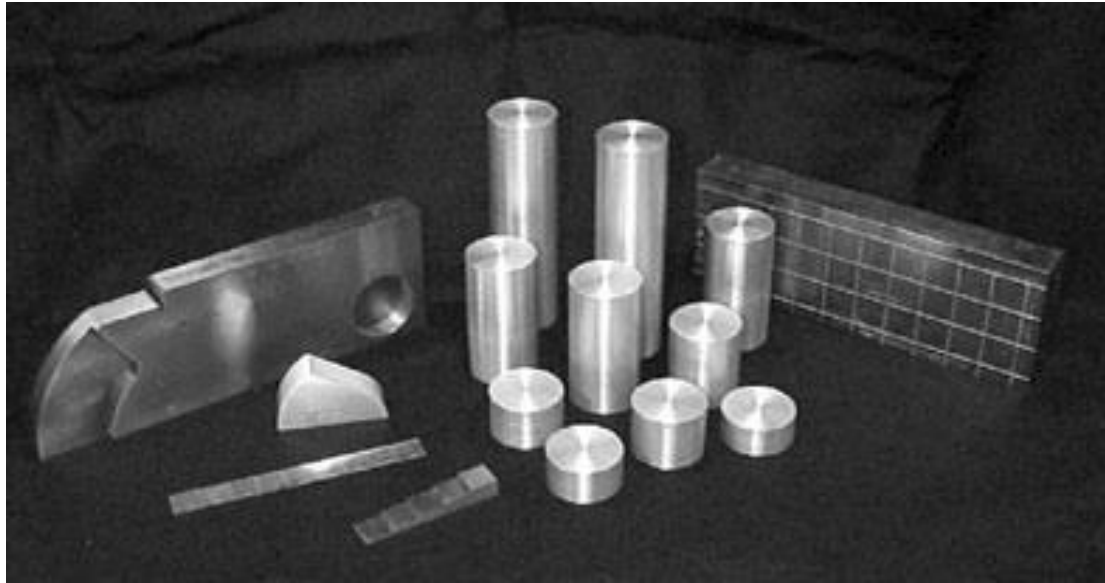
Άλλες δυνατότητες που μας δίνει η συσκευή είναι η μεγέθυνση κλίμακας, η χρήση της με εμβαπτιζόμενες κεφαλές, η τεκμηρίωση των μετρήσεων με την βοήθεια ενός ξεχωριστού μηχανήματος που προσαρμόζεται στην συσκευή και φωτογραφίζει την οθόνη, η ανίχνευση ατελειών μέσω των διαγραμμάτων DGS, η ρύθμιση του πλάτους των παλμών, η εξάλειψη του «θορύβου» που προέρχεται από ηχώ σημάτων που ανακλώνται σε «ακατάστατους» κρυστάλλους του υλικού κ.α.

Τέλος η συσκευή εκτός από υπερηχητικός ανιχνευτής ατελειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό των εγκάρσιων και διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων με την βοήθεια των οποίων υπολογίζουμε τις διάφορες ελαστικές σταθερές του υλικού όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας E , το μέτρο διάτμησης G και ο λόγος του Poisson ν .

Βαθμονόμηση συσκευής

Για να είναι αξιόπιστες οι πληροφορίες που λαμβάνουμε από τον υπερηχητικό ανιχνευτή ατελειών, έτσι ώστε να μπορούμε να τις αξιοποιούμε για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων, πρέπει πρώτου διενεργήσουμε οποιονδήποτε υπερηχητικό έλεγχο να έχουμε ρυθμίσει την συσκευή. Αυτό λέγεται βαθμονόμηση (calibration). Πρόκειται για την αντιστοίχιση όλου του πλάτους της CRT-οθόνης σε ένα καθορισμένο βάθος του υλικού, που πρόκειται να ελεγχθεί. Κατ' αυτόν τον τρόπο όλες οι ενδείξεις των ατελειών του υλικού συγκρίνονται με ένα πρότυπο δοκίμιο αναφοράς.

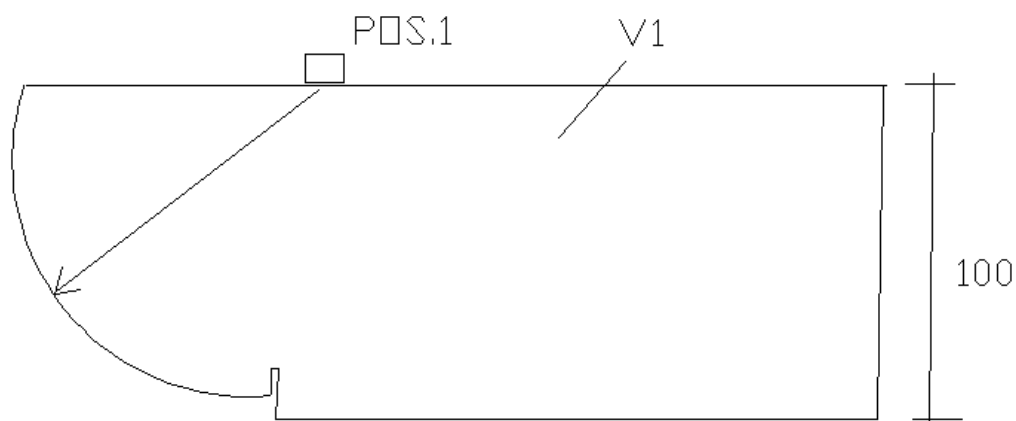
Για την βαθμονόμηση μιας υπερηχητικής συσκευής χρησιμοποιούνται αναλόγως την εφαρμογή ειδικά κατασκευασμένες πρότυπες πλάκες οι οποίες πιο συχνά λέγονται δοκίμια αναφοράς ή βαθμονομήσεως ή καλίμπρες (reference blocks or calibration blocks). Τέτοιου είδους πλάκες χρησιμοποιούνται στον υπερηχητικό έλεγχο πέρα από την βαθμονόμηση των συσκευών και στον άμεσο υπολογισμό ατελειών. Κάτι τέτοιο γίνεται με την άμεση σύγκριση του λαμβανόμενου σήματος με αντίστοιχα σήματα τα οποία προέρχονται από προκατασκευασμένες ατέλειες.



Εικόνα 50: Διάφορων τύπου πλάκες βαθμονόμησης

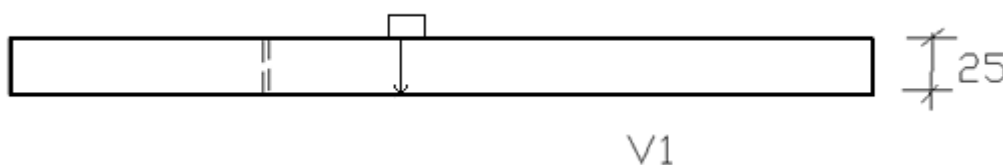
Η χρήση κατάλληλων πλακών βαθμονόμησης εξασφαλίζει την διεξαγωγή αξιόπιστων, αντικειμενικών και επαναλαμβανόμενων υπερηχητικών ελέγχων. Με την βαθμονόμηση μέσω πρότυπων πλακών βαθμονόμησης, ελέγχεται η ικανότητα τόσο της υπερηχητικής συσκευής όσο και των υπερηχητικών κεφαλών.

Για την βαθμονόμηση των υπερηχητικών συσκευών και κεφαλών χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τις ανάγκες, διάφορων τύπων πρότυπες πλάκες βαθμονόμησης οι γνωστότερες των οποίων, κατά DIN 54120, είναι η V₁, η V₂, η ημικυκλική και η κλιμακωτή (VW) πλάκα βαθμονόμησης.



Εικόνα 51: Σχεδιάγραμμα δοκιμίου αναφοράς V1

Κατά το στάδιο των πειραμάτων για την βαθμονόμηση της υπερηχητικής συσκευής χρησιμοποιήσαμε ένα δοκίμιο αναφοράς V_1 . Πρόκειται για ένα δοκίμιο κατασκευασμένο από λεπτόκοκκο μαλακό χάλυβα σύμφωνα με την προδιαγραφή DIN54120. Η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων είναι αντίστοιχα $c_1=5920$ m/s και $c_2=3250$ m/s και έχει πάχος 25cm.

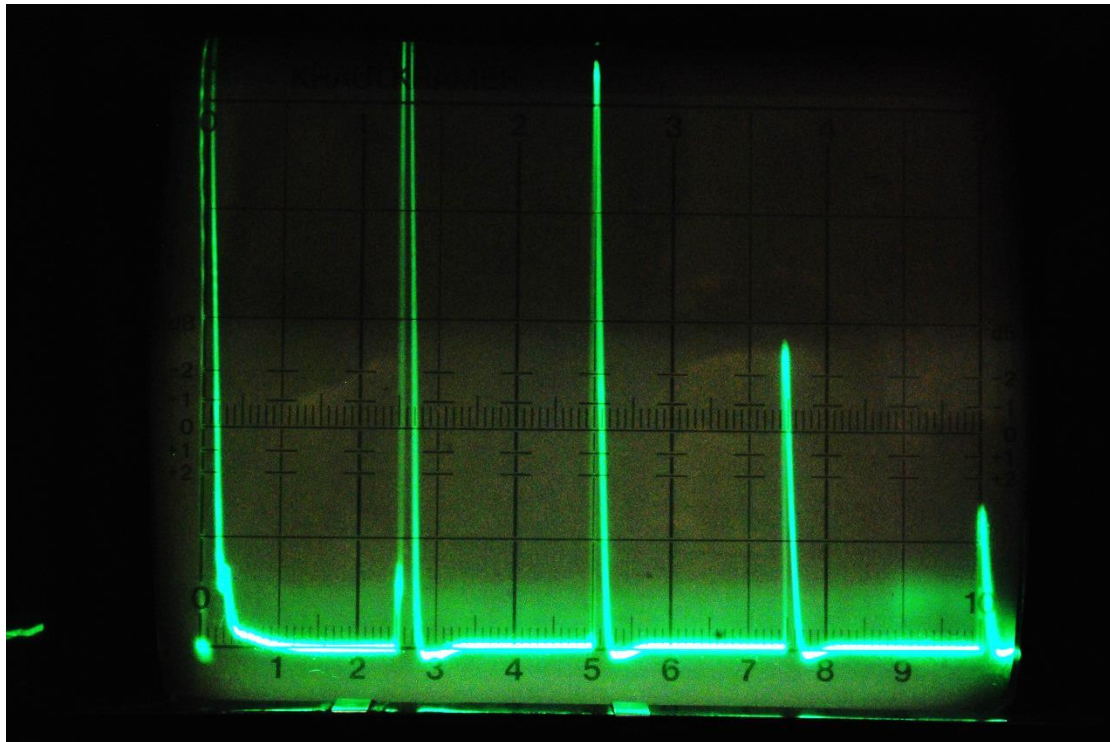


Για την βαθμονόμηση της συσκευής αρχικά την ενεργοποιούμε και συνδέουμε την κεφαλή με την οποία θέλουμε να εργασθούμε. Στη συνέχεια ρυθμίζουμε την συχνότητα εκπομπής της πηγής σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης της κεφαλής. Στις εφαρμογές μας οι κεφαλές βρίσκονταν στην περιοχή λειτουργία 2-8 MHz. Τέλος αφού ρίξουμε μερικές σταγόνες ειδικού λαδιού (για κεφαλές διαμήκων κυμάτων) ή μελιού (για κεφαλές εγκάρσιων κυμάτων) τοποθετούμε την κεφαλή στο δοκίμιο αναφοράς. Όπως γνωρίζουμε αυτό έχει πάχος 25 mm. Από την συσκευή επιλέγουμε να εργασθούμε στην κλίμακα 100. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η κλίμακα της CRT-οθόνης μπορεί να απεικονίσει πάχη μέχρι 100mm.

Το αρχικό σήμα που θα λάβουμε αποτελείται από τον αρχικό παλμό και τις επιστροφές που δεχόμαστε από τα πίσω τοιχώματα του δοκιμίου. Το συγκεκριμένο σήμα εάν δεν βαθμονομηθεί δεν έχει καμία πρακτική σημασία μιας και τα πάχη που εμφανίζονται στην οθόνη θα είναι εντελώς τυχαία. Ρυθμίζουμε την ενίσχυση έτσι ώστε στο σήμα που λαμβάνουμε στην οθόνη να μας εμφανίζονται μόνο ο αρχικός παλμός και άλλες τέσσερις ηχοί. Στη συνέχεια με λεπτές ρυθμίσεις από τους διακόπτες επιλογής και ρύθμισης πάχους λειτουργίας φέρνουμε τον αρχικό παλμό στην αρχή της κλίμακας της οθόνης και τις υπόλοιπες τέσσερις ηχοί στις αντίστοιχες θέσεις 2.5, 5, 7.5 και 10 της

κλίμακας της οθόνης. Αυτό επιτυγχάνεται αυξομειώνοντας το εύρος του σήματος στην οθόνη και μετακινώντας το, κατά τον άξονα των τετμημένων μέχρις ότου το σημείο της κάθε ηχούς να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση. Ο χειρισμός αυτών των διακοπών απαιτεί κυρίως την εξοικείωση του χρήστη με την συσκευή.

Η εμφάνιση του σήματος που επιθυμούμε να λάβουμε φαίνεται στην ακόλουθη φωτογραφία. Πλέον η συσκευή είναι βαθμονομημένη και ο χρήστης μπορεί να προχωρήσει στην λήψη αξιόπιστων μετρήσεων και αποτελεσμάτων.



Εικόνα 52: Η CRT οθόνη της υπερηχητικής συσκευής μετά από την βαθμονόμηση της συσκευής

Κεφάλαιο VII

Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται συνοπτικά ο τρόπος εμφάνισης ενός ραδιογραφικού φιλμ, τα πιθανά ελαττώματα τα οποία μπορούν να προξενηθούν και οι κανόνες επιλογής παραμέτρων ραδιογράφισης

Κατεργασία του φιλμ

Κατά την κατεργασία του φιλμ εμφανίζεται και μονιμοποιείται το μη ορατό είδωλο που δημιουργήθηκε κατά την έκθεση του φιλμ σε ακτινοβολία X ή γ. Η κατεργασία του φιλμ γίνεται με χαμηλό, φωτισμό τέτοιου χρώματος που να μην επηρεάζει το φιλμ.

Κατ' αρχάς το φιλμ βυθίζεται στο διάλυμα εμφανιστή εντός του οποίου αμαυρώνουν οι περιοχές του φιλμ που εξετέθησαν στην ακτινοβολία. Το ποσοστό αμαύρωσης εξαρτάται από την έκθεση του φιλμ. Με το πέρας της εμφάνισης το φιλμ βυθίζεται στο λουτρό διακοπής, το οποίο διακόπτει την διαδικασία εμφάνισης και τελικά το φιλμ βυθίζεται στον σταθεροποιητή. Ο σταθεροποιητής μονιμοποιεί το είδωλο επί του φιλμ αφαιρώντας τον βρωμιούχο άργυρο που δεν έχει εκτεθεί.

Καθαριότητα

Κατά τον χειρισμό του φιλμ απαιτείται πολύ μεγάλη καθαριότητα. Ο σκοτεινός θάλαμος και όλα τα εργαλεία του πρέπει να είναι πολύ καθαρά και να χρησιμοποιούνται μόνο για τον σκοπό για τον οποίο προορίζονται. Εάν χυθούν χημικά πρέπει να σκουπίζονται αμέσως διότι εάν εξατμισθεί μπορεί να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του φιλμ και να δημιουργήσει σημάδια.

Τα θερμομέτρα, αναμικτήρας και τα πλαίσια αναρτήσεως των φιλμ πρέπει να πλένονται πολύ καλά με νερό μετά την χρήση τους. Τα χημικά δεν πρέπει να στεγνώσουν επάνω τους οπότε θα είναι πιθανή η μόλυνση των διαλυμάτων και η δημιουργία προβλημάτων στις ραδιογραφίες όταν επαναχρησιμοποιηθούν.

Χειρισμός Φιλμ

Ο χειρισμός που υφίστανται τα φιλμ πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός. Τα φιλμ δεν πρέπει να υφίστανται μεγάλη πίεση επί της επιφάνειάς τους και

όταν τοποθετηθούν στην κασέτα μια μικρή πίεση είναι αρκετή για την επίτευξη καλής επαφής με τις ενισχυτικές επιφάνειες. Κατά τον χειρισμό των φιλμ το χέρια πρέπει να είναι καθαρά από χημικά και ιδρώτα για να μην δημιουργούνται σημάδια. Το φιλμ πρέπει να πιάνονται από τα άκρα προσεκτικά να μην δημιουργούνται τσαλακώματα τα οποία τραυματίζουν την επιφάνειά του.

Τα φιλμ δεν πρέπει να σύρονται απότομα από τα κουτιά ή τις κασέτες κατά το βγάλσιμό τους, ούτε επιτρέπεται άλλος χειρισμός που δημιουργεί έντονη τριβή. Μπορεί να προκληθεί στατικός ηλεκτρισμός ο οποίος δημιουργεί μαύρα σημάδια στο φιλμ στρογγυλού σχήματος.

Στάδια Κατεργασίας Φιλμ

Εμφάνιση

Κατά την εμφάνιση τα σωματίδια του βρωμιούχου αργύρου που έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία μετατρέπονται σε μαύρο μεταλλικό άργυρο. Το διάλυμα του εμφανιστή είναι αλκαλικό. Η ποσότητα του βρωμιούχου αργύρου που μετατρέπεται είναι ανάλογη των:

- Χρόνος εμφάνισης
- Ισχύς εμφανιστού
- Θερμοκρασία εμφανιστού

Για τον υπολογισμό των ανωτέρω μεταβλητών πρέπει πάντα να ακολουθούνται οι οδηγίες του κατασκευαστή ανά τύπο φιλμ. Για την επίτευξη ομοιόμορφων αποτελεσμάτων η θερμοκρασία του εμφανιστή διατηρείται σε ελεγχόμενα επίπεδα και ο χρόνος εμφάνισης εξαρτάται από τον τύπο του φιλμ. Σε συνήθεις περιπτώσεις η απαιτούμενη αμαύρωση και αντίθεση του φιλμ για βιομηχανικές εφαρμογές επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία εμφανιστού 20 °C και χρόνο εμφάνισης 5 έως 8 λεπτά.

Προ της εμφάνισης ελέγχεται πάντα η θερμοκρασία του διαλύματος. Όταν τα πλαίσια ανάρτησης με τα φιλμ βυθιστούν στο διάλυμα, πρέπει να τιναχθούν ελαφρώς για να απομακρυνθούν τυχόν φυσαλίδες από την επιφάνεια του φιλμ.

Κατά την διάρκεια της εμφάνισης, και κάθε ένα λεπτό, το πλαίσιο ανάρτησης αναταράσσεται προσεκτικά οριζοντίως και καθέτως λόγω των υπολοίπων της χημικής αντίδρασης που ρέουν επί της επιφανείας του φιλμ.

Η ισχύς του εμφανιστού ελέγχεται δια της εμφανίσεως φιλμ και της συγκρίσεως του με άλλο φιλμ το οποίο έχει υποστεί έκθεση και κατεργασία σε γνωστές συνθήκες.

Λουτρό Διακοπής

Με το πέρας του χρόνου εμφανίσεως το φιλμ αφαιρείται από τον εμφανιστή και στραγγίζεται για 1 με 2 λεπτά. Κατόπιν το φιλμ βυθίζεται στο λουτρό διακοπής το οποίο ευρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία με τον εμφανιστή. Το πλαίσιο ανάρτησης ανακινείται για 30 με 60 λεπτά και μετά μεταφέρεται στο διάλυμα του σταθεροποιητή.

Όταν το φιλμ αφαιρεθεί από τον εμφανιστή μια ποσότητα εμφανιστή παραμένει στην επιφάνεια του φιλμ και συνεχίζεται η διαδικασία εμφάνισης. Το λουτρό διακοπής αφαιρεί το υπόλοιπο του εμφανιστή από την επιφάνεια του φιλμ και έτσι αποφεύγεται η μη κανονική εμφάνιση και η μόλυνση του σταθεροποιητή από υπολείμματα εμφανιστή. Το λουτρό διακοπής είναι διάλυμα οξικού οξέως και νερού. Εάν το λουτρό διακοπής δεν είναι διαθέσιμο, τα φιλμ θα πρέπει να ξεπλένονται σε τρεχούμενο νερό για 1 με 2 λεπτά πριν τοποθετηθούν στον σταθεροποιητή. Ξέπλυμα ή λουτρό διακοπής εμφάνισης χρειάζονται επίσης και τα μεταλλικά στηρίγματα του φιλμ, διότι από εκεί μπορεί να τρέξει επιπλέον εμφανιστής στο φιλμ ή τουλάχιστον να μεταφερθεί εμφανιστής στο λουτρό σταθεροποίησης.

Σταθεροποιητής

Ο σταθεροποιητής είναι ένα όξινο διάλυμα που εξυπηρετεί δύο σκοπούς:

Α. Απομακρύνει τους μη εκτεθειμένους κρυστάλλους βρωμιούχου αργύρου, διότι ειδάλλως θα μπορούσαν να εκτεθούν στο φως και να συμβεί αργή μεν αλλά σίγουρη εμφάνιση, στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Β. Σκληραίνει το γαλάκτωμα του φιλμ (αιώρημα βρωμιούχου αργύρου σε ζελατίνη), προσδίδοντας σε αυτό μεγαλύτερη μηχανική αντοχή αλλά και ταχύτερο και ασφαλέστερο στέγνωμα.

Πρέπει να αποφεύγονται οι υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες μπορεί να αφαιρέσουν την επίστρωση του φιλμ. Μόλις το πλαίσιο ανάρτησης βυθιστεί στον σταθεροποιητή το πλαίσιο ανακινείται ανά 2 λεπτά περίπου. Ο χρόνος σταθεροποίησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 λεπτά. Εάν οι κόκκοι του

βρωμιούχου αργύρου που δεν έχουν εκτεθεί σε ακτινοβολία παραμένουν επί του φιλμ θα σκουρύνουν όταν εκτεθούν σε φως και θα καταστραφεί η ραδιογραφία. Ο σταθεροποιητής αφαιρεί τον βρωμιούχο άργυρο που δεν έχει εκτεθεί σε ακτινοβολία και σκληραίνει την επιφάνεια του φιλμ. Η παρακολούθηση της δραστηριότητας του λουτρού στερέωσης και η αντικατάσταση του στους κανονικούς χρόνους είναι πολύ σημαντική για την σωστή σταθεροποίηση του φιλμ.

Πλύσιμο

Με το πέρας της σταθεροποιήσεως το φιλμ πλένεται για να αφαιρεθεί ο σταθεροποιητής από την επιφάνεια. Για να είναι αποτελεσματικό το πλύσιμο, το άνω μέρος του πλαισίου ανάρτησης που συγκρατεί το φιλμ πρέπει να καλύπτεται πλήρως από νερό που ρέει. Το αποτελεσματικό πλύσιμο απαιτεί επαρκή ροή νερού και επαρκή χρόνο για να αφαιρεθεί ο σταθεροποιητής από την επιφάνεια του φιλμ. Εάν δεν απομακρυνθεί όλος ο σταθεροποιητής μετά από μακρό χρονικό διάστημα το φιλμ θα αποκτήσει ένα χαρακτηριστικό καφέ χρώμα. Για θερμοκρασία νερού 20 °C και ροή ύδατος που να ανανεώνει το νερό του δοχείου τέσσερις φορές ανά ώρα, ο χρόνος πλυσίματος είναι 30 λεπτά. Τα πλαίσια ανάρτησης τοποθετούνται στο δοχείο κοντά στο σημείο εξόδου του νερού. Επομένως τα φιλμ που περιέχουν την μεγαλύτερη ποσότητα σταθεροποιητή, πλένονται σε νερό που ήδη περιέχει σταθεροποιητή.

Κατά τη διάρκεια του πλυσίματος τα φιλμ βαθμιαία μεταφέρονται πλησιέστερα στην πλευρά του δοχείου που είναι η είσοδος του νερού. Με αυτόν

τον τρόπο το τελικό πλύσιμο των φιλμ γίνεται σε καθαρό νερό. Το δοχείο πρέπει να είναι ικανού όγκου ώστε το φιλμ να πλένονται συνεχόμενα χωρίς διακοπή.

Στέγνωμα

Όταν το φιλμ αφαιρεθεί από το δοχείο πλυσίματος μικρές σταγόνες νερού παραμένουν επί της επιφανείας του φιλμ, λόγω της επιφανειακής τάσης. Εάν αυτές οι σταγόνες στεγνώσουν επί της επιφανείας του φιλμ δημιουργούν σημάδια.

Για την αποφυγή του ανωτέρω, συνιστάται προ του στεγνώματος η εμφάνιση του φιλμ σε υγρό μείωσης επιφανειακής τάσης το οποίο προκαλεί ομοιόμορφο στέγνωμα της επιφανείας του φιλμ. Πριν τοποθετηθεί το φιλμ στον φούρνο στεγνώματος θα πρέπει να στραγγίζεται.

Στους φούρνους στεγνώματος το φιλμ στεγνώνει με ζεστό αέρα ο οποίος έρχεται σε επαφή και με τις δύο πλευρές του. Εάν δεν υπάρχει φούρνος τα φιλμ κρεμιόνται για στέγνωμα σε σημείο όπου υπάρχει επαρκής αερισμός. Κατά το στέγνωμα απαιτείται προσοχή να μην ακουμπάει το ένα φιλμ το άλλο, να μην υπάρχει σκόνη στον αέρα και να μην κρεμιόνται υγρά φιλμ πάνω από ημίστεγνα φιλμ.

Το φιλμ πρέπει να αναρτάται με απλά κλιπς και όχι στα συρταρωτά στηρίγματα που ενδεχομένως να χρησιμοποιήθηκαν κατά την εμφάνιση του. Επίσης δεν πρέπει να κρεμιέται λοξά. Μετά το πλήρες στέγνωμα συνιστάται να κόβονται οι αιχμηρές γωνίες του και οι πλευρές εκείνες που φέρνουν τα σημάδια από την ανάρτηση του.

Σκοτεινός θάλαμος

Ο σκοτεινός θάλαμος πρέπει να χωρίζεται σε στεγνή και σε υγρή περιοχή. Στην στεγνή περιοχή γίνονται όλες οι εργασίες στις οποίες δεν πρέπει να υπάρχει υγρασία όπως γέμισμα και άδειασμα κασετών και τοποθέτηση φιλμ στα πλαίσια ανάρτησης. Στην υγρή πλευρά του θαλάμου υπάρχουν τα δοχεία για την κατεργασία των φιλμ.

Τα δοχεία κατεργασίας των φιλμ πρέπει να είναι ικανών διαστάσεων ώστε τα φιλμ μαζί με τα πλαίσια ανάρτησης να χωράνε κάθετα. Τα δοχεία μπορεί να κατασκευαστούν από πλαστικό ή κατά προτίμηση από ανοξείδωτο χάλυβα. Οι διαστάσεις των δοχείων εξαρτώνται από τον αριθμό των φιλμ που θα υφίστανται κατεργασία και οι διαστάσεις τους πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να υπάρχει τουλάχιστον μια απόσταση 20mm μεταξύ των φιλμ και των πλαϊνών του δοχείου και το και το άνω μέρος των φιλμ να είναι βυθισμένο τουλάχιστον 20mm κάτω από την επιφάνεια του υγρού. Στην υγρή πλευρά του θαλάμου πρέπει να υπάρχουν τα ακόλουθα δοχεία κατά σειρά:

1. Δοχείο εμφανιστή
2. Δοχείο λουτρού διακοπής ή πλυσίματος
3. Δοχείο σταθεροποιητή
4. Δοχείο πλυσίματος

Οι διαστάσεις των δοχείων πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να επιτρέπουν την συνεχή ροή της κατεργασίας του φιλμ. Δοχεία μεγαλύτερου όγκου του απαιτούμενου, οδηγούν στην σπατάλη των χημικών κατεργασίας και νερού.

Ο φωτισμός του σκοτεινού θαλάμου πρέπει να είναι ασφαλείας και λευκός. Ο θάλαμος θα διαιρείται σε περιοχές διαφορετικής εντάσεως φωτισμού. Στην περιοχή έντονου φωτισμού ασφαλείας το φιλμ πλένονται και τοποθετούνται για στέγνωμα, στην περιοχή μέσου φωτισμού ασφαλείας εμφανίζονται και σταθεροποιούνται και στην περιοχή χαμηλού φωτισμού ασφαλείας ανοίγονται τα κουτιά των φιλμ και γεμίζονται/αδειάζονται οι κασέτες.

Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτηση των φώτων ασφαλείας διότι το φιλμ θολώνει με υπερβολική έκθεση σε φωτισμό ασφαλείας. Το ανωτέρω ελέγχεται με κατάλληλη δοκιμή έκθεσης φιλμ, στα φώτα ασφαλείας. Η διαδικασία έχει ως εξής : μέρος του σκεπάζεται και τοποθετείται σε απόσταση τέτοια που αντιστοιχεί στην απόσταση που θα δουλεύουμε πραγματικά φιλμ. Το αφήνουμε εκτεθειμένο στο φως ασφαλείας για χρόνο που αντιστοιχεί στον χειρισμό των πραγματικών φιλμ. Μετά το πέρας της κατεργασίας του φιλμ, ο

φωτισμός θεωρείται ασφαλής εάν δεν υπάρχει διαφορά αμαύρωσης μεταξύ καλυμμένης και ελεύθερης περιοχής.

Υλικά των δεξαμενών επεξεργασίας

Οι δεξαμενές επεξεργασίας του φιλμ συνίσταται να κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα τύπου AISI 316(με 2 έως 3% μολυβδένιο, για να αποφεύγεται πλήρως η διάβρωση). Υλικά όπως αλουμίνιο, γαλβανισμένος χάλυβας ή κασσίτερος πρέπει να αποφεύγονται, διότι προκαλούν επιμόλυνση (contamination) των υγρών επεξεργασίας του φιλμ και επομένως σημαντικά προβλήματα, ακόμη και αν έλθουν σε επαφή μαζί τους. Άλλα κατάλληλα υλικά είναι τα πλαστικά, το γυαλί και τα πορσελανοποιημένα κεραμικά. Στο θάλαμο εμφάνισης είναι απαραίτητο ένα καλό σύστημα εξαερισμού.

Αυτόματη εμφάνιση του φιλμ

Τα αυτόματα εμφανιστήρια χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια ολοένα και περισσότερο, διότι απελευθερώνουν ανθρώπινο δυναμικό, εμφανίζουν σε πολύ σύντομο χρόνο (λιγότερο από 13 λεπτά σε σχέση με τουλάχιστον 60 λεπτά που απαιτούνται μέχρι την ξήρανση του φιλμ με την παραδοσιακή μέθοδο) και παρέχουν σταθερής ποιότητας εμφάνιση (εφόσον συντηρούνται συστηματικά και σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή). Χρησιμοποιούν ειδικό εμφανιστή και σταθεροποιητή και η διαρκής ανάδευση του φιλμ αλλά και η διακοπή της εμφάνισης γίνονται από το ίδιο το σύστημα μεταφοράς του φιλμ στα διάφορα λουτρά, δηλαδή τους ειδικούς κυλίνδρους.

Το μειονέκτημα ενός αυτόματου συστήματος, ακόμη και αν είναι υψηλής ποιότητας και συντηρείται σωστά, είναι η αδυναμία επέμβασης στον χρόνο ή την θερμοκρασία εμφάνισης, ώστε να βελτιωθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του φιλμ. Η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι συνήθως υψηλότερη από ότι συνίσταται στα χειρωνακτικά συστήματα(27 έως 28 °C) και του νερού έκπλυσης περί τους 3 °C χαμηλότερη από την προηγούμενη.

Κατά την τροφοδοσία της συσκευής με τα διάφορα χημικά, είναι πολύ ουσιαστικό να τηρείται η σειρά που δίνει ο κατασκευαστής (π.χ. πρώτα ο

σταθεροποιητής) για να μην υπάρχει επιμόλυνση των χημικών. Τυχαία ανάμιξη σταθεροποιητή στον εμφανιστή σε αναλογία έστω και 1% επηρεάζει δραστικά την ποιότητα της εμφάνισης.

Ελαττώματα του ραδιογραφήματος

Ελαττώματα που προκαλούνται πριν από την εμφάνιση

Χημική ομίχλη (fog) – θολότητα

Ως χημική ομίχλη ή θολότητα ή απλώς ομίχλη (fog) ορίζεται η έκθεση των κρυστάλλων του γαλακτώματος (άρα και η σχετική αμαύρωση) για λόγους άλλους από την πρόσπτωση της ακτινοβολίας X ή γ που εμείς προκαλούμε. Η ομίχλη είναι περισσότερο εμφανής σε λιγότερο φωτεινές περιοχές του ραδιογραφήματος και μπορεί να είναι γενική ή τοπική (αναλόγως της αιτίας που την προκάλεσε). Αίτια ομίχλης μπορεί να είναι :

- Έκθεση του φιλμ (ή μέρους του) σε ορατό φως. Συνήθως από το φως του σκοτεινού θαλάμου εμφάνισης, όταν είναι πολύ μεγάλης έντασης, είτε όταν το φίλτρο της λάμπας καταστραφεί μερικά ή ολικά.
- Έκθεση σε φως ή ακτινοβολία ακτίνων X κατά λάθος (π.χ. από ελαττωματικές κασέτες ή κακό χειρισμό).
- Κακές συνθήκες αποθήκευσης των μη εκτεθειμένων φιλμ. Ιδιαίτερα όταν υπάρχει υψηλή θερμοκρασία στην υγρασία ή ατμοί ορισμένων χημικών ουσιών.
- Φυσική γήρανση του φιλμ. Όλα τα φιλμ και ιδιαίτερα τα γρήγορα, με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζουν ομίχλη και επομένως δεν θα πρέπει να διατηρούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Μεγάλος χρόνος εμφάνισης. Παρουσιάζεται ιδιαίτερα στα γρήγορα φιλμ και μάλιστα όταν η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι υψηλή. Ακόμη και υπερβολική ανάδευση του εμφανιστή, μπορεί να προκαλέσει ομίχλη.

Η μέγιστη επιτρεπτή γενική ομίχλη δίνεται επίσης από ορισμένες προδιαγραφές και εκφράζεται σε μονάδες πυκνότητας εμφανισμένου φιλμ, χωρίς αυτό να έχει εκτεθεί σε ακτίνες X ή γ(π.χ. 0,2 για τα πιο αργά φιλμ και 0,6 για τα

πιο γρήγορα). Στην πυκνότητα αυτή συνεισφέρει βεβαίως και ο ελαφρός χρωματισμός της βάσης του φιλμ.

Μαύρα σημάδια από πίεση (μετά την έκθεση)

Εάν το φιλμ πιεστεί ή καμφθεί πολύ (τσακίσει) μετά από την έκθεση, παρουσιάζονται στο ραδιογράφημα μαύρα σημάδια, στα σημεία πίεσης ή τσακίσματος. Συνήθως έχουν πολύ χαρακτηριστικό σχήμα τόξου ή μικρού κύκλου ή «νυχιάς». Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα συχνό, όταν χρησιμοποιούνται εύκαμπτες πλαστικές κασέτες.

Λευκά σημάδια από πίεση(πριν την έκθεση)

Όπως προηγουμένως, αλλά προξενούνται από πίεση η τσάκισμα του φιλμ πριν αυτό εκτεθεί.

Κηλίδες και γραμμές από ενισχυτικές πλάκες

Βαθιές αμυχές (γρατσουνιές) στις ενισχυτικές πλάκες προκαλούν μεγαλύτερη εκπομπή ηλεκτρονίων(ανά μονάδα επιφάνειας) και επομένως εμφανίζονται σαν μαύρα σημάδια ή γραμμές, στην περίπτωση πλακών(και λευκά στην περίπτωση φθοριζουσών).

Ξένες ύλες μεταξύ ενισχυτικών πλακών και φιλμ

Απορροφούν ακτινοβολία και επομένως εμφανίζονται σαν λευκά σωματίδια (τέτοια είναι και η περίπτωση lead pick-up, όταν χρησιμοποιούνται μεταλλικές ενισχυτικές πλάκες). Σχετικό σφάλμα είναι και η εμφάνιση της δομής του χαρτιού, όταν αυτό τοποθετηθεί μεταξύ φιλμ και ενισχυτικής πλάκας.

Σημάδια στατικού ηλεκτρισμού

Προκαλούνται συχνά με την γρήγορη εξαγωγή του φιλμ από την κασέτα ή τον φάκελο(στην περίπτωση έτοιμων φιλμ). Εμφανίζονται σαν μαύρες χαρακτηριστικές γραμμές που θυμίζουν στιγμιαία αποτύπωση αστραπών. Οφείλονται σε στατικό ηλεκτρισμό που αναπτύχθηκε με την τριβή του φιλμ στις ενισχυτικές πλάκες ή στα φύλλα χαρτιού που το περιβάλλουν. Το ξηρό περιβάλλον ευνοεί την εμφάνιση του φαινομένου.

Δακτυλικά αποτυπώματα

Τα δάκτυλά μας συχνά έχουν ελαφρό στρώμα φυσικών ελαίων. Όταν πιάσουμε το φιλμ πριν την εμφάνιση του με όχι καθαρά χέρια, τα έλαια αυτά εμποδίζουν στη συνέχεια την εμφάνιση και εμφανίζονται στο ραδιογράφημα σαν λευκά δακτυλικά αποτυπώματα.

Εμφανιστής στο φιλμ (πριν την εμφάνιση)

Προκαλεί την τοπική αμαύρωση του φιλμ.

Νερό στο φιλμ(πριν την εμφάνιση)

Προκαλεί ελαφρώς μεγαλύτερη αμαύρωση, όταν εμφανιστεί το φιλμ.

Σταθεροποιητής στο φιλμ(πριν την εμφάνιση)

Σταγόνες σταθεροποιητή στο φιλμ πριν την εμφάνιση, εμφανίζονται στο ραδιογράφημα σαν λευκές κηλίδες, που όμως γυαλίζουν όταν φωτίσουμε το φιλμ από τα πλάγια.

Στίγματα περίθλασης(Diffraction Mottling)

Έχουν εμφάνιση μαύρων στιγμάτων, παρόμοιων με εκτεταμένους πόρους μικρών σχετικά διαστάσεων. Παρουσιάζονται κυρίως σε χονδρόκοκκα υλικά, όπως χυτό αλουμίνιο και ωστενιτικούς χάλυβες, αλλά πολύ σπάνια σε κοινούς χάλυβες χαμηλού άνθρακα (ακόμη και όταν είναι χυτοί). Είναι δυνατόν να εξιχνιαστεί εάν πρόκειται για περίθλαση της ακτινοβολίας στους κόκκους του υλικού ή για πορώδες του υλικού, περιστρέφοντας ελαφρά το δοκίμιο(1 έως 5 μοίρες) και παρατηρώντας εάν περιστράφηκαν αντίστοιχα και οι ενδείξεις (οπότε πράγματι είναι πορώδες). Το φαινόμενο εξουδετερώνεται με μικρή αύξηση των kV είτε με χρήση φίλτρων (διότι το συναντάμε κυρίως σε ραδιογράφιση με χαμηλά kV). Ενδέχεται όμως η παρουσία του φαινομένου να σημαίνει και ατέλεια του υλικού και συγκεκριμένα την ύπαρξη μεγάλων κόκκων, ενώ αυτό δεν θα έπρεπε να συμβαίνει.

Ελαττώματα που προξενούνται κατά την εμφάνιση

Γραμμώσεις από εμφανιστή

Προκαλούνται όταν το φιλμ δεν αναδεύεται προς όλες τις διευθύνσεις μέσα στο λουτρό εμφάνισης και έχουν συχνά εικόνα μαύρων λωρίδων, παράλληλων προς τα άκρα του φιλμ.

Φυσαλίδες αέρα

Εμφανίζονται σαν ανοιχτόχρωμες στρογγυλόμορφες κηλίδες και οφείλονται στην προσκόλληση φυσαλίδων αέρα στο φιλμ, όταν αυτό βρίσκεται στο λουτρό εμφανιστή(και ιδιαίτερα στο πρώτο στάδιο).

Εμφάνιση δικτυώματος

Προκαλείται όταν υπάρχει σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των λουτρών (εμφανιστή, στερεωτή, έκπλυσης κλπ), ιδιαίτερα εάν η θερμοκρασία του εμφανιστή είναι πολύ υψηλή (αρκετά πάνω από 24 °C). Το γαλάκτωμα ρυτιδώνει και εμφανίζεται σαν δικτυωτό είτε σαν εξαιρετικά κοκκώδες.

Απώλεια του γαλακτώματος

Προκαλείται από υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία εμφανιστή ή σταθεροποιητή, καθώς και από υπερβολικά εξασθενημένο διάλυμα σταθεροποιητή. Το γαλάκτωμα φεύγει τελείως και απομένει η πλαστική βάση του φιλμ.

Σημάδια από στέγνωμα του φιλμ

Προκαλούνται από σταγόνες νερού που παραμένουν υγρές, παρότι το υπόλοιπο φιλμ είχε στεγνώσει. Εμφανίζονται σαν μαύρες στρογγυλές κηλίδες ή σαν μαύρες λωρίδες, που γυαλίζουν όταν φωτιστούν από τα πλάγια (όπως εξάλλου όλα τα σχετικά σφάλματα του φιλμ που δημιουργούνται κατά την εμφάνιση).

Μεταλλικά ρινίσματα στο λουτρό εμφάνισης

Προκαλούν μαύρα στίγματα ή και λωρίδες, λόγω ενίσχυσης της εμφάνισης, όταν βρίσκονται σε επαφή με το εμφανιζόμενο φιλμ.

Χημική ομίχλη

Παρουσιάζεται λόγω μεγάλων χρόνων εμφάνισης.

Επιλογή παραμέτρων ραδιογράφησης

Διαγράμματα έκθεσης

Προκειμένου να είμαστε σε θέση να πετύχουμε το ραδιογράφημα που θέλουμε χωρίς πολλαπλές δοκιμές, κατασκευάζουμε το διάγραμμα έκθεσης. Πρόκειται για ένα γράφημα που στον οριζόντιο άξονα (τετμημένες) έχει το πάχος του ραδιογραφούμενου υλικού και στον κάθετο άξονα (τεταγμένες) την απαραίτητη έκθεση.

Το γράφημα έχει ισχύ για συγκεκριμένο ραδιογραφούμενο υλικό (π.χ. χάλυβα ή αλουμίνιο), συγκεκριμένο φιλμ, συγκεκριμένη απόσταση πηγής-φιλμ, χρήση ενισχυτικών πλακών από συγκεκριμένο υλικό και πάχη, συγκεκριμένες συνθήκες εμφάνισης (χρόνοι, θερμοκρασίες, πυκνότητες λουτρών), συγκεκριμένη πυκνότητα φιλμ (συνήθως 2.0D) και αν πρόκειται για ακτινοβολία ακτίνων X, συγκεκριμένη συσκευή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (δηλαδή το διάγραμμα της έκθεσης της συσκευής ακτίνων X πρέπει να επαληθεύεται ή να διορθώνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα).

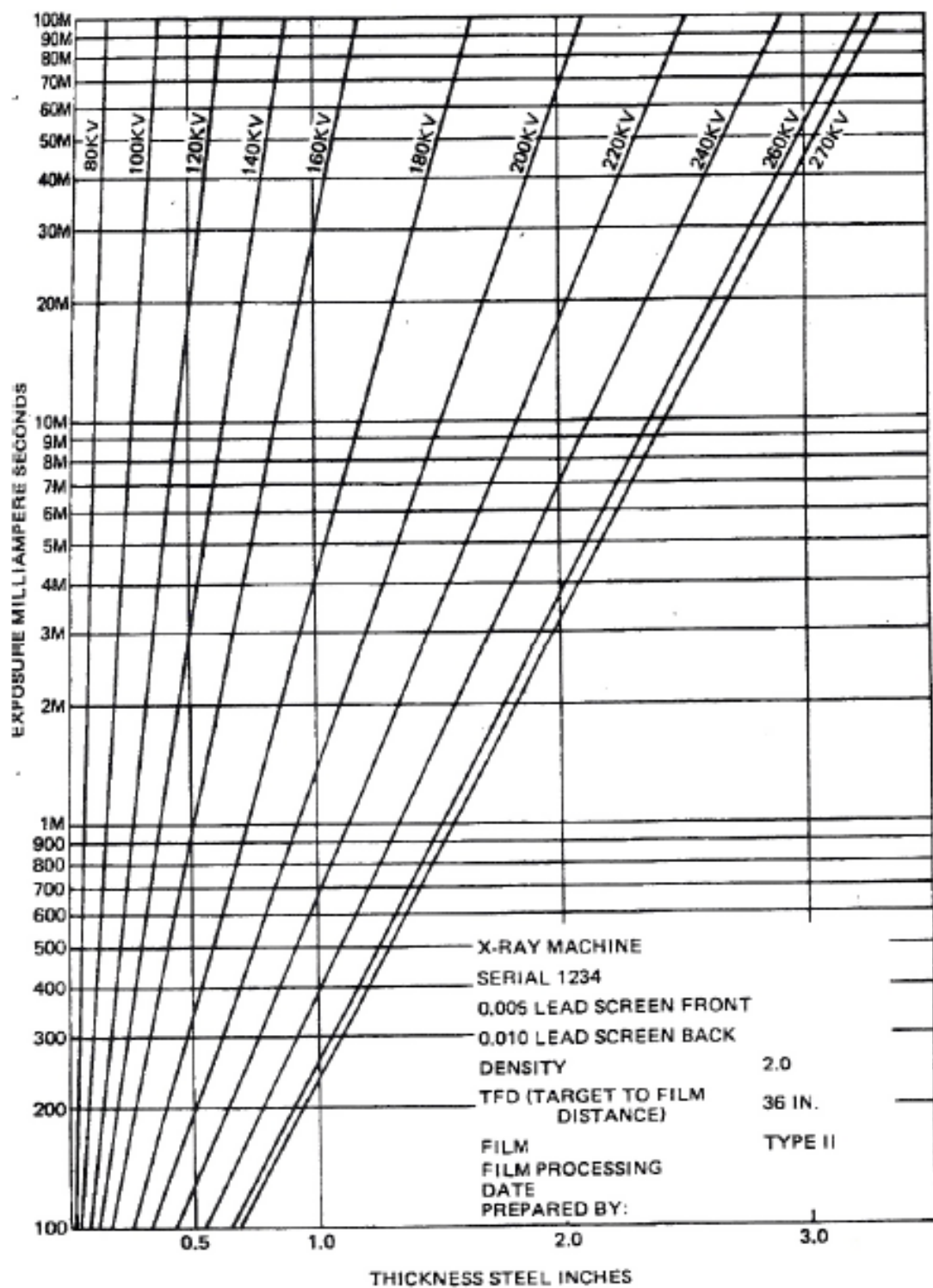
Οι κλίμακες είναι συνήθως λογαριθμικές (τουλάχιστον η μια εκ των δύο), οπότε το γράφημα παρουσιάζεται σαν ευθεία. Προκειμένου για ακτίνες X, απεικονίζονται διάφορες γραμμές, που αντιστοιχούν στα kV της ραδιογράφησης, ενώ για συγκεκριμένο ισότοπο (π.χ. Ir192) έχουμε μόνο μια ευθεία.

Εάν κατά την ραδιογράφιση θέλουμε να αλλάξουμε κάποιον από τους παράγοντες που τηρήσαμε σταθερούς κατά την κατασκευή του διαγράμματος έκθεσης, πράττουμε ανάλογα. Έτσι, εάν θέλουμε να αλλάξουμε την απόσταση πηγής φιλμ, χρησιμοποιούμε τον γενικευμένο νόμο της έκθεσης για να βρούμε την νέα απαιτούμενη έκθεση, ενώ αν θέλουμε να αλλάξουμε το είδος του φιλμ ή την πυκνότητα ραδιογραφήματος, χρησιμοποιούμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες των φιλμ.

Το διάγραμμα έκθεσης κατασκευάζεται ραδιογραφώντας επανειλημμένα ένα κλιμακωτό σφήνα (step wedge : 1. πυκνομετρική διαβάθμιση, 2. βαθμονόμηση κλίμακας σκιαγραφημένης διαβάθμισης 3. κλίμακα του γκρίζου για την διαβάθμιση της οπτική πυκνότητας 4. κλίμακα οπτικής πυκνότητας), με

σταθερές τις συνθήκες που θέλουμε (π.χ. απόσταση πηγής-φιλμ, είδος φιλμ, ενισχυτικών πλακών, kV, συνθήκες εμφάνισης κλπ) και με διαφορετικές εκθέσεις (συνήθως η μια διπλάσια της άλλης), τοποθετώντας στο γράφημα εκείνα τα πάχη και εκθέσεις που μας έδωσαν την επιθυμητή πυκνότητα (π.χ. 2.0D). Βεβαίως υπάρχουν τεχνικές που μας επιτρέπουν την ταχύτερη κατασκευή του διαγράμματος.

Τα διαγράμματα έκθεσης συχνά (ιδιαίτερα στις ακτίνες γ) δίνονται υπό την μορφή λογαριθμικού κανόνα (slide rule) ή άλλου είδους υπολογιστικής συσκευής (calculator). Στην περίπτωση μάλιστα ακτίνων γ, οι σχετικές υπολογιστικές συσκευές ή κανόνες δίνουν τον απαιτούμενο χρόνο έκθεσης για διαφορετικές αποστάσεις πηγής-φιλμ, για διαφορετικά Curie (ή χρόνους) του ισοτόπου και διαφορετικά φιλμ.



Εικόνα 53: Τυπικό διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα

Συντελεστής ισοδυναμίας

Αν πρόκειται να ραδιογραφήσουμε ένα υλικό, είναι δυνατόν να συσχετίσουμε την απαιτούμενη έκθεση για το συγκεκριμένο υλικό με την απαιτούμενη έκθεση για ραδιογράφιση χάλυβα, πολλαπλασιάζοντας το πάχος του υλικού με τον «συντελεστή ισοδυναμίας» (or equivalence factor). Χρησιμοποιούμε το διάγραμμα έκθεσης για χάλυβα, σαν να έχουμε πάχος χάλυβα όσο το γινόμενο του πάχους του υλικού μας επί τον αντίστοιχο συντελεστή ισοδυναμίας.

Οι σχετικοί πίνακες δίνουν τον συντελεστή ισοδυναμίας, σε σχέση βεβαίως με τα kV ή το ισότοπο που χρησιμοποιούμε. Για ακτινοβολίες μικρής διεισδυτικότητας (συνήθως τα 100kV και κάτω) σαν βάση (συντελεστής 1,0) συχνά δεν χρησιμοποιείται ο χάλυβας αλλά το αλουμίνιο. Ακολουθούν οι συντελεστές ισοδυναμίας για διάφορα υλικά και ακτινοβολίες.

ΜΕΤΑΛΛΟ	ΑΚΤΙΝΕΣ Χ							ΑΚΤΙΝΕΣ Γ			
	50kV	100kV	150kV	220kV	400kV	1000kV	2000kV	Ir-192	Cs-137	Co-60	ΡΑΔΙΟ
ΜΑΓΝΗΣΙΟ	0,6	0,6	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	1	1	0,12	-	-	-	-	0,35	0,35	0,35	0,4
ΧΑΛΥΒΑΣ	-	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18/8 St.8t	-	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ΧΑΛΚΟΣ	-	18	1,6	1,4	1,4	-	-	1,1	1,1	1,1	1,1
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΣ	-	-	1,4	1,3	1,3	-	-	1,1	1	1	1
ΜΟΛΥΒΔΟΣ	-	-	14	12	-	5	2,5	4	3,2	2,3	2

Κεφάλαιο VIII

Στο κεφάλαιο αυτό δίδονται γενικές πληροφορίες για τα έδρανα (ολίσθησης και κύλισης) ενώ γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα έδρανα κύλισης τα οποία και ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία.

Έδρανα και κατηγορίες εδράνων

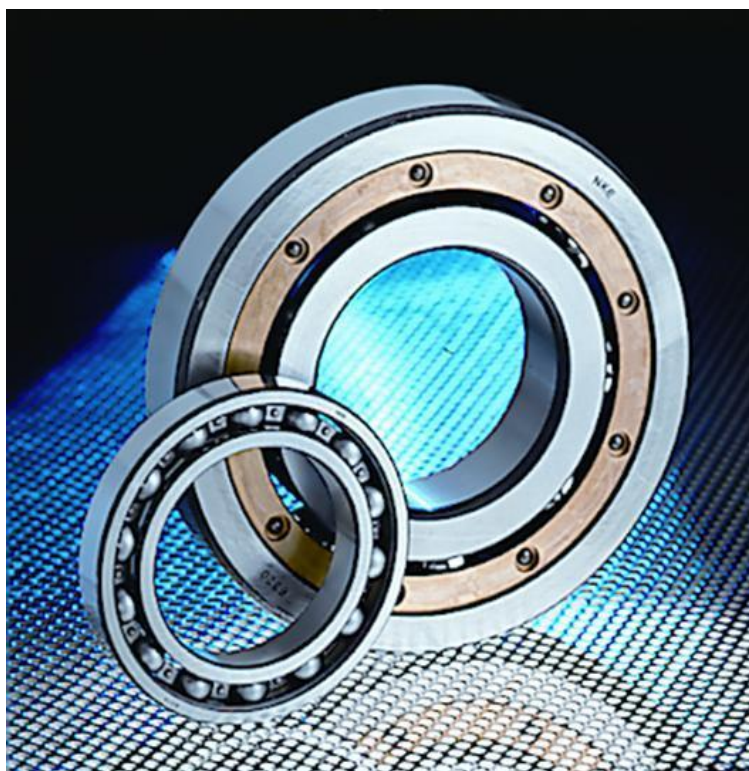
Στη επιστήμη της μηχανολογίας ως έδρανο ορίζεται ως το στοιχείο μιας μηχανής, το οποίο στηρίζεται ένας άξονας και σκοπεύει στη μεταβίβαση προς το έδαφος ή προς άλλες κατασκευές του φορτίου που εφαρμόζεται σε αυτόν. Τα έδρανα εν γένει χρησιμεύουν σαν «υποδοχείς» των αξόνων και των ατράκτων ενώ επιτρέπουν την σχετική κίνηση μεταξύ δύο κομματιών προς μία ή περισσότερες κατευθύνσεις με την ελάχιστη τριβή και παράλληλα αποτρέπουν την κίνηση προς την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Τα έδρανα λιπαίνονται για να διατηρούνται όσο το δυνατόν πιο χαμηλά οι απώλειες τριβών και οι θερμοκρασίες. Το μέγεθος της τριβής εμφανίζεται είτε ως τριβή κίνησης (που εμποδίζει την αντίθετης κατεύθυνσης σχετική κίνηση δύο επιφανειών), είτε ως τριβή ακινησίας στην περίπτωση που το εμπόδιο της τριβής είναι τέτοιου μεγέθους που καθιστά αδύνατη την κίνηση.

Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες εδράνων:

- Έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα). Πρόκειται για έδρανα στα οποία οι επιφάνειες είτε ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη, είτε χωρίζονται από ένα φιλμ λιπαντικού.
- Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν). Είναι τα έδρανα εκείνα τα οποία τα στοιχεία που δέχονται την φόρτιση είναι κυλιόμενα σώματα.

Τα έδρανα κύλισης συγκρινόμενα με τα έδρανα ολίσθησης παρουσιάζουν μειωμένο κατά πολύ συντελεστή τριβής κατά την εκκίνηση. Χαρακτηριστικά κατά μέσο όρο η τιμή «μ» ισούται με 0,02 για τα έδρανα ολίσθησης έναντι της 0,14 για τα έδρανα ολίσθησης. Αυτό συνεπάγεται ότι η εκκίνηση αλλά και η

στάση γίνεται χωρίς φθορά καθώς επίσης ότι δεν έχουν την ανάγκη λειτουργίας προσαρμογής (run-in, Einlauf). Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγεται ότι δεν έχουν ανάγκη συντήρησης καθώς και η απαραίτητη ποσότητα λιπαντικού είναι ελάχιστη. Η φέρουσα ικανότητά τους είναι αυξημένη δεδομένου ότι για ίδια διάμετρο του στροφέα και ίδιο πλάτος εδράνου έχουν μεγαλύτερο επιτρεπτό φορτίο συγκρινόμενα πάντα με τα έδρανα ολίσθησης. Όσον αφορά τον στροφέα και χαρακτηριστικά του, όπως το υλικό που είναι κατασκευασμένος καθώς και η σκληρότητα και η τραχύτητα της επιφάνειάς του δεν επηρεάζουν την αντοχή του εδράνου. Τέλος το κόστος παραγωγής είναι χαμηλότερο σε μικρές διαμέτρους στροφέων.



Εικόνα 54: Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν).

Αντιθέτως τα έδρανα κύλισης υστερούν έναντι των εδράνων ολίσθησης διότι παρουσιάζουν ευαισθησία σε κρουστικές φορτίσεις και κραδασμούς με αποτέλεσμα να τραυματίζονται οι συνεργαζόμενες επιφάνειες του εδράνου. Παρουσιάζουν επίσης και σημαντική ευαισθησία σε ακαθαρσίες, σκόνες ή ρινίσματα μετάλλων οι οποίες οδηγούν σε υπερβολική φθορά. Η διάρκεια της ζωής του είναι λοιπόν ιδιαίτερα περιορισμένη. Κατά την διάρκεια της

λειτουργίας τους δημιουργούν σχετικά υψηλότερη στάθμη θορύβου συγκριτικά με τα έδρανα ολίσθησης ενώ εξαιτίας των φυγόκεντρων δυνάμεων οι οποίες αναπτύσσονται στα σώματα κύλισης οδηγούν σε περιορισμένη ταχύτητα περιστροφής και ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων διαμέτρων. Σε τέτοιες περιπτώσεις μεγάλων διαμέτρων το κόστος είναι ιδιαίτερος υψηλότερο.



Εικόνα 55: Έδρανα ολίσθησης (κουζινέτα)

Είδη εδράνων κύλισης

Για τα έδρανα κύλισης αυτό που παίζει τον βασικό ρόλο είναι η τριβή κύλισης. Προς το σκοπό αυτό υπολογίζεται ακόμα και η τριβή εκκίνησης κατά την αρχή της κίνησης και η τριβή τερματισμού στο τέλος της κίνησης. Στην τριβή της κίνησης των εδράνων κύλισης έχουμε δύο περιπτώσεις την τριβή κύλισης και την τριβή κυλινδραρίσματος.

Η τριβή κύλισης εμφανίζεται όταν δύο ελαστικά σώματα (π.χ. από χάλυβα) κυλίσουν το ένα πάνω στο άλλο. Δια μέσου της ελαστικής παραμόρφωσης δημιουργείται από το θεωρητικό σημείο επαφής ή τη γραμμή

επαφής μια επιφανειακή επαφή, η οποία μάλιστα στην ελεύθερη κύλιση δύο σωμάτων μεταξύ τροχιών οδήγησης δίνει ένα ποσοστό ολίσθησης.

Η τριβή κυλινδραρίσματος εμφανίζεται όταν δύο σώματα κυλίνονται το ένα επί του άλλου, όπου υπάρχουν και ποσοστά κύλισης και ποσοστά ολίσθησης με βάση τους βασικούς νόμους της μηχανικής. Τριβή κυλινδραρίσματος έχουμε χαρακτηριστικά στα έδρανα κύλισης και στις πλευρές των γραναζιών.

Τα έδρανα κύλισης γενικά αποτελούνται από δύο δακτυλίους ή δίσκους εσωτερικό και εξωτερικό, που είναι διαμορφωμένοι, έτσι ώστε μεταξύ τους να κυλίνονται σε συγκεκριμένες τροχιές. Τα σώματα κύλισης μπορούν να έχουν μορφή σφαίρας, κυλίνδρου, βαρελοειδούς κυλίνδρου, κολουρου κώνου, βαρελοειδούς κολουρου κώνου ή βελόνας και συγκρατούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους στις ειδικά κατασκευασμένες τροχιές των δακτυλίων ή των δίσκων με την βοήθεια ενός κλωβού, που σε περίπτωση σφαιρικών σωμάτων κύλισης ονομάζεται και σφαιροθήκη.

Ανάλογα με τη γενική τους μορφή τα έδρανα κύλισης διακρίνονται σε δακτυλιοειδή, σε δισκοειδή και σε λοξά. Ενώ ανάλογα με τη διεύθυνση της δύναμης την οποία δέχεται ένα έδρανο κύλισης κατά τη λειτουργία του χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Στα εγκάρσια ή ακτινικά έδρανα
- Στα αξονικά ή ωστικά έδρανα
- Στα έδρανα συνδυασμένης φόρτισης

Τα εγκάρσια έδρανα είναι κατάλληλα κυρίως για να παραλαμβάνουν εγκάρσια φορτία και έχουν πάντοτε δακτυλιοειδή μορφή. Στην περίπτωση των αξονικών εδράνων αυτά παραλαμβάνουν μόνο αξονικά φορτία και έχουν δισκοειδή μορφή. Τα έδρανα συνδυασμένης φόρτισης μπορούν να παραλαμβάνουν ταυτόχρονα και αξονικά αλλά και εγκάρσια φορτία και έχουν δακτυλιοειδή ή δισκοειδή μορφή.

Ανάλογα με την μορφή των σωμάτων κύλισης που περιέχουν τα έδρανα ονομάζονται:

- Βελονοειδή
- Κωνικά
- Κυλινδρικά
- Σφαιρικά ή ένσφαιρα
- Βαρελοειδή

Από τους διάφορους τύπους εδράνων κύλισης αξίζει να δοθεί έμφαση στα βελονοειδή. Τα βελονοειδή έδρανα κύλισης είναι αξιόλογα λόγω του απαιτούμενου μικρού χώρου τοποθέτησης έναντι των σφαιρικών και κυλινδρικών εδράνων κύλισης και της σχετικά μεγάλης φόρτισής τους. Αν τα βελονοειδή έδρανα έχουν εσωτερικό δακτύλιο, οι βελόνες κινούνται άμεσα πάνω σε ένα σκληρυμένο, ρεκτιφιαρισμένο και στιλβωμένο δρομέα, διότι έτσι τα έδρανα χρειάζονται ακόμα λιγότερο χώρο. Ένας άλλος τύπος εδράνου κύλισης, τα έδρανα κύλισης με κωνικούς κυλινδρίσκους, μπορούν να αποσυναρμολογηθούν και ο εσωτερικός και ο εξωτερικός δακτύλιος να τοποθετηθούν χωριστά.

Αυτό τα καθιστά συμφέροντα για μονταρίσματα σε σειρά. Μια ιδιαίτερη κατασκευαστική μορφή αποτελούν τα έδρανα τεσσάρων σημείων. Αυτά μπορούν να δεχτούν τις δυνάμεις σε τέσσερα σημεία και έτσι επιτυγχάνουν μια υψηλή σταθερότητα. Στα έδρανα αυτά ο εσωτερικός δακτύλιος είναι χωρισμένος. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν πολλά σφαιρίδια, τα οποία σε συνδυασμό με τα ψηλά ερείσματα των δακτυλίων προσδίδουν σε αυτά τα έδρανα κύλισης μεγάλη ικανότητα έδρασης.

Τέλος ένας αρκετά σημαντικός τύπος εδράνων κύλισης είναι τα βαρελοειδή. Τα κλασικά βαρελοειδή έδρανα κύλισης έχουν σφικτήρα. Ένας ξεχωριστός τύπος βαρελοειδών είναι τα διαιρούμενα βαρελοειδή. Αυτά έχουν κυλινδρική οπή και οι δύο δακτύλιοι τους (εσωτερικός και εξωτερικός) καθώς

και το συγκρότημα κλωβού διαιρούνται σε δύο τμήματα. Οι διαιρεμένοι δακτύλιοι συνδέονται μεταξύ τους με κοχλίες.

Ένα σύνηθες κατασκευαστικό στοιχείο των διαιρούμενων βαρελοειδών εδράνων κύλισης είναι οι ενσωματωμένοι ασφαλιστικοί δακτύλιοι. Συνήθως οι εσωτερικοί ημιδακτύλιοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με κοχλίες συναρμολόγησης. Αυτό που πρέπει τελικά να τονιστεί είναι ότι η εσωτερική σχεδίαση των διαιρούμενων βαρελοειδών εδράνων κύλισης είναι τέτοια ώστε να έχουν τη μέγιστη δυνατότητα παραλαβής φορτίου.

Τα έδρανα επίσης διακρίνονται ανάλογα με το εάν έχουν μία ή δύο σειρές σωμάτων κύλισης σε απλά και διπλά. Τέλος ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους ονομάζονται σταθερά, κινητά ή αυτορυθμιζόμενα.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν απλά κυλινδρικά έδρανα κύλισης και εφεξής όταν γίνεται λόγος για έδρανα κύλισης θα εννοούνται τα κυλινδρικά έδρανα κύλισης.

Υλικά εδράνων κύλισης

Εξαιτίας της καταπόνησης της οποίας δέχονται τα έδρανα κύλισης, για την κατασκευή τους απαιτούνται αυστηρά ειδικοί χάλυβες αρίστης ποιότητας και υψηλής αντοχής οι οποίες έχουν δεχθεί συγκεκριμένη επεξεργασία. Τα έδρανα κύλισης, για να ανταποκρίνονται στις ανάγκες για υψηλή αντοχή σε φόρτιση, απαιτείται η πλήρης βαφή όλων των εξαρτημάτων τους όπως οι δακτύλιοι, οι δίσκοι και τα σώματα κύλισης. Για αυτό το λόγο όλοι οι χάλυβες εδράνων έχουν περιεκτικότητα σε C > 0,3 % ώστε ακόμα και ο πυρήνας των σωμάτων κύλισης να μπορεί να σκληρυνθεί. Οι κλωβοί κατασκευάζονται συνήθως από χαλυβδόφυλλα. Σε περιπτώσεις υψηλού αριθμού στροφών και χαμηλού συντελεστή τριβής κατασκευάζονται από ορείχαλκο ή και από συνθετικά υλικά.

Φθορές στα έδρανα κύλισης

Από τα στοιχεία μιας μηχανής τα έδρανα κύλισης είναι εκείνα τα οποία δέχονται την πιο έντονη μηχανική φθορά. Αυτό γιατί πρόκειται για το μηχανολογικό εξάρτημα το οποίο δέχεται τις πλέον μακροχρόνιες αλλά και ταυτόχρονα τις πιο έντονες δυναμικές φορτίσεις και καταπονήσεις.

Τα έδρανα κύλισης χρησιμοποιούνται σε μια ευρεία γκάμα μηχανισμών στις βιομηχανικές παραγωγικές διαδικασίες. Για το λόγο αυτό βρίσκονται σε επαφή με μια μεγάλη ποικιλία ρευστών τα οποία έχουν διαβρωτικές ιδιότητες, όπως το νερό, τα οξέα, οι βάσεις και διάφορα αέρια. Οι κατασκευαστές έχουν εξοπλίσει τα σύγχρονα έδρανα κύλισης με μηχανισμούς στεγανοποίησής τους από τα διαχειριζόμενα στη παραγωγική διαδικασία ρευστά. Ωστόσο, ορισμένα από αυτά είναι ιδιαίτερα δραστικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα έδρανα κύλισης εξαιτίας του γεγονότος ότι υφίστανται μια σύνθετη καταπόνηση μηχανικής αλλά και χημικής φύσης είναι αναγκαία η λήψη επιπλέον μέτρων. Αυτού του είδους τα μέτρα δεν συνίστανται στην επίστρωση με ειδικές ρητίνες της καταπονούμενης σε διάβρωση μεταλλικής επιφάνειας, αλλά μπορεί να αφορούν σε χρησιμοποίηση ειδικών υλικών κατά την κατασκευή των εδράνων κύλισης, στην κατάλληλη μηχανική προετοιμασία των καταπονούμενων επιφανειών καθώς επίσης και στη χρησιμοποίηση εξελιγμένων λιπαντικών στα οποία περιλαμβάνονται και στερεά.

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις βιομηχανικής παραγωγής, όπου απαιτείται η προστασία των εδράνων κύλισης από διάβρωση συναντώνται στη χημική βιομηχανία και την βιομηχανία τροφίμων, στη χαλυβουργία καθώς και στην βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών.

Εξαιτίας των παραπάνω είναι σημαντική η προσέγγιση της διάρκειας ζωής τους και η ένταξη των διαδικασιών συντήρησής τους σε ιδιαίτερα μελετημένα προγράμματα διαγνωστικής συντήρησης.

Στα έδρανα κύλισης η διάρκεια ζωής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας περιορίζεται είτε από την κόπωση του υλικού είτε από ένα ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φθοράς των επιφανειών κύλισης των δακτυλίων και των σωμάτων κύλισης.

Η εκλογή του κατάλληλου είδους και μεγέθους του εδράνου καθορίζεται από το είδος και το μέγεθος της φορτίσεως που παραλαμβάνει, από την ταχύτητα περιστροφής του στροφέα και τέλος από ειδικές συνθήκες λειτουργίας όπως το είδος λιπάνσεως, την θερμοκρασία λειτουργίας, τις αυξομειώσεις του ονομαστικού φορτίου κ.τ.λ..

Η αντοχή του εδράνου εξαρτάται βασικά από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του, από τη μορφή, το μέγεθος και τον αριθμό των σωμάτων κυλίσεως, από τη μορφή και το μέγεθος των αυλακιών κυλίσεως των δακτυλίων ή δίσκων, από το συνολικό αριθμό κυλίσεων των σωμάτων κυλίσεως σε κάθε ένα σημείο των αυλακιών κυλίσεως και από την κατανομή του φορτίου στα σήματα κυλίσεως.

Ο υπολογισμός της αντοχής των εδράνων κύλισης χωρίζεται σε δύο είδη, στο δυναμικό και το στατικό υπολογισμό αντοχής. Ο υπολογισμός δυναμικής αντοχής εκτελείται στα έδρανα εκείνα, που η ταχύτητα περιστροφής τους είναι μεγαλύτερη από 20 περίπου στροφές ανά λεπτό.

Ο υπολογισμός στατικής αντοχής εφαρμόζεται στα έδρανα που είτε δεν περιστρέφονται είτε ο αριθμός στροφών τους είναι μικρότερος από 20 στροφές το λεπτό.

Διάρκεια ζωής εδράνων κύλισης

Στα δεδομένα για υπολογισμό των ρουλεμάν περιλαμβάνονται τα εφαρμοζόμενα φορτία (ακτινικά ή εγκάρσια και αξονικά) από πλευράς μεγέθους, τρόπου και φοράς εφαρμογής τους (σταθερά ή εναλλασσόμενα), η ταχύτητα περιστροφής των στροφών, η διάρκεια ζωής που απαιτείται για τα ζητούμενα έδρανα, ο διαθέσιμος ακτινικός ή αξονικός χώρος κλπ.

Ένα έδρανο παραλαμβάνει εγκάρσιο, F_r , και αξονικό φορτίο F_a . Το ισοδύναμο φορτίο P είναι το υποθετικό φορτίο (σταθερό σε μέγεθος και κατεύθυνση) που δρα ακτινικά σε εγκάρσια έδρανα και αξονικά σε αξονικά έδρανα, και το οποίο αν εφαρμοσθεί θα έχει τα ίδια αποτελέσματα διάρκειας ζωής του εδράνου τα οποία θα έχουν τα πραγματικά φορτία και όταν δρουν ταυτόχρονα. Το ισοδύναμο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

Όπου X και Y είναι οι συντελεστές εγκάρσιου και αξονικού φορτίου αντίστοιχα, δίδονται σε αντίστοιχους καταλόγους και εξαρτώνται από τη μορφή του ρουλεμάν.

Ανάλογα με τον τρόπο επενέργειας του εγκάρσιου φορτίου F_r ορίζονται:

1. Το περιστρεφόμενο φορτίο επί του εσωτερικού δακτυλίου του εδράνου που αναφέρεται

- σε άξονα περιστροφής ο οποίος περιστρέφεται μαζί με τον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου, ενώ ο εξωτερικός δακτύλιος και το φορτίο F_r παραμένουν ακίνητα
- σε άξονα που μαζί με τον εσωτερικό δακτύλιο του εδράνου ακινητούν, ενώ ο εξωτερικός δακτύλιος μαζί με το φορτίο περιστρέφονται.

Για τις περιπτώσεις αυτές ισχύουν τύποι δυναμικού φορτίου. Το Δυναμικό φορτίο C (δυναμικός συντελεστής έδρασης) είναι το σταθερό φορτίο κάτω από την επίδραση του οποίου το έδρανο επιτυγχάνει μία ονομαστική διάρκεια ζωής 106 στροφών ή 500 ωρών λειτουργίας στις 33-1/3 RPM. Το φορτίο αυτό δίνεται στους καταλόγους των εδράνων.

2. Το σταθερό φορτίο επί του εσωτερικού δακτυλίου που αναφέρεται και ως φορτίο σημείου και αντιστοιχεί σε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις

- το έδρανο είναι ακίνητο και υφίσταται κρουστικά φορτία
- το έδρανο παλινδρομεί με φορτίο μικρού εύρους γύρω από μια θέση
- το έδρανο περιστρέφεται με φορτίο μικρής ταχύτητας και απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής
- το έδρανο κατά την περιστροφή του υφίσταται ισχυρά κρουστικά φορτία, πέραν των συνθηκών λειτουργίας.

Για τις περιπτώσεις αυτές ισχύουν τύποι στατικού φορτίου. Το Στατικό φορτίο C_o είναι το καθαρά ακτινικό (για αξονικά έδρανα, αξονικό) φορτίο το οποίο προκαλεί σε ακίνητα έδρανα μια παραμένουσα παραμόρφωση ίση με 0,01% της διαμέτρου του στοιχείου κύλισης, στη θέση επαφής που καταπονείται περισσότερο μεταξύ του δακτυλίου και του στοιχείου κύλισης. Δίνεται και αυτό στους καταλόγους των εδράνων.

Η διάρκεια ζωής ενός εδράνου διατυπώνεται και ως «δυναμική ικανότητα έδρασης» και είναι ο αριθμός των περιστροφών, ή οι ώρες λειτουργίας που αντέχει το έδρανο χωρίς ένδειξη μιας κόπωσης του υλικού κατασκευής είτε στους δακτυλίους, ή στους δίσκους, είτε στα σώματα κύλισης. Η κόπωση του υλικού μπορεί να φανεί στην αρχή με μορφή μικρών ρωγμών, οι οποίες αργότερα μπορούν να φτάσουν σε θρυμματισμούς. Η πείρα απέδειξε ότι έδρανα ίδιου μεγέθους κατασκευής και υλικού έχουν διαφορετική διάρκεια ζωής ακόμα και όταν λειτουργούν κάτω από απόλυτα ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής ενός εδράνου καθορίζεται ένας δυναμικός συντελεστής έδρασης. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται σαν η ισοδύναμη δύναμη φόρτισης κατά την οποία το 90% όλων των εδράνων φτάνουν σε μια ονομαστική διάρκεια ζωής $L_{10} \times 10^6$ περιστροφών (σε ώρες $L_h = \frac{L_{10} \cdot 10^6}{60 \cdot n}$, με n : στροφές ανά λεπτό (RPM)), δηλαδή αριθμός των στροφών που συμπληρώθηκαν από το 90% των εδράνων ίδιας σειράς πριν από τα πρώτα σημάδια της κόπωσης. Αν τώρα η εμφανιζόμενη κατά την εκάστοτε λειτουργία ισοδύναμη δύναμη φόρτισης είναι μικρότερη από το δυναμικό συντελεστή έδρασης τότε αυτό σημαίνει πως η διάρκεια ζωής του εδράνου θα ξεπεράσει το ένα εκατομμύριο περιστροφές. Η μέση διάρκεια ζωής L_m είναι ο αριθμός των στροφών, για τον οποίο το 50% ενός μεγάλου πλήθους εδράνων της ίδιας σειράς (ίδιο είδος και ίδιες διαστάσεις) εμφανίζουν σημεία κόπωσης, όταν λειτουργούν με τις ίδιες συνθήκες φόρτισης.

Πειραματικά, έχει βρεθεί ότι: $L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^k$ για ισοδύναμο φορτίο P και δυναμικό φορτίο C , με $k=3$ στην περίπτωση των σφαιρικών ρουλεμάν.

Έστω ότι για ποσοστό s %, ένα μεγάλος πλήθος εδράνων της ίδιας σειράς εμφανίζουν σημεία κόπωσης μετά από την διάρκεια ζωής L_s και $L_r = \frac{(L_s)}{L_{10}}$, μια σχετική διάρκεια ζωής του πλήθους αυτού. Μπορούμε να ορίσουμε τον παρακάτω νόμο μεταβολής της διάρκειας ζωής των ρουλεμάν:

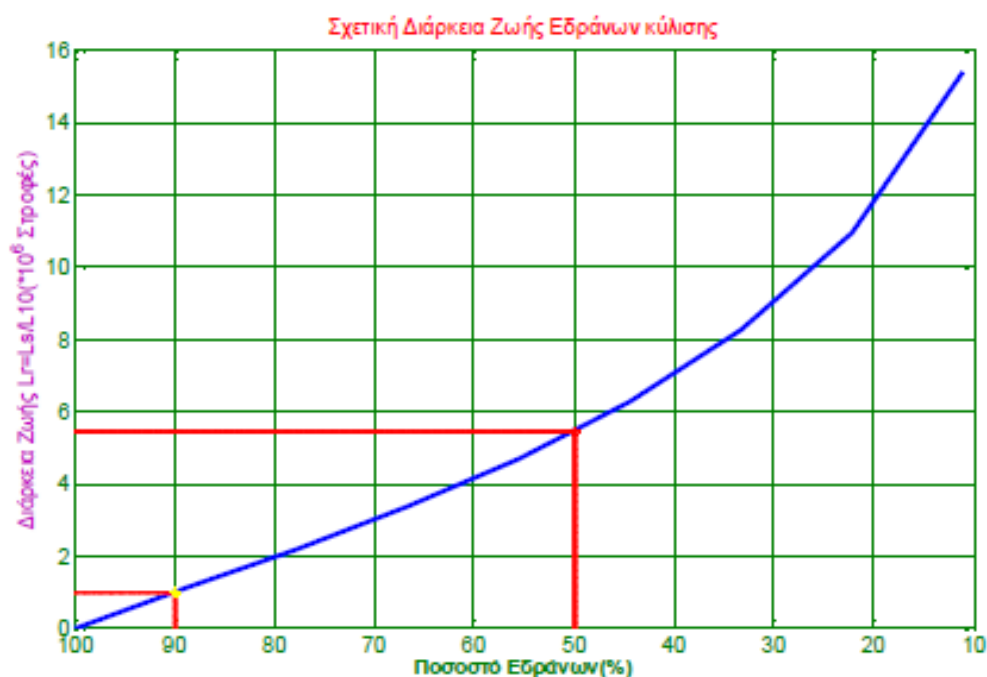
$$\log\left(\frac{1}{s}\right) = \left(\frac{L_s}{L_{10}}\right)^e \cdot \log\left(\frac{1}{0.9}\right)$$

Με $e=10/9$, για σφαιρικά ρουλεμάν και $s=100/100$.

Η εφαρμογή αυτής της σχέσης δείχνει ειδικότερα ότι για 50 % ($s=0.5$), η σχετική διάρκεια ζωής είναι $L_r=5.4992$, δηλαδή για τα μισά ρουλεμάν της ίδιας σειράς, η πραγματική διάρκεια ζωής θα είναι περισσότερο από πενταπλάσια της ονομαστικής διάρκειας ζωής. Φαίνεται επίσης ότι το 1/4 τους έχουν δεκαπλάσια της ονομαστικής διάρκειας ζωής.

Συμπεραίνουμε ότι η μέση διάρκεια ζωής των εδράνων κύλισης είναι περίπου πενταπλάσια της ονομαστικής διάρκειας ζωής. Από το γεγονός αυτό φαίνεται, ότι η διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων για τη διάρκεια ζωής των εδράνων είναι πολύ μεγάλη.

Η πραγματική διάρκεια ζωής ενός εδράνου μπορεί επομένως να είναι πολλαπλάσια της ονομαστικής.



Εικόνα 56: Εξάρτηση διάρκειας ζωής εδράνων με το ποσοστό εδράνων

Παράγοντες που προκαλούν φθορά στα έδρανα κύλισης

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, τα έδρανα κύλισης δεν έχουν άπειρο χρόνο λειτουργίας. Ο χρόνος λειτουργίας τους εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι ο τρόπος κατασκευής, ο τρόπος μεταφοράς και αποθήκευσης, ο τρόπος εγκατάστασης και τέλος ο τρόπος λειτουργίας του εδράνου.

- Ο παράγοντας της κατασκευής περιλαμβάνει την ανομοιογένεια των υλικών καθώς επίσης και τις κακές ανοχές της κατασκευής.
- Ο παράγοντας της μεταφοράς και της αποθήκευσης περιλαμβάνει το κακό πακετάρισμα και τους κραδασμούς κατά τη μεταφορά ή την αποθήκευση.
- Ο παράγοντας της εγκατάστασης περιλαμβάνει την παραμόρφωση του εδράνου, τον κακό τρόπο φόρτισης, τις κακές ανοχές και τα σφάλματα ευθυγράμμισης.
- Ο παράγοντας της λειτουργίας περιλαμβάνει την υπερφόρτιση, την κακή λίπανση, την παρουσία σκόνης, την παρουσία χημικών αερίων, την υγρασία και την υπερθέρμανση.

Τα αίτια καταστροφής των εδράνων κύλισης είναι η φθορά, η μακροχρόνια λειτουργία, η διάβρωση, η παραμόρφωση, τα σπασίματα (στα στοιχεία κυλίσεως), οι ρωγμές (στους δακτυλίους των εδράνων) και η υπερθέρμανση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΧ

Τα έδρανα κύλισης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν δοκίμια στη παρούσα διπλωματική δόθηκαν από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού και πιο συγκεκριμένα από τη διεύθυνση υλικού, αποθηκών, προμηθειών και μεταφορών.

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 %

Οι παρθενικές τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως μας δόθηκαν από τις κατασκευάστριες εταιρίες έχουν τις εξής τιμές :

μέτρο ελαστικότητας E	200 - 220 GPa
μέτρο διάτμησης G	75-95 GPa
σκληρότητα	810 Hv
λόγος Poisson ν	0.27 – 0,33

Γνωρίζουμε επίσης ότι η πυκνότητα του συγκεκριμένου τύπου χάλυβα είναι $7,89 \text{ gr/cm}^3$, η αντοχή 2240 MPa και το όριο διαρροής 2033 MPa .

Εύρεση ελαστικών σταθερών

Ο αρχικός στόχος των πειραμάτων που διενεργήθηκαν είχαν σαν στόχο να υπολογιστούν οι ελαστικές σταθερές των εδράνων με ΜΚΜ ελέγχου των υλικών. Για τον σκοπό αυτόν επιλέχθηκε η μέθοδος του υπέρηχου και πιο συγκεκριμένα η μέθοδος της παλμοηγούς. Κάνοντας χρήση της μεθόδου αποσκοπούμε στον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων στο εσωτερικό του εδράνου οι οποίες υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις.

$$C_l = C_l^x \cdot \frac{d_x}{d_g}$$

$$C_t = C_t^x \cdot \frac{d_x}{d_g}$$

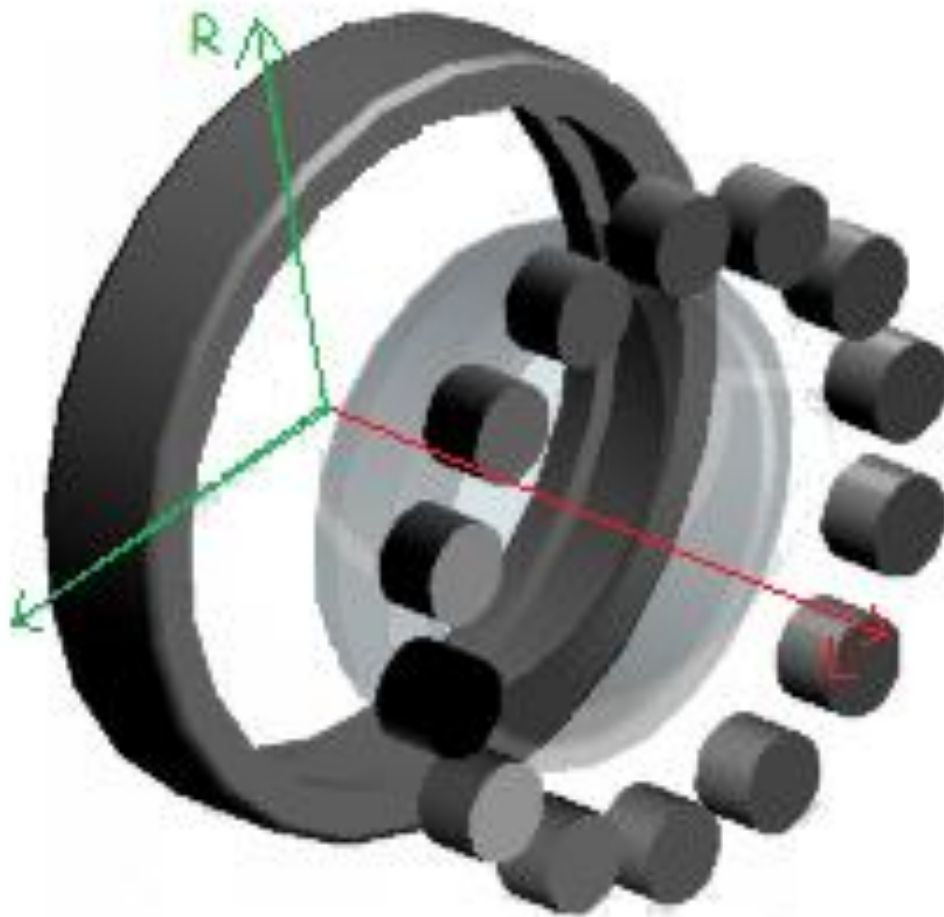
Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις οι οποίες συνδέουν τις ταχύτητες διάδοσης με ελαστικές σταθερές προχωρούμε στον υπολογισμό τους.

$$E = 4\rho C_t^2 \cdot \frac{\frac{3}{4} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} = \rho C_t^2 \cdot \frac{3C_l^2 - 4C_t^2}{C_l^2 - C_t^2} = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \cdot \rho C_l^2 \quad (I)$$

$$G = \rho C_t^2 \quad (II)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{1 - \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2} = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 2C_t^2} \quad (III)$$

Προτού προβούμε σε οποιαδήποτε μέτρηση, εξαιτίας του ότι όλα τα έρδανα ήταν μεταχειρισμένα, απαιτείτο διεξοδικός καθαρισμός από γράσα, σκουριές και διαφόρων είδους άλλων ακαθαρσιών. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν δύο κεφαλές καθέτου δέσμης οι οποίες η μία εξέπεμπε διαμήκη κύματα και η άλλη εγκάρσια. Οι συχνότητες λειτουργίας ήταν 4 MHz και 2 MHz αντίστοιχα. Το στρώμα του υλικού σύζευξης για την κεφαλή διαμήκων κυμάτων είναι ένα ειδικό λάδι ενώ για την κεφαλή εγκαρσίων κυμάτων χρησιμοποιήσαμε μέλι.



Στη συνέχεια με την βοήθεια ενός μηχανικού παχύμετρου μετρήθηκαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου ξεχωριστά. Σημειώνεται ότι εφεξής όταν μιλάμε για τα δοκίμια αναφερόμαστε μόνο για εσωτερικό ή εξωτερικό δακτύλιο και όχι για τους κυλίνδρους μεταξύ τους. Λόγω κυλινδρικής συμμετρίας ορίζουμε τους άξονες R και L ενώ σαν ΔR το πάχος του δακτυλίου και σαν ΔL το μήκος αυτού.

Δοκίμιο 1 Nu 228

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 14.5 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 42 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 14 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 41 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 15 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 6131 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3142 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6064 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3102 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 6098 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3122 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 204 \text{ GPa}$$

$$G = 77 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,32$$

Δοκίμιο 2 Nu 222

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 7.9 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 64 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 9 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 63 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 8 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 62 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 5196 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3209 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6014 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3355 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 5605 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3282 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 211 \text{ GPa}$$

$$G = 85 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,24$$

Δοκίμιο 3 Nu 314

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 11.7 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 35 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 12 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 34 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 11 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 36 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 5772 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3457 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6094 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3160 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 5993 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3309 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 220 \text{ GPa}$$

$$G = 86 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,27$$

Δοκίμιο 4 Nu 318

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 20 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 62 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 21 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 61 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 21 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 63 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 5638 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3095 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6017 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3198 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 5828 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3147 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 202 \text{ GPa}$$

$$G = 78 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,29$$

Δοκίμιο 5 Nu 230

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 16 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 45 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 1.6 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 17 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 47 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 5741 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3152 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6055 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3112 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 5898 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3132 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 202 \text{ GPa}$$

$$G = 77 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,30$$

Δοκίμιο 6 Nu 230 C3

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 16 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 45 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 16 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 17 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 6741 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3152 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6055 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3324 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 6398 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3238 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 220 \text{ GPa}$$

$$G = 83 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,33$$

Δοκίμιο 7 Nu 318

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 10.7 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 43 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 42 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 6334 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3478 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6061 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3176 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 6198 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3327 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 227 \text{ GPa}$$

$$G = 87 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,30$$

Δοκίμιο 8 Nu 328

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 10.7 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 43 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 42 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 10 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 6334 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3478 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6061 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3176 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 6198 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3327 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 227 \text{ GPa}$$

$$G = 87 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,30$$

Δοκίμιο 9 Nu 230

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

$$\Delta R = 16.5 \text{ mm}$$

$$\Delta L = 45 \text{ mm}$$

Μετρήσεις διαμήκων κυμάτων

$$d_{gl}^{(R)} = 16 \text{ mm}$$

$$d_{gl}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Μετρήσεις εγκάρσιων κυμάτων

$$d_{gt}^{(R)} = 16 \text{ mm}$$

$$d_{gt}^{(L)} = 44 \text{ mm}$$

Τελικά προκύπτει ότι οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε άξονα ισούνται με

$$C_l^{(R)} = 6105 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(R)} = 3352 \text{ m/sec}$$

$$C_l^{(L)} = 6055 \text{ m/sec}$$

$$C_t^{(L)} = 3324 \text{ m/sec}$$

Κάνοντας την παραδοχή ότι ο χάλυβας είναι ομογενές και ισότροπο υλικό θα πάρουμε τον μέσο όρο των ταχυτήτων από τις οποίες θα προκύψει.

$$C_l = 6080 \text{ m/sec}$$

$$C_t = 3338 \text{ m/sec}$$

Άρα τελικά οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου 1 ισούνται με

$$E = 226 \text{ GPa}$$

$$G = 88 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,28$$

Συνοπτικά φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα										
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Άξονας R										
	C_i[m/s]	6131	5196	5772	5638	5741	6741	6334	6334	6105
	C_i[m/s]	3142	3209	3457	3095	3152	3152	3478	3478	3352
	E[Gpa]	206	194	230	194	202	214	245	245	228
	G[Gpa]	78	81	94	76	78	78	96	96	89
	v	0,32	0,19	0,22	0,28	0,28	0,36	0,28	0,28	0,28
	Άξονας L									
C_i[m/s]	6064	6014	6094	6017	6055	6055	6061	6061	6055	
C_i[m/s]	3102	3355	3160	3198	3112	3324	3176	3176	3324	
E[Gpa]	201	227	208	211	202	224	209	209	224	
G[Gpa]	76	89	79	81	77	87	80	80	87	
v	0,32	0,27	0,32	0,30	0,32	0,28	0,31	0,31	0,28	
Ολικό										
C_i[m/s]	6098	5605	5993	5828	5898	6398	6198	6198	6080	
C_i[m/s]	3122	3282	3309	3147	3132	3238	3327	3327	3338	
E[Gpa]	204	211	220	202	202	220	227	227	226	
G[Gpa]	77	85	86	78	77	83	87	87	88	
v	0,32	0,24	0,27	0,29	0,30	0,33	0,30	0,30	0,28	

Σκληρομέτρηση

Στη συνέχεια κάνοντας χρήση του υπερηχητικού σκληρόμετρου του εργαστηρίου MIC-2 της Krautkramer το οποίο και περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο θα υπολογίσουμε την σκληρότητα των δοκιμίων. Παρόλο τον καθαρισμό που έγινε στα δοκίμια υπήρχαν περιοχές ελαφρώς οξειδωμένες, θερμικά επηρεασμένες περιοχές, όπως επίσης και μικροφθορές και ακαθαρσίες πολύ μικρού βαθμού τις οποίες απομονώσαμε και επισημαίνουμε στις μετρήσεις σαν υπόμνημα. Περιμετρικά των δοκιμίων σε διάφορα σημεία του πήραμε τις τιμές της σκληρότητας.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΑΤΕΛΕΙΩΝ	
	σκωρία
	ΘΕΠ
	ακαθαρσία
	φθορές

Δοκίμιο 1 Nu 228

Δοκίμιο 1- NU 228	
R-άξονας	
751	687
736	697
723	661
665	629
732	561
693	649
718	680
706	
856	
717	
772	
742	
734	652

Δοκίμιο 2 Νυ 222

Δοκίμιο 2- NU 222	
R-άξονας	L-άξονας
735	737
728	494
732	453
709	489
701	498
696	487
688	
668	
280	
386	
490	
425	
404	
493	
581	526
565	
445	

Δοκίμιο 3 Νυ 314

Δοκίμιο 3- NU 314	
R-άξονας	L-άξονας
675	644
657	667
695	690
675	548
700	653
659	678
704	690
698	
709	
686	653
671	

Δοκίμιο 4 Νu 318

Δοκίμιο 4- NU 318	
R-άξονας	L-άξονας
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	
668	685
675	

Δοκίμιο 5 Νu 230C3

Δοκίμιο 5- NU 230C3	
R-άξονας	L-άξονας
701	509
669	659
672	716
716	717
668	722
701	749
668	727
793	721
742	703
	695
	675
703	690
696	

Δοκίμιο 6 Νυ 230

Δοκίμιο 6- NU 230	
R-άξονας	L-άξονας
720	670
697	683
693	718
687	649
708	701
711	695
718	676
392	560
381	520
416	583
371	
448	
579	646
609	
459	

Δοκίμιο 7 Νυ 318

Δοκίμιο 7- NU 318	
R-άξονας	L-άξονας
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	
734	734
734	
664	

Δοκίμιο 8 Νu 328

Δοκίμιο 8- NU 328	
R-άξονας	L-άξονας
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	
639	738
687	
558	

Δοκίμιο 9 Nu 230

Δοκίμιο 9- NU 230	
R-άξονας	L-άξονας
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	
708	730
719	

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

#	Σκληρότητα δοκιμίων [HV]	Σκληρότητα περιοχών άνευ ελαττωμάτων [HV]	Σκληρότητα περιοχών με ελαττώματα [HV]	Ποσοστιαία μεταβολή λόγω ελαττωμάτων	Ποσοστιαία μεταβολή σκληρότητας
1	704	734	652	-11%	-13%
2	565	710	445	-37%	-30%
3	671	680	548	-19%	-17%
4	675	-	-	-	-17%
5	696	688	768	12%	-14%
6	609	695	459	-34%	-25%
7	734	743	664	-11%	-9%
8	687	731	549	-25%	-15%
9	719	-	-	-	-11%
ΜΟ	673	712	583	-18%	-17%

Από τα αποτελέσματα που εξάγαμε φαίνεται καταρχάς πως σε ένα έδρανο το οποίο έχει καταπονηθεί μειώνεται η σκληρότητά του. Πιο συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε ένα έδρανο το οποίο λειτουργεί σε ιδανικές συνθήκες κατά τις οποίες δεν συντελούνται χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε οξείδωσή του και δεν επηρεάζονται περιοχές του λόγω θερμικής καταπόνησης και ως εκ τούτου η μοναδική καταπόνηση που δέχεται είναι λόγω κόπωσης τότε παρατηρούμε μείωση στην σκληρότητα κατά μέσο όρο 12% με απόκλιση τεσσάρων ποσοστιαίων μονάδων. Αν όμως συνυπολογίσουμε και τις παραμέτρους των χημικών αντιδράσεων και της θερμότητας τότε παρατηρούμε μια περαιτέρω μείωση κατά μέσο όρο 18%. Έτσι τελικά η σκληρότητα μειώνεται κατά μέσο όρο 17% έχοντας ένα εύρος τιμών από 9% έως και 30%.

Εσωτερική μηχανική φθορά

Η εσωτερική μηχανική φθορά D είναι ένα μέγεθος το οποίο όπως αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο συνδέεται με την έννοια της καταπόνησης. Ορίζεται ως η ιδιότητα εκείνη κατά την οποία η αντοχή των υλικών μειώνεται μέχρι την αστοχία.

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός της παραμέτρου D απαιτείται η ταυτόχρονη εξέταση ενός παρθένου και ενός καταπονημένου δοκιμίου. Οι μετρήσεις λοιπόν έγιναν στις αποθήκες της εταιρίας πώλησης εδράνων κύλισης ΔΟΝΟΥΠΟΓΛΟΥ ΠΑΝΤΕΛΗΣ Κ ΑΕ στον Πειραιά όπου μας δόθηκε η δυνατότητα να προμηθευτούμε καινούργια και ίδιου τύπου έδρανα κύλισης με αυτά των δοκιμίων μας. Έτσι λοιπόν με την κεφαλή διαμήκων κυμάτων εκτελούμε μετρήσεις περιμετρικά των δοκιμίων. Χρησιμοποιώντας την σχέση $D = 1 - \frac{H_2}{H_1}$ στην οποία έχουμε αναφερθεί στο κεφάλαιο 5 προχωράμε στον υπολογισμό της εσωτερικής φθοράς.



Εικόνα 57: Πείραμα προσδιορισμού της εσωτερικής μηχανικής φθοράς. Αριστερά βρίσκεται το παρθένο δοκίμιο και δεξιά το καταπονημένο.

NU 314

Άξονας L		Άξονας R	
NEO	ΠΑΛΑΙΟ	NEO	ΠΑΛΑΙΟ
Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς	Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς
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
3,6%		17,8%	

NU 318

Άξονας L		Άξονας R	
NEO	ΠΑΛΑΙΟ	NEO	ΠΑΛΑΙΟ
Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς	Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς
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
4,9%		2,6%	

NU 230 (2 έδρανα)

Άξονας L			Άξονας R		
NEO	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ	NEO	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ
Ύψος H1 1 ^{ης} ηχούς	Ύψος H2 1 ^{ης} ηχούς	Ύψος H2 1 ^{ης} ηχούς	Ύψος H1 1 ^{ης} ηχούς	Ύψος H2 1 ^{ης} ηχούς	Ύψος H2 1 ^{ης} ηχούς
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
8,3%		9,7%		13,7%	
17,9%					

NU 228 (2 έδρανα)

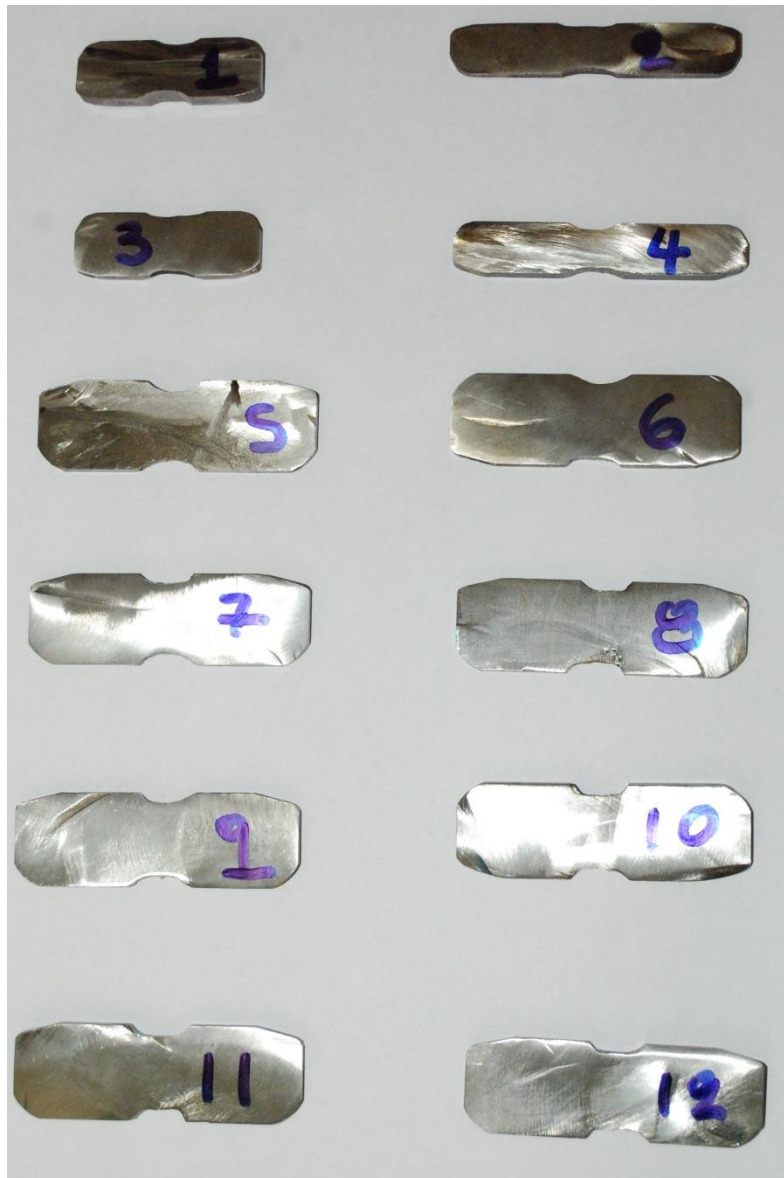
Άξονας L			Άξονας R		
NEO	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ	NEO	ΠΑΛΑΙΟ	ΠΑΛΑΙΟ
Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς	Ύψος H1 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς	Ύψος H2 1ης ηχούς
5,7	4,3	4,9	5,9	4,8	4,3
6,0	4,6	4,7	5,2	5,2	4,9
5,6	4,7	4,9	5,5	4,7	4,6
5,9	4,5	4,8	5,8	4,8	4,5
5,9	4,6	4,7	5,5	4,9	4,7
5,8	4,5	4,8	5,6	4,9	4,6
22,0%		17,5%		12,7%	
17,6%					

NU 328

Άξονας L		Άξονας R	
NEO	ΠΑΛΑΙΟ	NEO	ΠΑΛΑΙΟ
Ύψος Η1 1ης ηχούς	Ύψος Η2 1ης ηχούς	Ύψος Η1 1ης ηχούς	Ύψος Η2 1ης ηχούς
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	6,0	5,6	6,6
6,4	6,3	5,6	6,1
5,8	6,0	5,8	6,0
6,5	6,2	5,8	6,0
7,0	6,1	5,6	5,7
6,0	6,1		
6,4	6,0		
6,4	6,1	5,7	6,1
4,7%		6,4%	

Ραδιογραφική επιθεώρηση

Από τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήσαμε στις προηγούμενες μετρήσεις μας κρίθηκε σκόπιμο να προχωρήσουμε σε μια προσπάθεια υπολογισμού, με καταστρεπτικές πλέον μεθόδους, τις ελαστικές τους σταθερές και να τις συγκρίνουμε με εκείνες που λάβαμε από την υπερηχητική μέθοδο. Για τον σκοπό αυτό απομονώσαμε δοκίμια πάχους 4mm από τα έδρανα. Τα δοκίμια κόπηκαν σε εξωτερικό μηχανουργείο ενώ η τελική τους διαμόρφωση έγινε με χρήση ρεκτιφιέ στους χώρους του κτιρίου Αντοχής Υλικών.



Εικόνα 58: Δοκίμια εφελκυσμού

Τα συγκεκριμένα δοκίμια προέρχονται από καταπονημένα έδρανα και μπορεί να κρύβουν στο εσωτερικό του ατέλειες και μικρορωγμές. Κάτι τέτοιο προφανώς θα επηρέαζε τα αποτελέσματα και την αξιοπιστία ενός πειράματος εφελκυσμού καθώς και την αξιοπιστία της μεθόδου των υπερήχων. Για την ανίχνευση τέτοιων πιθανών ατελειών χρησιμοποιήσαμε την μη καταστροφική μέθοδο της ραδιογραφίας. Με αυτή την μέθοδο θα έχουμε μια πλήρη εικόνα του εσωτερικού.

Στις εγκαταστάσεις Βιομηχανικής Ραδιογραφίας στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας στην σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του επίκουρου καθηγητή Πετρόπουλου Νικόλαου έγιναν οι ραδιογραφήσεις των δοκιμίων.

Για την ραδιογράφιση των δοκιμίων έγινε χρήση μηχανής παραγωγής ακτίνων X της εταιρείας General Electric Inspections και πιο συγκεκριμένα του μοντέλου ERESKO 42MF3.1. Η εξοπλισμός απαρτίζεται από την συσκευή ελέγχου [εικ.59] από την οποία εισάγονται όλες οι επιμέρους ρυθμίσεις και την γεννήτρια παραγωγής ακτίνων X[εικ.60] από την οποία προφανώς εκπέμπονται ακτίνες X. Οι δύο συσκευές βρίσκονται σε δύο διαφορετικούς χώρους για την αποφυγή κάποιου ατυχήματος.

Ολόκληρη η διάταξη είναι συνδεδεμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε περίπτωση όπου ανοίξει ή δεν έχει κλείσει σωστά η πόρτα του δωματίου στο οποίο βρίσκεται η γεννήτρια ακτίνων X να αποκλειστεί εντελώς η λειτουργία της γεννήτριας. Στην περίπτωση ενός τέτοιου σφάλματος ο χειριστής μόλις πατήσει το κομβίο έναρξης ραδιογράφισης εκπέμπεται ένας συνεχής προειδοποιητικός ήχος. Για την λειτουργία της όλης διάταξης απαιτείται πιστοποιημένο, και μόνο, προσωπικό πάνω στην μέθοδο της ραδιογραφίας, για να μειωθούν οι κίνδυνοι ατυχήματος και να διασφαλιστεί η ποιότητα των παραγόμενων ραδιογραφιών.

Για την λειτουργία της διάταξης απαιτείται ένα κλειδί. Με το συγκεκριμένο κλειδί την γυρίζουμε από την κατάσταση αναμονής στην κατάσταση «ON». Σε περίπτωση που απαιτείται περεταίρω θέρμανση

λειτουργούμε ένα πρόγραμμα 'warm up' το οποίο δίνει στην συσκευή την απαιτούμενη τάση. Από την συσκευή ελέγχου μπορούμε να μεταβάλουμε τις εξής μεταβλητές

- Χρόνο έκθεσης
- Εισαγωγή kV
- Εισαγωγή mA

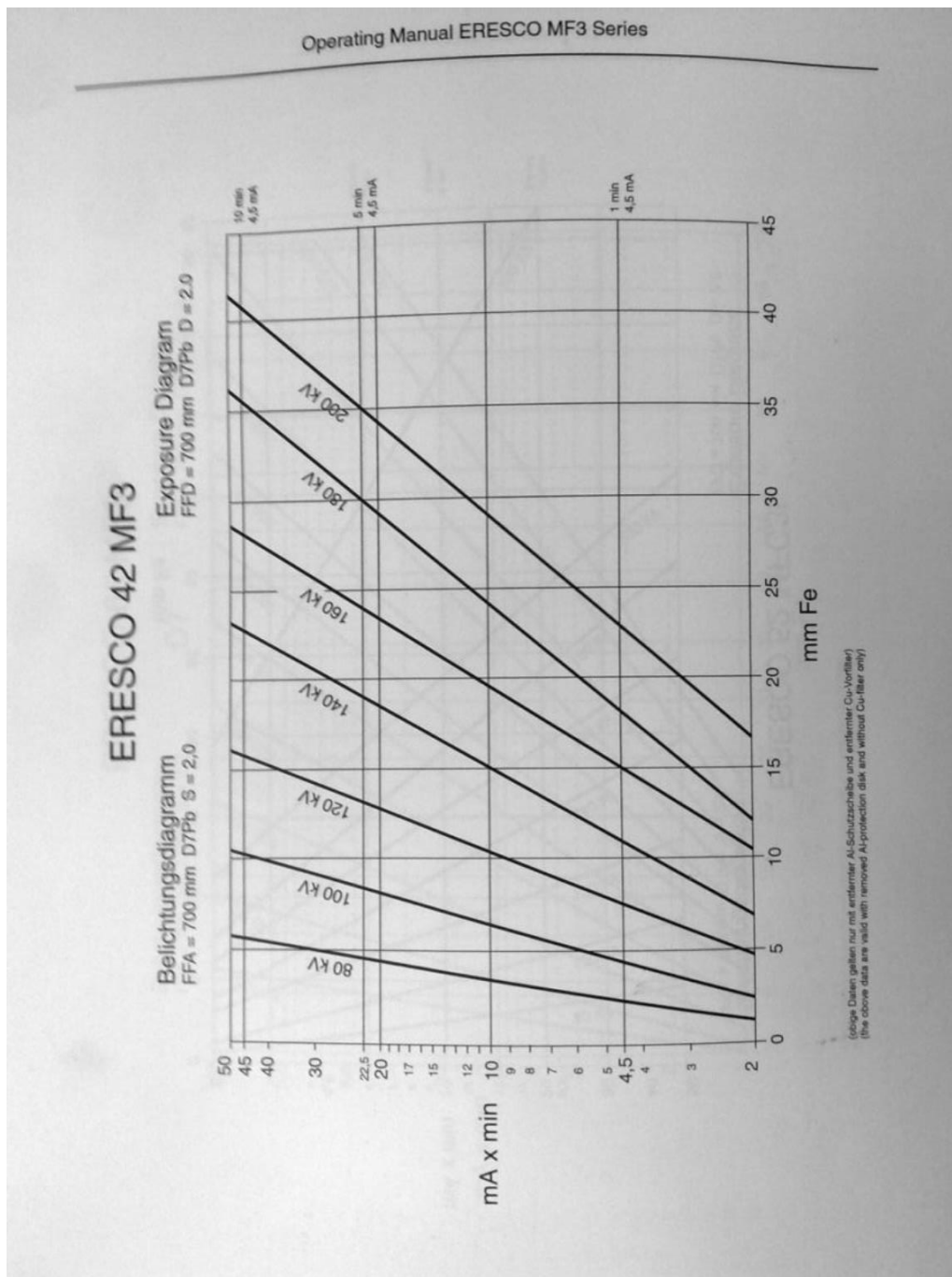


Εικόνα 59: Συσκευή ελέγχου

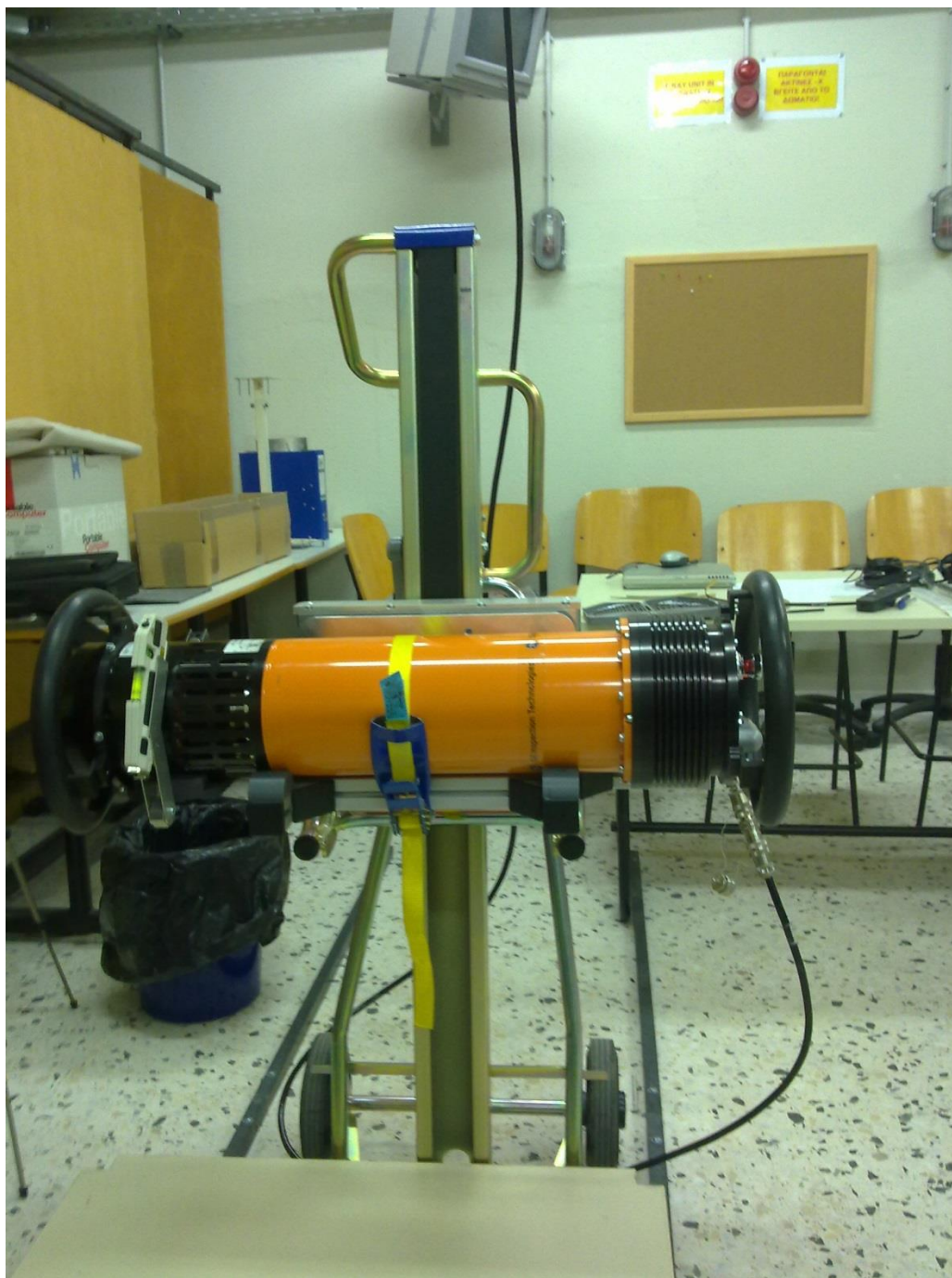
Από το διάγραμμα έκθεσης του εγχειρίδιου χρήσης της συσκευής [εικ.60] για την ποιοτική λήψη ραδιογραφίας των δοκιμίων πάχους 4mm η απαιτούμενη ένταση ακτινοβολίας είναι 100kV και τα απαιτούμενα mA είναι 3.5 mA·min. Στην περίπτωση χρήσης υψηλότερων kV θα υπήρχε μεγάλη αμαύρωση και μικρή ευκρίνεια και αντίθεση στο φιλμ ενώ στην περίπτωση χαμηλότερων kV θα είχαμε χαμηλή αμαύρωση, μέτρια ευκρίνεια και μικρή αντίθεση. Αντίστοιχα σε υψηλότερη τιμή των mA·min οδηγούμαστε σε αυξημένη αμαύρωση και χαμηλή

αντίθεση και ευκρίνεια. Αντίθετα μειωμένη έκθεση mA·min οδηγεί σε χαμηλή αμαύρωση και μέτρια ευκρίνεια και αντίθεση.

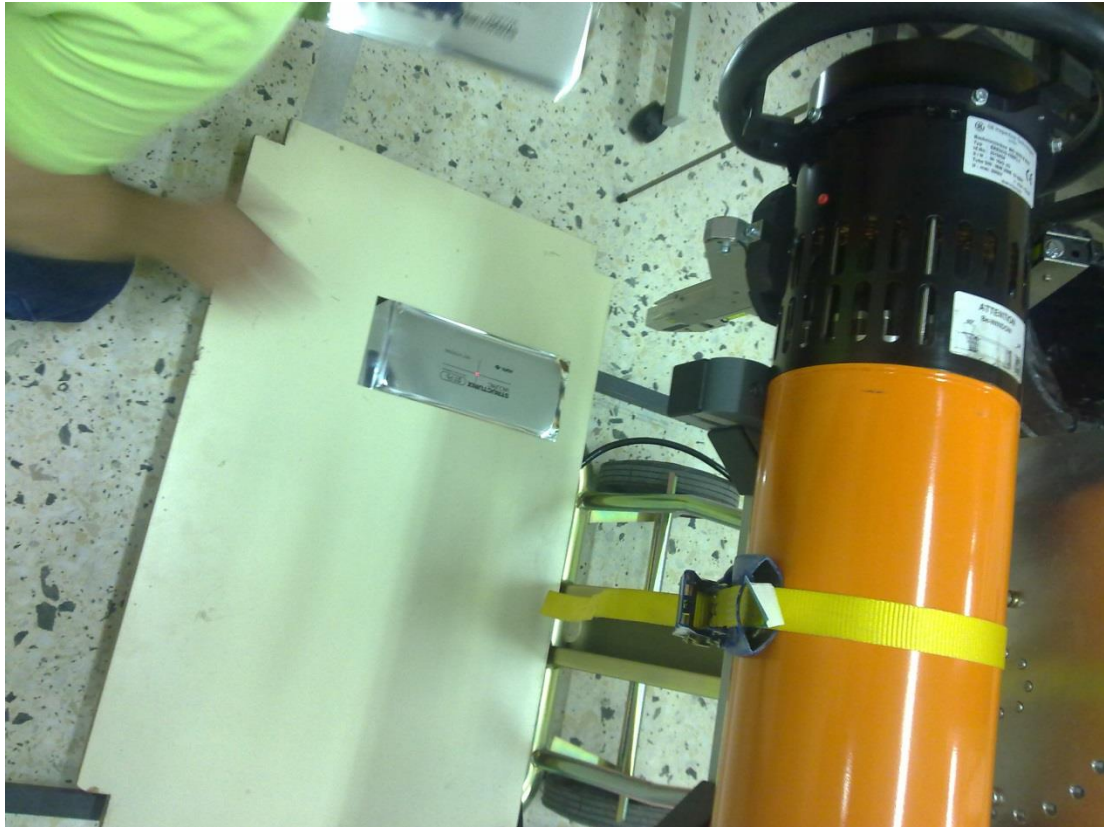
Τέλος για την λήψη της ραδιογραφίας μετά την ρύθμιση των απαιτούμενων παραμέτρων και αφού πρώτα τοποθετήσουμε τα δοκίμια και το φιλμ μπροστά από την πηγή ακτίνων X πατάμε το κομβίο START



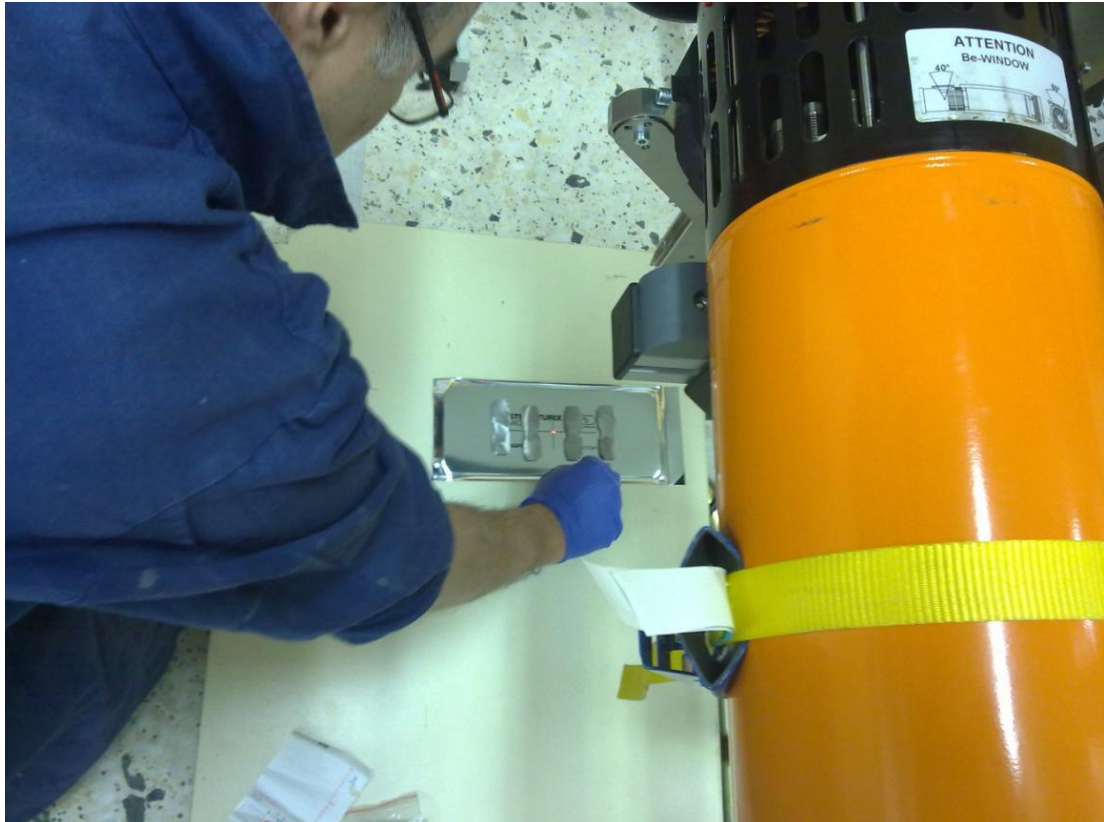
Εικόνα 60: Διάγραμμα έκθεσης



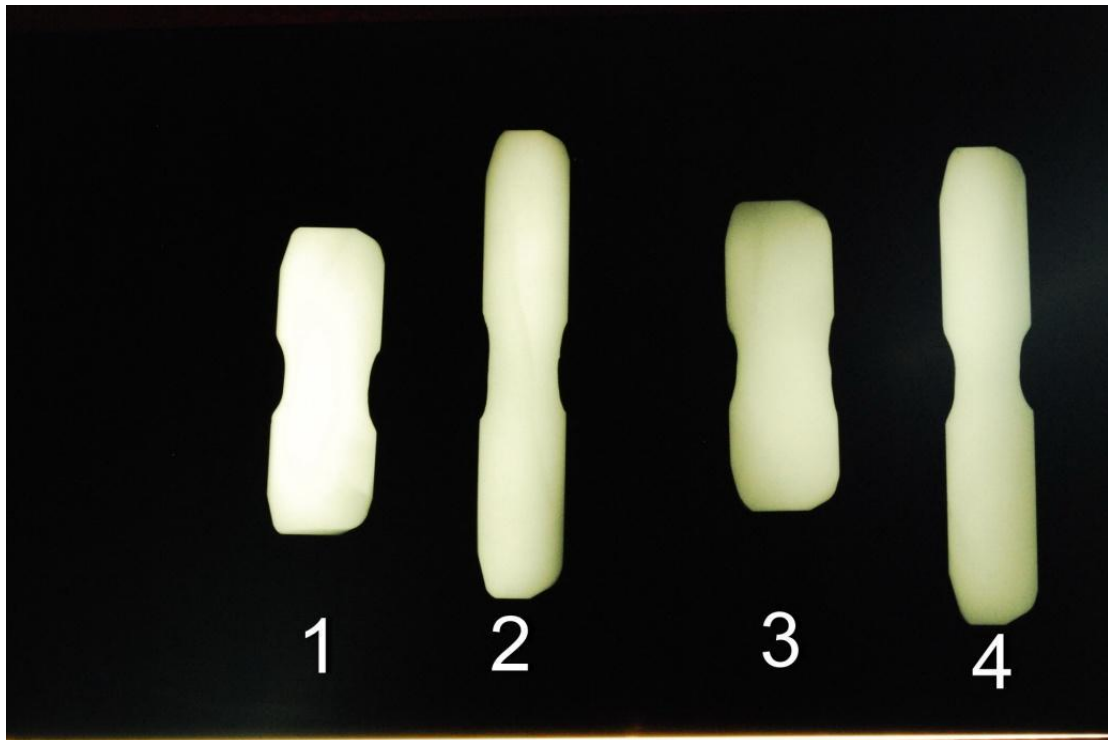
Εικόνα 61: Η πηγή παραγωγής ακτίνων X



Εικόνες 62&63: Τοποθέτηση του φιλμ και των δοκιμίων επάνω σε αυτό



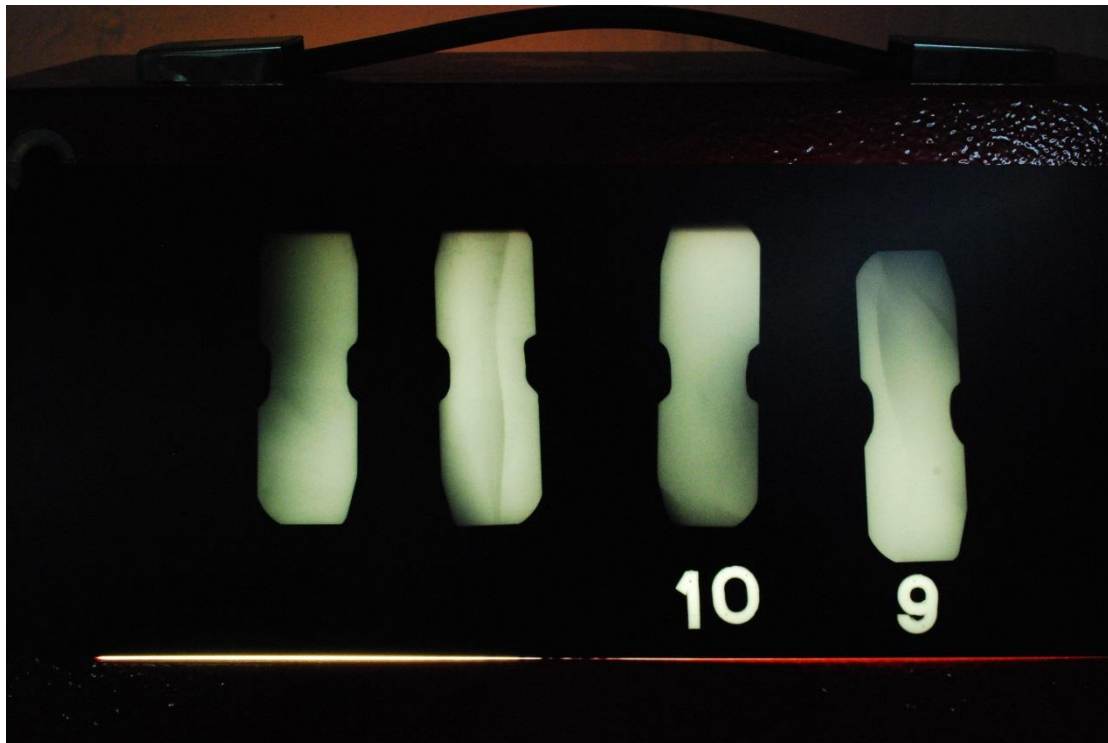
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα φιλμ ραδιογραφίας. Από την επιθεώρησή τους φαίνεται ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει καμία εσωτερική ατέλεια και φθορά.



Εικόνα 64: Ραδιογραφία δοκιμίων 1-4



Εικόνα 65: Ραδιογραφία δοκιμίων 5-8



Εικόνα 66: Ραδιογραφία δοκιμίων 9-12

Κάποιες γραμμές που παρατηρούνται στα δοκίμια 5, 9 και 10 είναι επιφανειακά σημάδια τα οποία προκλήθηκαν από την διαδικασία της κοπής και δεν είναι ένδειξη εσωτερική ατέλειας.

Πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού

Για το πείραμα του εφελκυσμού συναντήθηκαν πολλά προβλήματα εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους των δοκιμίων κυρίως με την στήριξή τους στις αρπάγες. Για τον λόγο αυτό μόνο τα δοκίμια 2 και 6 έδωσαν αξιόπιστα αποτελέσματα. Από τα υπόλοιπα είτε δεν μπόρεσε να εκτελεσθεί σωστά το πείραμα (υπήρξαν δοκίμια τα οποία έσπασαν σε σημεία εντός της αρπάγης) είτε η διαμόρφωση από το μηχανουργείο δεν ήταν αποδεκτή.

Τελικά από τα 2 δοκίμια τα οποία εφελκύσαμε με επιτυχία βγάλαμε τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας , του λογού Poisson , την αντοχή σε θραύση και το όριο διαρροής.

Τα μέτρα ελαστικότητας που βρέθηκαν για τα δύο δοκίμια είναι 223 GPa. Συγκρίνοντάς τα με εκείνα που υπολογίσαμε με την μέθοδο των υπερήχων

παρατηρούμε μια ιδιαίτερα ικανοποιητική προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα υπολογίσαμε για το δοκίμιο 2 ότι έχει μέτρο ελαστικότητας $E_{u2}=211\text{GPa}$ και για το δοκίμιο 6 βρήκαμε $E_{u6}=220\text{GPa}$. Προσέγγιση δηλαδή 5,4% και 1,3% αντίστοιχα. Αν όμως υπολογίσουμε εκ νέου το μέτρο ελαστικότητας με την διαφορά ότι αυτή την φορά αγνοήσουμε τις ταχύτητες κατά τον άξονα R και λάβουμε υπ' όψιν μας μόνο τις ταχύτητες διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων κατά τον άξονα L τότε θα παρατηρήσουμε ότι οι τιμές σχεδόν ταυτίζονται. Πιο συγκεκριμένα για το δοκίμιο 2 προκύπτει $E_{u2}=227\text{GPa}$ και $E_{u6}=224\text{GPa}$ απόκλιση δηλαδή 1.8% και 0,4% αντίστοιχα.

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.





Βιβλιογραφία

ΠΡΑΚΤΙΚΑ 2ου ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΕΛΕΜΚΕ με θέμα: Διασφάλιση της ποιότητας υλικών και κατασκευών με μη καταστροφικούς ελέγχους. (2000). ΑΘΗΝΑ: ΕΛΕΜΚΕ.

Aastroem, T. (2008). From Fifteen to Two Hundred NDT- methods in Fifty Years. *17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China*. Helsinki, Finland: Pohjola Insurance Ltd.

Aastroem, T. (n.d.). *ONE HUNDRED AND ONE NDT-AND MACHINE DIAGNOSTIC METHODS FOR THE PREVENTION OF LOSSES IN CRITICAL MACHINERY*. Helsinki, Finland: Pohjola Non-Life Insurance Company Ltd.

Alves, M. (2000). On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics. *Pergamon*, 703-712.

Berke, M. (n.d.). *Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles*. Krautkramer.

Industrial Radiography Image Forming Techniques. (n.d.). GE Inspection Technologies.

Karpenda, J. P. (2012). Διπλωματική εργασία: Διερεύνηση αξιοπιστίας του μετασχηματισμού Hilbert Huang ως εργαλείο ανίχνευσης βλαβών σε μηχανολογικές διατάξεις.

Krautkramer. (n.d.). *Nondestructive Material Testing Introduction to the Basic Principles*.

Marder, A. (n.d.). Replication Microscopy Techniques for NDE. *ASM Handbook, Volume 17:Nondestructive Evaluation and Quality Control*, 52-56.

Prassianakis, I. N. (1994). An experimental approach to damage evaluation using ultrasounds. *European journal of NDT*.

- Αθανάσιος, Κ. Α.-Κ. (2010). Διπλωματική εργασία: Ανίχνευση βλαβών σε ένσφαιρα έδρανα κύλισης με την μέθοδο μετασχηματισμού κυματιδίου.
- Καίρης, Σ. (2009). Διπλωματική εργασία: Η εφαρμογή της ραδιογραφίας για τον μη καταστροφικό έλεγχο συγκολλητών συνδέσεων στην βιομηχανία: εξέταση των μεταβλητών της μεθόδου και πειραματική επαλήθευση.
- Κορωνάιος Αιμ., Γ.Φοίβος Σαργέντης. (2003). *Θερμογραφία*. Αθήνα: Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών Ε.Μ.Π.
- Μπαρτζώκας, Δ. (2004). *Εισαγωγή στη μηχανική των σεισμών*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Παπαδόπουλος, Γ. (2007). *Πειραματική μηχανική των θραύσεων: Οπτικές μέθοδοι ανάλυσης των τάσεων*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.
- Πρασιανάκης, Ι. Ν. (1993). *Μη καταστροφικοί έλεγχοι-Η μέθοδος των υπερήχων*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Πρασιανάκης, Ι. Ν. (2000). Εναρκτήρια Ομιλία Του Προέδρου της ΕΛΕΜΚΕ. *2ο Εθνικό Συνέδριο ΕΛΕΜΚΕ με θέμα: Διασφάλιση της ποιότητας υλικών και κατασκευών με με καταστροφικούς ελέγχους*.
- Πρασιανάκης, Ι. Ν. (2001). Εναρκτήρια Ομιλία Του Προέδρου της ΕΛΕΜΚΕ. *3ο Εθνικό Συνέδριο ΕΛΕΜΚΕ με θέμα: Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι - Εμπειρίες, Εφαρμογές, Καινοτομίες*.
- Πρασιανάκης, Ι. Ν. (2002). *Μη καταστροφικοί έλεγχοι-Η μέθοδος των υπερήχων*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Φλέντζερης, Κ. (2011). *Ποιότητα Μεταλλουργικών Συγκολλήσεων & οι Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι*. Αθήνα.
- Χαϊδεμενόπουλος, Γ. (2010). *Εισαγωγή στις συγκολλήσεις*. Τζιόλα.
- Χειλαδάκη, Σ. (2011). Διπλωματική Μεταπτυχιακή εργασία: Μέθοδοι Φασματοσκοπίας Μη γραμμικού Ελαστικού Κύματος(NEWS) στα πλαίσια του Μη Καταστροφικού Ελέγχου.

Διαδικτυακές πηγές

<http://www.envirocoustics.gr>

<http://www.acutech.gr>

<http://el.m.wikipedia.org/wiki/>

http://www.ndt-ed.org/index_flash.htm

<http://www.ndt.org>

<http://www.ndt.net>

Φωτογραφικό υλικό

Προσωπικό αρχείο

Διπλωματική Εργασία: Καυστικές σε σφήνες για τον πειραματικό προσδιορισμό κατακόρυφου και πλάγιου φορτίου, Παπουτσή Γεώργιος

"The Supersonic Reflectoscope, an Instrument for Inspecting the Interior of Solid Parts by Means of Sound Waves" in The Journal of the Acoustical Society of America -- January 1946.

<http://www.envirocoustics.gr>

<http://www.olympus-ims.com>

<http://www.beodom.com>

<http://www.mr-chemie.de/>

<http://el.wikipedia.org>

<http://www.uq.edu.au>

<http://www.tms.org/>