



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»

ΤΙΤΛΟΣ

ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ

DISTANCE CONTROL OF PUMPS AND WELDINGS WITH THE

METHOD OF ULTRASOUND

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:

Μαρούγκας Ιωάννης

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

Δρ. Τσουκαλάς Βασίλειος

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Οκτώβριος 2018



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



ΤΙΤΛΟΣ

ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Μαρούγκας Ιωάννης

**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του
Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη
Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών
Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών
Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



«Αφιερωμένο στην Οικογένεια μου»



Contents

Περίληψη.....	6 -
Abstract.....	6 -
Ευχαριστίες	7 -
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8 -
ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	9 -
1.1 Εισαγωγή.....	9 -
1.2 Μέθοδοι ελέγχου	10 -
1.3 Πεδία Εφαρμογής.....	12 -
1.4 Χρόνος διεξαγωγής ελέγχου.....	13 -
1.5 Ποσοστά ελέγχου.....	14 -
1.6 Συγκριτική παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων	14 -
1.7 Δυνατότητες	14 -
1.8 Γνωμάτευση	18 -
1.9 Επάρκεια Ελεγκτή.....	20 -
1.10 Ταχύτητα Διεξαγωγής Ελέγχου.....	21 -
1.11 Κόστος Ελέγχου	22 -
1.12 Συμπεράσματα των δυο κυριότερων μεθόδων.....	23 -
ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΜΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	25 -
2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Ήχου	25 -
2.1.1 Συχνότητα, ταχύτητα ήχου και μήκος κύματος.....	25 -
2.2 Υπέρηχος.....	28 -
2.3 Αρχές διάδοσης κύματος.....	30 -
2.3.1 Τύποι ταλάντωσης	30 -
2.3.2 Ακουστική αντίσταση.....	33 -
2.3.3 Διάθλαση και μετατροπή μορφής κύματος	35 -



2.3.4	Ακτινοβολία ήχου μέσα στην ύλη.....	- 38 -
2.4	Δημιουργία Υπερηχητικών Κυμάτων	- 44 -
2.4.1	Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο.....	- 45 -
2.4.2	Κατασκευή του φορητού ακροδέκτη	- 47 -
2.4.3	Χαρακτηριστικά των ακροδεκτών	- 48 -
2.4.4	Συντήρηση και έλεγχος των ακροδεκτών	- 50 -
2.5	Συσκευή Υπερήχων	- 52 -
2.5.1	Αρχή λειτουργίας συσκευής υπερήχων	- 52 -
2.5.2	Ενισχυτής.....	- 55 -
2.5.3	Αναπαράσταση σάρωσης τύπου Β	- 56 -
2.5.4	Αναπαράσταση σάρωσης τύπου C	- 57 -
2.5.5	Λειτουργία της συσκευής ανίχνευσης	- 58 -
2.5.6	Μηχανισμός ελέγχου	- 59 -
2.6	Μέθοδοι ελέγχου με υπέρηχους	- 64 -
2.6.1	Έλεγχος με άμεση επαφή.....	- 64 -
2.6.2	Έλεγχος ευθείας ακτίνας	- 64 -
2.6.3	Ειδικές Εφαρμογές	- 73 -
2.6.4	Γωνιακή σάρωση	- 82 -
2.6.5	Κύματα Επιφάνειας και Πλάκας.....	- 102 -
2.6.6	Έλεγχος με ακροδέκτες διπλού κρυστάλλου (τεχνική TR)	- 107 -
2.6.7	Έλεγχος με δύο αντικριστές κεφαλές.....	- 116 -
ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ		- 130 -
3.1	Παχυμετρήσεις με συμβατική μέθοδο (σημειακή).....	- 130 -
3.2	Παχυμετρήσεις με ασύρματη τεχνολογία	- 131 -
3.3	Παράδειγμα Εφαρμογής	- 133 -
3.4	Σύγκριση	- 139 -
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		- 141 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		- 142 -



Περίληψη

Η παχυμέτρηση με υπερήχους είναι η πλέον διαδεδομένη και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αποτίμηση της μείωσης πάχους λόγω διάβρωσης στη βιομηχανία. Στην παρούσα διατριβή γίνεται σύντομη παρουσίαση του μη καταστροφικού ελέγχου, και ιδιαίτερα της τεχνικής ελέγχου με τη μέθοδο των συμβατικών υπερήχων και των σχετικών δυσκολιών που αυτή παρουσιάζει για μετρήσεις σε δυσπρόσιτα σημεία ή σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών. Αναλύεται η μετάβαση από τις απλές σημειακές παχυμετρήσεις στην εφαρμογή και χρήση σύγχρονων, ασύρματων συστημάτων και απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα που η εξ αποστάσεως συνεχής παρακολούθηση εξασφαλίζει.

Λέξεις-Κλειδιά: μη καταστροφικός έλεγχος, παχυμέτρηση, υπέρηχος, μετρήσεις πραγματικού χρόνου

Abstract

Ultrasonic densification is the most widely used and often used method for estimating corrosion reduction in industry. In this dissertation a short presentation of non-destructive testing, especially of the conventional ultrasonic inspection method, and the relative difficulties it presents for inaccessible or high temperature measurements. It analyzes the transition from simple point calculations to the implementation and use of modern, wireless systems and lists the advantages that remote monitoring ensures.

Key words: non-destructive screening, thicknessing, ultrasound, real-time measurements



Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ΠΜΣ « *Νέες Τεχνολογίες στην Ναυτιλία και τις Μεταφορές και ειδικότερα για Μηχανικούς Αυτοματισμού*» του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής του τμήματος Αυτοματισμού και Πανεπιστημίου Αιγαίου. Αισθάνομαι ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη και χαρά και θα ήθελα να μοιραστώ αυτή την ιδιαίτερη στιγμή με ανθρώπους που συνέβαλαν καταλυτικά στην επιτυχία μου αυτή Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή **Δρ. Β. Τσουκαλά** για την επιλογή του τίτλου της πτυχιακής μου εργασίας καθώς σχετιζόταν άμεσα με το αντικείμενο επαγγελματικής ενασχόληση μου, όπως επίσης και για την αμέριστη βοήθεια που μου πρόσφερε. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διευθυντή του Μεταπτυχιακού και Προϊστάμενο του τμήματος **Δρ. Κ. Αλαφοδήμο** και τον **Δρ. Ν. Νικητάκο** για την βοήθεια που μου έδωσαν επίσης για την υλοποίηση της εργασίας. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για τη διαχρονική τους συμπαράσταση και για την ηθική στήριξη των επιλογών μου στο μεγάλο ταξίδι αυτό της εκπαίδευσής μου.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παχυμέτρηση με υπερήχους είναι η πλέον διαδεδομένη και συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αποτίμηση της μείωσης πάχους λόγω της ύπαρξης της διάβρωσης στη βιομηχανία.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή στοχεύει στον έλεγχο των συγκολλήσεων με την μέθοδο των υπερήχων (μη καταστρεπτικός έλεγχος).

Πιο συγκεκριμένα, η διάρθρωση της διατριβής αφορά τρεις βασικές ενότητες:

- α) Στην πρώτη ενότητα γίνεται μια γενική περιγραφή των δυνατοτήτων που παρέχει ο έλεγχος συγκολλήσεων με υπερήχους, με τον ισοδύναμο έλεγχο συγκολλήσεων με ακτινογραφίες. Είναι οι δύο βασικότεροι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι που εφαρμόζονται στις βιομηχανικές διαδικασίες.
- β) Στην δεύτερη ενότητα γίνεται εμβάθυνση στο αντικείμενο του ελέγχου των συγκολλήσεων με υπερήχους (θεωρία) περιγράφοντας από τα βασικά χαρακτηριστικά του ήχου μέχρι το πως ανιχνεύονται τα σφάλματα με την συσκευή υπερήχων (παλμογράφος).
- γ) Στην τρίτη ενότητα παρουσιάζονται οι σημειακές μετρήσεις σε σχέση με την χρήση νέων τεχνολογιών (ασύρματη τεχνολογία μετάδοσης δεδομένων) στη διαδικασία μετρήσεων με αξιοποίηση υπέρηχων.



ΠΡΩΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1 Εισαγωγή

Η απαίτηση όπως μία συγκόλληση παρουσιάζει ορισμένη αντοχή σε δεδομένη καταπόνηση, σημαίνει ότι, πρέπει να εκλεγεί το κατάλληλο υλικό, τα κατάλληλα ηλεκτρόδια και να ακολουθηθεί η ενδεδειγμένη μέθοδος συγκόλλησης.

Η αντοχή όμως της συγκόλλησης δεν εξαρτάται, μόνον από τους παραπάνω παράγοντες, είναι πιθανόν, όπως άλλωστε συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις, να δημιουργηθούν σφάλματα κατά την διάρκεια της εργασίας της συγκολλήσεως, όπως π.χ. πόροι, εγκλείσματα σκουριάς, ατελής σύνδεση κ.λπ. τα οποία εξασθενούν την αντοχή της συγκόλλησης, μάλιστα μερικές φορές σε μεγάλο βαθμό.

Η συγκόλληση δοκιμίων, πριν την έναρξη της κατασκευής ενός έργου, για εκλογή των κατάλληλων συγκολλητών, είναι οπωσδήποτε μία ενδεδειγμένη ενέργεια, αναγκαία για την αποφυγή μελλοντικών δυσάρεστων καταστάσεων. Δεν είναι όμως απαραίτητα και ικανή να εξασφαλίσει την επιθυμητή πορεία των πραγμάτων, γιατί θα μπορούσε ο ίδιος συγκολλητής, εργαζόμενος κατά τον ίδιο τρόπο, να παρουσιάσει ένα άψογο δοκίμιο και στη συνέχεια κακή εργασία στο κυρίως έργο για διάφορους λόγους, όπως κόπωση δυσμενείς συνθήκες εργασίας κ.λπ.

Η αφαίρεση ενός ή περισσοτέρων τεμαχίων (δοκιμίων) από το έργο και ο έλεγχος της αντοχής αυτών παρουσιάζεται ανεφάρμοστος οπότε απαιτείται υψηλό ποσοστό ελέγχου, αλλά και στις περιπτώσεις μικρού ποσοστού ελέγχου, υπάρχει η πιθανότητα αυξημένη μάλιστα λόγω της καταπόνησεως του υλικού στις θέσεις



αφαίρεσης των τεμαχίων, να προκληθούν σφάλματα κατά την αποκατάσταση των δημιουργηθέντων κενών.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι προκύπτει ανάγκη δυνατότητας ελέγχου:

- Του ιδίου του Έργου.
- Σε όλα ή σένα ποσοστό, ανάλογα με τις απαιτήσεις.
- Χωρίς καταστροφή.

Η ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων βρίσκεται μέσα στις δυνατότητες με μεθόδους ελέγχου χωρίς καταστροφή.

1.2 Μέθοδοι ελέγχου

Είναι γνωστός σήμερα μεγάλος αριθμός μεθόδων ελέγχου χωρίς καταστροφή των συγκολλήσεων, όπως με ακτινογράφιση, υπέρηχους, μαγνητικά σωματίδια, διεισδυτικά υγρά και άλλες.

Στη μέθοδο με ακτινογράφιση το προς ακτινογράφιση αντικείμενο παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πηγής ακτινοβολίας και ενός φιλμ.

Όπως είναι γνωστό, η ακτινοβολία κατά την διόδο σε κάποιο υλικό ορισμένου πάχους, υφίσταται εξασθένηση σε κάποιο ποσοστό που εξαρτάται από το είδος του υλικού.

Εάν λοιπόν μέσα στο υπό ακτινογράφιση αντικείμενο υπάρχει ασυνέχεια, η ακτινοβολία υφίσταται κάποια εξασθένηση στη θέση ασυνέχειας ή στο υγιές υλικό, με αποτέλεσμα ή ένταση που εξέρχεται από το αντικείμενο της ακτινοβολίας, άρα και η αμαύρωση την οποία θα προκαλέσει αυτή στο φιλμ, να μην είναι ίδια σε όλα τα σημεία.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι όσο αυξάνεται η διάσταση της ασυνέχειας κατά την διεύθυνση των ακτινών, αυξάνεται η διαφορά της εξασθένησης αυτών στη διόδο μέσου του υγιούς υλικού αφενός και με την ασυνέχεια αφετέρου, δηλαδή αυξάνεται στο φιλμ η προκαλούμενη διαφορά της αμαύρωσης.

Ως πηγές ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται συσκευές παραγωγής ακτινών Χ ή ραδιενεργά ισότοπα. Οι συσκευές αυτές είναι σχετικά ελαφριές, εύχρηστες και μπορούν να προσαρμοσθούν πλήρως στις συνθήκες του Εργοταξίου.



Από τις συσκευές παραγωγής ακτίνων X η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ρυθμιζόμενης ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με μεταβολή της υψηλής τάσης στη λυχνία μέχρι μιας τιμής που μπορεί να φθάνει, ανάλογα της συσκευής, τα 300KV.

Τα συνηθέστερα, εξάλλου, χρησιμοποιούμενα σήμερα ισότοπα, είναι το ΙΓ-192 και Co-60, με χρόνους υποδιπλασιασμού 75 ημέρες και 5,5 χρόνια αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές ενέργειας, που εκπέμπουν οι ακτινοβολίες γ, είναι 0,4 MeV και 1.2 MeV αντίστοιχα.

Από τις παραπάνω τιμές ενέργειας, οι τιμές διεισδυτικής ικανότητας για το χάλυβα, είναι:

- 40mm για ακτίνες X-300KV
- 45mm για το ΙΓ-192
- 150mm για το Ca-60

Η εκλογή της κατάλληλης ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος του υλικού, το πάχος και από την απαιτούμενη σε κάθε περίπτωση ποιότητα της εικόνας της ακτινογραφίας. Έτσι σε περιπτώσεις πάχους ελασμάτων από χάλυβα μικρότερου των 32mm, για επίτευξη υψηλής ποιότητας εικόνας, απαιτείται η αποκλειστική χρησιμοποίηση ακτίνων X.

Στη μέθοδο ελέγχου με υπέρηχους τα εκπεμπόμενα κύματα υπερήχων από κάποιο πιεζοκρύσταλλο (συνήθως από χαλαζία ή τιτανικό, βάριο) συχνότητας συνήθως 2-4MHZ, ανακλώνται έπειτα από την πρόσπτωση σε κάποια ασυνέχεια, που βρίσκεται μέσα στο ελεγχόμενο κομμάτι (τεμάχιο) και ένα ποσοστό της ανακλώμενης δέσμης προκαλεί την εμφάνιση παλμού στην οθόνη του παλμογράφου.

Τώρα όσο η γωνία, που σχηματίζεται μεταξύ της κεντρικής ακτίνας της προσπίπτουσας δέσμης και της ασυνέχειας πλησιάζει τις 90, τόσο το ποσοστό της ανακλώμενης δέσμης, άρα και το ύψος του παλμού που προκλήθηκε, αυξάνεται.

Από τη θέση του σχήματος και το ύψος του παλμού, βγαίνουν συμπεράσματα για τη θέση, το είδος και το μέγεθος της ασυνέχειας.

Η μέθοδος ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια βρίσκει εφαρμογή στην ανίχνευση ασυνεχειών σιδηρομαγνητικών μόνον υλικών. Τα κομμάτι που θέλουμε να ελεγχθεί μαγνητίζεται, με τη βοήθεια μόνιμων μαγνητικών, ή ηλεκτρομαγνητών και η αλλαγή των μαγνητικών γραμμών, λόγω της ασυνέχειας στο υλικό, γίνεται ορατή με



τη χρησιμοποίηση μαγνητικών σωματιδίων, τα οποία ρίχνονται (με ψεκασμό) στην επιφάνεια του προς έλεγχο κομματιού.

Η ένδειξη που λαμβάνουμε, είναι τόσο ευκρινέστερη, όσο η ασυνέχεια βρίσκεται κοντύτερα προς την επιφάνεια και όσο βαθύτερα αυτή συναντάει τις μαγνητικές γραμμές.

Η μέθοδος ελέγχου με διεισδυτικά υγρά χρησιμεύει στην ανίχνευση επιφανειακών μόνο ασυνεχειών σε σιδηρομαγνητικά και όχι υλικά. Στη μέθοδο αυτή, ποσότητα κατάλληλου υγρού εισχωρεί στις επιφανειακές ασυνέχειες, που είναι πολύ δύσκολα να γίνουν ορατές με γυμνό μάτι και με εφαρμογή της κατάλληλης τεχνικής προκύπτουν πολύ καλές έγχρωμες ενδείξεις.

Υπάρχουν ακόμη και άλλες μέθοδοι ελέγχου, που Βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις, όπως ο έλεγχος στεγανότητας συγκολλήσεων σε πυρηνικές μονάδες με τη μέθοδο του ηλίου.

Η εκλογή της κατάλληλης μεθόδου ελέγχου, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, εξαρτάται από την δυνατότητα εφαρμογής της κάθε μία μεθόδου στην ανάλογη περίπτωση. Έτσι:

- Στην περίπτωση που είναι προσιτή η μια πλευρά της συγκόλλησης, η εφαρμογή της μεθόδου με ακτινογράφιση απορρίπτεται και ο έλεγχος γίνεται με κάποια άλλη μέθοδο όπως π.χ. με υπέρηχους.
- Στις εξωραφές, για την ύπαρξη τυχόν ρηγμάτων, ακολουθείται τακτικά η μέθοδος ελέγχου με μαγνητικά σωματίδια, διότι λόγω της γεωμετρίας της συγκολλήσεως γίνεται δύσκολη η εφαρμογή των μεθόδων με ακτινογράφιση και υπέρηχους.
- Σε άλλες περιπτώσεις τέλος, ορίζεται η διεξαγωγή του ελέγχου με περισσότερες από μια μέθοδο, διότι κάθε μέθοδος παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία στην ανίχνευση διαφόρων σφαλμάτων, όπως αναγράφονται αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο που ακολουθεί.

1.3 Πεδία Εφαρμογής

Η εξέλιξη και, η μεγάλη διάδοση της τεχνικής των συγκολλήσεων, σαν η πλεονεκτικότερη μέθοδος σύνδεσης μεταλλικών κομματιών οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στη συμβολή των μεθόδων ελέγχου χωρίς καταστροφή.

Αναλυτικότερα η συμβολή αυτή εμφανίζεται στους κατωτέρω τομείς.



- Στον εκπαιδευτή, για την διδασκαλία των συγκολλητών, με την υπόδειξη των σφαλμάτων που δημιούργησαν.
- Τον ερευνητή, για την δοκιμή νέων ηλεκτροδίων και νέων μεθόδων συγκόλλησης τεμαχίων.
- Τον εφαρμοστή, για τον έλεγχο των συγκολλήσεων σε μεγάλο αριθμό κατασκευών, όπως λέβητες, δεξαμενές, αγωγοί, πλοία, αεροπλάνα κ.λπ.

1.4 Χρόνος διεξαγωγής ελέγχου

Στη πράξη ο έλεγχος των συγκολλήσεων με τις μεθόδους χωρίς καταστροφή πραγματοποιείται σε χρονική συνάρτηση με το έργο:

- Πριν την έναρξη της κατασκευής, με την εκλογή των κατάλληλων ηλεκτροσυγκολλητών.
- Κατά την διάρκεια ή μετά το τελείωμα της κατασκευής
- Κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης του Έργου π.χ. με περιοδικές επιθεωρήσεις.

Η διεξαγωγή του ελέγχου στη διάρκεια της κατασκευής, μπορεί να θεωρηθεί γενικά ότι παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με την περίπτωση ελέγχου μετά την αποπεράτωση αυτής, γιατί γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει η δυνατότητα να αποφευχθούν με διόρθωση μελλοντικά σφάλματα. Έτσι π.χ. κατά την συγκόλληση αγωγού νερού διαμέτρου 900mm, ο ακτινογραφικός έλεγχος που διεξάχθηκε μετά το τέλος της συγκολλήσεως κάποιου τμήματος του αγωγού, έγινε ως παραδεκτή η εργασία του συγκολλητή σε ποσοστό 60%. Η καθοδήγηση του συγκολλητή και η γνωστοποίηση ότι θα γίνεται πλέον έλεγχος στην εργασία, μετέτρεψε το παραπάνω ποσοστό σε 100%, με σημαντική άνοδο του μέσου όρου της ποιότητας της εργασίας. Στη περίπτωση αυτή, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη και ο ψυχολογικός παράγοντας, επειδή από την ανθρώπινη φύση τι γνώση του επικείμενου ελέγχου εντείνει την προσοχή αυτού που θα ελεγχθεί.

Άλλωστε είναι γεγονός ότι μετά το τέλος της κατασκευής, πολλές φορές παρουσιάζονται εξαιρετικές δυσκολίες ή και αδυναμίες για την διόρθωση των χαρακτηρισθέντων ως μη σωστών τμημάτων συγκόλλησης λαμβάνοντας υπ' όψιν και την δυσμενή επίπτωση από πλευράς χρόνου και κόστους.

Τέλος παρουσιάζεται μερικές φορές και η ανάγκη ελέγχου πριν τοποθετηθούν όλα τα στρώματα της συγκόλλησης, όπως π.χ. συμβαίνει σε συγκολλήσεις ελασμάτων μεγάλου πάχους, όπου ο έλεγχος της ρίζας, προτού συνεχισθεί η συγκολλητική



εργασία, αποτελεί οικονομία χρόνου και χρημάτων. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει στο στάδιο αυτό με ακτινογράφηση ή με μαγνητικά σωματίδια ή διεισδυτικά υγρά. Αυτονόητο είναι ότι μετά τα τέλος της συγκολλήσεως αυτή μπορεί να ελεγχθεί στο σύνολο με ακτινογράφηση ή με υπέρηχους.

1.5 Ποσοστά ελέγχου

Το ποσοστό ελέγχου των συγκολλήσεων μιας κατασκευής εξαρτάται βασικά από το επιθυμητό βαθμό ασφάλειας της κατασκευής, καθώς και από τις οικονομικές επιπτώσεις που θα έχει κάποια τυχαία καταστροφή αυτής.

Το ποσοστό αυτό, μπορεί να φθάνει το 100%, αλλά ορίζεται κατά κανόνα με τις προδιαγραφές του έργου. Ο ακτινογραφικός έλεγχος μιας σφαιρικής δεξαμενής διεξάγεται σε ποσοστό 100% του μήκους συγκολλήσεων, ενώ σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων περιορίζεται σε ποσοστό το οποίο εξαρτάται από το αριθμό των συγκολλητών που ασχολούνται στο Έργο.

Σε περίπτωση δειγματοληπτικού ελέγχου, το αρχικό ποσοστό μπορεί να αυξηθεί μέχρι 100% ή και να μειωθεί, ανάλογα με τα αποτελέσματα που διεξάγονται κατά τον έλεγχο.

1.6 Συγκριτική παρουσίαση των κυριοτέρων μεθόδων

Οι μέθοδοι ελέγχου με ακτινογράφηση και υπέρηχους, παρουσιάζει αυξημένες δυνατότητες και βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Παρακάτω γίνεται συγκριτική παρουσίαση των δυο μεθόδων, από γενική τεχνικοοικονομική άποψη, στο συγκεκριμένο πεδίο του ελέγχου των συγκολλήσεων.

1.7 Δυνατότητες

Στη παράγραφο αυτή αναφέρονται περιληπτικά τα σφάλματα τα συνηθέστερα που συναντάμε στις συγκολλήσεις και εξετάζονται οι δυνατότητες των δυο μεθόδων στην ανίχνευση, αναγνώριση και μέτρηση των σφαλμάτων αυτών.

Πόροι: Πρόκειται για εγκλωβισμένα αέρια όπως CO, CO₂, N₂, H₂ κ.λπ. Οι πόροι εμφανίζονται είτε μεμονωμένοι είτε σε διάφορες συγκεντρώσεις, που ποικίλλουν στη διάμετρο. Μερικές φορές περνούν την συγκόλληση ως προς το ύψος, εξερχόμενοι μέχρι την επιφάνεια. Πολλές φορές προκαλούνται λόγω χρήσης υγρών ηλεκτροδίων ή λόγω λανθασμένης ρύθμισης του ρεύματος. Οι μεμονωμένοι πόροι μικρής διαμέτρου δεν έχουν μεγάλη επίδραση στη στατική αντοχή της συγκόλλησης.



Αντίθετα μεγάλη συγκέντρωση πόρων ή πόροι εξερχόμενοι μέχρι την επιφάνεια, είναι επικίνδυνοι, ιδιαίτερα σε δυναμικές καταπονήσεις.

Η ανίχνευση των πόρων με ακτινογράφιση είναι πιο ευχερείς σε σχέση με την μέθοδο των υπερήχων, στην οποία για περιπτώσεις πολύ μικρών πόρων, απαιτείται λείανση της επιφάνειας των ελασμάτων και σε κάθε περίπτωση να μην έχω ασυνέχειες όπως π.χ. αναδίπλωση.

Εγκλείσματα σκουριάς: Εμφανίζονται είτε μεμονωμένα είτε σε διάφορες συγκεντρώσεις είτε σε συνεχής ή διακοπτόμενες μορφές γραμμών.

Η κακή προετοιμασία της συγκόλλησης δηλαδή μη ολοκληρωμένη απομάκρυνση διαφόρων "ακαθαρσιών", όπως τα οξειδία κ.λπ., καθώς και η απρόσεκτη απομάκρυνση από το περίβλημα του ηλεκτροδίου των αποθέσεων σε μία ενδιάμεση στρώση, προτού συνεχισθεί η εργασία της συγκόλλησης είναι οι συνηθέστερες αιτίες για το παραπάνω σφάλμα.

Εγκλείσματα σκουριάς σχετικά μεγάλα ως προς το πάχος του ελάσματος που είναι για συγκόλληση, σε μεγάλες συγκεντρώσεις ή και σε μορφή γραμμών, ιδιαίτερα όταν οι γραμμές βρίσκονται στη μέση της συγκόλλησης, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν. Η εμφάνιση στο ακτινογράφημα των εγκλεισμάτων σκουριάς είναι χαρακτηριστικής μορφής. Προσοχή χρειάζεται με την ανίχνευση με τους υπέρηχους, όπως και στη περίπτωση με τους πόρους, όταν μάλιστα πρόκειται για μεμονωμένα μικρά εγκλείσματα σκουριάς.

Στις προδιαγραφές, ανάλογα με την κατασκευή, γίνεται δεκτό ένα μέγιστο, όσον αφορά την διάσταση και την συγκέντρωση των πόρων και των εγκλεισμάτων σκουριάς ιδιαίτερα πρέπει να δοθεί προσοχή, κατά την αξιολόγηση με τις δύο παραπάνω μεθόδους στη περίπτωση συγκολλήσεως μιας στρώσης.

Επίσης στη περίπτωση μεγάλων συγκεντρώσεων σε πόρους ή εγκλείσματα σκουριάς, υπάρχει η περίπτωση να καλύπτουν οι παραπάνω περιπτώσεις πολύ σοβαρότερα σφάλματα όπως π.χ. ρήγματα.

Ατελής σύνδεση: Το σφάλμα αυτό δηλώνει την ανυπαρξία σύντηξης μεταξύ συγκολλητικού μετάλλου και το προς συγκόλληση τεμάχιο, δηλαδή της έννοιας της συγκόλλησης και δημιουργείται όποτε τα παραπάνω έλθουν σε επαφή σε χαμηλή θερμοκρασία. Στη προκειμένη περίπτωση τόσο η στατική όσο και η δυναμική αντοχή της συγκόλλησης μειώνεται σημαντικά.



Στο ακτινογράφημα δεν είναι σπάνια η περίπτωση στην οποία λόγω της γεωμετρίας το σφάλμα δεν απεικονίζεται με ευκρίνεια ή και καθόλου μερικές φορές. Λόγω τώρα της σπουδαιότητας, συνιστάται σε περίπτωση αμφιβολίας να γίνεται νέα ακτινογράφιση τώρα από καλή γωνία.

Με τους υπέρηχους, ο εντοπισμός του σφάλματος γίνεται αμέσως γνωστός.

Ατελής διείσδυση: Ατελής διείσδυση του συγκολλητικού μετάλλου σημαίνει μη ολοκληρωμένη συγκόλληση και συναντάται στη ρίζα των συγκολλήσεων τύπου V ή στο μέσο του τύπου X.

Συνηθέστερη αιτία του σφάλματος είναι ή μικρή απόσταση μεταξύ των τεμαχίων που είναι για σύνδεση, η μικρή γωνία φρεζαρίσματος και γενικά η κακή προετοιμασία της συγκόλλησης. Άλλες αιτίες ακόμη για το σφάλμα της ατελούς διείσδυσης είναι η χρήση μεγαλύτερης διαμέτρου ηλεκτροδίου, ή η μη σωστή ρύθμιση της έντασης του ρεύματος.

Ανάλογα τώρα με το μέγεθος του σφάλματος είναι και η μείωση της στατικής αντοχής, της συγκόλλησης. Η δυναμική καταπόνηση στο παραπάνω σφάλμα έχει σαν συνεπεία τη συγκέντρωση τάσεων με αποτέλεσμα πολλές φορές να έχω θραύση.

Τόσο η ανίχνευση όσο και, η αναγνώριση του σφάλματος μπορεί να γίνει καλά και με τις δύο μεθόδους (ακτινογράφιση, υπέρηχους).

Ρωγμές: Εμφανίζονται είτε μέσα στη συγκόλληση είτε κοντά σε αυτή στο τεμάχιο. Οι ρωγμές δημιουργούνται από κακή μέθοδο συγκόλλησης π.χ. ακατάλληλο ηλεκτρόδιο, συγκόλληση σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία κ.λπ.

Στη προκειμένη περίπτωση, παρουσιάζεται ένα από τα σοβαρότερα μειονεκτήματα της ακτινογράφισης, σαν μέθοδο ελέγχου συγκολλήσεων, χωρίς να μπορεί να ανιχνεύει πολλές φορές το σοβαρότερο σφάλμα. Ο προσανατολισμός του σφάλματος και η ποιότητα της εικόνας της ακτινογραφίας παίζουν σπουδαίο ρόλο στη δυνατότητα ανιχνεύσεως του σφάλματος. Αν και η μέτρηση της ρωγμής ουσιαστικά δεν έχει σημασία, γιατί ποτέ αυτή δεν αποτελεί παραδεκτό σφάλμα, άσχετα διαστάσεων, αναφέρεται ότι το πραγματικό μήκος των ρωγμών είναι σε πολλές περιπτώσεις μεγαλύτερο από αυτό που εμφανίζεται στην ακτινογραφία.

Μερικές φορές είναι δύσκολος, ο διαχωρισμός με τους υπέρηχους, το σφάλμα μεταξύ ατελούς διείσδυσης και ρωγμής, από το γεγονός ότι και τα δύο σφάλματα βρίσκονται στη ρίζα της συγκόλλησης.



Κάψιμο στο όριο της συγκόλλησης: Πρόκειται για τοπική εκβάθυνση στην επιφάνεια των τεμαχίων που είναι για συγκόλληση, και οφείλεται στη τήξη του τεμαχίου και εισροή του στη "ζώνη συγκόλλησης".

Τις περισσότερες φορές αναγνωρίζεται με γυμνό μάτι και αναγνωρίζεται γρήγορα με την ακτινογράφιση. Το υψηλό ρεύμα και η κακή κίνηση του ηλεκτροδίου είναι οι κύριες αιτίες του παραπάνω σφάλματος.

Επειδή με το κάψιμο στο όριο της συγκόλλησης, έχουμε μείωση της διατομής, σε περιπτώσεις όχι βαθιών και μεμονωμένων σφαλμάτων, έχουμε μικρή επίδραση στη στατική αντοχή της συγκόλλησης, αλλά σοβαρή επίδραση στη δυναμική αντοχή.

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά οι δυνατότητες των μεθόδων για την ανίχνευση των παραπάνω σφαλμάτων.

Πίνακας 1 Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Σφαλμάτων

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ		
ΣΦΑΛΜΑΤΑ	ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΗΣΗ	ΥΠΕΡΗΧΟΙ
ΠΟΡΟΙ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
ΕΓΚΛ/ΤΑ ΣΚΟΥΡΙΑΣ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
ΑΤΕΛΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
ΑΤΕΛΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
ΡΩΓΜΕΣ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ
ΚΑΨΙΜΟ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ

Από τον πίνακα προκύπτει, ότι τα δυσδιάστατα σφάλματα, όπως οι ρωγμές και, η ατελής σύνδεσης, ανιχνεύονται, καλύτερα με τους υπέρηχους παρά με την ακτινογράφιση, το αντίστροφο συμβαίνει με τα τρισδιάστατα σφάλματα, όπως π.χ. πόροι, εγκλείσματα σκουριάς.

Όσον αφορά τώρα να αναγνωρίσουμε τα σφάλματα, δηλαδή το είδος, η μέθοδος της ακτινογράφισης δίνει γενικά πιο σαφείς πληροφορίες. Η μέτρηση, τέλος των σφαλμάτων γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο ακτινογράφημα παρά με τους υπέρηχους όπου το αποτέλεσμα λαμβάνεται, υπόψη με ανοχή της τάξεως του 25%. Επίσης είναι ευνόητο, ότι στο ακτινογράφημα δεν μετρείται η διάσταση του σφάλματος κατά την διεύθυνση των ακτινών.



Από τα παραπάνω γίνεται φανερό η αδυναμία της μιας ή της άλλης μεθόδου να επίλυση μόνη της το πρόβλημα του ελέγχου των συγκολλήσεων στο σύνολο του. Για αυτό το λόγο πολλές φορές ζητείται η παράλληλη εφαρμογή των δύο μεθόδων και ο κατάλληλος συνδυασμός των ευρημάτων, για την αντιμετώπιση του προβλήματος του ελέγχου. Έτσι π.χ. στη περίπτωση λήψεως μιας σαφής ενδείξεως για την ύπαρξη ρωγμής με υπέρηχους και μιας ασαφής ή και έλλειψη κάποιου ευρήματος στην ακτινογράφιση, το συμπέρασμα είναι ότι έχω ρωγμή. Τώρα μια ασαφής ένδειξη στους υπέρηχους, δεν πρέπει να χαρακτηριστεί σαν ρωγμή, όταν το ακτινογράφημα εμφανίζει σαφώς έγκλεισμα σκουριάς.

1.8 Γνωμάτευση

Το θέμα της γνωμάτευσης, δηλαδή η κρίση για την καταλληλότητα μιας συγκολλήσεως για ένα ορισμένο σκοπό, βάσει των σφαλμάτων που βρέθηκαν, αποτελεί το σπουδαιότερο και δυσκολότερο πρόβλημα.

Αυτό το γεγονός, δηλαδή η ανάγνωση των σφαλμάτων και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα του ελέγχου της συγκόλλησης με μεθόδους χωρίς καταστροφή, σε αντίθεση με τις μηχανικές δοκιμές, δεν εκφράζεται ποσοτικά αλλά ποιοτικά. Για το λόγο αυτό και όταν ακόμη από τις τεχνικές προδιαγραφές ορίζεται ακριβώς η παραδεκτή κατάσταση, τόσο από πλευράς μεγίστου επιτρεπόμενου μεγέθους μιας κατηγορίας σφαλμάτων, όσο και από πλευράς μέγιστης επιτρεπόμενης συγκέντρωσης αυτών, βρίσκεται, στη κρίση τελικά αυτού που κάνει, την γνωμάτευση να δεχθεί, εάν μικρή απόκλιση από το παραδεκτό όριο πρέπει, να οδηγήσει, σε διόρθωση ή όχι, αφού ληφθούν υπ' όψιν και άλλοι παράγοντες, δεδομένου ότι η αυστηρότητα δεν αποτελεί μερικές φορές και εξασφάλιση. Παραδείγματος χάριν σε μία γενικά πολύ καλή συγκόλληση, η διόρθωση ενός πόρου, του οποίου η διάμετρος είναι μεγαλύτερη λίγο, από τη διάμετρο του παραδεκτού ορίου, μπορεί να γίνει μη επιτυχώς, επίσης μία δεύτερη διόρθωση συνεπάγεται καταπόνηση του υλικού στη θέση διόρθωσης, με αποτέλεσμα να έχω αποδεκτή κατάσταση πολύ χειρότερη από την αρχική.

Αναφέρθηκαν μάλιστα οι δυνατότητες κάθε μιας από τις δύο κυριότερες μεθόδους ελέγχου των συγκολλήσεων, δηλαδή το πλήθος και η ακρίβεια των πληροφοριών που δίνει η κάθε μία μέθοδος και διατυπώθηκαν τα πλεονεκτήματα από το συνδυασμό των μεθόδων, για εξέταση του ίδιου προβλήματος.

Βάση των παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι στη περίπτωση που δεν συναντήσαμε σφάλμα, αποτελεί άστοχη έκφραση το συμπέρασμα ότι η συγκόλληση "είναι" χωρίς σφάλμα, η έκφραση ότι αυτή "βρέθηκε" χωρίς σφάλματα, είναι οπωσδήποτε κοντύτερα στη πραγματικότητα.



Στην αξιολόγηση, μιας συγκόλλησης, των σφαλμάτων που βρέθηκαν, λαμβάνεται υπ' όψιν η επίδραση σ' αυτή διαφόρων παραγόντων όπως:

- Το είδος της καταπόνησης: στατική, δυναμική.
- Η τιμή των μηχανικών τάσεων.
- Η επίδραση της θερμότητας.
- Η χημική δράση του ρευστού που βρίσκεται σε επαφή.
- Η μηχανική δράση του κινούμενου ρευστού π.χ. πρόβλημα στη ροή σε "κρεμάσματα" της ρίζας της συγκόλλησης σε αγωγούς.

Υπάρχει μεγάλος αριθμός τεχνικών προδιαγραφών και οδηγιών από Ινστιτούτα ή Οργανισμούς ελέγχου με διεθνή κύρος, με τους οποίους καθορίζεται σε διάφορες περιπτώσεις κατασκευών, μεταξύ άλλων, το παραδεκτό όριο από πλευράς μεγέθους και συγκεντρώσεις σφαλμάτων στις συγκολλήσεις, όπου καθορίζονται τα στοιχεία βάσει των οποίων μία συγκόλληση χαρακτηρίζεται σαν "παραδεκτή" ή "απαράδεκτη".

Στην περίπτωση γνωμάτευσης ακτινογραφιών, με βάση την προδιαγραφή που ισχύει κάθε φορά, πολλές φορές εφαρμόζεται το σύστημα των πέντε κατηγοριών, που επιτρέπει την ακόμη ταξινόμηση των συγκολλήσεων με αριθμούς, όπως:

- 1 = χωρίς ευρήματα,
- 2 = μικρά σφάλματα,
- 3 = σφάλματα κάτω από το όριο διόρθωσης,
- 4 = σφάλματα που απαιτούν τοπική διόρθωση και επανέλεγχο,
- 5 = σφάλματα που απαιτούν επανάληψη της συγκόλλησης.

Τώρα όσον αφορά το παραδεκτό ή όχι του τμήματος της συγκόλλησης που εξετάζεται, από την ανωτέρω ταξινόμηση, τα 1, 2, 3 είναι αδιάφορα.

Δεν είναι, σπάνιες εξάλλου οι περιπτώσεις που η ταξινόμηση των συγκολλήσεων που ελέγχονται, με βάσει τις ακτινογραφίες, γίνεται η σύγκριση αυτών με την εκδοθείσα συλλογή από το Διεθνές Ινστιτούτου Συγκολλήσεων. Συλλογή η οποία παρουσιάζει ποικιλία από μεγέθη και συγκεντρώσεις και από τυπικά σφάλματα, που ελήφθησαν σε δοκίμια από χάλυβα και με ακτίνες X.

Τα παραπάνω ακτινογραφήματα, με βάση το μέγεθος, της συγκέντρωσης και της σπουδαιότητας των σφαλμάτων που εμφανίζονται σε αυτά, ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες ή χρώματα όπως:

1	μέλαν	2	κυανό	3	πράσινο
---	-------	---	-------	---	---------



4 Καφέ **5 κόκκινο**

με προοδευτική μείωση της ποιότητας των συγκολλήσεων, όσο αυξάνεται ο αριθμός που χαρακτηρίζει αυτήν. Η συλλογή αυτή δεν αποτελεί βέβαια προδιαγραφή που να διαχωρίζει τη παραδεκτή από την μη παραδεκτή κατάσταση, διότι δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένη περίπτωση.

Η δυνατότητα ταξινόμησης όμως την οποία προσφέρει, επιτρέπει την τοποθέτηση του αποδεκτού ορίου μεταξύ δύο κατηγοριών π.χ. 2 και 3, εάν αυτό συμφωνηθεί μεταξύ των ενδιαφερομένων.

Στους υπέρηχους, συγκρίνεται συνήθως το ύψος του παλμού, το οποίο προκαλεί μία ασυνέχεια της ελεγχόμενης συγκόλλησης, προς το ύψος του παλμού που προκάλεσε ένα πρότυπο σφάλμα, γνωστό και ανάλογο για την κάθε περίπτωση μέγεθος π.χ. οπή ορισμένης διαμέτρου, που δημιουργήθηκε σε δοκίμιο από το ίδιο υλικό, με αυτό της κατασκευής που ελέγχεται και με κατάλληλο πάχος.

Σφάλματα στη συγκόλληση, που προκαλούν παλμούς που υπερβαίνουν το ύψος παλμού που προκαθορίστηκε από το πρότυπο σφάλμα, χαρακτηρίζονται ως σφάλματα που πρέπει να διορθωθούν. Μία άλλη δυνατότητα που μπορούν να εκφραστούν τα αποτελέσματα των υπέρηχων, είναι με τη χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων. Δηλαδή, εάν μέσα στη συγκόλληση υπάρχει ασυνέχεια, αυτή θα προκαλέσει την εμφάνιση παλμού ορισμένου ύψους. Με βάση το ύψος του παλμού και με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου διαγράμματος, καθορίζεται η διάμετρος οπής ικανής να προκαλέσει παλμό του ίδιου ύψους, εάν η οπή αυτή βρίσκεται στην ίδια θέση, όπως η ασυνέχεια μέσα στη συγκόλληση.

1.9 Επάρκεια Ελεγκτή

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα με τις μεθόδους ελέγχου χωρίς καταστροφή είναι το στοιχείο της υποκειμενικότητας, το οποίο εμπλέκεται περισσότερο ή λιγότερο σε κάθε μέθοδο.

Το γεγονός αυτό οδηγεί στη σκέψη ότι τα άτομα, που διεξάγουν τον έλεγχο, πρέπει αποδεδειγμένα να διαθέτουν τα απαραίτητα προσόντα, δηλαδή γνώσεις και πείρα, γιατί διαφορετικά η επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού, με την εφαρμογή των αναφερθέντων μεθόδων, δηλαδή η ασφάλεια και η οικονομία στην λειτουργία του Έργου, εξαρτάται από ευτυχείς συμπτώσεις.

Η μέθοδος της ακτινογράφησης χαρακτηρίζεται σχετικά σαν η πλέον αντικειμενική, ο υποκειμενικός παράγοντας περιορίζεται, κυρίως στη γνωμάτευση



των ακτινογραφιών. Αλλά και στο στάδιο αυτό όμως του ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα της κρίσης από περισσότερα άτομα, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, περιορίζοντας έτσι σημαντικά τα στοιχεία της υποκειμενικότητας. Γενικά αυτός που κάνει τη γνωμάτευση σε μία ακτινογραφία, πρέπει να είναι κάτοχος της μεθόδου και του τρόπου που απεικονίζονται αυτά. Προσθετά η μακροχρόνια πείρα, που έχει αποκτηθεί σε σωστές βάσεις, είναι αυτή που εξασφαλίζει την ορθότητα της κρίσης, και κατά συνέπεια την ασφάλεια της λειτουργίας της κατασκευής.

Είναι γνωστό ότι ένα μειονέκτημα το οποίο χαρακτηρίζει την μέθοδο με ακτινογράφιση, είναι η χρησιμοποίηση της ακτινοβολίας. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, οι γνώσεις ακτινοπροστασίας στο χειρίστη των ακτινογραφικών συσκευών θεωρούνται απαραίτητες. Είναι πολύ απλό να προφυλάξει αυτός τόσο τον εαυτό του όσο και τους άλλους που απασχολούνται κοντά στη συσκευή που εκπέμπει ακτινοβολία, αλλά επίσης είναι και πολύ πιθανό, λόγω της ελλείψεως προχείρων μέτρων προφύλαξης, να συμβούν ατυχήματα.

Στους υπέρηχους η κατάσταση είναι διαφορετική, γιατί ο χειριστής της συσκευής ελέγχου είναι σύγχρονος με αυτόν που κάνει τη γνωμάτευση. Στη περίπτωση αυτή για το χειρίστη απαιτούνται όχι μόνο θεωρητικές γνώσεις, αλλά και πείρα η οποία πρέπει τουλάχιστον να είναι διετής και ο ελεγκτής να μην αποξενώνεται από το αντικείμενο για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

1.10 Ταχύτητα Διεξαγωγής Ελέγχου

Εάν η ταχύτητα μιας μεθόδου ελέγχου συγκολλήσεων ορισθεί το μήκος της συγκόλλησης που ελέγχθηκε στην μονάδα του χρόνου, που αρχίζει από την έναρξη του ελέγχου έως ότου γίνουν γνωστά τα αποτελέσματα, η ταχύτητα της μεθόδου με ακτινογράφιση είναι γενικά πολύ μικρότερη της αντίστοιχης των υπερήχων.

Μια αριθμητική σχέση, που να συνδέει τις ταχύτητες των δύο ανωτέρω μεθόδων ελέγχου και να καλύπτει όλες τις περιπτώσεις, δεν είναι δυνατό να δοθεί, λόγω του ότι η ταχύτητα διεξαγωγής ελέγχου των συγκολλήσεων, και μάλιστα με τη μέθοδο της ακτινογράφισης, επηρεάζεται από μεγάλο αριθμό διαφόρων παραγόντων. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε, το είδος της κατασκευής, καθώς και την απαιτούμενη ευαισθησία ελέγχου, μεγέθη που καθορίζουν την τεχνική λήψης των ακτινογραφιών, δηλαδή την κατάλληλη εκλογή της ακτινοβολίας, την σωστή διάταξη λήψης, τα φιλμ που θα χρησιμοποιηθούν κ.λπ. Επομένως, η τεχνική της λήψης σαν συνάρτηση ενός αριθμού παραγόντων, που μπορούν να εξασκούν διαφορετικές επιδράσεις χρονικές,



έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγεί σε ταχύτητες ελέγχου που να απέχουν αρκετά σε διάφορες περιπτώσεις. Η θέση εξάλλου των τμημάτων των συγκολλήσεων που είναι για ακτινογράφιση δηλαδή η ευκολία της προσέγγισης, επηρεάζει την ταχύτητα του ακτινογραφικού ελέγχου.

Ανεξάρτητα από τους παραπάνω παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν το χρόνο λήψης των ακτινογραφικών, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το γεγονός, ότι πρέπει να μετρήσει και ο χρόνος από την στιγμή που τελειώνει η ακτινοβολή του φιλμ, μέχρι να γίνει γνωστό το αποτέλεσμα, που είναι της τάξης των 30 min.

Στον έλεγχο με υπέρηχους τα πράγματα είναι πιο απλά. Εδώ η ταχύτητα ελέγχου είναι κυρίως σε συνάρτηση με την ποιότητα της ελεγχόμενης συγκόλλησης και φυσικά από την πείρα του ελεγκτή. Η ταχύτητα εδώ κυμαίνεται μεταξύ 4-8m ελέγχου συγκόλλησης σε μία ώρα.

1.11 Κόστος Ελέγχου

Όσον αφορά τώρα το κόστος για την διεξαγωγή του ελέγχου με τις παραπάνω δύο μεθόδους, η μέθοδος με ακτινογράφιση είναι η πιο ακριβή.

Το κόστος για την διεξαγωγή του ελέγχου είναι σε συνάρτηση:

- Της ταχύτητας της μεθόδου,
- Από τα τεχνικά μέσα που έχουμε,
- Το απαιτούμενο προσωπικό.

Στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκε το θέμα της ταχύτητας και διαπιστώθηκε, ότι ενώ στους υπέρηχους μπορεί να ληφθεί για τον υπολογισμό μια τιμή σαν μέσος όρος ταχύτητας, στην ακτινογράφιση η έννοια του μέσου όρου είναι εκτός πραγματικότητας, λόγω των μεγάλων αποκλίσεων που εμφανίζουν οι τιμές των ταχυτήτων που προκύπτουν. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό να καθορισθεί μια ενιαία τιμή κόστους ακτινογράφισης ανά μονάδα μήκους.

Για το σκοπό αυτό θα δοθεί κατά προσέγγιση μία εικόνα από το κόστος των τεχνικών μεσών που χρησιμοποιούνται, οι τάξεις μεγέθους είναι :

Συσκευή ακτινών X-200KV	18.000 ευρώ.
Συσκευή ακτινών γ-Ir. 192	21.000 ευρώ.
Συσκευή υπερήχων	19.000 ευρώ.

Στο σημείο αυτό πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και το κόστος από πλήθος παρελκόμενα και υλικά, απαραίτητα κυρίως για τον έλεγχο με ακτινογράφιση,



καθώς και το κόστος εγκατάστασης του σκοτεινού θαλάμου, για την εμφάνιση των ακτινογραφιών.

Από πλευράς, τέλος προσωπικού για τη διεξαγωγή του ελέγχου, συνήθως χρειάζονται δύο άτομα για τον έλεγχο με ακτινογράφιση, ενώ για τους υπέρηχους αρκεί ένα.

1.12 Συμπεράσματα των δυο κυριότερων μεθόδων

Ο έλεγχος των συγκολλήσεων με μεθόδους χωρίς καταστροφή, συμβάλλει αποφασιστικά στην ασφαλή και οικονομική λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων και μεταφορικών μέσων, αποτελεί ένα από τα βασικά κριτήρια της ποιότητας πολλών κατασκευών και για αυτό η διεξαγωγή του προβλέπεται από τις αντίστοιχες τεχνικές προδιαγραφές (A.S.M.E., A.P.I, κ.λπ.).

Οι δύο μέθοδοι με ακτινογράφιση και με υπέρηχους που υπερισχύουν από τις άλλες, παρουσιάζονται συγκριτικά με συντομία παρακάτω:

Ακτινογράφιση

Πλεονεκτήματα (+):

- Ύπαρξη παραμένου αποδεικτικού στοιχείου του ελέγχου.
- Αξιόπιστη αναγνώριση των σφαλμάτων.
- Ακριβέστερη μέτρηση των σφαλμάτων.

Μειονεκτήματα (-):

- Αμφίβολη ανίχνευση δυσδιάστατων σφαλμάτων (π.χ. ρήγματα).
- Ύπαρξη ακτινοβολίας.
- Μικρότερη ταχύτητα ελέγχου.
- Ψηλότερο κόστος ελέγχου.

Υπέρηχοι

Πλεονεκτήματα (+):

- Δυνατότητα ανίχνευσης δυσδιάστατων σφαλμάτων.
- Ικανή η προσιτή της μιας μόνο πλευράς της συγκόλλησης.

Μειονεκτήματα (-):

- Έλλειψη παραμένου αποδεικτικού στοιχείου του ελέγχου.
- Μεγάλες απαιτήσεις στην επάρκεια του ελεγκτού.



Από το γεγονός, ότι η κάθε μία μέθοδος παρουσιάζει, για λόγους αρχής, εκλεκτική ευαισθησία στην ανίχνευση των διαφόρων σφαλμάτων στις συγκολλήσεις, και μάλιστα στα σημεία στα οποία η μια μέθοδος παρουσιάζει αδυναμία, η δεύτερη μέθοδος είναι σαφώς πιο ευαίσθητη. Δεν είναι λίγες οι φορές στις οποίες όταν τίθενται αυστηρές απαιτήσεις στην ασφάλεια μιας κατασκευής, ακολουθείται η εφαρμογή και των δύο μεθόδων.

Με άλλα λόγια, δεν γίνεται θέμα ανταγωνισμού, άλλα κατάλληλου συνδυασμού των δύο μεθόδων και των ευρημάτων, για την δυνατότητα του πλέον αξιόπιστου αποτελέσματος.

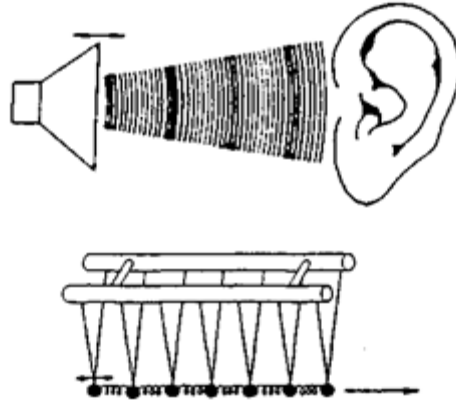


ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά Ήχου

2.1.1 Συχνότητα, ταχύτητα ήχου και μήκος κύματος

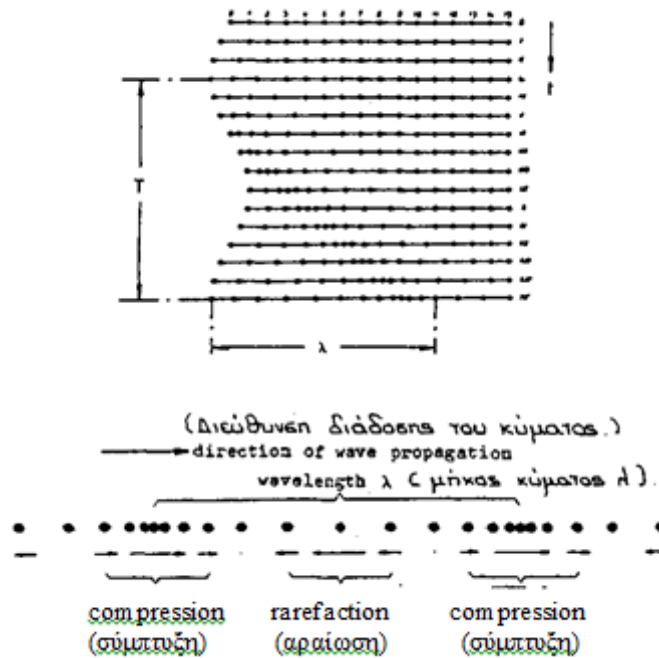
Πώς ταξιδεύει ο ήχος από μια ταλαντευόμενη μεμβράνη (π.χ. ένα μεγάφωνο) που λειτουργεί σαν πομπός μέχρι το αυτί μας που λειτουργεί σαν δέκτης; Η ταλαντευόμενη μεμβράνη προκαλεί ταλαντώσεις στα γειτονικά σωματίδια του αέρα και μεταβολές της πίεσης λαμβάνουν χώρα. Μια που τα σωματίδια του αέρα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με ελαστικότητα και όχι με μεγάλες δυνάμεις συνοχής, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σαν μοντέλο μπάλες συνδεδεμένες με ελατήρια (Εικόνα 1). Στην Εικόνα 2, φαίνεται η χρονική στιγμή 0 (πρώτη σειρά), όπου όλες οι μπάλες είναι ακίνητες. Ο μηχανισμός της ταλάντωσης ξεκινά τραβώντας την αριστερή μπάλα προς τα αριστερά, στη χρονική στιγμή I. Καθώς η αριστερή μπάλα συνδέεται με την γειτονική της μπάλα με ένα ελατήριο, η κίνηση ελαττώνεται μέχρι τη στιγμή III και τελικά αντιστρέφεται (λόγω της σύνδεσης με ελατήρια, η δεύτερη και διαδοχικά όλες οι μπάλες προς τα δεξιά αρχίζουν να κινούνται). Έτσι αναπτύσσεται μια κίνηση κύματος. Μια άλλη εξέταση αυτής της εικόνας δείχνει ότι κάθε μπάλα ταλαντώνεται γύρω από την θέση ακινησίας της κατά ένα ορισμένο ποσό, δηλαδή απλά η κατάσταση της ταλάντωσης διαδίδεται κατά τη διεύθυνση της διάδοσης. Μόνο η ενέργεια μεταφέρεται, η μάζα όχι. Κατά τη χρονική περίοδο από τη στιγμή III μέχρι τη στιγμή XV το σωματίδιο έχει εκτέλεση μια πλήρη ταλάντευση. Ο απαιτούμενος χρόνος είναι η C (περίοδος της ταλάντευσης T). Κατά την στιγμιαία αντιπροσώπευση XV, βλέπουμε ότι τα σωματίδια 0 και 12 υφίστανται την μέγιστη απόκλιση τους προς τα αριστερά, δηλαδή βρίσκονται στην ίδια κατάσταση ταλάντωσης. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο σωματίδια που βρίσκονται στην ίδια κατάσταση ταλάντωσης είναι το **μήκος κύματος** λ.



Διεύθυνση ταλάντωσης των μπαλόν.

Διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Εικόνα 1 Διάδοση Ήχου



Εικόνα 2 Λειτουργία Ηχητικών Κυμάτων

Η επόμενη εικόνα δείχνει, ότι η κατάσταση ταλάντωσης έχει διαδοθεί κατά απόσταση λ στην περίοδο T . Έτσι η ακόλουθη σχέση ισχύει για την **ταχύτητα ταλάντωσης**:



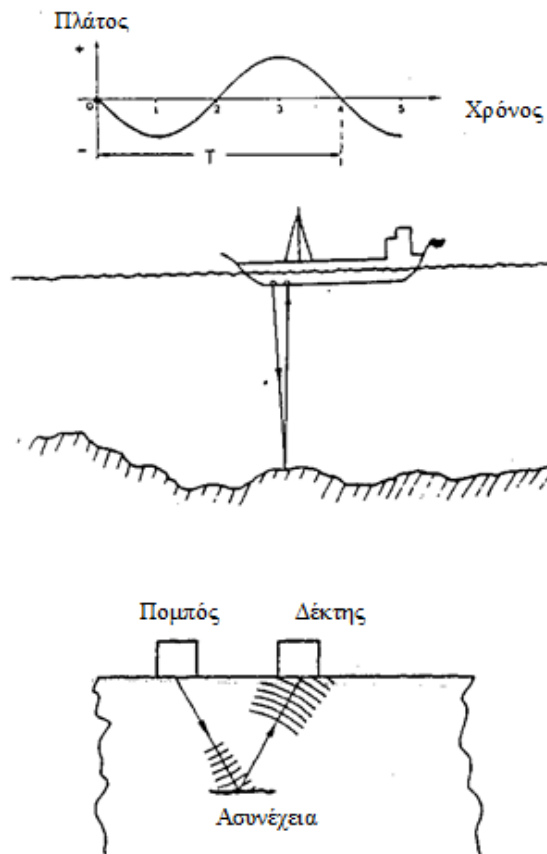
$$c = \frac{\lambda}{T}$$

Από την περίοδο της ταλάντωσης T ο αριθμός των ταλαντώσεων, ανά δευτερόλεπτο (sec) μπορούν να υπολογισθούν μέσω της σχέσης:

$$f = \frac{1}{T}$$

οπού f είναι η **συχνότητα** της ταλάντωσης, η μονάδα μέτρησης της είναι "αριθμός ταλαντώσεων/δευτερόλεπτο". Αυτή η μονάδα μέτρησης έχει πάρει το όνομα της από τον φυσικό H Hertz, και έχει συντομευτεί σε HZ.

1 HZ = 1 ταλάντωση ανά δευτερόλεπτο 1KHZ =1000 HZ =1000 ταλάντωσης ανά δευτερόλεπτο 1MHZ =1000000 HZ = 1.000.000 ταλαντώσεις ανά δευτερόλεπτο. Έτσι, η ακόλουθη σχέση ισχύει για την ταχύτητα ταλάντωσης του κύματος $c = f \cdot \lambda$. Η σχέση αυτή (**εξίσωση κύματος**) εφαρμόζει σε όλες τις διαδικασίες κύματος.





Εικόνα 3 Φυσική θεώρηση του Ήχου

2.2 Υπέρηχος

Η συχνότητα της αίσθησης του ήχου (τόνος) είναι ένα άμεσο μέτρο μέτρησης της οξύτητας του τόνου. Όσο ψηλότερη είναι η συχνότητα τόσο ψηλότερος είναι ο τόνος. Η οξύτητα του τόνου που μπορεί να δεχθεί το ανθρώπινο αυτί έχει ένα ανώτερο όριο. Για νεαρά άτομα το όριο αυτό είναι περίπου $20.000\text{Hz} = 20\text{KHz}$. Ήχος με ψηλότερες συχνότητες ονομάζεται **υπέρηχος**.

- **Ακουστικός ήχος:** $f = 20 - 20.000\text{Hz}$
- **Υπέρηχος:** $f > 20.000\text{Hz} = 20\text{KHz}$

Όπως είδαμε στο μοντέλο με τα ελατήρια, μεταφορά ενέργειας μέσω κύματος ήχου είναι δυνατή μόνο όταν τα σωματίδια από τα οποία συνιστάται είναι συνδεδεμένα το ένα με το άλλο με ελαστικές δυνάμεις. Στην περίπτωση μετάδοσης του ήχου από το μεγάφωνο στο αυτί μας τα σωματίδια του αέρα παίζουν το ρόλο του **μέσου μετάδοσης**. Επίσης, υγρά και στερεά υλικά είναι κατάλληλα μέσα για την μετάδοση του ήχου. Στο κενό (διάστημα) δεν υπάρχει ύλη και για αυτό δεν είναι δυνατή η μετάδοση του ήχου. Η ικανοποιητική ηχητική αγωγιμότητα των υγρών και του στερεού υλικού βρίσκει στις μέρες μας τεχνικές εφαρμογές σε διάφορους τομείς:

- Χρησιμοποιώντας τον ηχητικό ανιχνευτή βάθους μετράται η απόσταση ως τον πυθμένα της θάλασσας ή εντοπίζονται κοπάδια ψαριών .
- Χρησιμοποιώντας **ηχητικά μηχανήματα** υποβρύχια και πλοία σε μεγάλες αποστάσεις εντοπίζονται.

Στην περίπτωση του ηχητικού ανιχνευτή βάθους ένα άλλο χαρακτηριστικό της μετάδοσης του κύματος χρησιμοποιείται, αυτό ονομάζεται **ανάκλαση** του ηχητικού κύματος από τον πυθμένα της θάλασσας. Για το σκοπό αυτό ένας σύντομος **ηχητικός παλμός** εκπέμπεται από ένα πομπό τοποθετημένο στο σκελετό του πλοίου. Ο ανακλώμενος ηχητικός παλμός από τον πυθμένα της θάλασσας γίνεται αποδεκτός από ένα δέκτη.

Κατά τον ίδιο χρόνο μετράται ο χρόνος μετάδοσης του παλμού. Χρησιμοποιώντας την γνωστή ταχύτητα του ήχου στο νερά, μπορεί εύκολα να υπολογισθεί το βάθος του νερού. Η καλή αγωγιμότητα του ήχου σε στερεό υλικό μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του υλικού. Για τον σκοπό αυτό

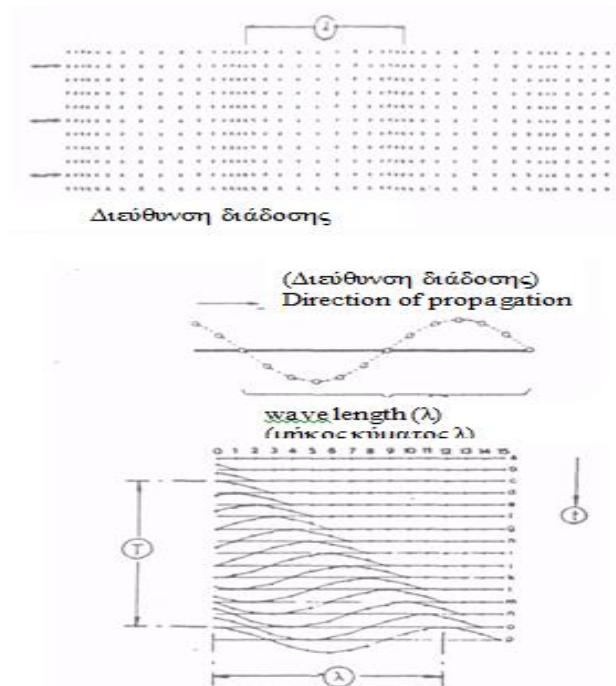


χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά ανάκλασης των ηχητικών κυμάτων. Έτσι, διάφορα σώματα μπορούν να ελεγχθούν για εσωτερικά ελαττώματα κατά ένα μη καταστρεπτικό τρόπο. Ο έλεγχος του υλικού με χρήση υπερήχων σκοπεύει στην απόκτηση ψηλών ηχητικών εντάσεων στο εξεταζόμενο σώμα. Καθώς η ένταση του ήχου αυξάνεται με το τετράγωνο της συχνότητας ο έλεγχος του υλικού πραγματοποιείται από υπέρηχους. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται, για έλεγχο με υπέρηχους κυμαίνονται από 0,5 έως 15 MHz.

Μια μέθοδος μη-καταστρεπτικού ελέγχου χρησιμοποιώντας υπέρηχους, η **μέθοδος παλμού αντίληξης**, περιλαμβάνει την μετάδοση του ήχου μέσα στο προς εξέταση αντικείμενο και την μέτρηση και ερμηνεία της μεταβολής που υφίστανται ο ήχος στο προς έλεγχο αντικείμενο. Σ' αυτήν την πιο συχνά εφαρμοζόμενη μέθοδο, το μέρος του ήχου που ανακλάται από την διαχωριστική επιφάνεια ή την ελαττωματική περιοχή του εξεταζόμενου αντικειμένου γίνεται πάλι αποδεκτό και υπολογίζεται ηλεκτρονικά. Κατά την μέθοδο αυτή δύο τιμές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

- Ο χρόνος **μετάδοσης του ήχου** καθώς ταξιδεύει από την επιφάνεια του σώματος μέχρι τον ανακλαστήρα και πίσω,
- και η **ένταση του σήματος του ανακλώμενου ήχου**.

Ο ανακλώμενος χρόνος του ήχου είναι ένα μέγεθος μέτρησης του βάθους του ανακλαστήρα, η ένταση του σήματος είναι ένα μετρό μέτρησης των χαρακτηριστικών ανάκλασης του προσδιορισμένου ανακλαστήρα. Είναι φανερό ότι ο συνεχής ήχος δεν είναι κατάλληλος για μέτρηση χρόνου μετάδοσης, λόγω του ότι μόνο στην περίπτωση συντόμων ηχητικών παλμών μπορεί να μετρηθεί μια καθορισμένη περίοδος ανάμεσα στη μετάδοση και στη λήψη. Έτσι, στην περίπτωση της μεθόδου παλμού αντίληξης ενός υπέρηχου ο πομπός παράγει συντόμους ηχητικούς παλμούς.



Εικόνα 4 Διάδοση Υπέρηχου

2.3 Αρχές διάδοσης κύματος

2.3.1 Τύποι ταλάντωσης

Η διάδοση του ήχου που παρουσιάστηκε με το μοντέλο των ελατηρίων είναι δυνατή σε όλα τα μέσα. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η διεύρυνση ταλάντωσης των σωματιδίων βαίνει παραλλήλως με την διεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Έτσι δημιουργούνται ζώνες με μικρή απόσταση σωματιδίων και ζώνες με μεγάλη απόσταση σωματιδίων. Για αυτό αυτός ο τύπος κύματος ονομάζεται **κύμα σύμπτυξης ή διαμήκες κύμα**. Αν δεν αναφερθούμε στην στιγμιαία αναπαράσταση αλλά στην δυναμική διαδικασία διάδοσης του διαμήκους κύματος βλέπουμε ότι οι συμπύξεις και μειώσεις κινούνται δια μέσου του εξεταζόμενου αντικειμένου κατά μια αμετάβλητη απόσταση. Η ταχύτητα με μειώσεις κινούνται δια μέσου του εξεταζόμενου αντικειμένου κατά μια αμετάβλητη απόσταση. Η ταχύτητα με την οποία κινούνται είναι η **ταχύτητα του ήχου** με, του διαμήκους κύματος. Αυτή η ταχύτητα του ήχου είναι μια σταθερά του υλικού, δηλαδή σε ένα εξεταζόμενο αντικείμενο που είναι φτιαγμένο καθ' ολοκληρία από το ίδιο υλικό μπορεί να θεωρηθεί σταθερά, π.χ.



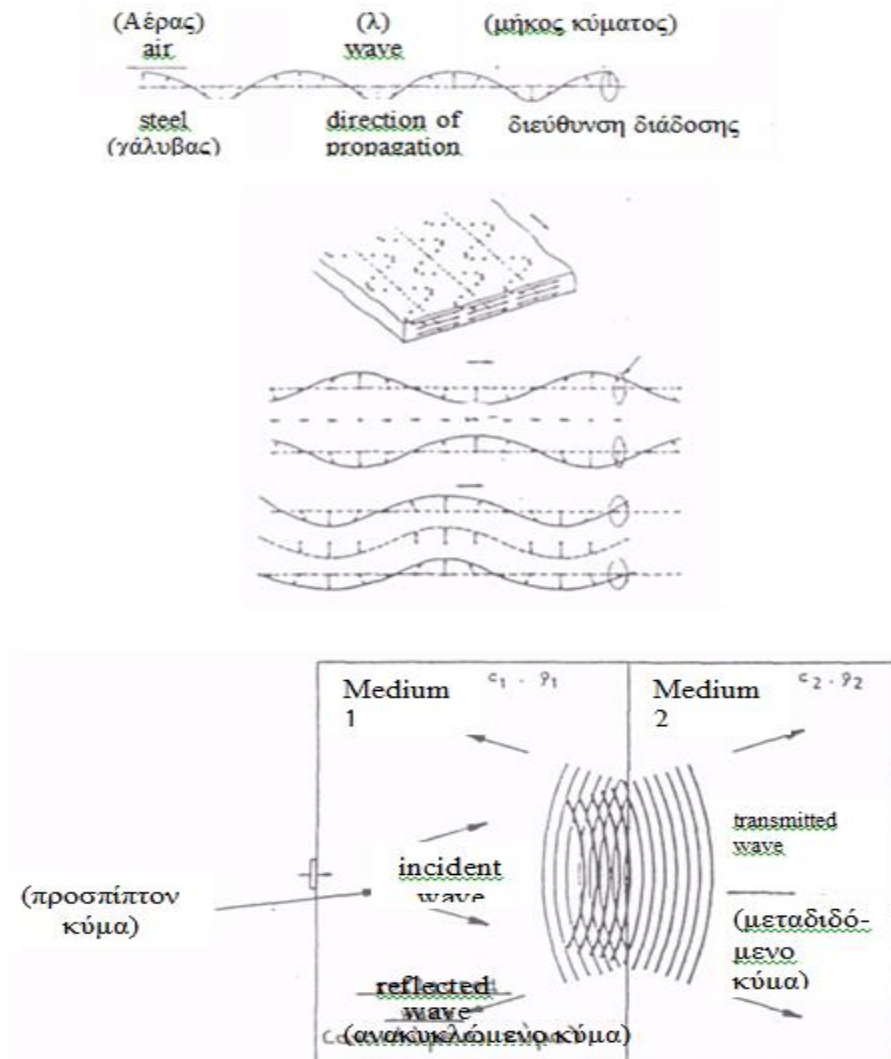
- για το ατσάλι $L = 5.920\text{m/s}$
- για το αργίλιο $CL = 6.300\text{ m/s}$

Η πυκνότητα στερεού υλικού είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με τις πυκνότητες υγρών και αερίων, δηλαδή με άλλα λόγια η απόσταση ανάμεσα στα άτομα ή στα μόρια είναι πολύ μικρή. Επί πλέον, στα στερεά τα άτομα ή μόρια είναι τοποθετημένα σε κρυσταλλικό πλέγμα και οι ελαστικές δυνάμεις συνοχής ανάμεσα τους είναι ιδιαίτερα ισχυρές. Λόγω αυτών των δύο γεγονότων ο ήχος μπορεί να διαδοθεί με διάφορους τρόπους μέσα σε ένα στερεό υλικό. Ήδη γνωρίσαμε ένα τύπο κύματος, αυτόν που ονομάσαμε **διαμήκες κύμα**. Ένας άλλος τύπος κύματος είναι το **εγκάρσιο κύμα**. Στην περίπτωση του εγκάρσιου κύματος τα σωματίδια ταλαντώνονται κάθετα στην διεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Τώρα ας έρθουμε πάλι στην αλυσίδα ελατηρίων. Το κύμα δεν διεγείρεται κατά την διεύθυνση της αλυσίδας αλλά κατά διεύθυνση που διασταυρώνεται με αυτήν της αλυσίδας. Τα ελατήρια σπρώχνουν τις μπάλες πίσω στην αρχική του θέση αλλά λόγω της κίνησης του ταλαντώνονται γύρω από τη θέση ακινησίας τους. Συγχρόνως αυτές οι διασταυρωμένες ταλαντώσεις μεταδίδονται στις δύο γειτονικές μπάλες οι οποίες με την σειρά τους αρχίζουν να ταλαντώνονται. Οι ταλαντώσεις αυτές εξακολουθούν να μεταδίδονται στις γειτονικές μπάλες μέσω των συνδέσεων με τα ελατήρια.

Παρατηρώντας την δυναμική πορεία μιας σειράς κυμάτων βλέπουμε ότι αμφότερα τα πυκνώματα του κύματος και τα αραιώματα του κύματος κινούνται διαμέσω του εξεταζομένου αντικειμένου σε μια αμετάβλητη διεύθυνση. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικά πυκνώματα κύματος είναι το **μήκος κύματος λ** (Εικ.5). Η μετάδοση ενέργειας σε ένα εγκάρσιο κύμα είναι μικρότερη λόγω της εγκάρσιας ταλάντωσης των ατόμων από ότι στην περίπτωση διαμήκους κύματος. Για αυτό λοιπόν η ταχύτητα διάδοσης του εγκάρσιου κύματος είναι αξιοσημείωτα μικρότερη από εκείνη του διαμήκους κύματος π.χ.

- Ατσάλι: $C_L = 5 \cdot 920\text{m/s}$ (ταχύτητα διάδοσης διαμήκους κύματος)
- $CL = 3.250\text{m/s}$ (ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιου κύματος)

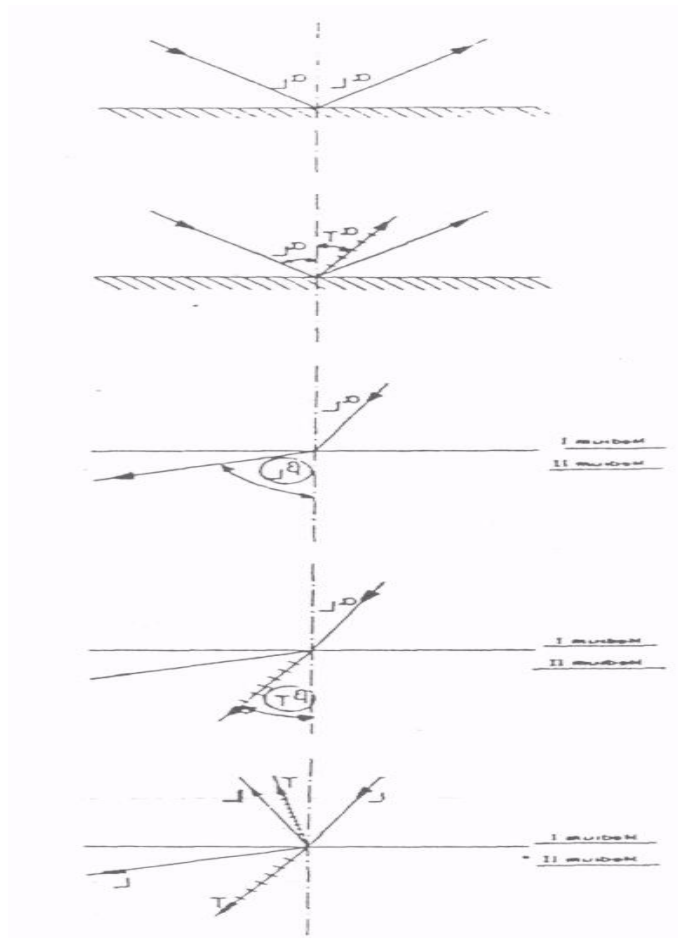
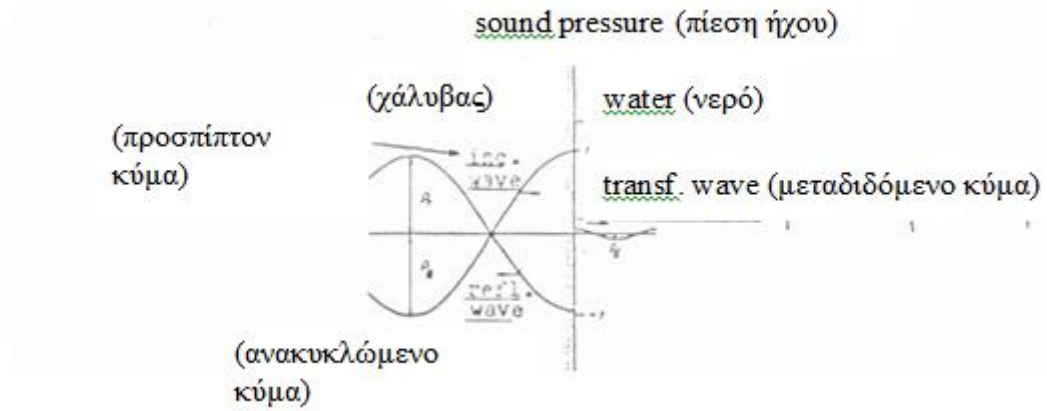
Επίσης, η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος είναι μια σταθερά του υλικού και είναι χαρακτηριστική για το αντικείμενο στο οποίο αντιστοιχεί.



Εικόνα 5 Ταλάντωση και Διάδοση Ηχητικής κύμανσης

Τα διαμήκη και τα εγκάρσια κύματα μπορούν να διαδίδονται σε όλο τον όγκο ενός αντικειμένου. Στις διαχωριστικές επιφάνειες και στις εξωτερικές επιφάνειες των αντικειμένων και άλλοι τύποι κυμάτων μπορούν να υπάρξουν:

Το **επιφανειακό κύμα** Λ το κύμα **RAYLEIGH**, διαδίδεται μόνο στις εξωτερικές επιφάνειες του αντικειμένου. Ένα τέτοιο επιφανειακό κύμα παρουσιάζεται κατά την στιγμιαία αντιπροσώπευση του κύματος. Τα σωματίδια της επιφάνειας ταλαντώνονται σε ελλειπτικές τροχιές, στο κύμα RAYLEIGH. Ακριβώς κάτω από την επιφάνεια τα σωματίδια είναι σχεδόν στην θέση ακινησίας τους πάλι. Το βάθος



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

Εικόνα 6 Διαγραμματική αναπαράσταση υπολογισμού ακουστικής αντίστασης



Το R ονομάζεται **συντελεστής ανάκλασης**.

Η σχέση D της πίεσης του μεταδιδόμενου ήχου προς την πίεση του προσπίπτοντος ήχου υπολογίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

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

Το D ονομάζεται **συντελεστής μετάδοσης**.

Το παράδειγμα της διαχωριστικής επιφάνειας ατσάλι/νερό δίνει τις ακόλουθες τιμές:

$$Z_1 = Z_{\text{ατσάλιου}} = 45 \times 10^6 \frac{\text{KG}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$Z_2 = Z_{\text{νερού}} = 1,5 \times 10^6 \frac{\text{KG}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$R = \frac{1,5 - 45}{1,5 + 45} = 0,935$$

$$D = \frac{2 \times 1,5}{1,5 + 45} = 0,065$$

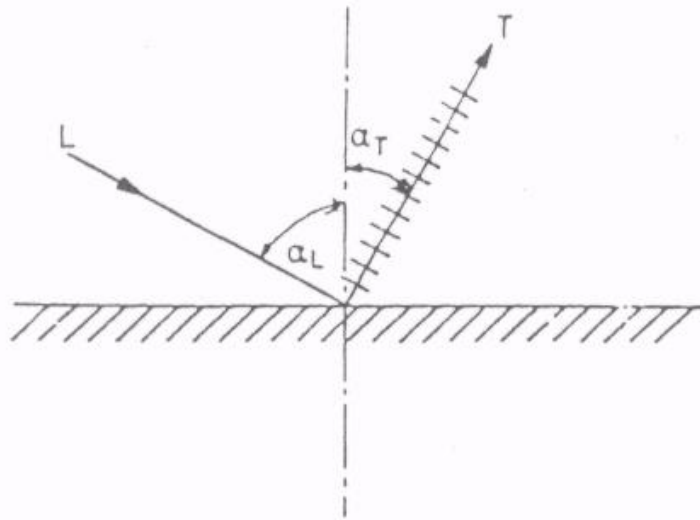
Αυτό σημαίνει ότι, περίπου το 94% της πίεσης του ήχου του προσπίπτοντος κύματος ανακλάται, από την διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο ατσάλι και το νερό και μόνο το 6% περίπου εισχωρεί στο νερό. Το αρνητικό πρόσημο, όσον αφορά το R σημαίνει ότι η κατάσταση ταλάντωσης του κύματος (η **φάση**) αντιστρέφεται στην διαχωριστική επιφάνεια. Ένα πύκνωμα προσπίπτοντος κύματος γίνεται αραιώμα ανακλώμενου κύματος, (αντίστροφη φάση).

2.3.3 Διάθλαση και μετατροπή μορφής κύματος

Αν το ηχητικό κύμα δεν προσκρούει κατακόρυφα σε μία επιφάνεια το φαινόμενο γίνεται πιο πολύπλοκο. Ας παρατηρήσουμε προσεκτικότερα ένα διαμήκες κύμα που προσκρούει σε μία διαχωριστική επιφάνεια υπό γωνία α ως προς την κάθετο (= **άξονας** της πρόσπτωσης)(Εικ.7). Το προσπίπτον κύμα ανακλάται σύμφωνα με τον νόμο ανάκλασης, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης αντιστοιχεί στην γωνία ανάκλασης. Συγχρόνως μία **μετατροπή της μορφής** λαμβάνει χώρα. Ένα εγκάρσιο κύμα ανακλάται με γωνία α. Η Γωνία α μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με το **νόμο διάθλασης** (ο νόμος του Snell).



Όπως στην περίπτωση του κύματος που προσκρούει κατακόρυφα στην διαχωριστική επιφάνεια, ένα μέρος εισχωρεί στο δεύτερο μέσο, εδώ, το προσπίπτον κύμα δεν μεταδίδεται γραμμικά δια μέσω του οριακού στρώματος αλλά διαθλάται στο οριακό στρώμα. Η γωνία διάθλασης a_L προσδιορίζεται από τα νόμο της διάθλασης. Εκτός από το διαμήκες κύμα ένα εγκάρσιο κύμα μπορεί να δημιουργηθεί στο μέσον 2.



Εικόνα 7 Διαγραμματική αναπαράσταση Διάθλασης και μετατροπής μορφής κύματος

Η γωνία a_T καθορίζεται πάλι σύμφωνα με τον νόμο της διάθλασης. Έτσι, ένα διαμήκες κύμα που προσκρούει, υπό γωνία πάνω σε ένα οριακό στρώμα μπορεί να παράγει ένα ανακλώμενο διαμήκες και εγκάρσιο κύμα καθώς επίσης ένα διαθλώμενο διάμηκες και εγκάρσιο κύμα. Βέβαια το ίδιο συμβαίνει αν το προσπίπτον κύμα είναι εγκάρσιο κύμα. Η κατανομή της πίεσης του "ήχου κατά την ανάκλαση, την διάθλαση και την μετατροπή της μορφής του κύματος είναι πολύ πιο πολύπλοκη από την περίπτωση κατακόρυφης πρόσπτωσης και δεν θα ασχοληθούμε εδώ με αυτήν περαιτέρω. Σε μία ορισμένη γωνία πρόσπτωσης το ανακλώμενο κύμα έχει σχεδόν ολόκληρο μετατραπεί στον άλλο τύπο κύματος. Η γωνία αυτή υπολογίζεται από την σχέση:

$$\tan a_L = \frac{C_L}{C_T}$$

$$a_L = 90^\circ - a_T$$



όπου

- A_L = γωνία πρόσπτωσης διαμήκους κύματος
- A_T = γωνία ανάκλασης εγκάρσιου κύματος
- C_L = ταχύτητα του διαμήκους κύματος
- C_T = ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος

Στην πρακτική του υπερηχητικού ελέγχου συχνά χρησιμοποιείται το πέρασμα του ήχου από ατσάλι/Plexiglas. Η γωνία διάθλασης στο ατσάλι ονομάζεται γωνία ακροδέκτη. Οι ταχύτητες του ήχου για το Plexiglas και το ατσάλι και μια δεδομένη γωνία πρόσπτωσης $\sin \alpha$, προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$C_{L,\text{χάλυβα}} = 5920\text{m/s} \quad C_{L,\text{χάλυβα}} = 2730\text{m/s}$$

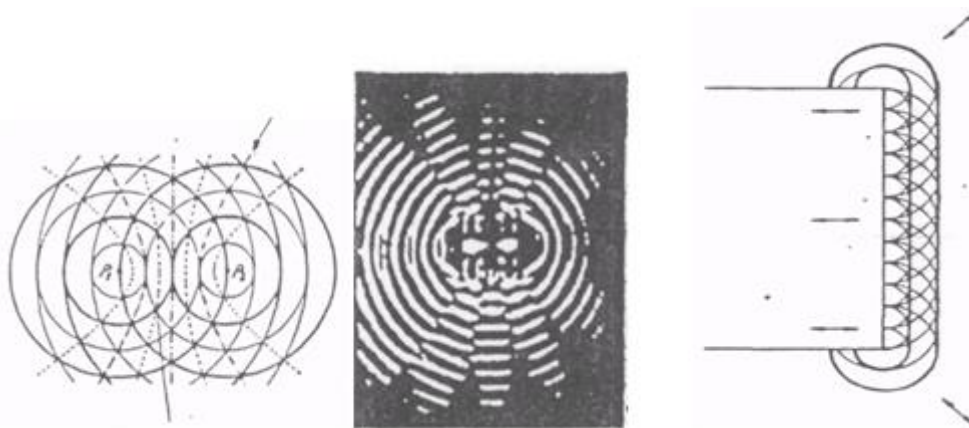
$$C_{T,\text{χάλυβα}} = 3250\text{m/s} \quad C_{T,\text{χάλυβα}} = 1180\text{m/s}$$

$$a_{L,\text{ανάκλασης}} = a_{L,\text{πρόσπτωσης}}$$

$$\sin \alpha_{T,\text{ανάκλασης}} \frac{C_{T,\text{plexiglass}}}{C_{L,\text{plexiglass}}} \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}} = 0,34 \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}}$$

$$\sin \beta_{L,\text{διάθλασης}} \frac{C_{L,\text{ατσάλι}}}{C_{T,\text{plexiglass}}} \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}} = 2,17 \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}}$$

$$\sin \beta_{T,\text{διάθλασης}} \frac{C_{T,\text{ατσάλι}}}{C_{T,\text{plexiglass}}} \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}} = 1,19 \times \sin \alpha_{L,\text{πρόσπτωσης}}$$



Εικόνα 8 Διαγραμματική αναπαράσταση υπερηχητικού ελέγχου



Ολική μετατροπή της μορφής λαμβάνει χώρα όταν :

$$\tan a_{\text{Lπρόσπτωσης}} = \frac{C_{\text{L,plexiglass}}}{C_{\text{T,plexiglass}}} = 2,31 \rightarrow a_{\text{Lπρόσπτωσης}} = 66,6^\circ$$

Έτσι, το ανακλώμενο διάμηκες κύμα έχει μία γωνία

$$a_{\text{T,ανακλ.}} = 90^\circ - 66,6^\circ = 23,4^\circ$$

Στο ατσάλι, δεν υπάρχει κύμα, δηλαδή σ' αυτή την ειδική περίπτωση μια **ολική ανάκλαση** με ολική μετατροπή της μορφής λαμβάνει χώρα.

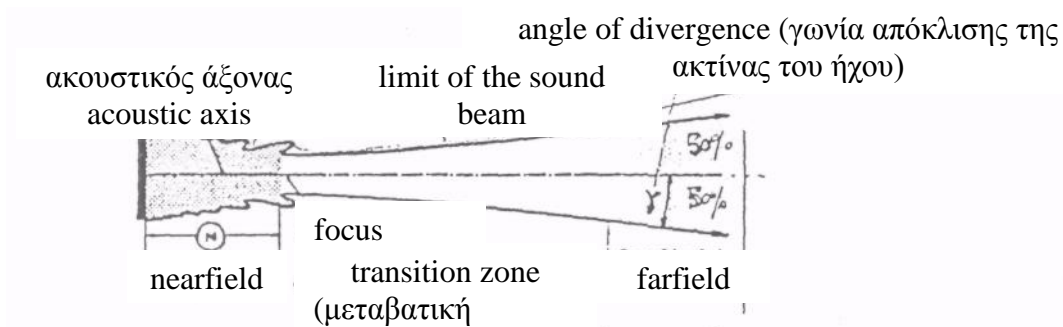
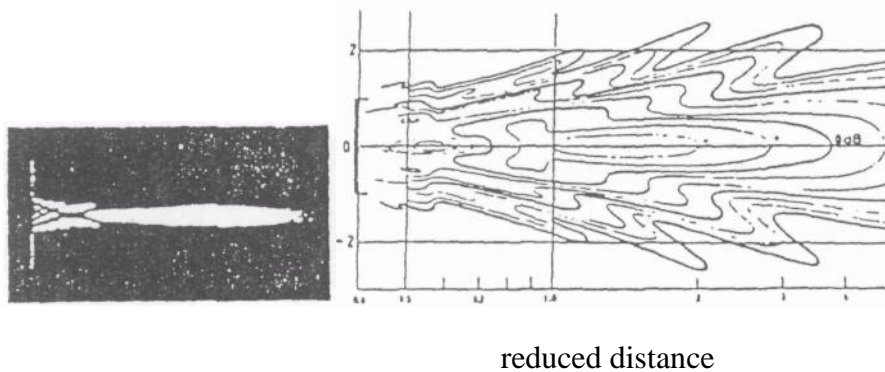
2.3.4 Ακτινοβολία ήχου μέσα στην ύλη

Η προηγούμενη θεώρηση της διάδοσης κύματος προερχόταν από την υπόθεση της θεώρησης ενός επιπέδου κύματος σε ένα υλικό δίχως όρια. Στην πράξη όμως, ο κρύσταλλος φτιάχνει, ένα σύστημα κρυστάλλων σε μια περιορισμένη περιοχή που οδηγεί σε ένα ηχητικό πεδίο του οποίου το σχήμα είναι περίπλοκο. Για να εξηγήσουμε τους μηχανισμούς αυτούς ας παρατηρήσουμε δύο σημειακές πηγές P1 και P2 που μεταδίδουν σφαιρικά κύματα. Επίσης υποθέτουμε ότι οι δύο πηγές παράγουν ταυτόχρονα μέγιστα και ελάχιστα με το ίδιο πλάτος.

Στον χώρο που περιβάλλει τις πηγές P1 και P2 υπάρχουν ορισμένα σημεία όπου η διαφορά δρόμων των δύο κυμάτων είναι, ακριβώς $\frac{1}{2} \lambda$, δηλαδή στα σημεία αυτά ένα ελάχιστο του ενός κύματος υπερκαλύπτει ένα μέγιστο του άλλου κύματος. Στα σημεία αυτά τα δύο κύματα εξουδετερώνονται το ένα από το άλλο. Μια άλλη ομάδα ορισμένων σημείων χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δύο μέγιστα ή δύο ελάχιστα των δύο κυμάτων υπερκαλύπτονται. Στα σημεία αυτά προκύπτει ένα κύμα του οποίου το πλάτος είναι το διπλάσιο του πλάτους του κύματος που έρχεται από τα σημεία P1 και P2. Η επόμενη εικόνα δείχνει μια στιγμιαία παρουσίαση του συστήματος που μελετάμε. Οι κύκλοι που φαίνονται παχύς αντιπροσωπεύουν τα μέγιστα και οι κύκλοι που φαίνονται, λεπτοί τα ελάχιστα των εξερχόμενων κυμάτων. Τα σημεία όπου ένας δακτύλιος που φαίνεται παχύς και ένας δακτύλιος που παρουσιάζεται λεπτός τέμνονται είναι τα σημεία αναίρεσης (συνδεόμενα με διακεκομμένες γραμμές). Οι γραμμές με παύλες και τελείες συνδέουν τα σημεία όπου δύο μέγιστα ή δύο ελάχιστα υπερκαλύπτονται. Μια επαλληλία δύο ή περισσότερων κυμάτων που έρχονται από διαφορετικά σημεία ονομάζεται **συμβολή**. Λόγω της συμβολής ένα πολύπλοκο σύστημα κύματος εμφανίζεται που μπορεί να παρουσιασθεί με κύματα νερού. Για να καταστήσουμε κατανοητή την ακτινοβολία του ήχου από την επιφάνεια του κρυστάλλου, η επιφάνεια υποδιαιρείται σε πολλά μικρά σημεία.



Κάθε σημείο του κρυστάλλου θεωρείται σαν το σημείο εκκίνησης ενός σφαιρικού κύματος (αρχή Huygens). Λόγω της συμβολής όλων αυτών των κυμάτων ένα πολύπλοκο σύστημα μεγίστων και ελάχιστων δημιουργείται, το **ηχητικό πεδίο**. Πίσω από τον κρύσταλλο ένας αριθμός μεγίστων και ελαχίστων συμβολής παρατηρείται (Fresnel αποτέλεσμα).



Ακτίνα ήχου ενός πομπού υπερήχων

Εικόνα 9 Διαγραμματική αναπαράσταση Ηχητικού Πεδίου (στιγμαία παράσταση)

Στην κεντρική ακτίνα υπάρχει το τελευταίο μέγιστο - το **κύριο μέγιστο** - και απ' αυτό το σημείο και υστέρτα δεν υπάρχουν άλλα μέγιστα και ελάχιστα. Η περιοχή των μεγίστων και ελάχιστων μέχρι, το κύριο μέγιστο ονομάζεται **κοντινό πεδίο**.

Η απόσταση από το κρύσταλλο μέχρι το κύριο μέγιστο ονομάζεται **μήκος κοντινού πεδίου N**. Το N εξαρτάται από τον κρύσταλλο, δηλαδή το τετράγωνο της διαμέτρου του, την συχνότητα των κυμάτων του ήχου και την ταχύτητα του ήχου στο υλικό στο οποίο διαδίδονται τα κύματα.

Για ένα σφαιρικό κρύσταλλο η ακόλουθη σχέση εφαρμόζεται:

όπου $N =$ μήκος κοντινού πεδίου



D_{eff} = ουσιαστική διάμετρος κρυστάλλου

$$N = \frac{D_{eff}^2 \cdot f}{4 \cdot C}$$

F = συχνότητα

C = ταχύτητα ήχου

Για ένα κρύσταλλο μορφής τετραγώνου η ακόλουθη σχέση ισχύει:

όπου N = μήκος κοντινού πεδίου του τετραγωνικού κρυστάλλου

$$N = 1,3 \frac{q^2_{eff} \cdot f}{4}$$

q_{eff} = ουσιαστική πλευρά του κρυστάλλου

f = συχνότητα

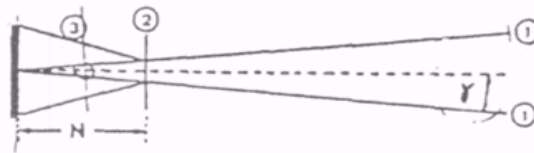
c = ταχύτητα του ήχου

Η αναπαράσταση του ηχητικού πεδίου που δείχνει την αλληλεπίδραση των μεγίστων και ελαχίστων δεν είναι κατάλληλη σε ικανοποιητικό βαθμό για την πρακτική του υπερηχητικού ελέγχου αν και δείχνει την πραγματική κατανομή της πίεσης του ήχου μιας ηχητικής πηγής. Στην πράξη, χρησιμοποιείται μια κατά προσέγγιση αναπαράσταση του ηχητικού πεδίου, που δείχνει την περιοχή μιας ηχητικής πηγής όπου υπάρχουν οι ανακλάσεις από τις ελαττωματικές περιοχές του αντικειμένου, όταν εφαρμόζεται η μέθοδος παλμού αντήχησης. Αυτή η κατά προσέγγιση αναπαράσταση ονομάζεται **ακτίνα ήχου**.

Κατ' αρχήν, ας δούμε τις αποστάσεις που είναι μεγαλύτερες από τα μήκος κοντινού πεδίου N. Προχωρώντας από κάποιο σημείο της **κεντρικής ακτίνας** ψάχνουμε για σημεία που κείνται στην κατακόρυφο της κεντρικής ακτίνας όπου η πίεση του ήχου έχει ελαττωθεί κατά 50% σε σύγκριση με το σημείο απ' όπου ξεκινήσαμε και βρίσκεται πάνω στην κεντρική ακτίνα. Για διάφορες αποστάσεις τα σημεία αυτά μπορούν με μια ικανοποιητική προσέγγιση να ενωθούν με ευθείες γραμμές (περιθωριακές ακτίνες). Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κεντρική ακτίνα και στην περιθωριακή ακτίνα ονομάζεται **γωνία απόκλισης γ 50%**. Ο δείκτης 50% σημαίνει ότι η περιθωριακή ακτίνα χαρακτηρίζει τα σημεία εκείνα που εμφανίζουν ελάττωση της πίεσης του ήχου κατά 50%, σε σύγκριση με την κεντρική ακτίνα. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να σχεδιασθούν περιθωριακές ακτίνες 10%. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της πίεσης του ήχου είναι μόνο το 10% της τιμής στην



κεντρική ακτίνα. Αυτό δίνει σαν αποτέλεσμα μία νέα γωνία απόκλισης γ 10%. Οι γωνίες απόκλισης μπορούν να υπολογισθούν ως ακολούθως (Εικ. 10):



Εικόνα 10 Γραφική προσέγγιση της ακτίνας του ήχου

Σφαιρικός κρύσταλλος

$$\sin V_{50\%} = 0,51 \frac{C}{D_{eff} \cdot f}$$

$$\sin V_{10\%} = 0,87 \frac{C}{D_{eff} \cdot f}$$

Τετραγωνικός κρύσταλλος

$$\sin V_{50\%} = 0,44 \frac{C}{q_{eff} \cdot f}$$

$$\sin V_{10\%} = 0,74 \frac{C}{q_{eff} \cdot f}$$

q είναι το μήκος της πλευράς του κρυστάλλου.

Χρησιμοποιώντας τα N και γ μπορούμε να σχεδιάσουμε την ακτίνα του ήχου με εύκολο τρόπο:

Σε απόσταση N από τον κρύσταλλο σχεδιάζεται μια βοηθητική παράλληλη του κρυστάλλου.

Από το κέντρο του κρυστάλλου, οι δύο περιθωριακές ακτίνες εμφανίζονται σε γωνία γ 50% ως προς την κεντρική ακτίνα. Τα σημεία που βρίσκονται στις τομές των περιθωριακών ακτινών και της βοηθητικής παραλλήλου συνδέονται με το περιθώριο του κρυστάλλου. Έτσι, μια εστίαση δημιουργείται μέχρι το τέλος του κοντινού πεδίου. Στην περίπτωση μεγαλύτερων αποστάσεων από τον κρύσταλλο μια απόσταση ίση με περίπου 3 μήκη κοντινού πεδίου η πίεση του ήχου στην κεντρική ακτίνα ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα, σε αναλογία με την απόσταση του κρυστάλλου (Fraunhofer φαινόμενο). Αυτή η περιοχή της ακτίνας του ήχου καλείται **μακρινό πεδίο**. Η περιοχή που βρίσκεται ανάμεσα στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο ονομάζεται **μεταβατική περιοχή**. Ας δούμε προσεκτικότερα τις τιμές N και γ 50% που χαρακτηρίζουν την ακτίνα του ήχου.

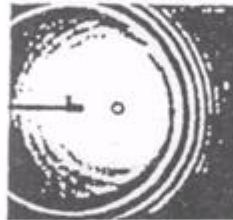
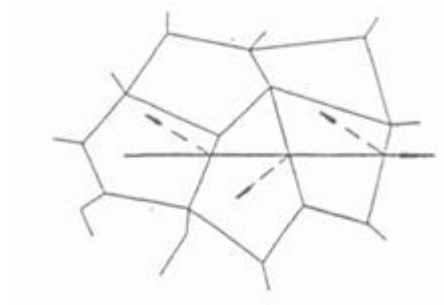
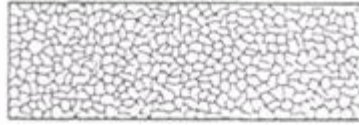
Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σχήμα της ακτίνας του ήχου εξαρτάται από την ταχύτητα του ήχου, την συχνότητα και την διάμετρο του κρυστάλλου. Εξάρτηση από την ταχύτητα του ήχου σημαίνει ότι το σχήμα της ακτίνας του ήχου επηρεάζεται, από το υλικό του προς εξέταση αντικειμένου. Αν αναφερόμαστε σε ένα συγκεκριμένο



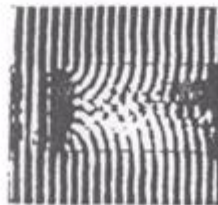
υλικό η ταχύτητα του ήχου είναι γνωστή, αυξάνοντας την ελεγχόμενη συχνότητα παίρνουμε ένα μεγαλύτερο μήκος κοντινού πεδίου και μια μικρή γωνία απόκλισης. Το ίδιο αποτέλεσμα μπορούμε να πετύχουμε αυξάνοντας την διάμετρο του κρυστάλλου. Η γεωμετρία του κρυστάλλου και τα χαρακτηριστικά του κύματος των ηχητικών κυμάτων είναι τα αίτια της χαρακτηριστικής μορφής της ακτίνας του ήχου και των φαινομένων αλληλεπίδρασης. Στην σύνδεση αυτή υποθέσαμε μία ελεύθερη διάδοση των ηχητικών κυμάτων. Ελευθερία σημαίνει:

- Το υλικό είναι εντελώς ομογενές, δηλαδή αποκλειστικά ομοιόμορφο.
- Το αντικείμενο είναι απέραντα μεγάλο έτσι ώστε τα ηχητικά κύματα δεν συναντούν ποτέ όρια.

Βεβαία και οι δύο αυτές συνθήκες δεν μπορούν να ισχύουν στην πράξη. Αυτό σημαίνει ότι επιπλέον επιδράσεις και αναπτυσσόμενα φαινόμενα συναντώνται, κατά την διάδοση του ήχου στα φυσικά αντικείμενα (Εικ.11).



(Διάθλαση σε ένα στόχο)
(Μέγεθος στόχου $> \lambda$)



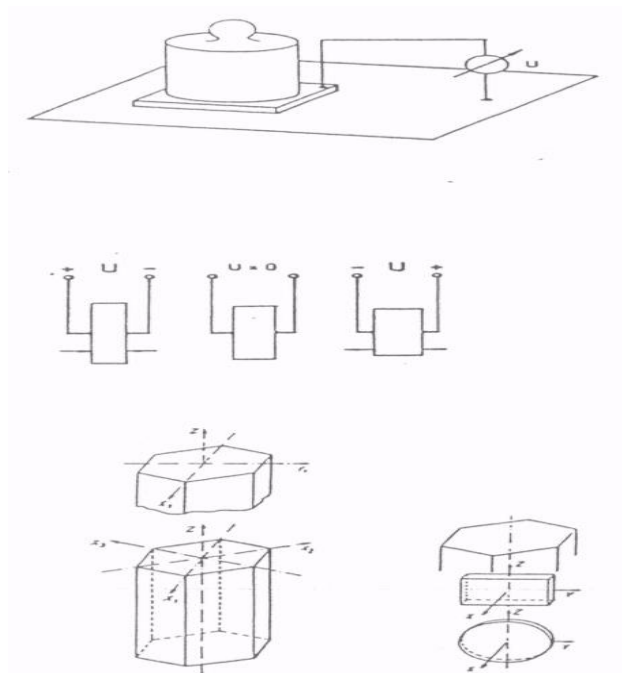
(Διάθλαση σε ένα στόχο)
(Μέγεθος στόχου $> \lambda$)

Εικόνα 11 Απεικονίσεις διάθλασης στόχου

Για παράδειγμα, ακόμη και ένα αντικείμενο χωρίς ελαττώματα αποτελούμενο από ατσάλι περιέχει πολύ μικρές και πολύ καλά κατανεμημένες ανομοιογενείς, όπως όρια κόκκων. Αυτές είναι περιοχές όπου η δομή πλέγματος του κρυστάλλου είναι ελαττωματική ή ξένο υλικό συσσωρεύεται σε πολύ μικρές ποσότητες στα όρια των κόκκων. Η διάδοση των ηχητικών κυμάτων έχει πάνω κάτω επηρεαστεί αρκετά από αυτήν την ανομοιογένεια (Εικ.12).



Τα όρια των κόκκων και το ξένο υλικό αντανακλούν πολύ μικρές ποσότητες ήχου προς όλες τις κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό καλείται **διασπορά**. Μεγάλες ελαττωματικές περιοχές, όπως κοιλώματα και ακόμη τεχνικοί ανακλαστήρες όπως ανοικτές οπές, άκρες ή αύλακες παρουσιάζουν το φαινόμενο της **περίθλασης του κύματος**, το οποίο όμως δεν είναι σημαντικό στην πράξη. Αν ένα κύμα ήχου πέσει πάνω σε ένα εμπόδιο και το περάσει, τα περιθωριακά σημεία του εμποδίου γίνονται αρχικά σημεία σφαιρικού κύματος, δηλαδή ο χώρος πίσω από το εμπόδιο διασπείρεται με ηχητική ενέργεια σε μία ορισμένη απόσταση (δεν δημιουργείται οξεία ηχητική σκιά). Επί πλέον, η διάδοση του κύματος οδηγεί πάντα σε ελάττωση ενέργειας. Μια μικρή ποσότητα της ενέργειας ταλάντωσης ενός σωματιδίου μάζας που συμμετέχει στην κίνηση ενός κύματος χάνεται κατά την μετατροπή σε θερμότητα. Το φαινόμενο αυτό καλείται **απορρόφηση**. Και η απορρόφηση και η διασπορά των ηχητικών κυμάτων οδηγούν στην απώλεια της ενέργειας του ήχου από την ακτίνα του ήχου από την ακτίνα του ήχου με αυξανόμενες αποστάσεις. Και οι δύο επιδράσεις μαζί έχουν σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του ήχου που επιπρόσθετα περιορίζει την έκταση των ηχητικών κυμάτων ιδίως σε μεγάλα αντικείμενα.



Εικόνα 12 Απεικονίσεις εσωτερικής δόμησης αντικειμένων για ηχοβόληση

2.4 Δημιουργία Υπερηχητικών Κυμάτων



2.4.1 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

Οι πομποί και οι δέκτες υπερήχων είναι κυρίως κατασκευασμένοι από μικρές πλάκες κομμένες από ορισμένους κρυστάλλους (πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι). Αν δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις πάνω σε μια τέτοια μικρή πλάκα τα ηλεκτρικά φορτία είναι τοποθετημένα κατά μια ορισμένη κρυσταλλική συμμετρία και έτσι εξουδετερώνεται το ένα με το άλλο. Λόγω εξωτερικής πίεσης το πάχος της μικρής πλάκας μεταβάλλεται και κατ' επέκταση η συμμετρία του φορτίου. Ένα ηλεκτρικό πεδίο αναπτύσσεται και η διαφορά δυναμικού διοχετεύεται στις επαργυρωμένες επιφάνειες του κρυστάλλου. Το φαινόμενο αυτό καλείται **άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο**.

Μεταβολές της πίεσης και έτσι και τα ηχητικά κύματα μετατρέπονται απ' ευθείας σε μεταβολές της ηλεκτρικής τάσης μέσω αυτού του φαινομένου η μικρή πλάκα ενεργεί σαν δέκτης. Το άμεσο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αντιστρέψιμο (αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο). Αν η διαφορά δυναμικού εφαρμοσθεί στην επιφάνεια επαφής του κρυστάλλου το πάχος της μικρής πλάκας μεταβάλλεται, σύμφωνα με την πολικότητα της διαφοράς δυναμικού η πλάκα γίνεται λεπτότερη ή παχύτερη. Λόγω της εφαρμογής διαφοράς δυναμικού εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας, ο κρύσταλλος ταλαντώνεται στην συχνότητα της διαφοράς δυναμικού του εναλλασσόμενου ρεύματος. Ένας βραχύς παλμός τάσης μικρότερης από $1/1.000.000$ second (1μsecond) και μια τάση που κυμαίνεται από 300 έως 1000 V διεγείρει τον κρύσταλλο σε ταλαντώσεις στην φυσική του συχνότητα (συντονισμός), που εξαρτάται από το πάχος και το υλικό της μικρής πλάκας. Όσο λεπτότερος είναι ο κρύσταλλος τόσο ψηλότερη είναι η συχνότητα συντονισμού του. Για αυτό, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα υπερηχητικό σήμα καθορισμένης πρωτογενούς συχνότητας. Το πάχος του κρυστάλλου υπολογίζεται από την απαιτούμενη συχνότητα συντονισμού f_0 σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

όπου

C = ταχύτητα του ήχου στο κρυσταλλικό υλικό

f_0 = συχνότητα συντονισμού του κρυστάλλου

$$d = \frac{\lambda}{2} = \frac{2C}{f_0}$$

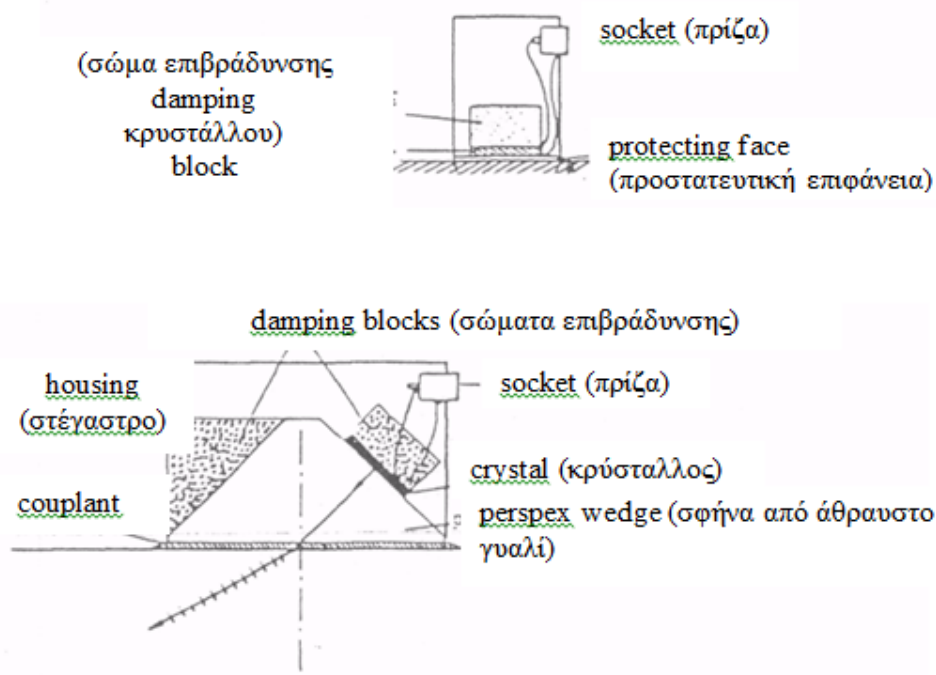
d = πάχος του κρυστάλλου

λ = μήκος κύματος



Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος που απαντάται στη φύση είναι ο χαλαζίας (κρυσταλλικό πέτρωμα) που χρησιμοποιήθηκε σαν υλικό κρυστάλλου στην αρχή του υπερηχητικού ελέγχου. Ανάλογα με τον αν θα δημιουργηθούν διαμήκη ή εγκάρσια κύματα οι πλάκες του χαλαζία θα προκύψουν με πριόνισμα του κρυσταλλικού πετρώματος κάθετα ή στον Χ-άξονα του κρυστάλλου ή στον Ψ-άξονα.

Στις μέρες μας σπάνια χρησιμοποιείται ο χαλαζίας, αντί γι' αυτόν χρησιμοποιούνται κεραμικά ή τεχνητοί κρύσταλλοι (Εικ.13).



Εικόνα 13 Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

Για ένα ικανοποιητικό διαχωρισμό των ήχων, η τιμή της σταθεράς K_p (συντελεστής σύζευξης ακτινικών ταλαντώσεων) πρέπει να είναι όσο γίνεται μικρότερη. Η K_p είναι μέτρο της εμφάνισης διαταραγμένων ακτινικών ταλαντώσεων που διευρύνονται. Κάτω από αυτό το πρίσμα εξέτασης ο μετανιοβικός μόλυβδος και το θειικό λίθιο είναι τα καλύτερα υλικά για την κατασκευή του κρυστάλλου.

Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των κρυσταλλικών υλικών που περιγράψαμε στο κεφάλαιο αυτό δείχνουν ότι δεν υπάρχει κανένα ιδανικό υλικό για την κατασκευή του κρυστάλλου, έτσι σύμφωνα με το πρόβλημα που έχουμε να επιλύσουμε κάθε φορά κάνουμε και διαφορετικούς συμβιβασμούς. Μια που το θειικό λίθιο παρουσιάζει πρόσθετες δυσκολίες λόγω της διαλυτότητας του στο νερό, τα υλικά που



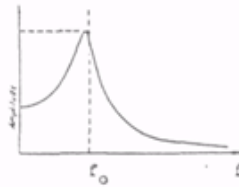
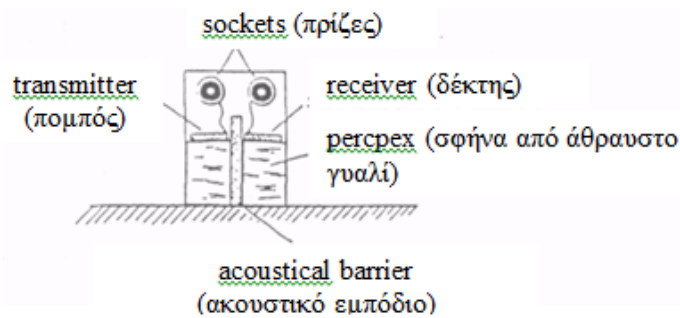
χρησιμοποιούνται συχνότερα είναι το **ζιρκονικό-τιτανικό άλας του μολύβδου**, το **τιτανικό βάριο** και ο **μετανοβικός μόλυβδος**.

2.4.2 Κατασκευή του φορητού ακροδέκτη

Για την πρακτική εφαρμογή στο υπό μελέτη υλικό χρησιμοποιούνται ακροδέκτες μέσα στους οποίους τοποθετούνται πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι. Για να προστατευθούν οι κρύσταλλοι από κάθε πιθανή καταστροφή επικαλύπτονται με ένα κομμάτι πλαστικού το **σώμα καθυστέρησης** που έχει επίπεδη παράλληλη επιφάνεια ή σφηνοειδή μορφή, το σχήμα του εξαρτάται από το αν το κύμα του ήχου θα μεταδοθεί κατακόρυφα ή υπό γωνία μέσα στο υπό εξέταση αντικείμενο. Το πίσω μέρος του κρυστάλλου συνδέεται στενά με το **στοιχείο επιβράδυνσης** που επιβραδύνει τις κανονικές ταλαντώσεις του κρυστάλλου όσο πιο γρήγορα γίνεται.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται οι βραχείς παλμοί που απαιτούνται από τη μέθοδο παλμού αντήχησης. Η μονάδα που περιλαμβάνει τον κρύσταλλο, το σώμα καθυστέρησης και το στοιχείο επιβράδυνσης βρίσκεται μέσα σε ένα ευρύχωρο πλαστικό ή μεταλλικό στέγαστρο και οι επαφές του κρυστάλλου συνδέονται με την πρίζα.

Ακροδέκτες που εκπέμπουν και δέχονται τους ηχητικούς παλμούς κάθετα στην επιφάνεια του αντικειμένου καλούνται **ακροδέκτες κανονικής ακτίνας** ή **ακροδέκτες ευθύγραμμης ακτίνας**. Αν ο κρύσταλλος είναι εφοδιασμένος με ένα σώμα καθυστέρησης σφηνοειδούς μορφής τότε αναφερόμαστε σε **ακροδέκτη ακτίνας υπό γωνία** που εκπέμπει και δέχεται τους ηχητικούς παλμούς υπό μια ορισμένη γωνία ως προς το υπό μελέτη αντικείμενο. Και στους δύο προαναφερθέντες τύπους ακροδεκτών ο κρύσταλλος χρησιμοποιείται και για την εκπομπή και για την υποδοχή των ηχητικών παλμών. Ένας τρίτος τύπος περιλαμβάνει δύο κρυσταλλικές μονάδες που είναι διαχωρισμένες η μια από την άλλη και ηλεκτρικά και ακουστικά και από τις οποίες η μια μόνο εκπέμπει και η άλλη μόνο δέχεται τους ηχητικούς παλμούς. Ο τύπος αυτός καλείται TR ακροδέκτης (πομπός - δέκτης - ακροδέκτης) ή ακροδέκτης δίδυμου κρυστάλλου και λόγω της μορφής και της λειτουργίας του χρησιμοποιείται για τον έλεγχο λεπτών υλικών ή για τον προσδιορισμό ελαττωμάτων του υλικού κοντά στην επιφάνεια του αντικειμένου που μελετάται.



Εικόνα 14 Κατασκευή και Λειτουργία Ακροδέκτη

2.4.3 Χαρακτηριστικά των ακροδεκτών

Δεν είναι μόνο το στοιχείο επιβράδυνσης αλλά όλα τα συστατικά της κρυσταλλικής μονάδας που προσδιορίζουν τον μηχανισμό της ταλάντωσης. Αν ο κρύσταλλος διεγερθεί, λόγω εφαρμογής διαφοράς δυναμικού εναλλασσόμενου ρεύματος, ώστε να αρχίσουν ταλαντώσεις θα ταλαντωθεί με την συχνότητα της διέγερσης. Το πλάτος (μέγιστη μεταβολή του πάχους) εξαρτάται, κατά μεγάλο βαθμό



από την συχνότητα της διέγερσης. Για τιμές που πλησιάζουν την συχνότητα συντονισμού f_0 το πλάτος φθάνει σε ένα μέγιστο (κατάσταση συντονισμού).

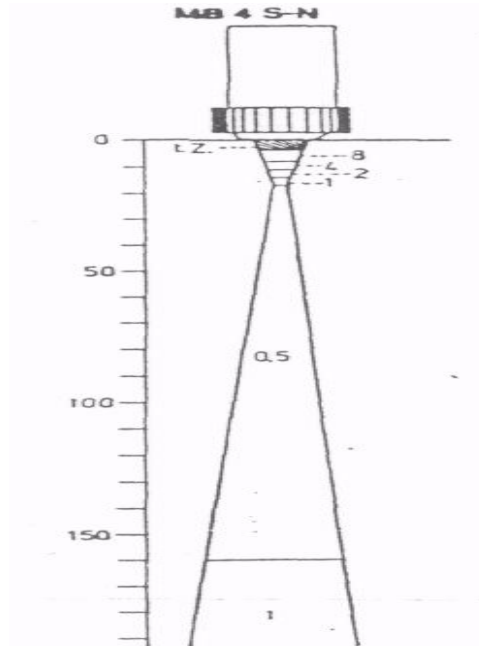
Στην κατάσταση του συντονισμού όσο μικρότερη είναι η επιβράδυνση τόσο μεγαλύτερο είναι, το πλάτος και πιο στενή η καμπύλη συντονισμού. Έτσι ένας μικρός συντελεστής επιβράδυνσης μπορεί να δώσει υψηλή πίεση ήχου και έτσι προκύπτει μεγάλη ευαισθησία του συστήματος ελέγχου. Το μειονέκτημα των μικρών συντελεστών επιβράδυνσης είναι οι παλμοί μακρού ήχου που σαν αποτέλεσμα έχουν το ότι μακρά ηλεκτρικά σήματα πρέπει να εκτιμηθούν. Αυτά τα μακρά ηλεκτρικά σήματα έχουν σαν αποτέλεσμα την μικρή ικανότητα διαχωρισμού του ολικού συστήματος ελέγχου. Τα σήματα από δύο ανακλαστές τοποθετούμενους ο ένας κοντά στον άλλο δεν διαχωρίζονται δηλαδή και οι δύο ανακλούν μόνο ένα πλατύ σήμα. Σύμφωνα με τα παραπάνω ένας συμβιβασμός πρέπει να γίνει ανάμεσα στη μεγάλη ευαισθησία και στην ικανοποιητική ικανότητα **διαχωρισμού**.

Στην περίπτωση μιας ορισμένης δοσμένης επιβράδυνσης η ικανότητα διαχωρισμού είναι δυνατόν να βελτιωθεί με αύξηση της συχνότητας, μολονότι πρέπει να δεχθούμε μια μεταβατική ελάττωση της ευαισθησίας εξαρτώμενη από το χρόνο.

Σύμφωνα με την εφαρμογή που θα έχουν, κατασκευάζονται ακροδέκτες με διαφορετικές επιβραδύνσεις και άρα και διαφορετική ικανότητα διαχωρισμού. Στη σύνδεση αυτή διακρίνονται 3 διαφορετικοί τύποι επιβράδυνσης:

- Στην κατηγορία **ακροδεκτών μέσης επιβράδυνσης** ο κρύσταλλος μετά την διέγερση του μεταφέρει ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ταλαντώσεων. Αυτό οδηγεί **σε μήκος παλμού** ανάλογο του αριθμού ταλαντώσεων.
- Στους **ακροδέκτες μεγάλης επιβράδυνσης** ο παλμός συνιστάται μόνο από λίγες (2 ή 4) ταλαντώσεις.
- Οι ακροδέκτες **κύματος δόνησης** έχουν τόσο μεγάλες επιβραδύνσεις ώστε ο κρύσταλλος μεταφέρει μισή ταλάντωση μόνο ή μια πλήρη ταλάντωση (μη περιοδική επιβράδυνση).

Ο αριθμός των διαθέσιμων τύπων ακροδεκτών δείχνει ότι ανάλογα με το κάθε πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στην πράξη και πρέπει να επιλυθεί, θα πρέπει να επιλεγθεί ο κατάλληλος ακροδέκτης. Κατά την εκλογή του ακροδέκτη πρέπει πρώτα από όλα να γνωρίζουμε το υπό μελέτη αντικείμενο με τα αναμενόμενα ελαττώματα και να συγκρίνουμε τους ακροδέκτες που έχουμε στην διάθεση μας βάσει του σχήματος της ακτίνας του ήχου και της **χαρακτηριστικής ευαισθησίας**.



Εικόνα 15 Χαρακτηριστικά Ακροδεκτών

Η χαρακτηριστική ευαισθησία εξαρτάται από το σχήμα της ακτίνας του ήχου, την ικανότητα διαχωρισμού και το ίδιο το αντικείμενο που μελετάται. Το μήκος του αρχικού παλμού καθορίζει την **νεκρή ζώνη**, δηλαδή την περιοχή ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του αντικειμένου όπου ανακλαστές δεν μπορούν να προσδιοριστούν. Η ευαισθησία μεγαλώνει αυξανόμενης της αποστάσεως και φθάνει στην μεγαλύτερη τιμή στην εστία της ακτίνας του ήχου, δηλαδή στην απόσταση ενός μήκους κοντινού πεδίου εκτός και αν η νεκρά ζώνη ξεπερνά αυτή την περιοχή.

Πίσω από την εστία η ακτίνα του ήχου αποκλίνει. Η πίεση του ήχου ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης και έτσι, η ευαισθησία ελαττώνεται επίσης. Επιπλέον, μια υπολογίσιμη αραίωση του ήχου στο υλικό μπορεί να ελαττώσει περαιτέρω την ευαισθησία και σαν επακόλουθο τον προσδιορισμό ελαττώματος.

Μια κατάλληλη παρουσίαση της χαρακτηριστικής ευαισθησίας, που λαμβάνεται υπ' όψη κατά την εκλογή του ακροδέκτη, δίνεται στο **Ηχόγραμμα**. Σ' αυτό το **ηχόγραμμα** η ικανότητα εξομάλυνσης ελαττωμάτων αναφοράς ορισμένων μεγεθών, σημειώνεται στις ακτίνες του ήχου των πιο συνηθισμένων ακροδεκτών.

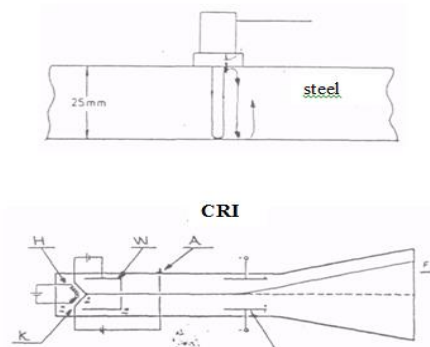
2.4.4 Συντήρηση και έλεγχος των ακροδεκτών



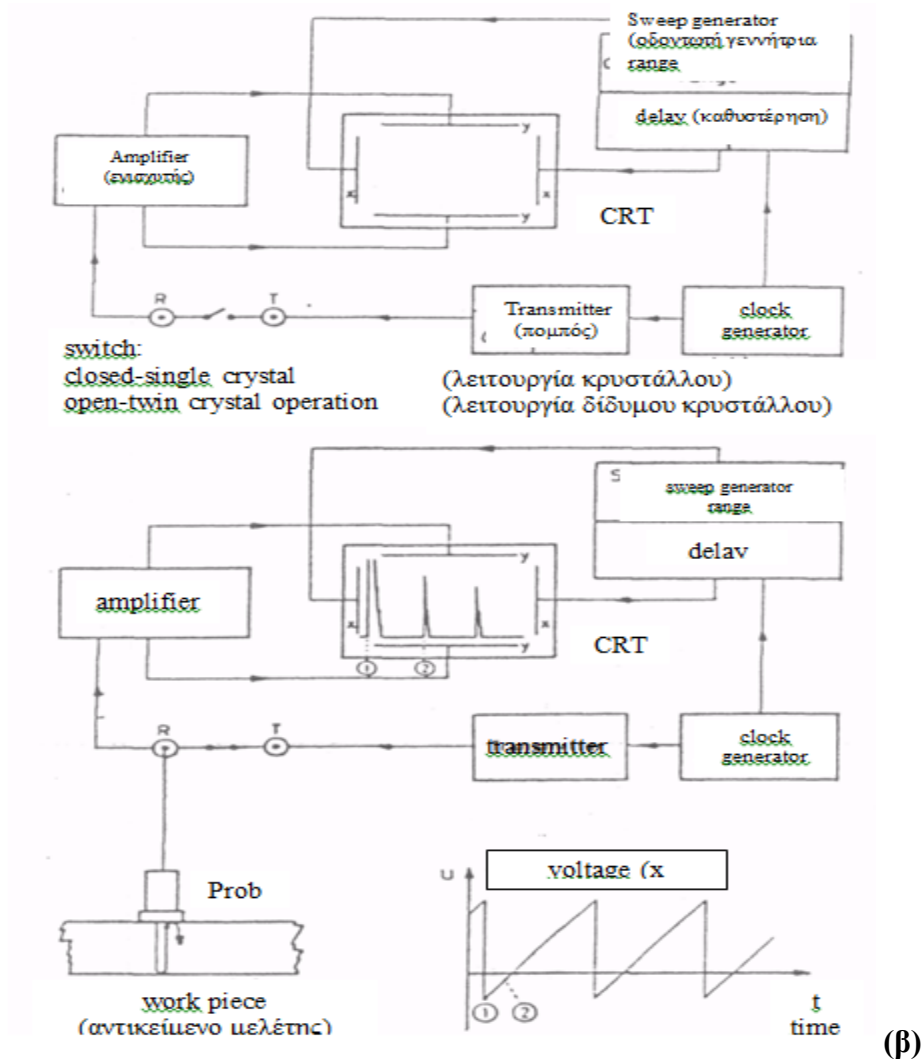
Κατά τον έλεγχο με υπερήχους με άμεση επαφή ο ακροδέκτης συνδέεται στην επιφάνεια του αντικείμενου με ένα συζευκτήρα λόγω του ότι τα κύματα των υπερήχων δεν μεταδίδονται στο κενό του αέρα ανάμεσα στον ακροδέκτη και στο αντικείμενο. Το αντικείμενο μελετάται εξετάζοντας με προσοχή την επιφάνεια του χρησιμοποιώντας τον ακροδέκτη. Έτσι η φάση σύζευξης του ακροδέκτη υπόκειται σε φθορά και ο χειριστής πρέπει να προσέξει ώστε ο κρύσταλλος του ακροδέκτη να μην φθαρεί. Η φθορά των ακροδεκτών μπορεί να ελαττωθεί χρησιμοποιώντας ανταλλάξιμες προστατευτικές μεμβράνες οι οποίες όμως ελατώνουν την ευαισθησία και πλαταίνουν τους παλμούς. Επίσης διατίθενται ακροδέκτες με ιδιαίτερα σκληρή κεραμική προφυλακτική πλάκα. Αν το σώμα καθυστέρησης ενός ακροδέκτη έχει φθαρεί μέχρι τον κρύσταλλο, ο ακροδέκτης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέον για ελέγχους.

Δυνατές δονήσεις όπως το πέσιμο του ακροδέκτη μπορούν να οδηγήσουν στο σπάσιμο του κρυστάλλου, θερμοκρασίες υπερβαίνουσες την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας που συνίσταται, μπορούν επίσης να καταστρέφουν τον ακροδέκτη μια που στην περίπτωση αυτή οι συνδέσεις προσκόλλησης μέσα στον κρύσταλλο και το σώμα καθυστέρησης ή τον κρύσταλλο και τα στοιχεία επιβράδυνσης σπάνε. Οι ίδιοι οι κρύσταλλοι υφίστανται μια διαδικασία παλαιώσης (γήρανσης) καθώς η πόλωση του κρυστάλλου μειώνεται βαθμιαία.

Εκτός από την προσεκτική μεταχείριση των ακροδεκτών ο έλεγχος τους έχει ιδιαίτερη σημασία (Εικ.16). Χρησιμοποιώντας ένα ανιχνευτή ελαττωμάτων Με υπερήχους και ένα κατάλληλα όργανο διαβάθμισης τα χαρακτηριστικά των ακροδεκτών μπορούν να ελεγχθούν εύκολα έτσι ώστε ο χειριστής των υπερήχων μπορεί να βεβαιωθεί γρήγορα αν ένας ορισμένος ακροδέκτης παράγει τις ορισμένες τιμές ή αν είναι ελαττωματικός.



(α)



Εικόνα 16 Συντήρηση & Έλεγχος Ακροδεκτών

2.5 Συσσκευή Υπερήχων

2.5.1 Αρχή λειτουργίας συσκευής υπερήχων

Μέχρι στιγμής γνωρίζουμε ότι με τη βοήθεια του ακροδέκτη μπορούμε να μεταδώσουμε ηλεκτρονικούς παλμούς μέσα στο αντικείμενο που μελετάμε. Αν αυτό έχει δύο επίπεδες παράλληλες επιφάνειες, ο ηχητικός παλμός θα ανακλασθεί στην επιφάνεια απέναντι στον ακροδέκτη και θα επιστρέψει στο πομπό.



Το ενδιαφέρον μας συγκεντρώνεται στην μέτρηση του χρόνου μετάδοσης του παλμού.

Παρατίθεται στα κάτωθι ένα παράδειγμα που θα δώσει μια ιδέα της τάξης μεγέθους αυτών των χρόνων:

- Ένας ακροδέκτης ευθύγραμμης ακτίνας μεταδίδει ένα παλμό ήχου (διαμήκης κύμα) κάθετα στην επιφάνεια σε ένα κομμάτι ατσάλι πάχους 25mm. Η προς και από πορεία του ήχου είναι $W = 50\text{mm}$. Η ταχύτητα του ήχου στο ατσάλι για διαμήκη κύματα είναι $C_L = 5920\text{ m/s}$. Από αυτό έπεται ότι

$$t = \frac{W}{C_L} = \frac{50_{\text{mm}}}{5920_{\text{m/s}}} = \frac{0,5_{\text{m}}}{5920_{\text{m/s}}} = 8,4 \times 10^{-6}\text{sec} = 8,4\mu\text{ sec}$$

Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρός για να μετρηθεί μηχανικά. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε ένα σωλήνα καθοδικής ακτίνας ή ένα BRAUN σωλήνα σαν συσκευή μέτρησης. Ο σωλήνας BRAUN περιέχει ένα θερμοστή με μορφή σπειρώματος (H) που πυρακτώνει την κάθοδο και τα "αποσπώμενα" ηλεκτρόνια επιταχύνονται από μια διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου K και ανόδου A. Το αποτέλεσμα είναι μια ακτίνα ηλεκτρονίων.

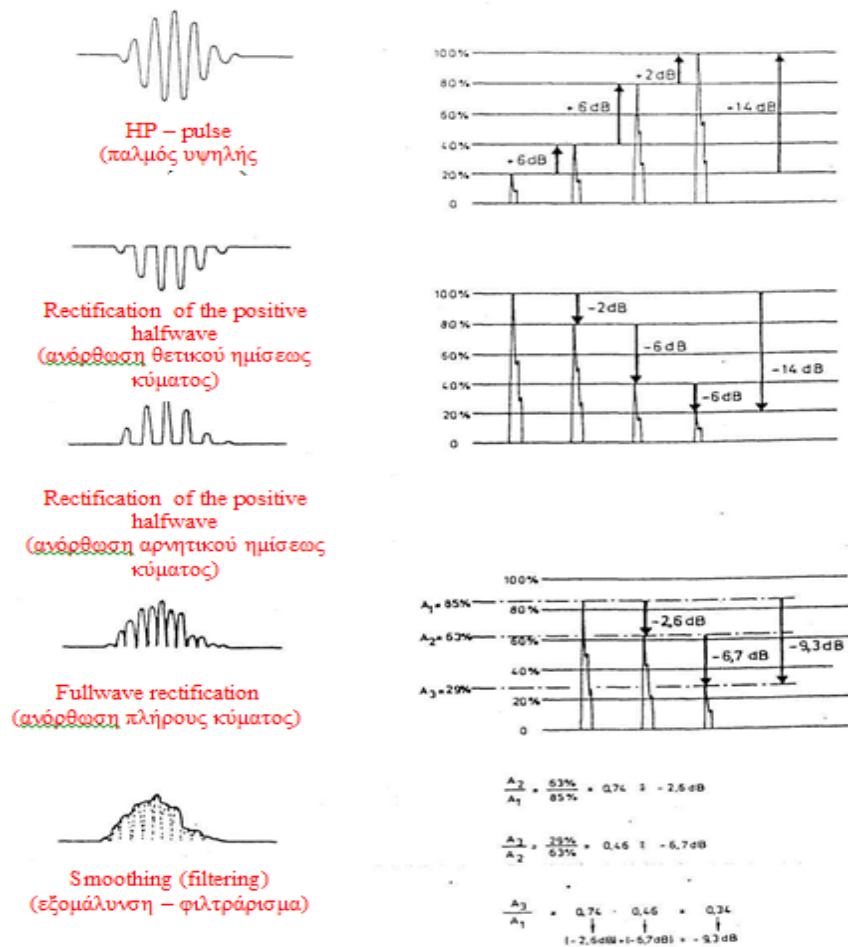
Η διαφορά δυναμικού στο κύλινδρο WEHNELT (W) συγκεντρώνει την ακτίνα ηλεκτρονίων και έτσι την κάνει να φαίνεται στην φθορίζουσα οθόνη F σαν μια φωτεινή κηλίδα. Καθώς τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν προς την CRT οθόνη περνούν από δύο ζεύγη παρεκκλιόμενων πλακών που είναι τοποθετημένες κάθετα το ένα προς το άλλο (το διάγραμμα δείχνει μόνο 1 ζεύγος πλακών για καλύτερη ευκρίνεια). Εάν εφαρμοσθεί διαφορά πίσω τοιχώματος πάνω στην οθόνη είναι μέτρο του χρόνου διάδοσης του παλμού υπερήχων και της φωτεινής κηλίδας πάνω στην οθόνη, είναι επίσης μέτρο του πάχους του αντικειμένου που μελετάμε.

Οι παλμοί που μετατοπίζονται πάνω στην CRT οθόνη δεν αντιστοιχούν στο σχήμα του παλμού υπερήχων που εκπέμπεται ή γίνεται δεκτός από τον κρύσταλλο. Αυτή η αλλαγή στο σχήμα του παλμού οφείλεται σε ηλεκτρική λειτουργία. Ο παλμός που ταξιδεύει μέσα σε ένα αντικείμενο είναι ένα κύμα που αποτελείται από ένα περιορισμένο αριθμό ταλαντώσεων που αναπαράγονται μόνες τους. Αν ένας τέτοιος (ανακλώμενος) παλμός επιστρέψει στον κρύσταλλο τότε παράγεται ένας ηλεκτρικός παλμός υψηλής συχνότητας που είναι ισοδύναμος με την πορεία του παλμού υπερήχων. Μόνο αυτός ο ηλεκτρικός παλμός μπορεί να επεξεργασθεί περαιτέρω ηλεκτρονικά.



Σαν πρώτο βήμα, ο παλμός υψηλής συχνότητας ανορθώνεται. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα από τους ακόλουθους (3) τρόπους (Εικ.17):

- Ανόρθωση του θετικού ημίσεως κύματος.
- Ανόρθωση του αρνητικού ημίσεως κύματος.
- Ανόρθωση του πλήρους κύματος.



Εικόνα 17 Τρόποι Ανόρθωσης Συχνότητας

Ποιος τύπος ανόρθωσης πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία του παλμού υψηλής συχνότητας εξαρτάται από τον τύπο της συσκευής, αλλά αυτό είναι δευτερευούσης σημασίας. Η περαιτέρω επεξεργασία των ανορθωμένων παλμών αναφέρεται στην **εξομάλυνση** (συναντάται και με τον όρο **φιλτράρισμα**) σύμφωνα με την οποία ατομικά ημίσεα κύματος απορροφώνται το ένα από το άλλο έτσι ώστε μόνο οι κόμβοι με ψηλές συχνότητες να απομένουν. Αυτά είναι τα φωτεινότερα βήματα που



μπορούν να αναγνωρισθούν σε ένα παλμό μετατοπισμένο πάνω στην οθόνη CRT. Τα σήματα που παράγονται δημιουργούν απότομες πλευρές αυξανόμενης αντήχησης που μπορούν εύκολα να διαβασθούν.

Αυτοί οι ηλεκτρικοί παλμοί πριν να εμφανισθούν σαν αντήχηση πάνω στην CRT οθόνη, έχουν μεγεθυνθεί αναλογικά. Ο ενισχυτής περιλαμβάνει ένα ρυθμιζόμενο αραιωτή με τον οποίο τα πλάτη της αντήχησης μεταβάλλονται ευρέως επί της οθόνης.

2.5.2 Ενισχυτής

Ο σχετιζόμενος έλεγχος είναι ο **έλεγχος αύξησης** που ονομάζεται και dB-έλεγχος γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταβάλει την μεγέθυνση σε καθορισμένες dB μονάδες. Τα μοντέρνα όργανα είναι συχνά εφοδιασμένα με περισσότερους του ενός ελέγχους αύξησης - ένα για την ρύθμιση μεγάλων μεταβολών αύξησης (π.χ. 20 dB βήματα), ένα για την ρύθμιση μικρότερων βημάτων αύξησης (π.χ. 1 ή 2 dB), και τέλος ένα για συνεχή ρύθμιση. Μεταβολές αύξησης σε dB μονάδες σχετίζονται με την αναλογία δύο τιμών, π.χ. τα πλάτη αντήχησης μετατοπισμένης επί της CRT οθόνης (Εικ. 18). Η διαφορά αύξησης ΔV σε dB υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$\Delta V = 20 \log \frac{A_2}{A_1}$$

όπου ΔV : διαφορά αύξησης

A_1 : πλάτος ήχους 1

A_2 : πλάτος ήχους 2

Η μονάδα dB είναι λογαριθμική μονάδα και έχει σχέση με τον λόγο δύο ποσοτήτων και χρησιμοποιείται σε πολλά πεδία της τεχνικής μέτρησης.

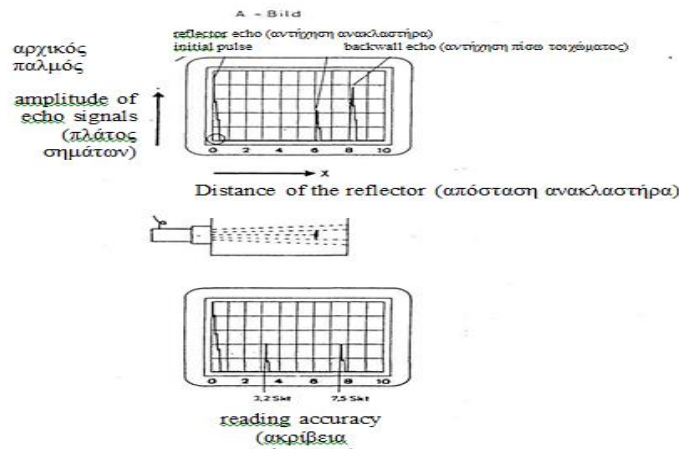
Τα πλεονεκτήματα της dB μονάδος είναι τα εξής:

α) Μεγάλοι λόγοι διαφοράς μπορούν να δοθούν σε μικρούς αριθμούς,

π.χ. 1000:1 = 60dB

1.000.000:1 = 120dB

β) Μια αντιστροφή των λόγων διαφοράς δυναμικού απαιτεί μοναχά αλλαγή πρόσημου, π.χ.



Εικόνα 18 Διαδικασία Ενίσχυσης

Επιπλέον:

I. Σφάλμα δεσμού

Οι απομένοντες δεσμοί υπέρηχων μίας αντήχησης μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ακρίβεια. Ανάλογα με την ενίσχυση που έχει ρυθμιστεί ένας τέτοιος δεσμός υπέρηχων μπορεί να λάβει χώρα από τον χρόνο που χρησιμοποιείται σαν βάση η μπορεί να παραμείνει αόρατος κάτω από τον χρόνο βάσης της οθόνης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση της βάσης της αντήχησης πάνω στην οθόνη αλλάζοντας την ενίσχυση. Για να αποφύγουμε αυτά τα δεσμικά σφάλματα πρέπει μέσω κατάλληλης ρύθμισης της αύξησης να εξασφαλιστεί ότι πλέον δεσμοί δεν συναντώνται πάνω από τον χρόνο βάσης, ούτε πέφτουν κάτω από αυτόν.

II. Παραμόρφωση οφειλόμενη στη γεωμετρία της CRT οθόνης

Κατ' αρχήν ένας σωλήνας καθοδικής ακτίνας λειτουργεί σαν ένα όργανο μετρητής. Το ισοδύναμο του μετρητή είναι η δέσμη ηλεκτρονίων (καθοδική ακτίνα) την οποία μπορούμε να φανταστούμε ότι είναι τοποθετημένη περιστροφικά ανάμεσα στα δύο ζεύγη παρεκκλινόμενων πλακών. Η κλίμακα ενός μετρητή είναι τοποθετημένη κυκλικά γύρω από το κέντρο περιστροφής του μετρητή σύμφωνα με την κυκλική κίνηση του άκρου του μετρητή. Επίσης, η CRT οθόνη μπορεί να έχει και αυτή μια τέτοια καμπυλότητα όμως η επίπεδη επιφάνεια της προκαλεί μια παραμορφωμένη παρουσίαση η οποία στο κέντρο της οθόνης είναι μηδενική αλλά αυξάνει προς το άκρο της οθόνης. Με τον τρόπο αυτό το σφάλμα μέτρησης που εξαρτάται από την γεωμετρία επηρεάζει την ακρίβεια που διαβάζουμε κύρια στα άκρα της οθόνης.

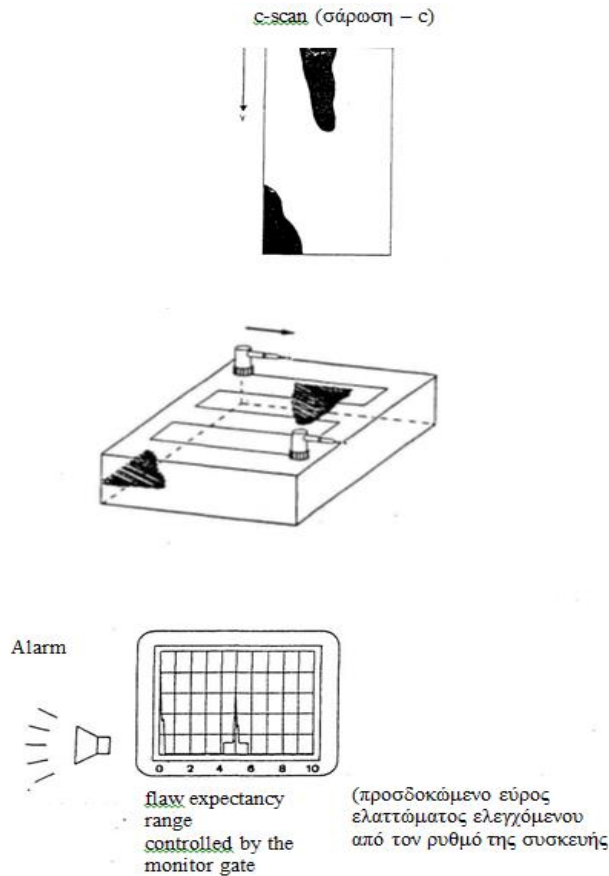
2.5.3 Αναπαράσταση σάρωσης τύπου B



Ιδίως για ημί ή πλήρως αυτόματους ελέγχους, η τεχνική ελέγχου με υπέρηχους χρησιμοποιεί ειδικά όργανα που επιτρέπουν ένα ιδιαίτερο τύπο παρουσίασης των αποτελεσμάτων του ελέγχου. Τα όργανα με αναπαράσταση σάρωσης τύπου Β παρουσιάζουν μια κατά μήκος τομή του αντικειμένου που μελετάμε πάνω στην οθόνη, μετά την κίνηση του ακροδέκτη στην τροχιά σάρωσης που κινείται δια μέσου του αντικειμένου που μελετάμε. Η κίνηση του ακροδέκτη παρουσιάζεται κατά κύριο λόγο στον άξονα Χ ενώ η απόσταση των ανακλαστήρων παρουσιάζεται στον άξονα Υ.

2.5.4 Αναπαράσταση σάρωσης τύπου C

Αν ο ολικός όγκος ενός αντικειμένου πρόκειται να μελετηθεί τότε είναι αναγκαίο να σαρωθεί τουλάχιστον μια επιφάνεια τελείως (Εικ.19). Για παράδειγμα, μία αυτόματη μηχανή ελέγχου πλάκας σαρώνει την πλάκα χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο αριθμό ανακλαστήρων και μια ελικοειδή τροχιά σάρωσης. Τα αποτελέσματα του ελέγχου μπορούν έπειτα να παρουσιασθούν μέσω της αναπαράστασης σάρωσης τύπου C κατά την οποία κανονικά χρησιμοποιείται ένα Χ-Υ μηχανήμα εγγραφής ή ένας εκτυπωτής. Το αντικείμενο υπό μελέτη παριστάνεται σε μια προοπτική του πάνω μέρους στην οποία τα ελαττωματικά μέρη μπορούν κατόπιν να σημειωθούν σε φυσικό μέγεθος. Η χρήση εκτυπωτών επιτρέπει την ένδειξη περαιτέρω πληροφοριών (π.χ. βάθος των ανακλαστήρων, τα πλάτη αντήχησης) με την βοήθεια διαφόρων συμβόλων.



Εικόνα 19 Αναπαράσταση σάρωσης τύπου C

2.5.5 Λειτουργία της συσκευής ανίχνευσης

Στην περίπτωση χειροκίνητου ελέγχου χρησιμοποιώντας ένα ανιχνευτή ελαττωμάτων με υπέρηχους, ο χειριστής σαρώνει το αντικείμενο που μελετάται με τον ακροδέκτη και ταυτόχρονα παρατηρεί την CRT οθόνη, συγκεντρωμένος με τον τρόπο αυτό σε ενδείξεις αντήρησης που προέρχονται από το εσωτερικό του αντικειμένου ή, με άλλα λόγια, από το εύρος προσδοκίας του ελαττώματος. Οι εξαρτώμενες από την γεωμετρία ενδείξεις όπως η αντήρηση πίσω τοιχώματος ή η αντήρηση από τρύπες ή άκρες πρέπει να αναγνωρισθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί μια σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων του ελέγχου. Πολλά όργανα είναι εφοδιασμένα με μια λειτουργία συσκευής ανίχνευσης που διευκολύνει την παρατήρηση του προσδοκώμενου εύρους ελαττώματος. Η αρχή και το τέλος του προσδοκώμενου εύρους ελαττώματος μπορεί να σημειωθεί με την βοήθεια μιας βαθμίδας στην γραμμή βάσης ή με μια πρόσθετη παύλα (μπάρα) που παρουσιάζεται, πάνω στην οθόνη. Αν τώρα απελευθερώνεται ένα ορατό και/ή ακουστικό σήμα συναγερμού. Το κατώφλι ανταπόκρισης της συσκευής ανίχνευσης ποικίλλει και αυτό έτσι ώστε μια ένδειξη



αντήχησης απελευθερώνει τον συναγερμό μόνο όταν έχει φθάσει σ' ένα συγκεκριμένο ύψος.

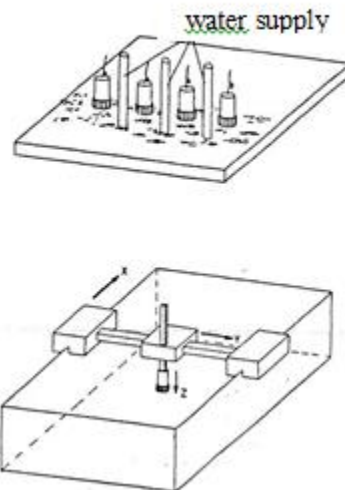
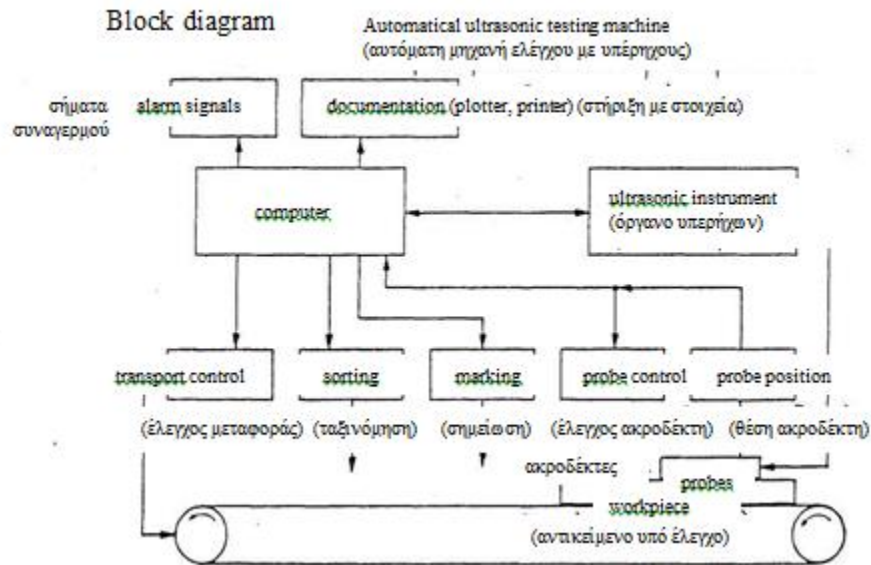
Εκτός από την λειτουργία της συσκευής ανίχνευσης, τα περισσότερα από τα όργανα αυτά διαθέτουν ένα εξάρτημα για την καταγραφή των αποτελεσμάτων, που χρησιμοποιείται για την περαιτέρω επεξεργασία των πληροφοριών.

Μόλις εμφανισθεί μια αντήχηση στο κατώφλι της συσκευής ελέγχου, μια διαφορά δυναμικού τροφοδοτείται στο εξάρτημα καταγραφής των αποτελεσμάτων, που είναι ανάλογη του ύψους της αντήχησης και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως για αυτόματη καταγραφή. Με την βοήθεια αυτής της συσκευής ελέγχου και ενός πίνακα τοποθετημένου μέσα στον ακροδέκτη, οι σαρώσεις τύπου C των αντικειμένων προς μελέτη μπορούν να αποτυπωθούν εύκολα σε ένα X – Y καταγραφέα. Μπορούν να θεωρηθούν σαν εκθέσεις ελέγχου και να καταχωρηθούν.

2.5.6 Μηχανισμός ελέγχου

Όλες οι περιπτώσεις όπου συνεχώς μεγάλες ποσότητες από ίσα μέρη ελέγχονται είναι κατάλληλες για μηχανές αυτομάτου ελέγχου. Στην ουσία αποτελούνται από ένα ή περισσότερους ακροδέκτες που είναι συνεζευγμένοι με το δείγμα υπό έλεγχο με μια μονάδα ελέγχου και μετακινούνται κατά μήκος του υπό έλεγχο αντικειμένου σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο σχέδιο σάρωσης. Τα σήματα υπερήχων επεξεργάζονται από την μονάδα εκτίμησης (π.χ. ένα ανιχνευτή ελαττωμάτων με υπέρηχους) και αν διατίθεται μια CRT οθόνη τότε μετακινούνται επ'αυτής. Όλα τα στοιχεία (δεδομένα, data) που μετρήθηκαν τροφοδοτούνται σε ένα κομπιούτερ όπου επεξεργάζονται και εκτιμώνται περαιτέρω. Ταυτόχρονα στο κομπιούτερ τροφοδοτούνται πληροφορίες σχετικές με την θέση του ακροδέκτη. Η αναφορά (report) του ελέγχου παράγεται μέσω ενός εκτυπωτή. Ο υπολογιστής ελέγχει επιπρόσθετα το μηχάνημα που σημειώνει και ταξινομεί, το οποίο σημειώνει τα μέρη των αντικειμένων που μελετώνται όπου υπάρχουν ελαττώματα. Αντικείμενα υπό έλεγχο που έχουν μη αποδεκτά ελαττώματα απορρίπτονται. Ένα περαιτέρω καθήκον του υπολογιστή είναι να ελέγξει την μεταφορά του αντικειμένου και να στείλει σήμα για καθορισμένες συνθήκες ελέγχου (Εικ.20).

Στα παρακάτω περιγράφονται λίγα παραδείγματα για τους διάφορους τύπους εφαρμογών.



Εικόνα 20 Μηχανισμός Ελέγχου

I. Έλεγχος πλάκας

Ο έλεγχος πλάκας υπό μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιεί συχνά ένα αυτόματο έλεγχο στο τέλος της συνεχούς διαδικασίας που σημαίνει ότι η μηχανή έλεγχου βρίσκεται ολόκληρη ενσωματωμένη στην γραμμή παραγωγής. Για να επιτευχθεί μια ταχύτητα ελέγχου όσο γίνεται μεγαλύτερη, όλη η πλάκα μεταφέρεται κατά μήκος μιας σειράς από μερικούς ακροδέκτες με μια σταθερή ταχύτητα. Η σύζευξη κατά το μέγιστο μέρος γίνεται με πίδακες νερού έτσι ώστε οι ακροδέκτες δεν βρίσκονται σε άμεση επαφή με την πλάκα. Η ταχύτητα ελέγχου είναι περίπου



1m/sec. Τα ελαττώματα είναι σημειωμένα πάνω στην επιφάνεια της πλάκας και συγχρόνως καταγράφονται, σε μια αναφορά ελέγχου. Πλάκες που έχουν μικρότερες διαστάσεις και για τις οποίες οι ζητούμενες απαιτήσεις είναι μεγάλες π.χ. πλάκες αλουμινίου για την βιομηχανία αεροσκαφών, ελέγχονται χρησιμοποιώντας την τεχνική εμβάπτισης. Στην περίπτωση αυτή η πλάκα παραμένει ακίνητη και μια γέφυρα, που είναι τοποθετημένη πάνω από την δεξαμενή νερού, κινείται κατά μήκος όλου του μήκους της δεξαμενής (άξονας X). Η λαβή του ακροδέκτη που είναι στερεωμένη πάνω στη γέφυρα, κινείται επί του Y άξονα και ο ακροδέκτης μπορεί να κινηθεί μόνος του πάνω κάτω (άξονας Z). Η πλάκα είναι τελείως εμβαπτισμένη στο νερό και ο αδιάβροχος ακροδέκτης οδηγείται κατά μήκος της πλάκας σε μια ορισμένη απόσταση σαρώνοντας όλο το πλάτος της πλάκας στον άξονα Y. Για την ολοκλήρωση αυτής της ακολουθίας λειτουργιών η γέφυρα κινείται περαιτέρω σε μια καθορισμένη απόσταση και ο ακροδέκτης συνεχίζει να σαρώνει στην διεύθυνση του άξονα Y. Η είσοδος της συσκευής ανίχνευσης στο όργανο υπέρηχων ανιχνεύει το προσδοκώμενο εύρος ελαττώματος και ένας XY καταγραφέας ή ένας εκτυπωτής παράγει την αναφορά του ελέγχου. Μικρότερες δεξαμενές εμβάπτισης χρησιμοποιούνται για αντικείμενα ελέγχου που έχουν πολύπλοκα σχήματα. Στην περίπτωση αυτή η ακολουθία με την οποία έχουν τοποθετηθεί οι ακροδέκτες έχει προγραμματισθεί σύμφωνα με ένα ορισμένο σχέδιο. Εν τούτοις, μια μεγαλύτερη ταχύτητα ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί όταν οι φορητοί ακροδέκτες έχουν στερεωθεί και το αντικείμενο που μελετάται έχει τοποθετηθεί ανάμεσα τους, αλλά αυτή η μέθοδος είναι πρακτική μόνο όταν όλα τα αντικείμενα που πρόκειται να ελεγχθούν έχουν το ίδιο σχήμα.

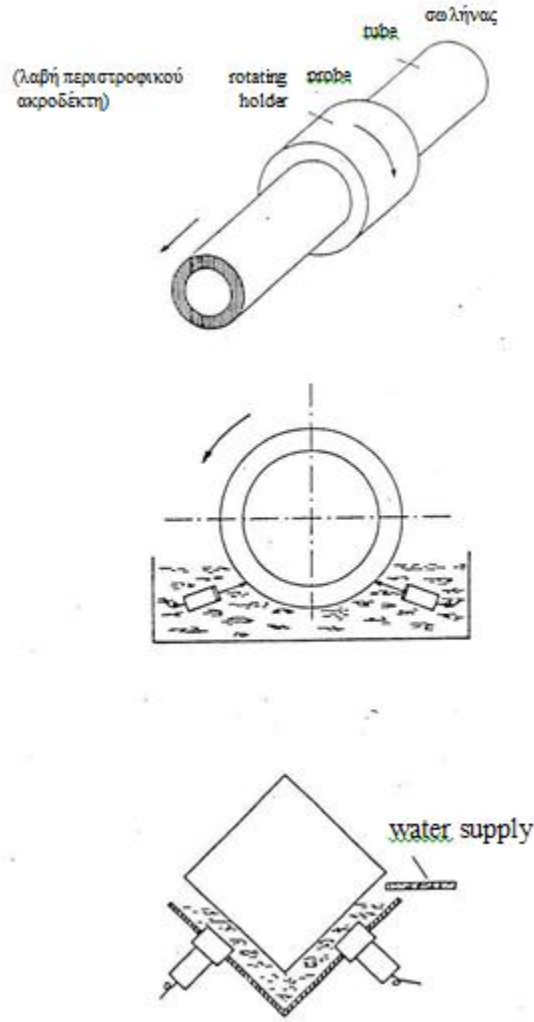
II. Έλεγχος σωλήνων

Σωλήνες με διάμετρο μέχρι περίπου 120mm ελέγχονται σε περιστροφικές μηχανές ελέγχου. Ένα σύστημα ελέγχου που περιλαμβάνει τους ακροδέκτες περιστρέφεται γύρω από το σωλήνα με μια μεγάλη ταχύτητα και ο σωλήνας καθώς μετατοπίζεται γραμμικά ελέγχεται σε μια σπειροειδή τροχιά σάρωσης. Το μέσο σύζευξης είναι το νερό. Αυτή η μηχανή ελέγχου πραγματοποιεί μια συνεχή μέτρηση του πάχους του τοιχώματος αλλά επίσης ανιχνεύει ελαττώματα τύπου ρωγμής στο εσωτερικό και στο εξωτερικό τοίχωμα του σωλήνα καθώς και ελαττώματα μέσα στο τοίχωμα. Η τεχνική περιστροφής δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σωλήνα που έχουν μεγάλες διαμέτρους.

Αυτοί ελέγχονται με την τεχνική μερικής εμβάπτισης. Οι ακροδέκτες είναι στερεωμένοι σε μια δεξαμενή που είναι κλεισμένη με ένα χείλος από καουτσούκ. Πετά



το γέμισμα της δεξαμενής με νερό, ο σωλήνας μεταφέρεται σπειροειδώς διαμέσου της δεξαμενής ενώ ελέγχεται.



Εικόνα 21 Έλεγχος Σωλήνων

III. Ράβδοι και βέργες

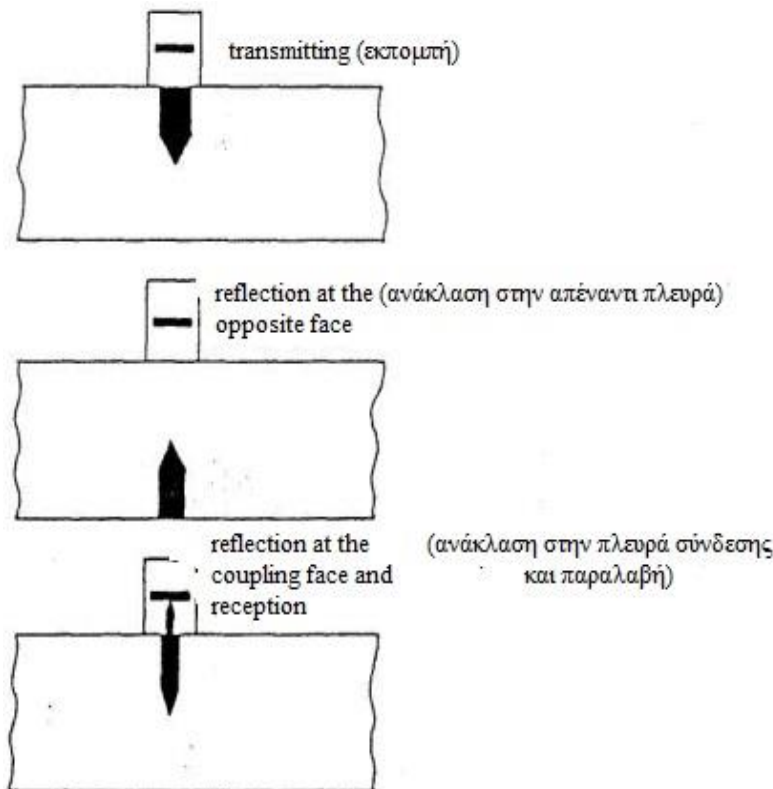
Η τεχνική περιστροφής βρίσκει εφαρμογή σε σφαιρικά υλικά με διαμέτρους μέχρι 120mm. Ένα τετράγωνο υλικό υπό έλεγχο κινείται κατά μήκος σταθερών ακροδεκτών που βρίσκονται σε σύζευξη στο υπό μελέτη αντικείμενο με νερό. Αν κατά τον έλεγχο χρησιμοποιούνται δύο ακροδέκτες τότε αυτά είναι αντισταθμισμένα κατά 90 επί της βέργας που μεταφέρεται προς τις κατευθύνσεις των άκρων. Έτσι είναι επίσης πιθανό να ανιχνευθούν ελαττώματα που Βρίσκονται υπό κλίση μέσα στη



βέργα. Αν απαιτείται ένας έλεγχος 100% το μηχάνημα που οδηγεί την βέργα είναι εφοδιασμένο με επιπλέον ακροδέκτες.

IV.Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις

Μεγάλες εγκαταστάσεις στην χημική βιομηχανία και την αυτοκινητοβιομηχανία απαιτούν τεχνικές ελέγχου οι οποίες διαφέρουν πολύ απ' αυτές που περιγράφηκαν πάρα πάνω. Ένα παράδειγμα για αυτό είναι ο εσωτερικός έλεγχος της μονάδας πίεσης του αντιδραστήρα των πυρηνικών σταθμών. Ο κεντρικός κύριος χειριστής που είναι εμβαπτισμένος στην πλήρη υγρού μονάδα πίεσης οδηγεί αρκετές κινητές λαβές ακροδεκτών στο εσωτερικό τοίχωμα και στο κάτω μέρος της μονάδας. Ο έλεγχος της μονάδας γίνεται οδηγώντας τον ακροδέκτη ή την ομάδα των ακροδεκτών σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο σχέδιο σάρωσης. Η κάθε μια από τις λαβές των ακροδεκτών μπορεί επίσης να τοποθετηθεί με την βοήθεια ενός χειροκίνητου τηλεχειριστή. Η θέση των ακροδεκτών ελέγχεται επί πρόσθετα μέσω τηλεοπτικής οθόνης και παρουσιάζεται στην συσκευή **ανίχνευσης**.



Εικόνα 22 Έλεγχος Βιομηχανικής διεργασίας



2.6 Μέθοδοι ελέγχου με υπέρηχους

Σήμερα χρησιμοποιείται, ο μη - καταστρεπτικός έλεγχος με υπέρηχους σε μια μεγάλη ποικιλία υλικών διαφορετικών συνθηκών επεξεργασίας και διαφορετικές γεωμετρίες. Για να εξετάσουμε ένα ορισμένο αντικείμενο για ορισμένο ελαττώματα είναι σημαντικό όχι μόνο να διαλέξουμε ένα κατάλληλο ακροδέκτη αλλά και την σωστή μέθοδο ελέγχου.

2.6.1 Έλεγχος με άμεση επαφή

Σχεδόν όλοι οι μη αυτόματοι έλεγχοι χρησιμοποιούν άμεση σύνδεση, π.χ. ο χειριστής κινεί τον ακροδέκτη με το χέρι σε άμεση επαφή πάνω από την επιφάνεια του αντικειμένου που εξετάζει. Η ακουστική σύνδεση του ακροδέκτη επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός μέσου σύζευξης (λάδι, νερό, γλυκερίνη, κόλλα ταπετσαρίας τοίχου κ.λπ.)

2.6.2 Έλεγχος ευθείας ακτίνας

Αν ένας ακροδέκτης που περιλαμβάνει ένα κρύσταλλο Χ-τομής συνδεθεί με ένα αντικείμενο, θα δημιουργηθεί ένας παλμός διαμήκους κύματος και θα εκπέμπει μέσα στο αντικείμενο. Οι ακροδέκτες ευθύγραμμης ακτίνας εκπέμπουν τον παλμό του ήχου κάθετα στην επιφάνεια του αντικειμένου μέσα στο υλικό.

Ο παλμός περνά δια μέσου του αντικειμένου και ανακλάται στην απέναντι πλευρά. Αν το αντικείμενο έχει παράλληλες επίπεδες επιφάνειες τότε ο ανακλώμενος παλμός επιστέφει στον ακροδέκτη και δημιουργεί ένα σήμα (αντήχηση πίσω τοιχώματος) στην CRT οθόνη του οργάνου. Μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας του ανακλώμενου ήχου επιστρέφει στον ακροδέκτη ενώ το μεγαλύτερο μέρος ανακλάται στην επιφάνεια και περνά για δεύτερη φορά μέσα από το αντικείμενο.

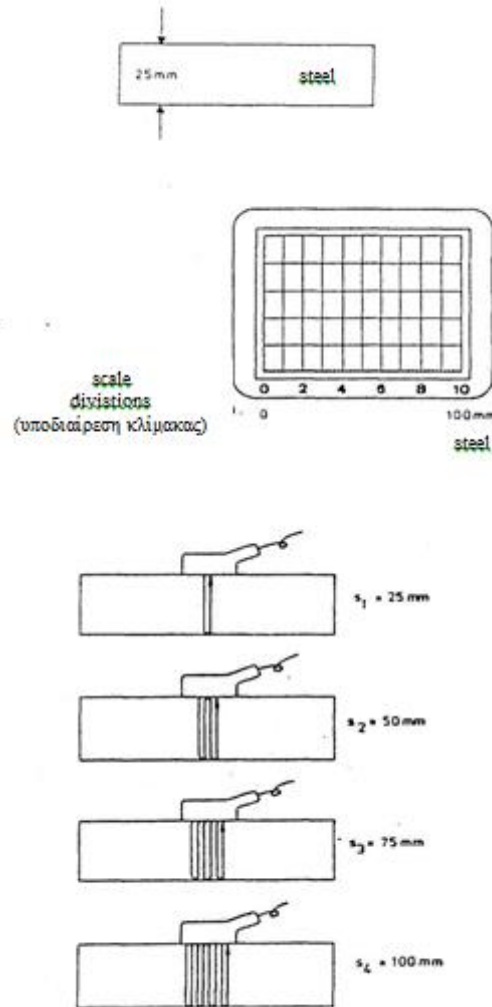
Αυτό δημιουργεί και άλλες αντηχήσεις πίσω τοιχώματος στην CRT οθόνη. Η ταχύτητα με την οποία η ακτίνα των ηλεκτρονίων ταξιδεύει κατά μήκος της CRT οθόνης από τα αριστερά προς τα δεξιά έχει καθοριστεί σύμφωνα με μια καθορισμένη αναλογία ως προς την ταχύτητα του ήχου στο αντικείμενο. Αν η αναλογία αυτή είναι γνωστή τότε το πάχος του αντικειμένου μπορεί να βρεθεί αμέσως από την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αντηχήσεις πίσω τοιχώματος επί της CRT οθόνης. Για τον καθορισμό της προαναφερθείσης αναλογίας ταχύτητας απαιτείται ρύθμιση του οργάνου.

2.6.2.1 Ρύθμιση

Μέσω της ρύθμισης είναι δυνατό να κατανεμηθεί το συνολικό πλάτος της οθόνης CRT σε ένα προκαθορισμένο εύρος απόστασης στο υπό έλεγχο υλικό (Εικ.23).



Αυτό το εύρος απόστασης ορίζεται ως το **εύρος ελέγχου**. Για την ρύθμιση χρησιμοποιούμε ένα επίπεδο παράλληλο σώμα ρύθμισης το οποίο έχει ένα γνωστό πάχος και πρέπει να είναι κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό με το αντικείμενο που ελέγχεται.



Εικόνα 23 Διαδικασία Ρύθμισης

Παράδειγμα:

Έστω ότι πρέπει να ρυθμιστεί ένα εύρος ελέγχου 0-100 mm για ατσάλι. Για το σκοπό αυτό έχουμε ένα επίπεδο παράλληλο σώμα ρύθμισης που έχει πάχος 25mm (Εικ.24). Το εύρος ελέγχου 0 – 100mm σημαίνει, ότι μια απόσταση 0 – 100mm ατσαλιού πρέπει να παρουσιαστεί στις 10 υποδιαιρέσεις της κλίμακας της CRT



οθόνης, δηλαδή η ελεγχόμενη περιοχή του αντικειμένου ξεκινά στην επιφάνεια και φθάνει ως 100mm βάθος. Αν το εύρος ελέγχου (TR) φθάνει έως 100mm τότε ακριβώς το 1/10 του εύρους ελέγχου μπορεί να κατανεμηθεί σε μια υποδιαίρεση της κλίμακας στην οθόνη ή με άλλα λόγια, 1 υποδιαίρεση κλίμακας αντιστοιχεί σε 10mm ατσάλι. Αυτή η τιμή είναι ο συντελεστής κλίμακας K και ορίζεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$K = \frac{TR_{mm}}{10_{\text{υποδιαιρ.κλιμ.}}}$$

Η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος που περνούμε από το σώμα ρύθμισης πάχους 25mm έρχεται από ένα βάθος 25mm θεωρούμε μόνο τις μονές αποστάσεις και όχι, τις αποστάσεις προς και από τις οποίες διανύει ο ήχος. Αυτή τη μόνη απόσταση την καλούμε **διαδρομή ακτίνας**, θεωρώντας την απόσταση προς και από αναφερόμαστε στο πραγματικό μονοπάτι που διανύει ο ήχος.

Ήδη γνωρίζουμε ότι η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος έχει ένα μονοπάτι ακτίνα $S_1 = 25\text{mm}$. Ο παλμός μόλις φθάσει στην επιφάνεια ανακλάται για μια φορά ακόμη και μετά από ένα πρόσθετο μονοπάτι ακτίνας 25mm, δημιουργεί την δεύτερη αντήχηση πίσω τοιχώματος. Η δεύτερη αντήχηση πίσω τοιχώματος έχει λοιπόν ένα μονοπάτι ακτίνας ίσο με $S_2 = 50\text{mm}$. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, με αποτέλεσμα μονοπάτια ακτίνας ίσα με $S_3 = 75\text{mm}$ και $S_4 = 100\text{mm}$. Όσον αφορά αυτό το παράδειγμα δεν ενδιαφερόμαστε για μεγαλύτερα μονοπάτια ακτίνας μια που θα υπερέβαιναν ήδη το προαναφερθέν εύρος ελέγχου.

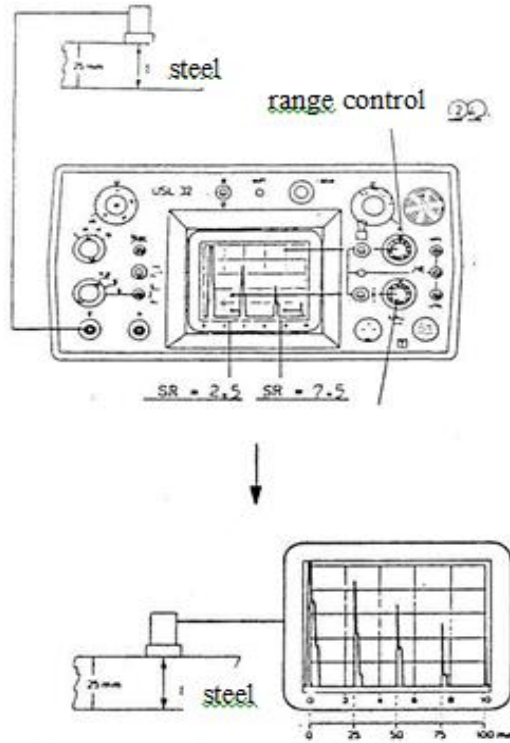
Αυτά τα μονοπάτια ακτίνας πρέπει τώρα να κατανεμηθούν στις θέσεις της κλίμακας SR σύμφωνα με το εύρος ελέγχου που επιλέχθηκε :

$$SR = \frac{S}{K}$$

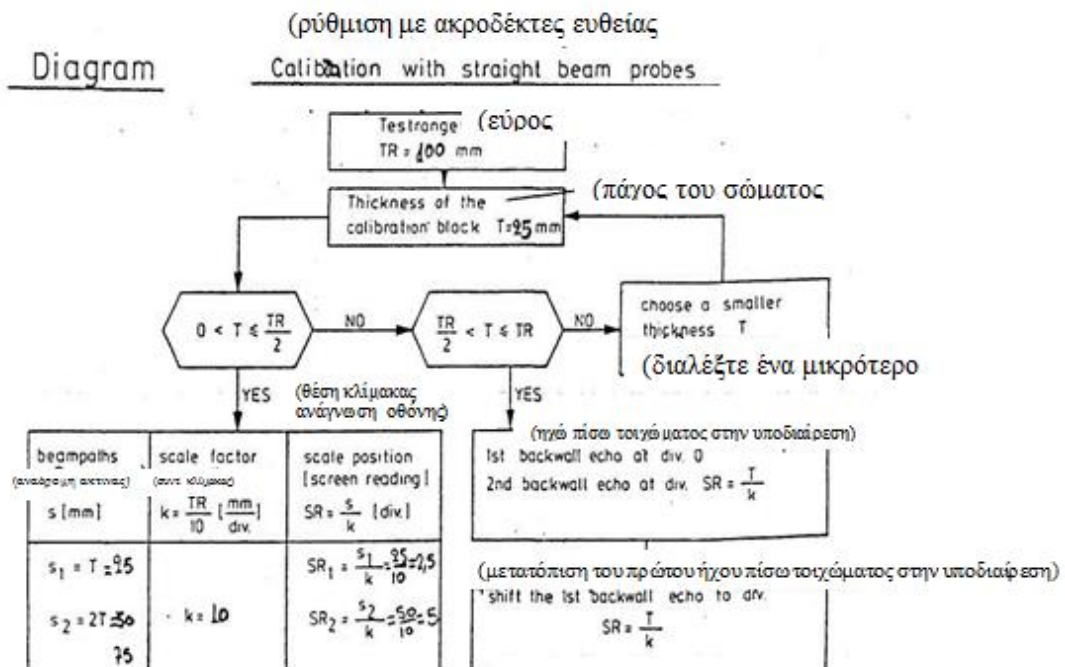
όπου, SR: θέση της κλίμακας (ανάγνωση οθόνης)

S: διαδρομή ακτίνας

K: συντελεστής κλίμακας



Εικόνα 24 Διαδικασία Ρύθμισης



Εικόνα 25 Διάγραμμα Ρύθμισης



Πίνακας 2 Παράμετροι Ρύθμισης

Αποστάσεις ήχου S_n	2.6.2.1.1 Συντελεστής κλίμακας K $K = \frac{TR_{mm}}{10 \text{ υποδιαίρ.}}$	Θέση κλίμακας SR
$S_1 = 25 \text{ mm}$	$10 \frac{\text{mm}}{\text{υποδιαίρ.}}$	2,5 υποδιαίρ.
$S_2 = 50 \text{ mm}$		5,0 υποδιαίρ.
$S_3 = 75 \text{ mm}$		7,5 υποδιαίρ.
$S_4 = 100 \text{ mm}$		10 υποδιαίρ.

Δύο από τις αντηχήσεις αυτές πρέπει να επιλεγούν σαν αντηχήσεις ρύθμισης. Αυτές οι δύο αντηχήσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατό περισσότερο γίνεται μακριά η μία από την άλλη, αλλά όχι μεταξύ των υποδιαίρέσεων της κλίμακας 0 και 1 ή μεταξύ των 9 και 10 (παραμόρφωση). Στο παράδειγμα μας η συνθήκη αυτή ικανοποιείται από την πρώτη και την τρίτη αντήχηση πίσω τοιχώματος.

Μετά από αυτή τη μαθηματική προετοιμασία μπορούμε τώρα να ξεκινήσουμε τη βασική διαδικασία ρύθμισης. Καθώς χειριζόμαστε τον ρυθμιστή εύρους ελέγχου προδιαγράφουμε εκ των προτέρων με σχετική ακρίβεια το εύρος ελέγχου. Με τον ρυθμιστή της χρονικής βάσης κινούμε τον αρχικό παλμό στο αριστερό άκρο της CRT οθόνης και τώρα μπορούμε να συνδέσουμε τον ακροδέκτη με το σώμα ρύθμισης. Πάλι με τον χειρισμό του ρυθμιστή της χρονικής βάσης φέρνουμε την αριστερή πλευρά της πρώτης αντήχησης ρύθμισης στην υπολογισμένη από πριν θέση της κλίμακας (στην περίπτωση αυτή στην 2,5 υποδιαίρεση της κλίμακας). Με τον ρυθμιστή έκτασης φέρνουμε την δεύτερη αντήχηση ρύθμισης στην υπολογισμένη θέση της κλίμακας (εδώ 7,5). Αυτές οι δύο διαδικασίες ρύθμισης επαναλαμβάνονται έως ότου κάθε αντήχηση βρίσκεται στην θέση της που έχει υπολογισθεί από πριν. Ο αρχικός παλμός βρίσκεται τώρα κάπου αριστερά της υποδιαίρεσης 0. Αυτή η μετατόπιση αντιστοιχεί στο πάχος της γραμμής καθυστέρησης του ακροδέκτη. Μια που είναι αδύνατο να προκαθορίσουμε την ακριβή θέση του αρχικού παλμού δεν πρέπει να τον χρησιμοποιήσουμε για την ρύθμιση. Το ακόλουθο διάγραμμα ρύθμισης δείχνει την μέθοδο αυτή όταν χρησιμοποιούνται ακροδέκτες ευθύγραμμης ακτίνας.

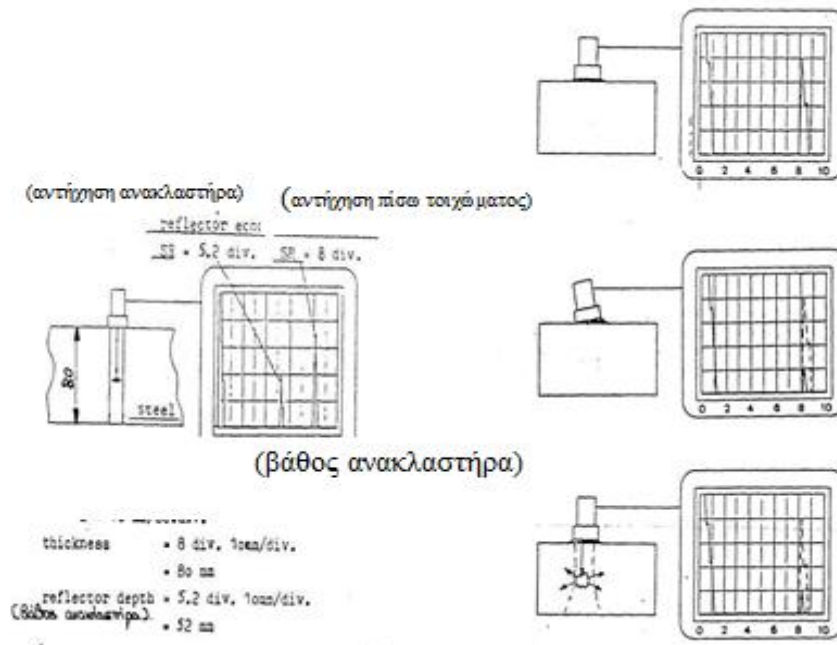
Από το ανώτερο διάγραμμα ρύθμισης (Εικ.25) μπορούμε να συμπεράνουμε 3 συνθήκες απαραίτητες για την ρύθμιση:



- Για την ρύθμιση απαιτούμε τουλάχιστον δυο αντηχήσεις.
- Ο αρχικός παλμός δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση.
- Το πάχος του σώματος ρύθμισης δεν πρέπει να υπερβαίνει το εύρος ελέγχου.

2.6.2.2 Προσδιορισμός θέσης σφαλμάτων

Για να ελέγξουμε το αντικείμενο συνδέουμε τον ακροδέκτη με την επιφάνεια του (Εικ.26). Αν έχουμε διαλέξει ένα κατάλληλο εύρος ελέγχου θα πάρουμε την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος στην οθόνη. Αν μια άλλη αντήχηση προηγείται της πρώτης αντήχησης πίσω τοιχώματος τότε αυτή η αντήχηση προέρχεται από ένα ανακλαστήρα στο αντικείμενο. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιούμε μόνο αυτό το εύρος πριν την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος γιατί στο εύρος μετά από αυτήν μπορεί να υπάρχουν δευτερεύουσες αντηχήσεις λόγω διαίρεσης εγκαρσίων κυμάτων και έτσι μιμήσεις ύπαρξης ανακλαστήρα στο αντικείμενο.



Εικόνα 26 Προσδιορισμός Θέσης Σφαλμάτων

Ο σκοπός του χειριστή είναι τώρα να προσδιορίσει ακριβώς την θέση του ανακλαστήρα. Κινώντας ελαφρά τον κινητό ακροδέκτη στην επιφάνεια του αντικείμενου η αντήχηση του ανακλαστήρα μπορεί να βελτιωθεί (ή να γίνει μέγιστη). Στην θέση του ακροδέκτη με τα μεγαλύτερο πλάτος αντήχησης ο ανακλαστήρας βρίσκεται ακριβώς στον κεντρικό άξονα της ακτίνας του ήχου, δηλαδή κατακόρυφα



κάτω από το κεντρικό σημείο του ακροδέκτη. Το τελευταίο στάδιο είναι να προσδιορίσουμε το ακριβές βάθος της θέσης του ανακλαστήρα.

Η θέση της κλίμακας SR της αντήχησης διαβάζεται από την αριστερή πλευρά της αντήχησης του ανακλαστήρα. Αν το σωστό εύρος ελέγχου έχει ρυθμιστεί, αυτή η θέση της κλίμακας SR αντιστοιχεί ακριβώς σε ένα ορισμένο μονοπάτι ακτίνας στον ανακλαστήρα και ως εκ τούτου στο βάθος του ανακλαστήρα κάτω από την επιφάνεια του αντικειμένου.

Το μονοπάτι της ακτίνας S υπολογίζεται από την ανάγνωση της θέσης της κλίμακας SR ως εξής:

$$S = K \cdot SR$$

όπου, S: η απόσταση του ήχου

K: ο συντελεστής κλίμακας

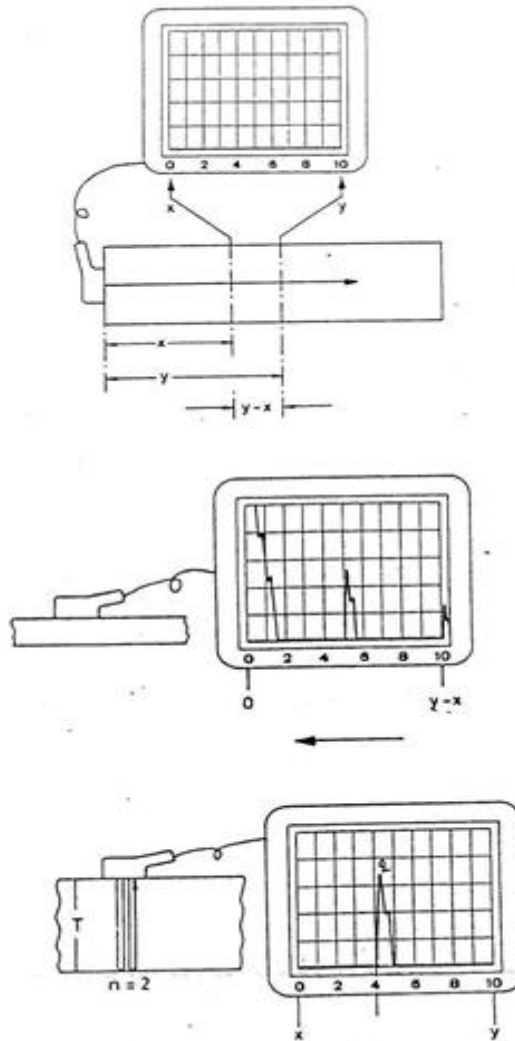
SR: η θέση της κλίμακας (ανάγνωση οθόνης)

Με την μέθοδο αυτή μπορούμε να σημειώσουμε το σημείο προβολής στην επιφάνεια του αντικειμένου και να βρούμε το βάθος του ανακλαστήρα. Το σημείο προβολής είναι, εκείνο το σημείο της επιφάνειας το οποίο βρίσκεται, ακριβώς κατακόρυφα πάνω από τον ανακλαστήρα.

Όταν ελέγχουμε ένα αντικείμενο είναι απαραίτητο να είναι ορατή στην οθόνη η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος για τους εξής τρεις λόγους:

- Μόνο τότε είναι δυνατά να σαρώσουμε το αντικείμενο εντελώς δια μέσου της απέναντι επιφάνειας.
- Ανεπαρκής σύνδεση του ακροδέκτη αναγνωρίζεται αμέσως μέσω μιας ελάττωσης στο ύψος αντήχησης πίσω τοιχώματος.
- Μερικοί τύποι ελαττωμάτων όπως ζαρωμένες τρύπες έχουν σημαντικά ανεπαρκές ικανότητες ανάκλασης λόγω της τραχείας (ανώμαλης) επιφάνειας τους, δηλαδή από τέτοιες ελαττωματικές περιοχές δεχόμαστε μόνο πολύ μικρές αντηχήσεις ή και καθόλου.

Εν τούτοις, αυτά τα ελαττώματα κανονικά ρίχνουν σκιά στο πίσω τοίχωμα του αντικειμένου που ελέγχεται και αυτή η σκιά εμφανίζεται στην οθόνη με την μορφή φθίνοντας πλάτους της αντήχησης πίσω τοιχώματος. Με πιο μεγάλα ελαττώματα αυτού του τύπου μπορεί ακόμη να συμβεί ολική εξαφάνιση της αντήχησης πίσω τοιχώματος.



Εικόνα 28 Έλεγχος σημείου Αντικειμένου (σημείο προβολής)

2.6.2.3 Ρύθμιση τμήματος του εύρους

Ήδη γνωρίζουμε ότι, στην πιο δυσμενή περίπτωση η μετρούμενη ανακρίβεια φθάνει στο 2% του ολικού πλάτους της CRT οθόνης. Το μετρούμενο εύρος που κατανέμουμε στο πλάτος της CRT οθόνης προσδιορίζεται από την ρύθμιση και το σφάλμα μέτρησης και ως εκ τούτου εξαρτάται από το εύρος ελέγχου. Όσο μεγαλύτερο είναι το επιλεγμένο εύρος ελέγχου τόσο μεγαλύτερη είναι η απόλυτη μετρούμενη ανεκτικότητα. Έτσι είναι σε πολλές περιπτώσεις χρήσιμο να εξετάζουμε ένα τμήμα του υπό έλεγχο αντικειμένου με μεγεθυντικό φακό, π.χ. να μετρήσουμε ένα προσδιορισμένο ελάττωμα με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Για το σκοπό αυτό ρυθμίζουμε ένα μικρό εύρος ελέγχου το οποίο κατόπιν κινούμε παράλληλα με την CRT οθόνη (χρησιμοποιώντας ρυθμιστή της βάσης χρόνου) έτσι ώστε να περνούμε τις πρώτες αντηχήσεις πάνω στην οθόνη αποκλειστικά από αυτό το μερικό εύρος του αντικειμένου που ελέγχεται.

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να τοποθετήσουμε το εύρος ανάμεσα στο X και Y mm βάθος ενός αντικειμένου υπό έλεγχο τότε πρώτα ρυθμίζουμε το εύρος ελέγχου από 0 έως $(Y-X)$ mm. Για μια ορισμένη μετατόπιση αυτού του εύρους απαιτείται ένα αντικείμενο στο οποίο ισχύει ότι:

$$X < n \cdot T < y$$

όπου $n = 1, 2, 3, \dots$

$T =$ πάχος του αντικειμένου

Αυτό σημαίνει ότι:

Η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος (ή μια επαναλαμβανόμενη αντήχηση που εξακολουθεί να είναι ορατή) βρίσκεται στο μερικό εύρος που ρυθμίστηκε. Μια θέση της κλίμακας T της αντίστοιχης αντήχησης πίσω τοιχώματος υπολογίζεται ως εξής:

όπου, $X =$ αρχή μερικού εύρου

$Y =$ τέλος μερικού εύρους

$K =$ συντελεστής κλίμακας

$SR =$ θέση κλίμακα

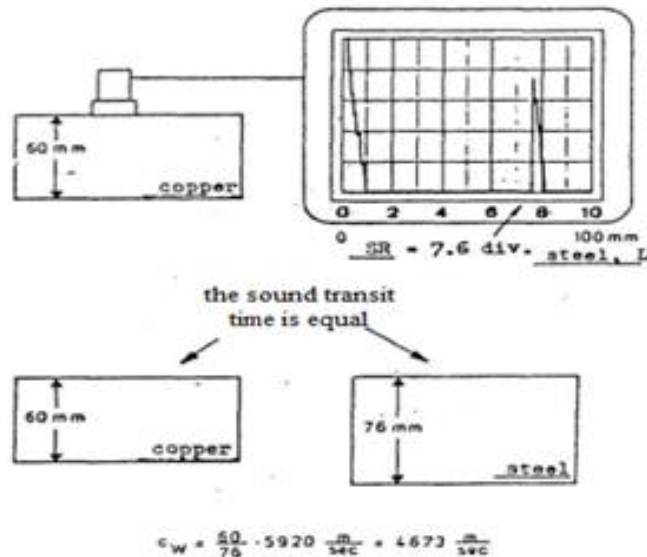
$T =$ Πάχος αντικείμενου

$\eta =$ τακτικός αριθμός του επιλεγμένου ήχου πίσω τοιχώματος

$$K = \frac{Y_{mm} - X_{mm}}{10 \cdot S \cdot K \cdot T} = \frac{n \cdot T - X}{K}$$

Ο φορητός ακροδέκτης είναι συνδεδεμένος με το αντικείμενο και η επιλεγμένη αντήχηση πίσω τοιχώματος έχει έρθει στην υπολογισμένη από πριν θέση της κλίμακας SR μέσω της, **λειτουργίας του** ρυθμιστή μετατόπισης (ο ρυθμιστής μετατόπισης δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί ξανά). Με μια τέτοια ρύθμιση μερικού εύρους (επίσης επέκταση κλίμακας) είναι δυνατό να τοποθετήσουμε μόνο πρώτες αντηχήσεις πίσω τοιχώματος από βάθος που κυμαίνεται από X έως Ψ . Επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις από το εύρος πάνω από το βάθος των X mm μπορούν να εμφανισθούν και αυτές στην CRT οθόνη. Μία που με μία τέτοια, ρύθμιση, ισχύει κανονικά η περίπτωση όπου η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος δεν εμφανίζεται επί

της οθόνης, άρα δεν υπάρχει βεβαίως και παρακολούθηση της αντήχησης πίσω τοιχώματος (Εικ.29).



Εικόνα 29 Τμηματική Ρύθμιση Εύρους

2.6.3 Ειδικές Εφαρμογές

Η μέθοδος παλμού αντήχησης χρησιμοποιείται κύρια για την ανακάλυψη και την εκτίμηση των ελαττωμάτων στα αντικείμενα που μελετώνται. Από την άλλη μεριά, υπάρχουν άλλες ενδιαφέρουσες εφαρμογές και επιδράσεις βασισμένες στη γεωμετρία οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς κανένα αλλά πρόσθετο εξοπλισμό, όπως περιγράφεται κατωτέρω:

2.6.3.1 Μέτρηση της ταχύτητας του ήχου

Με πρώτη όψη φαίνεται μάλλον άσκοπο να μετρήσουμε το πάχος ενός υλικού χρησιμοποιώντας ένα όργανο υπερήχων το οποίο έχει ρυθμιστεί για κάποιο άλλο είδος υλικού. Στην πραγματικότητα εν τούτοις μια τέτοια μέτρηση είναι εντελώς κατάλληλη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ήχου. Ας υποθέσουμε ότι το μηχάνημα έχει ρυθμιστεί για ατσάλι και ότι ο ακροδέκτης έχει συνδεθεί με ένα αντικείμενο στο οποίο ο ήχος διαδίδεται με μια άγνωστη ταχύτητα. Ας υποθέσουμε ακόμη ότι στο εύρος μέτρησης το αντικείμενο είναι επίπεδο παράλληλο, και ότι το πάχος αυτού του εύρους μπορεί να μετρηθεί μηχανικά. Τότε η θέση της αντήχησης πίσω τοιχώματος από αυτό το αντικείμενο δηλώνει το πάχος ενός σώματος από ατσάλι στο οποίο ο χρόνος διάδοσης του ήχου είναι ο ίδιος με αυτός στο αντικείμενο που εξετάζουμε με την άγνωστη ταχύτητα ήχου. Ο χρόνος διάδοσης του ήχου t υπολογίζεται από το μονοπάτι



της ακτίνας για ατσάλι S_{st} , που διαβάζεται στο μηχάνημα υπερήχων, και από την ταχύτητα του ήχου στο ατσάλι C_{st} ως εξής:

$$t = \frac{2S_{st}}{C_{st}}$$

όπου

S_{st} : το μήκος που αντιστοιχεί στη διαδρομή της ακτίνας στο ατσάλινο σώμα (διαβάζεται στο μηχάνημα)

C_{st} : ταχύτητα ήχου στο ατσάλι

Ο ίδιος χρόνος διάδοσης του ήχου t αντιστοιχεί στο αντικείμενο υπό έλεγχο με τη άγνωστη ταχύτητα ήχου C_w . Έτσι προκύπτει ότι:

$$t = \frac{2S_w}{C_w}$$

όπου

S_w : το μήκος που αντιστοιχεί στη διαδρομή της ακτίνας στο υπο έλεγχο αντικείμενο (= πάχος του αντικειμένου αυτού)

C_w : ταχύτητα ήχου στο υλικό.

Καθώς αυτός ο χρόνος διάδοσης του ήχου t είναι ο ίδιος και στα δύο υλικά προκύπτει ότι:

$$\frac{S_w}{C_w} = \frac{S_{st}}{C_{st}}$$

$$C_w = \frac{S_w}{S_{st}} \cdot C_{st}$$

Παράδειγμα: Εύρος ελέγχου 100mm σε ατσάλι.

Η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος από ένα αντικείμενο από χαλκό και με πάχος 60mm εμφανίζεται στην θέση της κλίμακας SR ίση με 7,6 της υποδιαίρεσης της κλίμακας, και η ταχύτητα του ήχου στο υπό έλεγχο αντικείμενο ισούται με:

$$S_{st} = K \cdot SR = 10 \frac{\text{mm}}{\text{υποδιαίρ.}} 7,6 \text{υποδιαίρ.} = 76 \text{mm}$$

$$C_w = \frac{S_w}{S_{st}} C_{st} = \frac{60 \text{mm}}{76 \text{mm}} \cdot 5920 \frac{\text{m}}{\text{sec}} = 4673 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$



2.6.3.2 Μέτρηση πάχους σε προαιρετικά υλικά με ρύθμιση σε ατσάλι

Η σχέση αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του πάχους επιπέδων αντικειμένων χρησιμοποιώντας υπερήχους ακόμη και αν το αντικείμενο είναι προσιτό μόνο από μια πλευρά και το μηχάνημα υπερήχων έχει ρυθμιστεί για κάποιο άλλο είδος υλικού. Το μόνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο αντίστοιχο υλικό.

Για τον σκοπό αυτό ρυθμίζουμε το μηχάνημα υπερήχων παραδείγματος χάριν για ατσάλι και συνδέουμε τον ακροδέκτη με το αντικείμενο. Η θέση της αντήχησης πίσω τοιχώματος είναι ενδεικτική του μονοπατιού της ακτίνας σε ένα σώμα από ατσάλι στο οποίο η ταχύτητα του ήχου ισούται ακριβώς με την αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο αντικείμενο μας (Εικ.30).

Από την σχέση που ήδη χρησιμοποιήθηκε στο (α) προκύπτει ότι:

$$S_w = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot S_{st}$$

όπου

S_w : η διαδρομή της ακτίνας στο αντικείμενο που μελετάται (πάχος αντικειμένου)

S_{st} : η διαδρομή της ακτίνας στο ατσάλι (διαβάζεται στο μηχάνημα)

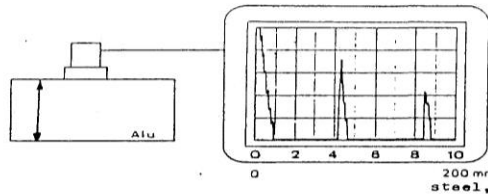
C_w : ταχύτητα του ήχου στο υλικό

C_{st} : ταχύτητα του ήχου στο ατσάλι

Παράδειγμα: εύρος ελέγχου 200mm ατσάλι.

Ο ακροδέκτης είναι συνδεδεμένος με ένα επίπεδο παράλληλο αντικείμενο φτιαγμένο από αλουμίνιο ($C_{al} = 6300$ m/sec) του οποίου το πάχος είναι, άγνωστο. Η πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος εμφανίζεται στην θέση της κλίμακας SR που ισούται με 4,2 της υποδιαίρεσης της κλίμακας. Επομένως:

$$S_{st} = K \cdot SR = 20 \frac{\text{mm}}{\text{υποδιαίρ.}} \times 4,2 \text{ υποδ.} = 84 \text{mm}$$



Εικόνα 30 Μέτρηση Πάχους στο Ατσάλι

Όσον αφορά το πάχος d του αντικειμένου ισχύει ότι:

$$d = S_w = \frac{6300\text{m/s}}{5920\text{m/s}} \cdot 84\text{mm} = 89,4\text{mm}$$

2.5.3.2 Ρύθμιση για διάφορα υλικά χρησιμοποιώντας ένα ρυθμιστικό σώμα από ατσάλι.

Για μια σειρά μετρήσεων του προηγούμενου είδους συμμετέχει η μέθοδος που περιγράφηκε διότι το απαιτούμενο πάχος του αντικειμένου δεν μπορεί να διαβασθεί απ' ευθείας από το μηχάνημα. Αν οι μετρήσεις αυτές γίνονται πάντα στο ίδιο είδος υλικού και ένα σώμα ρύθμισης του υλικού αυτού δεν είναι διαθέσιμο, τότε μπορούμε να εφαρμόσουμε την εξής μέθοδο:

Ρυθμίζουμε το όργανο με την βοήθεια ενός ρυθμιστικού σώματος από ατσάλι. Οι θέσεις των αντηχήσεων ρύθμισης πρέπει να μετατραπούν έτσι ώστε να προκύψει μια ρύθμιση στο αντίστοιχο υλικό. Αν υποθέσουμε ότι $T (= S_{ST})$ είναι το πάχος του ρυθμιστικού σώματος τότε οι θέσεις SR_n που αντιστοιχούν στις αντηχήσεις ρύθμισης μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την κάτωθι σχέση:

$$SR_n = n \frac{S_w}{K} \quad \text{όπου,} \quad S_w = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot T$$

K = συντελεστής κλίμακας

T = πάχος του ρυθμιστικού σώματος από ατσάλι

C_w = ταχύτητα του ήχου στο υλικό

C_{st} = ταχύτητα του ήχου στο ατσάλι

n = αριθμός των αντίστοιχων ηχών πίσω τοιχώματος

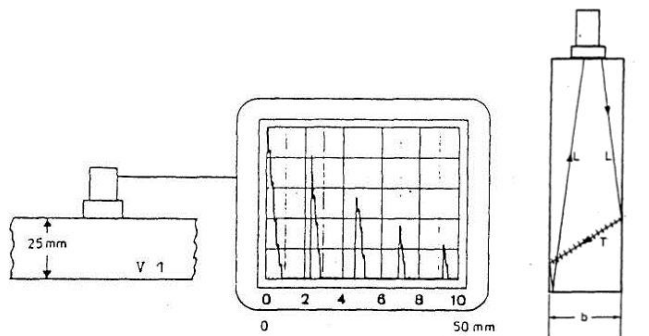
Παράδειγμα: Το μηχάνημα υπέρηχων πρέπει να ρυθμιστεί σε ένα εύρος 50 mm plexiglass. Μια που δεν διαθέτουμε ρυθμιστικό σώμα από plexiglass χρησιμοποιούμε το επίπεδο σώμα αναφοράς 1. Το πάχος του ρυθμιστικού σώματος από ατσάλι είναι $T = 25 \text{ mm}$ (Εικ.31).



Το ισοδύναμο μονοπάτι ακτίνας στο Plexiglas (Πιν.3):

$$S_{pl} = \frac{C_{pl}}{C_{st}} \cdot T = \frac{2730\text{m/s}}{5920\text{m/s}} \cdot 25\text{mm} = 11,5\text{mm}$$

$$K = \frac{50\text{mm}}{10\text{υποδ.}} = 5 \frac{\text{mm}}{\text{υποδ.}}$$



Εικόνα 31 Ρύθμιση με ρυθμιστικό σώμα από ατσάλι

Πίνακας 3 Παράμετροι SR

<u>n</u>	<u>SRn υποδιαρ. κλίμακας</u>
1	2,3
2	4,6
3	6,9
4	9,2

Μετά την ρύθμιση του οργάνου με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να διαβάσουμε το πάχος του αντικειμένου που εξετάζουμε από την θέση της πρώτης αντήχησης πίσω τοιχώματος από ένα δείγμα από **plexiglass**.

2.6.3.3 Δευτερεύουσες αντηχήσεις

Όταν συνδέεται, ένας ακροδέκτης με ένα αντικείμενο, το οποίο είναι τόσο στενό ώστε η ακτίνα του ήχου να αγγίζει, τα πλευρικά τοιχώματα, τότε δευτερεύουσες αντηχήσεις μπορούν να δημιουργηθούν επί πρόσθετα μετά από τις αντηχήσεις πίσω τοιχώματος. Το φαινόμενο της επαφής των διαμηκών κυμάτων με τα πλευρικά τοιχώματα προκαλεί διχασμό των εγκαρσίων κυμάτων τα οποία, καθώς μεταδίδονται κατά μήκος του υλικού, μετατρέπονται πάλι σε διαμήκη κύματα στο απέναντι πλευρικό τοίχωμα. Το μήκος που έχει η διαδρομή της ακτίνας, που προέρχεται από ένα τέτοιο τύπο μετατροπής, είναι μεγαλύτερο από το απ' ευθείας προς και από τη διαδρομή ενός διαμήκους κύματος. Η ταχύτητα ενός εγκαρσίου κύματος είναι πάντοτε



μικρότερη εκείνης του διαμήκους κύματος. Για αυτό λοιπόν οι δευτερεύου-σες αντηχήσεις εμφανίζονται πάντοτε μετά την αντήχηση πίσω τοιχώματος. Όταν μπορεί να λάθει χώρα μια μετατροπή τέτοιας μορφής τότε περισσότερες από μια ομάδες δευτερευουσών αντηχήσεων θα σχηματισθούν μετά την αντήχηση πίσω τοιχώματος. Η απόσταση Δ_S ανάμεσα σε μια αντήχηση πίσω τοιχώματος και σε μια δευτερεύουσα αντήχηση ή ανάμεσα σε δύο διαδοχικές δευτερεύουσες αντηχήσεις μπορεί να υπολογισθεί με καλή προσέγγιση χρησιμοποιώντας τον κάτωθι τύπο:

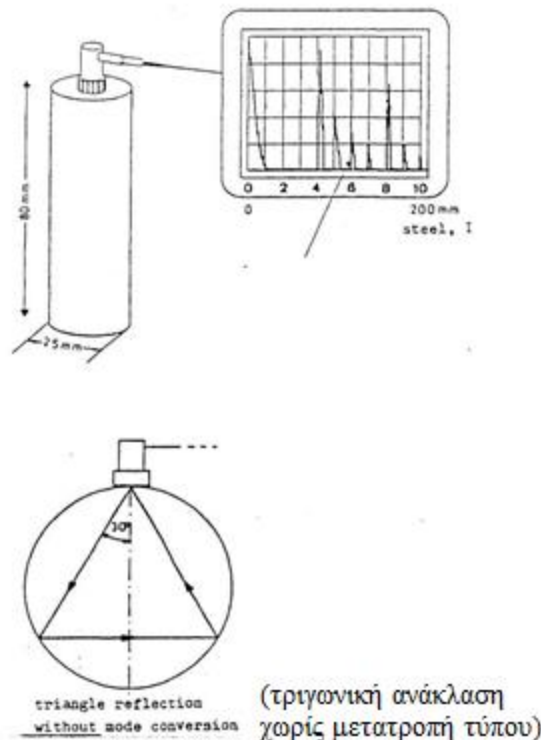
$$\Delta_S = \frac{b}{2} \sqrt{\left(\frac{C_L}{C_T}\right)^2 - 1} = bQ$$

οπού,

C_L = η ταχύτητα του ήχου του διαμήκους κύματος στο δείγμα υπό έλεγχο,

C_T = η ταχύτητα ήχου του εγκάρσιου κύματος στο δείγμα υπό έλεγχο,

b = πλάτος του δείγματος υπό έλεγχο



Εικόνα 32 Δευτερεύουσες Αντηχήσεις

Ο κάτωθι πίνακας δίνει τους συντελεστές Q



$$Q = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{C_L}{C_T}\right)^2} - 1$$

για διάφορα υλικά

Πίνακας 4 Συντελεστής Q για διάφορα Υλικά

Υλικό	Q
Αγρίλιο	0.877
Μόλυβδος	1.460
Ατσάλι	0.760
Χαλκός	0.912
Ορείχαλκος	0.866
Αργύρος	1.016
Βολφράμιο	0.914

2.6.3.4 Πρόσθετες αντηχήσεις

Αν συνδέσουμε έναν ακροδέκτη ευθύγραμμης δέσμης με την περιφέρεια ενός συμπαγούς κυλίνδρου ή μιας μπάλας τότε η δέσμη του ήχου μπορεί να εκταθεί αρκετά σε πλάτος λόγω των δυσμενών συνθηκών σύνδεσης. Το άνοιγμα της γωνίας της ηχητικής δέσμης εκτείνεται ιδίως όταν ο κύλινδρος έχει μικρή διάμετρο ή όταν ο ακροδέκτης συνδέεται με μια μπάλα. Με αυτές τις δύο γεωμετρίες, οι περιφερειακές ακτίνες της εκτεταμένης ηχητικής δέσμης μπορούν, εκτός από την αντήχηση πίσω τοιχώματος, να δημιουργήσουν πρόσθετες ενδείξεις στην CRT οθόνη, όπως πρόσθετες αντηχήσεις, με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- I. Στην ηχητική δέσμη υπάρχει μια πολύ καλή ακτίνα ήχου που σχηματίζει γωνία 30° με τον ακουστικό άξονα. Με την σειρά της, μια τέτοια ακτίνα ήχου διαπερνά την περιφέρεια του δείγματος με μια γωνία πρόσκρουσης 30. Σύμφωνα με το νόμο ανάκλασης αυτή η ακτίνα ήχου θα επιστραφεί με την ίδια γωνία και θα διαπεράσει για δεύτερη φορά την περιφέρεια με γωνία πρόσκρουσης 30 μοιρών.

Μετά από αυτήν την ανάκλαση η ακτίνα του ήχου επιστρέφει στον ακροδέκτη και δημιουργεί μια αντήχηση. Έτσι, η διαδρομή της δέσμης που διανύεται από αυτήν την ακτίνα του ήχου γράφει ένα ισόπλευρο τρίγωνο.

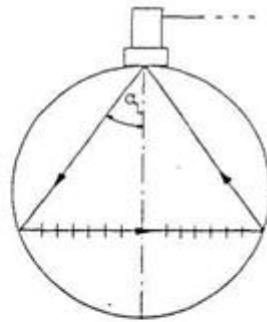


Η διαδρομή της δέσμης ισούται με :

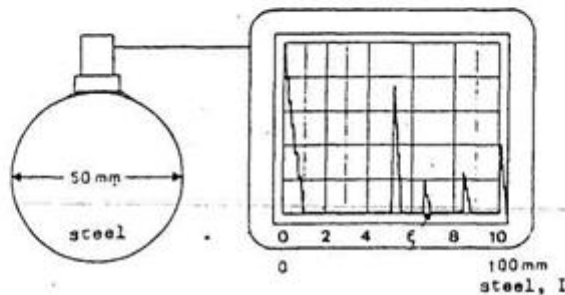
$$S = \frac{3}{2} \cdot D \cdot \cos 30^\circ = 1,30D$$

όπου D: η διάμετρος του δείγματος υπό έλεγχο.

Συμπέρασμα: $\Delta_c = 0,30D$ μετά την αντήχηση πίσω τοιχώματος εμφανίζεται μια δευτερεύουσα αντήχηση. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται, μόνο από την διάμετρο του υπό έλεγχο δείγματος και για αυτό είναι, ανεξάρτητος του υλικού.



triangle reflection ((τριγωνική
with node conversion ανάκλαση



Εικόνα 33 Πρώτος Τρόπος Πρόσθετης Αντήχησης

- II. Μια άλλη πολύ καλή ακτίνα της ηχητικής δέσμης μπορεί να μεταφερθεί δια μέσου του δείγματος γράφοντας ένα ισοσκελές τρίγωνο και, έτσι, είναι σε θέση να δημιουργήσει μια άλλη πρόσθετη αντήχηση. Στην περίπτωση αυτού του τύπου της διανύμενης διαδρομής λαμβάνουν χώρα μετατροπές κατά τη διάρκεια των δύο ανακλάσεων στην περιφέρεια του δείγματος υπό έλεγχο. Με άλλα λόγια οι δύο πλευρές του τριγώνου διανύονται από ένα διαμήκες κύμα



ενώ η βάση του τριγώνου διανύεται από ένα εγκάρσιο κύμα. Η διαδρομή αυτή διανύεται από εκείνη την ακτίνα της ηχητικής δέσμης που δημιουργεί μια γωνία α_L με την διεύθυνση των ακτινών και εξαρτάται από το υλικό.

Η γωνία α_L υπολογίζεται ως εξής:

$$\sin \alpha_L = \frac{1}{4} \left[\sqrt{8 + \left(\frac{C_T}{C_L}\right)^2} - \frac{C_T}{C_L} \right]$$

Αυτή η τριγωνική διαδρομή, με μετατροπή τύπου, είναι η αιτία της δημιουργίας μιας πρόσθετης αντήχησης που εμφανίζεται σε απόσταση Δ_s από την αντήχηση πίσω τοιχώματος.

Η απόσταση μονοπατιού Δ_s ανάμεσα στην αντήχηση πίσω τοιχώματος και σε μια πρόσθετη αντήχηση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta_s = D \left[\left(1 + \frac{C_L}{C_T} \cdot \sin \alpha_L \right) \cdot \cos \alpha_L - 1 \right] = D \cdot P$$

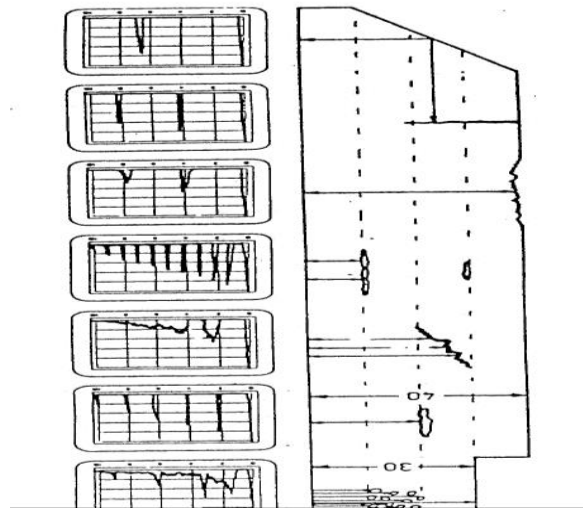
όπου, D = η διάμετρος του δείγματος υπό έλεγχο.

Ο επόμενος πίνακας δίνει τις τιμές του εξαρτώμενου από το υλικό συντελεστή P όπου

$$P = \left(1 + \frac{C_L}{C_T} \cdot \sin \alpha_L \right) \cdot \cos \alpha_L - 1$$

Πίνακας 5 Συντελεστής P για διάφορα Υλικά

Υλικό	P
Αργίλιο	0.760
Μόλυβδος	1.286
Ατσάλι	0.674
Χαλκός	0.798
Ορείχαλκος	0.760
Άργυρος	0.887
Βολφράμιο	0.800



Εικόνα 34 Δεύτερος Τρόπος Πρόσθετης Αντήχησης

2.6.4 Γωνιακή σάρωση

Ανάλογα με τους αντίστοιχους ανακλαστήρες, ορισμένα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από το σχήμα μιας αντήχησης, αλλά κάτι τέτοιο απαιτεί μια σημαντική εμπειρία που κερδίζεται από εκτεταμένη πρακτική εξάσκηση. Είναι πολύ βοηθητικό για τον χειριστή να εκτελέσει ένα καταστρεπτικό τεστ σε ένα σκάρτο αντικείμενο και να συγκρίνει το αποτέλεσμα του καταστρεπτικού τεστ με τις ερμηνείες που έχει ο ίδιος δώσει στις ενδείξεις της οθόνης CRT.

Τα ακόλουθα σχηματικά διαγράμματα παρουσιάζουν διαφορετικές θέσεις ελαττωμάτων (ασυνέχειες) και τις αντίστοιχες εμφανίσεις της οθόνης CRT.

Οι τελευταίοι δύο ανακλαστήρες δεν μπορούν να εντοπισθούν εύκολα όταν χρησιμοποιούνται ακροδέκτες ευθείας ακτίνας στην ορισμένη κατεύθυνση λόγω του ότι η ακτίνα του ήχου δεν προσπίπτει σ' αυτούς κατακόρυφα. Ένας από τους ζωτικούς βασικούς κανόνες για την ανίχνευση των ανακλαστήρων είναι ο "χρυσός κανόνας του ελέγχου υπερήχων" δηλαδή:

- **Η ακτίνα του ήχου πρέπει να προσπέσει κατακόρυφα πάνω στους ανακλαστήρες.**

Αν η συνθήκη αυτή εκπληρωθεί, το αποτέλεσμα θα είναι μια μέγιστη αντήχηση. Χρησιμοποιώντας ένα ακροδέκτη ευθείας - ακτίνας είναι αδύνατο να ανιχνεύσουμε ανακλαστήρες που βρίσκονται υπό κλίση ή κατακόρυφα στην επιφάνεια λόγω του ότι ο ήχος δεν ανακλάται απ' ευθείας στον



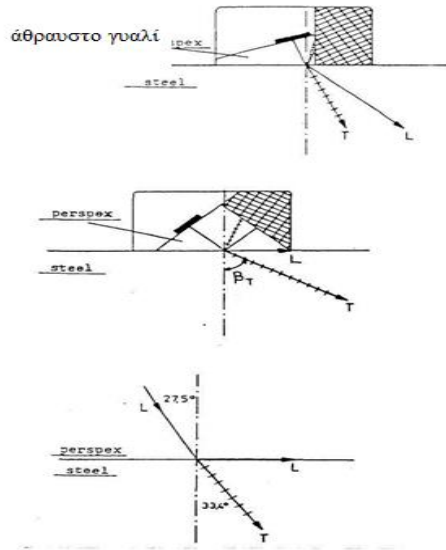
ακροδέκτη. Για να είμαστε σε θέση να ανιχνεύσουμε και να αξιολογήσουμε αυτόν τον τύπο ελαττωμάτων πρέπει να χρησιμοποιήσουμε **ακροδέκτες γωνιακής - ακτίνας**. Για να μεταδώσουμε παλμούς υπερήχων υπό κλίση στην επιφάνεια κολλάμε ένα κρύσταλλο κομμένο κατά τον άξονα X, ο οποίος δημιουργεί διαμήκη κύματα, ένα σώμα καθυστέρησης από άθραυστο γυαλί (PERSPEX) με σχήμα σφήνας. Αυτό το τμήμα του ήχου που ανακλάται από το κάτω μέρος του ακροδέκτη προσκρούει σε ένα αποσβέστη που απορροφά το τμήμα του ήχου που δεν θέλουμε. Στην μέση επιφάνεια ανάμεσα στα PERSPEX και το αντικείμενο, τα κύματα του ήχου διαθλώνται και αυτό μπορεί επίσης να προκαλέσει διαχωρισμό των εγκαρσίων κυμάτων και έτσι, στην περίπτωση αυτή, μπορούν να υπάρξουν δύο τύποι κυμάτων στο αντικείμενο, δηλαδή διαμήκη και εγκάρσια κύματα.

Έτσι, χρησιμοποιούμε ένα εποικοδομητικό τέχνασμα για να βεβαιωθούμε ότι μόνο ένας τύπος κύματος μπορεί να λάβει χώρα στο υπό εξέταση αντικείμενο. Διαλέγουμε μια γωνία πρόσπτωσης του διαμήκους κύματος στον ακροδέκτη τόσο μεγάλη ώστε ένα διαμήκες πλέον να λάβει χώρα σε ατσάλι, μέσω του οποίου B_L είναι μεγαλύτερη από 90° (ολική ανάκλαση).

Σύμφωνα με το νόμο διάθλασης, $B_L = 90^\circ$

$$\sin \alpha_L = \frac{C_{L,Pl}}{C_{L,st}} = \frac{2730}{5920} \rightarrow \alpha_L = 27,5^\circ$$

Η γωνία αυτή ονομάζεται "**πρώτη κρίσιμη γωνία**"(Εικ.35).



Εικόνα 35 Πρώτη Κρίσιμη Γωνία

Αν διαλέξουμε την γωνία πρόσπτωσης α έτσι ώστε να είναι η ίδια με την πρώτη κρίσιμη γωνία τότε, σύμφωνα με τον νόμο διάθλασης, η γωνία πρόσπτωσης, β_T του εγκάρσιου κύματος σε αστάλι είναι:

$$\sin \beta_T = \frac{C_{T,st}}{C_{L,pl}} \cdot \sin \alpha_L = \frac{3255}{2730} \cdot \sin 27,5^\circ \rightarrow \beta_T = 33,4^\circ$$

Πρότυποι ακροδέκτες γωνιακής-ακτίνας έχουν κατασκευαστεί με τις ακόλουθες γωνίες διάθλασης εγκάρσιου κύματος σε αστάλι:

35°, 45°, 60°, 70° και 80°.

Σημείωση: Οι γωνίες διάθλασης που δίνονται στους ακροδέκτες γωνιακής ταχύτητας σχετίζονται πάντοτε με το εγκάρσιο κύμα που διαδίδεται μέσα στο αστάλι ($C_T = 3255 \text{ m/s}$).

Αν έχουμε να ελέγξουμε ένα αντικείμενο φτιαγμένο από διαφορετικό υλικό από αστάλι χρησιμοποιώντας ακροδέκτες γωνιακής-δέσμης **πρέπει** πρώτα να καθορίσουμε την γωνία **διάθλασης** του εγκάρσιου κύματος σ' αυτό το υλικό.

Τα ακόλουθα εφαρμόζονται:

$C_{T,W}$: ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων στο υλικό

$C_{T,st}$: ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων στο αστάλι

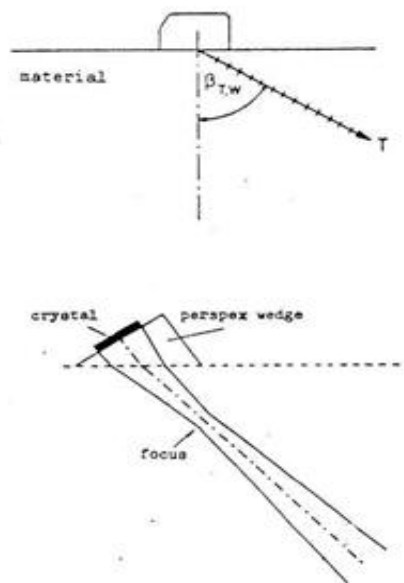


$$\sin \beta_{T,W} = \frac{C_{T,W}}{C_{T,st}} \cdot \sin \beta_{T,st}$$

$\beta_{T,W}$: γωνία διάθλασης εγκάρσιων κυμάτων στο υλικό

$\beta_{T,st}$: γωνία διάθλασης εγκάρσιων κυμάτων στα ατσάλι

Ο δεύτερος υπολογισμός γίνεται για να ελέγξει αν και διαμήκη κύματα λαμβάνουν χώρα στο υλικό (Εικ.36):



Εικόνα 36 Υπολογισμός για διαμήκη κύματα

$C_{L,W}$: ταχύτητα διαμηκών κυμάτων στο υλικό.

$C_{T,st}$: ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων στο ατσάλι.

$$\sin \beta_{L,W} = \frac{C_{L,W}}{C_{T,st}} \cdot \sin \beta_{T,st}$$

$\beta_{L,W}$: γωνία διάθλασης διαμηκών στο υλικό

$\beta_{T,st}$: γωνία διάθλασης εγκάρσιων κυμάτων σε ατσάλι.

Για $\sin \beta_{L,W} \geq 1$ δεν υπάρχει διαμήκες κύμα στο υπό έλεγχο υλικό. Αν ένα διαμήκες κύμα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα στο υλικό απλά διαλέγουμε ένα ακροδέκτη που έχει μεγαλύτερη γωνία διάθλασης για ατσάλι.

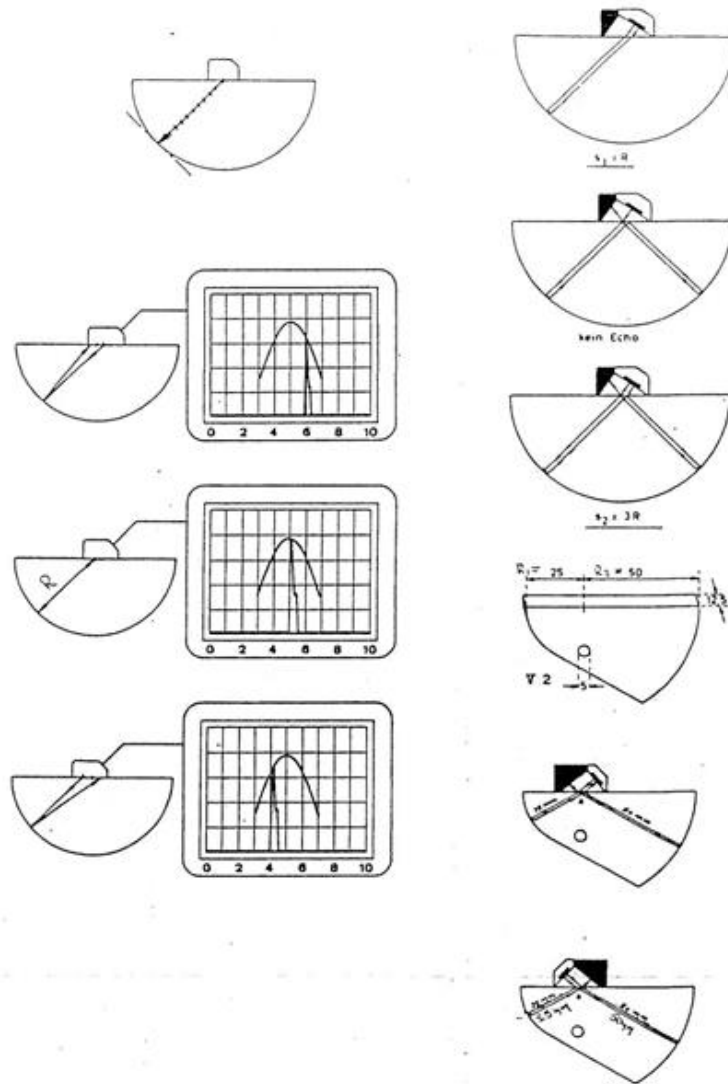


Μετά πρέπει να επαναληφθούν οι υπολογισμοί για τις γωνίες διάθλασης του διαμήκους και του εγκάρσιου κύματος.

2.6.4.1 Ρύθμιση χρησιμοποιώντας ακροδέκτες γωνιακής δέσμης

Όταν γίνεται σύζευξη ενός ακροδέκτη γωνιακής - δέσμης με ένα επίπεδο παράλληλο αντικείμενο, τότε ο ήχος θα επιστραφεί στην αντίθετη επιφάνεια μακριά από το αντικείμενο, δηλαδή στην περίπτωση αυτή ο ακροδέκτης δεν θα δεχθεί αντηχήσεις πίσω τοίχματος. Εν τούτοις, επειδή χρειαζόμαστε δύο αντηχήσεις για να βαθμολογήσουμε το ελεγχόμενο εύρος χρησιμοποιούμε ένα άλλο σώμα ρύθμισης διαφορετικού σχήματος. Αυτό το σώμα ρύθμισης πρέπει να είναι τέτοιου είδους, ώστε για κάθε γωνία πρόσπτωσης υπάρχει ένα πίσω τοίχωμα στο οποίο η πρόσπτωση γίνεται κατακόρυφα. Η συνθήκη αυτή πληρούται από ένα ημικυλινδρικό σώμα ρύθμισης διότι πάντοτε η ακτίνα ενός κύκλου συναντά την κυκλική καμπύλη κατακόρυφα. Για το λόγο αυτό πρέπει να είμαστε βέβαιοι ότι ο ήχος εισέρχεται στο σώμα ρύθμισης ακριβώς στο κέντρο. Γι' αυτό, βάζουμε τον ακροδέκτη μέσα στο σώμα ρύθμισης και μεγιστοποιούμε την πρώτη αντήχηση μετακινώντας τον ακροδέκτη πάνω στην επιφάνεια. Τη στιγμή που η **αντήχηση** φθάνει στο μέγιστο πλάτος το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω από το κέντρο του σώματος ρύθμισης με αποτέλεσμα οι παλμοί του ήχου να προσπίπτουν στο καντράν κατακόρυφα και για αυτό ανακλώνται πίσω ακριβώς με την ίδια διεύθυνση.

Στην περίπτωση αυτή πάλι, μόνο ένα μικρό μέρος της ενέργειας του ήχου γυρίζει στον ακροδέκτη. Το μεγαλύτερο μέρος ανακλάται στην επιφάνεια σύζευξης σύμφωνα με το νόμο ανάκλασης, περνώντας έτσι στο άλλο καντράν του σώματος ρύθμισης. Οι ηχητικοί παλμοί που προέρχονται από αυτό το καντράν και επιστρέφουν στον ακροδέκτη δεν φθάνουν στον κρύσταλλο αλλά στον αποσβέστη του ακροδέκτη και για τον λόγο αυτό ο κρύσταλλος δεν μπορεί να μετατρέψει τους παλμούς αυτούς σε ηλεκτρικά σήματα. Αφού οι παλμοί αυτοί του ήχου έχουν ανακλασθεί μια φορά ακόμη στην επιφάνεια σύζευξης τότε μόνο μπορούν να γυρίσουν πάλι στο πρώτο καντράν από όπου επιστρέφουν με την ίδια κατεύθυνση με την οποία τους έλαβε ο κρύσταλλος (Εικ.37).



Εικόνα 37 Ρύθμιση με χρήση ακροδεκτών γωνιακής δέσμης

Τώρα ας επιστρέψουμε στις πορείες της δέσμης. Η πρώτη αντήχηση λαμβάνεται μετά την πρώτη ανάκλαση στο καντράν. Έτσι η πορεία της δέσμης αντιστοιχεί ακριβώς στην ακτίνα R του ημικύκλου. Ο ήχος πρέπει να ταξιδεύει δυο πρόσθετους χρόνους κατά την κατεύθυνση της ακτίνας και πίσω, προτού η δεύτερη αντήχηση να μπορεί να ληφθεί.

Έτσι, η πορεία της δέσμης ανάμεσα στην πρώτη και στη δεύτερη αντήχηση είναι $2R$, δηλαδή η διαφορά πορείας δέσμης ανάμεσα σε δυο διαδοχικές



επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις είναι πάντοτε $2R$. Έτσι, οι αντηχήσεις στο καντράν συνδέονται με την ακόλουθη πορεία δέσμης:

$$S_n = (2n - 1) \cdot R \quad n = 1,2,3$$

$R =$ ακτίνα του ημι – κυλίνδρου

Έτσι

$$\begin{aligned} S_1 &= 1R \\ S_2 &= 2R \\ S_3 &= 5R \end{aligned}$$

Είναι σχετικά εύκολο να φτιαχτεί ένα τέτοιο ημικυλινδρικό σώμα ρύθμισης, από ένα υλικό προς έλεγχο. Για έλεγχο με ατσάλι υπάρχουν δύο πρότυπα σώματα ρύθμισης, το σώμα ρύθμισης VI (B.S. 2704). Εκτός από την ρύθμιση, τα σώματα αυτά χρησιμοποιούνται και για άλλους σκοπούς.

Το V2 αποτελείται από δύο γειτονικά τέταρτα κύκλων με ακτίνες $R1 = 25 \text{ mm}$ και $R2 = 50 \text{ mm}$. Η διαφορά πορεία δέσμης ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις ισούται, στην περίπτωση αυτή, με $R1 + R2 = 75 \text{ mm}$. Όταν κατευθύνουμε τον ακροδέκτη στο καντράν 25 mm , οι αντηχήσεις που λαμβάνονται έχουν τις ακόλουθες πορείες δέσμης:

$$S_n = R1 + (n - 1) \cdot (R1 + R2) \quad n = 1,2,3$$

Έτσι:

- $S1 = 25 \text{ mm}$
- $S2 = 100 \text{ mm}$
- $S3 = 175 \text{ mm}$

Όταν κατευθύνουμε τον ακροδέκτη του καντράν στο 50 mm :

$$S_n = R2 + (n - 1) \cdot (R1 + R2) \quad n = 1,2,3$$

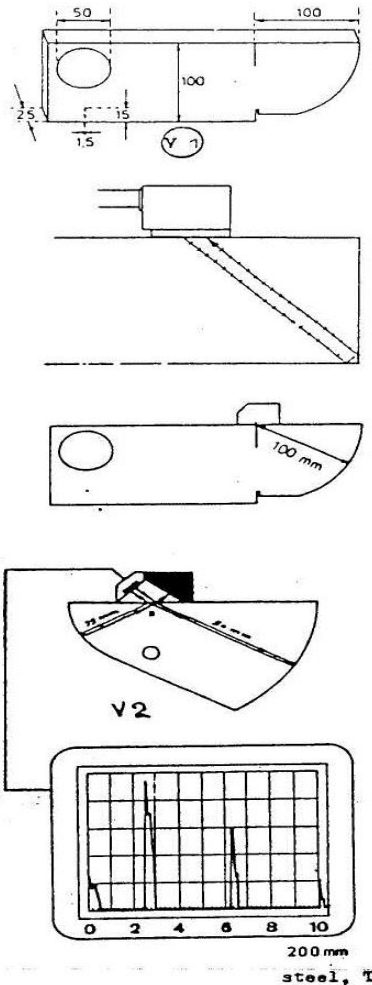
Έτσι :

- $S1 = 50 \text{ mm}$
- $S2 = 125 \text{ mm}$
- $S3 = 175 \text{ mm}$

Το καντράν με ακτίνα $R = 100 \text{ mm}$ χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του εύρους με V1. Για να ληφθούν από το κυκλικό τόξο επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις, πρέπει να δούμε ένα αυλάκι (μια ράβδωση) στο κεντρικό σημείο του καντράν



κατακόρυφα στην επιφάνεια σύζευξης. Εδώ χρησιμοποιούμε την επίδραση της επονομαζόμενης γωνιακής ανάκλασης: Κάθε δέσμη ήχου, που προσπίπτει στον γωνιακό ανακλαστήρα από οποιαδήποτε κατεύθυνση, θα ανακλασθεί παράλληλα με τον εαυτό της. Έτσι, από το V1 παίρνουμε μια αλληλουχία αντηχήσεων πίσω τοιχώματος με τις ακόλουθες πορείες δέσμης (Εικ.38):



Εικόνα 38 Λήξη Αλληλουχίας αντηχήσεων

$$S_n = n \cdot 100\text{mm}$$

$$n = 1,2,3$$

Διαλέγουμε το κατάλληλο σώμα ρύθμισης λαμβάνοντας υπ' όψιν το εύρος ελέγχου που έχουμε να ρυθμίσουμε και τις διαστάσεις του ακροδέκτη γωνιακής δέσμης και υπολογίζουμε τις θέσεις της κλίμακας των ορατών αντηχήσεων.



Παράδειγμα: Εύρος ελέγχου 0 – 200mm, ατσάλι.

Σώμα ρύθμισης V2, ακροδέκτης κατευθυνόμενος στο καντράν 50mm.

Συντελεστής κλίμακας K:

$$K = \frac{PB}{10SK_t} = \frac{200\text{mm}}{10} = 20\text{mm}$$

Πίνακας 5 Παράμετροι Παραδείγματος

n	Ηχητικές αποστάσεις mm	Θέση κλίμακας
	$S_n = 50 + (n - 1) \cdot 75$	$SR_n = S_n/K$
1	50	2,50
2	125	6,25
3	200	10,00

Μετά τον υπολογισμό, ενώνουμε τον ακροδέκτη με το σώμα ρύθμισης (λαμβάνοντας υπ' όψιν την κατεύθυνση του ακροδέκτη) και μεγιστοποιούμε την πρώτη αντήχηση του καντράν. Έπειτα συνεχίζουμε με την ρύθμιση (καλιμπράρισμα) όπως περιγράφηκε για ακροδέκτες ευθείας δέσμης.

2.6.4.2 Εντοπισμός ακροδεκτών με βαθμολόγηση πορείας δέσμης

Ενώ εξετάζουμε ένα αντικείμενο, για να εντοπίσουμε ένα ανακλαστήρα R πρέπει να καθορίσουμε την ακριβή θέση αυτού του ανακλαστήρα, δηλαδή να σημειώσουμε το σημείο προβολής P στην επιφάνεια του αντικείμενου και να καθορίσουμε σε ποιο βάθος κάτω από το σημείο αυτό βρίσκεται ο ανακλαστήρας.

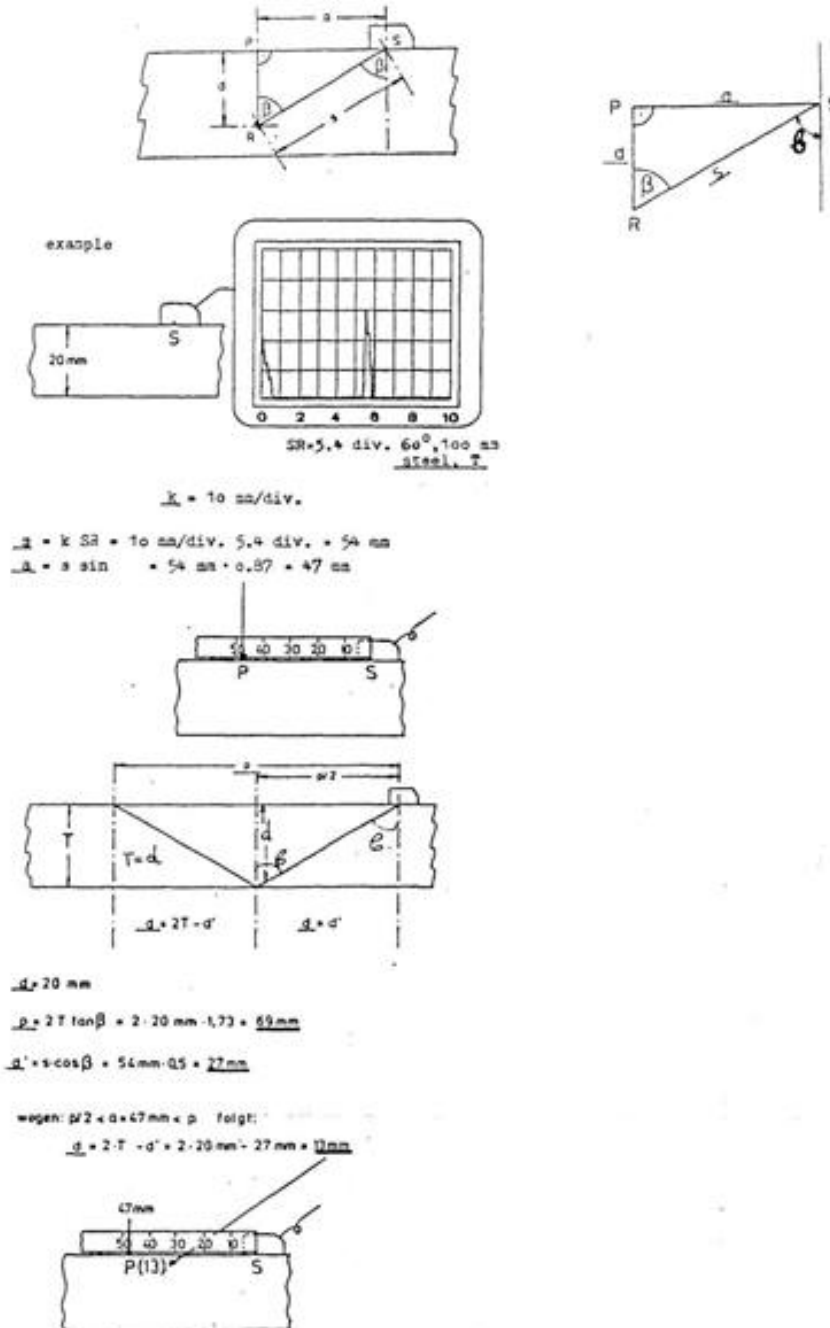
Για να υπολογίζουμε τα απαιτούμενα δεδομένα χρησιμοποιούμε το "τρίγωνο ελαττωμάτων".

S: σημείο ένδειξης του ακροδέκτη	α: απόσταση επιφάνειας
P: σημείο προβολής	β: γωνία διάθλασης
R: ανακλαστήρας	d: βάθος
	S: πορεία δέσμης

Η θέση της κλίμακας που αντιστοιχεί στην μεγιστοποιημένη αντήχηση διαβάζεται στο όργανο που έχει βαθμολογηθεί σε πορείες δέσμης. Πολλαπλασιασμός με τον συντελεστή K δίνει την πορεία της δέσμης S στον ανακλαστήρα. Αν η γωνία διάθλασης είναι γνωστή, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση επιφάνειας α και,



όσον αφορά την θέση του βάθους d , την βοηθητική ποσότητα d' (ουσιαστικό βάθος) ως εξής (Εικ.39):



Εικόνα 39 Εντοπισμός & Βαθμολόγηση



$$\alpha = S \cdot \sin \beta \quad \text{και} \quad d' = S \cdot \cos \beta$$

Ξεκινώντας από το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη και προχωρώντας προς το μπροστινό μέρος παραλείπουμε την απόσταση επιφάνειας α και σημειώνουμε το σημείο προβολής P .

I. Υπολογισμός του αληθινού βάθους d

Η απόσταση ανάμεσα στο σημείο ένδειξης του ακροδέκτη και εκείνο το σημείο της επιφάνειας όπου η κεντρική ακτίνα της δέσμης του ήχου επιστρέφει στην επιφάνεια μετά την πρώτη ανάκλαση της στην απέναντι πλευρά, ονομάζεται απόσταση "πηδήματος" ρ (Εικ.40). Για επίπεδα - παράλληλα αντικείμενα η απόσταση πηδήματος υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = 2 \cdot \tan \beta$$

Αν η απόσταση επιφάνειας του ανακλαστήρα κυμαίνεται από 0 έως $P/2$ τότε το ουσιαστικό βάθος d' ισούται με το αληθινό βάθος d του ανακλαστήρα. Για αποστάσεις επιφάνειας που κυμαίνονται από $P/2$ έως P το πραγματικό βάθος d του ανακλαστήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$d = 2 \cdot T \cdot d'$$

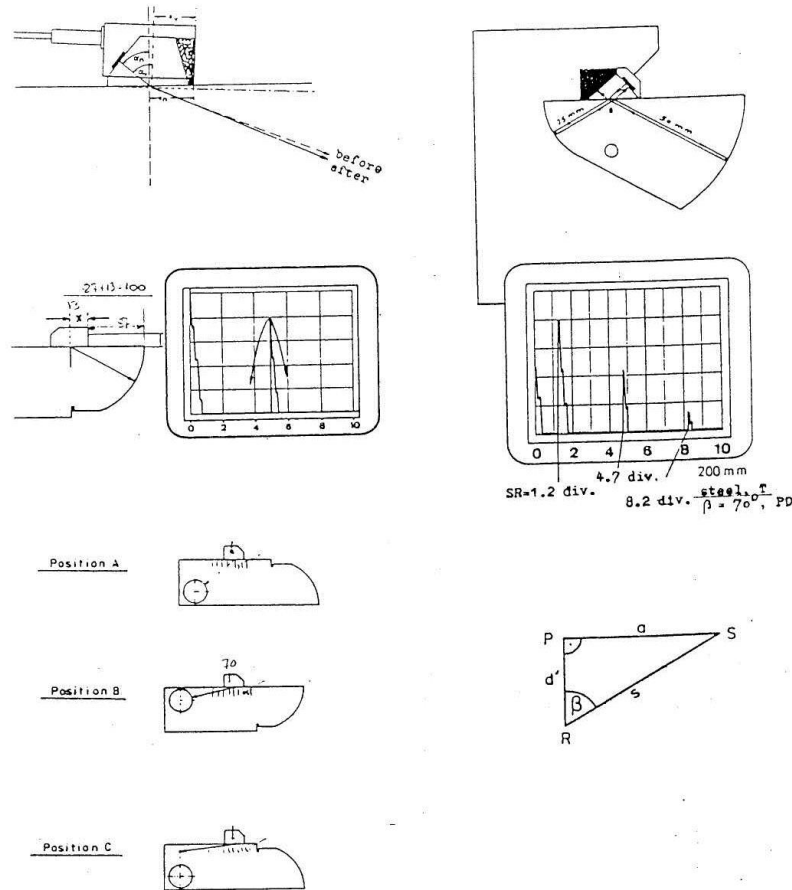
- d = αληθινό βάθος
- T = πάχος αντικειμένου
- d' = ουσιαστικό βάθος

Τώρα πια, το αληθινό βάθος d μπορεί να γραφτεί στην επιφάνεια του αντικειμένου δίπλα στο σημείο προβολής.

Μπορεί να συμβεί αλλαγή του σημείου ένδειξης του ακροδέκτη λόγω φθοράς του άκρου του ακροδέκτη. Για το λόγο αυτό, η θέση του σημείου ένδειξης του ακροδέκτη πρέπει να μετράται από καιρό σε καιρό. Για αυτό, ενώνουμε τον ακροδέκτη με το σώμα ρύθμισης V_1 και μεγιστοποιούμε την πρώτη αντήχηση του καντράν. Σε αυτή την θέση του ακροδέκτη, το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη είναι τοποθετημένο ακριβώς πάνω από το αυλάκι στο V_1 . Έτσι, ή σημειώνουμε το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη απ' ευθείας πάνω στον ακροδέκτη ή μετράμε την απόσταση ανάμεσα στο σημείο ένδειξης του ακροδέκτη (αυλάκι) και το μπροστινό άκρο του ακροδέκτη (τιμή X). Μια που και η ανώμαλη φθορά του άκρου μπορεί να προκαλέσει πρόσθετη αλλαγή στην γωνία διάθλασης, πρέπει και αυτή να ελέγχεται από καιρό με καιρό. Έτσι, ενώνουμε τον ακροδέκτη με το σώμα ελέγχου V_1 στην θέση A , B ή C ανάλογα



με την ονομαστική γωνία διάθλασης και μεγιστοποιούμε την αντήρηση από την τρύπα (B.S. 2704). Στην θέση αυτή, κάτω από το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη, μπορούμε να διαβάσουμε την πραγματική γωνία διάθλασης από την κλίμακα που είναι χαραγμένη στο V_1 .



Εικόνα 40 Υπολογισμός αληθινού βάθους d

2.6.4.3 Βαθμολόγηση, (καλιμπράρισμα) των αποστάσεων επιφάνειας

Η πορεία της δέσμης S , που έχει διαβαστεί στο όργανο υπέρηχων, κανονικά χρησιμοποιείται μόνο για τους υπολογισμούς των δεδομένων που απαιτούνται για τον εντοπισμό. Οι αποστάσεις επιφάνειας υπολογίζονται από τις πορείες δέσμης, πολλαπλασιάζοντας επί ένα σταθερό παράγοντα ($\sin B$). Ο πολ/σμός αυτός μπορεί να γίνει αυτόματα αλλάζοντας το πλάτος σύμφωνα με τον παράγοντα αυτόν.

Για καλιμπράρισμα σε αποστάσεις επιφάνειας, υπολογίζουμε τις αντίστοιχες αποστάσεις επιφάνειας από την πορεία της δέσμης των αντηχήσεων που



χρησιμοποιούνται για καλιμπράρισμα. Από αυτές τις αποστάσεις επιφάνειας υπολογίζουμε στην συνέχεια τις θέσεις της κλίμακας.

Παράδειγμα 1:

Εύρος ελέγχου 0-200 mm σε αποστάσεις επιφάνειας που αντιστοιχούν σε εγκάρσια κύματα σε ατσάλι.

Γωνία διάθλασης $\beta = 70$ μοίρες

Συντελεστής κλίμακας $K = 20$

mm

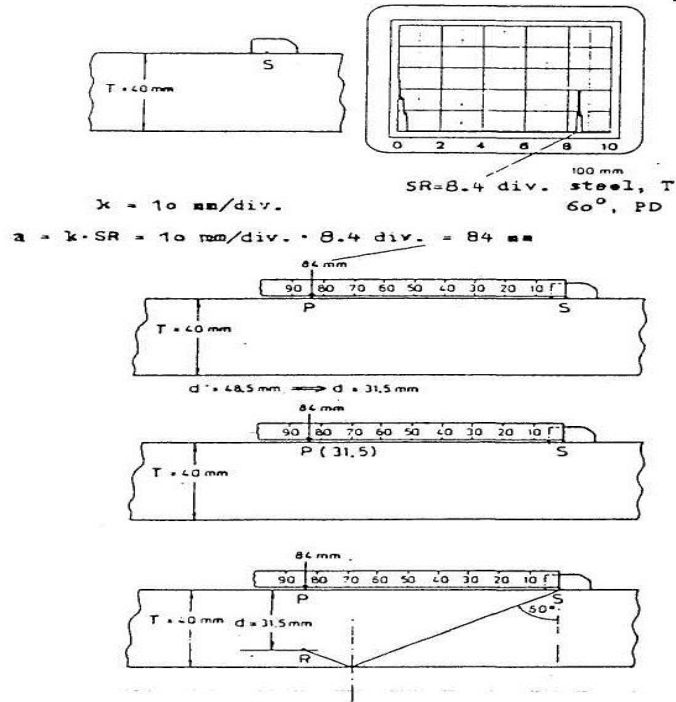
Υποδιαίρεση κλίμακας

Συντελεστής ρύθμισης V_2 , καντράν 25mm:

Σώμα ρύθμισης V_2 , καντράν 25mm:

Πίνακας 6 Παράμετροι Παραδείγματος

n	Πορεία δέσμης (mm)	Απόστασης επιφάνειας (mm)	Θέση κλίμακας SR υποδ. Κλίμακας
	$S_n = 25\text{mm} + (n - 1) \cdot 75\text{mm}$	$an = S_n \cdot \sin \beta$	$SR_n = an/K$
1	25	23,5	1,2
2	100	94,0	4,7
3	175	164,4	8,2



Εικόνα 41 Βαθμονόμηση αποστάσεων επιφάνειας

Μετά από τον υπολογισμό αυτό η ρύθμιση συνεχίζεται ως συνήθως. Από την αντήχηση του ανακλαστήρα επί της οθόνης μπορούμε να διαβάσουμε άμεσα την απόσταση επιφάνειας στον ανακλαστήρα αυτόν. Αν δούμε το τρίγωνο ελαττωμάτων, θα δούμε ότι, και, το βάθος d μπορεί να υπολογισθεί άμεσα από την απόσταση επιφάνειας a , χρησιμοποιώντας την σχέση:

$$d' = \frac{a}{\tan \beta}$$

Η τιμή αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το πάχος του αντικειμένου (ουσιαστικό βάθος) και μετά το αληθινό βάθος υπολογίζεται με ακρίβεια με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση ρύθμισης σε πορείες δέσμης.

Παράδειγμα 2:

Εύρος ελέγχου $0 - 100\text{mm}$ σε αποστάσεις επιφάνειας, $\beta = 60$ και προκειμένου για εγκάρσιο κύμα σε ατσάλι.

Πάχος του αντικειμένου που εξετάζεται: $T = 40\text{mm}$



Αντήχηση ανακλαστήρα στην υποδιαίρεση κλίμακας 8,4 SR = 8,4 υποδιαίρεση κλίμακας.

$$K = 10 \frac{\text{mm}}{\text{υποδ. κλίμακας}}$$

$$\alpha = K \cdot T = 10 \frac{\text{mm}}{\text{υποδ.}} \cdot 8,4SK_t = 84\text{mm}$$

Η απόσταση επιφάνειας (απόσταση: σημείο ένδειξης της δέσμης-σημείο προβολής) είναι 84 mm.

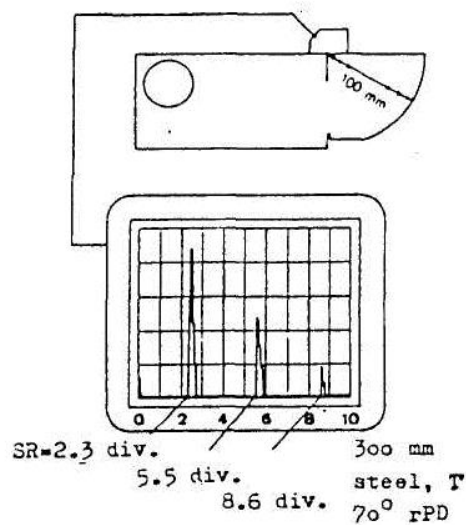
Υπολογισμός του βάθους του ανακλαστήρα:

$$d' = \frac{a}{\tan 60^\circ} = \frac{84\text{mm}}{1,73} = 48,5\text{mm}$$

επειδή $T < d' < 2T$ συνεπάγεται
ότι:

$$d = 2T - d' = 2 \cdot 40\text{mm} - 48,5$$

Είναι πολύ πιο εύκολο να βρεθεί η απόσταση επιφάνειας, αν αφαιρέσουμε την απόσταση X (ανάμεσα στο μπροστινό άκρο του ακροδέκτη και το σημείο ένδειξης του ακροδέκτη) από την απόσταση επιφάνειας του ανακλαστήρα. Μπορούμε τώρα να βρούμε απ' ευθείας αυτήν την τιμή ξεκινώντας από το μπροστινό άκρο του ακροδέκτη (Εικ.42).





Εικόνα 42 Ρύθμιση πορείας δέσμης

2.6.4.4 Ρύθμιση σε ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας

Η αφαίρεση της απόστασης X αντιστοιχεί σε αλλαγή του εύρους που ελέγχεται, το οποίο έχει ρυθμιστεί σε αποστάσεις επιφάνειας, από αυτήν την τιμή X προς τα αριστερά. Μέσω αυτής της αλλαγής, μπορούμε να διαβάσουμε την ελαττωμένη απόσταση επιφάνειας ενός ανακλαστήρα απ' ευθείας από την οθόνη CRT. Για ρύθμιση σε ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας, υπολογίζουμε πρώτα τις αποστάσεις επιφάνειας από τις πορείες δέσμης και από αυτές τις αντίστοιχες ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας αφαιρώντας την X . Σύμφωνα με το εύρος που ελέγχεται, καθορίζουμε στη συνέχεια από αυτές τις ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας τις θέσεις της κλίμακας.

Παράδειγμα:

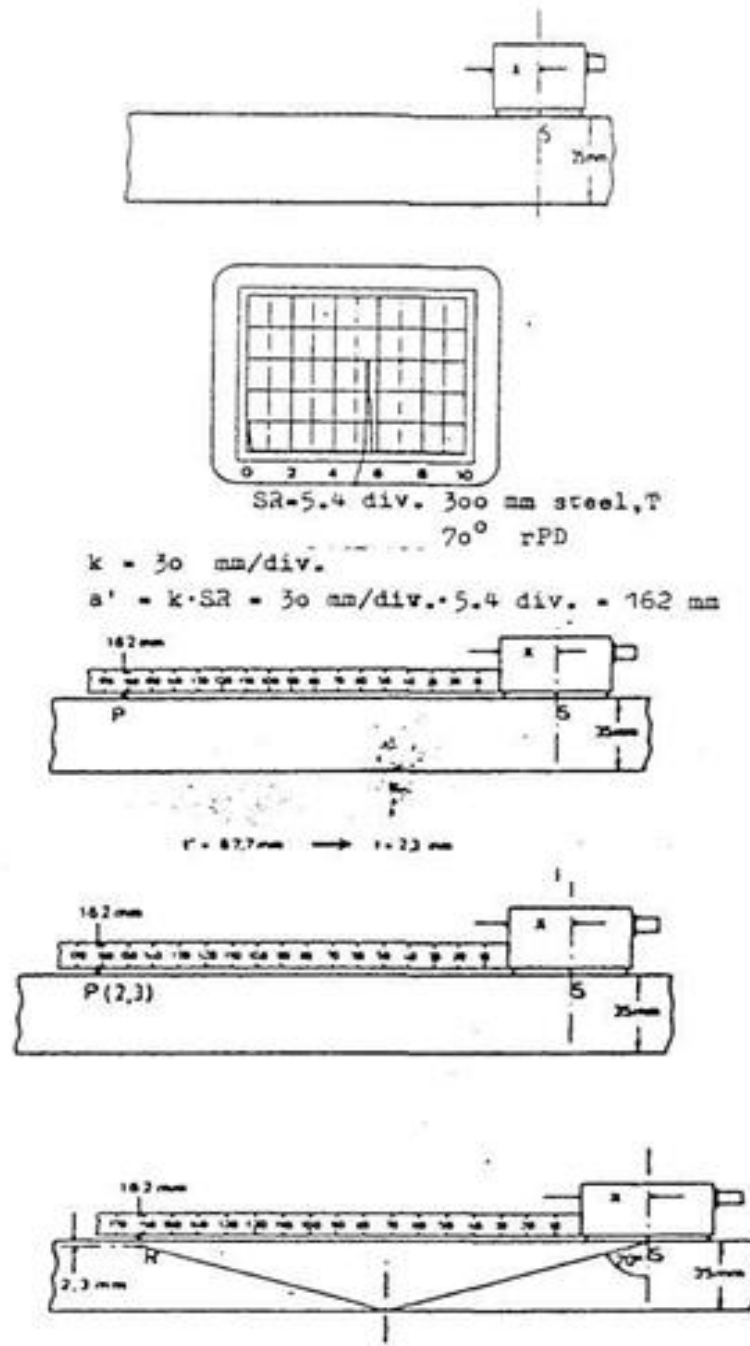
Εύρος ελέγχου 0 – 300mm ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας $\beta = 70$ μοίρες, εκάρσιο κύμα σε ατσάλι (Εικ.43).

$$K = 30 \frac{mm}{υποδ.}, \quad X = 24mm$$

σώμα ρύθμισης V1, ακτίνα: 100 mm

Πίνακας 7 Παράμετροι Παραδείγματος

n	S(mm)	a(mm)	a'(mm)	SR(υποδιαίρ)
	$S_n = n \cdot 100mm$	$an = S_n \cdot \sin \beta$	$a'n = an - X$	$SR_n = a'n/K$
1	100	94,0	70,0	2,3
2	200	187,9	163,9	5,5
3	300	281,9	257,9	8,6



Εικόνα 43 Ρύθμιση σε ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας

2.5.4.1 Εντοπισμός ανακλαστήρων με ρύθμιση σε ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας

- 98 -



Παράδειγμα:

Εύρος ελέγχου 0 – 300 mm ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας $\beta = 70$ μοίρες, εγκάρσιο κύμα σε ατσάλι.

$$K = 30 \frac{\text{mm}}{\text{υποδο. κλίμακας}}$$

Πάχος αντικειμένου: $T = 35\text{mm}$

αντήχηση ανακλαστήρα: $SR = 5,4$ υποδιαίρ. κλίμακας

Από μια θέση SR της κλίμακας της αντήχησης του ανακλαστήρα, υπολογίζουμε την ελαττωμένη απόσταση επιφάνειας a' , πολλαπλασιάζοντας με ένα συντελεστή κλίμακας K :

$$a' = K \cdot SR = 30 \frac{\text{mm}}{\text{υποδ.}} \cdot 5,4\text{skt} = 162\text{mm}$$

Στο σημείο αυτό, θέτουμε το μέτρο απ' ευθείας στο μπροστινό άκρο του ακροδέκτη και σημειώνουμε πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου το σημείο προβολής P στα 162mm.

Το ουσιαστικό βάθος d του ανακλαστήρα υπολογίζεται από την σχέση:

$$d' = \frac{a' + x}{\tan \beta}$$

Για το παράδειγμα μας συνεπάγεται ότι:

$$d' = \frac{162\text{mm} + 24\text{mm}}{\tan 70^\circ} = 67,7\text{mm}$$

και έτσι το πραγματικά βάθος είναι:

$$d = 2T - d' = 2 \cdot 35\text{mm} - 67,7 = 2,3\text{mm}$$

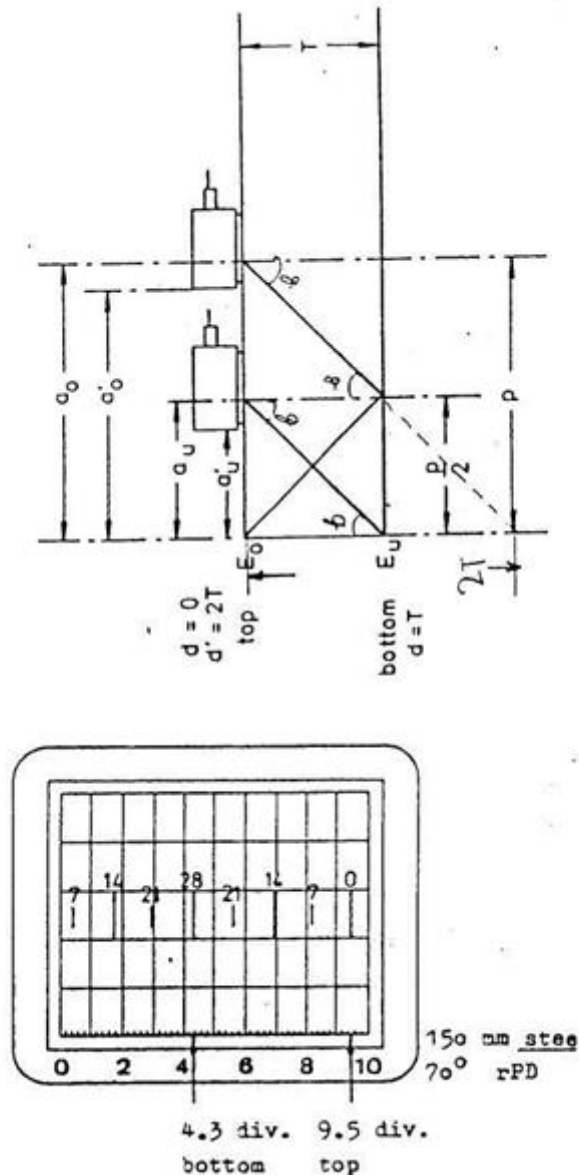
2.6.4.5 Βάθος κλίμακας

Το βάθος της κλίμακας μπορεί να σχεδιασθεί πάνω στην οθόνη CRT με αποτέλεσμα να ευκολύνεται ο υπολογισμός της θέσης του βάθους (Εικ.44). Για τον σκοπό αυτό διαλέγουμε δύο χαρακτηριστικές τιμές βάθους d :

$d = T$ και $d = 0$ (βάθος ανακλαστήρα στην απόσταση πηδήματος).



Για τον υπολογισμό πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το ουσιαστικό βάθος $d' = 2T$ επειδή η τιμή $d = 0$ συνδέεται με ένα ανακλαστήρα σε απόσταση πηδήματος P . Για αυτές τις δύο τιμές βάθους $d' = T$ και $d' = 2T$ υπολογίζουμε τις πορείες S της δέσμης, τις αποστάσεις a επιφάνειας ή τις ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας a' ανάλογα με την ρύθμιση.



Εικόνα 44 Υπολογισμός Βάθους Κλίμακας

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον τύπο της ρύθμισης, μετατρέπουμε τις τιμές που πήραμε με τον τρόπο αυτό σε θέσεις κλίμακας. Οι υπολογισμένες θέσεις της



κλίμακας σημειώνονται επί της οθόνης CRT και χαράζονται και "κάτω" και "πάνω". Μέσες τιμές μπορούν να ληφθούν με μονή υποδιαίρεση (γραμμική παρεμβολή).

Χρησιμοποιώντας την ίδια βαθμολόγηση, το βάθος της κλίμακας μπορεί να απλωθεί προς τα αριστερά και προς τα δεξιά (γραμμική παρεμβολή).

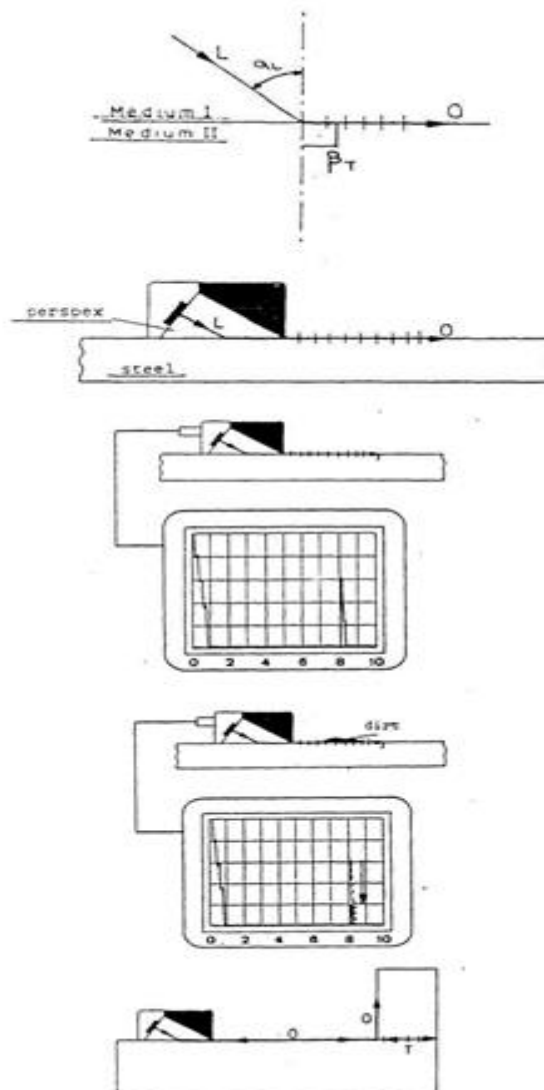
Παράδειγμα (Εικ.45):

Έυρος ελέγχου 0 – 150 mm ελαττωμένες αποστάσεις επιφάνειας,

$B = 70$, εγκάρσιο κύμα, σε ατσάλι

Πάχος του αντικειμένου που ελέγχεται: $T = 28$ mm

$X = 12$ mm





Εικόνα 45 Παράδειγμα Βαθμολόγησης Βάθους Κλίμακας

2.6.5 Κύματα Επιφάνειας και Πλάκας

Τα επιφανειακά κύματα δημιουργούνται κυρίως από το γεγονός ότι η γωνία του πλαστικού επιβραδυντή, με σχήμα σφήνα, στον ακροδέκτη έχει επιλεχθεί τόσο μεγάλη ώστε το εγκάρσιο κύμα κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του αντικείμενου. Τα εγκάρσια κύματα που τρέχουν κατά μήκος της επιφάνειας διεγείρουν τα σωματίδια της επιφάνειας να ταλαντωθούν σε ελλειπτικές τροχιές. Το βάθος εισχώρησης αυτού του τύπου κύματος έχει την τάξη μεγέθους του μήκους κύματος. Έτσι, ο έλεγχος με επιφανειακά κύματα επιτρέπει μονάχα την ανίχνευση και τον εντοπισμό ελαττωμάτων που βρίσκονται απευθείας πάνω στην επιφάνεια. Ανάλογα με τα υλικά της γραμμής επιβράδυνσης και με το υλικό του αντικείμενου που εξετάζεται, έχουμε να υπολογίσουμε τη γωνία πρόσπτωσης του διαμήκους κύματος που προκαλεί το επιφανειακό κύμα στο αντικείμενο.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα, υπολογίζουμε την γωνία για την μεσο-επιφάνεια πλαστικό/ατσάλι:

$$\frac{\sin a}{\sin \beta_T} = \frac{C_{PL,L}}{C_{st,T}} \quad \text{και} \quad \beta_T = 90^\circ$$

$$\sin \beta_T = 1$$

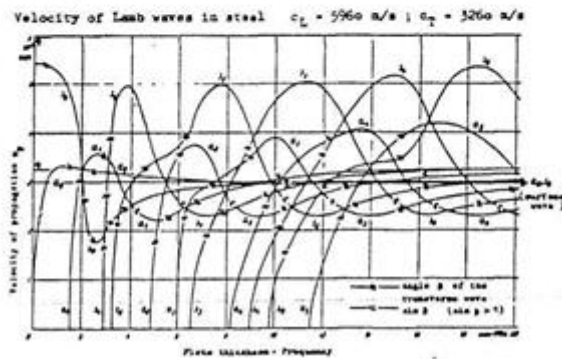
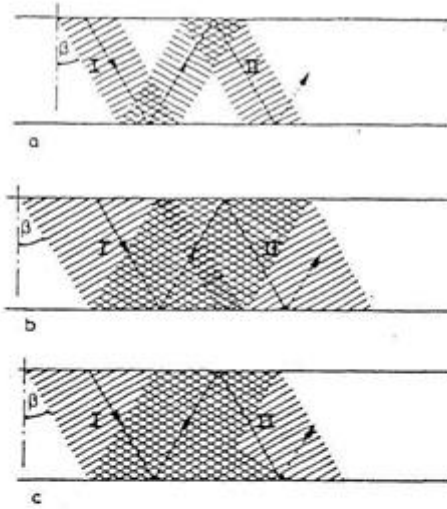
$$\sin a = \frac{C_{PL,L}}{C_{st,T}} = \frac{2730}{3255} = 0,839 \rightarrow a = 57^\circ$$

Η γωνία αυτή είναι "Η δεύτερη κρίσιμη γωνία". Η ευνοϊκότερη επίδραση ενός ακροδέκτη επιφανειακού κύματος εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος στο αντικείμενο. Αν η ταχύτητα αυτή στο αντικείμενο αποκλίνει περισσότερο από 5% από την καθορισμένη ταχύτητα για τον ακροδέκτη, τότε το αποτέλεσμα είναι ή ότι δεν λαμβάνουν χώρα επιφανειακά κύματα καθόλου ή ότι δημιουργούνται εγκάρσια κύματα που κινούνται υπό γωνία μέσα στο αντικείμενο. Η ταχύτητα διάδοσης επιφανειακών κυμάτων εξαρτάται από την ποιότητα της επιφάνειας του αντικείμενου. Επιφανειακή τάση κατά τη διεύθυνση της διάδοσης αυξάνει την ταχύτητα ενώ η πίεση την ελαττώνει. Επιφανειακά κύματα μπορούν να επιβραδυνθούν ακουμπώντας ένα δάκτυλο στην επιφάνεια. Επίσης μέσα σύζευξης ή σκόνη πάνω στην επιφάνεια έχουν σαν αποτέλεσμα μια σημαντική επιβράδυνση των



κυμάτων. Για το λόγο αυτό, επιφανειακά κύματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο με τεχνική εμβάπτιση.

Τα επιφανειακά κύματα είναι κατάλληλα στο να ανιχνεύσουν μικρές επιφανειακές ρωγμές και ελαττώματα που βρίσκονται σε μικρή απόσταση κάτω από την επιφάνεια. Το πλάτος της αντήχησης εξαρτάται μονάχα εν μέρει από το βάθος της ρωγμής και για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη για να μετρήσει το βάθος της ρωγμής. Τα επιφανειακά κύματα βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε αντικείμενα που έχουν ομαλές και λείες επιφάνειες. Τα επιφανειακά κύματα μπορούν να ακολουθήσουν επιφάνειες καμπύλων και να περάσουν πάνω από άκρα, υπό την προϋπόθεση ότι είναι καμπυλωμένες με ακτίνα μεγαλύτερη από το μήκος κύματος. Αλλά, ακόμη και μυτερά άκρα δεν ανακλούν πλήρως το επιφανειακό κύμα. Ένα μέρος του επιφανειακού κύματος κινείται πάνω από τα άκρα ενώ το υπόλοιπο μέρος μετατρέπεται σε εγκάρσιο κύμα (βλέπε διάγραμμα). Για αυτό είναι πιθανό ότι από αυτό το εγκάρσιο κύμα μπορεί να ληφθεί μία αντήχηση. Η μέθοδος κατά την οποία ακουμπάμε με ένα δάκτυλο είναι πολύ χρήσιμη στο να αποφανθούμε από ποιο τύπο κύματος προέρχονται αυτές οι αντηχήσεις (Εικ.46).



Εικόνα 46 Κύματα Επιφανείας και πλάκας

Μια αντήρηση από ένα εγκάρσιο κύμα, παραδείγματος χάριν, μπορεί να αποσβεστεί ακουμπώντας ένα δακτύλιο στην επιφάνεια μπροστά από το προεξέχον άκρο και όχι πίσω από αυτό.

Το επιφανειακό κύμα δεν έχει μεγάλη σημασία για την τεχνική ελέγχου με υπερήχους λόγω του ότι τα περισσότερα από τα ελαττώματα που ανιχνεύονται μπορούν να γίνουν ορατά με γυμνά μάτι ή μπορούν να εντοπισθούν χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους με μη καταστρεπτικούς ελέγχους.

Αν μια δέσμη ήχου διαδίδεται, υπό γωνία σε μια λεπτή πλάκα, τότε η ηχητική δέσμη πρόσπτωσης I επικαλύπτει την ανακλασθείσα ηχητική δέσμη II (Εικ.46b & c).

Για να καλυφθεί μια πλάκα με ήχο, όσο πιο πολύ γίνεται, το πλάτος της ηχητικής δέσμης πρέπει να επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συμφωνεί με το πάχος



τής πλάκας. Αν η ανάκλαση δεν είναι ικανοποιητική, τότε μπορεί, στην περιοχή επικάλυψης, μια μέγιστη πίεση ήχου να συμπέσει με μια ελάχιστη πίεση ήχου, και έτσι μερικά η μια να σβήνει την άλλη. Αν διαλέξουμε μια κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης τότε οι δύο ηχητικές δέσμες επικαλύπτουν η μια την άλλη ανά φάση.

Αυτή η επικάλυψη ανά φάση ενός εγκάρσιου και ενός διαμήκους κύματος αναπτύσσει ένα σύνθετο κύμα.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες σύνθετων κυμάτων, δηλαδή το συμμετρικό και το ασύμμετρο. Κάθε μια από τις δύο κατηγορίες κυμάτων μπορεί να υπάρξει σε άπειρους διαφορετικούς τύπους. Η πιο κατάλληλη γωνία για τη διάδοση ενός από αυτές τις κατηγορίες κυμάτων σε ατσάλι μπορεί να βρεθεί στο ακόλουθο διάγραμμα λαμβάνοντας υπ' όψιν το πάχος της πλάκας και την συχνότητα που χρησιμοποιήθηκε.

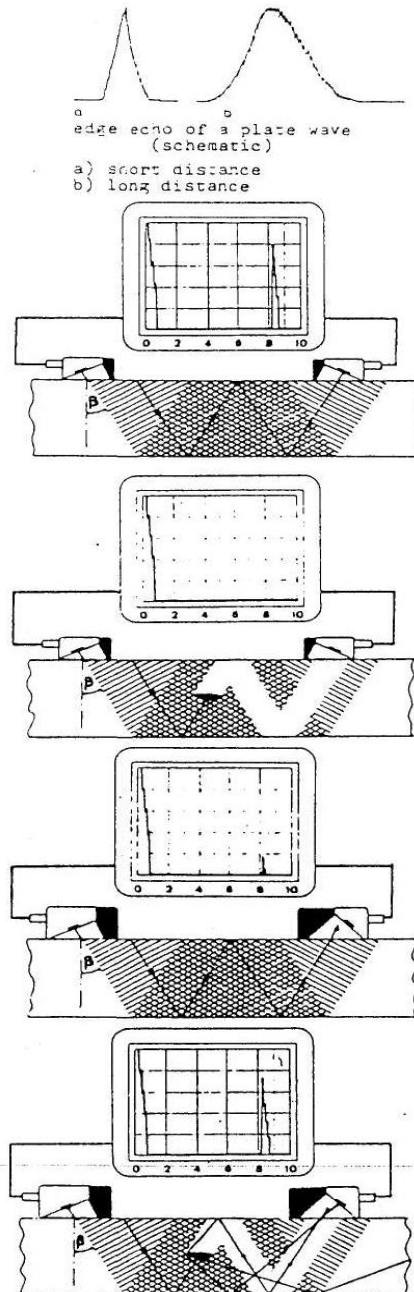
Πολύ συχνά, η πιο κατάλληλη γωνία βρίσκεται με πειραματισμό. Μπορούμε να πάρουμε μια αντήχηση άκρου από μια μεγάλη απόσταση μόνο αν διαλέξουμε μια κατάλληλη γωνία. Το διάγραμμα δείχνει με φανερό τρόπο, ότι η ταχύτητα διάδοσης δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό αλλά επίσης και από την συχνότητα και από το πάχος της πλάκας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι αντηχήσεις από ένα σύνθετο κύμα είναι πολλές φορές πλατειές και με σχήμα κώδωνος. Οι παλμοί, οι οποίοι περιλαμβάνουν ένα ολόκληρο φάσμα συχνότητας, διαχωρίζονται λόγω της ταχύτητας διάδοσης που εξαρτάται από την συχνότητα (διασπορά).

Στην περίπτωση μεγάλων αποστάσεων και με ορισμένες γωνίες είναι δυνατόν να εμφανισθούν πάνω στην οθόνη CRT αντηχήσεις άκρων από διαφορετικούς τύπους κυμάτων και μετά μπορούν οι αντηχήσεις αυτές να ερμηνευθούν λανθασμένα σαν αντηχήσεις ελαττωμάτων. Οι αντηχήσεις αυτές μπορούν να επιβεβαιωθούν μεγάλωνοντας προσεκτικά τις ιδιαίτερες αντηχήσεις και μετά ακουμπώντας ένα δάχτυλο πάνω στην επιφάνεια μέχρι το άκρο.

Για να ανιχνεύσουμε ελαττώματα με σύνθετα κύματα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και την μέθοδο παλμού αντήχησης και την μέθοδο μέσω διάδοσης. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο παλμού αντήχησης περνούμε από ένα ανακλαστήρα μια αντήχηση που εμποδίζει την διάδοση. Η μέθοδος μέσω διάδοσης χρησιμοποιεί διαφορετικούς ακροδέκτες πομπού και δέκτη. Η γωνία του ακροδέκτη πρέπει να επιλεγθεί έτσι ώστε ο ακροδέκτης να μπορεί να δεχθεί ενέργεια ήχου από την πλάκα. Αν δεν υπάρχουν ελαττώματα πάνω στην πλάκα, τότε πάνω στην οθόνη δεχόμαστε μια αντήχηση μέσω εκπομπής. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει ένας ανακλαστήρας μεταξύ του δέκτη και του πομπού, τότε η ενέργεια ήχου που περνούμε



ελαττώνεται λόγω ανάκλασης και του τρόπου μετατροπής. Η συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι ότι και το πλάτος της αντήχησης μέσω εκπομπής ελαττώνεται (Σχ.47).



Εικόνα 47 Ανίχνευση Ελαττωμάτων



Ακόμη, μπορεί να καθορισθεί και η γωνία δέκτη με τέτοιο τρόπο ώστε μια πλακά χωρίς ελαττώματα δεν μπορεί να δεχθεί αντήχηση μέσω εκπομπής.

Υστερα, αν το σύνθετο κύμα προσπέσει σε ένα ανακλαστήρα, η ενέργεια του ήχου θα ανακλασθεί προς διάφορες κατευθύνσεις λόγω του τρόπου μετατροπής και λόγω εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων που αναπτύσσονται.

Ένας από αυτούς του άλλους τύπους κυμάτων μπορεί να μετατραπεί μετά σε ηλεκτρικά σήματα με την βοήθεια του ακροδέκτη του δέκτη και έτσι να δώσει μια ένδειξη πάνω στην οθόνη.

Και οι δύο μέθοδοι ελέγχου είναι κατάλληλες στο να ανιχνεύσουν επίπεδα ελαττώματα τα οποία κινούνται κοντά στην επιφάνεια. Ακόμη, με σύνθετα κύματα μπορεί να ελεγχθεί ο βαθμός ένωσης ανάμεσα σε λεπτά επίπεδα και σε δομές σχήματος κηρύθρας.

2.6.6 Έλεγχος με ακροδέκτες διπλού κρυστάλλου (τεχνική TR)

Ακροδέκτες ευθύγραμμης-δέσμης και ακροδέκτες γωνιακής δέσμης είναι εφοδιασμένοι με μόνο ένα κρύσταλλο ο οποίος έχει την λειτουργία και του πομπού και του δέκτη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ανάλογα με το μήκος της γραμμής επιβράδυνσης, ότι ο αρχικός παλμός μετατίθεται πάνω στην οθόνη CRT, είτε πλήρως είτε εν μέρει. Αυτό συνεπάγεται ότι οι αντηχήσεις από ελαττώματα κοντινής επιφάνειας είτε δεν ανιχνεύονται καθόλου, είτε δεν ανιχνεύονται με σαφήνεια (νεκρή ζώνη, ζώνη επιρροής αρχικού παλμού). Εν τούτοις, σε πρακτικό έλεγχο, ερχόμαστε συχνά αντιμέτωποι με περιπτώσεις όπου πρέπει να ελέγξουμε λεπτά τμήματα, ή όπου πρέπει να ανιχνευθούν ειδικά ελαττώματα κοντινού επιπέδου. Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιούμε ένα ακροδέκτη με δύο κρυσταλλικές μονάδες οι οποίες διαχωρίζονται ηλεκτρικά και ακουστικά, δηλαδή η μια μονάδα εκπέμπει μόνο ηχητικούς παλμούς και η άλλη έχει μονάχα την λειτουργία δέκτη.

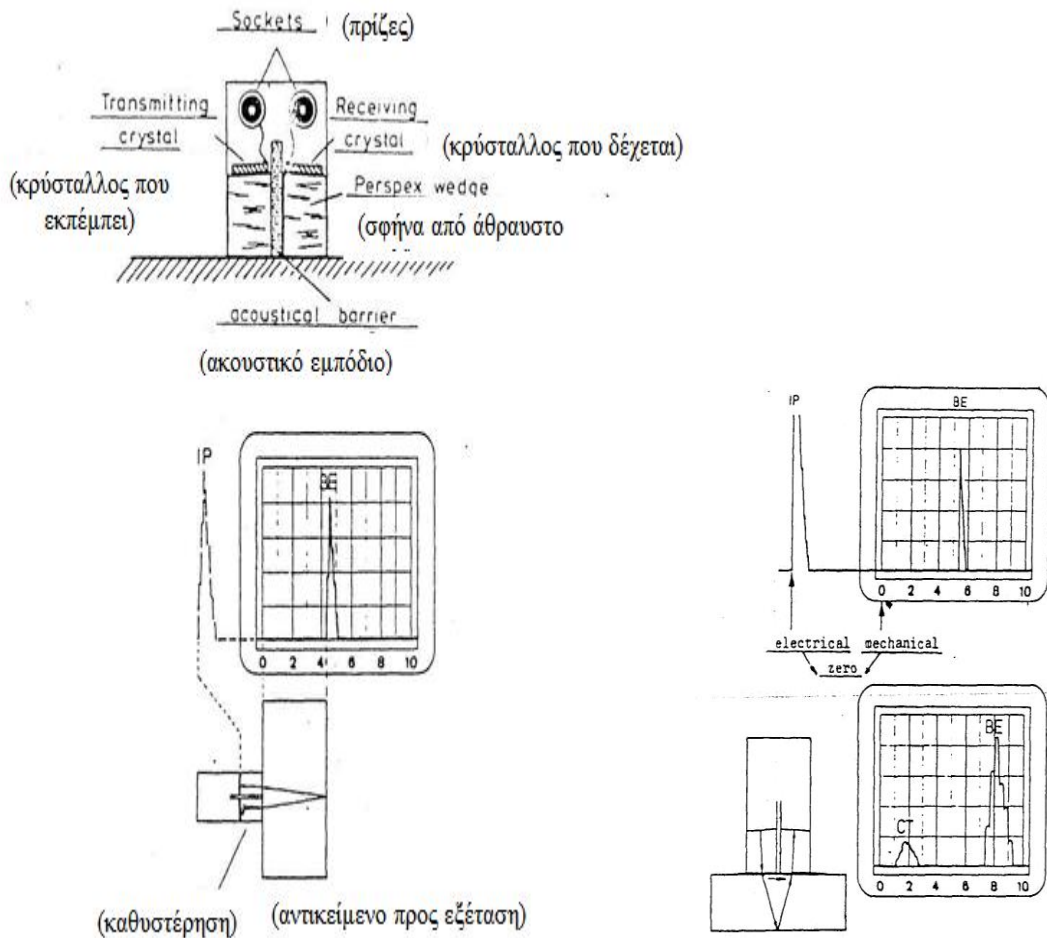
2.6.6.1 Ο TR ακροδέκτης

Κάθε μονάδα κρυστάλλου αποτελείται από μια γραμμή καθυστέρησης από άθραυστο γυαλί από έχει το σχήμα ενός ημικυλίνδρου. Ο κρύσταλλος, ο οποίος είναι ημικυλινδρικός, είναι ενωμένος με την γραμμή καθυστέρησης. Και οι δύο κρυσταλλικές μονάδες, οι οποίες είναι διαχωρισμένες η μια από την άλλη απ' ένα ακουστικό επίπεδο διαχωρισμού, βρίσκονται σε ένα στέγαστρο ακροδέκτη και είναι συνδεδεμένες με 2 ηλεκτρικά διαχωρισμένα ντουί. Μια πρόσθετη αύξηση σε ευαισθησία στην ζώνη κοντινής επιφάνειας επιτυγχάνεται με μια μικρή κλίση των κρυστάλλων, το ένα



προς το άλλο. Αυτή η γωνία κλίσης, η οποία ονομάζεται **γωνία στέγης**, ποικίλει σε μέγεθος από 0° έως περίπου 12° ανάλογα με τον σκοπό της εφαρμογής και τον ακροδέκτη.

Αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ακροδέκτη TR συνδεδεμένο με ένα ανιχνευτή ελαττωμάτων με υπέρηχους, τότε το μηχάνημα πρέπει να το ανάψουμε στην θέση TR - λειτουργία (λειτουργία δίδυμου κρυστάλλου)(Εικ.48).



Εικόνα 48 Χρήση Ακροδέκτη TR

Στο ένα ντουί σύνδεσης αντιστοιχεί ο αρχικός παλμός, και στο άλλα ντουί σύνδεσης βρίσκεται η είσοδος του ενισχυτή (δέκτης). Οι παλμοί υπέρηχων δημιουργούνται στο τμήμα εκπομπής του ακροδέκτη και μεταδίδονται στην γραμμή καθυστέρησης. Εν τούτοις, οι αντηχήσεις από την γραμμή καθυστέρησης δεν μετατοπίζονται επί της CRT - οθόνης λόγω του ότι ο κρύσταλλος εκπομπής δεν λειτουργεί σαν δέκτης. Τώρα, αν συνδέσουμε τον ακροδέκτη με μια παράλληλη



επίπεδη πλάκα, θα λάβουμε μια αντήχηση διότι ο ηχητικός παλμός, ο οποίος έχει ανακλασθεί στο πίσω τοίχωμα, κατευθύνεται στο τμήμα του ακροδέκτη που λειτουργεί σαν δέκτης. Αυτό σημαίνει ότι, ο ηχητικός παλμός πέρασε και μέσα από τις γραμμές καθυστέρησης του ακροδέκτη και μέσα από τα αντικείμενο που εξετάζεται. Η απόσταση ανάμεσα στο σημείο του ηλεκτρικού μηδενός (αρχικός παλμός) και του σημείου του μηχανικού μηδενός (επιφάνεια του αντικειμένου) είναι μάλλον μεγάλη, λόγω των μακρών σχετικά γραμμών καθυστέρησης. Για τον λόγο αυτό, ο αρχικός παλμός παρασύρεται προς τα αριστερά, τόσο πολύ έξω από την CRT-οθόνη ώστε η περιοχή κοντινής επιφάνειας να μην καλύπτεται πια.

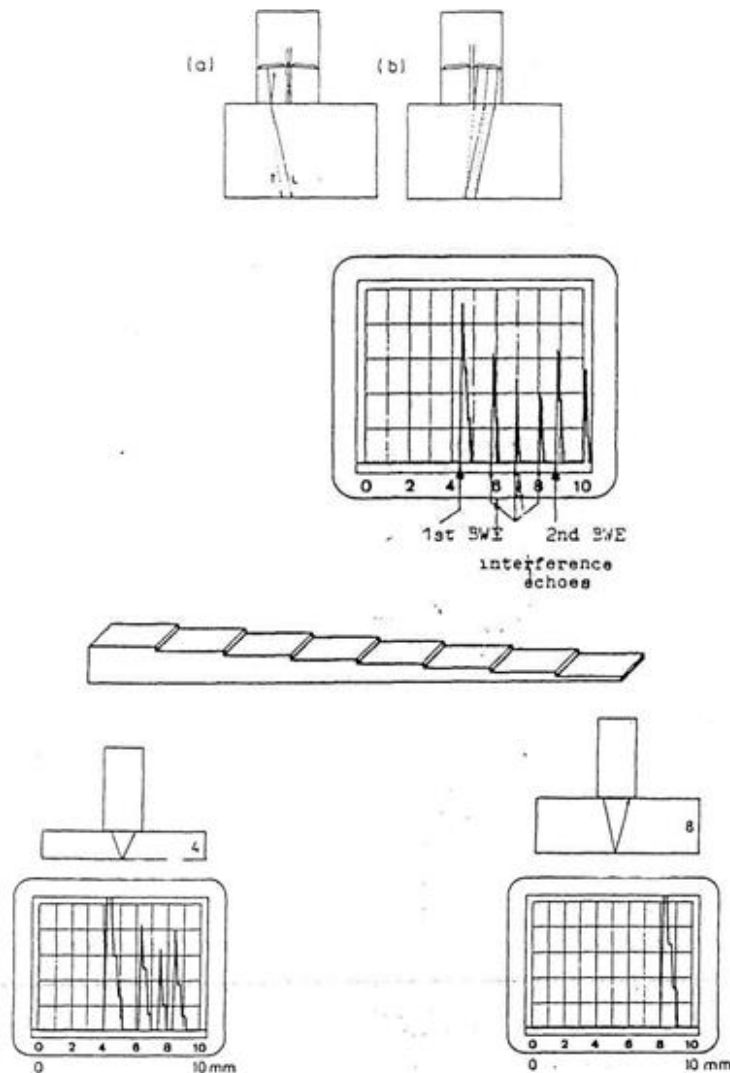
Εν τούτοις, υπάρχει μια αντήχηση ανάμιξης στην περιοχή κοντινής επιφάνειας με ένα όργανο μεγάλης αύξησης. Αυτή η αντήχηση ανάμιξης προκαλείται από μικρά ποσοστά ήχου, τα οποία καθώς ταξιδεύουν διαμέσου του επιπέδου ακουστικού διαχωρισμού ή κατά μήκος της επιφάνειας διαμέσου του μέσου σύζευξης, φθάνουν στον κρύσταλλο που δρα σαν δέκτης. Αυτή η αντήχηση ανάμιξης, η οποία λαμβάνει χώρα με TR ακροδέκτες, ορίζεται σαν **αντήχηση διαλόγου** διότι αφορά ένα άμεσο διάλογο ηχητικών παλμών.

Εν τούτοις, γενικά η αντήχηση διαλόγου δεν επηρεάζει την ικανότητα ανίχνευσης μικρών ανακλαστήρων κοντινής επιφάνειας. Αυτό το σχήμα ακροδέκτη έχει σαν αποτέλεσμα μια πολύ καλή ενέργεια κοντινής ευκρίνειας. Από την άλλη μεριά, έχει σαν αποτέλεσμα επίσης μια ακόμη ανάμιξη που δυσκολεύει την ρύθμιση του εύρους ελέγχου. Το γεγονός ότι οι δύο κρύσταλλοι των TR ακροδεκτών έχουν μια μικρή κλίση ο ένας προς τον άλλο δημιουργεί διάθλαση και διαίρεση των κυμάτων υπερήχων κατά την εκπομπή από το άθραυστο γυαλί στο ατσάλι (α).

Εντούτοις, διαίρεση του κύματος δεν λαμβάνει χώρα μόνο κατά την διάδοση από το άθραυστο γυαλί προς το ατσάλι αλλά επίσης και στο πίσω τοίχωμα του αντικειμένου μια πού και τα δύο κύματα προσπίπτουν υπό γωνία στο πίσω τοίχωμα. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύνολο 4 σημάτων επιστρέφει από το πίσω τοίχωμα του αντικειμένου (b). Μετά την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος, διάφορες αντηχήσεις ανάμιξης λαμβάνουν χώρα ούτως ώστε η δεύτερη αντήχηση πίσω τοιχώματος από το αντικείμενο να μην μπορεί να αναγνωρισθεί πια εύκολα. Όμως όλες οι αντηχήσεις ανάμιξης λαμβάνουν χώρα μόνο πίσω από την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος λόγω του ότι η ταχύτητα του εγκάρσιου κύματος είναι μικρότερη εκείνης του διαμήκους κύματος. Όταν ρυθμίσουμε τα όργανα που λειτουργούν με TR ακροδέκτες, δεν χρησιμοποιούμε την πρώτη και δεύτερη αντήχηση πίσω τοιχώματος από την ίδια πορεία αναφοράς αλλά τις πρώτες αντηχήσεις πίσω τοιχώματος από δύο πορείες μεταφοράς που έχουν διαφορετικό πάχος. Για να ρυθμίσουμε το εύρος ελέγχου και να



τσεκάρουμε την ρύθμιση χρησιμοποιούμε ένα βαθμιαίο σώμα αναφοράς, π.χ. το βαθμιαίο σώμα VW που έχει 8 βαθμίδες από 1 mm έως 8 mm (Εικ.49).



Εικόνα 49 Έλεγχος Αντήχησης Διαλόγου

2.6.6.2 Ρύθμιση χρησιμοποιώντας έναν ακροδέκτη TR



Όταν η ρύθμιση γίνεται με ένα TR ακροδέκτη τότε επιλέγουμε δυο κατάλληλες βαθμίδες του βαθμιαίου σώματος αναφοράς που περιλαμβάνονται στο επιθυμητό εύρος ελέγχου. Πρώτα, ενώνουμε τον ακροδέκτη με την μικρότερη βαθμίδα και φέρνουμε την αντήχηση πίσω τοιχώματος στην αντίστοιχη θέση της κλίμακας χρησιμοποιώντας την αλλαγή του μηδενικού σημείου (καθυστέρηση)(Εικ.50).

Μετά, ενώνουμε τον ακροδέκτη με την μεγαλύτερη βαθμίδα και φέρνουμε την αντήχηση στην αντίστοιχη θέση της κλίμακας χρησιμοποιώντας το ρυθμιστή επέκτασης (εύρους). Αυτές οι δύο βαθμίδες ρύθμισης επαναλαμβάνονται μέχρις ότου και οι δύο αντηχήσεις να βρίσκονται στις δεξιές θέσεις της κλίμακας.

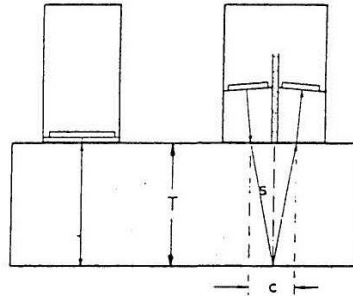
Παράδειγμα: εύρος ελέγχου: 0 – 100 mm

ακροδέκτης : MSEB 4 H Βαθμιαίο σώμα αναφοράς : VW πορείες ρύθμισης : 4 mm και 8mm

- i. **Ένωσε** τον ακροδέκτη με την βαθμίδα 4 mm.
- ii. **Άλλαξε** την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος στη θέση 4 της κλίμακας.
- iii. **Ένωσε** τον ακροδέκτη με την βαθμίδα 8 mm.
- iv. **Επέκτεινε** την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος στην θέση 8 της κλίμακας.
- v. **Επανάλαβε**, αρχίζοντας από το 1, κ.λπ, έως ότου και στις δύο θέσεις του ακροδέκτη οι αντηχήσεις να βρίσκονται στις αντίστοιχες θέσεις 4 και 8 της κλίμακας.

Σημείωση:

- i. Αν η ρύθμιση αύξησης είναι πολύ μεγάλη τότε μπορεί να λάβει χώρα μια αντήχηση διαλόγου την οποία μπορούμε να μπερδέσουμε λέγοντας ότι, είναι αντήχηση πίσω του χώματος. Η αντήχηση διαλόγου μπορεί να ταυτοποιηθεί με δύο τρόπους: Πάντοτε συμβαίνει στην ίδια θέση της κλίμακας, ανεξάρτητα από το πάχος του αντικειμένου, και παρουσιάζει μια έντονη αντίδραση όταν τοποθετήσουμε ένα δάκτυλο στην επιφάνεια σύζευξης.
- ii. Λόγω των μικρών εύρων ελέγχου, που συνήθως ρυθμίζονται με TR ακροδέκτες, το **άλμα δεσμού** μπορεί να προκαλέσει ένα σχετικά μεγάλο σφάλμα μέτρησης και στον ανακλαστήρα ρύθμισης και στον ανακλαστήρα εντοπισμού. Ο χειριστής πρέπει να προσέξει ώστε οι αντηχήσεις που χρησιμοποιούνται να φθάνουν συνεχώς περίπου στο ίδιο ύψος ή ότι έχουν συνεχώς τον ίδιο αριθμό δεσμών υψηλής συχνότητας, κάνοντας μια κατάλληλη ρύθμιση αύξησης.



Εικόνα 50 Ρύθμιση με χρήση του ακροδέκτης TR

Πίνακας 8 Παράμετροι Παραδείγματος

τ	3	u	%
9,0	9,2	0,22	2
8,0	8,2	0,25	3
7,0	7,3	0,28	4
6,0	6,3	0,32	5
5,0	5,4	0,39	8
4,0	4,5	0,47	12
3,0	3,6	0,61	20
2,0	2,8	0,33	-41-
1,0	2,2	1,24	124

2.6.6.3 Μέτρηση της ακρίβειας με TR ακροδέκτες

Εκτός από τις επιδράσεις στην ακρίβεια της μέτρησης, που ήδη γνωρίζουμε από τους ακροδέκτες μονών κρυστάλλων, ένα ακόμη συστηματικό σφάλμα λαμβάνει χώρα με τους TR ακροδέκτες. Η αιτία του είναι το γεγονός ότι οι ηχητικοί παλμοί δεν ταξιδεύουν πλέον ακολουθώντας την κοντύτερη πορεία δια μέσου του αντικειμένου. Αυτή η πρόσθετη απόσταση την οποία πρέπει να διανύσει ο ηχητικός παλμός ονομάζεται **λοξοδρόμηση** (V-πορεία). Η πραγματική πορεία της δέσμης S εξαρτάται επίσης από το πάχος T του αντικειμένου καθώς επίσης και από την απόσταση c ανάμεσα στις ενδείξεις του ακροδέκτη για την έξοδο και την είσοδο του ήχου ή από την τυπική σχέση:

$$S = \sqrt{T^2 + 0,25C^2}$$



Η λοξοδρόμηση u , την οποία διανύει επιπρόσθετα ο ηχητικός παλμός κατά την πορεία με V - σχήμα της δέσμης, ισούται με:

$$u = S - d = \sqrt{T^2 + 0,25C^2} - d$$

Για $c = 4$ mm και για πάχος τοιχώματος από 9mm - 1mm, οι αντίστοιχες τιμές δίνονται στον πίνακα παραπλεύρως.

όπου,

T = πάχος βαθμίδων

S = πραγματικό μήκος της πορείας της δέσμης

u = λοξοδρόμηση ($s-d$)

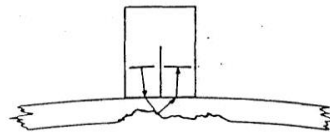
% = σφάλμα μέτρηση που σχετίζεται με το T .

Ο πίνακας δείχνει ότι οι αποκλίσεις είναι μάλλον μικρές με μεγάλο πάχος τοιχώματος, όμως με μικρό πάχος τοιχώματος τα σφάλματα μέτρησης που αναμένονται έχουν αξιόλογο μέγεθος (100% και άνω).

Όμως, το πραγματικό σφάλμα μέτρησης που λαμβάνει χώρα σε ένα όργανο το οποίο έχει ρυθμιστεί σωστά είναι μικρότερο από αυτό που υπολογίζεται στον πίνακα. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν γίνεται η ρύθμιση με τις δύο βαθμίδες ρύθμισης, οι λοξοδρομήσεις αυτών των δύο βαθμίδων απαλείφονται αυτόματα διότι οι αντηχήσεις έχουν φθάσει ακριβώς πάνω στις αντίστοιχες θέσεις της κλίμακας. Στο παράδειγμα που ακολουθεί ρυθμίζουμε την αντήχηση από την βαθμίδα 8 mm ακριβώς πάνω στην υποδιαίρεση 8 της κλίμακας και την αντήχηση από την βαθμίδα 4 mm ακριβώς πάνω στην υποδιαίρεση 4 της κλίμακας με αποτέλεσμα οι βαθμίδες να έχουν μετατοπισθεί στις σωστές θέσεις μολονότι τα μήκη των αντίστοιχων πορειών δέσμης να είναι στα 8,2mm και 4,5 mm.

Στο διάστημα από 8 έως 4mm μπορεί να θεωρηθεί ότι η αύξηση της λοξοδρόμησης είναι γραμμική σε μια πρώτη προσέγγιση που σημαίνει ότι είναι πιθανό να προσδιορισθούν με ακρίβεια όλες οι τιμές που έχουν μετρηθεί σε πάχος τοιχώματος από 4 έως 8mm, δηλαδή:

Ένα σφάλμα μέτρησης που οφείλεται στην λοξοδρόμηση του παλμού ήχου γίνεται αμελητέο υπό την προϋπόθεση ότι η προς μέτρηση απόσταση κείται ανάμεσα στα δύο πάχη των τοιχωμάτων και το διάστημα των δύο πορειών ρύθμισης δεν έχει επιλεγθεί πολύ μεγάλο.



Εικόνα 51 Μέτρηση Ακρίβειας με χρήση του ακροδέκτης TR

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι, ο χειριστής οφείλει να γνωρίζει από ποιο εύρος βάθους μπορεί να αναμένει τιμές μέτρησης πριν να αρχίσει το τεστ με ένα TR ακροδέκτη. Ύστερα, διαλέγει τις δύο τιμές ρύθμισης που απαιτούνται για την ρύθμιση του εύρους ελέγχου. Όλες οι μετρημένες τιμές, που περιλαμβάνονται στο διάστημα των δύο γραμμών ρύθμισης, είναι τιμές ακριβείας για τα συνήθη ανεκτά όρια. Οι τιμές που μετρήθηκαν και είναι μικρότερες από την μικρότερη γραμμή ρύθμισης, έχουν δηλωθεί πολύ μεγάλες. Όσο μεγαλώνει το σφάλμα μέτρησης τόσο μικρότερη είναι η πραγματική απόσταση μέτρησης.

2.6.6.4 Πεδίο εφαρμογής ακροδεκτών διπλού κρυστάλλου

Ένα από τα σπουδαιότερα πεδία εφαρμογής είναι η **μέτρηση του πάχους του εναπομείναντος τοιχώματος** σε σωλήνες και δοχεία που είναι εκτεθειμένα σε σκουριά και διάβρωση. Το κύριο πλεονέκτημα είναι το ότι οι εγκαταστάσεις και οι σταθμοί που έχουν να ελεγχθούν δεν χρειάζεται να σταματήσουν να λειτουργούν και έτσι απώλειες από στάση λειτουργίας δεν λαμβάνουν χωρά. Η ακρίβεια μέτρησης είναι 1/10 mm με πάχος τοιχώματος από 0,5 mm και άνω, και οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν σε συστήματα των οποίων οι θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν τους 500°C περίπου.

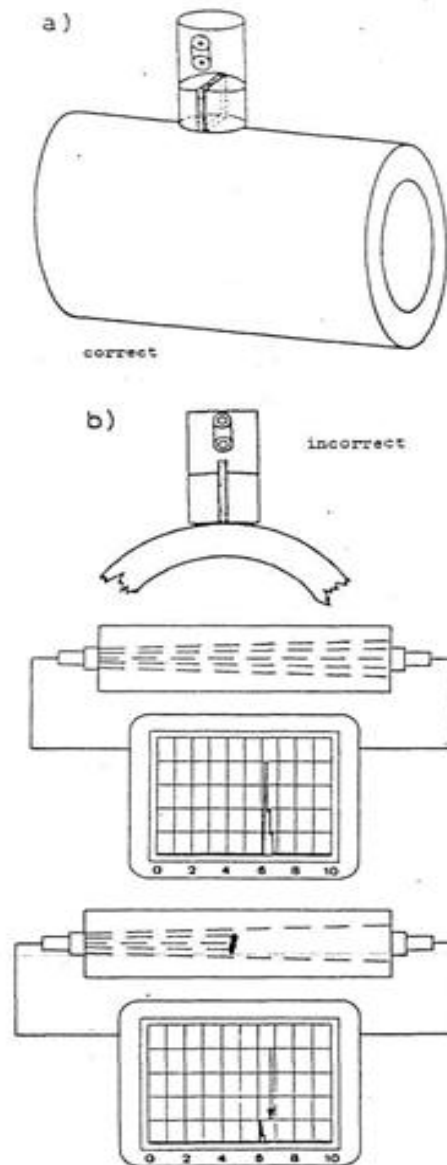
Ακροδέκτες με δίδυμους κρυστάλλους χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με ψηφιακούς μετρητές πάχους τοιχώματος. Αφού ενώσουμε τον ακροδέκτη, περνούμε απ' ευθείας ψηφιακά το πάχος του τοιχώματος σε mm ή ίντσες.

Λόγω της μεγάλης ευαισθησίας των ακροδεκτών με δίδυμους κρυστάλλους όσον αφορά την ζώνη κοντινής επιφάνειας, οι ακροδέκτες αυτοί είναι επίσης κατάλληλοι στο να εντοπίσουν τις θέσεις μικρών ελαττωμάτων σε βάθος περίπου 0,6mm. Για τον λόγο αυτό, οι ακροδέκτες με δίδυμους κρυστάλλους χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ελαττωμάτων σε λεπτά τμήματα. Επίπεδα ελαττώματα που είναι, παραλλήλα με την επιφάνεια όπως ατέλειες φυλλωτής μορφής είναι σχετικά ανιχνευσιμα και μετρημένα με ακρίβεια όταν χρησιμοποιείται ένας ακροδέκτης δίδυμου κρυστάλλου γιατί διαθέτει στην πιο ευαίσθητη ζώνη του μια πολύ στενή δέσμη ήχου. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο **μισής τιμής** (σάρωση με ένα



τμήμα 6dB του πάχους της αντήχησης) μπορεί να γίνει ένας σχετικά ακριβής προσδιορισμός του άκρου επίπεδου ελαττώματος.

Οι ακροδέκτες με δίδυμους κρυστάλλους είναι κατάλληλοι και για τις επιφάνειες εκείνες που έχουν κυρτή καμπυλότητα, π.χ. οι σωλήνες. Στην περίπτωση αυτή, η κανονική σύζευξη του ακροδέκτη είναι πολύ σημαντική στο να πάρουμε αξιόπιστα και οριστικά αποτελέσματα ελέγχου. Τα επίπεδο ακουστικού διαχωρισμού (εμπόδια) πρέπει να διατρέξει την διεύθυνση της καμπυλότητας (εγκάρσια προς τον άξονα του σωλήνα) διότι αυτό μας βεβαιώνει ότι οι δείκτες του ακροδέκτη έχουν μια άμεση επαφή με την επιφάνεια. Αν κάνουμε την σύζευξη του ακροδέκτη με τέτοιο τρόπο ώστε το επίπεδο διαχωρισμού να βρίσκεται κατά μήκος του άξονα του σωλήνα, τότε οι δείκτες του ακροδέκτη θα δημιουργήσουν ένα κενό σχήματος σφήνας που θα επιφέρει ασταθή σύζευξη και σφάλματα μέτρησης. Στην περίπτωση ακτινών μεγάλης καμπυλότητας ή κοίλων επιφανειών, είναι δυνατό να λειανθεί η γραμμή καθυστέρησης του ακροδέκτη ώστε να συμφωνεί με τις ιδιαίτερες επιφάνειες με σκοπό την σιγουριά της ευνοϊκότερης σύζευξης του ακροδέκτη (Εικ.52).



Εικόνα 52 Εφαρμογή ακροδεκτών διπλού κρυστάλλου

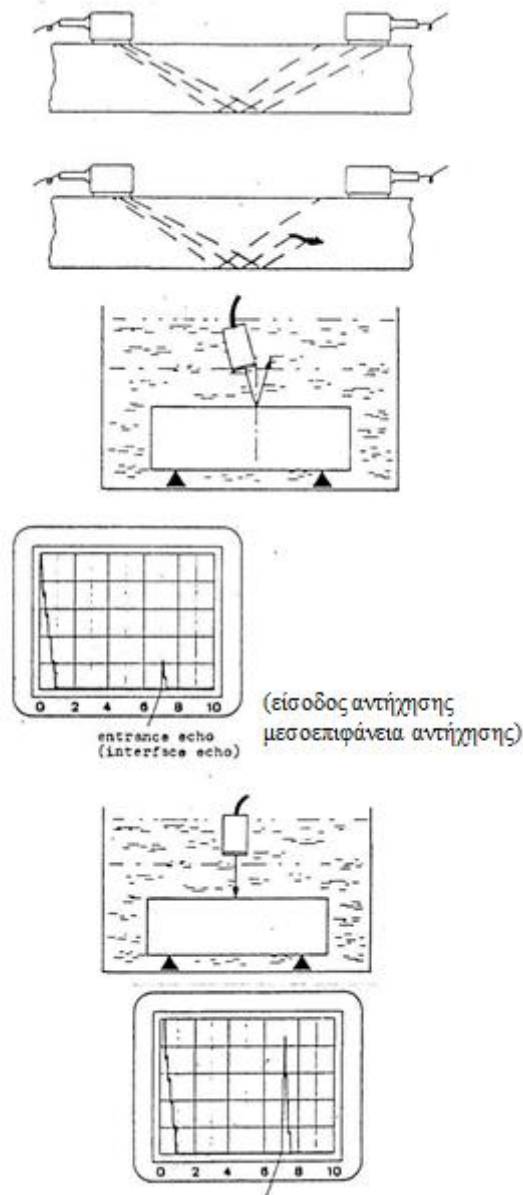
2.6.7 Έλεγχος με δύο αντικριστές κεφαλές

Η πιο παλιά μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε σε έλεγχο με υπέρηχους είναι η τεχνική μέσω εκπομπής. Ένας ακροδέκτης χρησιμοποιείται για να διαδώσει τον ήχο μέσα στο αντικείμενο που ελέγχεται και ένας άλλος ακροδέκτης που βρίσκεται στην απέναντι πλευρά δέχεται τον ήχο αυτό. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή, συγκρίνουμε την ένταση του ήχου από μια περιοχή χωρίς ελαττώματα, με εκείνη από μια ελαττωματική περιοχή.



Ένα ελάττωμα στην περιοχή του ήχου επισκιάζει τμήμα της ηχητικής ενέργειας με αποτέλεσμα η ένταση την οποία μετράμε στον δέκτη να είναι μικρότερη σε σύγκριση με μια περιοχή δίχως ελαττώματα. Η επίδραση της επισκίασης αυτής είναι μεγάλη με μεγάλα ελαττώματα σε σύγκριση με το μήκος κύματος, μια που η επισκιασμένη περιοχή ανακτάται μερικά ή ολικά με ήχο λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Αυτή η μέθοδος έντασης περιορίζεται ακόμη παραπάνω από την μεταβολή πλάτους λόγω των μεταβολών σύζευξης και των διαφόρων γεωμετριών των αντικειμένων που μελετώνται. Αν για την μέθοδο μέσω διάδοσης χρησιμοποιούμε συνεχή ήχο, τότε μπορούν να αναπτυχθούν στάσιμα κύματα ανάλογα με την συχνότητα ελέγχου και τις διαστάσεις του αντικειμένου που ελέγχεται. Αυτά τα στάσιμα κύματα μπορούν αμέσως να προκαλέσουν μεταβολές του πλάτους της ένδειξης μέσω διάδοσης ακόμη και όταν υπάρχουν μόνο μικρές μεταβολές πάχους στο αντικείμενο. Μπορούμε να αποφύγουμε τα στάσιμα κύματα ή ταλαντεύοντας την συχνότητα ή μέσω βραχέων (κοντών) παλμών. Οι μεταβολές του πλάτους που οφείλονται σε ένα ελάττωμα μπορούν λοιπόν να αναγνωρισθούν μόνο σαν τέτοιες αν οι μεταβολές είναι μεγαλύτερες από τις συστηματικές που προαναφέρθηκαν. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν μπορεί να γίνει καμιά δήλωση σχετικά με το βάθος και την έκταση του ελαττώματος. Αν αφήσουμε κατά μέρος τα μειονεκτήματα αυτά, η μέθοδος μέσω διάδοσης εξακολουθεί να χρησιμοποιείται, κυρίως για τον έλεγχο λεπτών πλακών ή αντικειμένων που πρόκειται να ελεγχθούν και έχουν σχήμα σαν πιατάκι και τα οποία είναι προσιτά και από τις δύο πλευρές και έχουν επίπεδα ελαττώματα που εκτείνονται παράλληλα προς την επιφάνεια.

Αυτό αφορά κύριος πλάκες όλου του εύρους πάχους που έχουν ατέλειες φυλλωτής μορφής, και κοντά σωληνοειδή σώματα όπως αυτά που έχουν μορφή θάμνου, φυλλωτά πλαστικά και επιστρώσεις. Για να αποφύγουμε τις μεγάλες μεταβολές σύζευξης, τα αντικείμενα αυτά συνήθως ελέγχονται με την τεχνική εμβάπτισης. Αν τα αντικείμενα που θα ελεγχθούν δεν είναι ορατά και από τις δύο πλευρές αλλά έχουν επίπεδες παράλληλες επιφάνειες, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε με την V-διάδοση ή την διάδοση σύνθετου κύματος.



Εικόνα 53 Έλεγχος δύο αντικρυστών κεφαλών

2.6.7.1 Τεχνική Εμβάπτισμνης Κεφαλής

Α. Σάρωση με καθετή κεφαλή

Με την τεχνική εμβάπτισης και το αντικείμενο που πρόκειται να ελεγχθεί και ο ακροδέκτης βρίσκονται καθ' ολοκληρία εμβάπτισμένα σε νερό. Αυτό μας δίνει την βεβαιότητα ενός διαρκώς καλού αποτελέσματος σύζευξης. Σαν κανόνα, χρησιμοποιούμε νερό στο οποίο έχουμε αναμίξει ένα αντισκωρικό πρόσθετο, μυκητοκτόνα καθώς

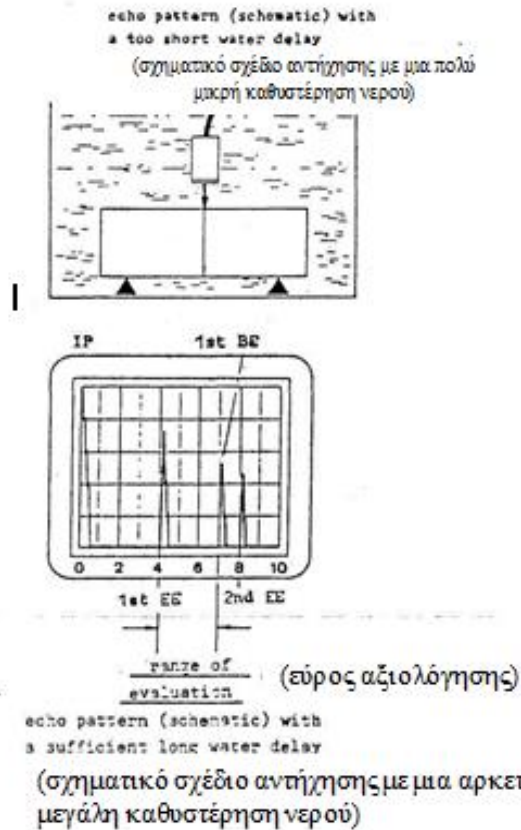
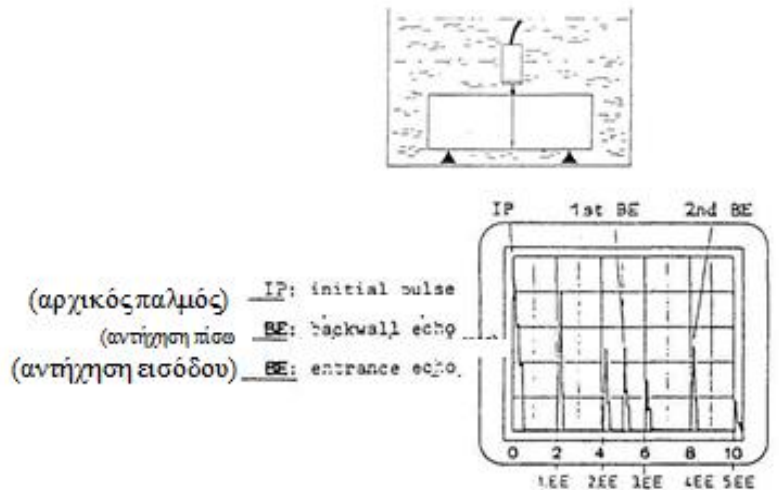


επίσης και ένα πρόσθετο που ελαττώνει την επιφανειακή τάση του νερού. Το νερό πρέπει να παραμείνει για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να εξαερωθεί, δηλαδή να ελαττωθούν στο ελάχιστο οι ενοχλητικές φυσαλίδες αέρος. Οι ακροδέκτες τύπου εμβάπτισης διαφέρουν από τους ακροδέκτες ευθύγραμμης δέσμης για άμεση επαφή μόνο, μέχρι στιγμής, στο ότι περιλαμβανομένου και του καλωδίου σύνδεσης είναι φτιαγμένα ώστε να είναι αδιάβροχα.

Οι ακροδέκτες είναι προσαρτημένοι σε ένα σφιγκτήρα (σε μια λαβή) ώστε να κατευθύνονται κατακόρυφα στην προς εξέταση επιφάνεια. Ανάμεσα από τον ακροδέκτη και την επιφάνεια του αντικειμένου βρίσκεται μια γραμμή καθυστέρησης από νερό, με ορισμένο μήκος. Μετά τον αρχικό παλμό, η πρώτη αντήχηση που εμφανίζεται επί της CRT-οθόνης είναι η αντήχηση από την μεσοεπιφάνεια νερού/αντικειμένου (αντήχηση εισόδου). Μόνο ένα τμήμα της ηχητικής ενέργειας μπορεί να εισχωρήσει στο αντικείμενο που ελέγχεται, ενώ το υπόλοιπο τμήμα ανακλάται στην επιφάνεια του αντικειμένου και δημιουργεί την αντήχηση εισόδου.

Ο λόγος μεταξύ της πίεσης του ανακλώμενου ήχου ή εκείνου που ήταν σε θέση να περάσει από μέσα και της πίεσης του προσκρουόμενου ήχου προσδιορίζεται από τον συντελεστή ανάκλασης ή από τον συντελεστή διάδοσης αν και είναι γνωστά τα ακουστικά εμπόδια των γειτονικών υλικών. Η αντήχηση εισόδου χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την θέση του ακροδέκτη.

Όταν η ηχητική δέσμη προσκρούει ακριβώς κατακόρυφα πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου που πρόκειται να ελεγχθεί τότε η αντήχηση εισόδου φθάνει στο μέγιστο πλάτος του. Το κομμάτι ήχου που εισέρχεται στο αντικείμενο δημιουργεί μια αλληλουχία αντήχησης πίσω τοιχώματος υπό την προϋπόθεση ότι το αντικείμενο που μελετάται είναι επίπεδα παράλληλο. Επαναλαμβανόμενες αντηχήσεις λαμβάνουν χώρα και από την γραμμή καθυστέρησης νερού. Γι' αυτό πρέπει να βεβαιωθούμε ότι τουλάχιστον μια αντήχηση πίσω τοιχώματος από το αντικείμενο προς έλεγχο λαμβάνει χώρα πριν από την αντήχηση δεύτερης εισόδου. Αν γίνει με τον αντίθετο τρόπο, δηλαδή αν η αντήχηση δεύτερης εισόδου λάβει χώρα πριν από την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος τότε είναι αδύνατο να ερμηνεύσουμε σωστά την ένδειξη. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε το μήκος της γραμμής καθυστέρησης ώστε να πληρούνται οι παρά πάνω συνθήκες. Μια που ρυθμίζουμε το εύρος ελέγχου για το υλικό του αντικείμενου, πρέπει να μετατρέψουμε την γραμμή καθυστέρησης σύμφωνα με τον λόγο των ταχυτήτων του ήχου (Εικ.54).



Εικόνα 54 Αντήηση με καθυστερήσεις νερού



Παράδειγμα 1:

Ένα αντικείμενο πάχους 30 mm από ατσάλι, με επίπεδες παράλληλες επιφάνειες πρόκειται να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο εμβάπτισης. Η απόσταση ανάμεσα στην αντήχηση πρώτης και δεύτερης εισόδου πρόκειται να είναι 40 mm σε ατσάλι. Τον ίδιο χρόνο κατά τον οποίο ο παλμός ήχου διανύει 40 mm σε ατσάλι, ανα νερό διανύει την απόσταση S_w .

$$S_w = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot S_{st} = \frac{1480}{5920} \cdot 40\text{mm} = 10\text{mm}$$

Αυτό πάει να πει ότι η γραμμή καθυστέρησης πρέπει να έχει μήκος 10 mm. Συχνά, πρόκειται να ανιχνευθούν μικρά ελαττώματα σε ένα καθορισμένο εύρος βάθους. Για να λύσουμε τα πρόβλημα αυτό, η εστία της δέσμης του ήχου πρέπει να Βρίσκεται ακριβώς σε αυτό το εύρος βάθους διότι αυτό δίνει μέγιστες αντηχήσεις ανακλαστήρα με υπερβολικά καλή ευκρίνεια. Η εστιακή απόσταση (μήκος κοντινού πεδίου) για ηλεκτρόδια εμβάπτισης δίνεται σε mm νερού.

Παράδειγμα 2:

Ένα αντικείμενο από ατσάλι, με πάχος 25 mm πρόκειται να εξετασθεί ακριβώς στη μέση, δηλαδή σε ένα βάθος 12,5 mm για ανακλαστήρες ελάχιστου μεγέθους. Ο ακροδέκτης έχει μια υποθετική εστιακή απόσταση 100 mm. Τα μήκη κοντινού πεδίου σε ατσάλι, και σε νερό σχετίζονται μέσω των ταχυτήτων ήχου:

έτσι:

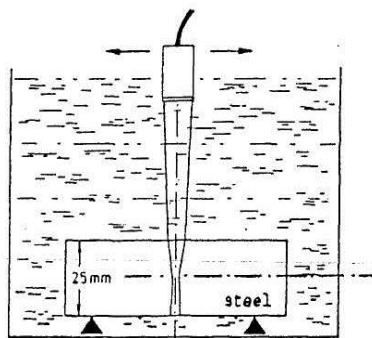
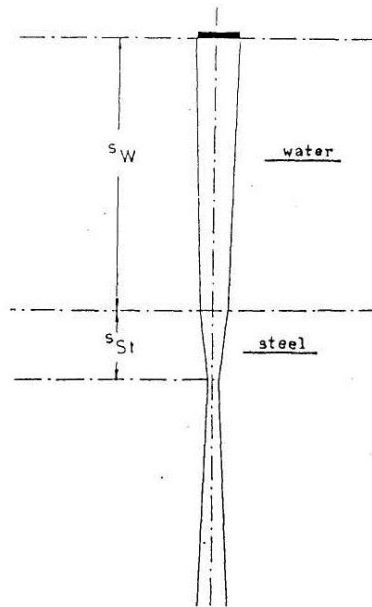
$$N_w \cdot C_w = N_{st} \cdot C_{st}$$

$$N_{st} = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot N_w$$

Στην περίπτωση αυτού του προβλήματος ελέγχου, το κοντινά πεδίο έγκειται εν μέρει σε νερό και εν μέρει σε ατσάλι. Η γραμμή καθυστέρησης του νερού θεωρείται ότι έχει μήκος S_w . Το τμήμα του κοντινού πεδίου που ισούται με $S_{st} = 12,5$ mm βρίσκεται στο ατσάλι. Αν κάνουμε αυτές τις δύο τιμές να γίνουν ίδιες μέσω του αντίστοιχου μήκους κοντινού πεδίου, τότε το ολικό μήκος κοντινού πεδίου θα ισούται με:



$$\frac{S_w}{N_w} + \frac{S_{st}}{N_{st}} = 1$$



Εικόνα 55 Αντήρηση Παραδείγματος 2

Λύνοντας ως προς S_w :

$$S_w = N_w \left(1 - \frac{S_{st}}{N_{st}} \right)$$

Συνεπάγεται ότι για τις τιμές αυτού του παραδείγματος, το μήκος κοντινού πεδίου στο ατσάλι είναι:

$$N_{st} = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot N_w = \frac{1480}{5920} \cdot 100\text{mm} = 25\text{mm}$$



και για την γραμμή καθυστέρησης από νερό.

Βεβαία στο παράδειγμα αυτό είναι επίσης σημαντικό το να ληφθεί η πρώτη αντήχηση

$$S_w = 100\text{mm} \left(1 - \frac{12,5}{25}\right) = 50\text{mm}$$

πίσω τοιχώματος πριν από την αντήχηση δεύτερης εισόδου.

Με γραμμή καθυστέρησης από νερό, S_w , ίση με:

$$S_w > \frac{C_w}{C_{st}} \cdot T$$

η αντήχηση δεύτερης εισόδου θα συμπίπτει ακριβώς με την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος. Για τον λόγο αυτό, η πρώτη συνθήκη για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα ελέγχου πρέπει να είναι ότι:

$$S_w > \frac{C_w}{C_{st}} \cdot T$$

Η δεύτερη συνθήκη προέρχεται από το εύρος βάθους S_{st} στο οποίο πρέπει να βρίσκεται η εστία (βλέπε πιο πάνω):

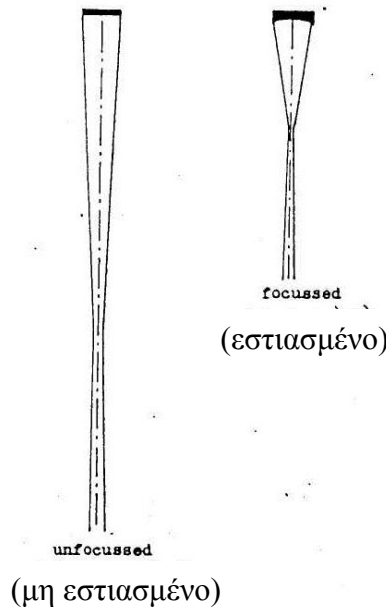
$$S_w = N_w \left(1 - \frac{S_{st}}{N_{st}}\right)$$

Συνδυάζοντας αυτές τις δύο προϋποθέσεις και ολοκληρώνοντας:

$$N_{st} = \frac{C_w}{C_{st}} \cdot N_w$$

Περνούμε ύστερα την ακόλουθη συνθήκη:

$$N_w > \frac{C_w \cdot T}{C_{st}} + \frac{S_{st} \cdot C_{st}}{C_w}$$



Εικόνα 56 Αντήχηση (εστιασμένο, μη εστιασμένο)

Αν στην συνθήκη αυτή αντικαταστήσουμε το σύμβολο του μεγαλύτερου ($>$) από ένα ίσον ($=$), τότε έχουμε το μήκος κοντινού πεδίου για το οποίο η εστία βρίσκεται, στο επιθυμητό βάθος και, μια γραμμή καθυστέρησης από νερό για την οποία η αντήχηση δεύτερης εισόδου συμπίπτει με την πρώτη αντήχηση πίσω τοιχώματος από το αντικείμενο. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε ένα ακροδέκτη που έχει μεγαλύτερο μήκος κοντινού πεδίου.

Για να επιτύχουμε μια ενέργεια καλύτερης ευκρίνειας και μεγαλύτερη πίεση ήχου για προκαθορισμένα εύρη βάθους, χρησιμοποιούμε συχνά ακροδέκτες εστίασης για έλεγχο εμβάπτισης. Η εστίαση επιτυγχάνεται κύρια με σφαιρικούς φακούς τοποθετημένους μπροστά από τον ακροδέκτη. Στην περίπτωση αυτήν, αντικαθιστούμε τον όρο "μήκος κοντινού πεδίου" από τον όρο "απόσταση εστίασης". Αυτή η εστιακή απόσταση δίνεται σε mm νερού. Ο βαθμός εστίασης K ορίζεται σαν:

$$K = \frac{f}{N}$$

όπου: f παριστάνει την εστιακή απόσταση στο νερό και N είναι το μήκος κοντινού πεδίου του ακροδέκτη σε νερό χωρίς τον προσαρτημένο φακό (σφαιρικός φακός). Ο συντελεστής K είναι πάντα μικρότερος από 1, δηλαδή με



προσηρτημένους φακούς μπορούμε μονάχα να μειώσουμε την εστιακή απόσταση. Οι ακροδέκτες εστίασης που χρησιμοποιούνται συχνότερα, έχουν βαθμό εστίασης από 0,2 έως 0,5. Κάνουμε διαχωρισμό ανάμεσα σε δύο τύπους ακροδεκτών εστίασης: ακροδέκτες εστίασης σημείου και ακροδέκτες εστίασης γραμμής. Το πλάτος της δέσμης του ήχου (6 dB διάστημα) των ακροδεκτών εστίασης σημείου μπορούν να καθοριστούν από τον βαθμό εστίασης K , περίπου σε σχέση με τον ακροδέκτη χωρίς φακό. Στην πρώτη προσέγγιση το πλάτος της δέσμης του ήχου στην εστία είναι ανεξάρτητο από το υλικό στο οποίο αναπτύσσεται η δέσμη ήχου.

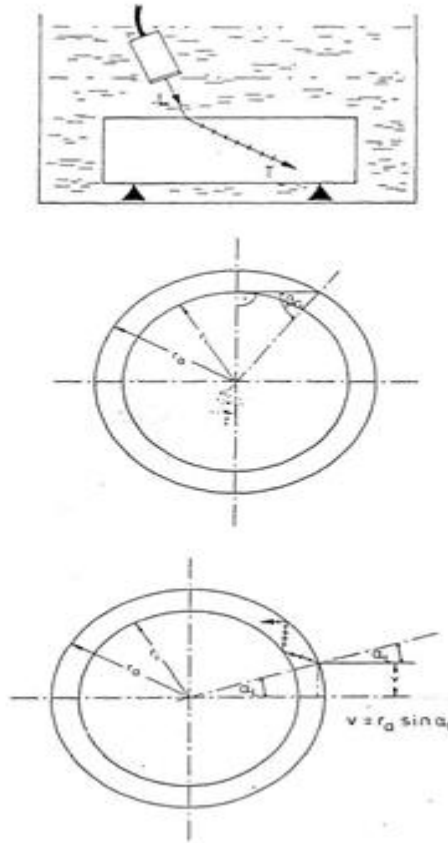
Ελέγχοντας ένα αντικείμενο με την τεχνική εμβάπτισης, ο ακροδέκτης κινείται πάνω από όλη την επιφάνεια ώστε να είμαστε σίγουροι ότι ο έλεγχος γίνεται 100%. Μεταβολές της γεωμετρίας του αντικειμένου ελέγχου μπορεί να προκαλέσει μια αλλαγή στην αντήχηση εισόδου επί της CRT οθόνης. Κανονικά, μια αλλαγή της αντήχησης εισόδου προκαλεί επίσης αλλαγή όλων των μετέπειτα αντηχήσεων ανακλαστήρα.

Σαν αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής, ο έλεγχος του αναμενόμενου εύρους ελαττώματος θα μπορούσε να γίνει αδύνατος διότι το κατώφλι ανίχνευσης παραμένει ακίνητο επί της CRT - οθόνης.

Έτσι, μερικά όργανα υπερήχων έχουν σχεδιασθεί με τρόπο ώστε να μπορούν να ενεργοποιήσουν την CRT - οθόνη ξεκινώντας από την πρώτη αντήχηση (αρχή αντήχησης). Αυτό σημαίνει ότι η αντήχηση εισόδου να παραμένει στην υποδιαίρεση 0 της κλίμακας αυθαίρετα.

B. Σάρωση υπό γωνία

Για σάρωση υπό γωνία με την τεχνική εμβάπτισης χρησιμοποιούνται ακροδέκτες με ευθύγραμμες δέσμες, οι οποίοι έχουν προσαρτηθεί στον σφικτήρα σύμφωνα με μια γωνία πρόσπτωσης επί της επιφάνειας του αντικειμένου, που έχει (η γωνία) υπολογισθεί από πριν. Αν σαν γωνία πρόσπτωσης διαλέξουμε την ορθή γωνία τότε όλοι οι τύποι κυμάτων μπορούν να προκληθούν, στο αντικείμενο προς έλεγχο. Ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης απαιτεί να είναι γνωστές η ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων στα νερό και οι ταχύτητες κύματος στο αντικείμενο.



Εικόνα 57 Σάρωση υπό γωνία

Παράδειγμα:

Ένας σωλήνας από ασάλι με ακτίνα 50mm και πάχος τοιχώματος 10mm, πρόκειται να εξετασθεί για εσωτερικά και εξωτερικά ελαττώματα στην κατά μήκος διεύθυνση. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να διαλέξουμε με τέτοιο τρόπο την γωνία πρόσπτωσης του διαμήκους κύματος ώστε η δέσμη του ήχου να ανακλασθεί στην εσωτερική επιφάνεια. Η κρίσιμη γωνία β_c για να πέσει η δέσμη του ήχου ξυστά πάνω στο εσωτερικό τοίχωμα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\beta_G = \arcsin \frac{r_i}{r_a}$$

r_i = εσωτερική ακτίνα

r_a = εξωτερική ακτίνα



Η γωνία πρόσπτωσης B_T πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη γωνία. Από τον σωλήνα με ακτίνες $r_i = 40\text{mm}$ και $r_a = 50\text{mm}$, μπορεί να βγει ότι η κρίσιμη γωνία B_G ισούται με 53° . Σαν γωνία πρόσπτωσης εγκάρσιου κύματος επιλέγουμε την γωνία $B_T = 40^\circ$.

Σύμφωνα με τον νόμο διάθλασης, η γωνία πρόσπτωσης a_L για διαμήκους κύμα σε νερό υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sin a_L = \frac{C_{W,T}}{C_{st,T}} \cdot \sin \beta_T = \frac{1480}{3255} \cdot \sin 40^\circ = 0,29 \rightarrow a_L = 17^\circ$$

Έλεγχος για το αν επίσης ένα τμήμα διαμήκους κύματος διαδίδεται στον σωλήνα δείχνει ότι το ημίτονο της γωνίας διάθλασης του διαμήκους κύματος είναι μεγαλύτερο από 1. Συνεπώς, δεν υπάρχει διάμηκες κύμα στον σωλήνα.

Για να ρυθμίσουμε την υπολογισθείσα γωνία πρόσπτωσης, χρησιμοποιούμε την καθορισμένη γεωμετρία του σωλήνα (βλέπε διάγραμμα). Στο παράδειγμα μας, μια αλλαγή $v = 14,6\text{mm}$ του ακροδέκτη κάθετα στην διεύθυνση ακτινικής σάρωσης έχει σαν αποτέλεσμα η γωνία πρόσπτωσης a_L του διαμήκους κύματος να γίνεται αυτόματα 17° . Για την ρύθμιση της θέσης του ακροδέκτη, πρώτα στερεώνουμε τον ακροδέκτη για ακτινική σάρωση. Η κεντρική ακτίνα προσκρούει ακριβώς κάθετα στα τοίχωμα του σωλήνα όταν το πλάτος της αντήχησης εισόδου φθάνει στην μέγιστη τιμή της. Μετά, ο ακροδέκτης μετακινείται από την θέση αυτή, κάθετα στον ακουστικό του άξονα κατά $v = 14,6\text{mm}$. Για μια ορθή τοποθέτηση των πυλών του ανιχνευτή, και για εσωτερικά και για εξωτερικά ελαττώματα, πρέπει να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες πορείες ακτίνας.

Από τον κανόνα ημίτονου στο τρίγωνο MEF με την δεύτερη συνθήκη $\varepsilon > 90^\circ$ και συνεπάγεται ότι:

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_T} = \frac{r_a}{r_i}$$

$$\varepsilon = 180^\circ - \arcsin \left[\frac{r_a}{r_i} \cdot \sin \beta_T \right] = 126,5^\circ$$

για την γωνία γ συνεπάγεται, ότι:

$$\gamma = 180^\circ - (\varepsilon + B_T) = 13,5^\circ$$



Η πορεία S_i της δέσμης για εσωτερικό ελάττωμα μπορεί να υπολογισθεί από τον κανόνα ημιτόνου στο τρίγωνο NEF:

$$\frac{S_i}{r_i} = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta_T} \rightarrow S_i = 14,5 \text{ mm}$$

Η πορεία S_a της δέσμης για εξωτερικά ελαττώματα ισούται με $2 \cdot S_i = 29 \text{ mm}$. Αν διαβαθμίσουμε ένα εύρος ελέγχου 50 mm πορείας δέσμης για εγκάρσια κύματα σε ασάλι, τότε οι πύλες του ανιχνευτή πρέπει να καλύψουν τις περιοχές γύρω από τις θέσεις S_{Ri} και S_{Ra} της κλίμακας.

Αυτές οι θέσεις της κλίμακας υπολογίζονται, από την σχέση:

$$S_{Ri} = \frac{S_i}{K} \quad S_{Ra} = \frac{S_a}{K}$$

$$S_{Ri} = 2,9 \text{ υποδιαρ. κλίμακας} \quad S_{Ra} = 5,8 \text{ υποδιαρ. Κλίμακας}$$

Τώρα μπορεί να επιτευχθεί ένας πλήρης έλεγχος του σωλήνα, με τα ελεγχόμενα κομμάτια να περιστρέφονται, γύρω από το κεντρικό τους σημείο και με τους ακροδέκτες να κινούνται σ' όλο το μήκος του σωλήνα.

2.6.7.2 Μέθοδος συντονισμού

Όλες οι τεχνικές που περιγράφηκαν προηγουμένως βασίζονται, στην μέθοδο παλμού αντήχησης. Ένα συνεχές κύμα υπερήχων όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης σε ένα μη-καταστρεπτικό έλεγχο.

Ένα συνεχές κύμα υπερήχων που διαδίδεται μέσα σε μια παράλληλη επίπεδη πλάκα μπορεί να προκαλέσει φυσικές ταλαντώσεις στην πλάκα. Μία απαραίτητη προϋπόθεση για κάτι τέτοιο είναι το να μπορεί η πλάκα να ταλαντωθεί ελεύθερα και στις δύο πλευρές δηλαδή και στις δύο πλευρές της πλάκας πρέπει να υπάρχει ένα μέσο με μικρή ακουστική παρεμπόδιση.

Το υπερηχητικό κύμα ανακλάται και στις δύο μεσοεπιφάνειες, ταξιδεύοντας έτσι μέσα στην πλάκα σε δύο διαφορετικές κατευθύνσεις και με τον τρόπο αυτό το προς τα εμπρός κύμα και το ανακλώμενο κύμα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο. Σύμφωνα με το μήκος κύματος σε σχέση με το πλάτος της πλάκας αυτή η επικάλυψη έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση ή την μερική καταστολή της ακολουθίας κύματος. Ενίσχυση συμβαίνει πάντοτε αν το πάχος της πλακάς είναι ακριβώς ίσο με ένα πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος. Στην περίπτωση αυτή, τα υβώματα κύματος



του προς τα εμπρός κύματος συναντά τα υβώματα κύματος του ανακλώμενου κύματος - αναπτύσσεται ένα **στάσιμο κύμα**.

Ένα τέτοιο κύμα χαρακτηρίζεται από το ότι στο εσωτερικό της πλάκας υπάρχουν θέσεις όπου τα σωματίδια είναι πάντοτε σταθερά ενώ σε άλλες θέσεις τα σωματίδια ταλαντεύονται συνεχώς με το μέγιστο πλάτος.

Οι συχνότητες αυτές που δημιουργούν στάσιμα κύματα στην πλάκα ορίζονται σαν **φυσικές συχνότητες** της πλάκας. Αν η πλάκα έχει διεγερθεί σε μια από τις φυσικές συχνότητες τότε αναφερόμαστε σε **δόνηση συντονισμού** της πλάκας. Όσον αφορά τις τεχνικές μέτρησης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το φαινόμενο του συντονισμού προσκειμένου για την μέτρηση πάχους της πλάκας. Η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος υπερήχων μεταβάλλεται συνεχώς μέχρις ότου να δημιουργηθεί στην πλάκα μια δόνηση συντονισμού. Στην περίπτωση του συντονισμού, η πλάκα παίρνει περισσότερη ενέργεια από τον πομπό υπερήχων από ότι χωρίς συντονισμό. Γι' αυτό η περίπτωση του συντονισμού γίνεται αντιληπτή μέσω του κατάλληλου ηλεκτρικού συστήματος. Για μια ποσοτική αξιολόγηση η συχνότητα μεγαλώνει και άλλο μέχρις ότου ο συντονισμός να λάβει πάλι χώρα. Η διαφορά Δf ανάμεσα στις δύο διαδοχικές συχνότητες συντονισμού $f_n + 1$ και f_n μετριέται. Η διαφορά ισούται πάντοτε με την βασική συχνότητα f_0 της πλάκας. Η βασική συχνότητα είναι η μικρότερη δυνατή φυσική συχνότητα της υπό εξέταση πλάκας. Με την συχνότητα αυτή, το πάχος της πλάκας ισούται ακριβώς με το μισό του μήκους κύματος. Έτσι λοιπόν ισχύουν τα ακόλουθα:

$$f_0 = \Delta f = f_n + 1 - f_n$$

και $T = \lambda / 2$ με $f = f_0$

f: συχνότητα διέγερσης

T: πάχος πλάκας

C: ταχύτητα του ήχου μέσα στην πλάκα

λ : μήκος κύματος

$$f_0 = \Delta f = f_n + 1 - f_n$$

$$\text{και } T = \frac{\lambda}{2} \text{ με } f = f_0$$

συνεπάγεται ότι:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{f_0} \quad T = \frac{c}{2\Delta f}$$



Με την μέθοδο συντονισμού μπορούν να προκύψουν προβλήματα διότι οι δονήσεις συντονισμού μπορούν να αναπτυχθούν επίσης και στην γραμμή καθυστέρησης και στον κρύσταλλο. Αν ο έλεγχος συντονισμού γίνει με άμεση επαφή τότε ένα άλλο πρόβλημα προκύπτει. Ο ακροδέκτης σύζευξης εμποδίζει την ελεύθερη ταλάντωση της πλάκας με αποτέλεσμα αλλαγή της συχνότητας συντονισμού και έτσι ανακρίβεια μέτρησης .

Η μέθοδος του συντονισμού εφαρμόζεται δύσκολα για την ανίχνευση ελαττωμάτων. Επί πλέον, τα ελαττώματα πρέπει να έχουν επιφάνεια ίση με το $1/4$ ή το $1/2$ της επιφάνειας του κρυστάλλου ώστε να μπορούν να ανιχνευθούν.

Τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος συντονισμού αντικαταστάθηκε από την μέθοδο παλμού αντήχησης.

ΤΡΙΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

3.1 Παχυμετρήσεις με συμβατική μέθοδο (σημειακή)

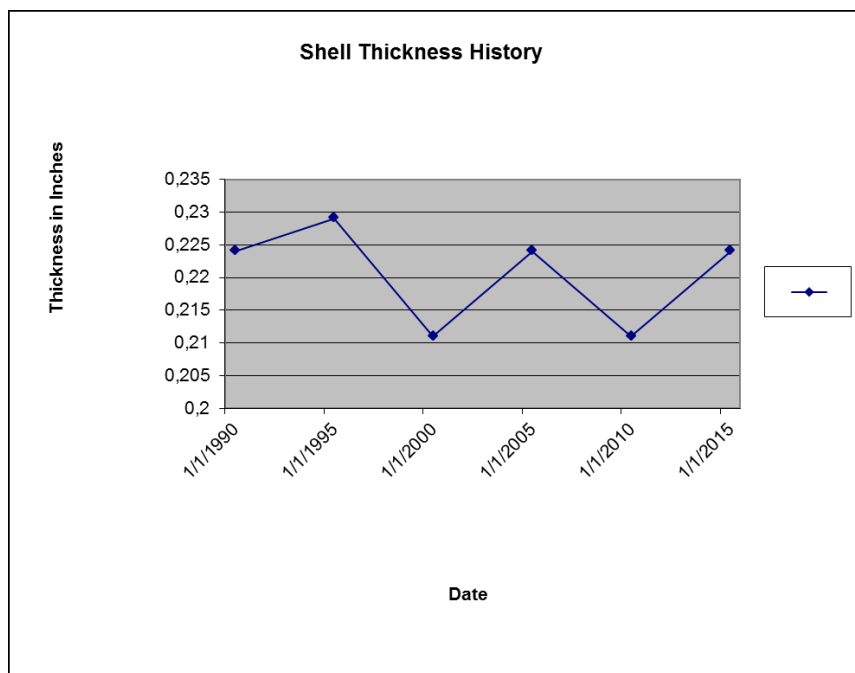
Η ευρεία εφαρμογή των σημειακών παχυμετρήσεων προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα που τις έχουν καταστήσει από τις πρώτες, αν όχι την πρώτη επιλογή των επιθεωρητών για τον προσδιορισμό της διάβρωσης και τη μέτρηση του πάχους τοιχωμάτων (Εικ.58). Το κόστος είναι χαμηλό, και εφαρμόζεται σε ευρεία γκάμα υλικών, σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και καλύπτει μεγάλο εύρος παχών. Προσφέρει ακρίβεια και εφαρμόζεται εύκολα από επιθεωρητές χωρίς να απαιτεί εμπειρίας ή/και πιστοποίηση. Για την ακρίβεια των μετρήσεων, απαιτούται μια σειρά προϋποθέσεων:

- Γνώση του υλικού,
- Ασφαλής πρόσβαση στην περιοχή ελέγχου,
- Κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας,
- Χρήση κατάλληλου μέσου σύζευξης,
- Διόρθωση μετρήσεων σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών,
- Αξιολόγηση της διαδικασίας ελέγχου και του τεχνικού,
- Επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων.

Ωστόσο, υπάρχουν οι εξής περιορισμοί:



- Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από τις συνθήκες που ισχύουν κάθε φορά και μπορεί να διαφέρει από μέτρηση σε μέτρηση.
- Ο χρόνος μεταξύ μετρήσεων ενδέχεται να είναι μεγαλύτερος από τον απαραίτητο για έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων.
- Υπάρχει δυσκολία στον έγκαιρο εντοπισμό προβλημάτων (περιπτώσεις επιταχυνόμενης διάβρωσης).
- Η πληροφορία που παρέχεται αφορά σε «στιγμιότυπο».



Εικόνα 58 Σημειακές μετρήσεις

3.2 Παχυμετρήσεις με ασύρματη τεχνολογία

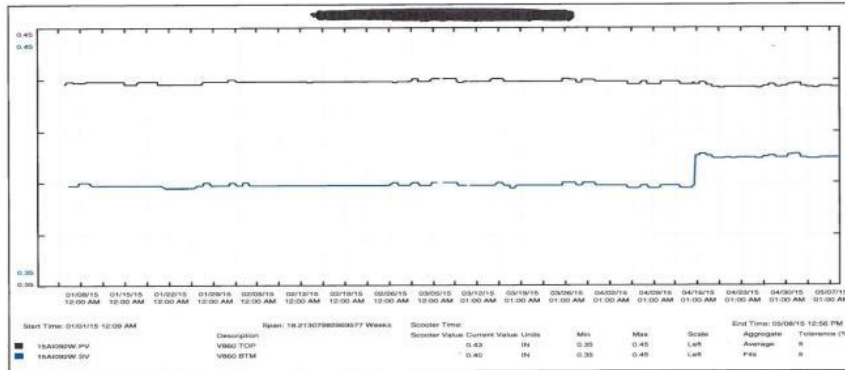
Η ανάγκη για ελαχιστοποίηση, αν όχι και εξάλειψη, των περιορισμών των σημειακών μετρήσεων, οδήγησε στην περαιτέρω εξέλιξη της εφαρμογής. Σύγχρονα συστήματα, στηριζόμενα στην διαχρονική και ευρέως αποδεκτή μέθοδο των υπερήχων, κατασκευάζονται για μόνιμη, πλέον, καταγραφή της μείωσης πάχους κρίσιμων δομών και παρακολούθηση της διάβρωσης (Εικ.59).



Εικόνα 59 Σύγχρονα Συστήματα Παχυμέτρησης

Τα πλεονεκτήματα της μόνιμης παρακολούθησης είναι φανερά (Εικ.60):

- Μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων,
- Σταθερή κατάσταση επιφάνειας,
- Δεν απαιτείται η πρόσβαση του προσωπικού,
- Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες,
- συχνές και τακτικές μετρήσεις,
- Προσδιορισμός της διάβρωσης σε πρώιμη φάση,
- Προσδιορισμός ρυθμού διάβρωσης,
- Βελτιωμένη διαχείριση της διάβρωσης.



Εικόνα 60 Δεδομένα Αισθητήρα Μόνιμης Καταγραφής

3.3 Παράδειγμα Εφαρμογής

Για παράδειγμα, ένα σύγχρονο δίκτυο αισθητήρων αφορά το σύστημα **Caliperacy**, όπου επιτρέπει τη βελτίωση της διαδικασίας μεταφοράς δεδομένων (data transfer) και επομένως την έγκαιρη αναγνώριση της κατάστασης, εξασφαλίζοντας έτσι την άμεση λήψη δεδομένων από κάθε ελεγχόμενη δομή σε ένα ολοκληρωμένο και συνεκτικό πρόγραμμα. Το συγκεκριμένο σύστημα σχεδιάστηκε για αυτόν ακριβώς το σκοπό. Πιο συγκεκριμένα, στοχεύει στην ενίσχυση της διαδικασίας ελέγχου με τρόπο ώστε να αποφεύγονται μεγάλα συμβάντα, παρέχοντας στους χρήστες μεγάλη εξοικονόμηση κόστους. Η μόνιμη καταγραφή δεδομένων, απλοποιεί και βελτιώνει τη δημιουργία των χρονοδιαγραμμάτων συντήρησης και σχεδιασμού, επιτρέποντας στις βιομηχανίες να εφαρμόσουν προληπτικά προγράμματα συντήρησης και διαχείρισης της διάβρωσης, συμβάλλοντας έτσι, στην ελαχιστοποίηση των επισκευών και σταματημάτων των βιομηχανικών μονάδων (shutdowns), των περιττών συντηρήσεων, των δαπανηρών συμβάντων και των ατυχών τραυματισμών του ανθρώπινου δυναμικού (Εικ.61).



Εικόνα 61 Σύστημα Caliperacy (Δίκτυο μετάδοσης)


Τα πλέον σημαντικά χαρακτηριστικά που καθιστούν το σύστημα Caliperacy κατάλληλο για πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών είναι:

- τα τέσσερα (4) κανάλια υπερήχων που ενσωματώνει για τη βέλτιστη παχυμέτρηση των δομών και
- η δυνατότητα εφαρμογής σε επιφάνειες υψηλών θερμοκρασιών που μπορεί να φτάσουν έως και 350°C (662°F).

Πολλαπλές τετρακάναλες μονάδες δύνανται να ενωθούν σε κοινό δίκτυο για την κάλυψη μεγαλύτερων επιφανειών όταν απαιτείται.

Επειδή το σύστημα Caliperacy καλύπτει μεγάλο εύρος εφαρμογών, και επίσης είναι σύστημα αντιαεκρηκτικού τύπου, με πιστοποίηση χρήσης σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, όπως για παράδειγμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



1 **EC-TYPE EXAMINATION CERTIFICATE** 

2 Equipment or Protective systems intended for use in Potentially Explosive Atmospheres - Directive 94/9/EC

3 EC-Type Examination Certificate No: FM15ATEX0043X

4 Equipment or protective system: 1616 Wireless UT Node (Type Reference and Name)

5 Name of Applicant: MISTRAS Group Inc.

6 Address of Applicant: 195 Clarksville Road Princeton Junction, NJ 08550- USA

7 This equipment or protective system and any acceptable variation thereto is specified in the schedule to this certificate and documents therein referred to.

8 FM Approvals Ltd, notified body number 1725 in accordance with Article 9 of Directive 94/9/EC of 23 March 1994, certifies that this equipment has been found to comply with the Essential Health and Safety Requirements relating to the design and construction of equipment intended for use in potentially explosive atmospheres given in Annex II to the Directive.


The examination and test results are recorded in confidential report number:
3051800 dated 29th February 2018

9 Compliance with the Essential Health and Safety Requirements, with the exception of those identified in item 15 of the schedule to this certificate, has been assessed by compliance with the following documents:
EN 60079-0:2012 +A11:2013, EN 60079-11:2012, and EN 60529:1992 + A2:2013

10 If the sign 'X' is placed after the certificate number, it indicates that the equipment is subject to special conditions for safe use specified in the schedule to this certificate.

11 This EC-Type Examination certificate relates only to the design, examination and tests of the specified equipment or protective system in accordance to the directive 94/9/EC. Further requirements of the Directive apply to the manufacturing process and supply of this equipment or protective system. These are not covered by this certificate.

12 The marking of the equipment or protective system shall include:

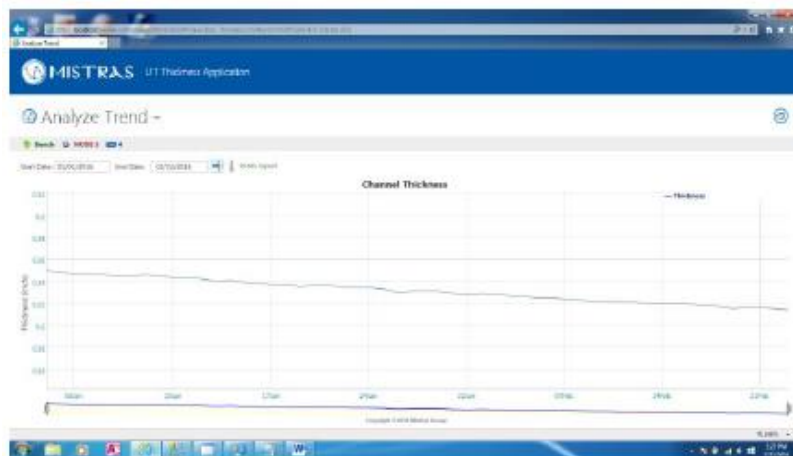
 II 1 G Ex ia IIC T4; Ta = -55°C to +55°C; IP66

Εικόνα 62 Πιστοποιητικό του Caliperacy (ATEX IS Certificate 1)

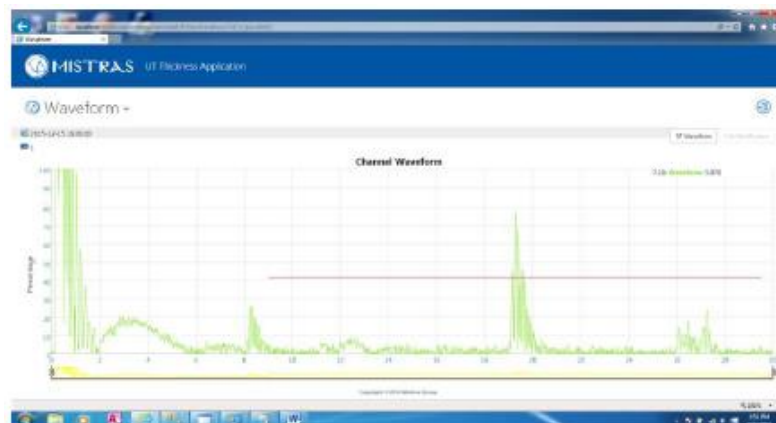
Τεχνολογικά, το σύστημα Caliperay συνδυάζει κύκλωμα συνεχούς on-line παρακολούθησης με προηγμένο λογισμικό (software), που προσφέρουν στους μηχανικούς παραγωγής την από απόσταση ανίχνευση, συλλογή και σύγκριση σε πραγματικό χρόνο (real time) προηγούμενων με τρέχουσες μετρήσεις για τον άμεσο προσδιορισμό της κατάστασης μίας δομής. Στις επόμενες εικόνες φαίνονται διάφορες διεπαφές του λογισμικού του συστήματος Caliperay, για διάφορες λειτουργίες/δυνατότητες του (on-line παρακολούθηση, trending over time, κυματική ανάλυση κλπ.).



Εικόνα 63 Λογισμικό και on-line Παρακολούθηση (PCMS™)



Εικόνα 64 Λογισμικό Trending Over Time



Εικόνα 65 Λογισμικό Ανάλυσης (Waveform Analysis)



Επιπρόσθετα, οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τη διαδικασία εγκατάστασης ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης με χρήση υπερήχων. Παρέχεται επιπλέον, η δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης θερμοκρασίας για τις απαραίτητες διορθώσεις και σωστή σύγκριση των αποτελεσμάτων.

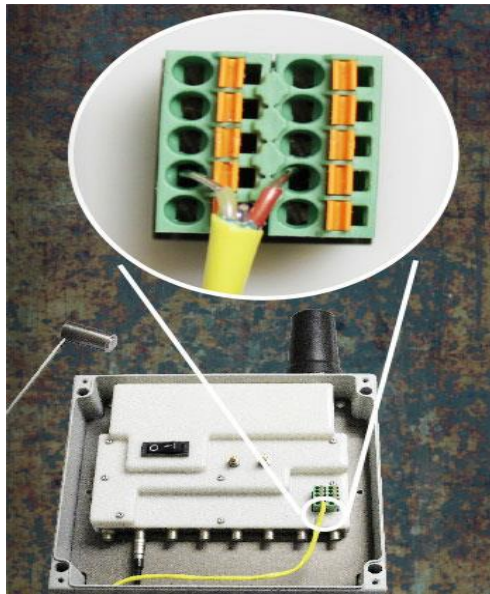


Εικόνα 66 Προετοιμασία Επιφανείας





Εικόνα 67 Τοποθέτηση Αισθητήρων



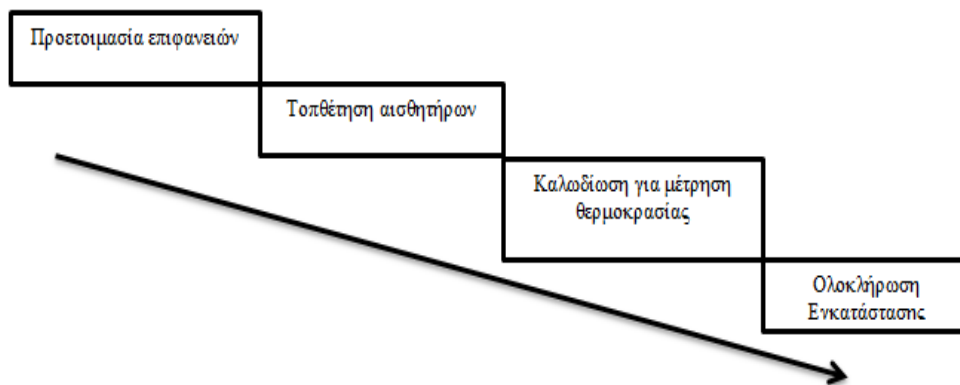
Εικόνα 68 Καλωδίωση για μέτρηση Θερμοκρασίας



Εικόνα 69 Ολοκλήρωση Εγκατάστασης



Τέλος στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται συνολικά η διαδικασία υλοποίησης του συστήματος συνεχούς παρακολούθησης με χρήση υπερήχων.



Εικόνα 70 Διαδικασία Υλοποίησης Εγκατάστασης συστήματος συνεχούς παρακολούθησης με χρήση υπερήχων

3.4 Σύγκριση

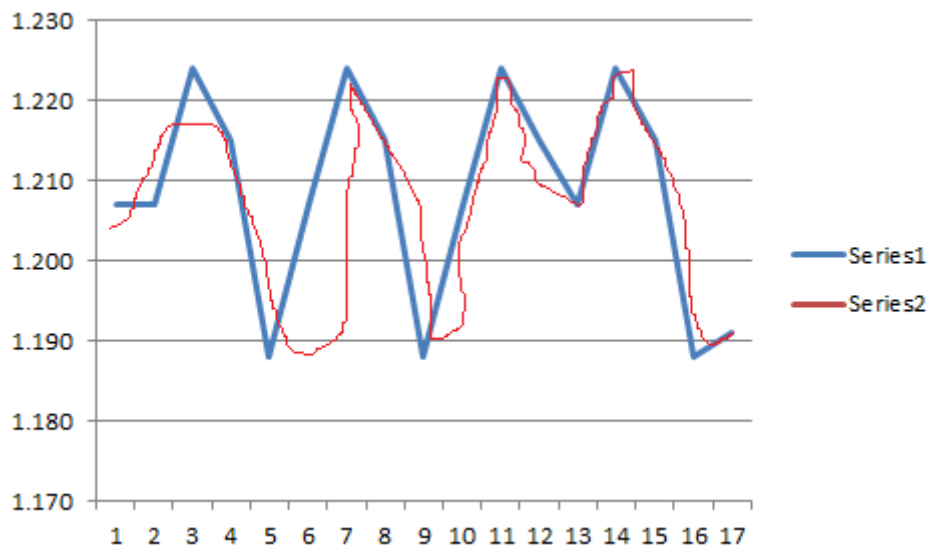
Η σύγκριση ενός παραδοσιακού συστήματος παχυμέτρησης σε σχέση με ένα ασύρματης μετάδοσης σύστημα, δίνει τα εξής αποτελέσματα (Πιν.9):

Πίνακας 9 Συγκριτική ανάλυση

Σημειακής μέτρησης	Ασύρματης μέτρησης
<ul style="list-style-type: none">▪ μικρός αριθμός μετρήσεων▪ συνεχές ρύθμιση των αισθητήρων▪ βασικές δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων	<ul style="list-style-type: none">▪ συνεχή ροή δεδομένων▪ δεν απαιτείται συνεχές ρύθμιση▪ μεγαλύτερη δυνατότητα επεξεργασίας δεδομένων



Τέλος, στην επόμενη εικόνα φαίνεται μια σύγκριση της ροής μετρήσεων μεταξύ των δύο συστημάτων:



Εικόνα 71 Σύγκριση Μετρήσεων (S1- σημειακή μέτρηση, S2- on line)



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διάβρωση αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα στη βιομηχανικές διεργασίες και στις κατασκευές πάσης φύσεως. Το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης κατασκευών και μεταλλικών στοιχείων, λόγω αυτής είναι υψηλό και επομένως καταβάλλονται μεγάλες προσπάθειες για την επακριβή αποτίμηση της κατάστασης κατασκευών αλλά επίσης, και την προστασία τους.

Σχεδόν όλες οι μεταλλικές κατασκευές μπορούν να υποστούν διάβρωση. Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν πολλές βιομηχανίες είναι η μέτρηση του πάχους τοιχωμάτων σε σωλήνες ή δεξαμενές, που έχουν υποστεί εσωτερική διάβρωση. Αυτή η διάβρωση δεν μπορεί να ανιχνευθεί μέσω οπτικού ελέγχου (τυπική επιθεώρηση) χωρίς κοπή ή αποσυναρμολόγηση του σωλήνα ή της δεξαμενής. Μεταλλικές δοκοί που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεφυρών, υπόκεινται επίσης στο φαινόμενο της διάβρωσης, που προκαλεί μείωση του πάχους. Κρίσιμες υποδομές, πρέπει να ελέγχονται συστηματικά, γιατί κινδυνεύουν να υποστούν βλάβες σοβαρές, όχι μόνο από πλευράς οικονομικού κόστους ς, αλλά και επικινδυνότητας για το κοινό.

Έτσι, επιβάλλεται τακτική παχυμέτρηση και η μέθοδος των υπερήχων αποτελεί διεθνώς ενδεδειγμένη μη καταστροφική μέθοδο ελέγχου, για τη διεξαγωγή αυτού του τύπου μετρήσεων. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που η επιτόπια περιοδική επιθεώρηση με σημειακές παχυμετρήσεις είτε δεν επαρκεί, είτε δεν είναι εφικτή και η μόνιμη εξ αποστάσεως παρακολούθηση αποτελεί τη μοναδική αξιόπιστη λύση για την αποτελεσματική αξιολόγηση του φαινομένου της διάβρωσης και των σχετικών επιπτώσεων της. Μέσα σε αυτό πλαίσιο, τα σύγχρονα συστήματα (on line) παρέχουν



τη δυνατότητα συνεχούς, από απόσταση, γρήγορη και με ακρίβεια παρακολούθησης πάχους, προλαμβάνοντας ατυχή περιστατικά, και μειώνοντας το κόστος αποκατάστασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Α. Αναστασόπουλος, Α. Τσιμόγιαννης, R. Kazares, M. Calva , “Χαρτογράφηση Διάβρωσης Με Υπέρηχους”, Πρακτικά 3ου Εθνικού Συνεδρίου της ΕΛΕΜΚΕ, με τίτλο “ΜΚΕ: Εμπειρίες, Εφαρμογές, Καινοτομίες”, Θεσσαλονίκη, ΕΙΜ 9 Ιουνίου 2001, pp. 83-88.
2. Α.Αναστασόπουλος, Δ. Κουρούσης, Σ. Μανουσάκη, Λ. Μπουχάγιερ, Παχυμετρήσεις με τη μέθοδο των υπερήχων – μετάβαση από τις απλές σημειακές παχυμετρήσεις στην εφαρμογή ασύρματων συστημάτων για εξ αποστάσεως, συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων δομών. *9ο Εθνικό Συνέδριο ΜΚΕ της Ελληνικής Εταιρείας Μη Καταστροφικών Ελέγχων*, Αθήνα, Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, 11 Νοεμβρίου 2016.

ΞΕΝΗ

1. J. and H. Krautkramer Ultrasonic testing of materials Springer-Verlag, Berlin, New York (1975).
2. W. Lehfeld Ultraschall - kurz and bunding Vogel verlag, Wurzburg (1973).
3. L . Bergman Der Ultraschall Hirzel - Verlag, Stuttgart (1954).
4. K. Fink, F. Richter, U. Lotter, K. Schrecke Physikalische Eigenschaften von Stahlen, insbesondere von warmfesten Stahlen Thyssenforschung 2 (1970) Nr.



- 2, S. 65/80.
5. R. Frielinghaus The ultrasonic inspection of plastics 7th Int. Conf. Nondestr. Testing, Warsaw (1973) paper J IB.
 6. U. ScjJengermann The Krautkramer booklet Krauthramer 6mbi1, Cologne (1978).
 7. R. C. McMaster (editor) Nondestructive testing handbook American Society for Nondestructive Testing Columbus, Ohio (1959).
 8. Recommended Practice No. SNT-TC-1A American Society For Nondestructive Testing Columbus, Ohio (1980).
 9. Richtlinien uber die Qua lifikation und Zertifikation von Personal der Zerstorungsfreien Prufung (ZfP-Personal) German Society For Nondestructive Testing (DGZfP), Berlin (1982).
 10. M. Berke Krautkramer training system Part 1 Krautkramer GmbH, Cologne (1979).
 11. Dr. E.A.W. Muller, Handbuch der zerstorungsfreien deterial – prufung, K. Oldenbourg Munchen 1970.
 12. DIN 5 4 10 9 Bl. 2, Bildgute vun Rontgen—und Gamma-Filmaufnahmen an metal lischen Warkstoffen.
 13. Vereinigung der Technischen Uverwachungs-Vereine c. V.Essen, Merkblatt fun den Bau, die Prufung und die Abnahrne von Kugel - Gasvehal tern.
 14. API Standard 50, Weided steel tanks for oil storage.
 15. International Institute of Welding, Collection of Reference Radiographs of Welds.
 16. Non-destructive Testing Handbook, Volume 7, “Ultrasonic Testing”, ASNT 1991.
 17. \ASTM, E214-01, “Standard Practice for Immersed Ultrasonic Examination by the Reflection Method Using Pulsed Longitudinal Waves”, 2001.
 18. A. Tsimogiannis, A. Anastasopoulos, S. Kattis, “Ultrasonic Processing Methodologies With Alternative Thickness Computation For Massive Corrosion Mapping Tests”, Proceedings of the 9th European Conference on NDT, Berlin 25-29, 2006, DGZfP, Proceedings BB 103-CD, Paper P208, ISBN 3-931381-86-2



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

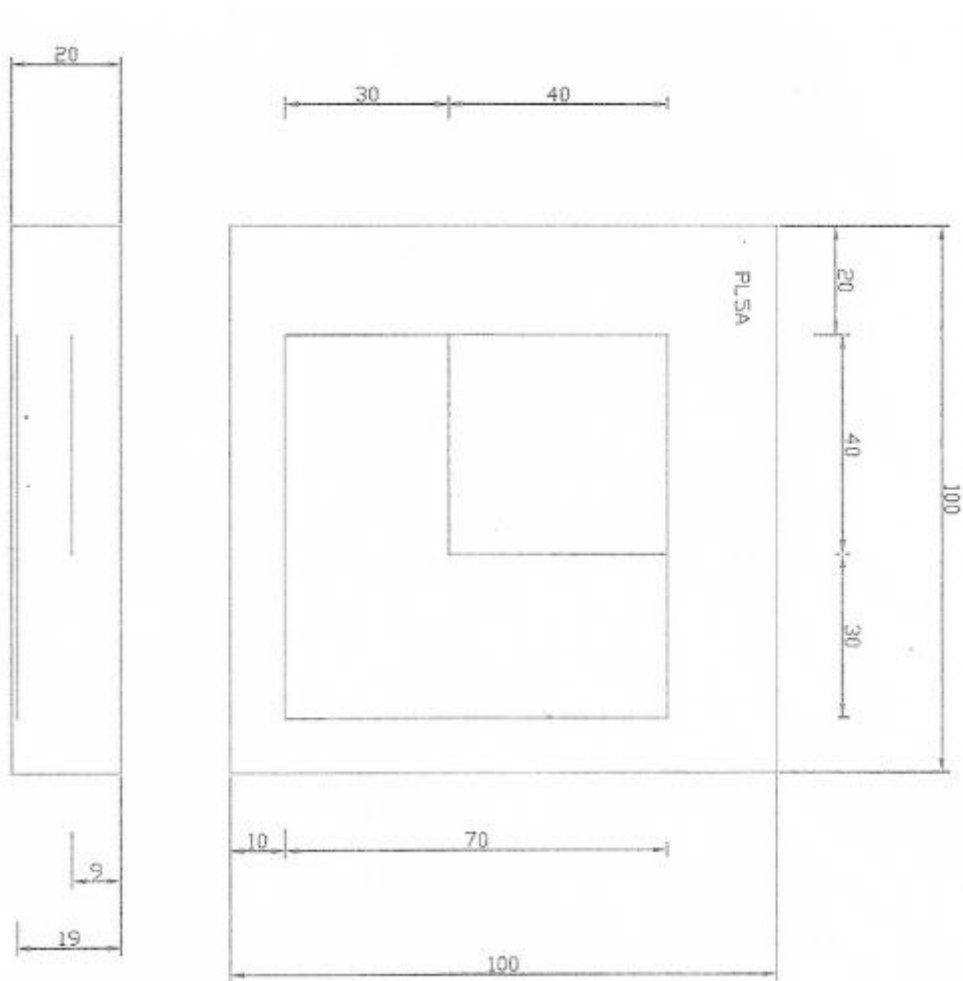
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΑΣΚΗΣΗ 1



ΑΣΚΗΣΗ 2

- 145 -

