



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΤΙΤΛΟΣ

« Μελέτη μεθοδολογίας ελέγχου και μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κράματος αλουμινίου 5083-H111 »

Διονύσιος Ν Καλογερόπουλος
Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός
Πολυτεχνείου Πατρών

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτρης Ι Παντελής

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, σκοπός είναι ο σχεδιασμός μιας γεωμετρίας που να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τη γεωμετρία μιας συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, με στόχο την εξασφάλιση αξιόπιστου και ολοκληρωμένου ελέγχου σε συγκολλήσεις κράματος αλουμινίου, με τη μέθοδο του μη καταστροφικού ελέγχου των υπερήχων.

Στα πρώτα δύο κεφάλαια γίνεται αναφορά στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του αλουμινίου, καθώς και στη συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης (FSW), εμβαθύνοντας στη γεωμετρία της (κύριες ζώνες συγκόλλησης) και άλλα χαρακτηριστικά της, όπως για παράδειγμα οι ιδιότητες του εργαλείου που τελεί τη συγκόλληση και οι επιδράσεις τους σε αυτή.

Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι κυριότερες μη καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου, με τα πεδία εφαρμογής τους, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά τους έναντι των «συμβατικών» μεθόδων και παρατίθεται συγκριτικός πίνακας αξιολόγησης των μεθόδων.

Στη συνέχεια ακολουθεί (κεφάλαιο 4), η φυσική των υπερήχων, με ιστορικά στοιχεία σε πρώτο στάδιο και μετέπειτα αναλύονται τα γενικά χαρακτηριστικά τους, τα είδη των υπερηχητικών κυμάτων, το πώς παράγονται οι υπέρηχοι, η δέσμη των υπερήχων και οι ζώνες της – γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνεται ο εξοπλισμός και η μεθοδολογία ελέγχου των υπερήχων. Εδώ μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τις φορητές και αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου, για τα είδη των υπερηχητικών κεφαλών, για τα πρότυπα βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα, και τέλος αναλύονται μεθοδολογίες ελέγχου με υπέρηχους όπως αυτή της «παλμοηχούς», που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή.

Τέλος, στα κεφάλαια 6 και 7, παρουσιάζεται ολοκληρωμένα ο σχεδιασμός που προηγήθηκε πριν τον έλεγχο των δοκιμίων από αλουμίνιο, η εκτέλεση αυτού κάτω από αυστηρή, συγκεκριμένη μεθοδολογία και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς και περαιτέρω σχολιασμός τους και συμπεράσματα.

ABSTRACT

In this master work, the target is to design a geometry as close as possible to the geometry of a Friction Stir Weld, aimed at ensuring reliable and integrated control in welding aluminum alloy, with the method of non-destructive test of ultrasound.

In the first two chapters, there is a reference to the properties and characteristics of the aluminum, and for friction stir welding (FSW method), deepening of the geometry (main zones of the weld) and other characteristics such as for example the properties of the tool that takes part in the weld and their effects on it.

In Chapter 3, there are presented the main non-destructive testing methods, with their fitting fields, the disadvantages and advantages over 'conventional' methods and also is given a comparative evaluation matrix of the methods.

Then in Chapter 4, it is analyzed the physics of ultrasound, with historical evidence as a first step and subsequently analyzed their general characteristics, the types of ultrasonic waves, how ultrasound is produced, the ultrasound beam and zones - geometric characteristics.

In the fifth chapter, is given the equipment and methodology control of ultrasound. Here we can get information for portable and automatic set – up controls, about the kinds of ultrasonic heads, for calibration standards which are used until today and finally it is analyzed the ultrasound testing methodologies such as pulse – echo, which was used in this work.

Finally, in Chapters 6 and 7, it is completely presented the design which is preceded before testing the samples of aluminum, its implementation under strict and specific methodology and the experimental results which are obtained, with further comments and findings.

Αφιερωμένη στον ξάδερφό μου, Νικόλαο Β. Σταματόπουλο.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο: « Μελέτη μεθοδολογίας ελέγχου και μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους συγκολλήσεων δια τριβής με ανάδευση κράματος αλουμινίου 5083-H111», πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους από τους ανθρώπους που γνώρισα, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Δημήτριο Ι. Παντελή, επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας, για τη συνεχή καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια του.

Ευχαριστώ θερμά τον Αν.Καθηγητή ΕΜΠ Ν.Τσούβαλη και τον Καθηγητή ΕΜΠ Δ.Μανωλάκο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου, την Δρ.Χ.Σαράφογλου, για όλη της τη βοήθεια και συμπαράσταση κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της μεταπτυχιακής μου εργασίας, που υπήρξε για μένα κάτι παραπάνω από πολύτιμη, καθώς και τους Υποψήφιους Διδάκτορες Νίκο Δανιόλο και Παναγιώτη Καρακίτση, οι οποίοι οποτεδήποτε τους χρειάστηκα, ήταν απόλυτα συνεργάσιμοι.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Σ.Μπαδογιάννη.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ καθιστώντας με, πια «υπόχρεο», στην οικογένειά μου, διότι χωρίς αυτή σε τόσο δύσκολους καιρούς, δε θα ήταν εφικτό να καταφέρω να ολοκληρώσω την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, δίνοντας τον καλύτερό μου εαυτό.

Τέλος ευχαριστώ από τα βάθη της ψυχής μου, δύο σημαντικούς ανθρώπους στη ζωή μου, την κοπέλα μου Πτυχιούχο του Τμήματος του Μαθηματικού Πανεπιστημίου Πατρών Κατερίνα Σ.Δ.Κόκλα και τον ξάδερφό μου Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό του Πολυτεχνείου Πατρών Γεώργιο Κ.Μπάρο.

Υ.Γ : «Ότι και αν κάνουμε στη ζωή μας να το κάνουμε με αγάπη και μεράκι, γιατί στο τέλος αυτό που αξίζει είναι η προσπάθεια και σίγουρα κάποια στιγμή θα μας αποφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα».

Με εκτίμηση,

Διονύσιος Ν.Καλογερόπουλος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ [26]	- 11 -
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	- 11 -
1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	- 11 -
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	- 12 -
1.4 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	- 12 -
1.4.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	- 15 -
1.4.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	- 21 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ	- 23 -
(FSW)[14,26]	- 23 -
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	- 23 -
2.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)	- 23 -
2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)	- 25 -
2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)	- 26 -
2.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ (FSW)	- 26 -
2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	- 28 -
2.6.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	- 28 -
2.6.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΗ ΦΘΟΡΑ	- 28 -
2.6.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ	- 29 -
2.6.4 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ	- 29 -
2.7 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΗΣ FSW	- 30 -
2.7.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	- 30 -
2.8 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ	- 32 -
2.8.1 ΚΕΝΑ-ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥΝΕΛ	- 33 -
2.8.2 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ-ΡΩΓΜΕΣ	- 33 -
2.9 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ	- 34 -
2.9.1 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ	- 34 -
2.9.2 ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	- 35 -
2.10 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ	- 36 -
2.10.1 ΖΩΝΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ	- 36 -
2.10.2 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ	- 38 -
2.10.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ	- 39 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ[1,4,13] ..	- 40 -
3.1 ΓΕΝΙΚΑ	- 40 -
3.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΚΕ	- 41 -
3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	- 41 -

3.3.1 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ.....	- 41 -
3.3.2 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ.....	- 42 -
3.4 ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	- 42 -
3.4.1 ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	- 42 -
3.4.2 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ.....	- 43 -
3.4.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ.....	- 44 -
3.4.4 ΥΠΕΡΗΧΟΙ.....	- 45 -
3.4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	- 46 -
3.4.6 ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ.....	- 47 -
3.4.7 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ.....	- 48 -
3.4.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	- 49 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ[11,13].....	- 52 -
4.1 ΗΧΟΙ- ΥΠΕΡΗΧΟΙ ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ.....	- 52 -
4.1.1 ΗΧΟΙ- ΥΠΕΡΗΧΟΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	- 52 -
4.2 ΕΙΔΗ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	- 53 -
4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	- 53 -
4.2.2 ΔΙΑΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ.....	- 54 -
4.2.3 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ.....	- 54 -
4.2.4 ΚΥΜΑΤΑ ΠΛΑΚΩΝ Ή ΚΥΜΑΤΑ ΤΟΥ LAMB.....	- 55 -
4.2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ- RAYLEIGH.....	- 56 -
4.2.6 ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΡΕΨΕΩΣ.....	- 56 -
4.3. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ.....	- 56 -
4.3.1 ΚΑΘΕΤΗ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ.....	- 56 -
4.3.2 ΠΛΑΓΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ.....	- 58 -
4.4 Η ΔΕΣΜΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	- 59 -
4.4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	- 59 -
4.4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ..	- 59 -
4.4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ.....	- 61 -
4.4.4 ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ.....	- 61 -
4.4.5 ΕΓΓΥΣ ΖΩΝΗ (ΖΩΝΗ FRENSEL).....	- 62 -
4.4.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (FARFIELD).....	- 63 -
4.4.7 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	- 64 -
4.4.8 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΤΡΑ.....	- 64 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ[15] - 67

5.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ	- 67 -
5.2 ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ	- 70 -
5.2.1 ΚΕΦΑΛΕΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	- 71 -
5.2.2 ΚΕΦΑΛΕΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ	- 72 -
5.2.3 ΕΜΒΑΠΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ	- 72 -
5.2.4 ΚΕΦΑΛΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ	- 72 -
5.2.5 ΚΕΦΑΛΕΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ	- 73 -
5.3 ΚΑΛΩΔΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	- 73 -
5.4 ΠΡΟΤΥΠΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ	- 74 -
5.5 ΥΓΡΑ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	- 76 -
5.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ	- 77 -
5.6.1 ΓΕΝΙΚΑ	- 77 -
5.6.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ	- 77 -
5.6.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ	- 77 -
5.6.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΜΟΗΧΟΥΣ	- 78 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ FSW[1,3,8,15]	- 80 -
6.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ FSW	- 80 -
6.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	- 82 -
6.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	- 83 -
6.4.1 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	- 83 -
6.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	- 83 -
6.4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΓΡΟΥ ΣΥΖΕΥΞΗΣ	- 84 -
6.4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΕΦΑΛΩΝ	- 84 -
6.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ	- 86 -
6.5.1 ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	- 86 -
6.5.2 ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ	- 87 -
6.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΗΣ	- 88 -
6.7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ	- 90 -
6.7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	- 90 -
6.7.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΒΑΣΗΣ	- 91 -
6.7.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΙΖΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	- 92 -
6.7.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	- 92 -
6.7.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΩΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ	- 93 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	- 94 -

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	- 107 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 108 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	- 110 -

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ – ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

Εικόνα 1.1 : Συμβολισμός του αλουμινίου και χαρακτηριστικά του.	- 11 -
Εικόνα 1.2 : Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου- Μαγγανίου.....	- 16 -
Εικόνα 1.3 : Αντοχή σε εφελκυσμό, όριο ελαστικότητας και επιμήκυνση σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε χαλκό	- 19 -- 19 -
Εικόνα 1.4 : Μεταβολή της μηχανικής αντοχής ανάλογα με την περιεκτικότητα σε Mg – Si	- 20 -
Εικόνα 2.1: Μακροσκοπική απεικόνιση συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW.....	- 24 -
Εικόνα 2.2 : Οι διακριτές ζώνες κατά την FSW.....	- 25 -
-	
Εικόνα 2.3 : Διάφοροι τύποι συγκολλήσεων όπου εφαρμόζεται η FSW.	- 25 -
Εικόνα 2.4 : Μηχανή FSW.	- 27 -
Εικόνα 2.5 : α) Τα μέρη του εργαλείου β) Τυπική κεφαλή συγκόλλησης.	- 31 -
Εικόνα 2.6 : Γεωμετρίες κεφαλών.	- 31 -
Εικόνα 2.7 : Τα είδη των κεφαλών.	- 32 -
Εικόνα 2.8 : Ατέλεια τύπου τούνελ.	- 33 -
Εικόνα 2.9 : Μικροσκοπική απεικόνιση ατέλειας τύπου kissing bond, κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης.....	- 34 -
Εικόνα 2.10 : Ζώνες που δημιουργούνται κατά την συγκόλληση με FSW.....	- 35 -
Εικόνα 2.11 : Απεικόνιση στο μικροσκόπιο των ζωνών που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση.	- 36 -
Εικόνα 2.12 : Χαρακτηριστικά onion rings της nugget zone.	- 37 -
Εικόνα 2.13 : Η επίδραση της ταχύτητας στην μικροδομή της nugget zone α)ταχύτητα περιστροφής 350rpm, β)ταχύτητα περιστροφής 650rpm.	- 37 -
Εικόνα 2.14 : Το μέγεθος των κόκκων στην nugget zone σε διάφορα σημεία.....	- 38 -
Εικόνα 2.15 : Η μικροδομή της Θερμομηχανικά Επηρεασμένης Ζώνης Al7075. .	- 38 -
Εικόνα 2.16 : Η μικροδομή στα όρια των ζωνών συγκόλλησης,Al7075	- 39 -
Εικόνα 3.1 : Οπτική μέθοδος.	- 43 -
Εικόνα 3.2 : Ανίχνευση ατελειών με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.	- 44 -
Εικόνα 3.3 : Έλεγχος γραμμής σωλήνων (με τη μέθοδο της ραδιογραφίας.	- 45 -
Εικόνα 3.4 : Έλεγχος με υπερήχους σε pipeline.....	- 46 -
Εικόνα 3.5 : Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων.....	- 47 -
Εικόνα 3.6 : Ημέθοδος των δινορρευμάτων.	- 48 -
Εικόνα 3.7 : Έλεγχος με ακουστική εκπομπή σε γέφυρα.	- 49 -
Εικόνα 3.8 : Η μέθοδος της θερμογραφίας.	- 50 -
Εικόνα 4.1 : Διαμήκη κύματα.	- 54 -
Εικόνα 4.2 : Εγκάρσια κύματα.	- 55 -
Εικόνα 4.3 : Κύματα του Lamb α) διασταλτικά β) καμπτικά.....	- 55 -
Εικόνα 4.4 : Επιφανειακά κύματα.	- 56 -
Εικόνα 4.5 : Κάθετη πρόσπτωση κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών-	57 -

Εικόνα 4.6: Διάγραμμα με όλα τα πιθανά είδη κυμάτων κατά την πρόσπτωση υπό γωνία θ_1 διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια.	58 -
Εικόνα 4.7 : Ο νόμος του Snell.....	59 -
Εικόνα 4.8: α) Ο κρύσταλλος του χαλαζία και β) τα πλακίδια χ και y	60 -
Εικόνα 4.9 : Δέσμη υπερήχων και χαρακτηριστικές περιοχές.	61 -
Εικόνα 4.10 : Εγγύς ζώνη.	62 -
Εικόνα 5.1 : Φορητή διάταξη ελέγχου υπερήχων.....	69 -
Εικόνα 5.2 : Εμβαπτιζόμενη διάταξη ελέγχου.....	70 -
Εικόνα 5.3 : Τύποι κεφαλών.	71 -
Εικόνα 5.4 : Λεπτομέρειες κεφαλής καθέτου δέσμης.	71 -
Εικόνα 5.5 : Κεφαλή πλάγιας δέσμης.....	72 -
Εικόνα 5.6 : Λεπτομέρειες κεφαλής διπλού κρυστάλλου.....	73 -
Εικόνα 5.7 : Καλώδιο σύνδεσης κεφαλών με διάταξη.	74 -
Εικόνα 5.8 : Διάφοροι τύποι πρότυπων βαθμονόμησης.....	75 -
Εικόνα 5.9 : Η μέθοδος του συντονισμού.....	78 -
Εικόνα 5.10 : Απεικόνιση διάφορων τύπων ελαττωμάτων.	78 -
Εικόνα 5.11 : Παράδειγμα DGS διαγράμματος.....	79 -
Εικόνα 6.1 : Οι κύριες ζώνες της Friction Stir Welding.....	80 -
Εικόνα 6.2 : Ορισμός αποστάσεως πλήρους βήματος της δέσμης της κεφαλής. ...	81 -
Εικόνα 6.3 : Επιλεχθείσα γεωμετρία συγκόλλησης προς έλεγχο.	82 -
Εικόνα 6.4 : Τύπος κεφαλής 70^0 που επιλέχθηκε, καθώς και άλλες γωνιακές κεφαλές.- 83 -	
Εικόνα 6.5 : Εκπομπή γωνιακής κεφαλής στη ρίζα συγκόλλησης.	85 -
Εικόνα 6.6 : Ζώνες συγκόλλησης - Ζώνες σάρωσης ελέγχου της FSW.	86 -
Εικόνα 6.7 : Πρότυπο βαθμονόμησης κεφαλής καθέτου δέσμης.	87 -
Εικόνα 6.8 : Πρότυπο βαθμονόμησης κεφαλής γωνιακής δέσμης.	88 -
Εικόνα 6.9 : Φορητή συσκευή παχυμέτρησης StressTel T-SCOPE III.....	89 -
Εικόνα 6.10 : Κάρτες ελέγχου (PC boards) - NDT Automation.	90 -
Εικόνα 6.11 : Στιγμιότυπο προγράμματος Ultrawin της NDT Automation.	91 -
Εικόνα 6.12 : Ζώνες συγκόλλησης - Ζώνες σάρωσης ελέγχου της FSW.....	92 -
Εικόνα 7.1: Δοκίμια 6, 12 και 11.....	94 -
Εικόνα 7.2 : Σχεδιασμός και ζώνες σάρωσης υπερηχητικής δέσμης για έλεγχο των δοκιμίων.....	95 -
Εικόνα 7.3 : Κωνικός πείρος.....	96 -
Εικόνα 7.4 : Κυλινδρικός πείρος με σπείρωμα.....	96 -
Γράφημα 7.1 : Ζώνη σάρωσης Z1, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 6 - 97 -	
Γράφημα 7.2 : Ζώνη σάρωσης Z1, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 6. Παλμοί που υποδηλώνουν ατέλεια στη ρίζα (τύπου τούνελ).	98 -
Εικόνα 7.5 : Μακροσκοπικός έλεγχος και επαλήθευση ατέλειας τύπου τούνελ. ...	98 -
Εικόνα 7.6 : Ατέλεια τύπου τούνελ δοκιμίου 6.	99 -
Εικόνα 7.7 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου τούνελ.	99 -
Εικόνα 7.8 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου chip lack of fill.....	100 -
Γράφημα 7.3 : Ζώνη σάρωσης Z3, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 12.....	100 -
Γράφημα 7.4 : Ζώνη σάρωσης Z1, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 12.....	101 -
Εικόνα 7.9 : Μακροσκοπικός έλεγχος ατέλειας δοκιμίου 12.	101 -
Εικόνα 7.10 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου Surface lack of fill.	102 -
Εικόνα 7.11 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου Lack of penetration.....	102 -

Γράφημα 7.5 : Ζώνη σάρωσης Z1, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11.....	- 103 -
Γράφημα 7.6 : Ζώνη σάρωσης Z1, αριστερά του άξονα της συγκόλλησης δοκιμίου 11.....	- 104 -
Γράφημα 7.7 : Ζώνη σάρωσης Z2, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11.....	- 104 -
Γράφημα 7.8 : Ζώνη σάρωσης Z3, αριστερά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11. -	105 -
Εικόνα 7.12 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου ribbonflash.	- 105 -
Εικόνα 7.13 : Χαρακτηριστικοί παλμοί ατελειών.....	-106-

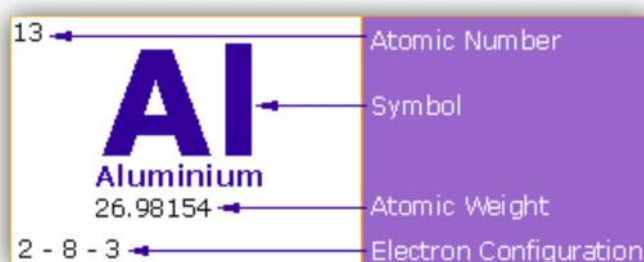
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 : Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου- 13 -	-
Πίνακας 1.2 : Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου. ...	- 13 -
Πίνακας 1.3 : Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου, βάση της κατεργασίας που έχουν υποστεί.....	- 14 -
Πίνακας 1.4 : Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 5083.	- 17 -
Πίνακας 1.5 : Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου 5083.....	- 18 -
Πίνακας 2.1 : Υλικά εργαλείου ανάλογα με τα προς συγκόλληση κράματα.....	- 29 -
Πίνακας 3.1 : Μη καταστροφικές μέθοδοι και η ικανότητα τους στην ανίχνευση ατελειών-βλαβών.	- 50 -
Πίνακας 5.1 : Υλικά και οι ακουστικές τους αντιστάσεις.	- 76 -
Πίνακας 7.1 : Χαρακτηριστικά συγκόλλησης δοκιμίων.....	-95-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΚΑΙ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ [26]

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το καθαρό αλουμίνιο είναι μέταλλο ελαφρύ και πολύ όλκιμο. Οι μηχανικές του ιδιότητες δεν εξαρτώνται μόνο από την καθαρότητά του, αλλά και από το ποσοστό της ενδοτράχυνσης που έχει υποστεί κατά τη διάρκεια των μηχανικών του κατεργασιών. Η σημασία του για την κατασκευαστική βιομηχανία είναι πολύ μεγάλη διότι παρουσιάζει υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/ρ) και υψηλή ειδική μηχανική αντοχή (σ_{TS}/ρ), σε σχέση με άλλα μέταλλα και κράματα. Επίσης, παρουσιάζει καλή αντοχή σε διάβρωση.



Εικόνα 1.1 : Συμβολισμός του αλουμινίου και χαρακτηριστικά του.

1.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαφρύ αργυρόχρωμο μέταλλο. Το ατομικό του βάρος είναι 26,9815, κρυσταλλώνεται σε δομή κυβικού εδροκεντρωμένου, λιώνει σε θερμοκρασία 660°C (1,220°F), εξατμίζεται σε θερμοκρασία 2.467°C (4,473°F), και έχει ειδικό βάρος 2,7 (kg/m³ ή g/cm³). Είναι ισχυρά ηλεκτροθετικό ως μέταλλο και εξαιρετικά αντιδρόν. Στην επαφή του με τον ατμοσφαιρικό αέρα οξειδώνεται ταχέως, δίνοντας ένα λεπτό συνεχές επιφανειακό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου (Al₂O₃), το οποίο είναι αδιαπέραστο από το οξυγόνο και προσφέρει στο μέταλλο αντιοξειδωτική προστασία. Είναι εξαιρετικός αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ είναι μη μαγνητικό, μη αναφλέξιμο και μη τοξικό.

Επιπλέον, είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας. Μπορεί να ανακυκλωθεί, ενώ μορφοποιείται χυτεύεται και κατεργάζεται εύκολα. Κράματα αυτού με μικρά ποσοστά χαλκού, μαγνησίου, μαγγανίου και πυριτίου αλλά και άλλων κραματικών στοιχείων, του προσδίδουν ιδιαίτερα ξεχωριστές και χρήσιμες ιδιότητες. Η αντοχή του εξαρτάται από την καθαρότητά του. Έτσι, καθαρό αλουμίνιο σε ποσοστό 99,996% έχει αντοχή σε εφελκυσμό περίπου 49 MPa, η οποία όμως μπορεί να φτάσει τα 700 MPa μετά από κραμάτωση και κατάλληλη θερμική κατεργασία.

1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Μια συγκεκριμένη ποσότητα μάζας αλουμινίου, ζυγίζει περίπου το 1/3 της ίδιας μάζας από σίδηρο. Ο συνδυασμός του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος με την υψηλή αντιδιαβρωτική αντοχή του, το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο κατασκευαστικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη δομική και αρχιτεκτονική (τόσο ως δομικό όσο και ως διακοσμητικό υλικό), αλλά και στην κατασκευή αυτοκινήτων, τρένων, αεροπλάνων, πλοίων και γενικότερα σε εφαρμογές, όπου απαιτείται μεγάλο ωφέλιμο φορτίο και ταυτόχρονα εξοικονόμηση ενέργειας (π.χ. μεταφορά εμπορευμάτων, υγρών καυσίμων κ.λ.π.).

Εξαιτίας της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητάς του, χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκευών μαγειρικής, ως περιτύλιγμα τροφίμων, αλλά και στην κατασκευή πιστονιών για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Έχει το 63% της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του χαλκού, αλλά μόνο το μισό βάρος ενός ιδίου αγωγού. Κατά συνέπεια, ένας αγωγός αλουμινίου είναι πιο μεγάλος σε διάμετρο από έναν αντίστοιχο από χαλκό, αλλά εξακολουθεί να είναι πιο ελαφρύς και θεωρείται καταλληλότερος για μεγάλου μήκους γραμμές μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης (αγωγοί αλουμινίου χρησιμοποιούνται πλέον για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχης των 700.000V ή και περισσότερο).

Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας (εξαιτίας του γεγονότος ότι απορροφά σχετικά λίγα νετρόνια) και σε κρυογονικές θερμοκρασίες επειδή διατηρεί την αντοχή του και αυξάνει τη σκληρότητά του όσο μειώνεται η θερμοκρασία.

1.4 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Όπως ακριβώς συμβαίνει και με κάθε μέταλλο, έτσι και στην περίπτωση του καθαρού αλουμινίου, η χρησιμότητά του διευρύνεται σημαντικά έπειτα από την κραμάτωσή του με άλλα στοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται «νέα μέταλλα» που έχουν ως βάση το αλουμίνιο και που η χρησιμότητά τους σε διάφορες εφαρμογές είναι μεγαλύτερη από αυτήν του καθαρού αλουμινίου.

Τα κράματα του αλουμινίου διακρίνονται σε κράματα διαμόρφωσης και σε κράματα χύτευσης. Τα κράματα των δύο αυτών κατηγοριών υποδιαιρούνται σε κράματα που μπορούν να υποστούν θερμική κατεργασία και σε κράματα των οποίων η θερμική κατεργασία είναι αδύνατη. Οι ιδιότητες των πρώτων εξαρτώνται από την ακολουθούμενη θερμική κατεργασία, ενώ οι ιδιότητες των δεύτερων εξαρτώνται από το ποσοστό ενδοτράχυνσης που έχουν υποστεί. Όπως το καθαρό αλουμίνιο, έτσι και τα κράματά του έχουν χαμηλή πυκνότητα, καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση. Οι κύριες προσθήκες των κραμάτων αλουμινίου είναι ο χαλκός, ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο και ο ψευδάργυρος.

Πίνακας 1.1 : Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων διαμόρφωσης του αλουμινίου.

Βασικό Μέταλλο	Κυρίαρχο κραματικό στοιχείο	Κωδικός
Αλουμίνιο	Καθαρότητα από 99,00% και πάνω	1xxx
Αλουμίνιο	Χαλκός (Cu)	2xxx
Αλουμίνιο	Μαγγάνιο (Mn)	3xxx
Αλουμίνιο	Πυρίτιο (Si)	4xxx
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο (Mg)	5xxx
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο και Πυρίτιο (Mg, Si)	6xxx
Αλουμίνιο	Ψευδάργυρος (Zn)	7xxx
Αλουμίνιο	Άλλα κραματικά στοιχεία π.χ. ως 2,5% Li	8xxx
Μη χρησιμοποιούμενη σειρά	-	9xxx

Πίνακας 1.2 : Οι κωδικές ονομασίες των κραμάτων χύτευσης του αλουμινίου.

Βασικό Μέταλλο	Κυρίαρχο κραματικό στοιχείο	Κωδικός
Αλουμίνιο	Αλουμίνιο ελάχιστης καθαρότητας 99,00%	1xx.x
Αλουμίνιο	Χαλκός (Cu)	2xx.x
Αλουμίνιο	Πυρίτιο και χαλκός ή Μαγνήσιο (Si και Cu ή Mg)	3xx.x
Αλουμίνιο	Πυρίτιο (Si)	4xx.x
Αλουμίνιο	Μαγνήσιο (Mg)	5xx.x
Μη χρη/νη σειρά	-	6xx.x
Αλουμίνιο	Ψευδάργυρος (Zn)	7xx.x
Αλουμίνιο	Κασσίτερος (Sn)	8xx.x
Αλουμίνιο	Άλλα στοιχεία	9xx.x

Το δεύτερο μέρος της κωδικής ονομασίας για τα κράματα διαμόρφωσης και για τα κράματα χύτευσης, αναφέρεται στην κατεργασία, μηχανική ή θερμική, που έχουν υποστεί. Η ανάλυση της κωδικοποίησης αυτής παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3 : Κωδικοποίηση των κραμάτων αλουμινίου, βάση της κατεργασίας που έχουν υποστεί.

ΚΩΔΙΚΟΣ	ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ
F	Προϊόν όπως παρήχθη, χωρίς μηχανική ή θερμική κατεργασία.
O	Ανόπτηση
H	Ενδοτράχυνση, μόνο για τα κράματα διαμόρφωσης.
H1X	Μόνο ενδοτράχυνση, (το X αναφέρεται στο βαθμό ενδοτράχυνσης): H11: Κράμα ελάχιστης σκληρότητας H12: Κράμα σκληρυμένο κατά 25% H14: Κράμα σκληρυμένο κατά 50% H16: Κράμα σκληρυμένο κατά 75% H18: Κράμα σκληρυμένο κατά 100% H19: Υπέρσκληρο κράμα
H2X	Ενδοτράχυνση ακολουθούμενη από ανόπτηση αποκατάστασης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης μετά από ανόπτηση.
H3X	Ενδοτράχυνση, ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία σταθεροποίησης σε χαμηλή θερμοκρασία, προκειμένου να αποφευχθεί σκλήρυνση λόγω γήρανσης. Το X κυμαίνεται από 1 έως 8, υποδηλώνοντας το βαθμό σκλήρυνσης πριν από τη σταθεροποίηση.
T	Θερμική κατεργασία σκλήρυνσης με γήρανση.
T1	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και φυσική γήρανση.
T2	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, μηχανική κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T3	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και φυσική γήρανση.
T4	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και φυσική γήρανση.
T5	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T6	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή και τεχνητή γήρανση, σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος.
T7	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης,

	βαφή, θερμική κατεργασία σταθεροποίησης.
T8	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
T9	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης, βαφή, τεχνητή γήρανση και κατεργασία εν ψυχρώ.
T10	Βαφή από τη θερμοκρασία θερμής μορφοποίησης, κατεργασία εν ψυχρώ και τεχνητή γήρανση.
W	Θερμική κατεργασία ομογενοποίησης. Χρησιμοποιείται μόνο για τα κράματα που υφίστανται σκλήρυνση με γήρανση.

1.4.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

- Κράματα αλουμινίου που δεν υφίστανται σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.

Πρόκειται για κράματα των σειρών 1000, 3000 και 5000. Είναι μονοφασικά, με μικρά ποσοστά εγκλεισμάτων ή μέσω μεταλλικών ενώσεων. Οι μηχανικές τους ιδιότητες ρυθμίζονται με κατεργασίες σκλήρυνσης, με τη δημιουργία οριακών στερεών διαλυμάτων και κυρίως, με την επακολουθούσα ενδοτράχυνση.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 1000

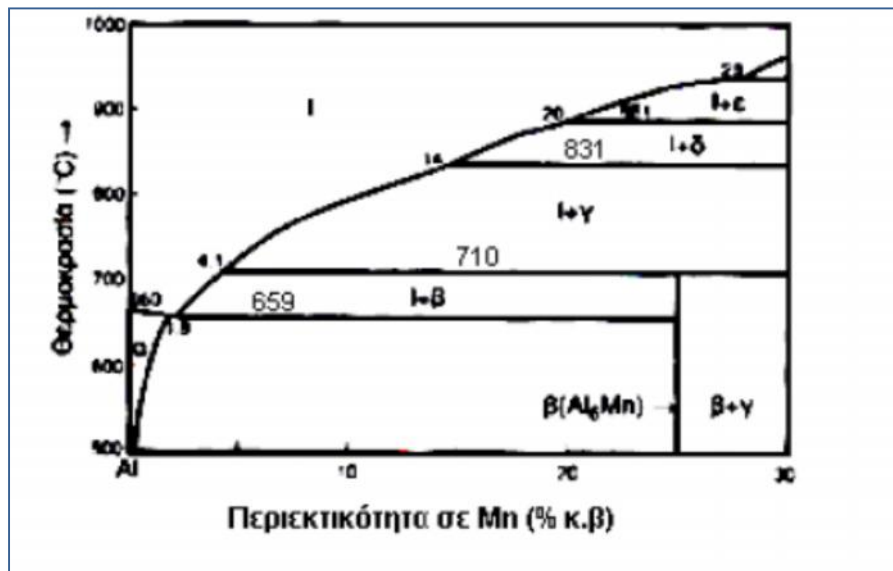
Τα κράματα αυτής της σειράς περιέχουν τουλάχιστο 99% Al. Οι τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι χαμηλές, αλλά βελτιώνονται με ενδοτράχυνση. Είναι κατάλληλα για κατεργασία εν ψυχρώ και αντέχουν σημαντικά σε υγρή και θαλάσσια ατμόσφαιρα. Παρουσιάζουν άριστη ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυριότερες ακαθαρσίες που περιέχονται στα κράματα αυτά είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο, σε συνολικό ποσοστό 1% (κράμα 1100). Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι η κατασκευή συρμάτων και αγωγών ηλεκτρικού ρεύματος, η κατασκευή θερμαντικών σωμάτων κ.α.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου με κύρια προσθήκη το μαγγάνιο. Η μέγιστη διαλυτότητα του Mn στο Al, που είναι 1,8% στους 659 ° C, ελαττώνεται γρήγορα με τη θερμοκρασία.

Το Mn ενώνεται με το Al, σχηματίζοντας τη μεσομεταλλική ένωση Al₆Mn. Η σκλήρυνση του Al με προσθήκη Mn, σε ποσοστά μικρότερα από 1,5%, οφείλεται στη διασπορά της ένωσης αυτής μέσα στη μεταλλική μήτρα του αλουμινίου. Συγχρόνως, η παρουσία Al₆Mn προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του κράματος. Η προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό 0,12%, προκαλεί αύξηση της μηχανικής τους αντοχής. Η προσθήκη Mg, σε ποσοστά μικρότερα από 1,2%, επιφέρει δευτερογενή σκλήρυνση, λόγω του σχηματισμού στερεού διαλύματος. Τα κράματα

Al-Mn μορφοποιούνται εύκολα, αντέχουν στην ατμοσφαιρική διάβρωση και συγκολλώνται εύκολα. Αντικαθιστούν τα κράματα της σειράς 1000, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.



Εικόνα 1.2 : Διάγραμμα ισορροπίας φάσεων Αλουμινίου- Μαγγανίου. Στον x-άξονα βρίσκεται το ποσοστό περιεκτικότητας του κράματος σε μαγγάνιο.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5000

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου, με κύρια προσθήκη το μαγνήσιο, σε ποσοστά μικρότερα του 4%. Σε αυτά το μεγαλύτερο μέρος του Mg βρίσκεται στο στερεό διάλυμα και το υπόλοιπο μετέχει στη μεσομεταλλική ένωση Mg_2Al_3 η οποία είναι σκληρή και εύθραυστη.

Τα κράματα της σειράς 5000, παρουσιάζουν μέτρια μηχανική αντοχή, που όμως βελτιώνεται με ενδοτράχυνση, σε βάρος όμως, της ολκιμότητας. Συγκολλώνται εύκολα, έχουν υψηλή αντοχή σε θαλάσσια διάβρωση και παρουσιάζουν επιφάνεια καλής ποιότητας μετά από λείανση και ανοδίωση. Στην περίπτωση που πρόκειται να υποστούν τέτοιες επιφανειακές κατεργασίες, θα πρέπει τα ποσοστά του σιδήρου και του πυριτίου να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία τα πειράματα έχουν γίνει σε κράμα αλουμινίου 5083, επομένως αναφέρουμε παρακάτω ορισμένες ιδιότητες του κράματος αυτού.

Κράμα αλουμινίου 5083

Το αλουμίνιο 5083 είναι γνωστό για την αντοχή του σε δύσκολα περιβάλλοντα. Είναι ανθεκτικό σε θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και σε παρουσία χημικών. Επιπλέον, θεωρείται από τα πιο σκληρά κράματα διαμόρφωσης του αλουμινίου και η σκληρότητά του αυτή, διατηρείται ακόμα και μετά τη συγκόλληση.

Χημική σύσταση του κράματος αλουμινίου 5083:

Στοιχείο	Σύσταση %
Si	0.4
Fe	0.4
Cu	0.1
Mn	0.4-1.0
Mg	4.0-4.9
Zn	0.25
Ti	0.15
Cr	0.05-0.25
Al	Balance

Πίνακας 1.4 : Μηχανικές ιδιότητες αλουμινίου 5083.

Temper	H32	0/H111
Proof Stress 0.2% (MPa)	240	145
Tensile Strength (MPa)	330	300
Shear Strength (MPa)	185	175
Elongation A5 (%)	17	23
Hardness Vickers (HV)	95	75

Πίνακας 1.5 : Φυσικές ιδιότητες αλουμινίου 5083.

Property	Value
Density	2.65 g/cm ³
Melting Point	570°C
Modulus of Elasticity	72 GPa
Electrical Resistivity	0.058x10 ⁻⁶ Ω.m
Thermal Conductivity	121 W/m.K
Thermal Expansion	25x10 ⁻⁶ /K

Το αλουμίνιο 5083 χρησιμοποιείται κυρίως στους παρακάτω τομείς:

- Ναυπηγική
 - Αυτοκινητοβιομηχανία
 - Εξέδρες άντλησης πετρελαίου
 - Σωλήνες πίεσης
 - Βαγονέτα ορυχείου
- Κράματα αλουμινίου που υπόκεινται σε σκλήρυνση δομής με θερμική κατεργασία.

Πρόκειται για κράματα των σειρών 2000, 6000 και 7000.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2000

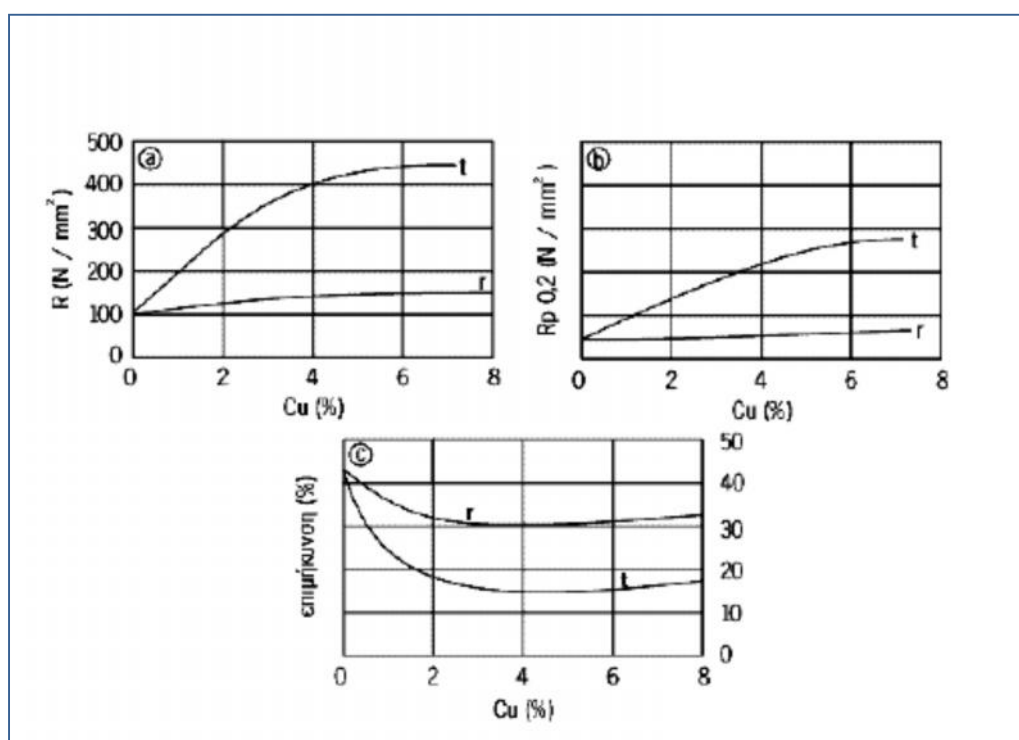
Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6 – 6,3% και για κράματα Al – Cu – Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5 – 1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων CuAl₂ και CuMgAl₂, που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή, εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης Cu₂FeAl₇, η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Ωστόσο, αν προστεθεί

συγχρόνως και Ni, σχηματίζεται η ένωση Al_9FeNi , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους $230\text{ }^\circ\text{C}$.

Τα κράματα της σειράς 2000, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλούνται δύσκολα διότι, οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης ζώνες, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα, οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά.

Η ανάπτυξη των κραμάτων αυτών ως αρχικό στόχο είχε τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου).



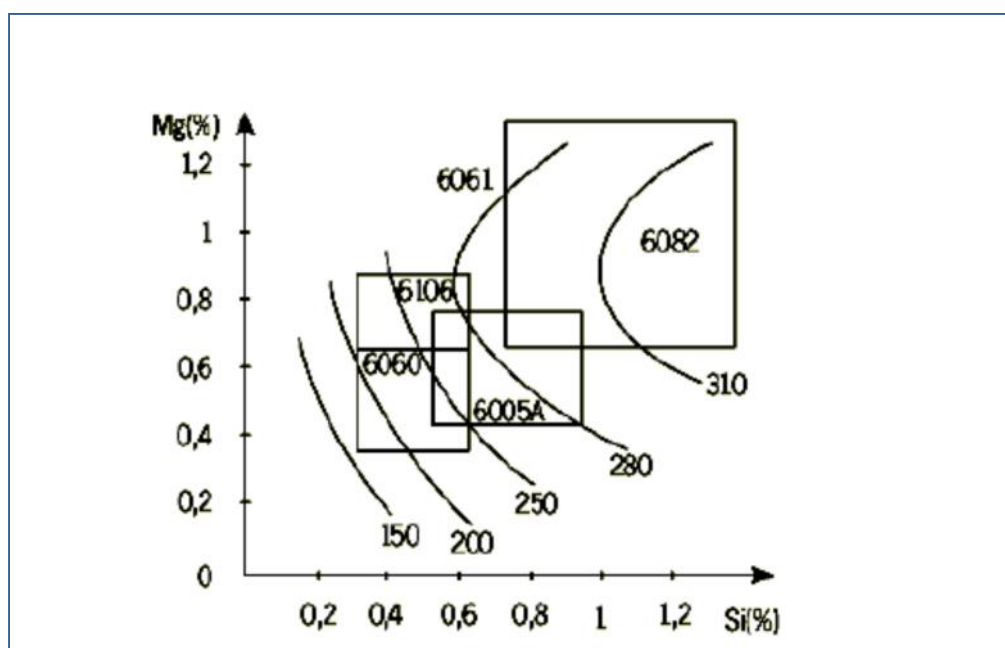
Εικόνα 1.3 : Αντοχή σε εφελκυσμό, όριο ελαστικότητας και επιμήκυνση σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα σε χαλκό. Οι καμπύλες με το γράμμα r αναφέρονται σε κράμα που έχει υποστεί διαδικασία ανόπτησης, ενώ οι καμπύλες με το γράμμα t σε κράμα που έχει υποστεί σκλήρυνση.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 6000

Πρόκειται για κράματα $Al - Mg - Si$. Η σκλήρυνση της δομής τους οφείλεται στο σχηματισμό της ένωσης Mg_2Si , στην οποία, συνήθως μετέχει το σύνολο της μάζας των στοιχείων Mg και Si , με λόγο μαζών (Mg/Si) ίσο προς 1,73. Κάποια περίσσεια Si βελτιώνει σε μερικά κράματα της σειράς τις μηχανικές τους ιδιότητες, σε βάρος όμως της αντοχής τους σε διάβρωση.

Ορισμένα κράματα της σειράς αυτής, περιέχουν προσθήκες Mn, σε ποσοστό μικρότερο του 0,8%, και Cr, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3%. Αυτές οι προσθήκες, συντελούν στη βελτίωση της μηχανικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και υποβοηθούν την εκλέπτυνση των κόκκων. Η προσθήκη χαλκού βελτιώνει, επίσης, τις μηχανικές ιδιότητες του κράματος, ωστόσο το ποσοστό του θα πρέπει να παραμείνει μικρότερο του 0,5%, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης της αντοχής σε διάβρωση που προκαλεί.

Τα κράματα της σειράς 6000 μορφοποιούνται εν θερμώ και συγκολλώνται εύκολα, συγχρόνως όμως, δεν παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά η χρήση τους περιορίζεται μέχρι τους 150 °C. Τέλος, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε ατμοσφαιρική διάβρωση και σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.



Εικόνα 1.4 : Μεταβολή της μηχανικής αντοχής ανάλογα με την περιεκτικότητα σε Mg – Si .

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7000

Πρόκειται για κράματα Al – Zn – Mg και για κράματα Al – Zn – Mg – Cu. Αυτά, μετά από κατάλληλες θερμικές κατεργασίες, παρουσιάζουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από όλα τα κράματα αλουμινίου. Το ποσοστό του Zn κυμαίνεται από 4 – 8% και αυτό του Mg από 1 – 3%. Η επιταχυνόμενη σκλήρυνση δομής οφείλεται κυρίως στην κατακρήμνιση της ένωσης MgZn₂. Προσθήκη χαλκού, σε ποσοστό μικρότερο του 2%, προκαλεί σκλήρυνση λόγω της δημιουργίας στερεού διαλύματος και κατακρήμνισης.

Ωστόσο, η παρουσία χαλκού, μειώνει την εμβαπτότητα, τη συγκολλησιμότητα και τη δυσθραυστότητα των κραμάτων Al – Mg – Zn. Παρουσία χρωμίου, σε ποσοστό μικρότερο του 0,3% βελτιώνει την αντοχή των κραμάτων αυτών σε διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση, ενώ η παρουσία Zn βελτιώνει τη συγκολλησιμότητά τους. Τα κράματα της σειράς 7000 υποβάλλονται εύκολα σε θερμικές κατεργασίες, λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους της περιοχής ομογενοποίησής τους, της καλής τους

εμβαπτότητας, ενίοτε η βαφή πραγματοποιείται στον αέρα, και των σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών γήρανσης, από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 160 °C. Λόγω του συνόλου των ιδιοτήτων αυτών, τα χαρακτηριστικά των κραμάτων της σειράς 7000 δεν αλλοιώνονται κατά τη συγκόλλησή τους. Ωστόσο, η συγκολλησιμότητά τους παραμένει μέτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα των κραμάτων της σειράς αυτής είναι η μειωμένη αντοχή εν θερμώ, έτσι, η θερμοκρασία χρήσης τους παραμένει χαμηλή (έως 120 °C). Τα κράματα του αλουμινίου της σειράς 7000 χρησιμοποιούνται, κυρίως, στην κατασκευή δομικών στοιχείων αεροσκαφών και τμημάτων κατασκευών που υφίστανται ισχυρή καταπόνηση, όπου απαιτούνται υψηλή μηχανική αντοχή και αντοχή σε διάβρωση.

1.4.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά ενός κράματος χύτευσης διαφέρουν από εκείνα των κραμάτων αλουμινίου διαμόρφωσης. Τα χυτά εξαρτήματα έχουν οριστική και καθορισμένη μορφή και δεν υφίστανται πλέον καμία πλαστική παραμόρφωση.

Τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να εξασφαλίζει ένα κράμα χύτευσης αλουμινίου είναι :

- Η καλή χυτευσιμότητα.
- Η απουσία ρωγματώσεων.
- Η ομοιογενής κατανομή του πορώδους.
- Η παραγωγή λεπτόκοκκων χυτών αντικειμένων.
- Η καλή αντοχή εν θερμώ.
- Η καλή αντοχή σε διάβρωση.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων του αλουμινίου, επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση των καλουπιών χύτευσης που πραγματοποιείται με τρεις τρόπους:

- Χύτευση σε άμμο : Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για την παραγωγή μικρής ποσότητας όμοιων χυτών αντικειμένων, πολύπλοκων εξαρτημάτων ή αντικειμένων ιδιαίτερης δομής.
- Χύτευση σε μεταλλικό τύπο : Το κράμα χυτεύεται με τη βοήθεια της βαρύτητας ή χαμηλής πίεσης. Με τη μέθοδο αυτή τα παραγόμενα χυτά παρουσιάζουν μικρότερο πορώδες σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο χύτευσης. Ωστόσο η μέθοδος αντενδείκνυται στην περίπτωση κατασκευής εξαρτημάτων, εργαλείων ή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας.
- Χύτευση υπό πίεση: Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνονται λεπτόκοκκα χυτά με λείες επιφάνειες και γεωμετρική ακρίβεια.

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες στοιχείων κραμάτωσης σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου διαμόρφωσης. Τα στοιχεία αυτά σχηματίζουν ευτηκτικά, μειώνοντας έτσι τις θερμοκρασίες χύτευσης. Παρακάτω παρατίθενται τα κυριότερα κράματα χύτευσης αλουμινίου :

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 2XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-χαλκού τα οποία χρησιμοποιούνται πλέον σπάνια λόγω της χαμηλής μηχανικής τους αντοχής και της κακής αντοχής σε διάβρωση.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 3XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-πυριτίου, κράματα αλουμινίου-πυριτίου-μαγνησίου και κράματα αλουμινίου-πυριτίου-χαλκού. Αυτά περιέχουν πυρίτιο σε ποσοστό 5 έως 20%, αν και τις περισσότερες φορές προτιμώνται αυτά που έχουν ευτηκτική ή υποευτηκτική σύσταση. Τα κράματα αυτά χυτεύονται εύκολα και έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Προσθήκη μαγνησίου σε ποσοστό 0,3 έως 1% ή χαλκού σε ποσοστό 3-5% βελτιώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου-πυριτίου. Κράματα αλουμινίου-πυριτίου-χαλκού, η περιεκτικότητα των οποίων σε πυρίτιο είναι κοντινή της ευτηκτικής σύστασης (12,7% Si), παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά εν θερμώ και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εμβόλων στις μηχανές εσωτερικής καύσης.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 5XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-μαγνησίου. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι η εξαιρετική τους αντοχή σε θαλάσσιο περιβάλλον, στην ατμόσφαιρα ή μέσα στο θαλασσινό νερό. Έχουν καλή κατεργασιμότητα, αλλά μέτρια χυτευσιμότητα.

- Σειρά κραμάτων αλουμινίου 7XX.X

Πρόκειται για κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου και κράματα αλουμινίου-ψευδαργύρου-μαγνησίου. Αυτά χυτεύονται δύσκολα, αλλά έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση. Επιπλέον, υφίστανται γήρανση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, γι' αυτό και οι μηχανικές τους ιδιότητες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά από ένα μέχρι δύο μήνες. Η ταχύτητα απόψυξης επηρεάζει λίγο τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλο το πάχος των χυτών αντικειμένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗ ΔΙΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΣΩ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ (FSW)^[14,26]

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πρόκειται για μέθοδο η οποία αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα από το Βρετανικό Ινστιτούτο Συγκολλήσεων (The Welding Institute, Δεκέμβριος 1991). Είναι τεχνική στερεής κατάστασης κατά την οποία συμβαίνει πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών, αλλά σε θερμοκρασίες κάτω από το σημείο τήξης τους.

Η τεχνική της Συγκόλλησης δια Τριβής μέσω Ανάδευσης, θεωρείται ως μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα των συγκολλήσεων. Οι πρώτες έρευνες το 1991 επικεντρώθηκαν σε βασικούς τομείς τόσο για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μεθόδου, όσο και για τη δημιουργία των εξαρτημάτων που απαρτίζουν μια μηχανή FSW. Μέχρι το 1995, οι επιστήμονες είχαν μεταβεί πια από το θεωρητικό επίπεδο σε εφαρμογές τόσο στην αεροναυπηγική και στη ναυπηγική βιομηχανία, όσο και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η έρευνα και η ανάπτυξη της τελευταίας δεκαετίας πάνω στη μέθοδο αυτή, οδήγησαν σε περαιτέρω εξέλιξη προϊόντων και άλλων παρόμοιων τεχνολογιών, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των προϊόντων και μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος τους.

2.2 Η ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)

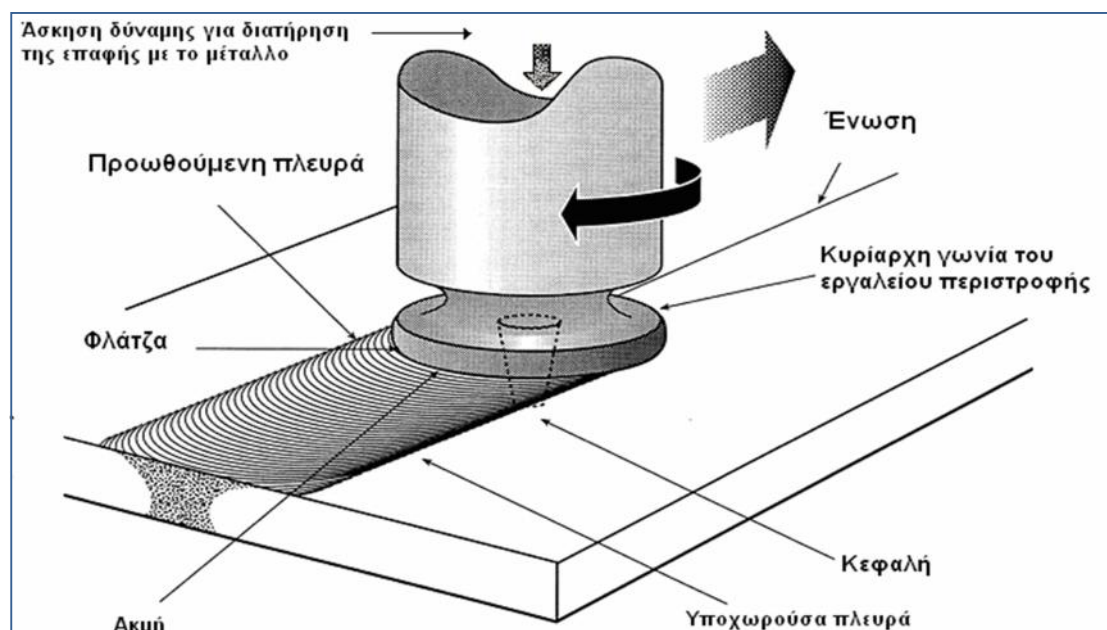
Οι βασικότερες αρχές που διέπουν τη μέθοδο FSW, είναι η τριβή και η ανάδευση, όπου σε συνδυασμό με την παραγομένη θερμότητα δημιουργούν τις προϋποθέσεις εκείνες που οδηγούν, σε πλαστική παραμόρφωση και συγκόλληση των υλικών, σε θερμοκρασίες κάτω του σημείου τήξης τους.

Αρχικά, εφαρμόστηκε κυρίως σε κράματα αλουμινίου, γρήγορα όμως βρήκε εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος υλικών. Ένα μη αναλώσιμο περιστρεφόμενο εργαλείο συγκόλλησης με μία ειδικά σχεδιασμένη κεφαλή ως προέκταση ενός περιαιχενίου, εισέρχεται στην επαφή των ακμών των δύο πλακών που πρόκειται να συγκολληθούν και διέρχεται κατά μήκος αυτών (Εικόνα 2.1).

Με το περιστρεφόμενο εργαλείο της μηχανής, συντελούνται τρεις βασικές λειτουργίες:

α) Η τοπική θέρμανση του δοκιμίου, β) Η ανάδευση του υλικού των δύο πλακών που οδηγεί στη συγκόλλησή τους και γ) Η συγκράτηση του πλαστικού υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης, κάτω ακριβώς από το περιαιχένιο. Η θερμότητα που αναπτύσσεται, λόγω τριβής ανάμεσα στην κεφαλή συγκόλλησης και το δοκίμιο, οδηγεί στην πλαστική παραμόρφωση αυτού. Η τοπική θερμότητα, μαλακώνει το υλικό γύρω από την κεφαλή. Ο συνδυασμός της περιστροφικής και της εμπρόσθιας κίνησης του εργαλείου, προκαλεί την κίνηση του υλικού από το μπροστινό μέρος της κεφαλής, στο πίσω μέρος αυτής. Το περιαιχένιο, περιορίζει τη ροή του μετάλλου περίπου στο αρχικό επίπεδο της επιφάνειας της πλάκας. Ως αποτέλεσμα της

διεργασίας αυτής, οδηγούμαστε στη συγκόλληση των πλακών στη «στερεά τους φάση».

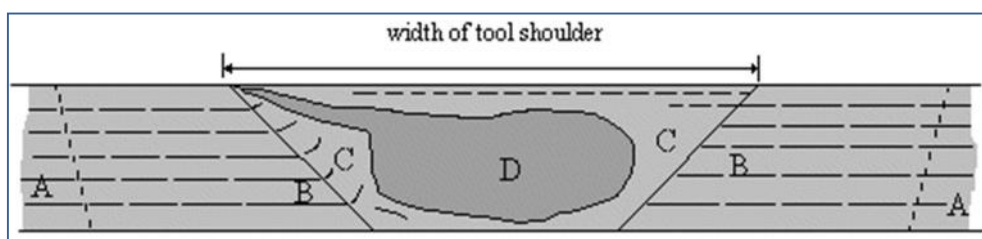


Εικόνα 2.1: Μακροσκοπική απεικόνιση συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW.

Λόγω των πολλαπλών γεωμετρικών σχημάτων που μπορεί να έχει η κεφαλή, η κίνηση του υλικού είναι αρκετά σύνθετη. Κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης με τη μέθοδο FSW, το υλικό υποβάλλεται σε έντονη πλαστική παραμόρφωση σε υψηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα, τη δημιουργία λεπτόκοκκης δομής και ισοαξονικών κόκκων. Η λεπτόκοκκη αυτή μικροδομή της FSW προσδίδει στο μέταλλο αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες. Η διαδικασία συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, δημιουργεί τις ακόλουθες, σαφώς διακεκριμένες ζώνες στη συγκολλούμενη περιοχή (Εικόνα 2.2) :

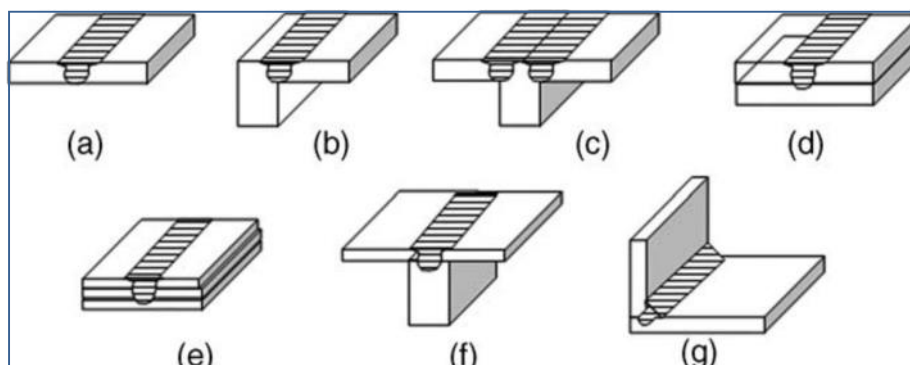
- **Ζώνη βασικού μετάλλου:** Η περιοχή αυτή, βρίσκεται μακριά από τη ζώνη συγκόλλησης, δεν έχει παραμορφωθεί και παρόλο που θα υποβληθεί στους θερμικούς κύκλους της συγκόλλησης, δεν επηρεάζεται από τη θερμότητα, γιατί η θερμότητα που αναπτύσσεται είναι πολύ χαμηλή.
- **Θερμικά επηρεασμένη ζώνη:** Η περιοχή αυτή βρίσκεται κοντά στη ζώνη συγκόλλησης. Ο θερμικός κύκλος θα διαμορφώσει ανάλογα τη μικροδομή ή ακόμα και τις μηχανικές ιδιότητες (σε μικρό βαθμό), του υλικού. Παρόλα αυτά, δεν παρατηρείται πλαστική παραμόρφωση.
- **Θερμο-μηχανικά επηρεασμένη ζώνη:** Στην περιοχή αυτή το εργαλείο, θα επιδράσει πάνω στο υλικό, όπως επίσης και η θερμότητα που αναπτύσσεται. Στην περίπτωση του αλουμινίου υφίσταται πλαστική παραμόρφωση με άμεση επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, χωρίς όμως πλήρη ανακρυστάλλωση. Κάτι που τη διακρίνει χαρακτηριστικά, σε σχέση με τη ζώνη συγκόλλησης, η οποία υφίσταται πλήρη ανακρυστάλλωση.
- **Ζώνη συγκόλλησης:** Πρόκειται για την περιοχή πλήρους ανακρυστάλλωσης, η οποία καλείται και ζώνη ανάδευσης και εξαρτάται πλήρως από την κεφαλή του περιαιχηνίου. Ο όρος ζώνη ανάδευσης χρησιμοποιείται στην περίπτωση

όπου έχουμε να κάνουμε με κατεργασίες τριβής μέσω ανάδευσης και όχι στην περίπτωση των συγκολλήσεων και αυτό γιατί στην πρώτη περίπτωση έχουμε να κάνουμε κατά κύριο λόγο με τη μεταποίηση του υλικού.



Εικόνα 2.2 : Οι διακριτές ζώνες κατά την FSW: Α) Ζώνη βασικού μετάλλου, Β) Θερμικά επηρεασμένη ζώνη, Γ) Θερμο-μηχανικά επηρεασμένη ζώνη, Δ) Ζώνη συγκόλλησης/ανάδευσης.

Η μέθοδος FSW συγκαταλέγεται στις πιο εξελιγμένες μεθόδους συγκόλλησης της τελευταίας δεκαετίας. Καλείται και «πράσινη» μέθοδος, λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας, είναι φιλική στο περιβάλλον και έχει πολλαπλές χρήσεις. Σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους συγκολλήσεων η FSW καταναλώνει τη λιγότερη ενέργεια, ενώ δε λαμβάνει χώρα μακροσκοπική τήξη υλικού για τον καθορισμό του οποίου, θα έπρεπε να γίνει χρήση επιβλαβών για το περιβάλλον διαλυτών. Η FSW, μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους των συγκολλήσεων όπως για παράδειγμα, μετωπικές, γωνιακές, τύπου T, με επικάλυψη, κατ'ακμή (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3 : Διάφοροι τύποι συγκολλήσεων όπου εφαρμόζεται η FSW.

2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)

Η FSW, πλεονεκτεί έναντι των άλλων κλασικών μεθόδων. Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται τόσο η αντοχή των συγκολλούμενων υλικών, όσο και η βελτίωση της αντοχής σε κόπωση. Επίσης τα προϊόντα είναι πολύ πιο ανθεκτικά στο σημείο της ραφής της συγκόλλησης και είναι λιγότερο επιρρεπή στη διάβρωση από το περιβάλλον.

Οι χαμηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου και ο σχετικά μικρός θερμικός κύκλος, οδηγούν σε συγκολλήσεις:

- ✓ Με βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη αλλά και κόπωση.
- ✓ Χωρίς πορώδες.
- ✓ Χωρίς στρεβλώσεις ή συρρικνώσεις.
- ✓ Χωρίς οξειδία στη συγκόλληση.
- ✓ Με βελτιωμένη εμφάνιση ραφής.
- ✓ Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης.
- ✓ Δεν χρησιμοποιεί καταναλισκόμενα στοιχεία, οπότε δεν υπάρχει κόστος αναλώσιμων.
- ✓ Δεν χρησιμοποιεί αέρα προστασίας (εξαιρέση το τιτάνιο και σε κάποιους χάλυβες).
- ✓ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου που ανήκουν σε διαφορετική σειρά.
- ✓ Πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδος.

2.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ (FSW)

Θα πρέπει στις προς συγκόλληση πλάκες να υπάρχει ισχυρή συγκράτηση, κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες σε επίπεδο παραγωγής, όπου οι παράγοντες του χρόνου και της ασφάλειας παίζουν σημαντικό ρόλο. Το γεγονός ότι πρόκειται για μια καινούργια μέθοδο, εξηγεί την έλλειψη του απαραίτητου εξοπλισμού, γεγονός που την καθιστά μια λιγότερο ευέλικτη διαδικασία. Ωστόσο, προβλήματα όπως το παραπάνω καθώς και άλλα, όπως για παράδειγμα το υψηλό κόστος του ως τώρα υπάρχοντος εξοπλισμού, ενδέχεται να ξεπεραστούν, διότι η μέθοδος FSW γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής.

2.5 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ (FSW)

Υπάρχουν πολλές και διάφορες κατηγορίες που αφορούν στον εξοπλισμό για την FSW. Κάθε μία από αυτές έχει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά που επικεντρώνονται πάντα στη βέλτιστη ποιότητα των διαδικασιών. Έχουμε τρεις βασικές κατηγορίες μηχανών : α) Οι ειδικά σχεδιασμένες μηχανές, β) Τα ρομπότ, γ) Οι τροποποιημένες φρέζες.

Οι μηχανές όπου μπορούν εύκολα να δεχτούν διάφορα κομμάτια ανάλογα με την εκάστοτε κατεργασία, διακρίνονται από ένα μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων, διαφορετικών μεγεθών και γεωμετρίας.

Τα ρομπότ χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα αυτοματισμού που παρέχουν στο χρήστη. Οι λειτουργίες είναι πιο ακριβείς και σύνθετες σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές, όμως το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Οι εφαρμογές είναι παρόμοιες με αυτές των συμβατικών όπως, συγκόλληση ανόμοιων μετάλλων, λεπτού πάχους, μεγάλων επιφανειών, πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων κλπ.



Εικόνα 2.4 : Μηχανή FSW.

Το καθοριστικό μέρος μιας μηχανής FSW, αποτελείται από ένα κυλινδρικό περιανχένιο, η προέκταση του οποίου είναι μία κεφαλή, η οποία είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε περιστρεφόμενη να εισχωρεί εντός του προς κατεργασία υλικού και ταυτόχρονα να προωθείται με μία ταχύτητα ανάμεσα στα προς συγκόλληση υλικά τα οποία εφάπτονται. Τα προς συγκόλληση υλικά συγκρατούνται σφιχτά πάνω στην τράπεζα εργασίας, με τέτοιο τρόπο, ώστε παρά την πίεση που δέχονται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, να παραμένουν ακίνητα. Περιστρεφόμενη η κεφαλή, περνά κατά μήκος των ακμών των τεμαχίων που πρόκειται να συγκολληθούν. Μεταξύ της κεφαλής και των προς συγκόλληση υλικών αναπτύσσεται θερμότητα λόγω τριβής. Η θερμότητα αυτή, «μαλακώνει» το υλικό των ακμών του κάθε τεμαχίου, το οποίο παρασύρεται από την περιστρεφόμενη κεφαλή, στροβιλίζεται, αναμιγνύεται και τελικά δημιουργεί τη ραφή μεταξύ των υλικών. Πραγματοποιείται απευθείας μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε θερμική. Η κινητική ενέργεια της περιστρεφόμενης κεφαλής, μετατρέπεται σε θερμική ισχύ που απαιτείται για τη συγκόλληση των δύο πλακών.

Η νέα αυτή μέθοδος συγκόλλησης αξιοποιώντας τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω τριβής σε συνδυασμό με την πίεση που ασκείται από την κεφαλή στις ακμές των υλικών, οδηγεί σε συγκόλληση τα υλικά, χωρίς αυτά να φτάνουν το σημείο τήξης, χαρακτηριστικό που την καθιστά ως μέθοδο, καλύτερη από τις άλλες κλασικές μεθόδους συγκόλλησης.

2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

Κατά τη συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης, έχουμε να κάνουμε με μία θερμομηχανική διαδικασία, όπου το εργαλείο φθάνει κατά κύριο λόγο τη solidus θερμοκρασία του προς συγκόλληση υλικού. Για να επιτευχθεί μία συγκόλληση με καλή ποιότητα, σημαντικό ρόλο παίζει το υλικό της κεφαλής. Ανάλογα με τα υλικά που συγκολλούνται, επιλέγονται και τα ανάλογα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένη η κεφαλή. Τα εργαλεία της μηχανής έχουν διάφορους σχεδιασμούς ανάλογα με το είδος της εκάστοτε συγκόλλησης. Λάθος σχεδιασμός ή επιλογή εργαλείου, μπορεί να οδηγήσει είτε στη θραύση του εργαλείου, είτε σε συγκόλληση χαμηλής ποιότητας.

Η επιλογή του σωστού υλικού, απαιτεί να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά (υλικά προς συγκόλληση, πάχος πλακών κλπ.) που είναι σημαντικά για την εκάστοτε διαδικασία. Η τελική επιλογή καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες του προς συγκόλληση μετάλλου.

2.6.1 ANTOXH ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Το υλικό του εργαλείου θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέχει τα φορτία θλίψης, όταν το εργαλείο έρχεται σε επαφή με την προς συγκόλληση πλάκα και εισχωρεί σε αυτήν, καθώς και τις διατμητικές τάσεις σε υψηλές θερμοκρασίες, ώστε να αποφευχθεί πιθανή αστοχία ή παραμόρφωση καθ' όλη τη φάση της διαδικασίας.

Εκτός από την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, το εργαλείο θα πρέπει να διατηρεί και τη σταθερότητά του. Ο ερπυσμός του εργαλείου, είναι ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζει τις συγκολλήσεις μεγάλου μήκους, με πιθανότητα το εργαλείο να αστοχήσει κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Υλικά όπου έχουν υποστεί σκλήρυνση ή κάποια άλλη μετατροπή, έχουν ένα ανώτατο θερμοκρασιακό όριο και εν καιρώ θα παρουσιάσουν κάποια μορφή αστοχίας, λόγω της μείωσης των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανόπτηση που υφίσταται το υλικό. Στη συγκόλληση δια τριβής μέσω ανάδευσης, οι αλλαγές αυτές, αποδυναμώνουν το εργαλείο και είτε το οδηγούν σε παραμόρφωση, είτε ακόμα και σε θραύση. Ακριβώς επειδή πρόκειται για μία διαδικασία όπου το υλικό υπόκειται σε θερμικούς κύκλους θέρμανσης - ψύξης, είναι πιο εύκολο να οδηγηθούμε σε πιθανή αστοχία. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το εργαλείο αστοχεί λόγω θερμικής κόπωσης.

2.6.2 ANTOXH ΣΤΗ ΦΘΟΡΑ

Το εργαλείο της συγκόλλησης είναι ένα εξάρτημα που μπορεί εύκολα να αφαιρείται από τη μηχανή, γεγονός που θα προκαλέσει πιθανή φθορά σε αυτό, με αποτέλεσμα να έχουμε επιπτώσεις στην ποιότητα των συγκολλήσεων, αυξάνοντας τις πιθανότητες ελαττωμάτων. Στις κατεργασίες τριβής μέσω ανάδευσης, η φθορά του εργαλείου μπορεί να προκύψει από λειαντικά που χρησιμοποιούνται, κόλλες οι οποίες κατά κύριο λόγο μπορούν να προκαλέσουν χημική φθορά. Ο ακριβής μηχανισμός φθοράς εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του εργαλείου και τις εκάστοτε παραμέτρους. Για παράδειγμα στην περίπτωση εργαλείων, κατασκευασμένα από πολυκρυσταλλικό κυβικό νιτρίδιο του βορίου, παρατηρείται φθορά, λόγω χαμηλών

ταχυτήτων περιστροφής αλλά και σε υψηλές ταχύτητες, λόγω της έντονης τριβής που αναπτύσσεται.

2.6.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αστοχία του εργαλείου. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου το εργαλείο, κεφαλή και περιανχένιο, είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά και άρα έχουν διαφορετικούς θερμικούς συντελεστές. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ πιθανό, να οδηγηθούμε στην καταστροφή του εργαλείου, αν δεν προσέξουμε τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται και κατ' επέκταση, τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της όλης διαδικασίας. Γι' αυτές τις περιπτώσεις υπάρχουν πρόσθετα εργαλεία που λειτουργούν ως ρυθμιστές, προκειμένου να υπάρχει θερμική ισορροπία ανάμεσα στο περιανχένιο και την κεφαλή. Το ίδιο πρόβλημα δεν παρατηρείται όταν έχουμε να κάνουμε με διαφορετικούς θερμικούς συντελεστές μεταξύ του εργαλείου και της προς συγκόλληση πλάκας.

2.6.4 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ

Παρόλο που το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το εργαλείο είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την καλή ποιότητα τόσο της συγκόλλησης, όσο και της εκάστοτε κατεργασίας δια τριβής μέσω ανάδευσης, οι έρευνες δεν έχουν επικεντρωθεί τόσο σε αυτόν τον τομέα. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τα υλικά που χρησιμοποιούνται, υλικά όπως ο χάλυβας και τα κράματα αυτού, αλλά και κράματα νικελίου – κοβαλτίου.

Το υλικό από το οποίο φτιάχνεται τόσο το εργαλείο συγκόλλησης, όσο και η κεφαλή, πρέπει να είναι ανθεκτικά, ώστε να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση. Θα πρέπει επίσης να έχουν καλή αντοχή στην οξειδωση και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, ούτως ώστε, να μειώνονται οι θερμικές απώλειες και κατ' επέκταση, να μην προκαλούνται αλλοιώσεις στη μηχανή. Ο χάλυβας AISI H13 έχει αποδειχθεί ως το καλύτερο υλικό κεφαλής για συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου. Άλλα υλικά κεφαλής, που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση υλικών, με πολύ υψηλό σημείο τήξης, όπως είναι το τιτάνιο και ο χάλυβας, είναι το πολυκρυσταλλικό νιτρίδιο του βορίου (PCBN).

Πίνακας 2.1 : Υλικά εργαλείου ανάλογα με τα προς συγκόλληση κράματα.

Κράματα προς συγκόλληση	Πάχος πλακών	Υλικό εργαλείου
Αλουμινίου	<12	Εργαλειοχάλυβας WC-Co
	<26	MP159
Μαγνησίου	<6	Εργαλειοχάλυβας WC
Χαλκού	<50	Κράματα Νικελίου, PCBN
Τιτανίου	<11	Κράματα βολφραμίου
Ανοξειδωτοι χάλυβες	<6	Κράματα βολφραμίου, PCBN
Low alloy steels	<10	WC, PCBN

Νικελίου	<6	PCBN
PCBN		

2.7 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΗΣ FSW

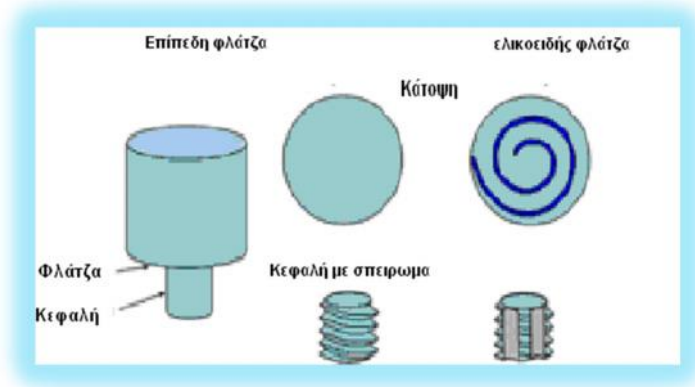
Καθένα από τα μέρη του εργαλείου (κεφαλή και περιαιχένιο), εκτελεί μία διαφορετική λειτουργία. Ως εκ τούτου, ο κατάλληλος σχεδιασμός αυτών, αλλά και το υλικό από το οποίο είναι αυτά φτιαγμένα, επιδρούν στην ποιότητα των συγκολλήσεων. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική αναφορά για τους σχεδιασμούς που υπάρχουν τόσο για το περιαιχένιο όσο και για την κεφαλή. Αξίζει να σημειωθεί ότι νέα σχέδια βρίσκονται σε διαρκή μελέτη, προκειμένου να εξυπηρετηθούν εξειδικευμένες εφαρμογές.

2.7.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Η γεωμετρία του εργαλείου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η καλή ποιότητα της συγκόλλησης όσο και η μέγιστη δυνατή ταχύτητα που αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί. Το εργαλείο της FSW αποτελείται από ένα περιαιχένιο και μια κεφαλή όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5. Όπως αναφέρθηκε το εργαλείο εκτελεί δύο βασικές διεργασίες:

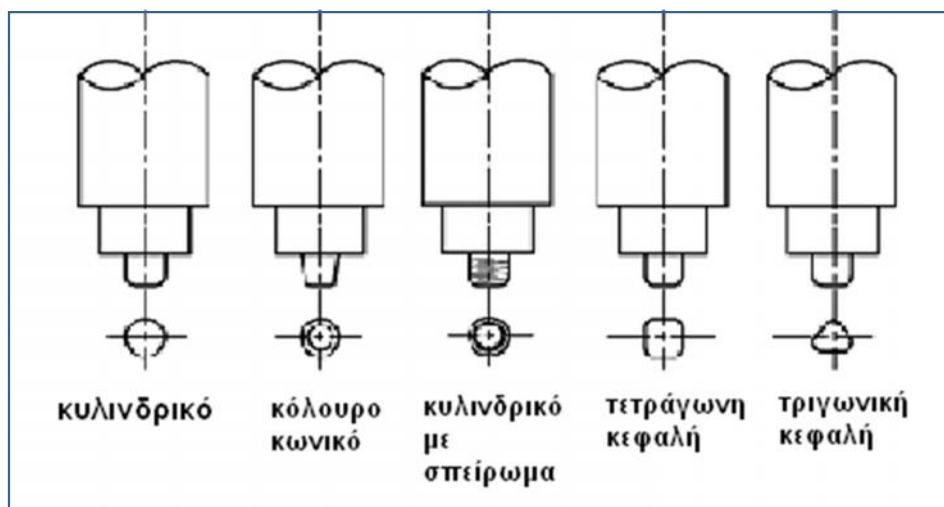
- Οριοθετεί τη θερμότητα που αναπτύσσεται στις πλάκες λόγω τριβής.
- Αναμιγνύει τα υλικά.

Στο αρχικό στάδιο το εργαλείο εισχωρεί στο σημείο όπου εφάπτονται οι ακμές των δύο πλακών, η θερμότητα αναπτύσσεται λόγω της τριβής μεταξύ της κεφαλής και του προς συγκόλληση δοκιμίου. Το εργαλείο εισχωρεί μέχρις ότου το περιαιχένιο να εφάπτεται με τις πλάκες. Η τριβή μεταξύ του περιαιχενίου και των πλακών αποδίδει το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται καθ'όλη τη διαδικασία της συγκόλλησης. Η δεύτερη διεργασία που πραγματοποιείται είναι εξίσου σημαντική καθώς «αναμιγνύει» και «μετακινεί» τα δύο υλικά, προκαλώντας τελικά τη συγκόλλησή τους. Η ομοιομορφία της μικροδομής και οι ιδιότητες που αποκτούν τα υλικά μετά τη διαδικασία της συγκόλλησης οφείλονται κατά κύριο λόγο στη γεωμετρία των εργαλείων αυτών. Κατά γενικό κανόνα στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται επίπεδο περιαιχένιο με κοχλιωτή κεφαλή.









Εικόνα 2.5 : α) Τα μέρη του εργαλείου, β) Τυπική κεφαλή συγκόλλησης.

Η πειραματική εμπειρία αλλά και οι συνεχείς μελέτες οδήγησαν στη βελτίωση τόσο του υλικού όσο και του σχεδιασμού της κεφαλής και του περιανχενίου. Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές γεωμετρίες κεφαλών (Εικόνα 2.6), που επικεντρώνονται στον τρόπο με τον οποίο η κεφαλή εισχωρεί στις πλάκες, στον τρόπο με τον οποίο το περιανχένιο προωθείται στις πλάκες και στον τρόπο με τον οποίο τελικά τα υλικά αναμιγνύονται. Το ινστιτούτο TWI, έχει αναπτύξει κατά πολύ το σχεδιασμό τόσο των κεφαλών όσο και του περιανχενίου του εργαλείου.



Εικόνα 2.6 : Γεωμετρίες κεφαλών.

Εργαλείο	κυλινδρική	κωνική	κόλουρο	τριπλής κεφαλής	με κλίση	διπλής κατεύθυνσης περιστροφής
Σχήματα						
Γεωμετρία κεφαλής	κυλινδρική με σπείρωμα	κόλουρο κωνικό με σπείρωμα	κόλουρο κωνικό με τρεις σπείρες	τριπλή κεφαλή με εξωτερικό άνοιγμα	κεκλιμένο κυλινδρικό με σπείρωμα	κόλουρο με σπείρωμα



Εικόνα 2.7 : Τα είδη των κεφαλών.

Οι Thomas et al παρατήρησαν ότι οι κεφαλές με σχήμα κόλουρου κόνου καταφέρνουν να συγκρατούν στις εσοχές τους λιγότερο υλικό από ότι οι κυλινδρικές με την ίδια διάμετρο. Οι κεφαλές αυτές ονομάζονται WorlTM και MX Triflute αντίστοιχα. Πιστεύεται ότι οι κεφαλές αυτές αυξάνουν τη δυναμική της συγκόλλησης, καθιστούν πιο εύκολη τη ροή του πλαστικοποιημένου πλέον υλικού, διευκολύνει την προς τα κάτω προώθηση του περιανυχνίου και αυξάνεται η επιφάνεια επαφής της κεφαλής και της πλαστικοποιημένης ζώνης του υλικού, αυξάνοντας έτσι τη θερμότητα. Η πλειονότητα των εργαλείων είναι κυρίως κυλινδρικού σχήματος. Πρόσφατα, δυο νέες κεφαλές σχεδιάστηκαν, με κόλουρο σπειροειδές σχήμα και με κλίση της κεφαλής (Εικόνα 2.7), διευκολύνοντας έτσι τη ροή του υλικού γύρω και κάτω από την κεφαλή και προσδίδοντας καλύτερη αναμειξιμότητα λόγω της κλίσης της κεφαλής.

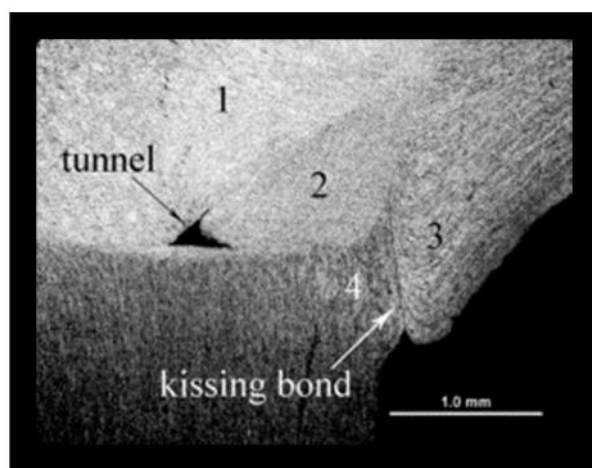
2.8 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ

Κατά τη διαδικασία μιας συγκόλλησης δια της τριβής μέσω ανάδευσης, εμφανίζονται κυρίως 3 είδη ατελειών: τα κενά, τα υπολείμματα υλικού και οι ρωγμές. Η παρουσία των κενών είναι εύκολα ανιχνεύσιμη, σε αντίθεση με τα δυο άλλα είδη ατελειών που μπορεί να εμφανιστούν. Τα ελαττώματα αυτά θα πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός εργαλείου FSW. Παράμετροι όπως ο σχεδιασμός του εργαλείου, του περιαιχενίου αλλά και της κεφαλής, το βάθος διείσδυσης της κεφαλής στην πλάκα, η κλίση που θα έχει το εργαλείο αλλά και το πάχος των πλακών σχετίζονται με τα ελαττώματα αυτά.

2.8.1 ΚΕΝΑ-ΑΤΕΛΕΙΕΣ ΤΥΠΟΥ ΤΟΥΝΕΛ

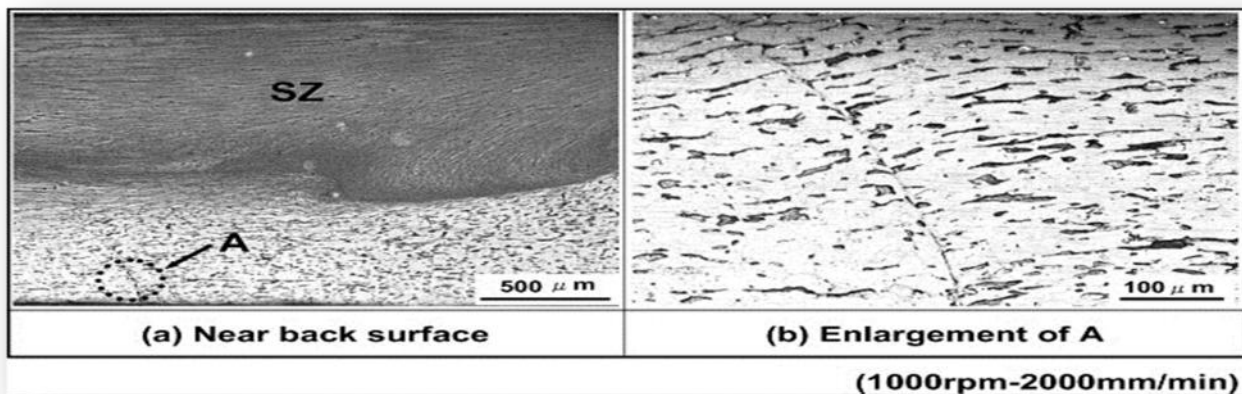
Εμφανίζονται κυρίως στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης, στα όρια μεταξύ της ζώνης ανάδευσης - συγκόλλησης και του βασικού μετάλλου, μέσα στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη και είναι πιθανό είτε να φτάνουν μέχρι την επιφάνεια της συγκόλλησης, είτε και όχι. Έχει παρατηρηθεί ότι αυτού του είδους οι ατέλειες, οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ανεπαρκή πίεση που ασκεί το περιαιχένιο στην προς συγκόλληση πλάκα καθώς εισέρχεται σε αυτή (Εικόνα 2.8). Οι ατέλειες τύπου τούνελ, καλύπτουν όλο το μήκος των συγκολλήσεων.



Εικόνα 2.8 : Ατέλεια τύπου τούνελ.

2.8.2 ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ-ΡΩΓΜΕΣ

Πρόκειται για μία συχνά εμφανιζόμενη ατέλεια την οποία στη βιβλιογραφία τη συναντάμε με διάφορους όρους όπως, kissing bond, lazy S ή entrapped oxide defect. Οφείλεται στην εμφάνιση ενός ημισυνεχούς στρώματος οξειδίου που εγκλωβίζεται στη ζώνη συγκόλλησης. Η ατέλεια αυτή εμφανίζεται είτε λόγω κακής προετοιμασίας του δείγματος, είτε λόγω κακής θέσης του εργαλείου, σε συνδυασμό με υπερβολικά μεγάλη ταχύτητα περιστροφής και προώθησης (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9 : Μικροσκοπική απεικόνιση ατέλειας τύπου kissing bond, κοντά στην επιφάνεια της συγκόλλησης.

2.9 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.9.1 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

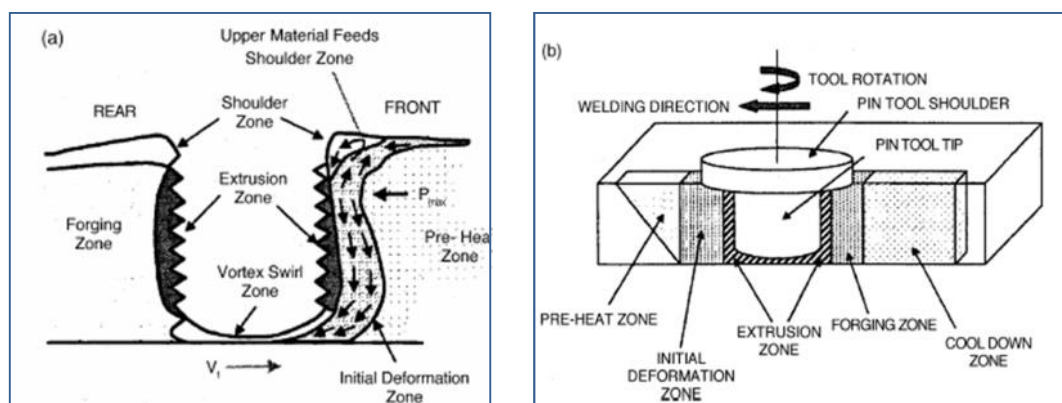
Από τις πιο βασικές παραμέτρους της FSW είναι η ταχύτητα περιστροφής του εργαλείου (περιαυχένιο- κεφαλή), δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα (ω , rpm) και η ταχύτητα πρόωσης (v , mm/min) του περιουχενίου κατά μήκος της ραφής της συγκόλλησης. Η περιστροφή του εργαλείου προκαλεί την ανάδευση και ανάμειξη των δύο προς συγκόλληση υλικών γύρω από την κεφαλή και τελικά η μετακίνηση αυτού από το μπροστινό στο πίσω μέρος της κεφαλής, επιφέρει τελικά τη συγκόλλησή τους. Μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής, συνεπάγεται και μεγαλύτερη τριβή και άρα αύξηση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα την καλύτερη ανάδευση των υλικών.

Επιπλέον με τις ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής, υπάρχει και μια άλλη σημαντική παράμετρος. Η κλίση (γωνία) που θα έχει το εργαλείο, σε σχέση με την προς συγκόλληση πλάκα. Η κλίση αυτή εξασφαλίζει την ομοιόμορφη «μεταφορά»-ανάδευση του υλικού από το μπροστινό μέρος της κεφαλής στο πίσω. Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι και το βάθος εις το οποίο θα εισέλθει η κεφαλή στην πλάκα, το οποίο εξαρτάται από το μήκος που θα έχει η κεφαλή του εργαλείου. Αν για παράδειγμα το βάθος εισχώρησης είναι πολύ μικρό, τότε το εργαλείο δεν έρχεται σε επαφή με την πλάκα και η ανάδευση του υλικού δε θα είναι ικανοποιητική. Άρα η συγκόλληση δε θα είναι αποτελεσματική.

2.9.2 ΣΤΑΔΙΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η διαδικασία συγκόλλησης, με τη μέθοδο FSW περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Στάδιο προθέρμανσης λόγω τριβής.
- Στάδιο παραμόρφωσης λόγω ανάδευσης.
- Στάδιο εξώθησης λόγω ανάδευσης και κίνησης.
- Στάδιο απόψυξης.



Εικόνα 2.10 : Ζώνες που δημιουργούνται κατά την συγκόλληση με FSW.

Στο πρώτο στάδιο της προθέρμανσης, αναπτύσσονται θερμοκρασίες λόγω τριβής ανάμεσα στο εργαλείο και στο υπό επεξεργασία μέταλλο. Οι θερμικές ιδιότητες του μετάλλου και η ταχύτητα προχώρησης του εργαλείου, καθορίζουν τη θερμότητα που αναπτύσσεται στην περιοχή αυτή. Καθώς το εργαλείο κινείται κατά μήκος του δοκιμίου δημιουργείται ένα αρχικό στάδιο παραμόρφωσης. Αυτό συμβαίνει γιατί το υλικό θερμαίνεται πάνω από μία κρίσιμη θερμοκρασία, όπου αρχίζει η ανάδευση και η ροή του υλικού. Το υλικό στο στάδιο αυτό πιέζεται προς τα πάνω καθώς το εργαλείο εισέρχεται στο δοκίμιο και ταυτόχρονα εξωθείται προς τα έξω. Ένα μέρος του υλικού παραμένει στη ζώνη στροβιλισμού κάτω από την κεφαλή. Στην περιοχή όπου το υλικό εξωθείται λόγω της πίεσης που του ασκείται από το εργαλείο, κινείται από το μπροστινό μέρος της κεφαλής προς το πίσω. Μια κρίσιμη ισόθερμη μεταβολή στο δεξιό και αριστερό μέρος της κεφαλής οριοθετεί το μέγεθος που θα έχει η ζώνη ανάδευσης του υλικού, καθώς η πίεση και η θερμότητα που αναπτύσσονται στην περιοχή αυτή θα οδηγήσουν στην ανάδευση του υλικού.

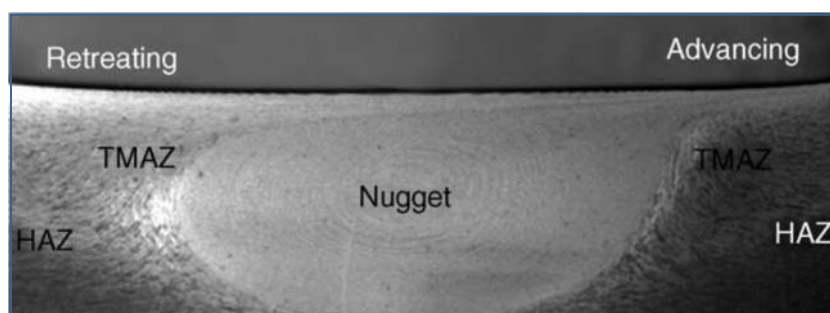
Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν τη ζώνη ανάδευσης του υλικού:

- Η γεωμετρία του εργαλείου (σχεδιασμός κεφαλής και περιαιχηνίου και η σχέση μεγέθους μεταξύ τους).
- Παράμετροι συγκόλλησης (φορά και διεύθυνση κίνησης του εργαλείου- δεξιόστροφη, αριστερόστροφη- ταχύτητα περιστροφής και πρόωσης, βάθος διείσδυσης κεφαλής, κλίση κεφαλής).
- Το είδος του υλικού.
- Η θερμοκρασία του δοκιμίου.

2.10 ΜΙΚΡΟΔΟΜΗ

Η έντονη πλαστική παραμόρφωση και η υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη διαδικασία της μεθόδου, συμβάλλουν στην ανακρυστάλλωση και δημιουργία της αναδευμένης περιοχής. Σύμφωνα με τη χαρακτηριστική μικροδομή των κόκκων δημιουργούνται πλήρως διαχωρισμένες μεταξύ τους : η ζώνη προώθησης, η ζώνη υποχώρησης, η ζώνη επιφάνειας του εργαλείου και η ζώνη επιφάνειας υποστήριξης. Με βάση την επίδραση της θερμικής ενέργειας, της μηχανικής ενέργειας ή το συνδυασμό αυτών κατά την εφαρμογή της μεθόδου, μπορούν να χαρακτηριστούν οι εξής διαφορετικές ζώνες:

- Η ζώνη ανάδευσης (nugget zone).
- Η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (Thermomechanical Affected Zone, TMAZ).
- Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (Heat Affected Zone, HAZ).

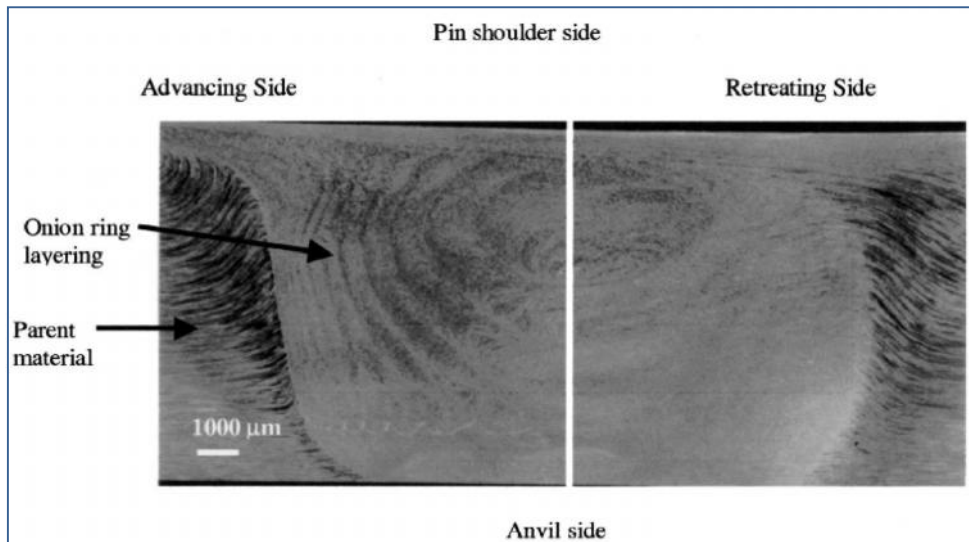


Εικόνα 2.11 : Απεικόνιση στο μικροσκόπιο των ζωνών που δημιουργούνται κατά τη συγκόλληση.

Η μικροδομή αλλάζει σε κάθε ζώνη και αυτό έχει άμεσα αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Γι' αυτό και το μεγαλύτερο μέρος των επιστημόνων εστίασαν την προσοχή τους στη μικροδομή των ζωνών αυτών.

2.10.1 ΖΩΝΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗΣ

Η πλαστική παραμόρφωση και η θερμότητα λόγω τριβής που αναπτύσσεται, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ανακρυστάλλωσης των κόκκων στην περιοχή της ανάδευσης. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη ανάδευσης (nugget zone- weld nugget).

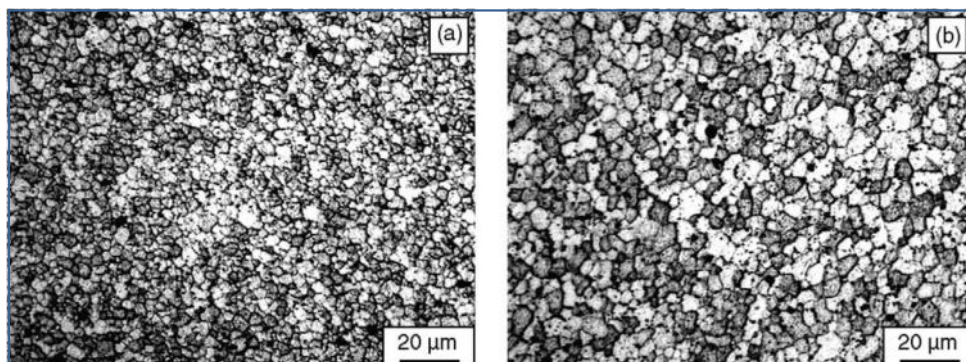


Εικόνα 2.12 : Χαρακτηριστικά onion rings της nugget zone.

Η διεπιφάνεια της ανακρυσταλλωμένης nugget zone και του βασικού μετάλλου διαχέεται ομοιόμορφα στην υποχωρούσα πλευρά, ενώ αντίθετα στην προωθούμενη πλευρά είναι λιγότερο ομογενοποιημένη.

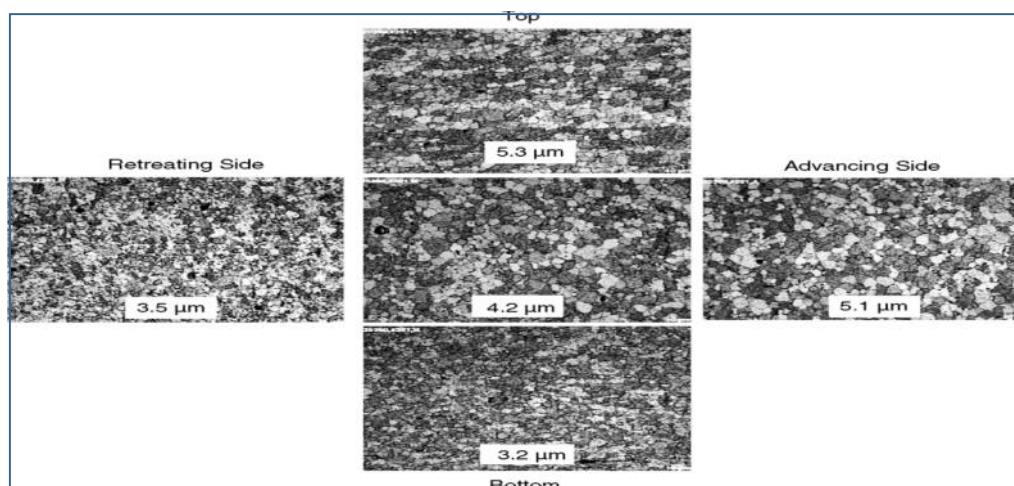
Ανάλογα με τις παραμέτρους, γεωμετρία εργαλείου, θερμοκρασία και θερμική αγωγιμότητα του μετάλλου, η ζώνη ανάδευσης μπορεί να πάρει τελικά δυο σχήματα. Είτε το βασικό, το οποίο πλαταίνει προς το επάνω μέρος του, είτε αυτό της ελλειπτικής μορφής.

Έχει παρατηρηθεί, ότι οι ταχύτητες περιστροφής από 300 έως 500 rpm διαμορφώνουν τη βασική μορφή, ενώ την ελλειπτική μορφή ταχύτητες άνω των 700 rpm. Παρατηρείται ότι, διατηρώντας την ίδια κεφαλή, το σχήμα της ζώνης ανάδευσης αλλάζει με τη μεταβολή της ταχύτητας. Καθοριστικό ρόλο στη μορφή που θα έχει τελικά η ζώνη ανάδευσης παίζει και η διάμετρος της κεφαλής. Όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος τόσο και πιο κυκλικό το σχήμα της.



Εικόνα 2.13 : Η επίδραση της ταχύτητας στην μικροδομή της nugget zone
 α) Ταχύτητα περιστροφής 350rpm, β) Ταχύτητα περιστροφής 650rpm.

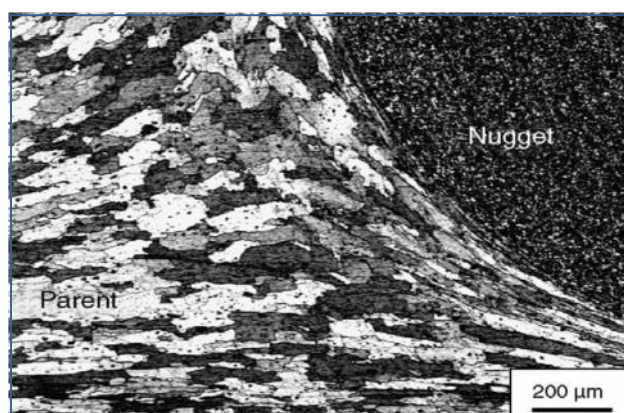
Η ανακρυστάλλωση που συντελείται κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FSW στη ζώνη ανάδευσης δημιουργεί λεπτόκοκκη μικροδομή. Παράμετροι όπως η γεωμετρία του εργαλείου, η σύσταση του δοκιμίου, η θερμοκρασία του, η πίεση που ασκεί το εργαλείο κατά τη διείσδυση, το πόσο γρήγορα το δοκίμιο θα ψυχθεί, επηρεάζουν άμεσα τη μικροδομή που θα έχει το υλικό μετά τη συγκόλληση.



Εικόνα 2.14 : Το μέγεθος των κόκκων στην nugget zone σε διάφορα σημεία.

2.10.2 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

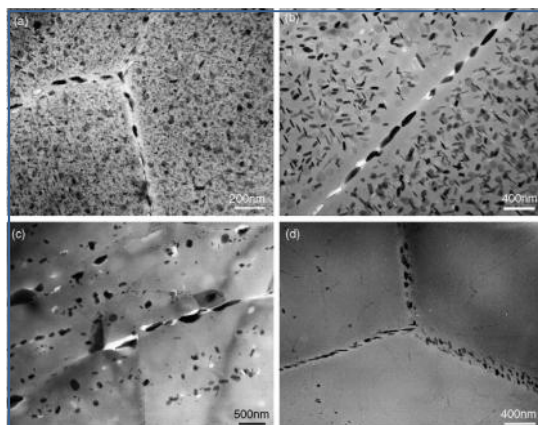
Ανάμεσα στο βασικό μέταλλο και τη ζώνη ανάδευσης αναπτύσσεται η θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΜΕΖ). Είναι απόρροια τόσο της θερμότητας που αναπτύσσεται, όσο και της παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό. Παρατηρείται έντονη παραμόρφωση. Οι κόκκοι του βασικού μετάλλου επιμηκύνονται από τη μια άκρη του δοκιμίου μέχρι και την nugget zone, έως και την άλλη άκρη του. Παρόλο που η ΘΜΕΖ υπόκειται σε πλαστική παραμόρφωση, η μικροδομή της δεν υφίσταται ανακρυστάλλωση.



Εικόνα 2.15 : Η μικροδομή της Θερμομηχανικά Επηρεασμένης Ζώνης Al7075.

2.10.3 ΘΕΡΜΙΚΑ ΕΠΗΡΕΑΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ

Πέρα από τη ΘΜΕΖ δημιουργείται η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ). Στη ζώνη αυτή λαμβάνουν χώρα θερμικοί κύκλοι, που όμως, δεν οδηγούν σε ανακρυστάλλωση των κόκκων ούτε και σε παραμόρφωση του υλικού. Το μέγεθος των κόκκων είναι μικρότερο από αυτό της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης.



Εικόνα 2.16 : Η μικροδομή στα όρια των ζωνών συγκόλλησης, Al7075 α) Βασικό μέταλλο, β) Θερμικά επηρεασμένη ζώνη, γ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη, κοντά στην θερμικά επηρεασμένη ζώνη, δ) Θερμομηχανικά επηρεασμένη ζώνη κοντά στον πυρήνα συγκόλλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ^[1,4,13]

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε επίπεδο επιστημονικής έρευνας, ανάκτηση τεχνολογίας και πρόληψης, προκειμένου να ελέγξουμε ένα υλικό ή να προσδιορίσουμε μηχανικές και φυσικές του ιδιότητες, έχουμε τη δυνατότητα χρήσης δυο μεθόδων: τις καταστροφικές και τις μη καταστροφικές.

Με τις καταστροφικές μεθόδους, μπορούμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των υλικών, να δημιουργήσουμε τύπους ερμηνείας αυτής της συμπεριφοράς και να βρούμε τις μέγιστες καταπονήσεις, πέρα από τις οποίες το υλικό μπαίνει σε στάδιο αστοχίας. Οι μέθοδοι αυτές, όμως, προϋποθέτουν την κατασκευή ενός αριθμού δοκιμίων με καθορισμένες διαστάσεις, όπως ορίζουν οι τηρούμενες προδιαγραφές και την καταστροφή, στη συνέχεια, των δοκιμίων, για την ανάλυση και τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων.

Η ανάγκη, όμως, να ελέγχονται κατασκευές και μηχανικά μέρη ώστε να εντοπίζεται έγκαιρα η ύπαρξη ή η δημιουργία απρόβλεπτων ανωμαλιών που μπορεί να προκαλέσουν την αστοχία αυτών αλλά και η αναγκαιότητα να προσδιορίζονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες ορισμένων υλικών, ενώ αυτά βρίσκονται σε λειτουργία, οδήγησε στην ανάπτυξη των μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου των υλικών (Non Destructive Testing, NDT, ΜΚΕ). Δηλαδή οι μέθοδοι ΜΚΕ είναι η διαδικασία που απαιτείται για τη διεύρυνση της ποιότητας, των ιδιοτήτων και διαστάσεων, την ανίχνευση ελαττωμάτων των υλικών και των μηχανικών εξαρτημάτων, χωρίς να προκαλείται καταστροφή ή ανεπανόρθωτη βλάβη με αδυναμία περαιτέρω ελέγχου.

Με αυτές τις τεχνικές χωρίς πρόσθετη καταπόνηση μπορούμε:

- Να εντοπίσουμε έγκαιρα την ύπαρξη επικίνδυνων σημείων, δηλαδή σημεία συγκέντρωσης τάσεων, όπως μικρορωγμές, ασυνέχειες, διαβρώσεις και ελαττώματα.

Να προσδιοριστούν μηχανικές, χημικές, γεωμετρικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών.

- Ακόμα, σε περιπτώσεις που το προς έλεγχο υλικό, δεν επαρκεί για την κατασκευή τυποποιημένων δοκιμίων, όπως προβλέπεται από τις προδιαγραφές με τις γνωστές συμβατικές μεθόδους, χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι ΜΚΕ. Επιπλέον, εξασφαλίζουν τον ποιοτικό έλεγχο και τη συντήρηση κατασκευών, που απαιτούν υψηλά επίπεδα ασφάλειας σε καθημερινή χρήση.

3.2 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΚΕ

Οι μέθοδοι ΜΚΕ των υλικών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα μπορεί να χωριστούν σε δυο κύριες κατηγορίες: στις βασικές μεθόδους, που εφαρμόζονται ευρύτατα στον έλεγχο των υλικών και στις υπόλοιπες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν:

- Η οπτική μέθοδος.
- Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών.
- Η βιομηχανική ακτινογραφία.
- Η μέθοδος των υπερήχων.
- Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων.
- Η μέθοδος των δινορρευμάτων.
- Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής
- Η μέθοδος της θερμογραφίας.

Στη δεύτερη κατηγορία, ανήκουν η μέθοδος της ξηροακτινογραφίας, η μέθοδος ψαθυρών επικαλύψεων, η μέθοδος της διαρροής ρευστών, κλπ.

3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

3.3.1 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Άμεση εφαρμογή στη διαδικασία παραγωγής χωρίς κατεστραμμένα εξαρτήματα (scrap), εκτός από αυτά που βρίσκονται ελαττωματικά.
2. Εφαρμόζονται στο 100% της παραγωγής ή σε δείγμα.
3. Προσαρμόζονται εύκολα.
4. Διάφοροι έλεγχοι μπορεί να διεξάγονται ταυτόχρονα ή εν σειρά.
5. Δυνατότητα επανάληψης.
6. Αυτοφερόμενα- φορητά μηχανήματα ελέγχου.
7. Εφαρμόζονται σε εξαρτήματα και κατασκευές που βρίσκονται σε λειτουργία.
8. Μέτρηση συσσώρευσης ελαττωμάτων σε υλικά σε χρήση.
9. Εργατικό κόστος χαμηλό σε εφαρμογές επαναληπτικού χαρακτήρα.
10. Εξακρίβωση μηχανισμού κόπωσης.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού.
2. Χωρίς τη χρήση δείγματος η ανάλυση των αποτελεσμάτων υπόκειται σε υποκειμενική ερμηνεία από τον τεχνικό.
3. Λήψη μέτρων ακτινοπροστασίας.
4. Μερικές από τις μεθόδους απαιτούν υψηλό κόστος επενδύσεων σε ειδικά μηχανήματα.

3.3.2 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Μετρήσεις ποσοτικές με αποτελέσματα χρήσιμα στη βελτίωση του προϊόντος.
2. Επιτρέπουν την αντικειμενική ανάλυση του αποτελέσματος, χωρίς διαφωνία μεταξύ των παρατηρητών.
3. Αμεσότητα μετρήσεων και ελέγχου.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

1. Εφαρμόζονται σε μικρό δείγμα. Ανάγκη εξακρίβωσης αντιπροσωπευτικότητας δείγματος επί του συνόλου.
2. Χρησιμοποιηθέντα εξαρτήματα είναι άχρηστα.
3. Δυσχερής η επαναληπτικότητα.
4. Μεγάλα δείγματα ελέγχου δε συναντώνται, λόγω υψηλού κόστους.
5. Απαγορευτική η χρήση σε υλικά υψηλού κόστους κατασκευής ή υλικά με μικρή σειρά παραγωγής.
6. Αδύνατη η μέτρηση συσσώρευσης ελαττωμάτων σε υλικά σε χρήση.
7. Δύσκολη η εφαρμογή σε χρησιμοποιούμενα εξαρτήματα γιατί ο καταστροφικός έλεγχος θέτει αυτόματα την ακρήστευσή τους.
8. Σημαντική ανάγκη μηχανικής κατεργασίας ή προετοιμασίας του δείγματος.
9. Οι επενδύσεις κεφαλαίων και το κόστος των εργατικών που απαιτούνται είναι συνήθως υψηλό.

3.4 ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.4.1 ΟΠΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η οπτική μέθοδος (visualtesting, VT) είναι η πιο απλή μέθοδος ΜΚΕ ενός υλικού, που πραγματοποιείται για τον εντοπισμό επιφανειακών ελαττωμάτων είτε με γυμνό μάτι είτε με τη χρήση οργάνων, όπως οπτικές ίνες ή μικροσκόπιο. Μια απλή οπτική εξέταση μπορεί να αποκαλύψει ατέλειες και έτσι να οδηγήσει σε μια άμεση απόρριψη του δοκιμίου και επομένως να κερδηθεί χρόνος και χρήμα από περιττές δοκιμές.

Δυο είναι οι κατηγορίες οπτικών μεθόδων ελέγχου:

- Αυτές που χρησιμοποιούν όργανα, όπως μικροσκόπια, τηλεσκόπια και προβολείς, τα οποία εφαρμόζουν τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής, σύμφωνα με την οποία οι φωτεινές ακτίνες διαδίδονται ευθύγραμμα.
- Αυτές όπου γίνεται χρήση της φυσικής οπτικής, λαμβάνοντας υπόψη την κυματική φύση του φωτός, όπως συμβαίνει με τη συμβολή του φωτός στη φωτοελαστικότητα, την ολογραφία και τις καυστικές.



Εικόνα 3.1 : Οπτική μέθοδος.

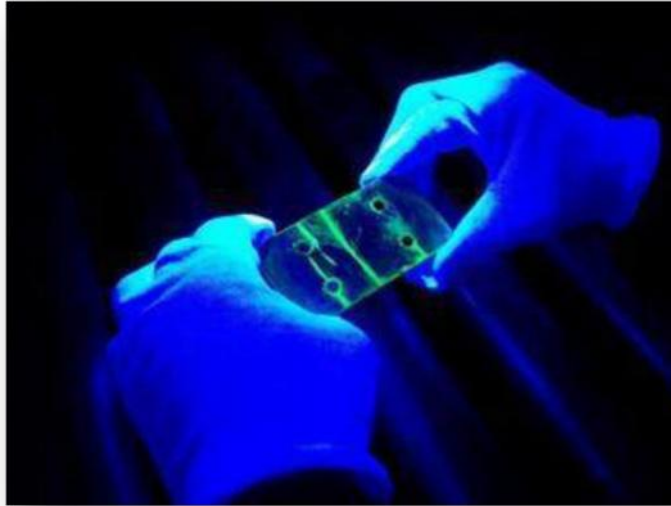
Τέλος, θα πρέπει πριν από τον οπτικό έλεγχο οι επιφάνειες να προετοιμάζονται, απομακρύνοντας ακαθαρσίες, γράσα, σκουριές και άλλα υλικά διάβρωσης.

3.4.2 ΔΙΕΙΣΔΥΤΙΚΑ ΥΓΡΑ

Αποτελεί εξέλιξη της οπτικής μεθόδου. Στα πλεονεκτήματά της είναι η ταχύτητα, η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων επιφανειών, καθώς και το χαμηλό κόστος αγοράς και λειτουργίας του εξοπλισμού. Με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών (Penetrant Liquid Testing, PT), ανιχνεύονται επιφανειακές ρωγμές και άλλες ατέλειες, οι οποίες δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι. Οι διαστάσεις αυτών των ρωγμών για να είναι ανιχνεύσιμες πρέπει να είναι πλάτους 0,001 mm, μήκους 1 cm και βάθους 0,1 mm. Εφαρμόζεται ευρύτατα σε φερριτικά και μη υλικά, σε ανοξείδωτους χάλυβες, ελαφρά κράματα κ.ά.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

Η επιφάνεια που θέλουμε να ελέγξουμε, ψεκάζεται με χρωματιστό διάλυμα το οποίο διεισδύει και εμποτίζει τις τυχόν ρωγμές που καταλήγουν στην επιφάνεια. Πλένοντας την επιφάνεια και στη συνέχεια με τη χρήση του κατάλληλου υγρού ή στερεού εμφανιστή, σύμφωνα με το τριχοειδές φαινόμενο, το διάλυμα, που έχει παραμείνει στις ρωγμές, και τα διάφορα ελαττώματα, γίνεται αντιληπτό. Οι ατέλειες τότε φαίνονται σα χρωματιστές γραμμές, χρώματος ανάλογου του χρησιμοποιούμενου υγρού, σε λευκό φόντο. Στη διαδικασία εφαρμογής τους, μπορεί να προστεθεί ένα ακόμα στάδιο, αυτό της γαλάκτωσης της επιφάνειας μετά το πλύσιμό της και πριν την επικάλυψη με τον εμφανιστή (συνήθως χρησιμοποιούνται φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά και η επιθεώρηση γίνεται σε υπεριώδες φωτισμό).



Εικόνα 3.2 : Ανίχνευση ατελειών με τη μέθοδο των διεισδυτικών υγρών.

3.4.3 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΓΡΑΦΙΑ

Με τη μέθοδο της ακτινογραφίας (Radiographic Testing, RT) ελέγχονται υλικά με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως οι ακτίνες X ή πυρηνικής ακτινοβολίας, όπως είναι τα σωμάτια α , β και οι ακτίνες γ . Εφαρμόζεται για να απεικονιστούν εσωτερικές και εξωτερικές λεπτομέρειες της δομής εξαρτημάτων σε πληθώρα υλικών. Πρόκειται για μέθοδο που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εφαρμογή άλλης τεχνικής. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με την προσβολή του ελεγχόμενου τμήματος σε ακτινοβολία και καταγραφή της εικόνας σε φιλμ ακτινογραφίας. Το επεξεργασμένο φιλμ παρουσιάζει τις δομικές λεπτομέρειές του, καθώς μεταβάλλεται η πυκνότητα του φιλμ.

Η επιφάνεια στην οποία πρόκειται να διεξαχθεί ο έλεγχος, θα πρέπει να είναι καθαρή, η διεύθυνση σάρωσης της κεντρικής δέσμης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν κάθετη προς το φιλμ, η απόσταση από την πηγή ακτίνων X ως το φιλμ (απόσταση εστίασης) θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, κ.ά.

Τέλος, η ακτινογραφία έχει το πλεονέκτημα ότι με το φιλμ δίνει ένα μόνιμο τεκμήριο της κατάστασης του υλικού. Η εφαρμογή της όμως, απαιτεί ειδικά μέτρα προστασίας των εργαζομένων, λόγω των επιβλαβών συνεπειών της στον ανθρώπινο οργανισμό.



Εικόνα 3.3 : Έλεγχος γραμμής σωλήνων (pipeline), με τη μέθοδο της ραδιογραφίας.

3.4.4 ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Η μέθοδος υπερήχων (Ultrasonic Testing, UT) θεωρείται η σημαντικότερη μέθοδος ΜΚΕ, έχοντας ευρύτερες εφαρμογές συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Αυτό συμβαίνει διότι είναι απλή, σχετικά γρήγορη, εφαρμόζεται σε πολλά υλικά και μπορεί να εντοπίσει επιφανειακές αλλά και εσωτερικές ασυνέχειες του υλικού.

Είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη μέτρηση πάχους κατασκευών μεγάλων διαστάσεων, όπως σε πλοία, σωλήνες, λέβητες, αντιδραστήρες κλπ. Χρησιμοποιείται ακόμη για τον έλεγχο και τον προσδιορισμό της ποιότητας των συγκολλήσεων και επιπλέον αποτελεί μία μη συμβατική μέθοδο κατεργασίας αφαίρεσης και κοπής μετάλλων.

Τέλος μπορούμε να προσδιορίσουμε και ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών όπως για παράδειγμα, το μέτρο ελαστικότητας E , το μέτρο διάτμησης G , αντοχή σ κ.ά. Εκτενέστερη ανάλυση για τη μέθοδο των υπερήχων ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 3.4 : Έλεγχος με υπερήχους σε pipeline.

3.4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η τεχνική των μαγνητικών σωματιδίων (Magnetic Particle Testing, MT) χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και κατά προσέγγιση προσδιορισμό επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ευρισκόμενων ρωγμών σε μαγνητικά υλικά, οι οποίες δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι. Η μέθοδος αυτή δε μπορεί να εφαρμοστεί σε μη μαγνητικά υλικά, όπως το γυαλί, το αλουμίνιο, ο χαλκός κ.ά.

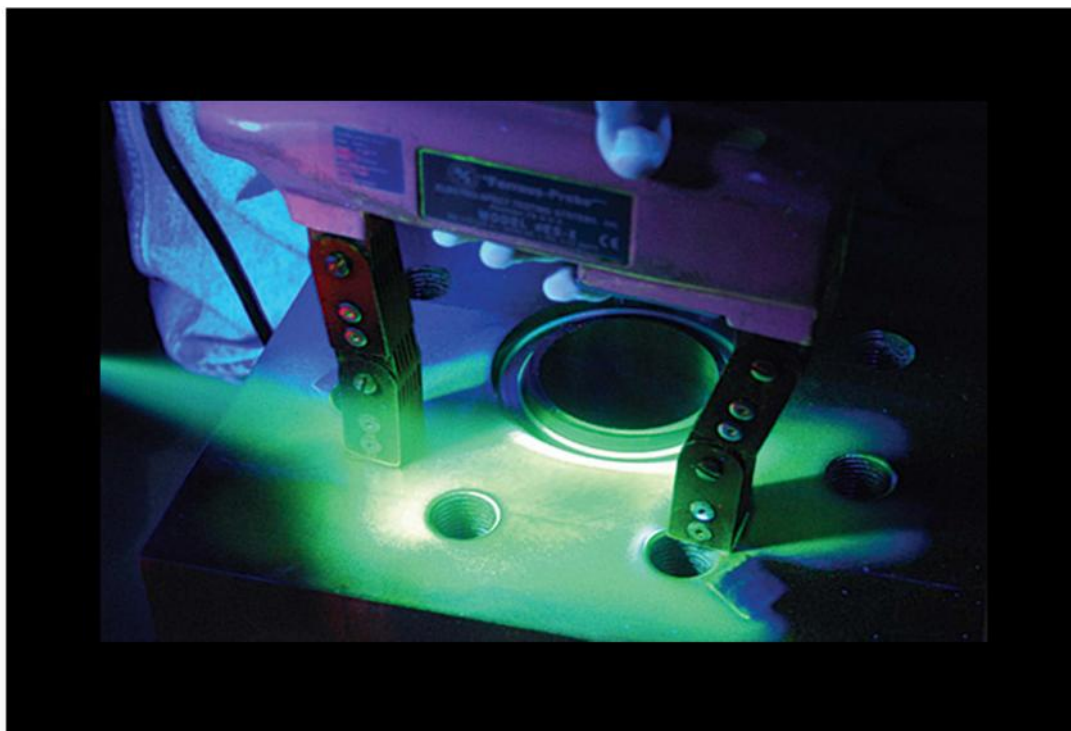
Η διαδικασία ελέγχου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Εισάγεται το εξεταζόμενο δοκίμιο στο κατάλληλο μαγνητικό πεδίο.
- Εφαρμόζονται τα μαγνητικά σωματίδια υπό μορφή σκόνης ή επάλειψης με κατάλληλο υγρό (μελάνι).
- Εξετάζεται το δοκίμιο σε συνθήκες κατάλληλου φωτισμού (ειδικές λυχνίες), ερμηνεύοντας και υπολογίζοντας τις πιθανές ενδείξεις.

Η μέθοδος στηρίζεται στην ιδιότητα κατά την οποία η μαγνητική ροή σε ένα μαγνητιζόμενο υλικό διαταράσσεται τοπικά από την παρουσία ατελειών. Αυτή η διαταραχή αναγκάζει τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές να «βγαίνουν» από το

αντικείμενο και να επανεισέρχεται σε αυτό. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διαρροή μαγνητικής ροής.

Η παρουσία αστοχίας του υλικού γίνεται ορατή από την απότομη αλλοίωση των χαρακτηριστικών γραμμών, που σχηματίζουν πάνω στο αντικείμενο τα μικροσκοπικά σωματίδια της φερομαγνητικής σκόνης. Για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου, πρέπει η διεύθυνση του αναπτυσσόμενου μαγνητικού πεδίου να είναι κάθετη προς τη διεύθυνση των ρωγμών.



Εικόνα 3.5 : Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων.

3.4.6 ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ

Η μέθοδος των δινορρευμάτων (Eddy Current Testing, ET) ή επαγωγικών ρευμάτων είναι μια σημαντική και ευρύτατα διαδεδομένη μη καταστροφική μέθοδος υπολογισμού και ελέγχου μεταλλικών υλικών (ηλεκτρικά αγωγίμων). Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων και διαστάσεων των υλικών, καθώς και για τον εντοπισμό επιφανειακών ή κοντά στην επιφάνεια ασυνεχειών.

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



Εικόνα 3.6 : Μέθοδος των δινορρευμάτων.

Τέλος, η επιφάνεια που πρόκειται να ελεγχθεί πρέπει να είναι προσβάσιμη από τον αισθητήρα- κεφαλή. Βέβαια, έχουν κατασκευαστεί ειδικοί αισθητήρες ακόμα και για ελέγχους σε οπές ή σπειρώματα περικοχλίων με εγκατεστημένους τους κοχλίες. Οι μετρούμενες μεταβολές των δινορρευμάτων συναρτώνται μόνο των ακολούθων χαρακτηριστικών:

- Ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- Μαγνητική διαπερατότητα.
- Γεωμετρικές ιδιότητες του εξεταζόμενου αντικειμένου.
- Απόσταση της κεφαλής από την επιφάνεια του υλικού.

3.4.7 ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

Η μέθοδος ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emission Testing, AT) είναι η τεχνική κατά την οποία ανιχνεύονται και αναλύονται τα ηχητικά σήματα, τα οποία παράγονται από την ταχεία αποδεσμευμένη ενέργεια παραμορφώσεων που εμφανίζονται μέσα σε υλικά κατά τη δημιουργία και επέκταση ρωγμών. Συνεπώς, κατά τη μέθοδο της ακουστικής εκπομπής το σήμα προέρχεται από το ίδιο το υλικό και όχι από εξωτερική πηγή. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη προϋπόθεση η εφαρμογή φορτίου ελέγχου, που όμως να μη ξεπερνά τα φορτία σχεδιασμού της κατασκευής.

Η ακουστική εκπομπή περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη δημιουργία και μετάδοση των ελαστικών κυμάτων που παράγονται μέσα σε ένα υλικό

με απότομη απελευθέρωση ενέργειας. Η πηγή αυτή των κυμάτων μπορεί να είναι τοπική μετατόπιση που συνοδεύει την πλαστική παραμόρφωση, ή η έναρξη και διάδοση αστοχίας στο υλικό.

Η τεχνική της ακουστικής εκπομπής είναι ιδιαίτερα σημαντική για ελέγχους που απαιτούνται να διεξαχθούν σε κατασκευές υψηλού κινδύνου όπως αεροπλάνα, δεξαμενές, δοχεία υγρών καυσίμων κ.ά.



Εικόνα 3.7 : Έλεγχος με ακουστική εκπομπή σε γέφυρα.

3.4.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

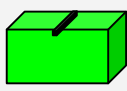
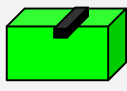
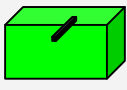
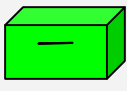
Σύμφωνα με το νόμο της ακτινοβολίας μέλανος σώματος του Planck, κάθε σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, της οποίας το φάσμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Στην εν λόγω μέθοδο μελετάται η εκπεμπόμενη υπέρυθη ακτινοβολία από ένα υλικό μέσω κατάλληλων συσκευών (θερμοηλεκτρική μηχανή φωτογράφισης, πυροηλεκτρική συσκευή vidicon). Καταγράφονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας ενός υλικού από μακριά και από τη μελέτη των λαμβανόμενων εικόνων (θερμογραφήματα ή υπερυθρογραφήματα) προκύπτουν πληροφορίες για την ύπαρξη ατελειών ή σημείων συγκέντρωσης τάσεων στο σώμα.

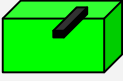
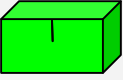




Εικόνα 3.8 : Η μέθοδος της θερμογραφίας.

Τέλος, παρατίθεται ένας πίνακας αξιολόγησης, που περιλαμβάνει όλες τις μη καταστροφικές μεθόδους.

Πίνακας 3.1 : Μη καταστροφικές μέθοδοι και η ικανότητα τους στην ανίχνευση ατελειών-βλαβών.

Είδος ατέλειας-βλάβης	Οπτική επιθεώρηση	Διεισδυτικά υγρά	Υπέρηχοι		Μαγνητικά σωματίδια	Eddy current	X-Ray
			Straight beam	Angle beam			
Επιφανειακές δύο διαστάσεων. 	1	3	1	2	3	3	1
Επιφανειακές τριών διαστάσεων. 	3	3	3	3	3	3	3
Κοντά στην επιφάνεια δύο διαστάσεων. 	0	0	1	2	2	3	1
Δύο διαστάσεων κοντά στην επιφάνεια και παράλληλες 	0	0	3	3	0	0	0

προς αυτή.							
Κοντ ά στην  επιφάνεια τριών διαστάσεων.	0	0	3	3	2	3	3
Στο εσωτ ερικό  δύο διαστάσεων κάθετες στην επιφάνεια.	0	0	1	2	0	0	1
Στο εσωτ ερικό  δύο διαστάσεων παράλληλες στην επιφάνεια.	0	0	3	3	0	0	1
Στο εσωτ ερικό  τριών διαστάσεων.	0	0	3	3	0	0	3
<p>(0)= Δεν ανιχνεύει (1)=Δεν ενδείκνυται (2)=Ενδείκνυται (3)=Ιδανική για την εφαρμογή Επιφάνεια : αυτή που είναι κατάλληλη για να γίνει η εξέταση.</p>							

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ^[11,13]

4.1 ΗΧΟΙ- ΥΠΕΡΗΧΟΙ ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Ο έλεγχος των υλικών με τη βοήθεια του ήχου είναι μία από τις παλαιότερες μη καταστροφικές μεθόδους δοκιμής των αντικειμένων για την εύρεση σφαλμάτων σ' αυτά.

Είναι γνωστό ότι κεραμοποιοί και αγγειοπλάστες δοκιμάζουν τα προϊόντα τους χτυπώντας τα ελαφριά και ακούγοντας τον ήχο που παράγεται. Με τον ίδιο τρόπο ελέγχονται τα χυτά αντικείμενα, σωληνώσεις μεγάλου μήκους σε διυλιστήρια και γενικά σε βιομηχανίες για τυχόν ρήγματα ή διαβρώσεις. Οι ρωγμές και οι σχετικά μεγάλες φυσαλίδες σε χυτά αντικείμενα καθώς και σημαντική ελάττωση του πάχους των τοιχωμάτων των σωληνώσεων, λόγω διαβρώσεων, έχουν σαν αποτέλεσμα την αλλοίωση του ήχου που παράγουν όταν τα χτυπήσουμε με κάποιο σφυρί. Επειδή όμως η μέθοδος αυτή είναι πολύ πρωτόγονη και στηρίζεται εξ ολοκλήρου στην εμπειρική ακουστική ικανότητα του ελεγκτή, καθώς και στη γεωμετρική μορφή του αντικειμένου, γεννήθηκε η ανάγκη εύρεσης μιας ακριβέστερης και αξιόπιστης μεθόδου ελέγχου, πολύ πιο ευαίσθητης από αυτής του τεχνικού. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι όσο η συχνότητα που χρησιμοποιούταν ήταν υψηλότερη, τόσο οι διαστάσεις των ελαττωμάτων που μπορούσαν να ανιχνευτούν ήταν μικρότερες. Οι παρατηρήσεις αυτές οδήγησαν στη χρήση προοδευτικά υψηλότερων συχνοτήτων μέχρι, που έφτασαν στην περιοχή των υπερήχων, δηλαδή πέρα από την ακουστική ικανότητα που έχει το ανθρώπινο αυτί (20 kHz). Οι πρώτες απόπειρες παραγωγής υπερήχων έγιναν με διατάξεις ακροφυσίων πεπιεσμένου αέρα, καθώς και με υψίσυχνες ηλεκτρικές εκκενώσεις. Το 1915 ο Paul Langevin έδωσε την οριστική λύση στην παραγωγή και την ανίχνευση των υπερήχων κάνοντας χρήση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου που ανακαλύφθηκε από τους Pierre και Jacques Curie. Ήδη, από το 1929 ο Ρώσος Sokoloff είχε την ιδέα ανίχνευσης ελαττωμάτων σε μεταλλικές πλάκες προσβάλλοντάς τις με μία δέσμη υπερήχων και μετρώντας την ένταση που μεταδίδεται σε κάθε σημείο τους. Ακολούθως την σύγκρινε με αυτή που μεταδίδεται από μια περιοχή χωρίς ελαττώματα. Το 1942 ο Firestone είναι ο πρώτος που εφάρμοσε τη μέθοδο των υπερήχων για τη μέτρηση του πάχους μεταλλικών υλικών. Από τότε έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις στις συσκευές παραγωγής υπερήχων με αποτέλεσμα το ευρύ πεδίο εφαρμογών τους στο μη καταστροφικό έλεγχο υλικών, στη μεταλλουργία, στις υποβρύχιες τηλεπικοινωνίες, στην ιατρική, στη βιολογία και σε πολλούς άλλους τομείς.

4.1.1 ΗΧΟΙ- ΥΠΕΡΗΧΟΙ ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ήχος καλείται η περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα, η οποία μεταδίδεται ως κύμα, του οποίου η συχνότητα είναι ικανή να ερεθίζει το αισθητήριο της ακοής. Γενικά ως ήχοι χαρακτηρίζονται τα τασικά ελαστικά κύματα που, σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και οπτικά κύματα, απαιτείται για τη διάδοσή τους η ύπαρξη της ύλης (στερεά- υγρά- αέρια). Δε γίνονται αντιληπτά όλα τα ηχητικά

κύματα από το ανθρώπινο αυτί, αλλά μόνο μια κατηγορία από αυτά, που οι συχνότητές τους βρίσκονται στην περιοχή 16 Hz μέχρι 20 kHz.

Η επιστήμη που εξετάζει τα φαινόμενα σχετικά με τους ήχους είναι η ακουστική. Οι ήχοι διακρίνονται σε απλούς, όπου η μεταβολή της πίεσεως του αέρα είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου, και τους σύνθετους όπου η μεταβολή της πίεσεως είναι μεν περιοδική αλλά όχι αρμονική και οι οποίοι αναλύονται κατά Fourier σε πολλούς απλούς ήχους, των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.

Το φάσμα των μηχανικών ελαστικών κυμάτων περιλαμβάνει:

- Τους υπόηχους με συχνότητες $f < 16$ Hz
- Τους ακουστικούς ήχους με συχνότητες $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$
- Τους υπέρηχους με συχνότητες $20 \text{ kHz} < f < 20 \text{ MHz}$
- Τους υπερυπέρηχους $20 \text{ MHz} < f$.

Συνεπώς οι υπέρηχοι είναι μια κατευθυνόμενη δέσμη μηχανικών ελαστικών κυμάτων υψηλής συχνότητας. Υπέρηχους εκπέμπουν μερικά ζώα, τους οποίους χρησιμοποιούν για τον προσανατολισμό τους. Τέτοια ζώα είναι οι νυχτερίδες, τα δελφίνια κ.ά. Υπέρηχοι επίσης εκπέμπονται από διάφορα μηχανικά μέσα κατά τη λειτουργία τους, όπως είναι οι μηχανές ή κατά τη σφυρηλάτηση των μετάλλων.

Δύο βασικές κατηγορίες υπερήχων υπάρχουν, ανάλογα με την ισχύ και τα πεδία εφαρμογής τους. Οι υπέρηχοι μεγάλης ισχύος (1-100 W), οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως για τον καθορισμό της συγκόλλησης και τη θερμική κατεργασία των υλικών. Και οι υπέρηχοι μικρής ισχύος (1 mW-1 W), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην ιατρική, στα υπερηχομικροσκόπια, στα συστήματα σήμανσης μέτρησης και τηλεχειρισμών και τους μη καταστροφικούς ελέγχους των υλικών.

4.2 ΕΙΔΗ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

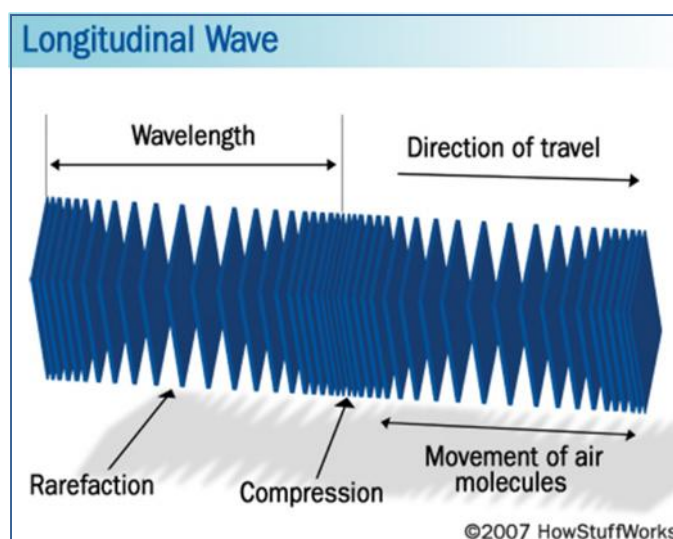
Η διάδοση των ηχητικών κυμάτων συμβαίνει σε δύο βασικές διευθύνσεις. Στη διεύθυνση της ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματίων του σώματος και στη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων. Επειδή ένα ηχητικό κύμα, δεν είναι τίποτε άλλο παρά η διάδοση των ταλαντώσεων των στοιχείων του ελαστικού σώματος, για τη διάδοσή του απαιτείται η παρουσία της ύλης. Έτσι στα υγρά και αέρια διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα, ενώ στα στερεά σώματα διαδίδονται όλα τα είδη των κυμάτων (διαμήκη, εγκάρσια, όπως και συνδυασμός αυτών). Τα στερεά υλικά έχουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα να επιτρέπουν τη διάδοση μεγάλης ποικιλίας τασικών κυμάτων, όπως είναι τα ελαστικά κύματα (elasticwaves), τα πλαστικά κύματα (plasticwaves) και τα κρουστικά κύματα (shockwaves).

Για εντάσεις τάσεων μικρότερες του ορίου διαρροής (ελαστική φόρτιση), η διάδοση των τασικών κυμάτων γίνεται με την ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων. Ενώ για εντάσεις τάσεων μεγαλύτερες του ορίου διαρροής, η διάδοση των κυμάτων γίνεται με την ταχύτητα των πλαστικών κυμάτων, που είναι λίγο μικρότερη από την ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων και η οποία μεταβάλλεται με την κράτυνση (strainhardening) του υλικού. Όμως για εντάσεις τάσεων υπερβολικά μεγαλύτερες των ορίων διαρροής, η διάδοση των τασικών κυμάτων γίνεται με μία μεταβλητή

ταχύτητα η οποία μπορεί να πλησιάζει ή και ακόμα να ξεπερνά την ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων. Τα τασικά ελαστικά κύματα διακρίνονται κύρια, σε διαμήκη και εγκάρσια.

4.2.2 ΔΙΑΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ

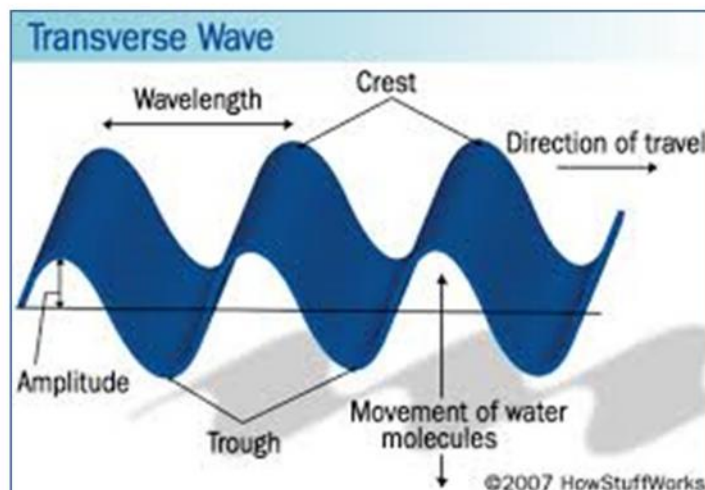
Στα διαμήκη κύματα η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματίων του σώματος και η διεύθυνση διάδοσης του κύματος συμπίπτουν (Εικόνα 4.1). Τέτοια κύματα είναι τα κύματα πίεσεως του αέρα. Τα διαμήκη κύματα καλούνται και κύματα πίεσεως. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται και στις τρεις μορφές της ύλης (στερεά-υγρή-αέρια) και είναι το βασικότερο είδος κυμάτων που χρησιμοποιεί η μη καταστροφική μέθοδος των υπερήχων. Παράγονται με διάφορους τρόπους, εύκολα και με απλό τρόπο με τη βοήθεια ειδικών κεφαλών (probes), διαμηκών κυμάτων.



Εικόνα 4.1 : Διαμήκη κύματα.

4.2.3 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΥΜΑΤΑ

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματίων του σώματος είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Εικόνα 4.2). Τα εγκάρσια κύματα παράγονται από ειδικές κεφαλές εγκαρσίων κυμάτων ή από διαμήκη κύματα εάν αξιοποιηθεί κατάλληλα το φαινόμενο της ανάκλασης ή διάθλασης που συμβαίνει όταν τα διαμήκη κύματα προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις, για αυτό καλούνται και κύματα διάτμησης. Δεν διαδίδονται δηλαδή στα υγρά και στα αέρια. Διαδίδονται όμως σε ορισμένα παχύρευστα υγρά που εμφανίζουν μεγάλη συνεκτικότητα όπως είναι το μέλι, πυκνό διάλυμα ζάχαρης κ.ά., γι'αυτό και σαν υλικά προσαρμογής, των κεφαλών υπερηχητικών εγκαρσίων κυμάτων, χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων και το μέλι ή διάλυμα ζάχαρης. Τα εγκάρσια κύματα εφαρμόζονται σε πολλές περιπτώσεις μη καταστροφικού ελέγχου των υλικών και είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών των υλικών με την NDT μέθοδο των υπερήχων.



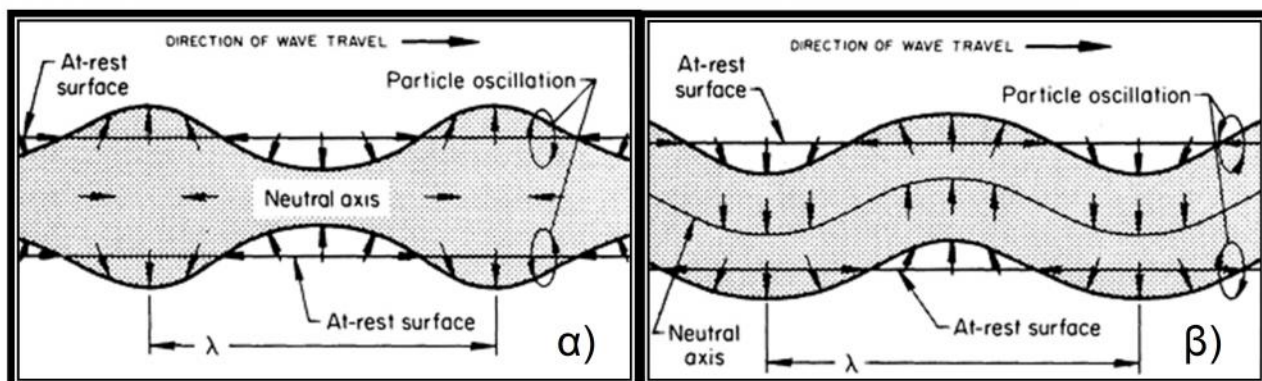
Εικόνα 4.2 : Εγκάρσια κύματα.

Πρέπει να τονισθεί ότι καθαρά διαμήκη και εγκάρσια κύματα σχηματίζονται σε ένα υλικό, μόνο εάν οι διαστάσεις του υλικού, οι κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου υπερηχητικού κύματος.

Εάν δεν πληρείται αυτή η συνθήκη, τότε παράγονται και άλλα είδη κυμάτων όπως είναι τα κύματα πλακών (platewaves) ή κύματα του Lamb (Lambwaves), τα οποία διακρίνονται στα διασταλτικά κύματα (dilatationalwaves) και στα καμπτικά κύματα (flexionalwaves), τα επιφανειακά κύματα (surfacewaves), τα κύματα στρέψεως (torsionwaves) κ.ά. Συνεπώς, εκτός των διαμηκών και εγκαρσίων κυμάτων, με κατάλληλο συνδυασμό τους παράγονται και τα ακόλουθα είδη ελαστικών κυμάτων.

4.2.4 ΚΥΜΑΤΑ ΠΛΑΚΩΝ Ή ΚΥΜΑΤΑ ΤΟΥ LAMB

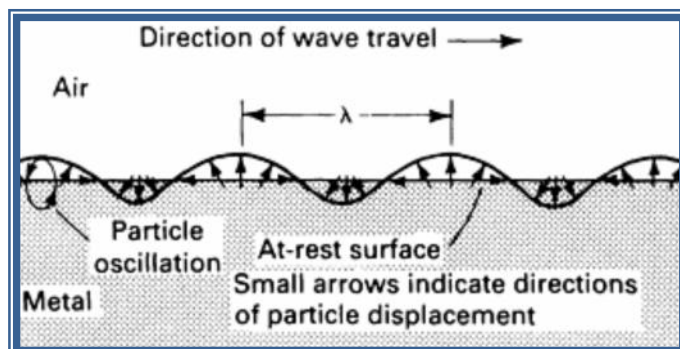
Στην περίπτωση λεπτών πλακών, τα διαδιδόμενα κατά διεύθυνση κάθετη προς το πάχος της πλάκας ελαστικά κύματα, διαδίδονται με έναν ιδιαίτερο τρόπο διαφορετικό από εκείνο που διαδίδονται τα ίδια κύματα (διαμήκη και εγκάρσια), μέσα σε σώματα μεγάλων διαστάσεων. Διακρίνουμε δύο τύπους κυμάτων πλακών, τα διασταλτικά κύματα και τα καμπτικά κύματα (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 : Κύματα του Lamb α) Διασταλτικά, β) Καμπτικά.

4.2.5 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ- RAYLEIGH

Τα επιφανειακά κύματα αναπτύσσονται μόνο στην επιφάνεια των σωμάτων και επεκτείνονται από την επιφάνεια μέσα στο σώμα, σε βάθος ίσο προς ένα περίπου μήκους κύματος (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4 : Επιφανειακά κύματα.

4.2.6 ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΡΕΨΕΩΣ

Τα κύματα στρέψεως αναπτύσσονται σε σώματα που έχουν μορφή ράβδου και εκτελούν στρεπτική ταλάντωση γύρω από τον επιμήκη άξονα της ράβδου. Η διεύθυνση διαδόσεως των κυμάτων στρέψεως, συμπίπτει με τη διεύθυνση του άξονα της ράβδου. Οι ταχύτητες διάδοσης των ηχητικών διαμηκών c_l εγκαρσίων c_t και επιφανειακών c_s κυμάτων, είναι σταθερές των υλικών και είναι ανεξάρτητες από τη συχνότητα του κύματος και τις διαστάσεις των υλικών.

Τέλος, όταν τα ηχητικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις ομοιόμορφα, ονομάζονται σφαιρικά κύματα, ενώ τα κύματα που διαδίδονται ομοιόμορφα προς τη μία μόνο κατεύθυνση ονομάζονται επίπεδα κύματα.

4.3. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΗΧΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ

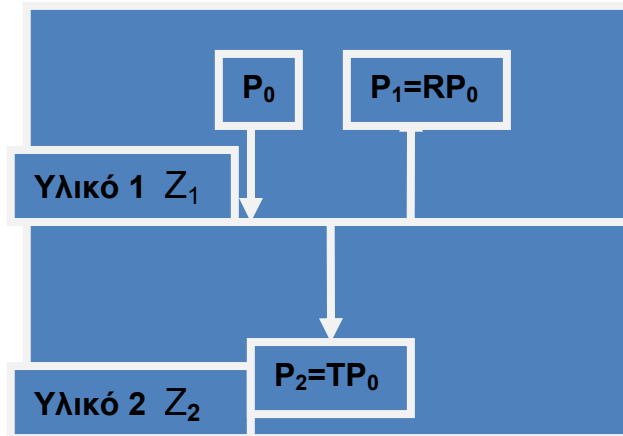
4.3.1 ΚΑΘΕΤΗ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ

Εάν ένα ηχητικό σήμα συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια δυο υλικών, τότε ένα μέρος της ηχητικής ενέργειάς του περνά στο άλλο υλικό, ενώ ένα άλλο μέρος ανακλάται σε αυτή (Εικόνα 4.5).

Το ποσοστό του ανακλώμενου και διερχόμενου κύματος, εξαρτάται από την ακουστική αντίσταση z των δύο υλικών. Η ακουστική αντίσταση ορίζεται ως:

$$z = \rho * c,$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού και c η ταχύτητα του ήχου σε αυτό.



Εικόνα 4.5 : Κάθετη πρόσπτωση κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών.

Εάν ένα ηχητικό κύμα περάσει σε ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1 , και συναντήσει κάθετα μια διαχωριστική επιφάνειά του με ένα άλλο υλικό ακουστικής αντίστασης Z_2 , τότε ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης R , από τη σχέση:

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

Επίσης ως συντελεστής διάθλασης: $T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$

Οι συντελεστές ανάκλασης R και διάθλασης T , δίνουν το ποσοστό της ηχητικής πίεσης που ανακλάται, ή εισχωρεί στο δεύτερο υλικό. Ο συντελεστής ανάκλασης R μπορεί να είναι θετικός ή αρνητικός, ενώ ο συντελεστής διάθλασης T μπορεί να είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος της μονάδας και εξαρτάται από τις τιμές των ακουστικών αντιστάσεων Z_1 και Z_2 .

Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ισχύει η συνέχεια της ηχητικής πίεσης που εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_0 + P_1 = P_2,$$

Όπου P_0 είναι η ακουστική πίεση του προσπίπτοντος κύματος, P_1 είναι ακουστική πίεση του ανακλώμενου κύματος και είναι ίση με RP_0 και $P_2 = TP_0$ είναι η ακουστική πίεση του διαθλώμενου κύματος. Έτσι σύμφωνα με τα προηγούμενα προκύπτει ότι:

$$P_0 + RP_0 = TP_0$$

$$1 + R = T.$$

Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δυο υλικών είναι ίσες ($Z_1 = Z_2$), τότε δεν υπάρχει ανάκλαση, δηλαδή ισχύει $R = 0$, ενώ όλος ο ήχος περνά ανεμπόδιστα μέσα από τη διαχωριστική επιφάνεια των δυο υλικών, δηλαδή τότε θα ισχύει $T = 1$.

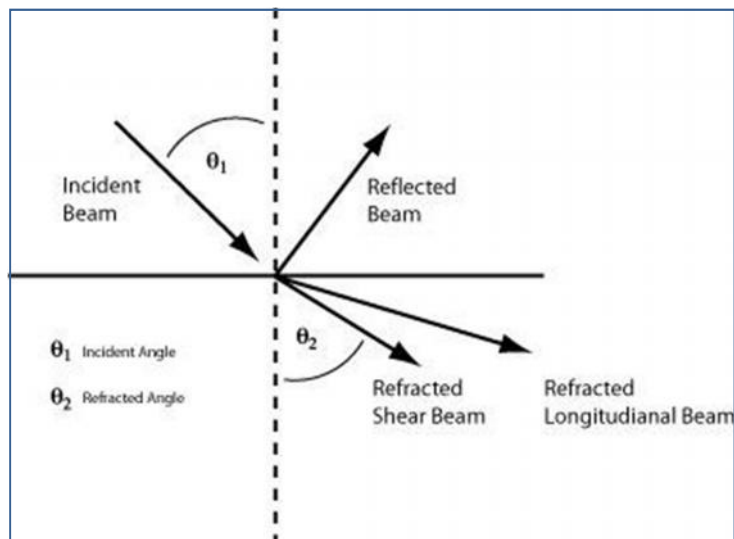
Έτσι προκύπτει ότι τα κύματα των υπερήχων κατά τη μετάβαση τους από το χάλυβα στον αέρα ανακλούν το 99,96% της ενέργειάς τους ενώ από χάλυβα σε Plexiglas το 68%, από αλουμίνιο στο νερό το 70% και τέλος από χαλαζία στο αλουμίνιο το 0.64% της ενέργειάς τους.

Επομένως θα πρέπει πριν από κάθε έλεγχο να ελέγχονται οι συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης (R, T), για να εξασφαλίζεται η διέλευση των υπερήχων στο ελεγχόμενο υλικό. Για καλύτερη ακουστική επαφή της κεφαλής των υπερήχων και του υλικού ή δύο υλικών παρεμβάλλεται, ανάλογα και με το είδος των κυμάτων (διαμήκη ή εγκάρσια), κατάλληλη ουσία όπως το λάδι μηχανής, το νερό ή διάφορες ειδικές πάστες. Έτσι, ενώ το παρεμβαλλόμενο λεπτό στρώμα της ξένης ουσίας μειώνει την ένταση του διερχόμενου υπερηχητικού κύματος, ταυτόχρονα όμως εξουδετερώνει το στρώμα αέρα που θα υπήρχε μεταξύ των δύο σωμάτων χωρίς την παρουσία της ουσίας και θα ανακλούσε σχεδόν το 100% της ενέργειας του υπερηχητικού κύματος.

4.3.2 ΠΛΑΓΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΥΛΙΚΩΝ

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών με γωνία πρόσπτωσης διάφορη των 0 μοιρών όπως συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, τότε συμβαίνουν πολύ διαφορετικά φαινόμενα. Στην περίπτωση αυτή, το ηχητικό κύμα ανακλάται και διαθλάται όπως στην κάθετη πρόσπτωση. Η διαφορά με την κάθετη πρόσπτωση είναι ότι στην πλάγια πρόσπτωση ηχητικού κύματος παρατηρείται μετατροπή ενός μέρους της ενέργειάς του σε άλλο είδος κύματος, τόσο στο ανακλώμενο όσο και στο διαθλώμενο μέρος του.

Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται η πρόσπτωση ενός διαμήκους κύματος, στη διαχωριστική επιφάνεια δυο υλικών, όπως και τα παραγόμενα ανακλώμενα και διαθλώμενα εγκάρσια και διαμήκη κύματα.

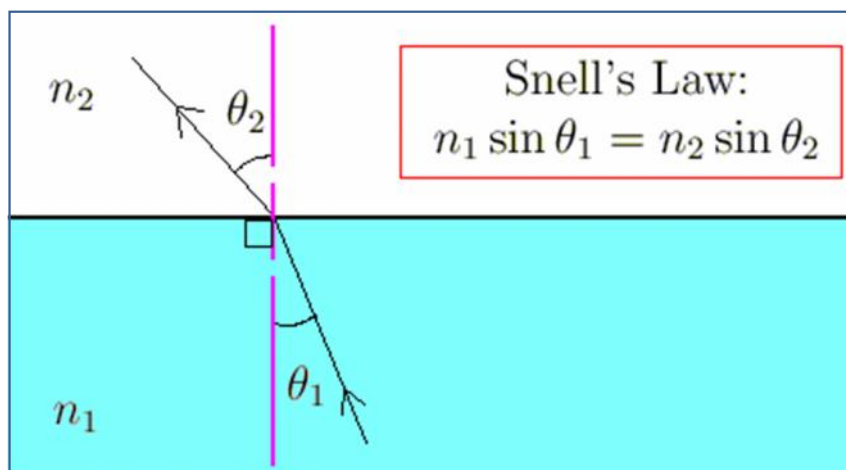


Εικόνα 4.6 : Διάγραμμα με όλα τα πιθανά είδη κυμάτων κατά την πρόσπτωση υπό γωνία θ_1 διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια.

Παρατηρείται ότι παράγονται 4 είδη κυμάτων, δύο από ανάκλαση και δύο από διάθλαση. Επίσης, τόσο στην ανάκλαση όσο και στη διάθλαση, παράγεται από ένα διαμήκες και ένα εγκάρσιο κύμα. Εννοείται ότι όταν το υλικό είναι υγρό ή αέριο τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται.

Οι διευθύνσεις όλων των κυμάτων, τόσο του προσπίπτοντος όσο και των ανακλώμενων και διαθλώμενων, καθορίζονται από τη γωνία που σχηματίζει κάθε ένα

από αυτά, με την κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών. Σε αυτή την περίπτωση πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων, ισχύουν οι ίδιοι φυσικοί νόμοι που ισχύουν και στην οπτική. Επίσης, όπως και στην οπτική, έτσι και στην περίπτωση πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων παραμένουν οι έννοιες διάθλαση ή ανάκλαση του κύματος με την ίδια σημασία. Ισχύει ο γνωστός από την οπτική, νόμος του Snell, ο οποίος παίρνει την παρακάτω μορφή (Εικόνα 4.7) σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα.



Εικόνα 4.7 : Ο νόμος του Snell.

Αυτή η σχέση ισχύει για κάθε είδους κύμα, εγκάρσιο ή διαμήκες, είτε πρόκειται για ανάκλασή του ή διάθλασή του.

4.4 Η ΔΕΣΜΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ: ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

4.4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Παραγωγή υπερήχων πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους, ωστόσο στον ΜΚΕ με υπερήχους κατά βάση η δέσμη των υπερήχων παράγεται αξιοποιώντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, δύναται να παραχθούν υπέρηχοι υψηλών συχνοτήτων. Οι αισθητήρες υπερήχων (ultrasonic transducers), αποτελούν το όργανο παραγωγής (πομπό) και πολλές φορές ταυτόχρονα, το αισθητήριο όργανο (δέκτη), των συστημάτων υπερήχων που χρησιμοποιούνται στον ΜΚΕ των υλικών. Συνεπώς, το ηχητικό πεδίο της δέσμης υπερήχων, όσον αναφορά στα γενικά του χαρακτηριστικά, συναρτάται από το είδος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται. Παρακάτω, περιγράφεται το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τα γεωμετρικά – ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ηχητικής δέσμης. Στόχος είναι η εισαγωγή του χειριστή διατάξεων ΜΚΕ με υπερήχους, στη μεθοδολογία επιλογής κατάλληλου εξοπλισμού κατά περίπτωση.

4.4.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΠΕΡΗΧΩΝ – ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μία βασική ιδιότητα ορισμένων φυσικών ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν καταπονούνται εμφανίζουν αντίθετα

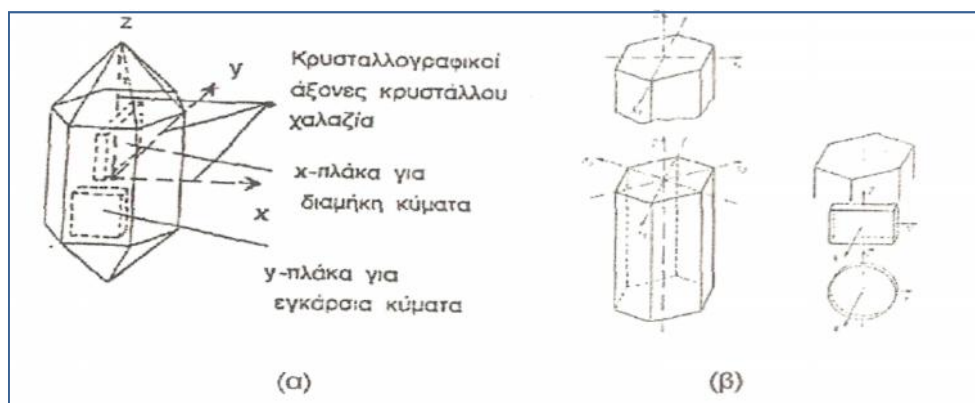
ηλεκτρικά φορτία στις απέναντι πλευρές τους. Για την κατανόηση του φαινομένου θεωρούμε τον κύβο από πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο της Εικόνας 4.8.

Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος καταπονείται εναλλάξ σε εφελκυσμό και θλίψη παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι επιφάνειές του. Έτσι, όταν ένα ακουστικό κύμα, στην περίπτωση μας υπερηχητικό, φτάσει σε έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τον υποβάλλει σε κατάσταση εναλλασσόμενου εφελκυσμού και θλίψης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να αναπτύσσεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δυναμικό, η πολικότητα του οποίου αλλάζει με τη συχνότητα του κύματος και η τάση του είναι ανάλογη της ακουστικής πίεσης. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τότε ο κρύσταλλος λειτουργεί ως δέκτης κυμάτων υπερήχων, μετατρέποντας τις μηχανικές ταλαντώσεις σε ηλεκτρική τάση (ηλεκτρικά σήματα).

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όμως, είναι αναστρέψιμο. Δηλαδή, εάν εφαρμόσουμε ένα ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι πλευρές ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, ο κρύσταλλος θα παραμορφωθεί εφελκυστικά ή θλιπτικά, ανάλογα με την πολικότητα του ηλεκτρικού δυναμικού. Εάν το δυναμικό αυτό είναι εναλλασσόμενο, τότε ο κρύσταλλος θα εφελκύεται ή θα θλίβεται με τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Εάν εμποδιστεί η αλλαγή των δύο διαστάσεων του κύβου, τότε με την τρίτη του διάσταση θα ασκεί θλιπτικές δυνάμεις στο μέσο (νερό, αέρας, μέταλλο), με το οποίο συνορεύει η τρίτη διάσταση και οι οποίες θα είναι ανάλογες με την τάση που εφαρμόζεται στον κύβο. Στην περίπτωση που η τάση είναι εναλλασσόμενη, προκαλούνται μεταβολές στην πίεση που ασκείται στο μέσο και έχουμε ως αποτέλεσμα την παραγωγή διαμήκων κυμάτων. Το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαμηκών υπερηχητικών κυμάτων.

Χρησιμοποιώντας τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους να λειτουργούν είτε με τον ευθύ είτε με τον ανάστροφο τρόπο, κατασκευάζονται οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές (transducers), οι οποίες είναι ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο ενός συστήματος υπερήχων. Σήμερα για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, τα οποία είναι πολυκρυσταλλικά σιδηροηλεκτρικά υλικά, με κρυσταλλική δομή πολύ κοντά στο κυβικό σύστημα. Τα υλικά αυτά έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους κρυστάλλους χαλαζία, καθώς είναι οικονομικότερα, κατασκευάζονται εύκολα και μπορούν να πάρουν οποιοδήποτε σχήμα.

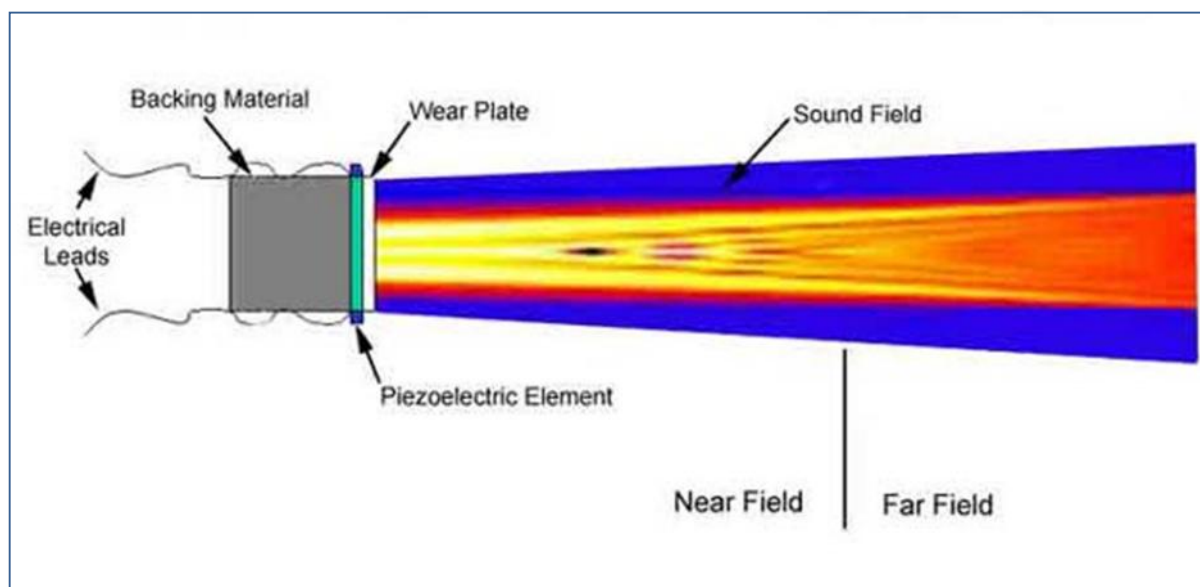
Συνοψίζοντας, η μετατροπή των ηλεκτρικών παλμών σε μηχανικές ταλαντώσεις και αντιστρόφως, η μετατροπή των μηχανικών ταλαντώσεων σε ηλεκτρικά σήματα, που πραγματοποιείται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, είναι η βάση του μη καταστροφικού ελέγχου με υπερήχους.



Εικόνα 4.8 : α) Ο κρύσταλλος του χαλαζία και β) Τα πλακίδια χ και y.

4.4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

Η δέσμη των υπερήχων εκπέμπεται από κρυστάλλους με κυκλική διατομή (κεφαλές καθέτου δέσμης) ή από κρυστάλλους ορθογωνικής διατομής (γωνιακές κεφαλές). Αντί όμως η δέσμη να παρουσιάζει εικόνα κυλίνδρου ή πρίσματος παρουσιάζει μια πολυπλοκότερη σύνθετη εικόνα. Στην περίπτωση που ο κρύσταλλος έχει κυκλική διατομή, η υπερηχητική δέσμη χωρίζεται σε τρεις ζώνες και έχει τη μορφή του σχήματος (Εικόνα 4.9).



Εικόνα 4.9 : Δέσμη υπερήχων και χαρακτηριστικές περιοχές.

4.4.4 ΝΕΚΡΗ ΖΩΝΗ

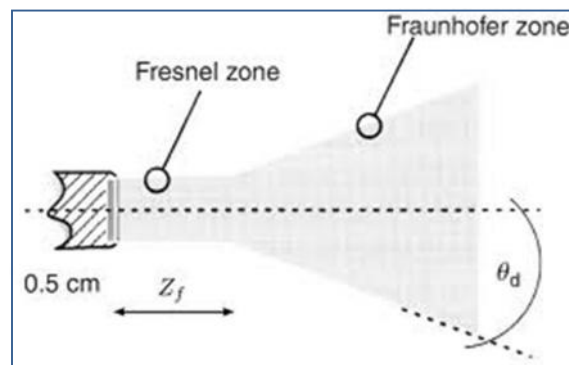
Μόλις τεθεί σε λειτουργία η συσκευή των υπερήχων εμφανίζεται ο αρχικός παλμός. Αν το προς έλεγχο υλικό είναι πολύ λεπτό, η ανάκλαση της πίσω επιφάνειάς του θα πέσει στο τμήμα της οθόνης που ήδη καταλαμβάνει ο αρχικός παλμός. Μπορεί επίσης ο ήχος κατά τη διάβασή του μέσα από ένα δοκίμιο να συναντήσει πολύ κοντά στην επιφάνεια όπου βρίσκεται η κεφαλή κάποια ατέλεια, που να εξαναγκάσει τμήμα αυτού να ανακλαστεί και πάλι η ανάκλαση αυτή δε θα φανεί πάνω στην οθόνη. Στην περιοχή αυτή λοιπόν που βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια της υπερηχητικής κεφαλής, είναι αδύνατη η ανίχνευση ατελειών ή και οποιασδήποτε μέτρησης, λόγω του ότι το ύψος του αρχικού παλμού καλύπτει τις ανακλάσεις που έρχονται από τις διάφορες ανωμαλίες του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό η περιοχή ονομάζεται νεκρή ζώνη. Η νεκρή ζώνη είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο η συχνότητα των υπερήχων είναι μικρότερη. Για έλεγχο πολύ κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου μπορεί να γίνει χρήση διπλών κεφαλών που πλεονεκτούν έναντι των απλών κεφαλών στο ότι δεν παρουσιάζουν νεκρή ζώνη.

4.4.5 ΕΓΓΥΣ ΖΩΝΗ (ΖΩΝΗ FRENSEL)

Μετά τη νεκρή ζώνη, ακολουθεί η εγγύς ζώνη στην οποία παρατηρείται συμβολή της δέσμης. Δηλαδή στην περιοχή αυτή, το εμβαδόν της διατομής της δέσμης συνεχώς μειώνεται, ενώ αντίθετα η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας συνεχώς μεγαλώνει. Άρα, όσο μεγαλύτερη γίνεται η απόσταση από τον κρύσταλλο, τόσο το ύψος του παλμού μεγαλώνει εφ' όσον βέβαια προκύπτει για τον ίδιο ανακλαστήρα. Το μήκος της εγγύς ζώνης εξαρτάται από το σχήμα των κρυστάλλων. Έτσι αν μιλάμε για κυκλικό κρύσταλλο το μήκος της είναι:

$$N = D^2 * f / 4 * C \quad \text{ή} \quad N = D^2 / 4 * \lambda,$$

- N= το μήκος της εγγύς ζώνης σε mm.
- D= η διάμετρος του κρυστάλλου σε mm.
- f= η συχνότητα σε MHz.
- λ= το μήκος κύματος σε mm.
- C= η ταχύτητα του ήχου σε m/sec.



Εικόνα 4.10 : Εγγύς ζώνη.

Ο κρύσταλλος προκειμένου να στερεωθεί μέσα στην κεφαλή, πακτώνεται από τη μια επιφάνειά του. Αποτέλεσμα αυτού είναι ένα μέρος της επιφάνειας να πάλλεται και το άλλο να μένει ακίνητο. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται ενεργός επιφάνεια. Η διάμετρος που αντιστοιχεί στην ενεργό επιφάνεια ονομάζεται ενεργός διάμετρος και συμβολίζεται με D_{eff} . Σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς ισχύει:

$$D_{eff} = 0.97 * D$$

Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$N = 0.94 * D^2 * f / 4 * C \quad \text{ή} \quad N = 0.94 * D^2 / 4 * \lambda$$

Για τετραγωνικής διατομής κρύσταλλο ισχύει:

$$N = 1.3 * (q_{eff})^2 * f / 4 * C$$

- N = το μήκος της εγγύς ζώνης σε mm.
- f = η συχνότητα σε MHz.
- C = η ταχύτητα του ήχου σε m/sec.
- q_{eff} = η ενεργός επιφάνεια του κρυστάλλου.

4.4.6 ΑΠΟΜΑΚΡΥΣΜΕΝΗ ΖΩΝΗ (FARFIELD)

Μετά το τέλος της εγγύς ζώνης ακολουθεί η απομακρυσμένη ζώνη. Στη ζώνη αυτή η ηχητική δέσμη αποκλίνει. Δηλαδή στην περιοχή αυτή όσο απομακρυνόμαστε από την κεφαλή, το εμβαδόν της διατομής της δέσμης συνεχώς μεγαλώνει, ενώ η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας συνεχώς μειώνεται. Άρα, όσο ο ανακλαστήρας απομακρύνεται από τον κρύσταλλο, το ύψος του παλμού στην οθόνη μικραίνει.

Η γωνία Φ του κώνου της δέσμης των υπερήχων που εκπέμπονται από έναν κυκλικό κρύσταλλο, δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Sin}\Phi/2 = \kappa \cdot \lambda/D$$

Όπου ο συντελεστής κ εξαρτάται από το ύψος της ανάκλασης και παίρνει τιμές:

- $\kappa = 1.22$ για ύψος ανάκλασης 0%.
- $\kappa = 1.08$ για ύψος ανάκλασης 10%.
- $\kappa = 0.56$ για ύψος ανάκλασης 50%.

Το ύψος ανάκλασης 50% ή 60% προκύπτει εάν θεωρηθεί η πηγή των υπερήχων ως μία απλή πηγή με έμβολο, οπότε η ποικιλία στην ακουστική πίεση που δημιουργείται κατά μήκος του άξονα της δέσμης, PR , σε μία απόσταση R από την πηγή, δίνεται από τη σχέση:

$$PR = P_0 \cdot 2 \sin \left\{ \pi/\lambda \cdot [(D^2/4 + R^2) - R] \right\}$$

Έτσι για ύψος ανάκλασης 50%, εννοείται ότι η ακουστική πίεση του κύματος έχει μειωθεί κατά 50%. Ανάλογα για ύψος ανάκλασης 10%. Όταν η γωνία Φ είναι μεγάλη, το ύψος της κάθετης εκτροπής στον παλμογράφο είναι μικρό με αποτέλεσμα να είναι δύσκολος ο έλεγχος των υλικών. Για να μειωθεί η γωνία Φ , πρέπει με βάση τον τύπο $\text{Sin}\Phi/2 = \kappa \cdot \lambda/D$:

- Να χρησιμοποιηθεί πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος μεγαλύτερης διαμέτρου D ή
- Να μειωθεί το μήκος κύματος με αύξηση της συχνότητας του παραγόμενου κύματος.

Πρέπει να τονισθεί ότι οι εξισώσεις για το διασκορπισμό της δέσμης δείχνουν ότι μικρής διαμέτρου κεφαλές έχουν πλατιά δέσμη, και πιο μεγάλης διαμέτρου κεφαλές έχουν πιο εύκολα κατευθυνόμενη δέσμη, αλλά με μεγαλύτερη εγγύς ζώνη.

4.4.7 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η απόδοση του ελέγχου με υπερήχους χαρακτηρίζεται από τη διακριτική ικανότητα (resolution) και την ευαισθησία (sensitivity), της παραγόμενης δέσμης υπερήχων. Οι έννοιες αυτές ως ένα βαθμό εκφράζουν την ικανότητα της ΜΚ μεθόδου να εντοπίσει τις ατέλειες.

Ως ευαισθησία ορίζεται η ικανότητα της μεθόδου να εντοπίσει μικρών διαστάσεων ατέλειες. Ως διακριτική ικανότητα ορίζεται η ικανότητα της μεθόδου να εντοπίσει ατέλειες, οι οποίες είναι πολύ κοντά, είτε μεταξύ τους, είτε στην επιφάνεια του υλικού. Και τα δύο αυτά μεγέθη συναρτώνται από τη συχνότητα παραγωγής των υπερήχων. Συγκεκριμένα, και τα δύο μεγέθη αυξάνονται όσο αυξάνεται η συχνότητα.

Επίσης, ποιοτικό χαρακτηριστικό της δέσμης δύναται να θεωρηθεί η εξασθένηση (attenuation). Η εξασθένηση είναι η απώλεια ενέργειας της δέσμης, ως συνέπεια της σκέδασης (scattering) ή της απορρόφησης (absorption).

Η σκέδαση εμφανίζεται όταν η δέσμη των υπερήχων συναντά υπό γωνίες διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες και ανακλάται ή διαθλάται ακανόνιστα ή μετατρέπεται σε άλλα είδη κυμάτων. Η απορρόφηση είναι η άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων σε θερμότητα. Η απορρόφηση είναι πιο έντονη όταν οι ταλαντώσεις γίνονται με μεγαλύτερη ταχύτητα, δηλαδή με υψηλότερη συχνότητα. Στα περισσότερα υλικά, η απορρόφηση είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας των υπερηχητικών κυμάτων.

Ουσιαστικά λοιπόν, η απόσβεση είναι η μείωση της ηχητικής πίεσης των υπερηχητικών κυμάτων, από την αρχική τιμή P_0 σε κάποια τιμή P , όταν το κύμα διαπερνά το υλικό σε βάθος d . Η σχέση που δίνει την πίεση P σε απόσταση d μέσα στο υλικό είναι :

$$P = P_0 * e^{-ad}$$

Ο συντελεστής a καλείται συντελεστής απόσβεσης (attenuation coefficient) και εκφράζεται συνήθως σε dB/mm ή dB/m. Η συνολική απόσβεση σε μία απόσταση d του υλικού, προκύπτει από την ακόλουθη σχέση :

$$a*d = \ln \frac{P_0}{P} \text{ [Np]}$$

Εκφράζεται σε Nepers [Np]. Για πρακτικούς λόγους έχει καθιερωθεί ως μονάδα απόσβεσης το decibel [dB], οποίο συνδέεται με [Np] με τη σχέση $1 \text{ dB/m} = 8.686 \text{ Np/cm}$.

4.4.8 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΤΗΡΑ.

Η συχνότητα παραγωγής των υπερήχων παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στα ποιοτικά όσο και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης των υπερήχων. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε περαιτέρω συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων αυτών.

Η απόκριση του αισθητήρα στις ακραίες τιμές συχνότητας, εξαρτάται από το υλικό απόσβεσης το οποίο εμπεριέχει. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσβεση, τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο αποκρίνεται.

Με βάση τις σχέσεις που συνδέουν τη συχνότητα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της δέσμης των υπερήχων, η αύξηση της συχνότητας :

- Αυξάνει την ευαισθησία και τη διακριτική ικανότητα (κοντά στην επιφάνεια).
- Συντελεί στην επίτευξη στενότερης δέσμης.
- Αυξάνει το μήκος της εγγύς ζώνης.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, φαίνεται ασφαλές το συμπέρασμα ότι αυξάνοντας τη συχνότητα παραγωγής των υπερήχων, αυξάνουμε την απόδοση της μεθόδου. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ισχύει απόλυτα. Πρέπει να λαμβάνονται ταυτόχρονα υπόψη η επίδραση της συχνότητας στα υπόλοιπα (γεωμετρικά) χαρακτηριστικά της δέσμης, τα οποία επίσης συναρτώνται από παραμέτρους, όπως, η δομή του υλικού (μέγεθος κόκκων), το πάχος του υλικού, το είδος, η πιθανή θέση και το μέγεθος των ατελειών, κ.α. Έτσι η αύξηση της συχνότητας, συνεπάγεται επίσης :

- Μεγάλη αποδυνάμωση λόγω σκέδασης.
- Χαμηλή διεισδυτικότητα.
- Υψηλό θόρυβο απόκρισης.

Είναι προφανές, ότι αποτελεί δύσκολη διαδικασία η επίτευξη της βέλτιστης επιλογής συχνότητας, καθώς πρέπει να ισοσταθμίζονται ταυτόχρονα η θετική και η αρνητική επίδραση της μεταβολής της συχνότητας. Ωστόσο, η επιλογή αισθητήρα κατάλληλης συχνότητας θεωρείται αναγκαία διαδικασία για κάθε περίπτωση ελέγχου. Καθώς δεν υπάρχει κάποια μαθηματική έκφραση που να συσχετίζει όλες αυτές τις παραμέτρους με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, χρησιμοποιείται η έννοια του λόγου Σήματος προς Θόρυβο (Signal-to-NoiseRatio-S/N), ως κριτήριο αξιολόγησης και επιλογής αισθητήρα. Γενικά ένας λόγος S/N, 3 προς 1, θεωρείται ότι αποτελεί τη βάση.

Ο λόγος S/N, εμμέσως δύναται να εκφράσει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου καθώς περιγράφει πόσο σημαντικότερη είναι η ανάκλαση που προέρχεται από μία ατέλεια σε σχέση με την ανάκλαση – θόρυβο που προέρχεται από χαρακτηριστικά του υλικού (όπως η μεγάλη κοκκομετρία του) ή συστατικά του (όπως τα αδρανή στο σκυρόδεμα).

Όπως είναι γνωστό η ισχύς ενός σήματος προερχόμενου είτε από θόρυβο είτε από ατέλεια συναρτάται από παραμέτρους όπως:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης δέσμης (ζώνη εστίασης).
- Τη συχνότητα και το εύρος συχνοτήτων του αισθητήρα.
- Τη διαδρομή του ήχου πριν το σημείο ελέγχου (μέσα στο υγρό ή στερεό μέσο) και την απόσταση.
- Τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τραχύτητα, μορφή).
- Τη θέση των ατελειών σε σχέση με τη διεύθυνση της δέσμης.

- Τη δομή του υλικού.
- Την ανακλαστικότητα της ατέλειας, η οποία εξαρτάται από την ακουστική της αντίσταση, το μέγεθος και σχήμα της και τον προσανατολισμό της.

Πολλές από τις παραμέτρους αυτές συσχετίζονται στη σχέση που δίνει το λόγο (S/N) :

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{16}{p * V_{metal} * w_x * w_y * \Delta_t} * \frac{A_{flow}(f_0)}{FOM(f_0)}}$$

Όπου :

p : πυκνότητα,

V_{metal} : ταχύτητα ήχου,

w_x και w_y : διαστάσεις δίσκου δέσμης στο σημείο εστίασης,

Δ_t : διάρκεια παλμού,

f_0 : ιδιοσυχνότητα,

A_{flow} : ένταση παλμού στην ιδιοσυχνότητα,

FOM : θόρυβος σήματος στην ιδιοσυχνότητα.

Η σχέση αυτή δίνει τη δυνατότητα να βελτιστοποιηθεί η επιλογή της συχνότητας σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους. Γενικά από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι ο λόγος (S/N), και συνεπώς η ιχνηλασιμότητα μιας ατέλειας:

- Αυξάνει, καθώς αυξάνει το μέγεθος της ατέλειας. Η ιχνηλασιμότητα μιας ατέλειας είναι ευθέως ανάλογη του μεγέθους της.
- Αυξάνει όσο πιο στενή είναι η δέσμη. Η ιχνηλασιμότητα μιας ατέλειας είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους της δέσμης.
- Αυξάνει όσο πιο σύντομος είναι ο παλμός. Η ιχνηλασιμότητα μιας ατέλειας είναι αντιστρόφως ανάλογη της διάρκειας του παλμού. Όσο πιο σύντομος είναι ο παλμός (που παράγεται από αισθητήρες μεγάλου εύρους συχνοτήτων), τόσο αποδοτικότερα ανιχνεύεται η ατέλεια.
- Μειώνεται για υλικά μεγάλης πυκνότητας ή και μεγάλης ταχύτητας διάδοσης του ήχου.
- Γενικά αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας. Ωστόσο για μερικά υλικά, όπως τα κράματα τιτανίου, τόσο ο όρος A_{flow} , όσο και ο όρος “Figure of Merit”, (FOM), της εξίσωσης μεταβάλλονται κατά τον ίδιο περίπου τρόπο όσο μεταβάλλεται η συχνότητα. Έτσι σε μερικές περιπτώσεις ο λόγος (S/N) είναι ανεξάρτητος της συχνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ^[15]

5.1 ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Ο σωστός έλεγχος των συγκολλήσεων απαιτεί τον κατάλληλο εξοπλισμό, ο οποίος πρέπει να βαθμονομηθεί με την ανάλογη ακρίβεια από τον χειριστή. Λέγοντας εξοπλισμό, εννοούμε κυρίως την συσκευή, τις κεφαλές παραγωγής υπερήχων, τα καλώδια σύνδεσής τους, τα πρότυπα βαθμονόμησης και το υγρό σύζευξης τους. Για να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια και ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων, εκτός από τη σωστή επιλογή καθενός από τα παραπάνω ξεχωριστά, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα και στο σωστό συνδυασμό τους. Έτσι, λοιπόν, ορίζουμε κάποιες ελάχιστες απαραίτητες προϋποθέσεις (που αφορούν κυρίως την συσκευή καθ'αυτή), οι οποίες και πρέπει να πληρούνται για το σωστό έλεγχο των συγκολλήσεων, που αναφέρονται παρακάτω:

- Να μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε μια κεφαλή, που παίζει το ρόλο και του πομπού και του δέκτη, όσο και με δύο κεφαλές, μία για τον πομπό και μία για το δέκτη.
- Να μπορεί να λειτουργήσει σε τουλάχιστον δύο συχνότητες μέσα στην περιοχή από 1 έως 6 MHz.
- Να έχει εσωτερικό ενισχυτή και η ενίσχυση να παίρνει διακριτές τιμές ανά 1 ή 2 dB.
- Να μπορεί να χρησιμοποιεί τον ενισχυτή, χωρίς να κρύβει τα αδύνατα σήματα (αυτά δηλαδή που ο παλμός ανάκλασής τους είναι πολύ ασθενής).
- Να έχει παρουσίαση σε μορφή A-scan ή άλλη παρόμοια.
- Να έχει χρονική βάση που να είναι γραμμική, με απόκλιση $\pm 1\%$ σε όλη την εμβέλεια του παλμού.
- Να παρέχει ρυθμιζόμενη έκταση χρόνου – βάσης από 100 έως 500 mm μήκος διαδρομής παλμού, τόσο για διαμήκη όσο και για εγκάρσια κύματα.
- Να έχει έλεγχο καθυστέρησης, ώστε να μπορούμε για κάθε κεφαλή να υπολογίσουμε τον «νεκρό χρόνο», δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται ο παλμός να διανύσει την απόσταση από τον πιεζοκρύσταλλο μέχρι να διεισδύσει στο προς έλεγχο τεμάχιο.
- Η οθόνη του οργάνου να έχει διαβαθμίσεις τόσο κατά την οριζόντια, όσο και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και κατά προτίμηση από την εσωτερική πλευρά της οθόνης, ώστε να αποφεύγονται ανακρίβειες που οφείλονται σε φαινόμενα διάθλασης.

- Η οθόνη να έχει την κατάλληλη φωτεινότητα, ώστε όλες οι ενδείξεις να είναι ευανάγνωστες από μια απόσταση 500 mm.
- Έπειτα από 15 λεπτά προθέρμανσης της συσκευής, οι ενδείξεις στην οθόνη πρέπει να είναι απολύτως σταθερές και κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.
- Για συσκευές που τροφοδοτούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο, διακυμάνσεις στην τάση τροφοδοσίας της τάξεως του $\pm 10\%$, δεν πρέπει να προκαλούν ούτε οριζόντιες μετατοπίσεις μεγαλύτερες του 1% της έκτασης του χρόνου – βάσης, ούτε μετατοπίσεις στην ενίσχυση (κατακόρυφες μετατοπίσεις), μεγαλύτερες από 1 dB. Συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, πρέπει να κλείνουν αυτόματα όταν οι παραπάνω συνθήκες δεν πληρούνται.

Η πλειοψηφία των παραπάνω απαιτήσεων, μπορεί να ελεγχθεί χωρίς καν να χρειάζεται η ύπαρξη κάποιου δοκιμίου. Μερικές, όμως, απαιτούν κατάλληλο δοκίμιο, το οποίο μπορεί να είναι είτε οποιοδήποτε τεμάχιο από χάλυβα, είτε ένα από τα IIW πρότυπα βαθμονόμησης.

Διακρίνουμε δύο μεγάλες κατηγορίες συσκευών ελέγχου:

1. Φορητές διατάξεις ελέγχου: Με τις φορητές συσκευές γίνεται χειροκίνητος σημειακός έλεγχος, με επαφή της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής της διάταξης πάνω στο εξεταζόμενο υλικό, αφού πρώτα καλυφθεί η περιοχή ελέγχου με ένα στρώμα μέσου σύζευξης. Με τον χειροκίνητο έλεγχο γίνονται συνήθως παχυμετρήσεις και ανίχνευση ατελειών – βλαβών σε μία κατασκευή (π.χ. συγκόλληση). Οι μέθοδοι σάρωσης – απεικόνισης που χρησιμοποιούνται είναι αυτές των A-scan και B-scan.



Εικόνα 5.1 : Φορητή διάταξη ελέγχου υπερήχων.

2. Αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου με εμβάπτιση: Στον εμβαπτιζόμενο έλεγχο τόσο το ελεγχόμενο υλικό, όσο και η κεφαλή παραγωγής υπερήχων, βρίσκονται βυθισμένα σε δεξαμενή. Η δεξαμενή περιέχει το μέσο σύζευξης, που είναι κάποιο υγρό, συνήθως νερό. Η δέσμη υπερήχων κατευθύνεται στο εξεταζόμενο υλικό και όταν προσπίπτει (συνήθως) κάθετα σε αυτό, τότε χρησιμοποιούνται διαμήκη υπερηχητικά κύματα. Υπάρχει όμως η περίπτωση, η πρόσπτωση της δέσμης να γίνεται υπό γωνία και να χρησιμοποιηθούν γωνιακές τεχνικές ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται εγκάρσια κύματα ή συνδυασμός εγκαρσίων και διαμηκών κυμάτων ή ακόμα και κύματα του Lamb, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης που επιλέγεται. Οι διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου είναι αυτοματοποιημένες και διακρίνονται σε συμβατικές, μικρών και μεσαίων διαστάσεων και σε διατάξεις μεγάλου μεγέθους.

Αποτελούνται από τη δεξαμενή μέσα στην οποία εμβαπτίζεται το εξεταζόμενο υλικό, από ένα ηλεκτροκίνητο φορείο πάνω στο οποίο προσαρμόζονται οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές και από μία κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μέσω της οποίας γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, καθορίζεται η κίνηση του φορείου, ο τρόπος σάρωσης και γενικότερα ρυθμίζεται η λειτουργία της όλης διάταξης.



Εικόνα 5.2 : Εμβαπτιζόμενη διάταξη ελέγχου.

5.2 ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ

Η κεφαλή, (με τον όρο κεφαλή, εννοούμε το στοιχείο που περιλαμβάνει και τον πιεζοκρύσταλλο και τον αποσβεστήρα), μαζί με το καλώδιο σύνδεσής της με την συσκευή, πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε να μην προκαλούν «θόρυβο», ο οποίος επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Κάθε κεφαλή πρέπει να αναγράφει πάνω της τα εξής στοιχεία:

- ✓ Τοσημείο από το οποίο ο υπέρηχος βγαίνει από την κεφαλή, γνωστό και ως B.I.P. (Beam Index Point).
- ✓ Τη γωνία της κεφαλής (γωνία διάθλασης του κύματος).
- ✓ Τη συχνότητά της.
- ✓ Τον τύπο του κύματος (διαμήκες ή εγκάρσιο).
- ✓ Τις διαστάσεις του κρυστάλλου.
- ✓ Τον τύπο του κρυστάλλου.

Ακόμα πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- ✓ Η επιφάνεια οποιουδήποτε κρυστάλλου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 mm^2 και καμία άλλη του διάσταση τα 25 mm .
- ✓ Το B.I.P. μιας καινούργιας κεφαλής πρέπει να βρίσκεται στη σωστή θέση με μία μέγιστη απόκλιση της τάξεως του $\pm 5\%$ της μεγαλύτερης διάστασής της.
- ✓ Η γωνία μίας καινούργιας κεφαλής δε θα πρέπει να διαφέρει παραπάνω από το $\pm 2\%$ από την τιμή που αναγράφεται επάνω της.

- ✓ Ο άξονας της δέσμης του υπερήχου, πρέπει να είναι παράλληλος στις πλευρές του φορέα από Plexiglas (παπουτσάκι) και τυχόν απόκλιση να μην υπερβαίνει το $\pm 2\%$.

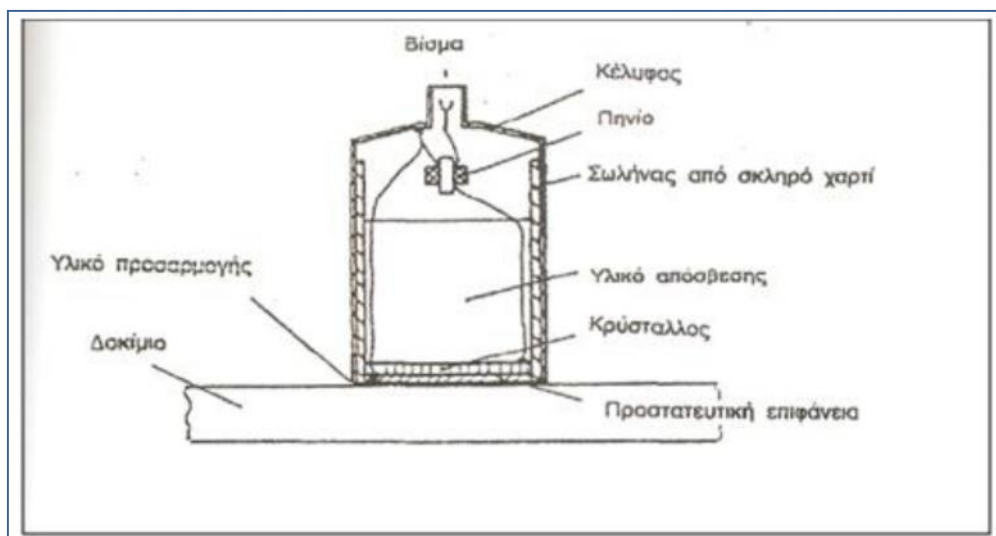
Παρακάτω φαίνονται διάφοροι τύποι κεφαλών,



Εικόνα 5.3 : Τύποι κεφαλών.

5.2.1 ΚΕΦΑΛΕΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

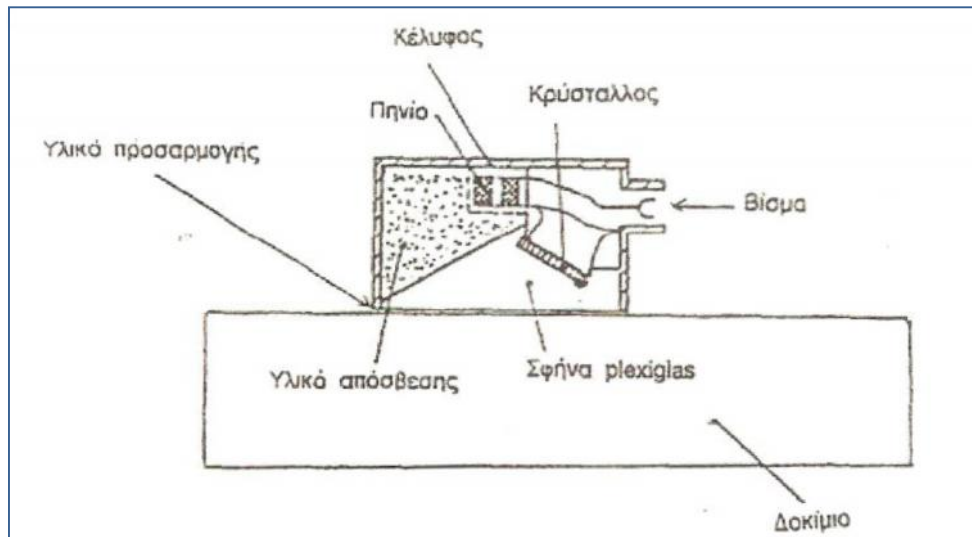
Οι κεφαλές καθέτου δέσμης εφαρμόζονται στην περίπτωση που επιθυμούμε να προβούμε στην παχυμέτρηση κάποιου υλικού, να εντοπίσουμε ατέλειες της δομής του ή να προσδιορίσουμε τις ελαστικές σταθερές και την απόσβεση του, αρκεί να είναι επίπεδη η κάτω επιφάνειά του.



Εικόνα 5.4 : Λεπτομέρειες κεφαλής καθέτου δέσμης.

5.2.2 ΚΕΦΑΛΕΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΔΕΣΜΗΣ

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



Εικόνα 5.5 : Κεφαλή πλάγιας δέσμης.

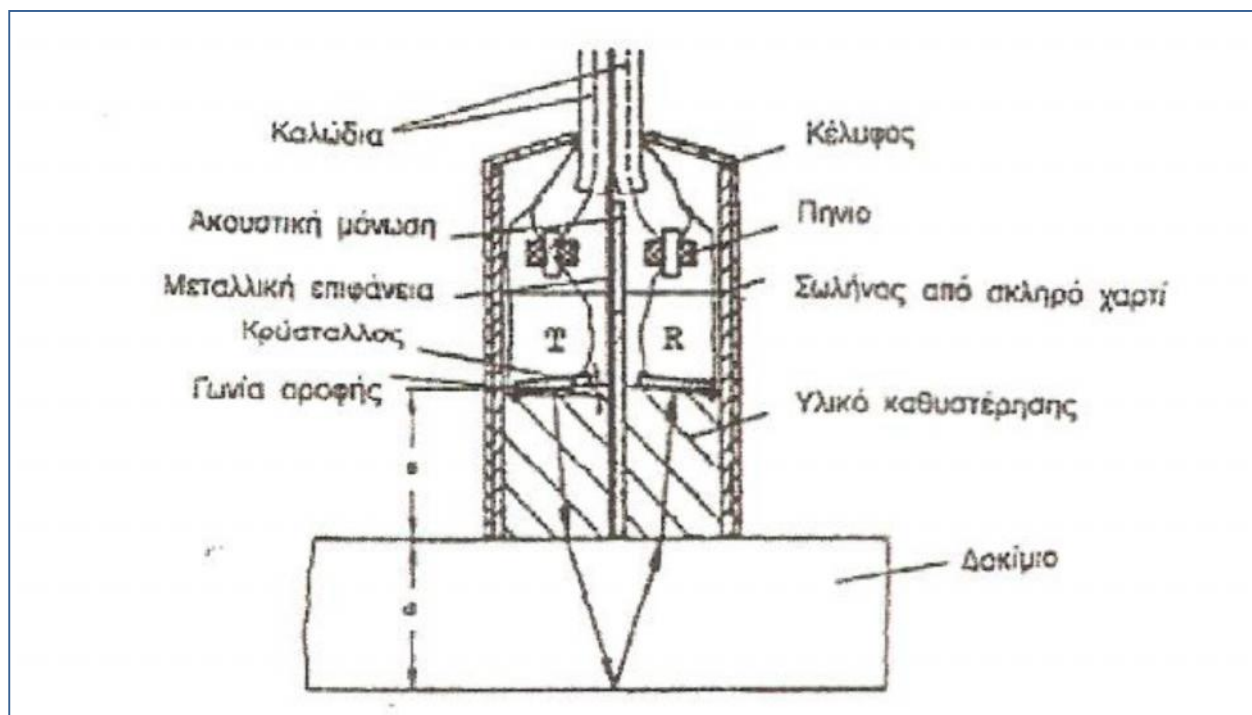
5.2.3 ΕΜΒΑΠΤΙΖΟΜΕΝΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ

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

5.2.4 ΚΕΦΑΛΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΥ

Οι κεφαλές διπλού κρυστάλλου που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.6, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν εμφανίζουν νεκρή ζώνη, (περιοχή του υλικού για το οποίο δεν

μπορούμε να πάρουμε καμία πληροφορία) και επομένως προσφέρονται για τον έλεγχο λεπτών δοκιμίων ή για την ανίχνευση ατελειών που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια των υλικών. Η γωνία που σχηματίζουν οι δύο κρύσταλλοι ονομάζεται *γωνία οροφής* και είναι το μέγεθός της που καθορίζει το μέγεθος της νεκρής ζώνης και την ευαισθησία. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία, τόσο μικρότερη θα είναι η νεκρή ζώνη, αλλά μικρή θα είναι και η περιοχή μέγιστης ευαισθησίας.



Εικόνα 5.6 : Λεπτομέρειες κεφαλής διπλού κρυστάλλου.

5.2.5 ΚΕΦΑΛΕΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ

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

5.3 ΚΑΛΩΔΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Τα καλώδια σύνδεσης είναι αυτά που συνδέουν τις κεφαλές με την συσκευή. Λόγω του ότι οι απαιτήσεις είναι πάρα πολλές και εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή, στο εμπόριο κυκλοφορούν πάρα πολλοί τύποι καλωδίων, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ο κάθε ένας. Γενικά, ένα καλώδιο πρέπει να πληρεί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να μην παράγει «θόρυβο», ειδικά σε υψηλές συχνότητες.
- Να έχει κατάλληλη θωράκιση, ώστε να μην επηρεάζεται το σήμα από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.
- Να είναι αρκετά ανθεκτικό, εύκαμπτο και να έχει σχετικά μεγάλο χρόνο ζωής.
- Να υπάρχει σε μεγάλη ποικιλία μηκών.
- Μερικές εφαρμογές απαιτούν αδιάβροχα καλώδια.

Συνήθως, τα καλώδια κατασκευάζονται με ένα μεταλλικό περίβλημα πλεγματικής μορφής, το οποίο εξασφαλίζει τόσο την αντοχή όσο και την ευκαμψία του. Έξω από το περίβλημα αυτό, τοποθετούνται διάφορα επιστρώματα, το είδος των οποίων εξαρτάται από την εφαρμογή για την οποία προορίζεται το καλώδιο. Για παράδειγμα, επίστρωμα από τεφλόν χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε καλώδιο πολύ υψηλής απόδοσης, επίστρωμα σιλικόνης όταν θέλουμε μεγάλη ευελιξία, ενώ ευρύτατα χρησιμοποιείται και επίστρωμα PVC. Ειδικές εφαρμογές απαιτούν αδιάβροχα καλώδια, τα οποία έχουν και ειδικά κατασκευασμένες στεγανές υποδοχές για τις κεφαλές, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετά μεγάλα βάθη τόσο σε καθαρό νερό, όσο και σε θαλασσίνο.



Εικόνα 5.7 : Καλώδιο σύνδεσης κεφαλών με διάταξη.

5.4 ΠΡΟΤΥΠΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Κατά τα πρώτα χρόνια της εφαρμογής της μεθόδου των υπερήχων στους μη καταστροφικούς ελέγχους, προέκυψε το εξής πρόβλημα. Οι μετρήσεις που γίνονταν δεν είχαν επαναληψιμότητα. Δηλαδή, ενώ γινόταν μια μέτρηση ακριβώς στο ίδιο σημείο όπου είχε ξαναγίνει παλιότερα, τα αποτελέσματα δε συμβιβάζονταν μεταξύ τους. Αυτό οδήγησε τους κατασκευαστές των συσκευών να κατανοήσουν ότι οι συσκευές αυτές είναι πάρα πολύ ευαίσθητες και οι ρυθμίσεις τους μπορούν πολύ εύκολα να αλλάξουν. Έπρεπε, επομένως, να βρουν κάποιο τρόπο ώστε να μπορούν να τις βαθμονομούν κατά τακτά χρονικά διαστήματα.

Η ανάγκη αυτή, οδήγησε στην κατασκευή των πρότυπων βαθμονόμησης, τα οποία είναι τεμάχια γνωστών διαστάσεων πολύ μεγάλης ακρίβειας. Έτσι, λοιπόν, μετρώντας τα πρότυπα αυτά και ρυθμίζοντας την συσκευή ώστε να μας δώσει τις ακριβείς διαστάσεις, την έχουμε βαθμονομήσει κατάλληλα ώστε να μας παρέχει σωστές μετρήσεις.

Υπάρχουν πάρα πολλά είδη προτύπων βαθμονόμησης (calibration blocks), τα οποία φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8 : Διάφοροι τύποι πρότυπων βαθμονόμησης.

Γενικά πάντως, τα πρότυπα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και τη διόρθωση των παρακάτω στοιχείων:

- Γραμμικότητα του χρόνου – βάσης.
- Βαθμονόμηση του χρόνου – βάσης.
- Διαδρομή παλμού.
- Γωνία της κεφαλής.
- Εύρεση του B.I.P. (του σημείου από όπου ο άξονας της δέσμης εξέρχεται από την κεφαλή και εισέρχεται στο τεμάχιο που πρόκειται να ελεγχθεί).
- Ανάλυση της κεφαλής.
- Το προφίλ της δέσμης.
- Εύρεση του «νεκρού χρόνου» της κεφαλής.
- Ορισμός του επιπέδου ευαισθησίας.

Η βαθμονόμηση των κεφαλών, είναι απαραίτητη γιατί με τον καιρό τα «παπουτσάκια» φθείρονται. Η φθορά αυτή μπορεί να μην είναι συμμετρική με αποτέλεσμα να αλλάζει τόσο γωνία όσο και το B.I.P. της κεφαλής.

5.5 ΥΓΡΑ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Όταν η κεφαλή εκπομπής υπερήχων τοποθετείται πάνω στο προς έλεγχο τεμάχιο τοποθετούμε ανάμεσά τους ένα υγρό σύζευξης (couplant) του οποίου ο σκοπός είναι να μεγιστοποιήσει το ποσοστό της ενέργειας του παλμού που διαθλάται μέσα στο τεμάχιο. Αυτό συμβαίνει γιατί το υγρό διώχνει το στρώμα αέρα που υπάρχει ανάμεσα στη κεφαλή και το τεμάχιο. Η διάδοση των υπερήχων στον αέρα είναι μηδαμινή, αφού μόνο ένα ποσοστό της τάξεως του 0.002% του υπερήχου διαθλάται από τον αέρα στο αλουμίνιο.

Το ποσοστό της πίεσης των υπερήχων που διαθλάται από το ένα μέσο στο άλλο εξαρτάται από την ακουστική αντίσταση των δυο κυτών μέσων και δίνεται από τον τύπο:

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

Όπου Z_1 και Z_2 είναι οι ακουστικές αντιστάσεις των δυο μέσων.

Πίνακας 5.1 : Υλικά και οι ακουστικές τους αντιστάσεις.

ΥΛΙΚΟ	ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
Αλουμίνιο	$17 * 10^5 \text{ kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$
Λάδι	$1 * 10^6 \text{ kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$
Νερό	$1.5 * 10^6 \text{ kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$
Γλυκερίνη	$2.46 * 10^6 \text{ kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$
Αέρας	$430 * 10^6 \text{ kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1}$

Πολλοί είναι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην επιλογή ενός υγρού σύζευξης (θερμοκρασία, επιφανειακή τραχύτητα κ.ά.). Γενικά ένα υγρό σύζευξης πρέπει:

- Να καλύπτει και την επιφάνεια της κεφαλής και του τεμαχίου.
- Να διώχνει όλον τον αέρα.
- Να καλύπτει όλες τις επιφανειακές ανωμαλίες του τεμαχίου και να παρέχει λεία επιφάνεια.
- Να επιτρέπει άνετη κίνηση της κεφαλής.
- Να τοποθετείται εύκολα, να καθαρίζεται εύκολα και να είναι ακίνδυνο για το τεμάχιο.
- Ειδικά υγρά σύζευξης, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο υλικών που βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, πρέπει να αντέχουν στις θερμοκρασίες αυτές, χωρίς να αλλάζει η ακουστική τους αντίσταση και χωρίς να αλλοιώνεται η σύστασή τους.

Υπάρχουν πάρα πολλά διαφορετικά υγρά σύζευξης, μερικά από τα οποία είναι νερό, γράσο, σιλικόνη και γλυκερίνη, η οποία και χρησιμοποιείται ευρύτατα λόγω των πολύ καλών ακουστικών ιδιοτήτων της. Βέβαια, όλα τα παραπάνω απαιτούν πολύ μεγάλη εμπειρία από τον ελεγκτή, πολλές ώρες ενασχόλησης και πάρα πολύ καλή γνώση της μεθόδου των υπερήχων.

5.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

5.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

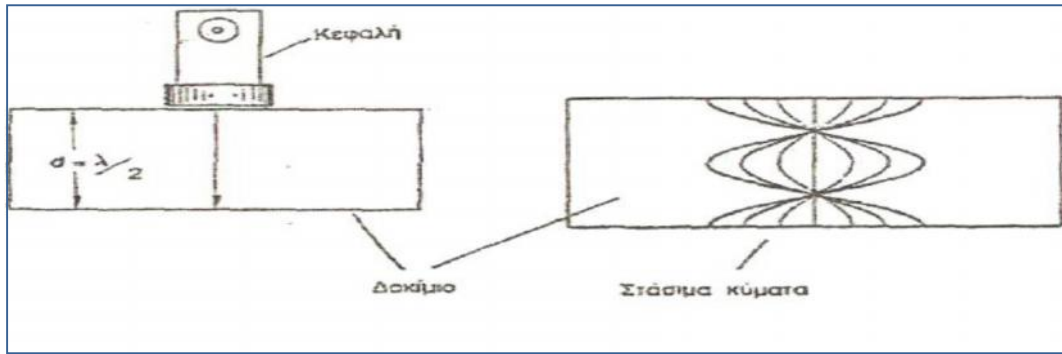
Ο υπερηχητικός έλεγχος των υλικών βασίζεται στον τρόπο που τα ηχητικά κύματα επηρεάζονται κατά τη διέλευσή τους από ένα δοκίμιο που ελέγχεται. Τα ηχητικά κύματα υφίστανται αισθητές αλλαγές, από τις οποίες μπορούμε να εκτιμήσουμε την κατάσταση ή τις μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού. Η παρεμπόδιση του ηχητικού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

5.6.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

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

5.6.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Κατά τη μέθοδο του συντονισμού, ένα συνεχές υπερηχητικό κύμα που διοχετεύεται σε μία επίπεδη πλάκα με επίπεδες επιφάνειες, μπορεί να διεγείρει σε ταλάντωση την πλάκα με τη φυσική της συχνότητα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει η πλάκα να είναι σε θέση να πάλλεται ελεύθερα και στις δύο επιφάνειές της. Αυτό συμβαίνει, όταν και στις δύο πλευρές της πλάκας υπάρχει υλικό με χαμηλή ακουστική αντίσταση. Έχει αποδειχθεί, ότι ο συντονισμός μπορεί να περιγραφεί ως ένα στάσιμο κύμα, κατά το οποίο υπάρχουν κάποια μέρη του υλικού που παραμένουν συνεχώς ακίνητα. Η συχνότητα του προσπίπτοντος υπερηχητικού κύματος μεταβάλλεται μέχρι τη στιγμή που εμφανίζεται μία ταλάντωση συντονισμού στην πλάκα. Σε αυτή την περίπτωση, απορροφά από τον πομπό περισσότερη ισχύ από ότι θα απορροφούσε εάν δεν είχε συντονιστεί. Στη συνέχεια, η συχνότητα αυξάνει μέχρι να εμφανιστεί ο επόμενος πρώτος συντονισμός. Τότε από τη διαφορά των δύο συχνοτήτων συντονισμού Δf , υπολογίζεται το πάχος του εξεταζόμενου δοκιμίου από τον τύπο $d = C / 2\Delta f$. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό του πάχους και των ελαστικών σταθερών ενός υλικού. Όμως, δεν προσφέρεται για την ανίχνευση ατελειών.

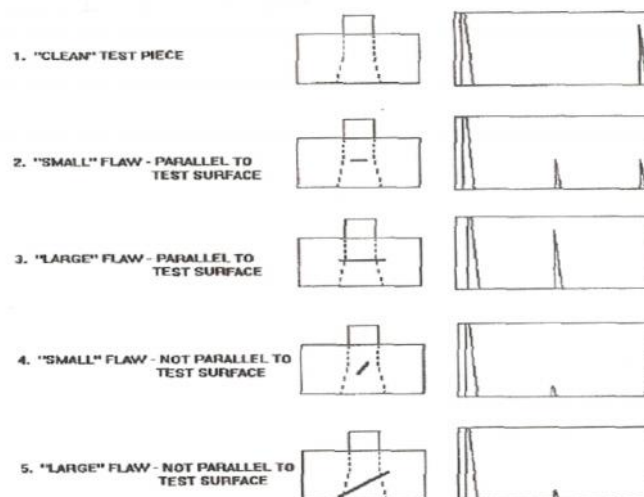


Εικόνα 5.9 : Η μέθοδος του συντονισμού.

5.6.4 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΜΟΗΧΟΥΣ

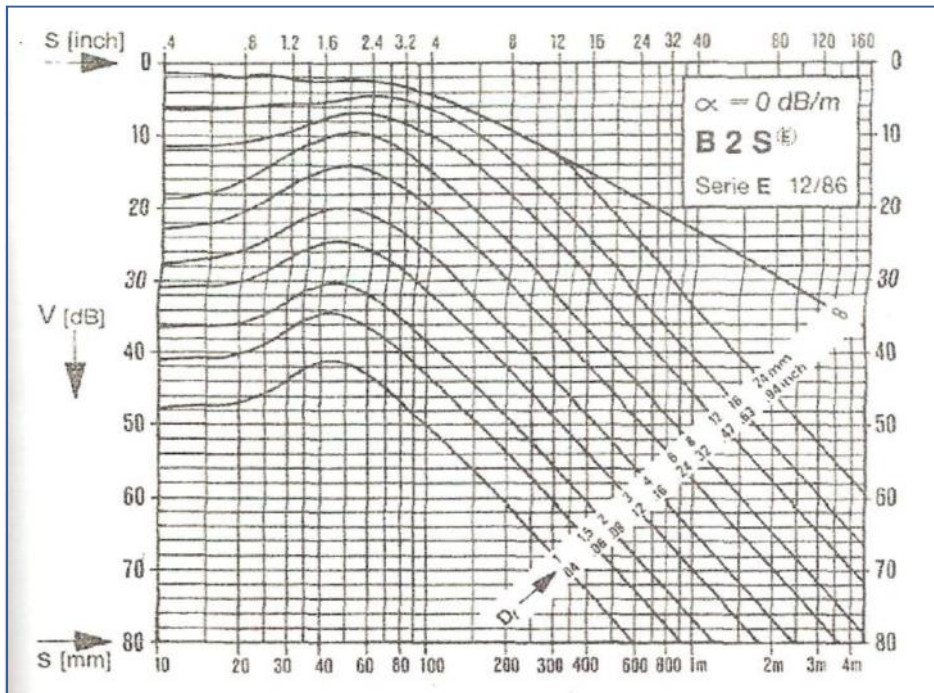
Είναι η πλέον διαδεδομένη σήμερα μέθοδος υπερηχητικού ελέγχου. Με αυτήν υπολογίζεται το ύψος της ηχούς που χαρακτηρίζει το μέγεθος του ανακλαστήρα (εμπόδιου), καθώς και ο χρόνος διέλευσης του παλμού, που προδίδει το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο ανακλαστήρας. Εάν το εμβαδόν του ανακλαστήρα είναι μικρότερο του εμβαδού της ηχητικής δέσμης, τότε ένα μέρος της δέσμης ανακλάται στο εμπόδιο και το υπόλοιπο συνεχίζει την πορεία του μέχρι να ανακλαστεί από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Η πρώτη ανάκλαση θα μας δώσει έναν παλμό που αντιστοιχεί στη θέση της ατέλειας, ενώ η ανάκλαση της κάτω επιφάνειας θα δώσει έναν παλμό που θα αντιστοιχεί στο πάχος του δοκιμίου. Γνωρίζοντας το χρόνο διέλευσης t , μπορούμε να προσδιορίσουμε την απόσταση a της ατέλειας από την πάνω επιφάνεια μέσω της σχέσης:

$$a = Ct / 2.$$



Εικόνα 5.10 : Απεικόνιση διάφορων τύπων ελαττωμάτων.

Για την μέθοδο της παλμοηγούς, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι με τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος μίας ατέλειας που βρίσκεται στο εσωτερικό ενός υλικού. Έχοντας ως αποτελέσματα των μετρήσεων το βάθος της ατέλειας και την πτώση του ύψους του παλμού που αυτή επιφέρει, με την χρήση των λεγόμενων διαγραμμάτων DGS μπορούμε να προσδιορίσουμε προσεγγιστικά το μέγεθος της ατέλειας. Ένα διάγραμμα DGS αναφέρεται σε μια συγκεκριμένη κεφαλή. Ακολουθεί ένα παράδειγμα στην παρακάτω Εικόνα 5.11.



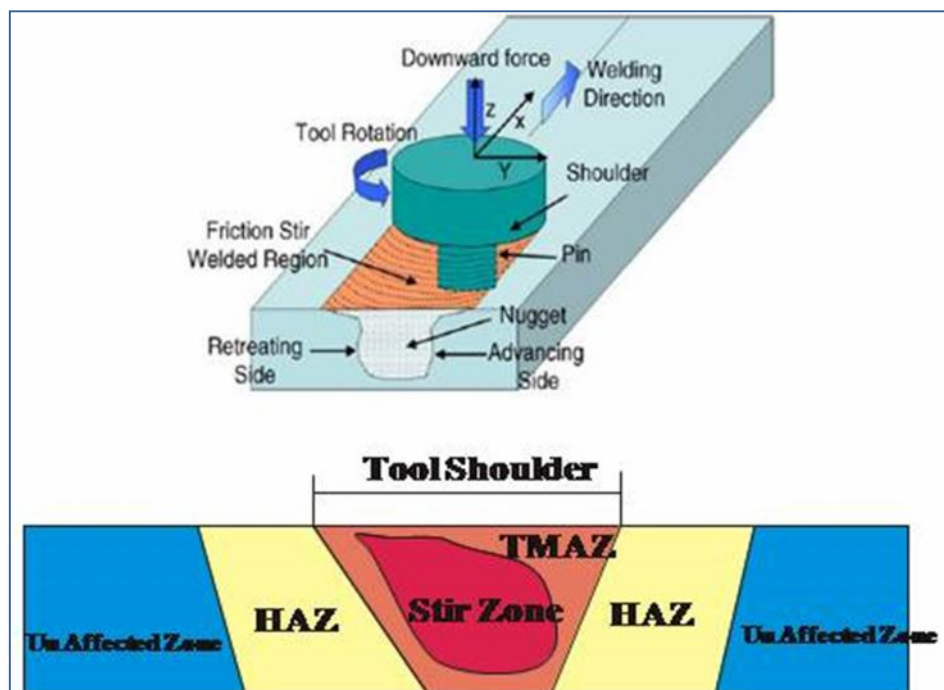
Εικόνα 5.11 : Παράδειγμα DGS διαγράμματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΣΕ FSW_[1,3,8,15]

6.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ FSW

Σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας όπως προαναφέρθηκε είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός ελέγχου της μεθόδου συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, κοινώς γνωστή και ως Friction Stir Welding (FSW). Επομένως, πρωταρχικό στόχο αποτέλεσε η προσεκτική προσέγγιση της γεωμετρίας της συγκόλλησης, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μία αξιόπιστη σχεδίαση και μέθοδος ελέγχου των δοκιμίων που έχουν συγκολληθεί με FSW.

Καθώς η γεωμετρία της FSW παρουσιάζει διαφορές ως προς τις ζώνες συγκόλλησης σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους συγκολλήσεων, θα πρέπει να σχεδιαστεί μία διαφορετική μεθοδολογία ελέγχου. Παρατηρείται ότι η συγκόλληση FSW παρουσιάζει γεωμετρία τραπεζίου, που περιλαμβάνει τις τρεις βασικές ζώνες της FSW (nuggetzone, TMAZ, HAZ), οι οποίες αποτελούν και τις κύριες «περιοχές» προς έλεγχο (Εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 : Οι κύριες ζώνες της Friction Stir Welding.

Έτσι η γεωμετρία που επιλέχθηκε για τον έλεγχο, διαφοροποιείται σε σχέση με την κλασική γεωμετρία των «συμβατικών» συγκολλήσεων, η οποία είναι τριγωνική και χρησιμοποιείται για τον έλεγχό τους.

Ο έλεγχος των συγκολλήσεων πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

- Έλεγχος του μετάλλου βάσης, με αισθητήρα κάθετης πρόσπτωσης.
- Έλεγχος της ρίζας της συγκόλλησης, με αισθητήρα γωνιακής δέσμης.
- Έλεγχος του σώματος συγκόλλησης, με αισθητήρα γωνιακής δέσμης.

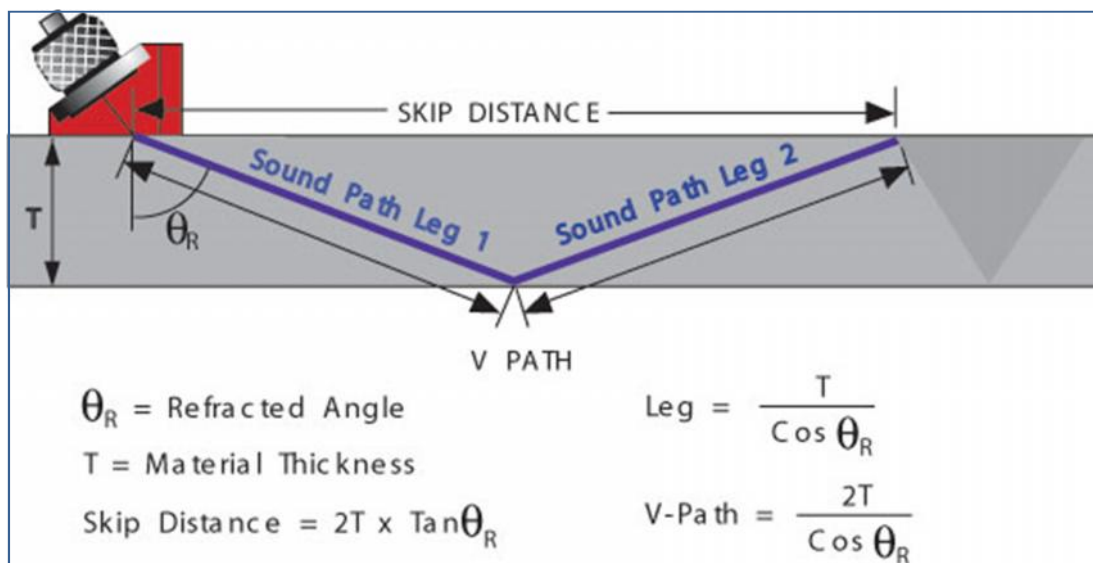
Ανεξάρτητα από την περιοχή ελέγχου, απαιτούνται προκαταρκτικές ενέργειες, όπως καθαρισμός των επιφανειών, επιλογή υλικού σύζευξης, επιλογή κατάλληλης κεφαλής, καθορισμός περιοχών ζωνών κ.α., όπου θα αναφερθούν και παρακάτω.

Τρεις είναι οι τύποι σάρωσης που εφαρμόζονται για τον εντοπισμό μιας ατέλειας, αλλά και εν συνεχεία προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το λαμβανόμενο σήμα της στην οθόνη A-scan:

- Σάρωση 1: Παράλληλα στον άξονα της συγκόλλησης.
- Σάρωση 2: Κάθετα στον άξονα της συγκόλλησης.
- Σάρωση 3: Μικρή περιστροφή δεξιά και αριστερά ως προς τον άξονα της συγκόλλησης.

Κατά τον έλεγχο των συγκολλήσεων με γωνιακό αισθητήρα, πάνω στο δοκίμιο σχεδιάζονται οι ζώνες σάρωσης. Οι ζώνες αυτές σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τόσο της συγκολλητής κατασκευής, όσο και της δέσμης υπερήχων.

Σύμφωνα με την ακόλουθη Εικόνα 6.2, ορίζεται η «απόσταση πλήρους βήματος» (full skip distance), ως η απόσταση από το άκρο της συγκόλλησης, στην οποία αν τοποθετηθεί ο γωνιακός αισθητήρας, ηχοβολεί το άκρο της συγκόλλησης.



Εικόνα 6.2 : Ορισμός αποστάσεως πλήρους βήματος της δέσμης της κεφαλής.

Με βάση την προηγούμενη εικόνα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ελάσματος (T : πάχος ελάσματος) και της δέσμης (θ_R : η γωνία δέσμης αισθητήρα), υπολογίζονται οι τιμές «πλήρους βήματος» και «διαδρομής ήχου», από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{Πλήρες βήμα} = 2T \cdot \tan\theta_R$$

$$\text{Διαδρομή ήχου} = T / \cos\theta_R$$

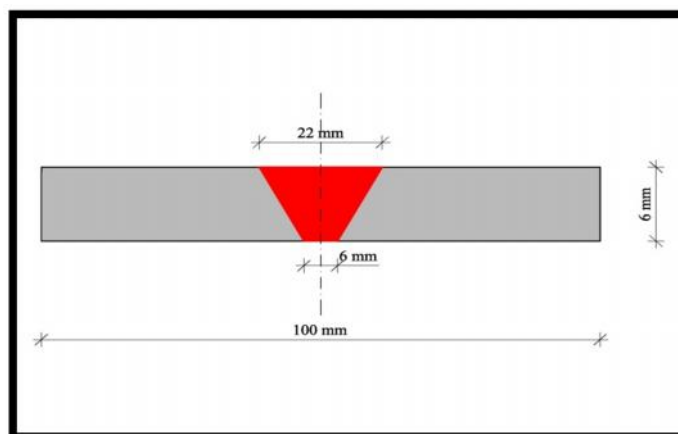
Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, και λαμβάνοντας υπόψη το πάχος της συγκόλλησης (V), υπολογίζονται και σχεδιάζονται οι ζώνες σάρωσης προκειμένου να ελέγχονται η ρίζα, το σώμα και τα άκρα της συγκόλλησης.

- Η ζώνη Z1 σε απόσταση μισού βήματος από τον άξονα της συγκόλλησης.
- Η ζώνη Z2 σε απόσταση πλήρους βήματος από τον άξονα της συγκόλλησης μείον το μισό πάχος της συγκόλλησης.
- Η ζώνη Z3 σε απόσταση πλήρους βήματος από τον άξονα της συγκόλλησης πλέον του μισού πάχους της συγκόλλησης.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται τόσο δεξιά όσο και αριστερά του άξονα της συγκόλλησης.

6.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Αφού ορίστηκε η γεωμετρία της συγκόλλησης, ακολούθησε σχεδιασμός της τομής της συγκόλλησης κάθε δοκιμίου με κλίμακα 1:1 σε υπολογιστικά φύλλα και η χάραξη των ζωνών σάρωσης, με στόχο μέσω της χρήσης ειδικών διαφανειών που απεικονίζουν τις δέσμες των υπερηχητικών κεφαλών, να επιλεγούν οι κατάλληλες γωνιακές κεφαλές για τη σάρωση αυτών στις επιθυμητές ζώνες. Ως διαστάσεις της γεωμετρίας, θεωρήθηκε τραπέζιο με μεγάλη βάση μήκους ίσου με τη διάμετρο του περιουχένιου του εργαλείου που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση των πλακών από αλουμίνιο και ως μικρή βάση μήκους, ίσου, με το βάθος διείσδυσης του εργαλείου. Επιλέχθηκε γωνιακή κεφαλή 70° και συχνότητας 2.25 MHz, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6.4 μαζί με άλλες γωνιακές κεφαλές που απερρίφθησαν καθώς δεν κάλυπταν βασικά κριτήρια που εξηγούνται και στο υποκεφάλαιο 6.4.4.



Εικόνα 6.3 : Επιλεγθείσα γεωμετρία συγκόλλησης προς έλεγχο.



Εικόνα 6.4 : Τύπος κεφαλής 70° που επιλέχθηκε, καθώς και άλλες γωνιακές κεφαλές.

6.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

6.4.1 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά σε όλες τις απαραίτητες προετοιμασίες που πρέπει να γίνουν, πριν αρχίσει ο έλεγχος της συγκόλλησης. Αρχικά, μία προκαταρκτική οπτική επιθεώρηση της συγκόλλησης είναι απαραίτητη. Πολύ χρήσιμο είναι να γνωρίζουμε διάφορες πληροφορίες όπως τη μέθοδο εκτέλεσης, τα υλικά τόσο του τεμαχίου, εάν έγινε διαμόρφωση στα τεμάχια πριν τη συγκόλλησή τους, τις θερμοκρασιακές επιδράσεις και τέλος εάν έχουν γίνει οποιεσδήποτε επιδιορθώσεις. Όλα αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να ελέγχονται οπτικά, όσο είναι δυνατόν βέβαια, κατά μήκος της ραφής. Τα αποτελέσματα του οπτικού ελέγχου θα πρέπει να καταγράφονται, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται σε εμφανή ελαττώματα όπως: επιφανειακή καμπυλότητα, μέγεθος διείσδυσης στη ρίζα της ραφής, διαφορετικό πάχος μετάλλου δίπλα από τη ραφή, έκταση της ενίσχυσης της ραφής, παρουσία μεγάλων επιφανειακών ρωγμών, φινίρισμα ραφής και κακή ευθυγράμμιση των προς συγκόλληση τεμαχίων.

Κατά τη διάρκεια του οπτικού ελέγχου, είναι και η κατάλληλη στιγμή να εντοπίσουμε και να σημειώσουμε τον άξονα συμμετρίας της ραφής (centerline). Ακριβής γνώση του άξονα αυτού είναι πολύ σημαντική για το σωστό έλεγχο της ραφής όπως θα διαπιστώσουμε και στη συνέχεια.

6.4.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Η επιφάνεια του τεμαχίου που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της συγκόλλησης, πρέπει να επιτρέπει την άνετη κίνηση της κεφαλής και να παρέχει ικανοποιητικές συνθήκες για τη μετάδοση των υπερηχητικών κυμάτων. Για αυτό το λόγο, η επιφανειακή τραχύτητα, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 6 μm . Τραχύτητα μεγαλύτερη των 6 μm μπορεί να αλλοιώσει το σχήμα της δέσμης των υπερήχων, να μειώσει την ευαισθησία και να οδηγήσει σε λάθη κατά τον εντοπισμό των ελαττωμάτων.

Επιπλέον, από κάθε πλευρά της ραφής και για μία απόσταση ίση με $1 \frac{1}{4}$ της διαδρομής του υπερήχου (skip distance), η ραφή θα πρέπει να είναι καθαρή και να μην έχει πιτσιλιές συγκόλλησης, ασταθείς φλοιούς σκουριάς ή ακαθαρσιών, εγκοπές, αυλακώσεις, σκόνη, γρέζια από μηχανική κατεργασία και οτιδήποτε άλλο που να εμποδίζει τον έλεγχο. Για να επιτευχθεί αυτό, πολλές φορές απαιτείται λείανση της επιφάνειας με έναν κατάλληλο λειαντικό τροχό. Αντίθετα, φλοιοί στην επιφάνεια οι οποίοι έχουν καλή συνοχή με το τεμάχιο και είναι αρκετά λείοι, όπως λεπτά στρώματα μπογιάς, δεν αφαιρούνται κατά τον έλεγχο.

6.4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΓΡΟΥ ΣΥΖΕΥΞΗΣ

Η επιλογή του υγρού σύζευξης γίνεται σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Να υπενθυμίσουμε, ότι η επιλογή γίνεται με βάση την επιφανειακή τραχύτητα του τεμαχίου, τη θερμοκρασία του και τη θέση της επιφάνειας στο χώρο (π.χ. εάν είναι κατακόρυφη, ελάχιστα ή και καθόλου κεκλιμένη). Τέλος σημαντικό είναι το υγρό να μην είναι επιβλαβές για το τεμάχιο.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, ελέγχθηκαν συγκολλήσεις αλουμινίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για τις συνθήκες αυτές, το υγρό προσαρμογής που επιλέχθηκε είναι η γλυκερίνη, καθώς παρουσιάζει πολύ καλές ακουστικές ιδιότητες χωρίς να αλλοιώνεται η σύστασή της.

6.4.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΕΦΑΛΩΝ

Η επιλογή των κεφαλών πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη πολλούς παράγοντες, οι οποίοι, πολλές φορές, αντικρούουν ο ένας τον άλλον. Για παράδειγμα, κεφαλές χαμηλής συχνότητας είναι καλύτερες, από πλευράς διείσδυσης και διακριτικής ικανότητας, όταν ελέγχουμε ανώμαλες επιφάνειες, γιατί οι υπέρηχοι χαμηλών συχνοτήτων δεν έχουν μεγάλη απόκλιση από τον άξονα της δέσμης, σε σχέση με αυτή των υπερήχων υψηλής συχνότητας.

Γενικά όμως, η συχνότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώστε να έχουμε μέγιστη διακριτική ικανότητα και ανάλυση. Βλέπουμε λοιπόν, ότι η απόφαση για το είδος της κεφαλής που θα χρησιμοποιήσουμε, αποτελεί προϊόν συμβιβασμού ανάμεσα σε πολλούς παράγοντες.

Η συχνότητα της κεφαλής, επιλέγεται με βάση το μέγεθος των κόκκων του υλικού, τον προσανατολισμό των ελαττωμάτων, τη μέγιστη ακρίβεια που θέλουμε, την απόσταση που έχει να διανύσει ο υπέρηχος κ.ά. Χαμηλές συχνότητες είναι καλύτερες όταν πρόκειται να ελέγξουμε υλικά με ανώμαλη επιφάνεια, αφού η διείσδυση είναι μεγαλύτερη στις συχνότητες αυτές, ενώ υψηλότερες χρησιμοποιούνται για ανίχνευση πολύ μικρών ελαττωμάτων, αφού τότε το μήκος κύματος του υπερήχου είναι μικρότερο και η κεφαλή έχει καλύτερη ανάλυση. Οι κεφαλές εγκαρσίων κυμάτων παρέχουν καλύτερη ανάλυση από ότι οι αντίστοιχες διαμηκών ίδιας συχνότητας, γιατί για την ίδια συχνότητα και για στερεά σώματα, έχουμε μικρότερο μήκος κύματος στα εγκάρσια από ότι στα διαμήκη κύματα. Όταν θέλουμε να ελέγξουμε μεγάλες επιφάνειες σε μικρό χρονικό διάστημα, χρησιμοποιούμε μεγάλες κεφαλές χαμηλής συχνότητας. Συνήθως οι τιμές συχνότητας κυμαίνονται από 2 MHz έως 5 MHz.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο για την επιλογή της συχνότητας της κεφαλής, είναι η εξασθένηση που παρουσιάζει το υλικό. Με τον όρο εξασθένηση, εννοούμε όλες τις

απώλειες του παλμού κατά τη διάδοσή του, εκτός από αυτές που οφείλονται στη γεωμετρία του. Οι απώλειες αυτές οφείλονται στο διασκορπισμό του παλμού, στην εσωτερική απορρόφηση λόγω της τριβής μεταξύ των σωματιδίων του υλικού και στη συχνότητα του υπερήχου. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξασθένιση.

Στα περισσότερα υλικά, με κατάλληλη επιλογή συχνότητας και για διαδρομή υπερήχου μικρότερη των 75 mm, η εξασθένιση αυτή είναι αμελητέα. Εάν για οποιουδήποτε λόγους εμφανίζεται έντονη εξασθένιση (χονδρόκοκκο υλικό), ο ελεγκτής πρέπει να επιλέξει διαδρομή παλμού μικρότερη των 75 mm.

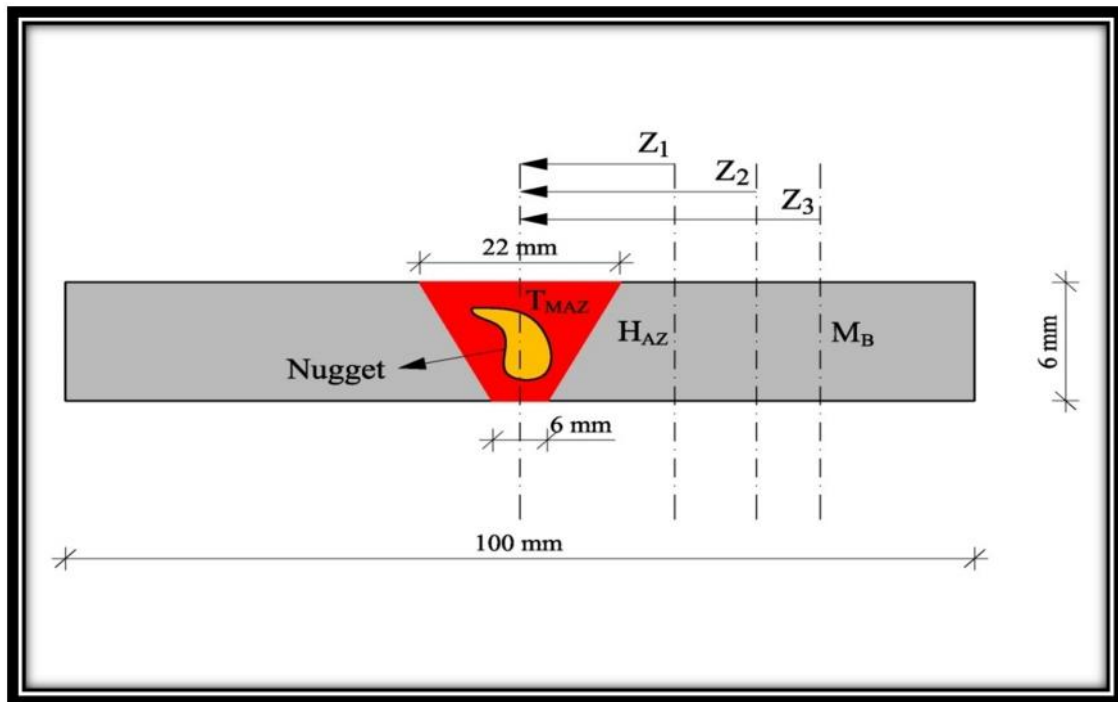
Το μέγεθος και το σχήμα της κεφαλής, εξαρτώνται από την εκάστοτε εφαρμογή. Συνήθως οι κεφαλές έχουν σχήμα κυκλικό, τετραγωνικό ή παραλληλόγραμμο. Για έλεγχο συγκολλήσεων, το μέγεθος κυμαίνεται συνήθως από 6 – 28 mm διάμετρο για κυκλικές, και από 5 – 24 mm το μήκος κάθε πλευράς για τετραγωνικές κεφαλές. Κεφαλές παραλληλόγραμμου σχήματος, συνίσταται να έχουν λόγο μήκους προς πλάτος μικρότερο από 2.

Η γωνία της κεφαλής, πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να παίρνουμε πάντα ένδειξη από σημαντικά ελαττώματα, όπως ρωγμές, ατελή τήξη στα τοιχώματα και στη ρίζα της ραφής, πορώδες και εγκλείσματα σκουριάς. Γενικά, κατά την επιλογή της γωνίας πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη το πάχος του υλικού, τη διαμόρφωση που τυχόν έχει γίνει στα προς συγκόλληση τεμάχια και το είδος του ελαττώματος που πρόκειται να εντοπίσουμε. Για να πάρουμε καλή αντήχηση από ένα ελάττωμα, η γωνία που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι τέτοια ώστε ο παλμός να χτυπήσει κάθετα ή σχεδόν κάθετα σε αυτό.



Εικόνα 6.5 : Εκπομπή γωνιακής κεφαλής στη ρίζα συγκόλλησης.

Οι γωνίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι 45°, 60° και 70°. Η κεφαλή των 70° είναι κατάλληλη για τις περισσότερες εφαρμογές για πάχη από 10 mm έως 35 mm, γεγονός που επιβεβαιώνει την επιλογή μας στην παρούσα εργασία. Για πάχη μεγαλύτερα των 35 mm χρησιμοποιούνται κεφαλές κυρίως 45° και 60°. Τέλος, μερικοί κατασκευαστές, παρέχουν στη γκάμα των προϊόντων τους, κεφαλές μεταβλητής γωνίας οι οποίες όμως, δεν χρησιμοποιούνται πολύ συχνά. Η επιλογή της σωστής γωνιακής κεφαλής, γίνεται επιμέρους μέσω διαγραμμάτων της υπερηχητικής δέσμης για κάθε κεφαλή, όπου σε συνδυασμό με το σχεδιασμό της τομής της γεωμετρίας της συγκόλλησης που πρόκειται να ελεγχθεί, καταλήγουμε και στον υπολογισμό – σχεδιασμό των ζωνών σάρωσης.



Εικόνα 6.6 : Ζώνες συγκόλλησης - Ζώνες σάρωσης ελέγχου της FSW.

6.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

6.5.1 ΚΑΘΕΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Για τη βαθμονόμηση της διάταξης παχυμέτρησης χρησιμοποιούνται κλιμακωτά δοκίμια βαθμονόμησης (step wedge calibration block –VW). Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6.7), δίνεται το κλιμακωτό δοκίμιο βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε στη μεταπτυχιακή εργασία. Αποτελείται από πέντε βαθμίδες οι οποίες διαφέρουν κατά 2,5 mm μεταξύ τους. Το δοκίμιο αυτό χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση κεφαλών διπλού κρυστάλλου για τον έλεγχο επίπεδων επιφανειών ή με πολύ μικρή καμπυλότητα. Λαμβάνονται οι δύο ακραίες τιμές πάχους, προκειμένου να σταθμιστεί το σφάλμα μέτρησης που οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης.



Εικόνα 6.7 : Πρότυπο βαθμονόμησης κεφαλής καθέτου δέσμης.

6.5.2 ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Για τη βαθμονόμηση των γωνιακών αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο V2. Το δοκίμιο αυτό είναι κατασκευασμένο από ειδικό κράμα χάλυβα που έχει υποστεί κατάλληλη θερμική επεξεργασία προκειμένου να αποκτήσει τη μέγιστη δυνατή ομογένεια. Έχει μήκος 75 mm και αποτελείται από δύο καμπύλα τμήματα με ακτίνες R_1 και R_2 , 25 και 50 mm αντίστοιχα. Τέλος, φέρει διαμπερή οπή διαμέτρου 5 mm κατά το πάχος του. Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλαμβάνει τρία στάδια:

- Εύρεση σημείου εξόδου.
- Επαλήθευση γωνίας εξόδου γωνιακής κεφαλής υπερήχων.
- Βαθμονόμηση διάταξης καταγραφής.

Πριν την υλοποίηση κάθε σταδίου πραγματοποιείται έλεγχος στην τιμή της ταχύτητας των υπερήχων και ανιχνεύεται ο αρχικός παλμός. Η ταχύτητα πρέπει να είναι αυτή που αντιστοιχεί στο μέταλλο του δοκιμίου. Ο αρχικός παλμός εμφανίζεται θέτοντας στην παράμετρο delay, την τιμή 0.

1. Για την εύρεση του σημείου εξόδου μετακινείται η γωνιακή κεφαλή δεξιά - αριστερά έως ότου μεγιστοποιηθεί ο παλμός στην οθόνη καταγραφής. Σημειώνεται η θέση εξόδου στην κεφαλή.
2. Για την επαλήθευση της γωνίας εξόδου της γωνιακής κεφαλής υπερήχων, τοποθετείται η κεφαλή στην αντίστοιχη θέση της στο δοκίμιο V2 (κεφαλή 45° στη θέση των 45° κ.ο.κ). Αναμένεται μεγιστοποίηση του παλμού.
3. Για τη βαθμονόμηση της διάταξης καταγραφής χρησιμοποιούνται οι ρυθμίσεις της διάταξης καταγραφής width, delay. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση απαιτούνται τρεις παλμοί που αντιστοιχούν σε τρεις ανακλάσεις: οι δύο παλμοί χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των παραμέτρων width και delay και ο τρίτος για την επαλήθευση της διαδικασίας.

Πιο αναλυτικά:

- Αρχικά μέσω της ρύθμισης width ρυθμίζεται το εύρος οθόνης στα 250 mm.
- Ηχοβολώντας προς το R_{25} και ρυθμίζοντας την παράμετρο delay τοποθετείται η πρώτη ανάκλαση που λαμβάνεται στα 25 mm.
- Ρυθμίζοντας την παράμετρο width, τοποθετείται η δεύτερη ανάκλαση στα 100 mm.
- Γυρνώντας την κεφαλή και ηχοβολώντας προς το R_{50} , ελέγχεται αν η πρώτη ανάκλαση εμφανίζεται στα 50 mm. Σε περίπτωση που δε συμβαίνει κάτι τέτοιο επαναλαμβάνονται τα δυο παραπάνω στάδια.



Εικόνα 6.8 : Πρότυπο βαθμονόμησης κεφαλής γωνιακής δέσμης.

6.6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΑΧΥΜΕΤΡΗΣΗΣ

Η παχυμέτρηση πραγματοποιείται με την τεχνική της παλμοηγούς αφού έχει προηγηθεί βαθμονόμηση των αισθητήρων κάθετης πρόσπτωσης μονού ή διπλού κρυστάλλου. Χρησιμοποιήθηκε κεφαλή συχνότητας 2,5 MHz και διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, (Εικόνα 6.9). Πρόκειται για τη φορητή συσκευή παχυμέτρησης της StressTel T-SCOPE III.



Εικόνα 6.9 : Φορητή συσκευή παχυμέτρησης StressTel T-SCOPE III.

Στους αισθητήρες μονού κρυστάλλου, όταν χρησιμοποιούνται, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μήκος της νεκρής ζώνης της δέσμης, η οποία οπωσδήποτε πρέπει να αποσβένεται στο προστατευτικό του αισθητήρα (delayblock or shoe). Σε περίπτωση που το προστατευτικό δεν έχει το απαραίτητο πάχος (π.χ. έχει μειωθεί λόγω φθοράς), τότε μπορεί να συμπεριληφθεί σφάλμα στην παχυμέτρηση της τάξης των 0,001-0,15 mm.

Επίσης, η χρήση αισθητήρων μονού κρυστάλλου δεν ενδείκνυται για υλικά που έχουν είτε μεγάλο συντελεστή απορρόφησης της ηχητικής ενέργειας, είτε δεν έχουν απόλυτα παράλληλες επιφάνειες (π.χ. μεγάλη τραχύτητα λόγω διάβρωσης).

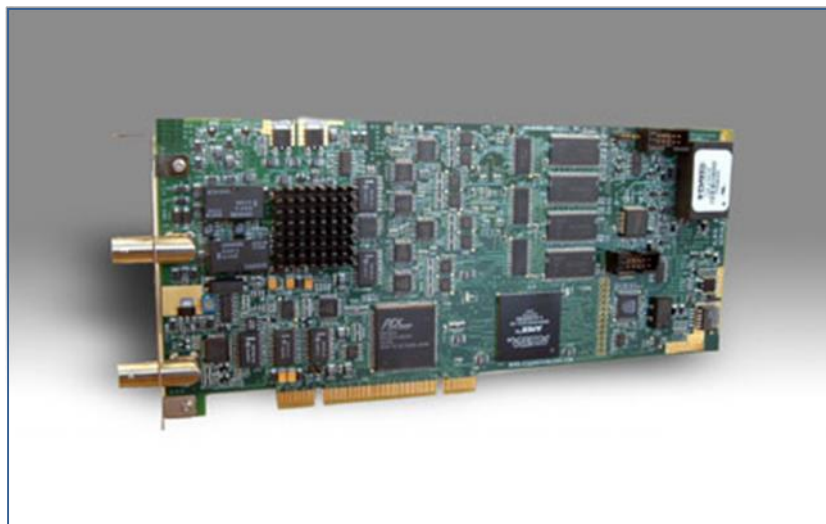
Ειδικά στη ναυπηγική, για την περίπτωση παχυμετρήσεων διαβρωμένων επιφανειών, χρησιμοποιούνται αισθητήρες διπλού κρυστάλλου. Η γεωμετρία της παραγόμενης δέσμης τους επιτρέπει καλή εστίαση και μικρή σκέδαση και η παχυμέτρηση δεν επηρεάζεται από τη νεκρή ζώνη. Ωστόσο, μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται τόσο για τη σωστή επιλογή της ζώνης εστίασής τους, όσο και για την απόκλιση στη μέτρηση που οφείλεται στη γεωμετρία της δέσμης.

Η ζώνη εστίασης δεν πρέπει να επιλέγεται στενή για παχυμετρήσεις ελασμάτων μεγάλου πάχους και αντίστροφα. Όσον αφορά στο σφάλμα μέτρησης που οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης δέσμης υπερήχων, η εφαρμογή κατάλληλης διαδικασίας βαθμονόμησης με τη χρήση κλιμακωτών δοκιμίων μειώνει σημαντικά το σφάλμα. Επίσης οι σύγχρονες διατάξεις παχυμέτρησης διαθέτουν κατάλληλο ρυθμιστή διόρθωσης της απόκλισης. Τέλος αναφέρεται ότι όλα τα δοκίμια που ελέγχθησαν ήταν πάχους 6 mm.

6.7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΩΝ

6.7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Χρησιμοποιήθηκε σταθερή διάταξη υπερήχων της εταιρείας NDT Automation, της οποίας σκοπός είναι η παραγωγή ολοκληρωμένων συστημάτων ελέγχου, παράγοντας κάρτες ελέγχου (PC boards), όπου σε συνδυασμό λογισμικού ανάλυσης και απόκτησης δεδομένων παρέχουν αξιόπιστα συστήματα υπερήχων ελέγχου – σάρωσης.

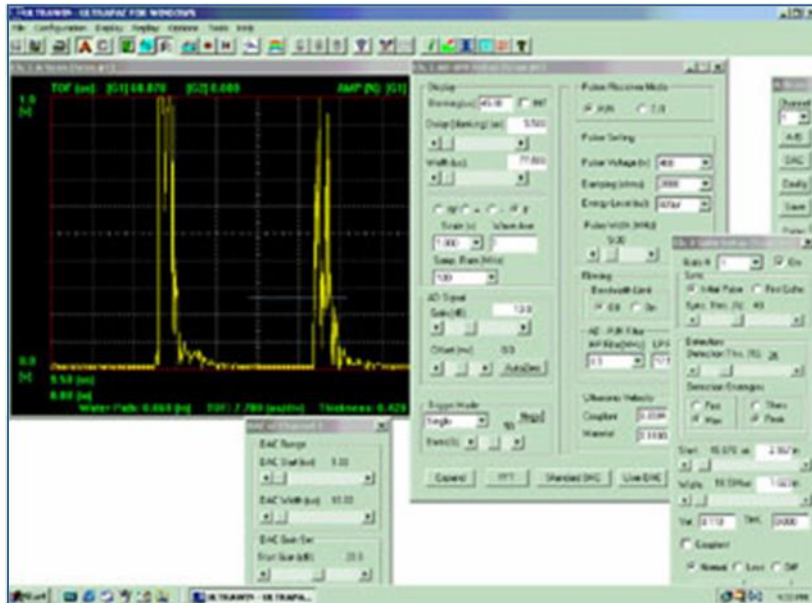


Εικόνα 6.10 : Κάρτες ελέγχου (PC boards) - NDT Automation.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι το Ultrawin™ Windows Ultrasonic A, B, C- Scan Software, το οποίο αποτελεί ένα σύστημα 32-bit με απόκτηση δεδομένων, απεικόνιση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Σχεδιάστηκε για να είναι εύχρηστο και φιλικό προς το χρήστη, με εύκολο μενού και εικονίδια, με δυνατότητες προβολής σε πραγματικό χρόνο όπως προαναφέρθηκε και με επιπλέον λειτουργίες, όπως για παράδειγμα η εξαγωγή των δεδομένων σε MS Excel και η περαιτέρω επεξεργασία αυτών.

Επιπλέον προηγμένες επιλογές περιλαμβάνουν πολλαπλές πύλες (gates), με επιμέρους ταχύτητες, μέσω ή μη περιορισμού σε B-Scan, καθώς και προαιρετικές ενότητες λογισμικού, όπως:

- ✓ TOFD
- ✓ 3D Επανάληψη
- ✓ Καμπύλες DAC
- ✓ RF Κυματομορφές



Εικόνα 6.11 : Στιγμιότυπο προγράμματος Ultrawin™ της NDT Automation.

Συνοψίζοντας το λογισμικό Ultrawin™ της NDT Automation παρέχει ευελιξία και αξιοπιστία στο μη καταστροφικό έλεγχο με υπερήχους και κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα παρακάτω :

- ✓ Λογισμικό 32- bit Windows.
- ✓ Εξαγωγή αποτελεσμάτων – μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
 - ✓ Εξαγωγή αποτελεσμάτων σάρωσης σε MS Excel.
 - ✓ Δυνατότητα πολλαπλών παλμών – λήψεων.
 - ✓ Εύκολος διαχειρισμός αρχείων.
 - ✓ Εύκολη διαχείριση των παραμέτρων σάρωσης.

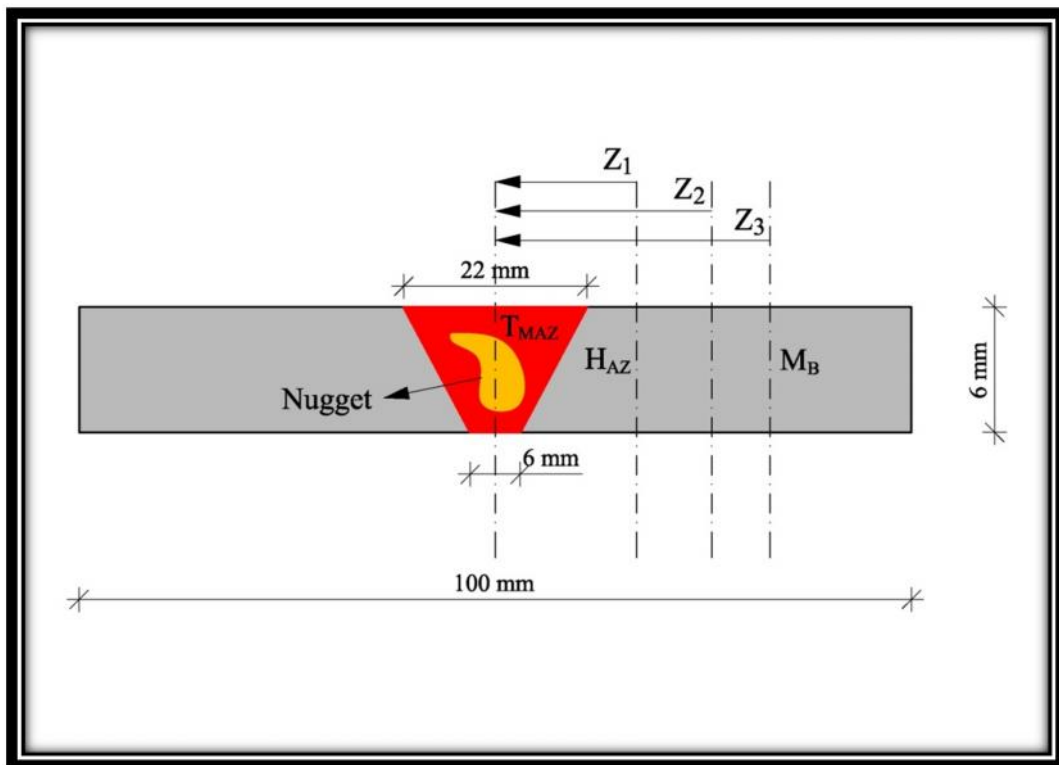
6.7.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΒΑΣΗΣ

Ο έλεγχος των επιφανειών πλευρικά της συγκόλλησης πραγματοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί το πάχος, καθώς επίσης και τυχόν φυλλοειδής μορφολογία στο εσωτερικό του μετάλλου. Όπως αναφέρθηκε, ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη χρήση αισθητήρων κάθετης πρόσπτωσης επαφής. Στην περίπτωση του ελέγχου με επαφή πραγματοποιείται σάρωση 1 στην περιοχή του μετάλλου βάσης. Έτσι κατά τον έλεγχο A-scan ενός υλικού χωρίς ατέλειες αναμένονται μία πρώτη κορυφή η οποία αντιστοιχεί στον αρχικό παλμό και μία δεύτερη, η οποία αντιστοιχεί στην ανάκλαση της δέσμης από την κάτω επιφάνεια του υλικού. Χρησιμοποιώντας την τιμή του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ των δυο ανακλάσεων, προσδιορίζεται το πάχος του υλικού στην περιοχή του M.B.

6.7.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΙΖΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Ο έλεγχος της ρίζας της συγκόλλησης πραγματοποιείται με σάρωση τύπου 1, ακολουθώντας τη ζώνη σάρωσης Z_1 . Προσοχή δίνεται σε τυχόν σήματα που εμφανίζονται για απόσταση μικρότερη της πλήρους διαδρομής ήχου τα οποία υποδηλώνουν την ύπαρξη ατελειών στη ρίζα (ατελής τήξη, ρωγμή, πόροι, ατελής διείσδυση κ.ά.). Το σήμα είναι διαφορετικό για κάθε περίπτωση ατέλειας, καθώς και η αντιμετώπιση των ενδείξεων προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εκτίμηση των χαρακτηριστικών τους.

Πιο συγκεκριμένα για ατέλειες όπως ατελής τήξη ή διείσδυση, καταγράφονται συνήθως μέχρι τρεις παλμοί. Αντίθετα για ατέλειες όπως ρωγμές ή πόρους καταγράφονται περισσότεροι των τριών παλμών.



Εικόνα 6.12 : Ζώνες συγκόλλησης - Ζώνες σάρωσης ελέγχου της FSW.

6.7.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΚΡΩΝ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Πραγματοποιείται με σάρωση τύπου 1, ακολουθώντας τις ζώνες σάρωσης Z_2 και Z_3 . Προσοχή δίνεται σε τυχόν σήματα που έρχονται σε αυτές τις αποστάσεις από τον άξονα της συγκόλλησης, τα οποία υποδηλώνουν υποκοπή.

6.7.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΩΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ

Ο έλεγχος του σώματος της συγκόλλησης πραγματοποιείται με σαρώσεις τύπου 1 και 2 ουσιαστικά μεταξύ των ζωνών σάρωσης Z_2 και Z_3 . Όταν το υπό εξέταση έλασμα είναι μικρού πάχους αρκούν μία ή δύο σαρώσεις τύπου 1 σε διαφορετικές τροχιές παράλληλες και μεταξύ των ζωνών σάρωσης Z_2 και Z_3 . Όταν το υπό εξέταση έλασμα είναι μεγάλου πάχους τότε απαιτείται συνδυασμός σαρώσεων τύπου 1 και 2.

Πιο συγκεκριμένα κινούμενοι σε τροχιά παράλληλη μεταξύ των ζωνών Z_2 και Z_3 , δίνεται προσοχή σε τυχόν σήματα που αντιστοιχούν σε διαδρομή ήχου μεγαλύτερη από μία πλήρη και μικρότερη από δύο πλήρεις διαδρομές ήχου. Ευθύς μόλις εντοπισθεί ένας τέτοιος παλμός μεγιστοποιείται με σάρωση τύπου 1 και στη συνέχεια με σάρωση τύπου 2. Αν δε μεγιστοποιείται μεταξύ των δύο αποστάσεων αποτελεί άσχετη ένδειξη και δε λαμβάνεται υπόψη. Σε περίπτωση που μεγιστοποιείται εντός των δύο αποστάσεων και αναλόγως της φύσης του παλμού, αποφασίζεται η αντίστοιχη τεχνική αντιμετώπισης (μεθοδολογία ελέγχου ρίζα συγκόλλησης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στις τρεις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της συγκόλλησης δια τριβής με ανάδευση, σε πλάκες αλουμινίου 5083 – H111, με βάθος διείσδυσης του εργαλείου 6mm και κλίση 2° . Πρόκειται για ελάσματα πάχους 6 mm. Η συγκόλληση 12, έγινε με κυλινδρικό πείρο που φέρει σπείρωμα, ενώ οι άλλες δύο με κωνικό (Σχήμα 7.3 – 7.4). Στον πίνακα 7.1, παρουσιάζονται οι συνθήκες συγκόλλησής τους.

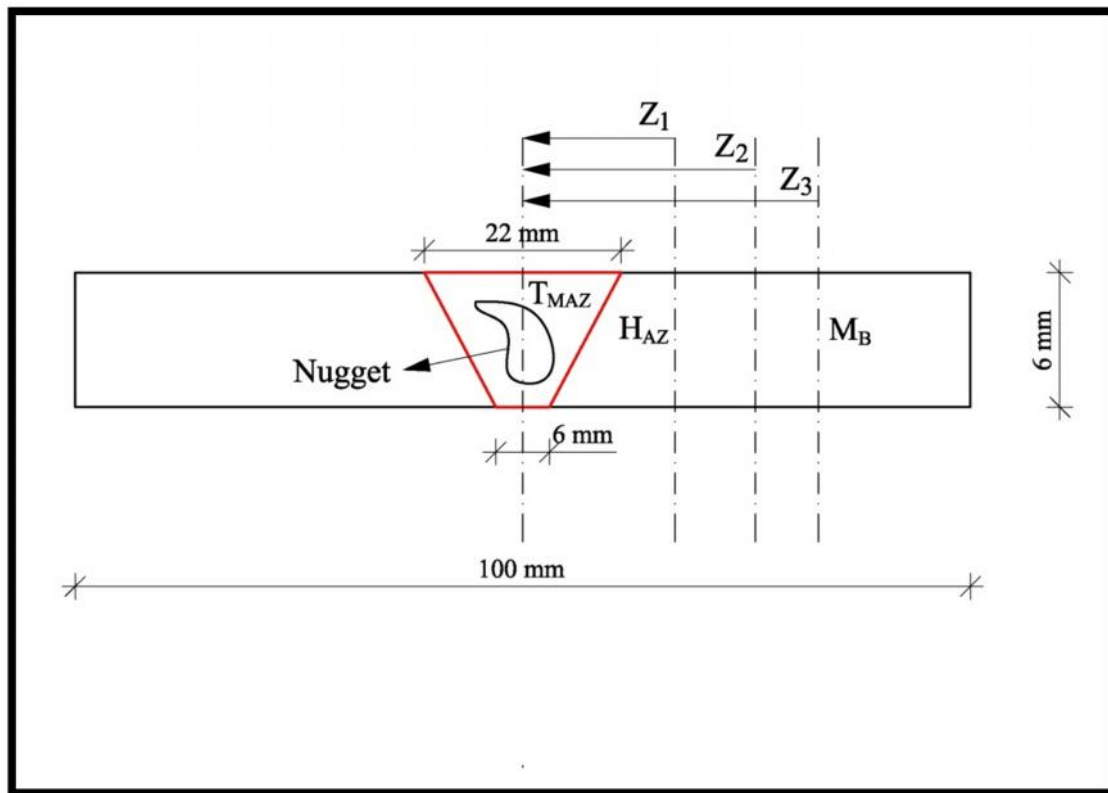
Τα τρία δοκίμια με κωδικούς (6,12,11) από αλουμίνιο 5083-H111, των οποίων οι συγκολλήσεις ελέγχθηκαν απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7.1: Από κάτω προς τα πάνω, δοκίμια 6, 12 και 11 αντίστοιχα.

Παρατηρούνται καθαρά στην εικόνα οι ζώνες σάρωσης που χαρακτήριζαν για τον έλεγχο της συγκόλλησης και από τις δύο πλευρές του άξονα, καθώς και με κόκκινα σημάδια, πιθανά σημεία ατελειών που σημειώθηκαν για περαιτέρω ανάλυση κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Μέσω κατάλληλων τύπων υπολογίστηκαν οι ζώνες σάρωσης, οι οποίες είναι ίδιες και για τα τρία δοκίμια. Έχουμε, ζώνη σάρωσης $Z_1 = 16,5 \text{ mm}$, ζώνη σάρωσης $Z_2 = 26 \text{ mm}$ και ζώνη σάρωσης $Z_3 = 36 \text{ mm}$.



Εικόνα 7.2 : Σχεδιασμός και ζώνες σάρωσης υπερηχητικής δέσμης για έλεγχο των δοκιμίων.

Πίνακας 7.1 : Χαρακτηριστικά συγκόλλησης δοκιμίων

Δοκίμια	Φορά συγκόλλησης	Ταχύτητα περιστροφής	Ταχύτητα πρόωσης
6	Κάθετα στην έλαση	950 rpm	85 mm/min
11	Παράλληλα στην έλαση	600 rpm	60 mm/min
12	Παράλληλα στην έλαση	750 rpm	85 mm/min



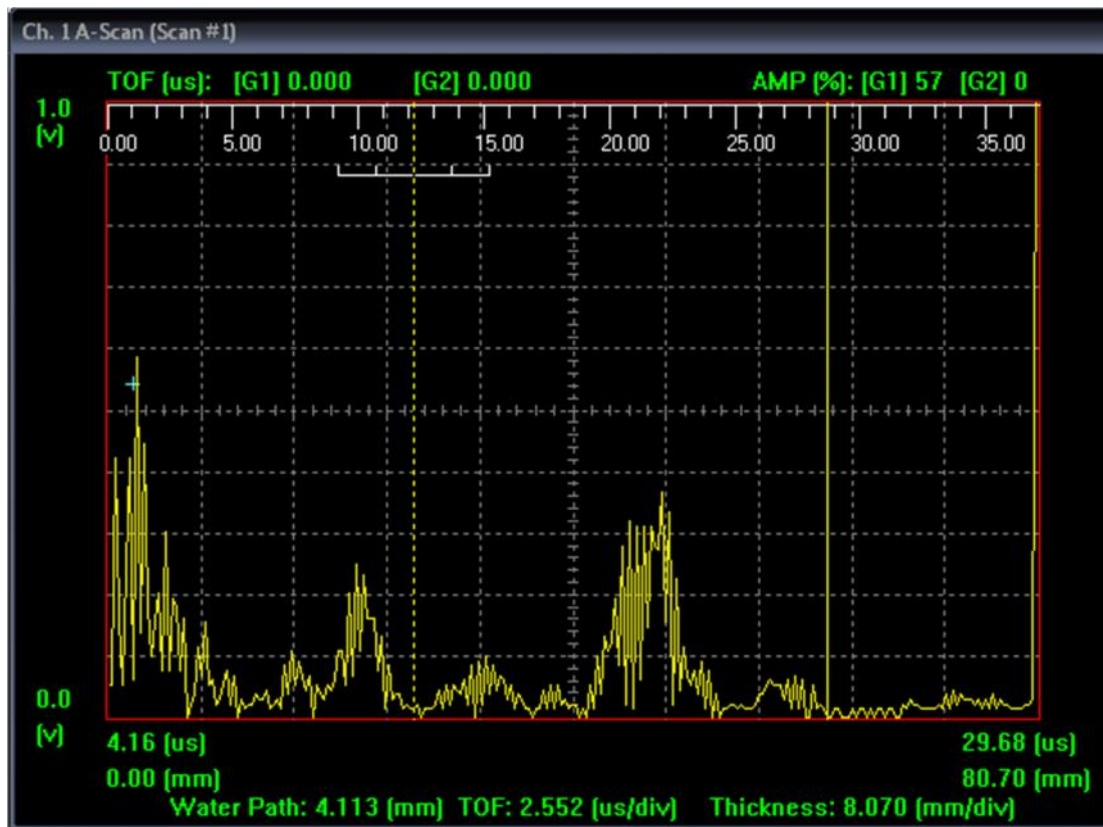
Εικόνα 7.3 : Κωνικός πείρος.



Εικόνα 7.4 : Κυλινδρικός πείρος με σπείρωμα.

ΔΟΚΙΜΙΟ 6 :

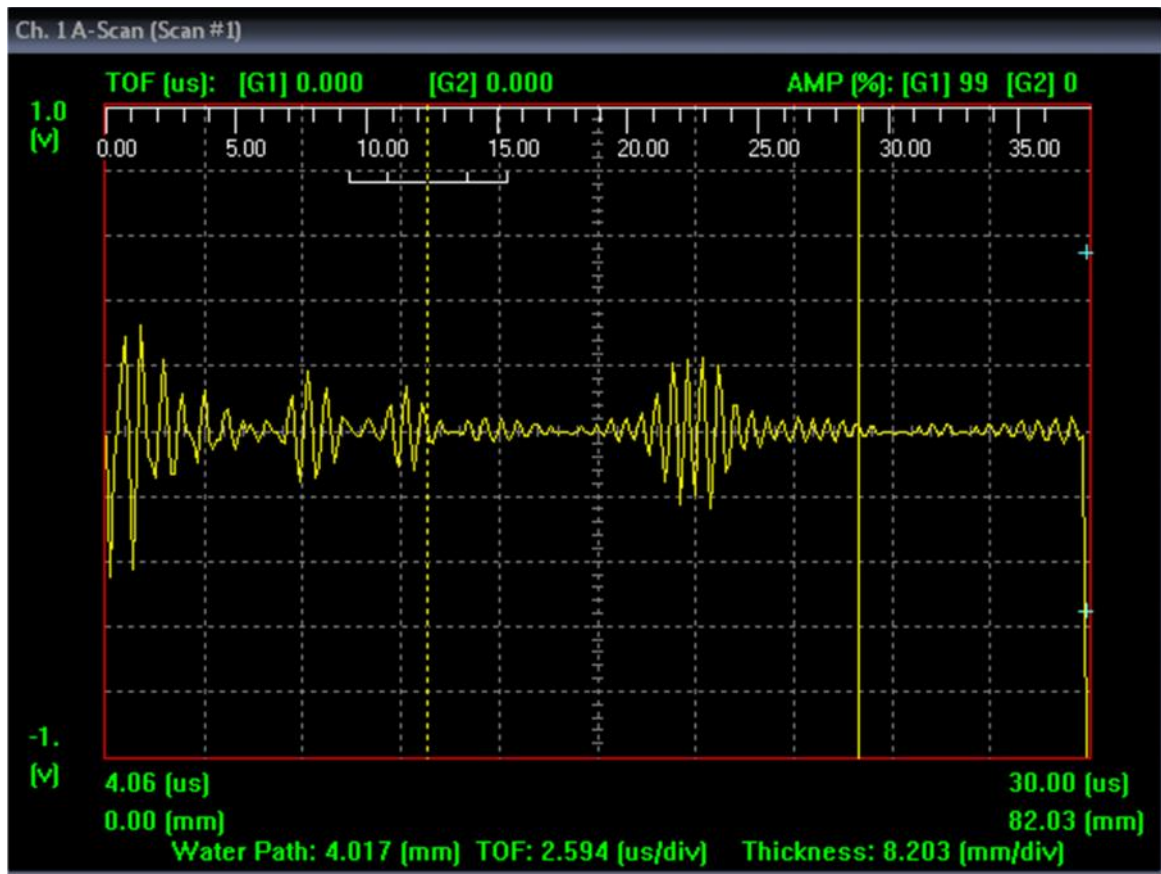
Στο δοκίμιο 6 και σε συνδυασμό από το σήμα που ελήφθη κατά τη σάρωσή του, κρίθηκε απαραίτητος ο έλεγχος για ατέλεια τύπου τούνελ (tunnel defect), κάτι που επιβεβαιώθηκε και μικροσκοπικά.



Γράφημα 7.1 : Ζώνη σάρωσης Z_1 , δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 6 (Πιθανή παρουσία ατέλειας).

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται τέρμα αριστερά της οθόνης μας, ο υγιής παλμός της ρίζας, να διαταράσσεται – μεγιστοποιείται, γεγονός που μας οδηγεί στην περαιτέρω διερεύνηση του παλμού, επικεντρώνοντας την προσοχή μας στο σημείο αυτό. Παρακάτω στο γράφημα 2, το οποίο είναι γράφημα RF, παρατηρούνται δύο επιμέρους παλμοί, εκ των οποίων ο πρώτος είναι ελαφρά μεγαλύτερης έντασης, πράγμα το οποίο μας δηλώνει την παρουσία ατέλειας (τύπου τούνελ) στη ρίζα της συγκόλλησης, ζώνη σάρωσης Z_1 .

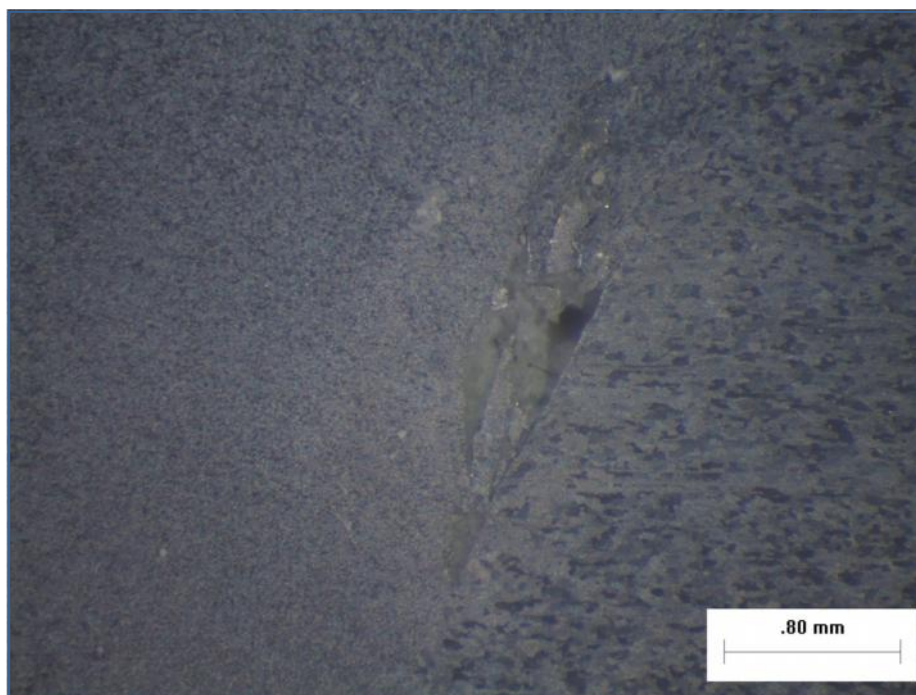
Η ατέλεια τύπου τούνελ, εκτείνεται σε όλο το μήκος της συγκόλλησης μεταξύ weld nugget zone και TMAZ, κυρίως στην προωθούμενη πλευρά. Πιθανές αιτίες είναι η ψυχρή συγκόλληση (μέθοδος στερεάς κατάστασης, δηλαδή χωρίς την παρουσία τήξεως ή θέρμανσης της διεπιφάνειας των προς συγκόλληση τεμαχίων) ή η μικρή κλίση συγκόλλησης κ.α. Σαν μειονέκτημα παρουσιάζει, την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.



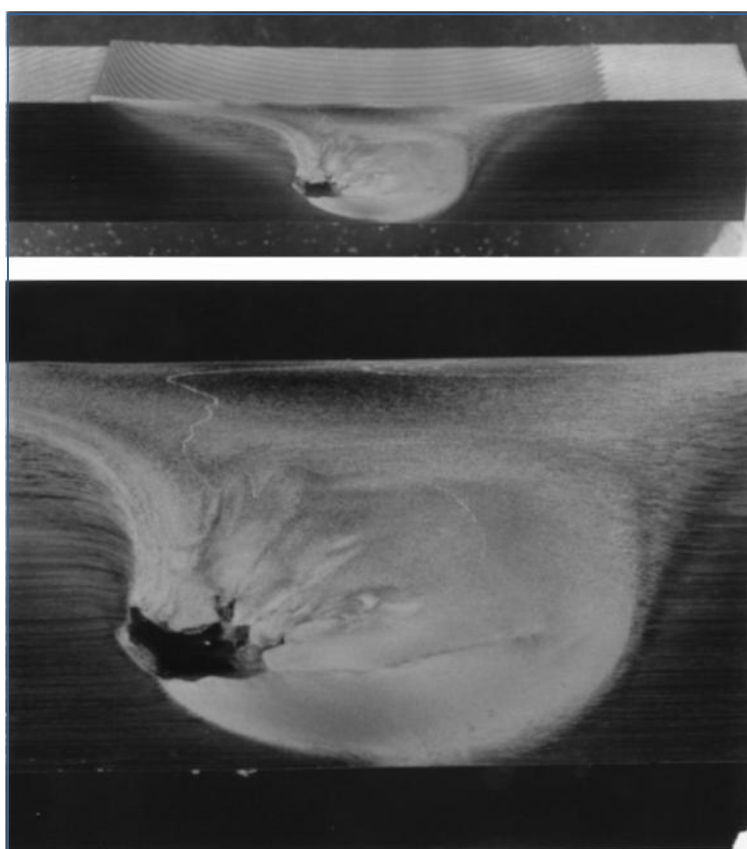
Γράφημα 7.2 : Ζώνη σάρωσης Z_1 , δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 6. Παλμοί που υποδηλώνουν ατέλεια στη ρίζα (τύπου τούνελ).



Εικόνα 7.5 : Μικροσκοπικός έλεγχος και επαλήθευση ατέλειας τύπου τούνελ.



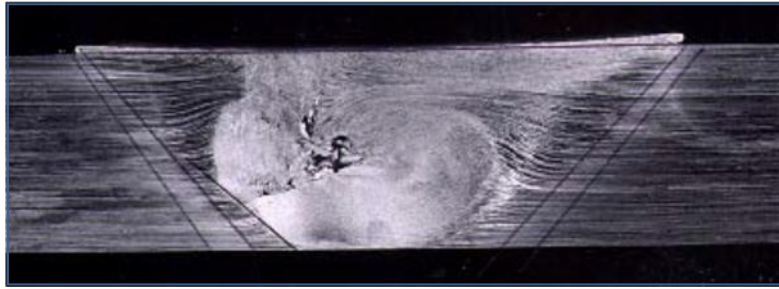
Εικόνα 7.6 : Ατέλεια τύπου τούνελ δοκιμίου 6 - Μικρογραφία.



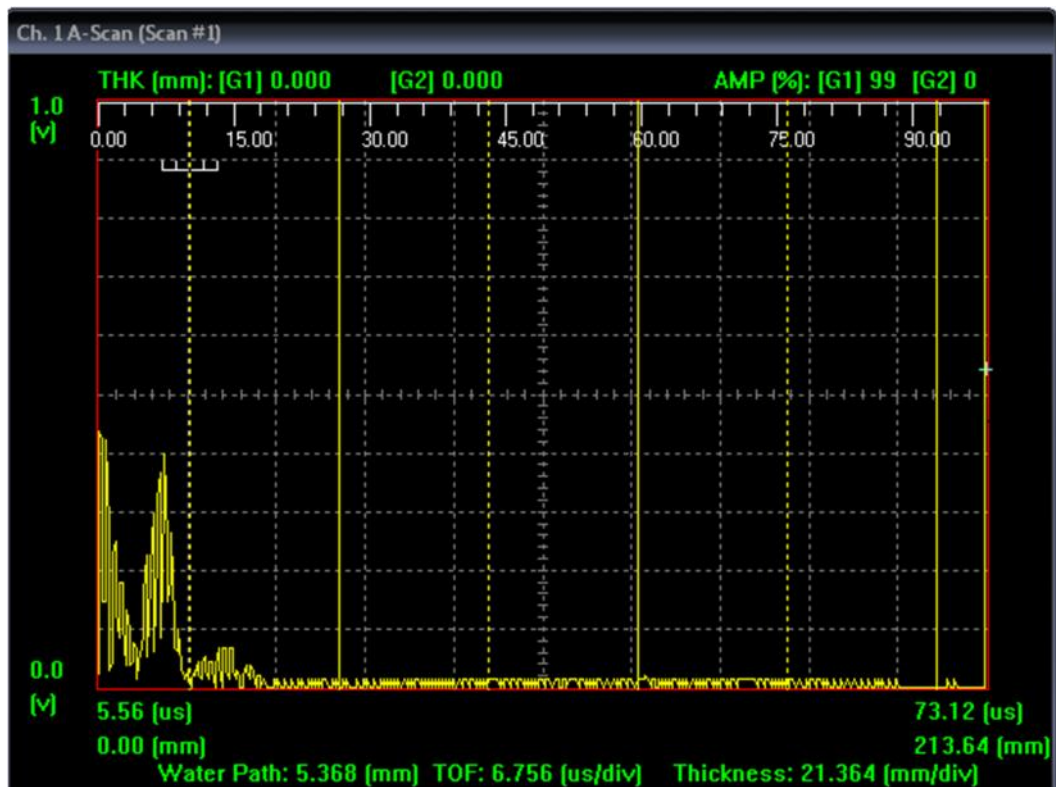
Εικόνα 7.7 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου τούνελ.

ΔΟΚΙΜΙΟ 12 :

Στην παρακάτω εικόνα παρατηρείται ατέλεια που ονομάζεται «υπερβολική ή ακανόνιστη ανάδευση» (abnormal stirring), λόγω σχήματος της weld nugget zone ή και ακόμα εξαιτίας της υπερβολικής παροχής θερμότητας. Καθοριστικό ρόλο για την εμφάνιση του φαινομένου αυτού, είναι οι υψηλές ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής του εργαλείου που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση.

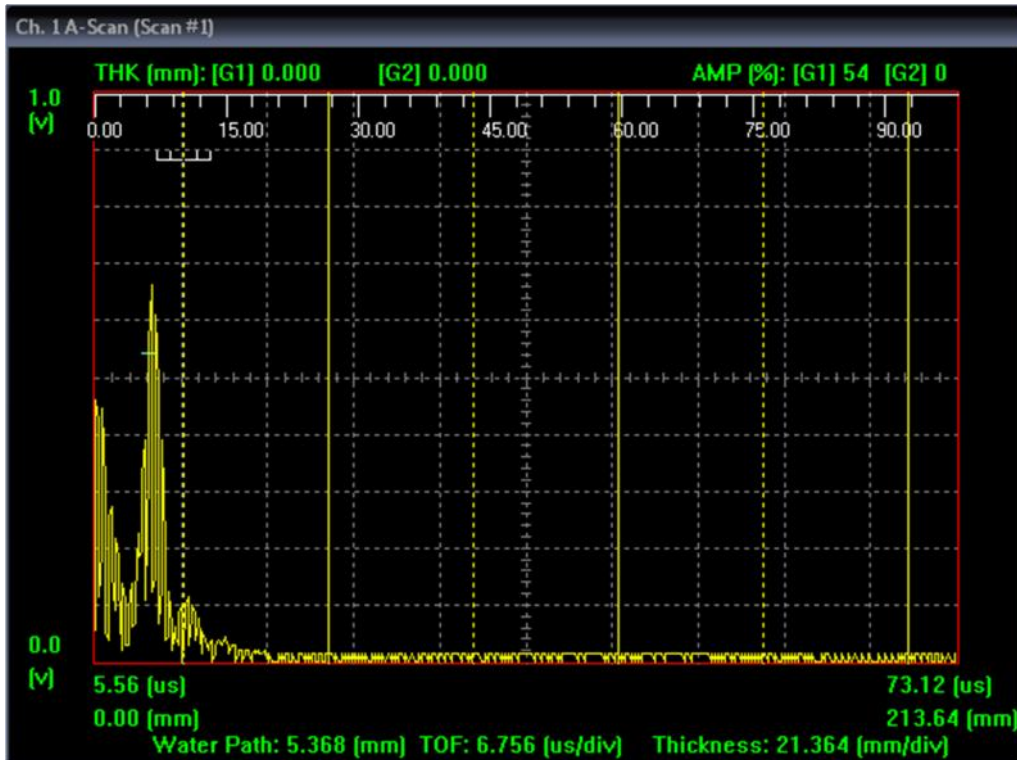


Εικόνα 7.8 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου υπερβολικής - ακανόνιστης ανάδευσης.



Γράφημα 7.3 : Ζώνη σάρωσης Z₃, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 12.

Από το γράφημα 7.4, παρατηρήθηκε μία ομοιότητα με αυτά του δοκιμίου 6 κοντα στη ρίζα της συγκόλλησης, αλλά και μέσω του γραφήματος 7.3 μεταξύ της θερμομηχανικά επηρεασμένης ζώνης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Έτσι και εδώ, παρουσιάστηκε ραγδαία μεταβολή του παλμού της υγιούς ρίζας, όπου εξετάζοντας τον παλμό και γραφικά και μετέπειτα μικροσκοπικά, εντοπίστηκε το ελάττωμα τύπου abnormal stirring.



Γράφημα 7.4 : Ζώνη σάρωσης Z₁, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 12.

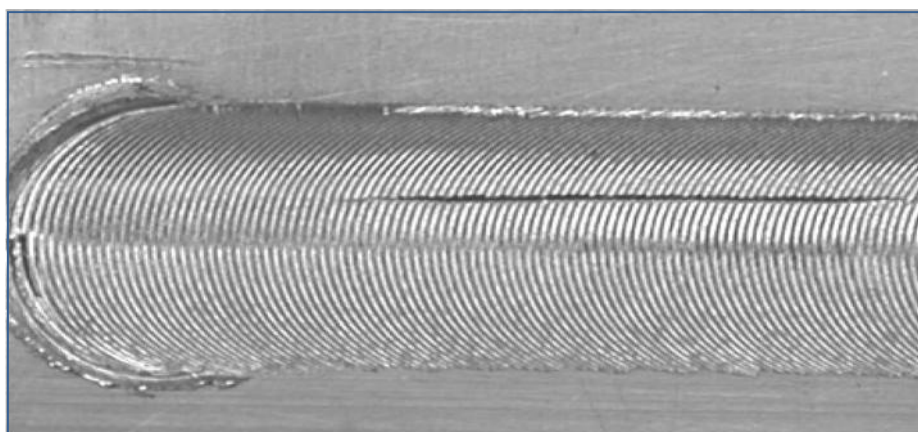


Εικόνα 7.9 : Μικροσκοπικός έλεγχος ατέλειας δοκιμίου 12.

ΔΟΚΙΜΙΟ 11 :

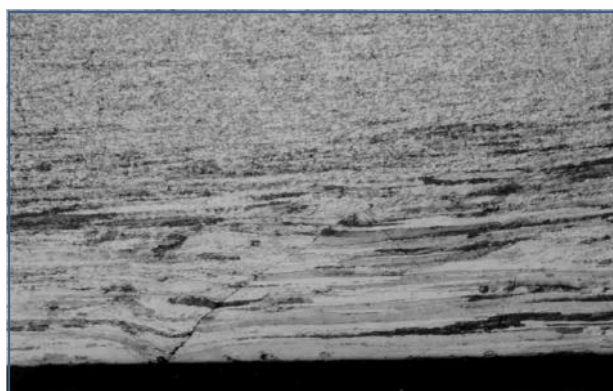
Στο δοκίμιο αυτό φαίνονται καθαρά με γυμνό μάτι δύο χαρακτηριστικά ελαττώματα:

- Ατέλεια τύπου αυλακιού (groove like defect): Ένα συνεχές ή διακοπτόμενο αυλάκι πάνω στην προωθούμενη πλευρά της συγκόλλησης. Αιτία μπορεί να αποτελέσει η χαμηλή παροχή θερμότητας που κυρίως οφείλεται στη μη επαρκή κάθετη αξονική δύναμη.



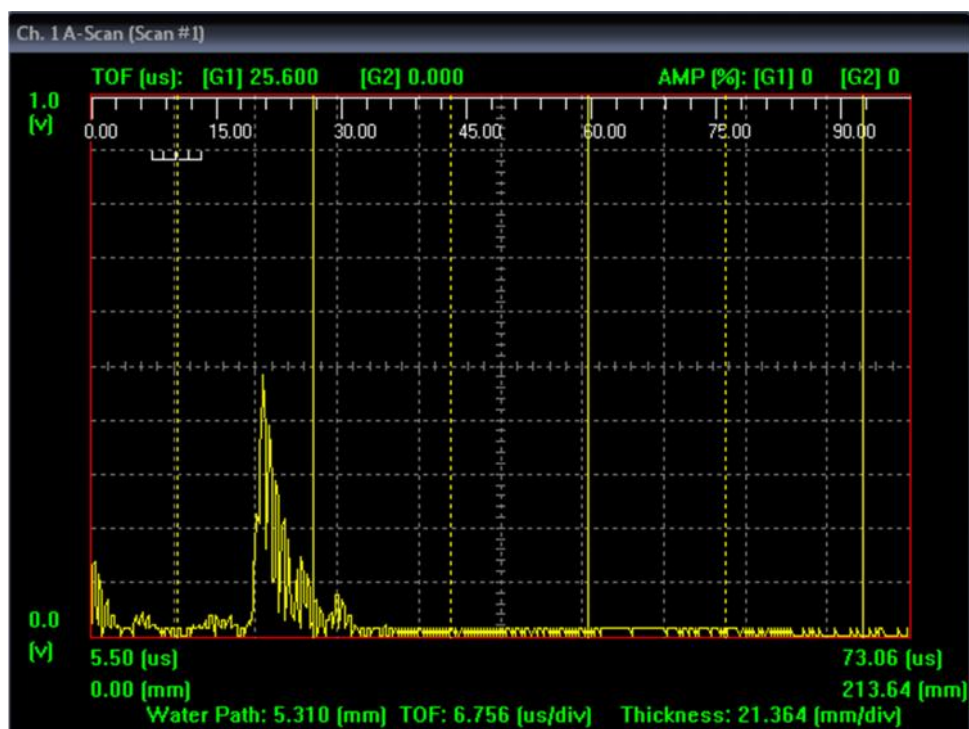
Εικόνα 7.10 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου αυλακιού.

- Ατελής διείσδυση (Lack of penetration) : Ατελής διείσδυση ή τήξη η οποία παρουσιάζεται στην πίσω πλευρά της συγκόλλησης των δύο τεμαχίων και πιθανές αιτίες είναι η μη ικανοποιητική ροή υλικού στη ζώνη ανάδευσης, που οφείλεται κυρίως λανθασμένη επιλογή ακτίνας του πείρου του εργαλείου συγκόλλησης, η οποία προκαλεί μη συμμετρική ροή υλικού κατά το πάχος της συγκόλλησης.



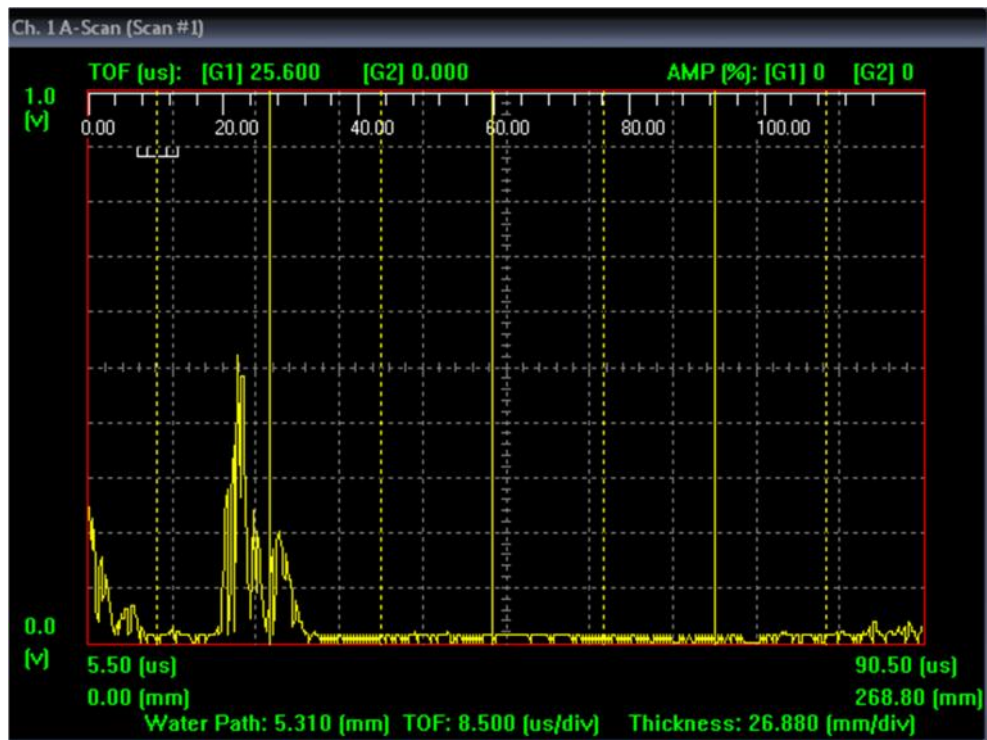
Εικόνα 7.11 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου ατελούς διείσδυσης.

Παρακάτω δίνονται γραφήματα και για τις τρεις ζώνες σάρωσης του δοκιμίου, διότι το ελάττωμα της ατελούς διεύθυνσης υπήρχε σε όλο το μήκος της συγκόλλησης και παρατηρείται παλμός ο οποίος είναι πολύ λεπτός και αρκετά μεγάλου ύψους και θα μπορούσε να προέρχεται από κάποια μεγάλη ρωγμή που βρίσκεται κάθετα ή σχεδόν κάθετα προσανατολισμένη στον άξονα της συγκόλλησης.

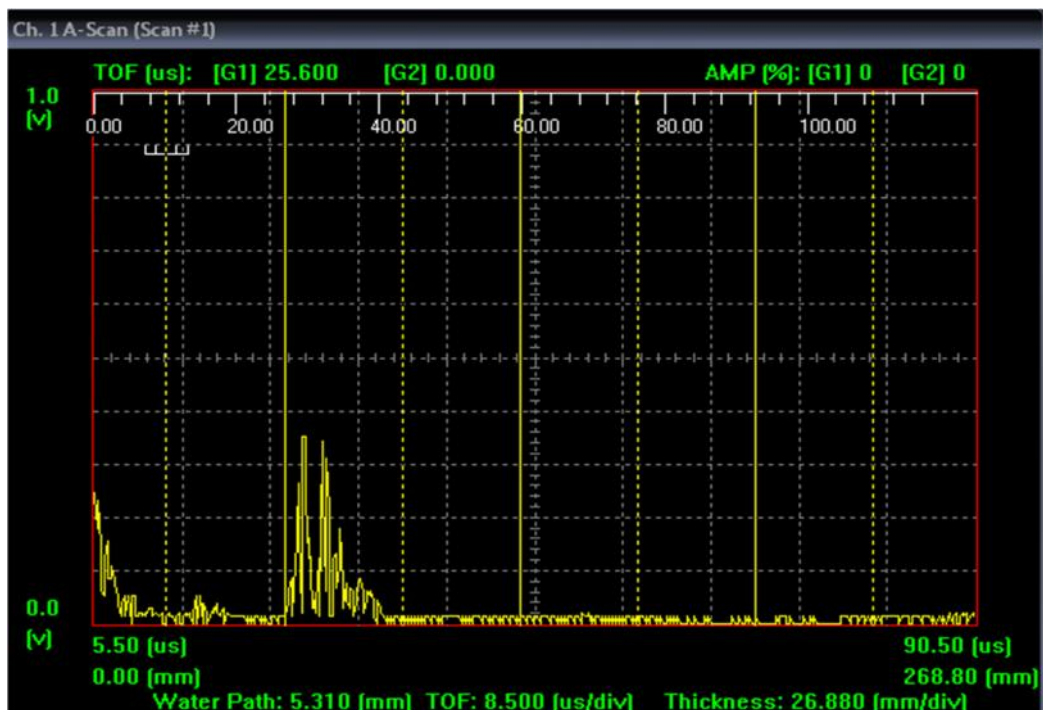


Γράφημα 7.5 : Ζώνη σάρωσης Z₁, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11.

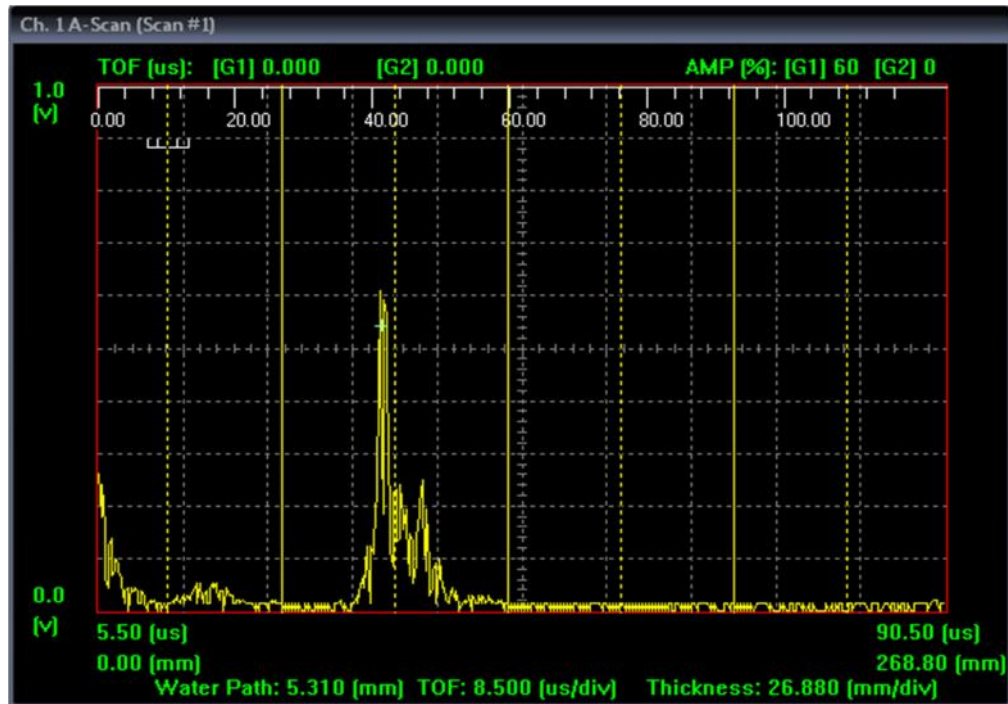
Επομένως, όπως στο γράφημα 7.5, έτσι και στα υπόλοιπα, παρατηρείται μετά τον παλμό της υγιούς ρίζας, παλμός υψηλής έντασης να συνοδεύεται από άλλους μικρότερους και πιο λεπτούς, χαρακτηριστικοί της ελλιπούς τήξης στη ρίζα της ραφής μιας συγκόλλησης.



Γράφημα 7.6 : Ζώνη σάρωσης Z₁, αριστερά του άξονα της συγκόλλησης δοκιμίου 11.



Γράφημα 7.7 : Ζώνη σάρωσης Z₂, δεξιά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11.



Γράφημα 7.8 : Ζώνη σάρωσης Z₃, αριστερά του άξονα της συγκόλλησης του δοκιμίου 11.

Τέλος αναφέρεται ότι σε όλα τα δοκίμια, παρουσιάστηκε ένα defect, το οποίο ονομάζεται 'ribbonflash' και χαρακτηρίζεται από την υπερβολική εξώθηση υλικού επί της άνω επιφάνειας, αφήνοντας ένα κυματοειδές στρώμα υλικού κατά μήκος της υποχωρούσας πλευράς. Αιτίες είναι κυρίως οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη συγκόλληση σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη κάθετη αξονική πίεση του εργαλείου προς το τεμάχιο.



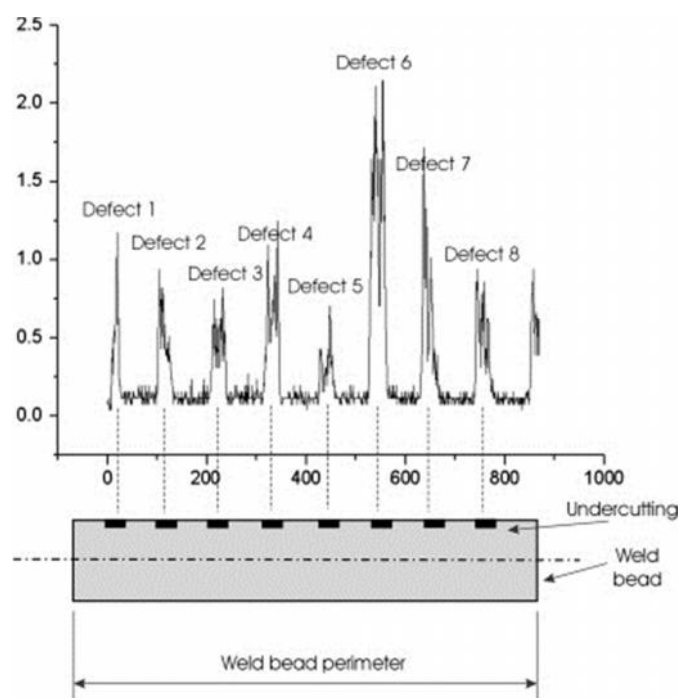
Εικόνα 7.12 : Υπόδειγμα – Περιγραφή ατέλειας τύπου ribbonflash.

Στην παρακάτω εικόνα 7.13, παρατίθενται χαρακτηριστικοί παλμοί υπερήχων, που μας υποδηλώνουν την παρουσία ατέλειας στο εξεταζόμενο υλικό μας. Έτσι μπορεί να γίνει μία σύγκριση με τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα – γραφήματα, συμπεραίνοντας την ομοιότητα μεταξύ αυτών.

Για παράδειγμα ο πρώτος παλμός του γραφήματος 7.1 από αριστερά, παρουσιάζει ομοιότητα με το defect no.2 της εικόνας, όπου επιβεβαιώθηκε και μικροσκοπικά έπειτα από έλεγχο, πως πρόκειται για ατέλεια τύπου τούνελ.

Επιπλέον παράδειγμα αποτελεί ο παλμός του γραφήματος 7.7, με το defect no.3 καθώς και το γράφημα 7.8 με το defect no.7.

Συμπερασματικά, έπειτα από την καταγραφή και καταχώρηση των παλμών που κρίθηκαν σημαντικοί για τον έλεγχο των συγκολλήσεων, ακολούθησε σύγκριση αυτών με χαρακτηριστικούς παλμούς ελαττωμάτων και τέλος επαλήθευση αυτών έπειτα από μεταλλογραφία των δοκιμίων – μικροσκοπικό έλεγχο.



Εικόνα 7.13 : Χαρακτηριστικοί παλμοί ατελειών.

Τέλος, σε περίπτωση όπου ολοκληρωθεί ο έλεγχος με υπερήχους και μία συγκόλληση, κριθεί ως «υγιής συγκόλληση», παρατηρείται η μικροδομή και κυρίως το μέγεθος των κόκκων. Επίσης απαραίτητη είναι η μέτρηση της μικροσκληρότητας (οριζόντια και κάθετη), για να δούμε τη σχετική συμπεριφορά του υλικού εντός της ζώνης ανάδευσης αλλά και κυρίως εάν και πόσο μειώνεται η σκληρότητα εντός της θερμικά επηρεασμένης ζώνης σε σχέση πάντα με το μητρικό υλικό. Στα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου (π.χ. 6082-T6, 7075-T651, 2024-T4), η υποβάθμιση της σκληρότητας εντός της ζώνης ανάδευσης και της ΘΕΖ είναι αναμενόμενη, αλλά και σημαντική, λόγω διάλυσης των κατακρημνισμάτων. Μετά εκτός από τη σκληρότητα μπορεί να μελετήσει κάποιος μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση, καθώς και την αντοχή σε διάβρωση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ✓ Οι μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου, είναι η διαδικασία που απαιτείται για τη διεύρυνση της ποιότητας, των ιδιοτήτων και των διαστάσεων, την ανίχνευση ελαττωμάτων των υλικών και των μηχανικών εξαρτημάτων, χωρίς να προκαλείται καταστροφή ή ανεπανόρθωτη βλάβη με αδυναμία περαιτέρω ελέγχου.
- ✓ Η μέθοδος των υπερήχων θεωρείται η σημαντικότερη μέθοδος ΜΚΕ.
- ✓ Ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους όπως παρουσιάζεται και στον πίνακα 3.1, παρέχει αξιόπιστο και ακριβή έλεγχο των συγκολλήσεων και είναι μία μέθοδος με ευρύ φάσμα εφαρμογών, εν συγκρίσει με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου.
- ✓ Ο σωστός έλεγχος απαιτεί τον κατάλληλο εξοπλισμό, δηλαδή τη σωστή συσκευή και κεφαλές παραγωγής υπερήχων, τα καλώδια σύνδεσής τους, τα πρότυπα βαθμονόμησης και το υγρό σύζευξης.
- ✓ Στο κεφάλαιο 6, αποδείχτηκε πως υπάρχει γεωμετρία για την FSW, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γνώμονας, με σκοπό τον έλεγχο της συγκόλλησης, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για την ποιότητα αυτής.
- ✓ Επιπλέον στο κεφάλαιο 7, αξιοποιώντας το σχεδιασμό της γεωμετρίας της συγκόλλησης δια τριβής μέσω ανάδευσης, εντοπίστηκαν βασικά ελαττώματα που εμφανίζονται στη μέθοδο αυτή, όπως για παράδειγμα η ατελής διείδυση και η ατέλεια τύπου τούνελ.
- ✓ Παρατηρήθηκαν και στα τρία δοκίμια ελατώματα, όπου με τη βοήθεια του λογισμικού UltrawinTM που περιγράφεται στο έκτο κεφάλαιο, καθώς και η μεθοδολογία ελέγχου της συγκόλλησης, ακολούθησε η εκτίμηση αυτών και έπειτα μακροσκοπικός έλεγχος για την ταυτοποίηση των ελαττωμάτων – ατελειών.
- ✓ Ολοκληρώνοντας ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους, αποτελεί μία αυτοτελή επιστήμη, που εξελίσσεται διαρκώς στο πέρασμα του χρόνου, δρώντας καταλυτικά στον αξιόπιστο έλεγχο κατασκευών και συγκολλήσεων, η οποία αποτέλεσαι και αντικείμενο μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ.Παντελής ,Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων - Ειδικά κεφάλαια (Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Αθήνα 2012).
2. Albert S.Birks, Robert E.Green, Paul McIntire, NDT Handbook Ultrasonic Testing (American society for NDT, second edition, volume 7).
3. Jack Blitz, Geoff Simpson ,Ultrasonic methods of non – destructive testing, (Chapman and Hall, London 1996).
4. Baldev Raj, C.V. Subramanian, T.Jayakumar, Non - destructive testing of welds, (Alpha science Intl Ltd, 2000).
5. Non – destructive evaluation and quality control : ASM handbook, volume 17, 9th edition (1992).
6. J.Krautkramer, H. Krautkramer, Ultrasonic testing of materials, (4th fully rev.ed., Berlin, New York : Springer – Verlag, 1990).
7. Ultrasonic transducers for non – destructive testing, Parametrics NDT (2006).
8. <http://www.ndt.net/>
9. Workman G.L., Kishoni D., Moore P.O., NDT Handbook Ultrasonic Testing (volume 7, third edition, ASNT, 2007).
10. NDT Automation ,UltrawinTM software, user’s manual , (rev 2.58, Princeton Junction, NJ, 2002).
11. Ι.Πρασιανάκης,Μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών, Η μέθοδος των υπερήχων ,(Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2003).
12. Β.Παπάζογλου, Γ.Παπαδημητρίου Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων (Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1994).
13. Μεταπτυχιακή εργασία, Επιμέλεια – Αθανάσιος Γ.Παπαγεωργίου, Επίβλεψη – Ι.Ν.Πρασιανάκης, με θέμα, «Έλεγχος των υλικών με τη μέθοδο των υπερήχων και την αυτοματοποιημένη μέθοδο σαρώσεως C-scan», (Ιανουάριος, 2004, Αθήνα).
14. Μεταπτυχιακή εργασία, Επιμέλεια – Αλέξανδρος Κακαρόγλου, Επίβλεψη – Βασίλειος Παπάζογλου, με θέμα, «Συγκόλληση δια τριβής με ανάδευση σε κράμα αλουμινίου 5083 – H11, με απόθεση πολλαπλών περασμάτων», (Αθήνα 2009).
15. Διπλωματική εργασία, Επιμέλεια – Δημήτριος Κούσουλας, Δρ. Δ.Κουλοχέρης, Επίβλεψη – Δρ. Α.Κανάραχος με θέμα, «Μη καταστροφικός έλεγχος συγκολλήσεων με υπερήχους χρησιμοποιώντας τη μετρητική διάταξη EPOCH III – MODEL 2300 της PARAMETRICS», (Αθήνα 1999).
16. Andre Lamarre, Olivier Dupuis, Michael Moles Complete Inspection of Friction Stir Welds in Aluminum using Ultrasonic and Eddy Current Arrays, (paper, Quebec, Canada).

17. M. Moles and A. Lamarre, Phased array ultrasonic inspection of friction stir welds, (4th International Symposium on Friction Stir Welding, , Park City, Utah, USA, May 14-16, 2003).
18. Esther T. Akinlabi *Member, IAENG*, Adrian C. S. Levy and Stephen A. Akinlabi *Member, IAENG*, Non-Destructive Testing of Dissimilar Friction Stir Welds, (Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III, WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.).
19. T.L. Dickerson, J. Przydatek Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws, (*Engineering Department, Cambridge University, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, UK, Lloyd's Register of Shipping, 71 Fenchurch Street, London EC3M 4BS, UK*, Received 28 March 2002; received in revised form 22 August 2002; accepted 2 September 2002).
20. Feifei LIU, Songping LIU, Enming GUO and Legand LI, Ultrasonic Evaluation of Friction Stir Welding, (The Center of NDT&E, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China).
21. Telmo Santos, Pedro Vilaça, Luísa Quintino, Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys, (Technical University of Lisbon, IST, Secção de Tecnologia Mecânica, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal).
22. Michael Berke, Nondestructive Material Testing with Ultrasonics, Introduction to the Basic Principles, (Krautkramer).
23. Olympus company Ultrasonic transducers for non - destructive testing ,(manual, theory and instructions).
24. A.J. Leonard, S.A.Lockyer, Flaws in friction stir welds, (4th international symposium on friction stir welding, Park City, Utah, USA, 14 – 16 May, 2003).
25. D.Levesque, L.Toubai, X.Cao, L.Duburg, Ultrasonic evaluation of friction stir welds and dissimilar intermixing using synthetic aperture focusing technique, (Industrial materials institute, national research, council Canada, Boucherville, Quebec, Canada, Aerospace manufacturing technology centre).
26. Διπλωματική εργασία, Επιμέλεια - Παναγιώτα Ι.Σαράφογλου, Επίβλεψη Ι.Δ.Χρυσουλάκης, με θέμα «Μελέτη Συγκολλησιμότητας Ναυπηγικού Κράματος Al5083 με την Τεχνική Συγκόλλησης Δια Τριβής Μέσω Ανάδευσης», Αθήνα 2009.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Nondestructive Material Testing with Ultrasonics



Introduction to the Basic Principles

Introduction

Nondestructive material testing with ultrasonics is more than 40 years old. From the very first examinations, using ultrasonic oscillations for detection of flaws in different materials, it has become a classical test method based on measurements with due regard to all the important influencing factors. Today it is expected that ultrasonic testing, supported by great advances in instrument technology, give reproducible test results within narrow tolerances. This assumes exact knowledge of the influencing factors and the ability to apply these in testing technology. Not all influences have to be seriously regarded by the operator. In many cases some of the influences can be neglected without exceeding the permitted measurement tolerances. Due to this, the test sequence is simplified and the testing time reduced. Despite this, the future belongs to the qualified operator who carries out his task responsibly and who continuously endeavours to keep his knowledge at the latest state of the art.

1. Why use ultrasonics for nondestructive material testing?

At the beginning of the fifties the technician only knew radiography (x-ray or radioactive isotopes) as a method for detection of internal flaws in addition to the methods for nondestructive testing of material surfaces, e.g. **the dye penetrant and magnetic particle method**. After the Second World War the ultrasonic method, as described by *Sokolov* in 1935 and applied by *Firestone* in 1940, was further developed so that very soon instruments were available for ultrasonic testing of materials. The ultrasonic principle is based on the fact that solid materials are good conductors of sound waves. Whereby the waves are not only reflected at the interfaces but also by internal flaws (material separations, inclusions etc.). The interaction effect of sound waves with the material is stronger the smaller the wave length, this means the higher the frequency of the wave.

$$\lambda = c/f$$

✓ c = Sound velocity [km/s]

✓ f = Frequency [MHz]

✓ l = Wave length [mm]

This means that ultrasonic waves must be used in a frequency range between about 0.5 MHz and 25 MHz and that the resulting wave length is in mm. With lower frequencies, the interaction effect of the waves with internal flaws would be so small that detection becomes questionable. Both test methods, radiography and ultrasonic testing, are the most frequently used methods of testing different test pieces for internal flaws, partly covering the application range and partly extending it. This means that today many volume tests are possible with the more economical and non-risk ultrasonic test method, on the other hand special test problems are solved, the same as before, using radiography. In cases where the highest safety requirements are demanded (e.g. nuclear power plants, aerospace industry) both methods are used.

2. Ultrasonic testing tasks

Is there a primary classification of tasks assigned to the ultrasonic operator? If we limit ourselves to testing objects for possible material flaws then the classification is as follows:

1. Detection of reflectors
2. Location of reflectors
3. Evaluation of reflectors
4. Diagnosis of reflectors
(reflector type, orientation, etc.)

Instead of using the word "**reflector**", the ultrasonic operator very often uses the term "**discontinuity**". This is defined as being an "irregularity in the test object which is suspected as being a flaw". In reality, only after location, evaluation and diagnosis has been made, can it be determined whether or not there is a flaw which effects the purpose of the test object. The term "discontinuity" is therefore always used as long as it is not certain whether it concerns a flaw which means a non-permissible irregularity.

3. Detection of discontinuities

The essential "tool" for the ultrasonic operator is the probe, Figs. 1a + 1b.

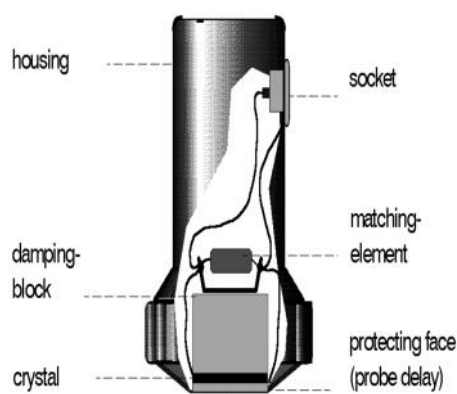


Fig. 1a Straight-beam probe (section).

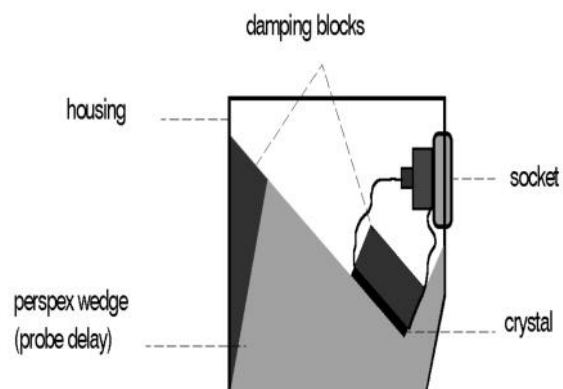


Fig. 1b Angle-beam probe.

The piezoelectric element, excited by an extremely short electrical discharge, transmits an ultrasonic pulse. The same element on the other hand generates an electrical signal when it receives an ultrasonic signal thus causing it to oscillate. The probe is coupled to the surface of the test object with a liquid or coupling paste so that

the sound waves from the probe are able to be transmitted into the test object. The operator then scans the test object, i.e. he moves the probe evenly to and fro across the surface. In doing this, he observes an instrument display for any signals caused by reflections from internal discontinuities, Fig. 2.

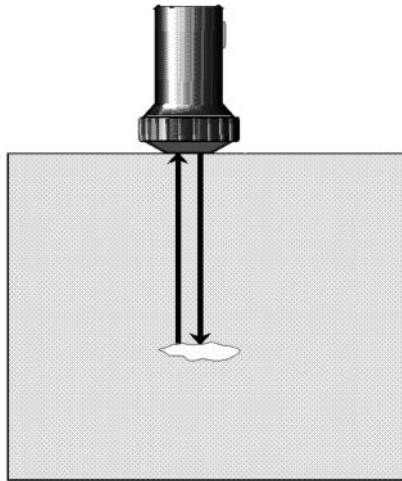


Fig. 2a Plane flaw – straight-beam probe.

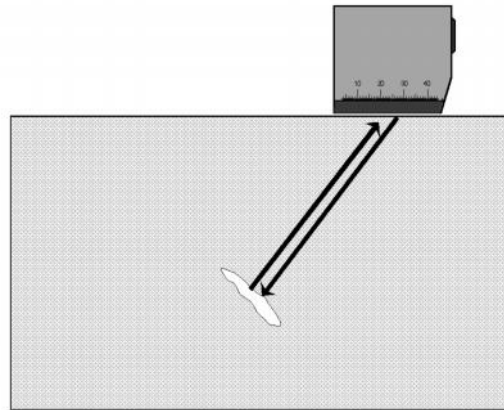


Fig. 2b Plane flaw – angle-beam probe.

Every probe has a certain directivity, i.e. the ultrasonic waves only cover a certain section of the test object. The area effective for the ultrasonic test is called the "sound beam" which is characteristic for the applied probe and material in which sound waves propagate. A sound beam can be roughly divided into a convergent (focusing) area, **the nearfield**, and a divergent (spreading) part, **the far field**, Fig. 3. The length N of the near-field (**near-field length**) and the **divergence angle** is dependent on the diameter of the element, its frequency and the sound velocity of the material to be tested. The center beam is termed **the acoustic axis**. The shape of the sound beam plays an important part in the selection of a probe for solving a test problem. It is often sufficient to draw the acoustic axis in order to show what the solution to a test task looks like. A volumetric discontinuity (hollow space, foreign material) reflects the sound waves in different directions, Figs. 4a + 4b.

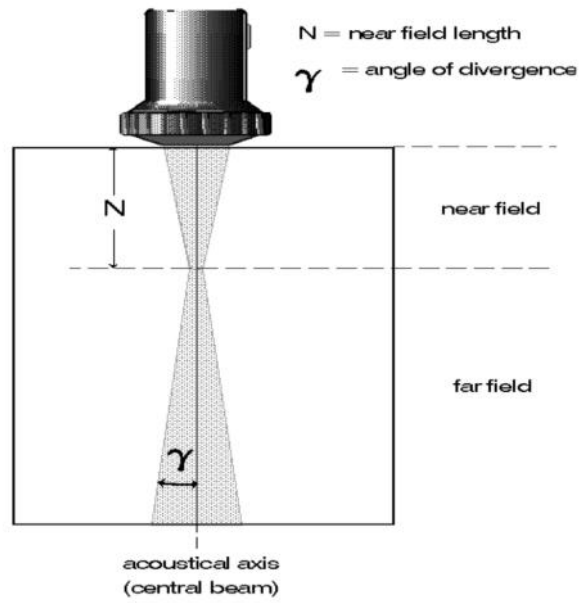


Fig. 3 Sound field.

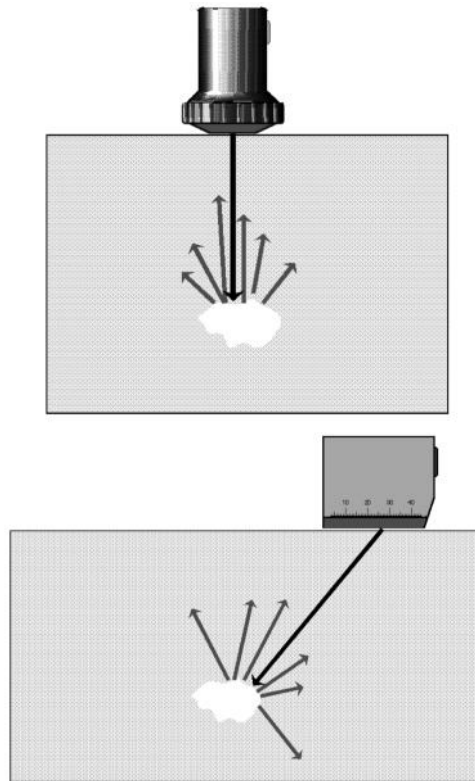


Fig. 4a Volumetric discontinuity – straight-beam probe, Fig. 4b Volumetric discontinuity – angle-beam probe.

The portion of sound wave which comes back to the probe after being reflected by the discontinuity is mainly dependent on the direction of the sound wave; i.e. it does not matter whether scanning is made with a straight-beam probe or an angle-beam probe or whether it is carried out from different surfaces on the test object, Fig. 5.

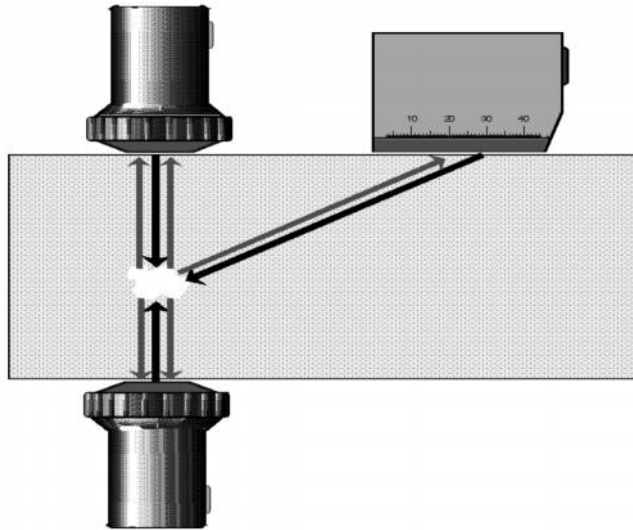


Fig. 5 Volumetric flaw – detection from different directions.

If the received portion of the reflected sound wave from the probe is sufficient then the detection of the existing volumetric discontinuity is not critical, this means that the operator is able to detect it by scanning from different directions. A plane (two dimensional) discontinuity (e.g. material separation, crack) reflects the ultrasonic waves mostly in a certain direction, Fig. 6.

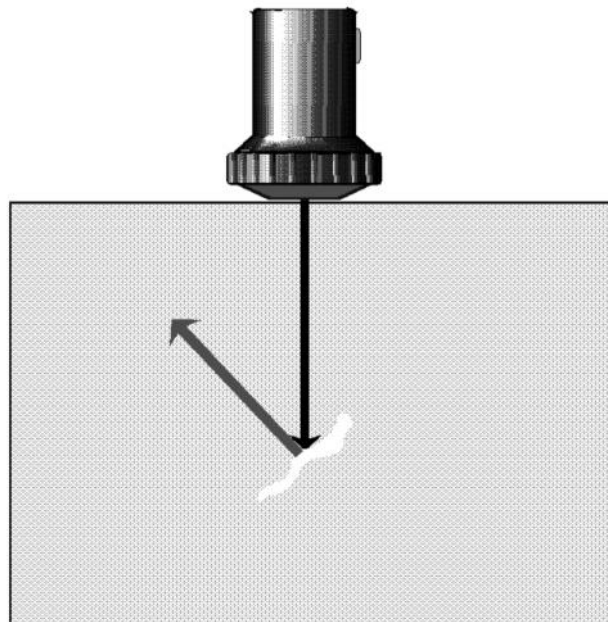


Fig. 6 Reflection on angled plane discontinuity.

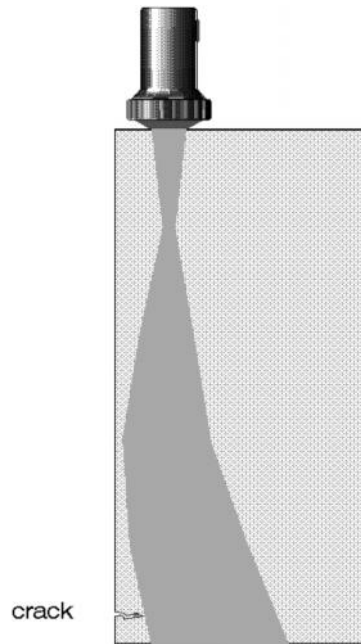


Fig. 7 Apparent deformation of the sound beam on a side wall.

If the reflected portion of the sound wave is not received by the probe then it is unlikely that the discontinuity will be detected. The possibilities of detection only increase when the plane discontinuity is hit vertically by the sound beam. This applies to discontinuities which are isolated within the test object. With plane discontinuities which are open to the surface of the test object, e.g. a crack running vertically from the surface into the test object, a vertical scan of the crack does not always produce the required success.

In this case wave overlapping occurs (interferences) due to sound wave reflection on the side wall of the test object which seems as if the sound wave bends away from the corresponding side wall, Fig. 7. In such cases, the probability of crack detection is very good if the **angle reflection effect** is used, Fig. 8a. At the 90° edge, between the crack and the surface of the test object, the sound waves are reflected back within themselves due to a double reflection, Fig. 8b. Use of the angle reflection effect is often even possible when a plane discontinuity, which is vertical to the surface, does not extend to the surface and under the condition that the sound wave reflections at the discontinuity and the surface are received by the probe, Fig. 9.

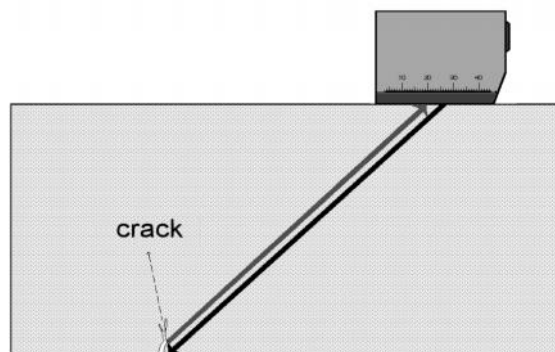


Fig. 8a Crack detection with 45° scanning.

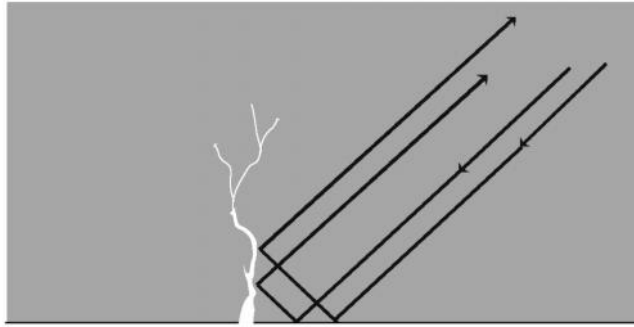


Fig. 8b Angle reflection effect.

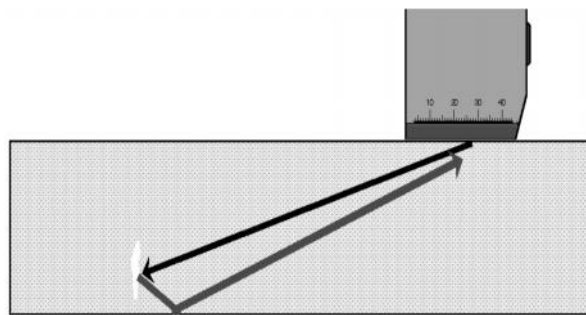


Fig. 9 Plane, vertical reflector near the surface.

Often in thick-walled test objects, in which there are vertical discontinuities, this condition cannot be fulfilled so that the reflected sound waves from the discontinuity and the surface of the test object do not return to the probe. In this case, a second probe is used for receiving the reflected portions of sound thus enabling detection of the discontinuity.

With this type of testing, **the Tandem Technique**, one probe is used as a transmitter, and the other probe is used as the receiver. Both probes are moved over the surface of the test object and are spaced apart at a fixed distance. Scanning is made for vertically positioned discontinuities at different depths of the test object, depending on the probe spacing, Figs. 10a, 10b and 10c.

Although, with angle scanning in thin test objects, there is a possibility that plane discontinuities cannot be vertically hit, Fig. 11 a, the detection sensitivity is much better, especially by suitable selection of the scanning angle and the test frequency so that the user favours the **single probe test** as opposed to the more complicated tandem method. This is normally the case when testing welds up to a thickness of about 30 mm.

Of course the possibility of detecting discontinuities which are not vertically hit is reduced. However, this deficiency is often compensated by an additional test with another angle of incidence, Fig. 11 b, or by using a probe with a lower frequency, Fig. 11 c. A typical procedure can be found in the corresponding specifications (test instructions) for weld testing.

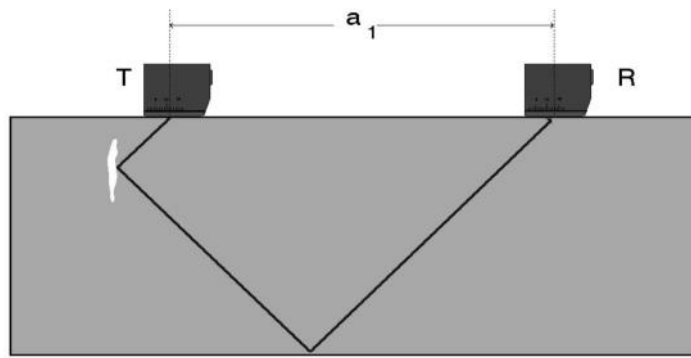


Fig. 10a Angle reflection effect.

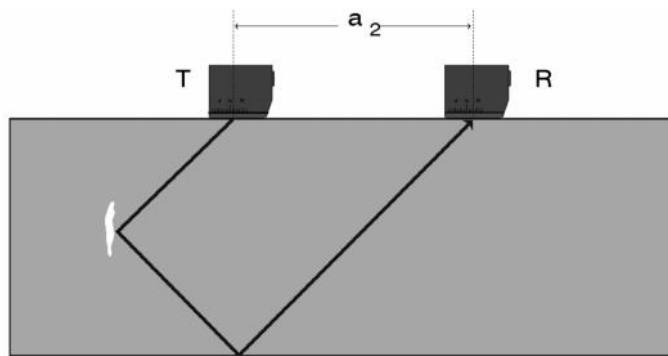


Fig. 10b Tandem testing: center zone.

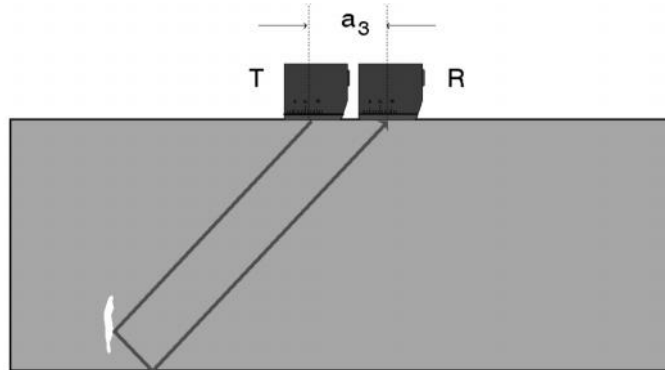


Fig. 10c Tandem testing: lower zone.

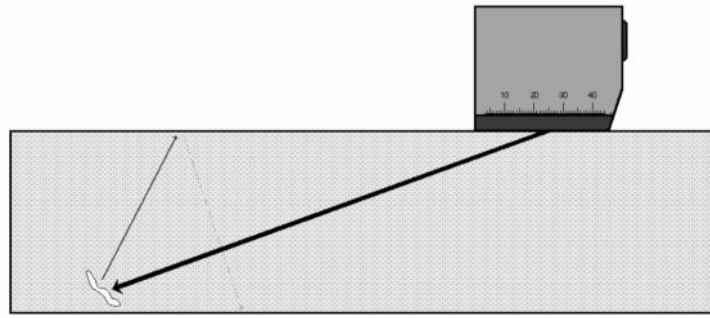


Fig. 11a 70° scanning: unfavourable angle.

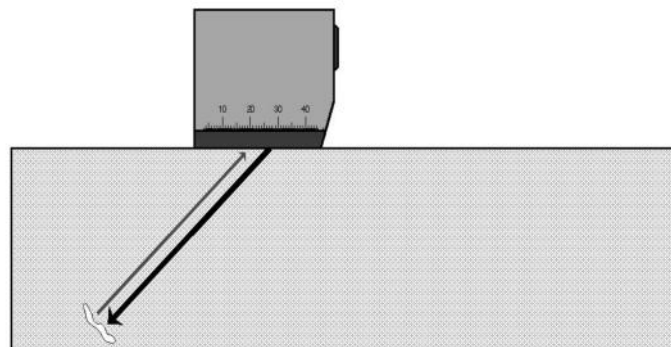


Fig. 11b 45° scanning: favourable angle.

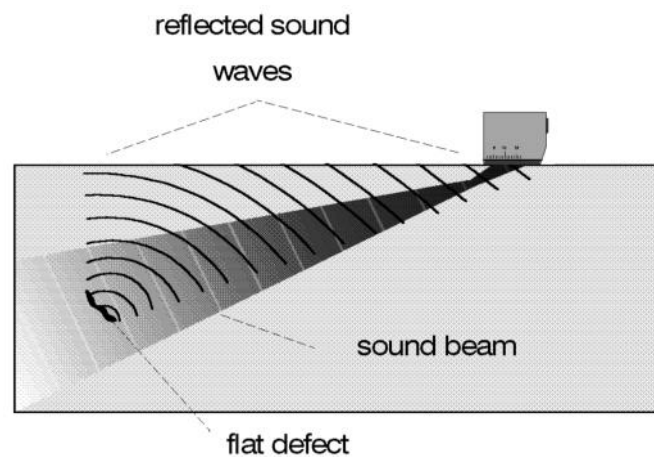


Fig. 11c 70° scanning with 2 MHz; detection by large divergence of the sound beam.

4. Method of testing and instrument technology

4.1 The ultrasonic flaw detector

Before we concern ourselves with further test tasks and their solutions, we must firstly acquire more detailed knowledge about the most frequently applied ultrasonic technique, including test instruments and probes. Based on what has already been stated concerning the location of discontinuities, we must transmit short sound pulses

into the test object in order to measure the sound pulse's time of flight from the probe to the reflector and back. This is only possible when there is a clearly defined start time and target time. As long as the test object's sound velocity is known it is then possible to determine, using simple calculation, the distance of the reflector and thus its exact position in the test object, Fig. 12.

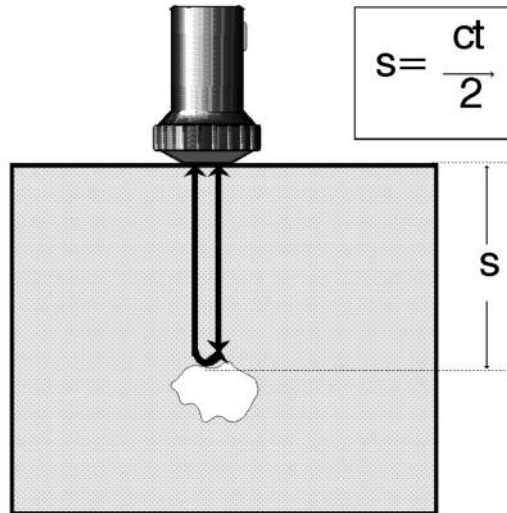


Fig. 12 The principle of time of flight measurement.

Sound reflections in the audio range are called **echoes** (think of the yodeler in the mountains). Therefore why should we not use this short appropriate term for the reflection of an ultrasonic pulse? Thus the name of the method came into being which is applied in most areas of application for material testing with ultrasonics: the **Pulse Echo Method**, Fig. 13.

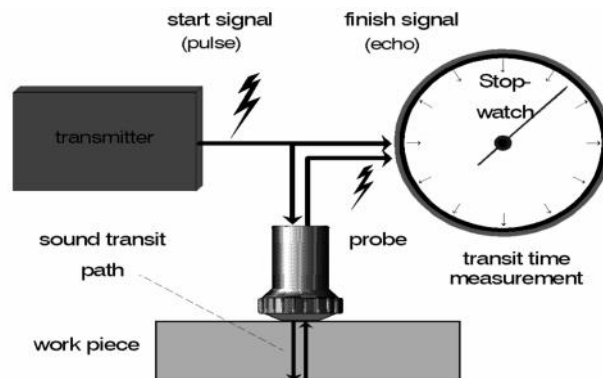


Fig. 13 Block diagram: Pulse Echo Method.

The time measurement starts with the electrical transmission pulse, the **initial pulse**. This is an extremely short electrical discharge which triggers a sound pulse at the probe crystal. This pulse travels through the material and is reflected by a discontinuity or the opposing wall and returns back to the probe. The received oscillations are converted into an electrical pulse which stops the time measurement. The distance to the reflector can now be instantly determined by the following formula:

$$s = \frac{ct}{2},$$

- ✓ s = sound path [mm]
- ✓ c = sound velocity [km/s]
- ✓ t = time of flight [ms]

If the time of flight is graphically displayed then we are not far from the universal **Ultrasonic Flaw Detector**, Fig. 14.

In order to evaluate the visual signals (echoes) on the screen there is a grid on the inside of the CRT. The exchangeable attachment scale, which has a horizontal scale with 10 graduations is called the **display scale**, Fig. 15.



Fig. 14 Ultrasonic Testing in practice.

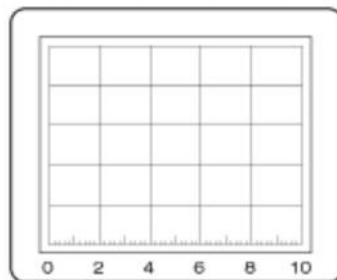


Fig. 15 The Display scale

Using this scale, the ultrasonic operator is able to measure echoes on the display. How is this done? As already stated, the electrical transmission pulse triggers the sound pulse at the probe crystal. At the same time this voltage pulse is feed to the input of the amplifier so that the high voltage causes a vertical deflection of the display sweep, this is called the initial pulse, Fig. 16a.

With this initial pulse, the sweep starts in the lower left corner of the display synchronous to the start of the sound pulse in the test object and moves along the **base line** at a constant speed to the right, Fig. 16b. The speed of the pulse is dependent on

the material of the test object (sound velocity = material constant). The **sweep speed** of the instrument's display can be varied within wide limits.

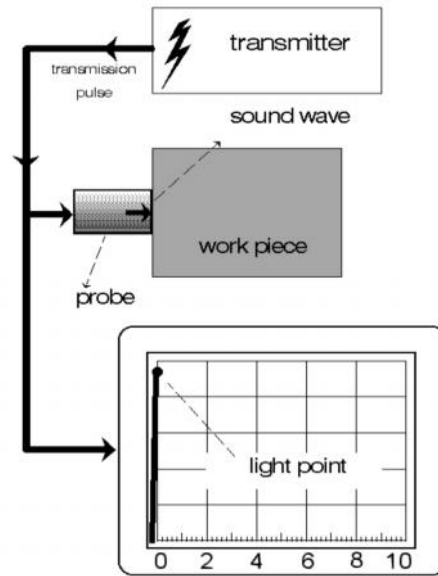


Fig. 16a Initial pulse = Start.

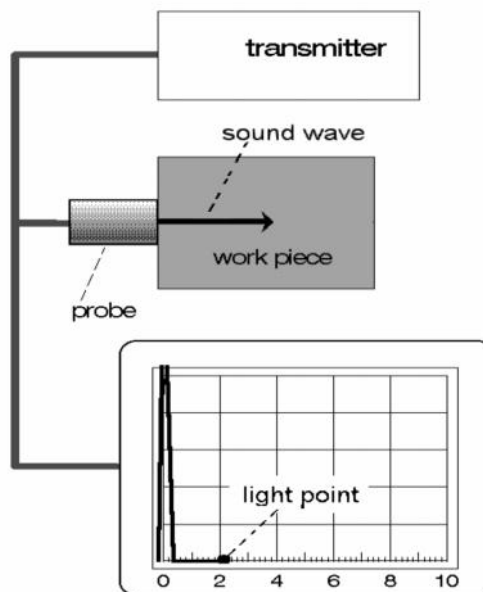


Fig. 16b after 10 ms.

Thus the speed of the display sweep can be exactly matched to the sound velocity. In our example the electron beam reaches scale division 4 while the pulse is at the opposing side of the test object, Fig. 17 a, then it will of course need the same time to return, i.e. the beam spot will be at the 8th scale graduation, Fig. 17 b.

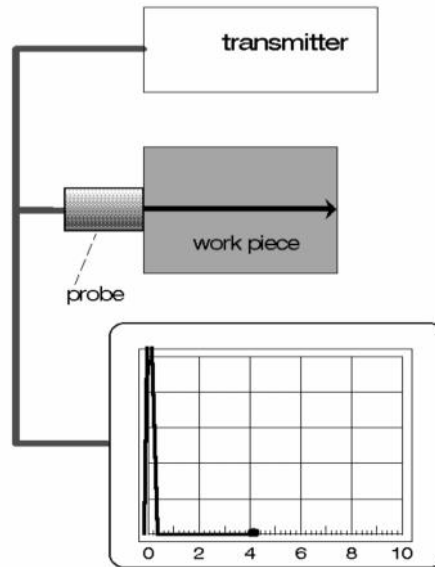


Fig. 17a Beam spot at the 4th scale graduation.

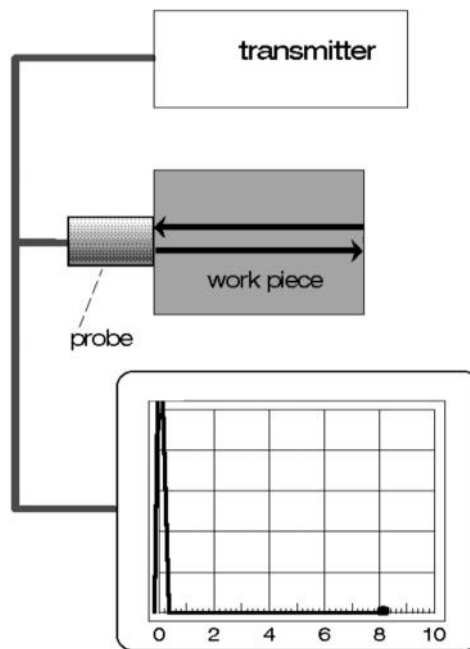


Fig. 17b Beam spot at the 8th scale graduation.

The part of the sound pulse, which is transmitted through the couplant and into the probe, generates a small electrical reception signal at the crystal which, via the amplifier, causes vertical deflection of the beam spot, this is the **backwall echo** Fig. 18. The deflection takes place quickly because the sound pulse is short, therefore can only trigger a short voltage pulse at the probe crystal. The electron beam returns quickly back to the base line and continues to the right, whilst the largest part of the sound pulse is reflected at the couplingsurface and travels through the test object a second time.

The display indications can now be allocated into two measurement values:

1. *Horizontal position.* Left flank of the echo at the 8th scale graduation.
2. *Vertical amplitude:* 70% screen height.

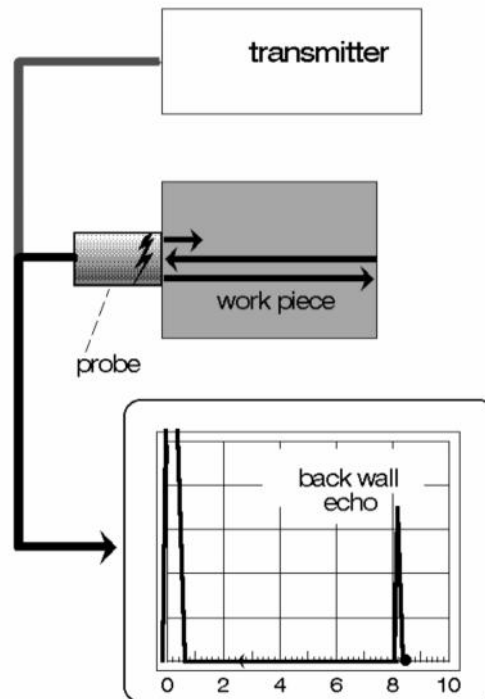


Fig. 18 Backwall echo at the 8th scale graduation.

At the moment this does not tell us very much, however, later we will see that nearly all usable results which we obtain from ultrasonic testing are based on these two readings. Let us take a look more closely at the current result: The high initial pulse starts at the left in front of the scale zero point. The rising flank corresponds to the time at which the electrical signal is on the crystal and starts the sound pulse. However, before it is fed to the surface of the test object it must travel through the protection layer of the probe (**probe delay**). Although it is relatively thin, a short period of time is required. The initial pulse is exactly shifted to the left by this period of time, Fig. 19a.

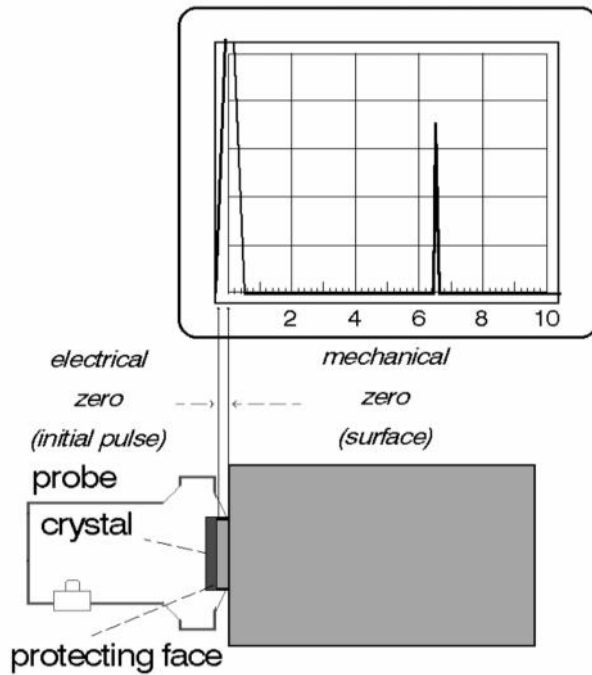


Fig. 19a Straight-beam probe: initial pulse delay.

With angle-beam probes the sound pulse in the probe must travel through a much longer delay path made of perspex before it is transmitted into the test object. Depending on the type of probe, the initial pulse delay can be so large that it no longer appears on the display, Fig. 19 b.

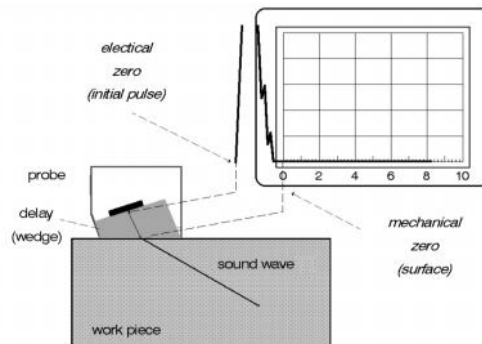


Fig. 19b Angle-beam probe: initial pulse delay.

We already explained the echo at the 8th scale graduation before: It is the pulse reflected at the opposite wall of the test object, the backwall echo. Now it is not too difficult to guess how the display changes when there is another reflector within the sound beam, e.g. a material separation: between the initial pulse and the backwall echo another echo will appear, caused by partial reflection of the sound wave on a discontinuity, Fig. 20.

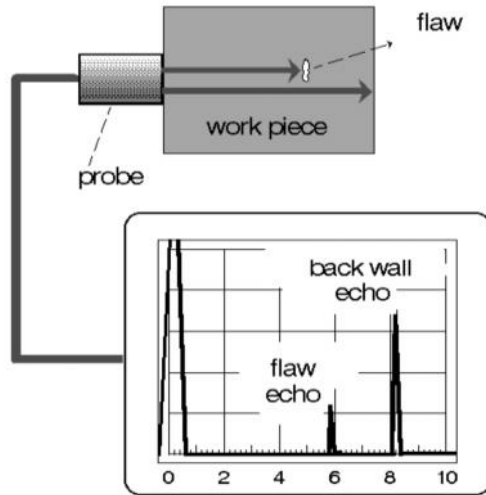


Fig. 20 Test object with discontinuity, display with flaw echo.

Such an echo is called an **intermediate echo**. It is easy to foresee the position changes of the intermediate echo on the display if the reflector is at different depths. Fig. 21 a+b: the position of the intermediate echo on the display in relation to the position of the backwall echo behaves the same as the distance of the discontinuity related to the total thickness of the test object. We already know a method of determining the distance of an internal flaw; the ultrasonic tester speaks of **location of the discontinuity**.

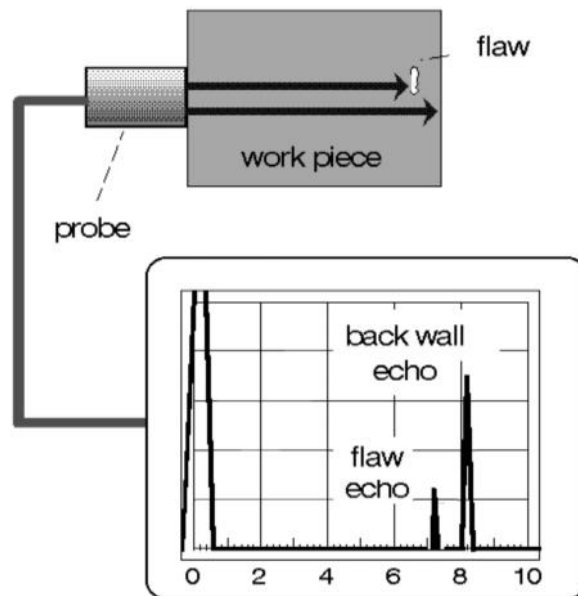


Fig. 21a Discontinuity in front of the backwall.

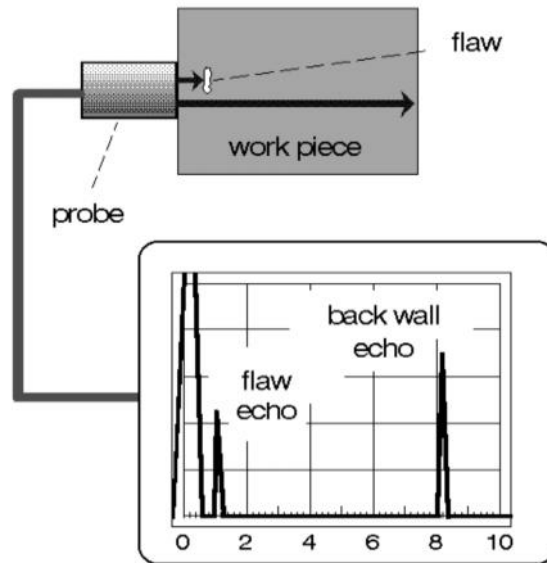


Fig. 21b Discontinuity near the surface.

4.2 Near resolution

So, what can we do when a small discontinuity is just below the surface of the test object, i.e. directly in front of the probe? Can this discontinuity still be detected? The answer is no, because the intermediate echo is now within the initial pulse, it is therefore covered by it. Probably there are also no further indications that there is a near-to-surface discontinuity here, Fig. 22.

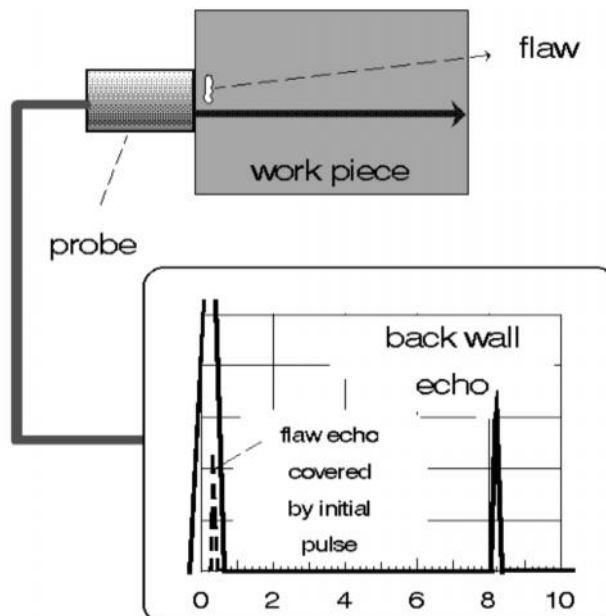


Fig. 22 A non-detectable near-to-surface discontinuity.

Or do we perhaps have a clue which will lead us to the unseen intermediate echo (a near-to-surface discontinuity)? The answer is yes, when the discontinuity is large enough and shadows a noticeable part of the sound beam so that the backwall echo becomes smaller, Fig. 23. If the near-to-surface discontinuity is also smooth and parallel to the surface, then there is an echo sequence which is more or less well formed because the pulses are reflected many times between the surface and the discontinuity, Fig. 24.

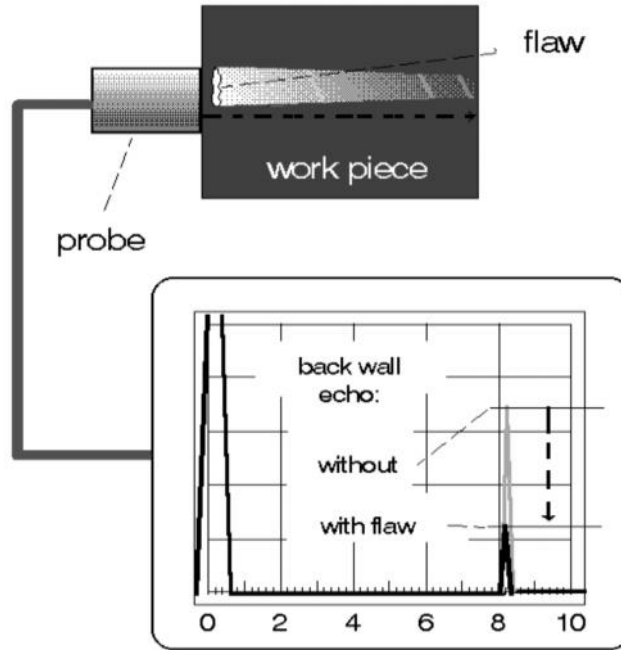


Fig. 23 Shadowing of the backwall echo by a larger near-to-surface reflector.

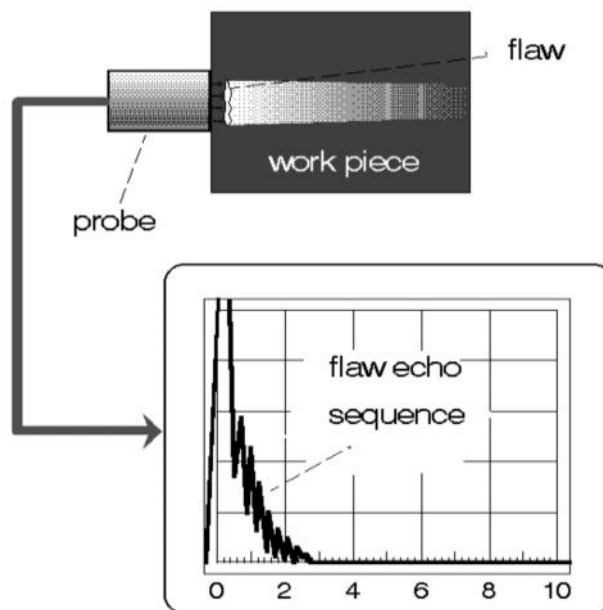


Fig. 24 Echo sequence of a near-to-surface discontinuity.

In this case, the amplitudes of the echoes become smaller as the distance increases. The more dense the flat echoes advance to the surface, the more the echoes of the echo sequence disappear into the initial pulse, this causes the echoes to become even more dense. In such cases there is a limit to detection.

From everything, we see that the initial pulse is not welcome on the display, however it is a technical necessity: it limits the detectability of near-to-surface discontinuities. Reflectors in the **dead zone**, the non-testable area immediately beneath the surface, can no longer be detected, Fig. 25. The dead zone is dependent on the test setup, this means from the probe and the test instrument. However, it can be minimized by suitable selection of the testing device.

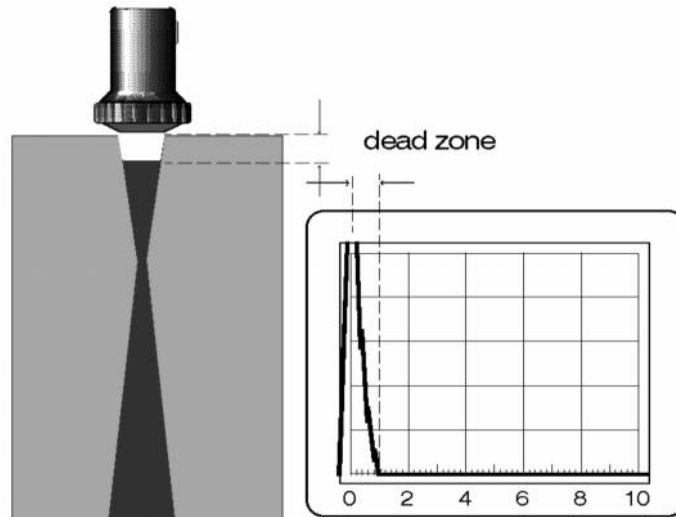


Fig. 25 Dead zone: display, test object.

4.3 The probe

Probes whose beams are normal to the surface are called **straight-beam probes**, Figs. 1a and 26.



Fig. 26 Straight beam probe.

Most standard straight-beam probes transmit and receive longitudinal waves (pressure waves). The oscillations of such a wave can be described by compression and decompression of the atoms propagating through the material (gas, liquid and solid), Fig 27. There is a large selection of straight-beam probes in various sizes and range from frequencies of approximately 0.5 MHz to 25 MHz. Distances of over 10†m can be obtained thus enabling large test objects to be tested.

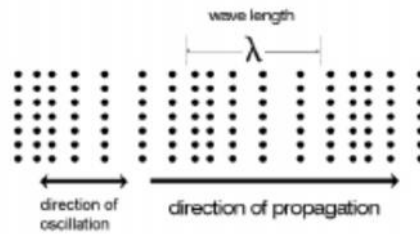


Fig. 26 Straight beam probe

The wide range enables individual matching of probe characteristics to every test task, even under difficult testing conditions. We have already mentioned a disadvantage of straight-beam probes which, under certain conditions, can be decisive: the poor recognition of near-to-surface dis-continuities due to the width of the initial pulse.

Probes whose beams enter at an angle are called **angle-beam probes** because they transmit and receive the sound waves at an angle to the surface of the test object, Figs. 1b and 28.

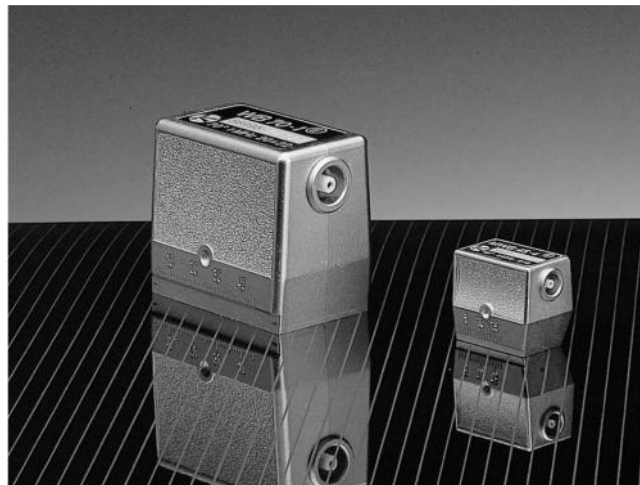


Fig. 28 Angel-beam probes.

Most standard angle-beam probes transmit and receive, due to technical reasons, **transverse waves** or **shear waves**.

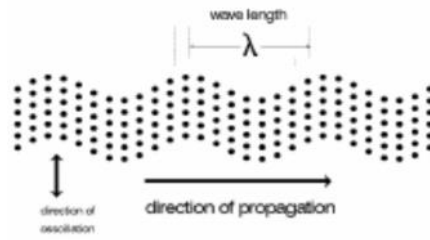


Fig. 29 Transverse wave

With a transverse wave the atoms or molecules oscillate vertical to the wave's direction of propagation, Fig. 29, due to the fact that excitation is made by shear force (transverse to the propagation's directive forces). Transverse waves only occur in solid materials never in liquids or gases because these do not have a shear modulus and therefore do not effect any shear forces. In addition to this, they propagate much slower than longitudinal waves in the same material. There is no quick reply to the question about why angle-beam probes do not transmit longitudinal waves. In this case a detailed examination is required.

4.4 Refraction and mode conversion

Inclined sound waves are almost exclusively generated so that they occur at an angle to the probe/test object interface, Fig. 1b. This is simply achieved by cementing the element onto a wedge shaped delay path which is normally made of perspex. If a longitudinal wave, at a fixed angle of incidence (the wedge angle), hits the perspex/steel interface then this wave is firstly split-up into a reflected and a transmitted wave, Fig. 30a.

Reflected waves obey the reflection law (angle of incidence = angle of reflection) and transmitted waves the refraction law (Snell's law):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

- ✓ a = angle of incidence
- ✓ b = angle of refraction
- ✓ c₁ = sound velocity in medium 1
- ✓ c₂ = sound velocity in medium 2

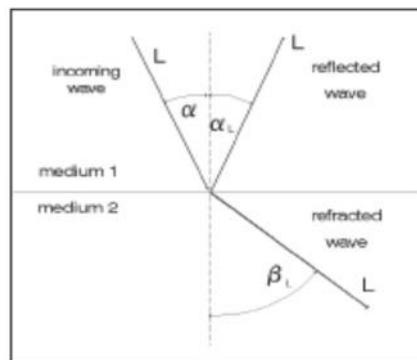


Fig. 30a Refraction and reflection without transverse waves.

Moreover something strange happens: In addition transverse waves are created at the sound beam's point of impact, Fig. 30b. This happens with reflection as well as with refraction! Due to the fact that the transverse waves propagate at around only half the sound velocity of longitudinal waves, other propagation directions are automatically produced due to the refraction law, i.e. reflection and refraction angles.

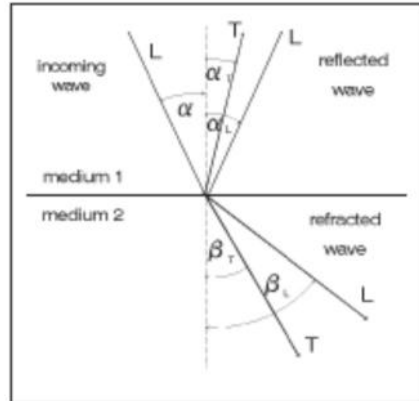


Fig. 30b Refraction and reflection with transverse waves.

If, with inclined scanning, this wave conversion is not taken into consideration, then location and evaluation of discontinuities is not possible in many cases, even detection becomes questionable because one echo on the display leads to two different reflector locations depending on whether one takes longitudinal waves or transverse waves as a basis, Fig.31.

But where is the discontinuity? A clear answer can only be given by the operator when one of the wave modes does not occur. That is undoubtedly the precondition for the universal application of anglebeam probes. This precondition can be derived from the refraction law: firstly we recognize that the refraction angle of longitudinal waves is for steel approximately twice as large as that of the transverse waves, Fig. 30b.

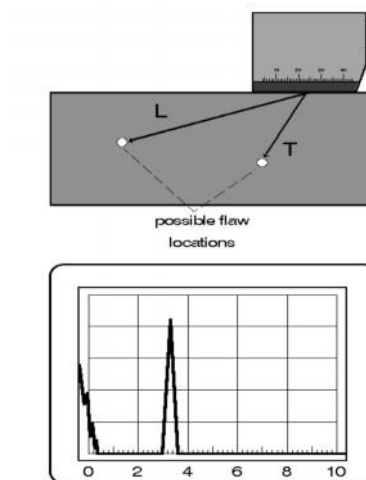


Fig. 31 Evaluation: one echo – two possible reflector locations.

With further enlargement of the angle of incidence the angle of refraction β also increases until finally, at an angle of incidence of $\alpha = 27.5^\circ$ (**1st critical angle**), the longitudinal wave, with an angle β of 90° , is refracted. This means that it runs along the interface whilst the transverse wave is still transmitted into the test object, Fig 32a.

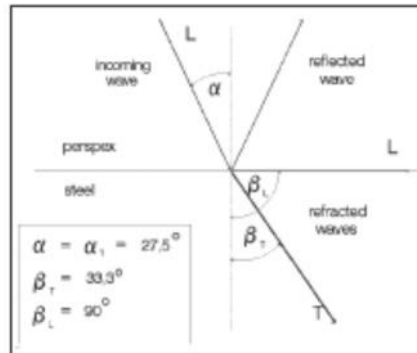


Fig. 32a Refraction: 1st critical angle

Our precondition for clear reflector evaluation is fulfilled: now only **one** sound wave occurs in the test object, this is the transverse wave with a refraction angle of 33.3° (for perspex/steel). With further enlargement of the angle of incidence various refraction angles of the transverse wave (= **beam angle**) can be set, e.g. exactly 45° , Fig. 32 b. Finally, with an angle of incidence of about 57° (**2nd critical angle**), the transverse wave, with an angle of 90° , is refracted and propagates along the surface of the test object, it then becomes a **surface wave**, Fig. 32 c.

That is the limit over which no more sound waves are transmitted into the test object. **Total reflection** starts from here, Fig. 32d.

Fig. 32b Refraction: transverse wave under 45° .

Fig. 32c Refraction: 2nd critical angle, surface wave.

Fig. 32d Total reflection.

The area in which an angle of incidence is present between the 1st and 2nd critical angle ($27.5^\circ - 57^\circ$) gives us a clear evaluable sound wave in the test object (made of steel), namely the transverse wave between 33.3° and 90° , Fig. 33.

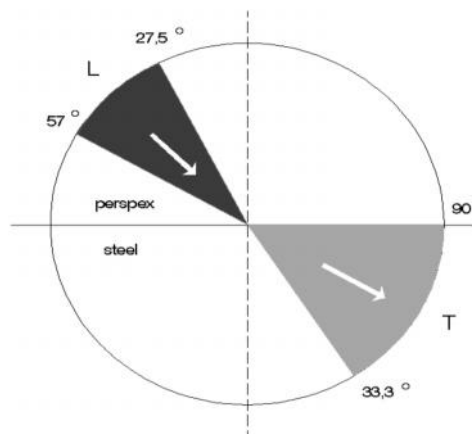


Fig. 33 Usable range for angle-beam probes in steel.

4.5 Characteristics of angle-beam probes

Due to the fact that steel is tested in most applications, the angle-beam probes are designed so that suitable angles of incidence are produced in steel. To achieve clear evaluation there are angle-beam probes with angles of 35°, 45°, 60°, 70°, 80° and 90° (surface waves), Fig. 33.

Angles of 45°, 60° and 70° are mostly used. With regard to frequency, angle-beam probes do not have such a wide selection as straight-beam probes. This is primarily due to the fact that high frequency transverse waves in non-alloyed fine grain steels are subjected to high **attenuation**. As the sound energy of the waves travels through the material it is so strongly absorbed and scattered that only relatively small test objects can be tested with sufficient sensitivity.

If discontinuities have to be detected over larger distances (in thicker test objects) then angle-beam probes with larger crystals and lower frequencies are to be used; e.g. a reflector with a size of 2 mm in low alloyed fine grain steel with a 2 MHz anglebeam probe with a large crystal can be detected up to a distance of 700 mm. The **near resolution** of angle-beam probes is often better than with straight-beam probes because the initial pulse is shifted far to the left due to the relatively large Perspex delay path. The falling flank of the initial pulse could sometimes still cover near-to surface discontinuities. Figs. 34a+b show, when using an angle-beam probe, how a near-to-surface drilled hole (1 mm deep) can be reliably detected.

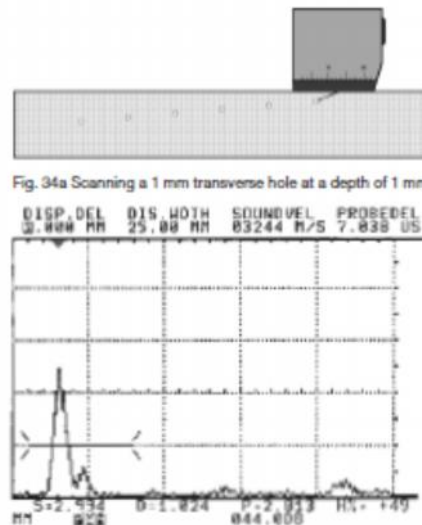


Fig. 34b Detection of a hole with a MWB 70-4E.

4.6 The TR probe

If you want to obtain a similarly good near resolution with straight-beam scanning you should use a **TR probe**, Fig. 35.

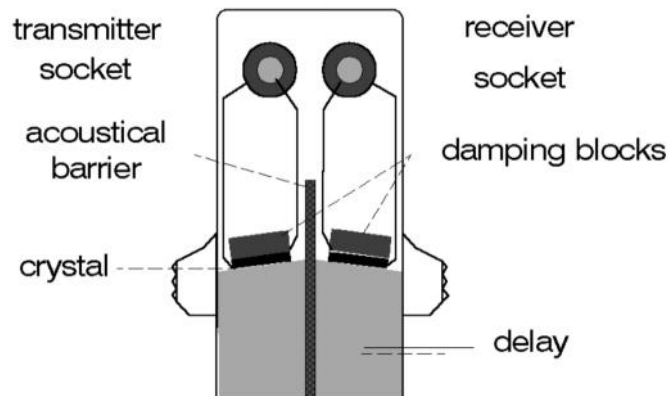


Fig. 35 TR probe: section.

This technique uses two crystal elements which are acoustically and electrically separated from each other in the same housing. In addition to this, both elements are stuck to a relatively long delay path (made of perspex) and are slightly inclined towards each other. Connection of the TR probe on the instrument is made in the **TR** or **dual mode**, i.e. one element is connected to the transmitter and the other with the input of the receiver amplifier. The initial pulse is positioned far left of the display due to the long delay path, Fig. 36.

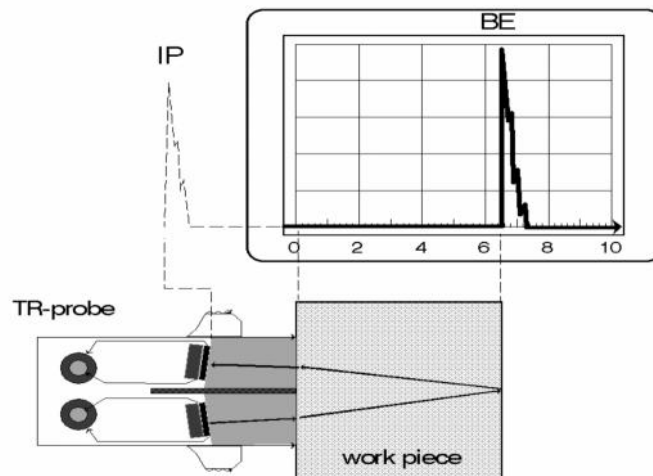


Fig. 36 TR probe on the test object: CRT with backwall echo.

Multi-reflections within the delay path of the transmitter do not interfere because the transmitter element does not have any reception function. Only when the sound pulses come out of the test object and into the receiver element of the TR probe do evaluatable echoes appear on the display.

The electrical and acoustic separation is, due to technical reasons, not completely possible. Especially high gain adjustments and rough test object surfaces cause portions of sound to be directly transferred from the transmitter to the receiver.

This generates an interference echo on the display which is called the **cross-talk echo**. The cross-talk echo can exactly cover the near-surface area of the test object and once again there is a loss in detection sensitivity, especially of small discontinuities. However, most cross-talk echoes are so small, or even negligible, that they can be clearly distinguished from possible discontinuity echoes, Fig. 37.

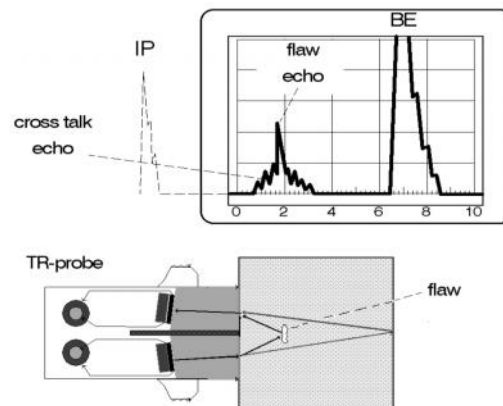


Fig. 37 TR probe on the test object: discontinuity echo in the cross-talk echo.

TR probes are therefore ideally suited for the detection of near-to-surface discontinuities and for thickness measurements on thin test objects. The TR probe reacts considerably less sensitive to coupling variations which may be caused by rough or curved material surfaces. This characteristic explains why TR probes play a valuable part in the chemical and energy generating industries: they are ideal for testing all types of tubes and containers, for the detection of discontinuities in tube walls, and for measurements of inside corrosion and remaining wall thicknesses. Special high temperature probes are even able to measure the wall thickness on test object surfaces up to about 550°C so that installations can be tested during operation.



Fig. 38 Wall thickness measurement with a digital thickness gauge in practice.

5. Locating discontinuities

5.1 Calibration of the instrument

The location of a discontinuity can be instantly determined using its echo if the instrument is correctly **calibrated**. Calibration means, linear display, from the zero point on the scale, of a certain distance range of the object to be tested. The zero point on the scale corresponds to the surface of the test object and the 10th scale graduation the maximum distance, e.g. 100 mm steel, 10 mm aluminum, 25 mm brass etc. When specifying the **calibration range** the naming of the material is also important because the displayed distance of the echo, **sound path s**, is always deduced from the time of flight t of the pulse and the sound velocity c according to the equation:

$$s = \frac{ct}{2}$$

- ✓ s = sound path [mm]
- ✓ c = sound velocity [km/s]
- ✓ t = transit time [ms]

This relationship is not unimportant for the ultrasonic operator but it is not required for the sequence of calibration. The rule simply says:

Use a work piece of the same material as the test object whose dimensions are known. By coupling the probe onto an object of known thickness t an echo sequence appears on the display, Fig. 39. The associated sound paths correspond logically to the paths being travelled in the test object, for example with a straight-beam probe it is the multiple of the test object's thickness t , therefore:

- 1st Echo = t ,
- 2nd Echo = $2t$,
- 3rd Echo = $3t$, etc.

We must now adjust 2 of these echoes on the corresponding scale graduation to the required calibration range.

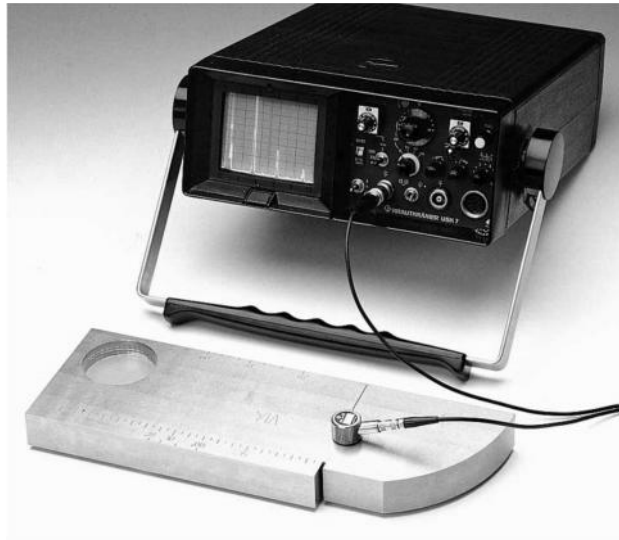


Fig. 39 USK 7: Backwall echo sequence with a straight-beam Probe.

The instrument is then calibrated, i.e. by reading off the scale position T the sound path s (distance) of the associated reflector can be determined (location of reflectors, wall thickness measurement).

5.1.1 Calibration with a straightbeam probe

The reference piece used for calibration is called the **Calibration Block**, or **Standard Calibration Block**, if the block used is standardized. The **Standard Calibration Block 1**, also simply referred to as **V1 block** (according to BS 2704 - A2), has a thickness of exactly 25 mm and is made of low-alloyed fine grained steel so that it can be used for nearly all types of calibration when similar steels are to be tested. **Example 1:** Calibration range 100 mm steel (longitudinal waves) The 10 scale graduations on the horizontal display scale are to have a range of 0 to 100 mm steel, Fig. 40. One scale graduation therefore corresponds to 10 mm in the test object. We say: **the scale factor k** (display scale) is 10 mm per scale graduation.

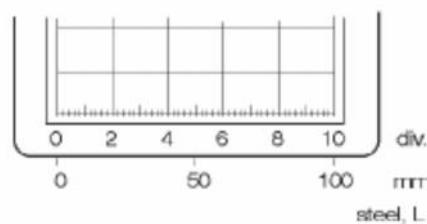


Fig. 40 Calibration range: 0-100 mm.

We couple the straight-beam probe to the V1 block (laying flatwise), Fig. 39. The backwall echo sequence now comes from the 25 mm steel path. The allocation of sound paths s_i to the corresponding scale positions T_i is carried out using the **calibration table**:

Echo-No i	Sound path s_i [mm]	Scale factor k [mm/scale grad.]	Skalen- position T_i [scale grad.]
1	25	10	2.5
2	50	10	5.0
3	75	10	7.5
4	100	10	10.0

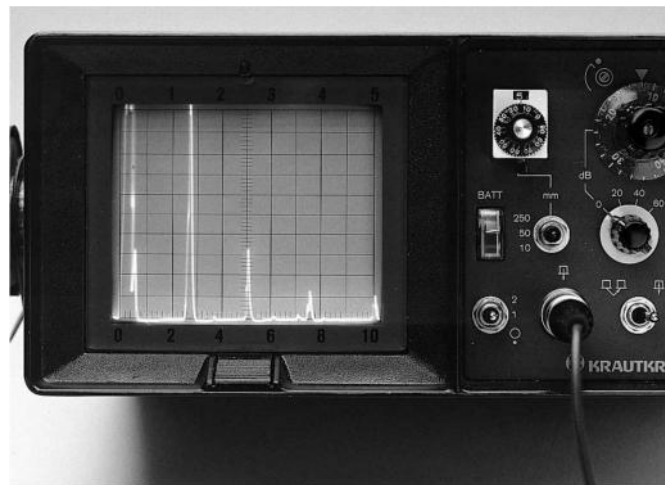


Fig. 41 USK 7: Calibration in the 100 mm range.

The corresponding scale position T_i is calculated by using the formula:

$$T_i = \frac{s_i}{k}$$

- ✓ s_i = sound path of umpteenth echoes
- ✓ T_i = scale position of the umpteenth echo
- ✓ k = scale factor

The exact adjustment of echoes from the calibration block, as in Fig. 41, is made with analog ultrasonic flaw detectors using the controls **pulse shift** (or **delay**) as well as **coarse and fine ranges**.

In doing this, the adjustments must be alternately carried out at these points until the echo flanks are at the correct scale positions. With modern digital instruments the calibration range of 100 mm and the sound velocity of 5920 m/s are firstly entered. After coupling the probe to the calibration block, the function **delay** or **probe delay** is changed until the echoes are correctly positioned, Fig. 42.

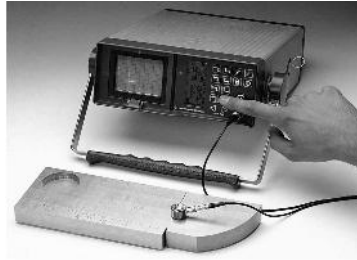


Fig. 42 USK 7 D: Consideration of the probe delay.

Example 2: Calibration range of 250 mm in aluminum 10 scale graduations correspond to 250 mm in aluminum: $k = 25 \text{ mm/graduation}$. We couple the straight-beam probe to an aluminum test block which is 80 mm thick, i.e. a backwall echo sequence is produced from this thickness ($t = 80 \text{ mm}$), Fig. 43.



Fig. 43 USK 7 D: Calibration of a 250 mm range with an 80 mm aluminum path.

The calibration table now looks like this:

Echo-No i	Sound path s_i [mm]	Scale factor k [mm/scale grad.]	Skalen- position T_i [scale grad.]
1	80	25	3.2
2	160	25	6.4
3	240	25	9.6

Exact reflector location is only possible after correct calibration of a test instrument. The ultrasonic operator moves the probe over the test object. In a normal case, i.e. when a discontinuity does not exist, only the initial pulse and the backwall echo are visible on the display. As soon as a discontinuity is within the area of the sound beam, an additional echo appears between the initial pulse and the backwall echo, Fig. 44, e.g. an echo at scale graduation 1.4. With calibration in the 250 mm range the distance to the reflector s is therefore $1.4 \times 25 = 35 \text{ mm}$.



Fig. 44 USK 7 D: Sound path measurement.

5.1.2 Calibration with a TR probe

For technical reasons, the calibration with a TR probe can only be made to a certain extent using a backwall echo sequence from a comparison object. Due to the slight angular beaming, Fig. 35, transverse waves occur with the TR probe which cause strong interference behind the 1st backwall echo so that the 2nd backwall echo is often unable to be identified. Therefore, a stepped calibration block is used for the adjustment of both echoes, alternately going between two steps (2 point calibration).

Example 3: Calibration range for 10 mm steel.

Step block VW (steel: 1 - 8 mm). The 3 mm and 6 mm steps should be used for calibration. The step selection depends on the depth range of the expected reflectors. Here the echo from 3 mm must be adjusted to the 3rd scale graduation and the echo from 6 mm to scale graduation 6, Fig. 45a+b.

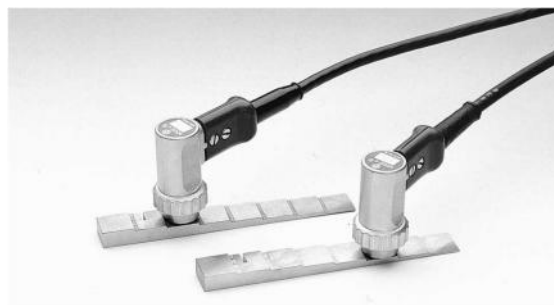


Fig. 45a The two positions (3 mm and 6 mm step) of the TR probe on the stepped calibration block VW.

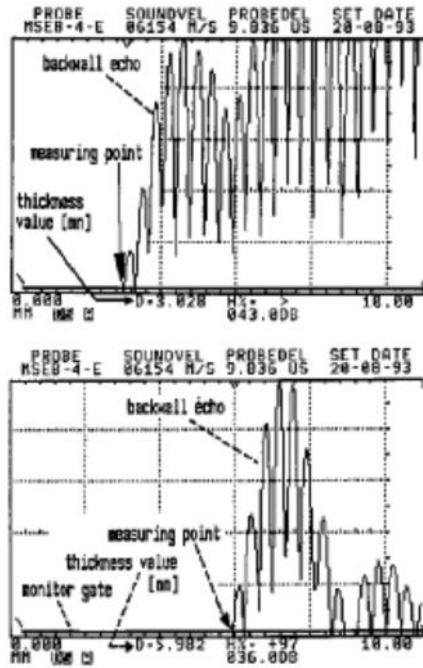


Fig. 45b Calibration echo at the 3rd graduation (top) Calibration echo at the 6th graduation (bottom).

- a) Firstly, we couple the TR probe to the 3rd mm step and use the delay control for adjusting the echo flank to the 3rd scale graduation.
- b) Now we couple the probe to the 6 mm step and bring the echo to the 6th scale graduation with the range control.
- c) Steps a) and b) are alternately repeated until both echo flanks are exactly on the 3rd and 6th scale graduations, Fig. 45a+b.

The main application of TR probes are wall thickness measurements, but they are also suitable for the detection of near-to-surface discontinuities, Fig. 46a+b.

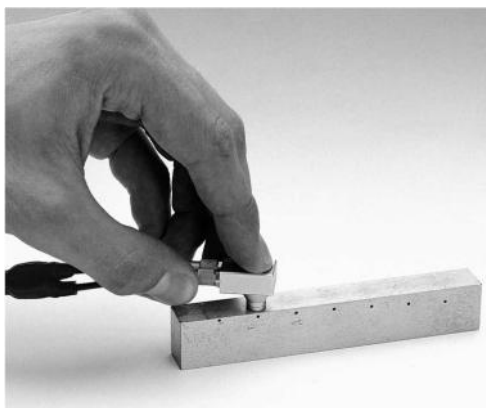


Fig. 46a Probe DA 312 on a specimen with a side drilled hole in a depth of 1 mm.

5.1.3 Calibration with an anglebeam probe

For calibration of the test instrument with an angle-beam probe the standard calibration block 1, Fig. 47a, and the calibration block V2 (according to BS 2704 - A4), Fig. 47b, are almost exclusively used because no backwall echo sequence is received due to the angular beaming from a plane-parallel calibration block.

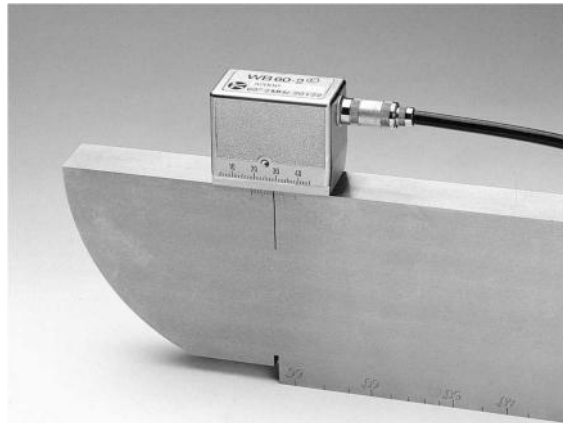


Fig. 47a WB 60-2E on Calibration Block 1



Fig. 47b MWB 45-4E on Calibration Block 2

The advantage with echoes from the circle segment of the calibration block is that the same sound path is always given independent of the probe angle, Fig. 48.

When the angle-beam probe is exactly coupled in the center of the circle segment, a first echo is exactly received from 100 mm out of V1 block. According to the reflection law, the sound waves coming out of the arc are reflected away from the coupling surface to the back, this means away from the arc, Fig. 49a.

A second echo out of the arc, needed for the calibration sequence, cannot therefore be produced. For this, there are two saw cuts made in the center of the quarter circle: in the edges, which these saw cuts form with the surfaces, the sound waves are reflected back within themselves due to double reflection (**angle reflection effect**) so that they go back to the arc, Fig. 49b.

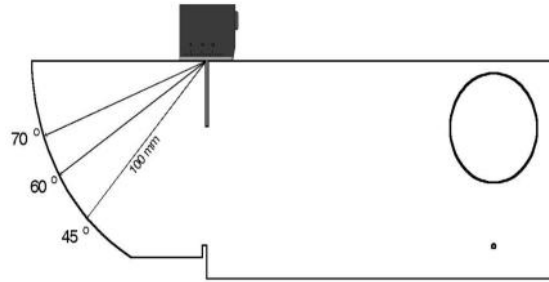


Fig. 48 Different probe angles at V1 block

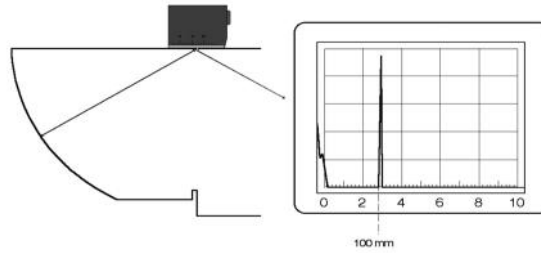


Fig. 49a Sound path in the V1 block without angle reflection

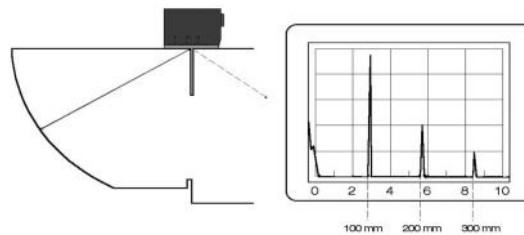


Fig. 49b Sound path in the V1 block with angle reflection

Because the radius of the circle segment is exactly 100 mm we will regularly receive an echo sequence with distances of 100 mm, 200 mm, 300 mm etc. with which we are able to carry out calibration of the test instrument the same way as the straightbeam probe. Fig. 50 shows calibration of the 250 mm range.



Fig. 50 Range: 250 mm with a WB 60-2 on V1 block

For the miniature angle-beam probe one uses the considerably smaller and lighter Standard Calibration Block 2 (V2 block). This has, as opposed to the V1 block, two circle segments with a common center point, however it does not have saw cuts. The

required echo sequence is produced here by the alternating reflection of the sound waves, Fig. 51a+b.

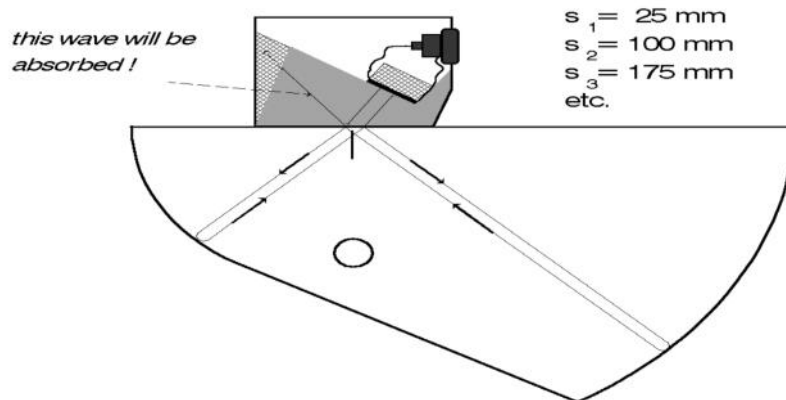


Fig. 51a Path of a sound wave in a V2 block, radius 25 mm

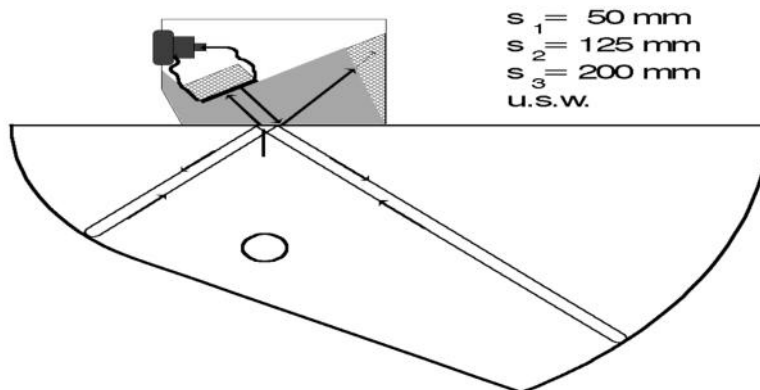


Fig. 51b Path of a sound wave in a V2 block, radius 50 mm

The corresponding echo sequence is produced according to whether the probe beams into the 25 mm radius or the 50 mm radius. No echoes appear with sound paths by which the sound pulses from the "wrong" direction meet at the center point because these pulses are absorbed by the front damping element of the probe. Fig. 52 shows calibration of the 100 mm range by scanning into the 25 mm radius of Standard Calibration Block V2.

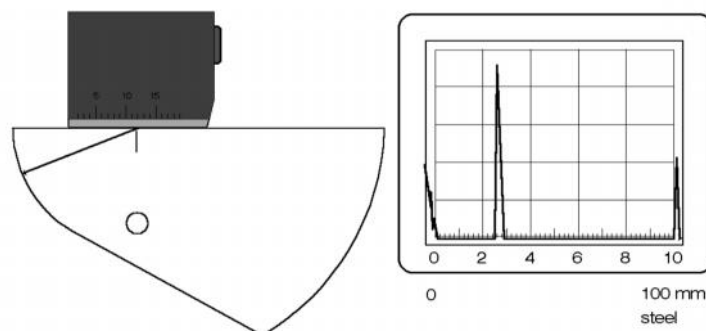


Fig. 52 Range: 100 mm calibrated on V2, radius 25 mm

5.1.4 Locating reflectors with an angle-beam probe

The echo of a discontinuity on the instrument display does not now give us any direct information about its position in the material. The only available information for determination of the reflector position is the scale position and therefore the sound path s , this means the distance of the discontinuity from the **index point** (sound exit point) of the probe, Fig. 53.

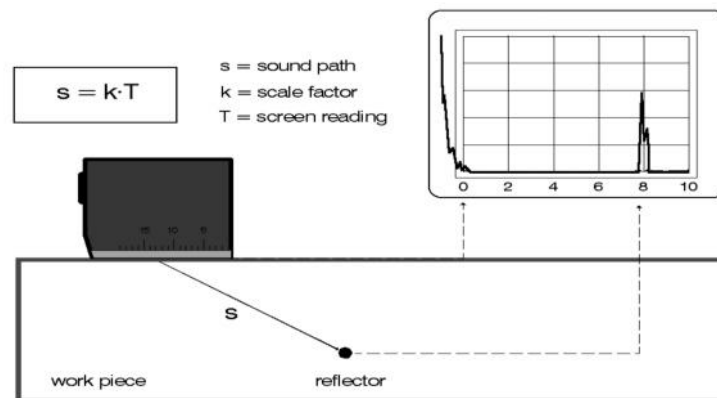


Fig. 53 Scanning a reflector using an angle beam probe

The mathematics of the right-angled triangle helps us to evaluate the **Surface Distance** and the **Depth** of a reflector which are both important for the ultrasonic test, Fig. 54a.

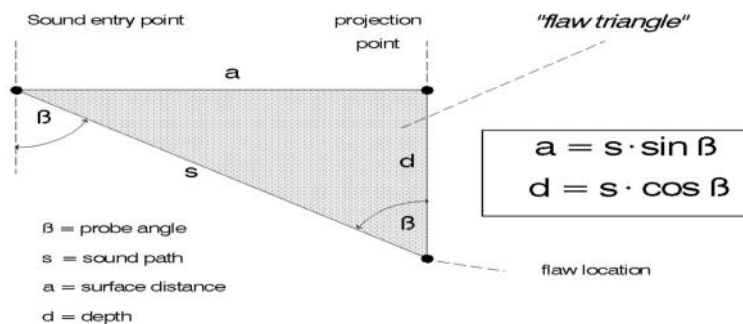


Fig. 54a The flaw triangle

We therefore now have the possibility to instantly mark a detected flaw's position on the surface of the test object by measurement of the surface distance from the sound exit point and to give the depth. For practical reasons, the **reduced surface distance** is used because this is measured from the front edge of the probe. The difference between the surface distance and the reduced surface distance corresponds to the **x-value** of the probe, this is the distance of the sound exit point to the front edge of the probe, Fig. 54b.

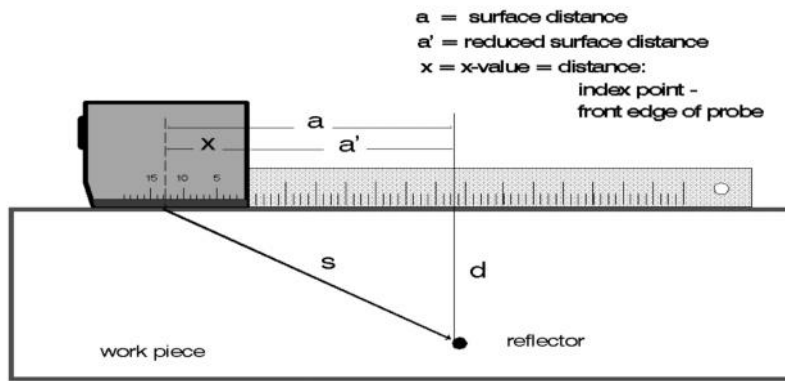


Fig. 54b Reduced surface distances and x-value

With ultrasonic instruments having digital echo evaluation these calculations are naturally carried out by an integrated microprocessor and immediately displayed so that the operator does not need to make any more time-consuming calculations, Fig. 55.



Fig. 55 USN 50: A hole being scanned with the probe MWB 60-4E

This is of great help with weld testing because with the calculation of the flaw depth an additional factor must be taken into account, namely: whether the sound pulses were reflected from the opposing wall. If this is the case then an **apparent depth** of the reflector is produced by using the depth formula which is greater than the thickness T of the test object.

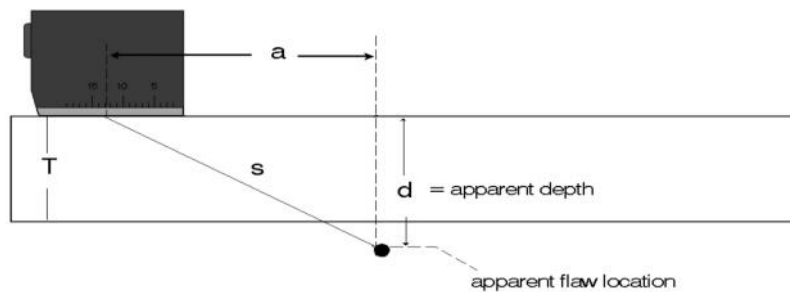


Fig. 56a The apparent depth

The ultrasonic operator must ascertain whether a reflection comes from the opposite wall and then proceed with calculating the reflector depth, Fig. 56b.

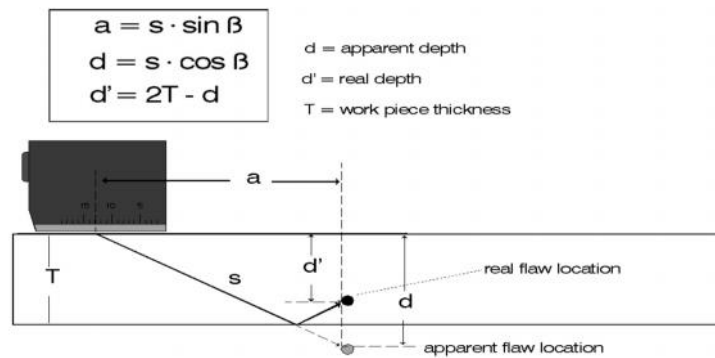


Fig. 56b The real reflector depth after sound reflection

6. Evaluation of discontinuities

Of course, a discontinuity is best evaluated when its size (extension) is known. The operator's wish to accurately know the "real reflector size" is understandable therefore it is expected that a nondestructive testing method, such as ultrasonic testing, give this information. However, due to the fact that on the display only the echo can be interpreted, this means the reflected sound coming from the discontinuity, it is very often difficult, and in some cases even impossible, to reliably assert the size of the reflector. In fact, the echo height plays the decisive part when evaluating discontinuities during manual Ultrasonic Testing.

6.1 Scanning method

In ultrasonic evaluation one is frequently able to come near to the true reflector size as long as the discontinuity is large compared to the diameter of the sound field. The discontinuity then reflects the complete impacting energy back, Fig. 57.

By scanning the boundaries of the discontinuity, reliable information can be obtained about its extension. The ultrasonic operator normally observes the height of the discontinuity echo. The probe position on the test object at which the echo drops by exactly half indicates that the discontinuity is only being hit by half the sound beam, Fig. 58a.

This means that the acoustic axis is exactly on the boundary of the discontinuity. The probe position is marked and the operator determines further boundary points until a contour of the discontinuity is formed by joining the marked points together, Fig. 58b.

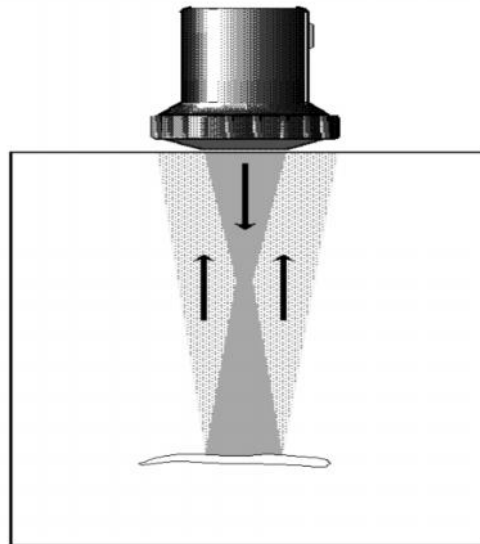


Fig. 57 A large reflector in the sound beam

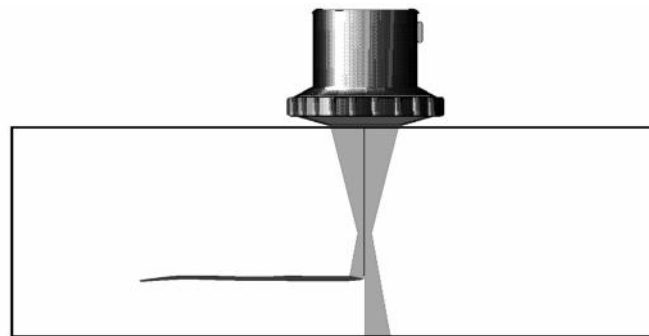


Fig. 58a Straight beam probe on the reflector boundary

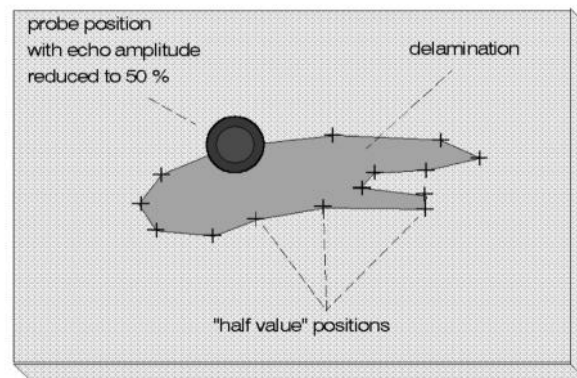


Fig. 58b Top view with reflector for extension

Location of the reflector boundary becomes more exact the smaller the diameter of the sound beam is at the reflector position. Therefore, if the reflector extension is to be exactly measured it is recommended that a probe be selected which has its focal point at the same distance as the reflector.

TR probes are especially suited which have a hose-shaped sound beam with a small diameter (1 - 3 mm) at their most sensitive depth range.

6.2 Evaluation of small discontinuities: The DGS method

A reflector which is completely contained within the sound beam is regarded as a **small reflector**. If such a reflector is evaluated by scanning then it is not the size of the reflector which is obtained as a result but the diameter of the sound beam! Therefore, the scanning method is not practical in this case. We have noticed previously that the height of a reflector echo will become greater the larger the sound beam area is which covers the reflector. This feasible behavior can be used on small reflectors: their echo heights increase with their areas, Fig. 59.

Under optimal conditions, e.g. drill holes with flat bottoms and at equal depths, this law can be confirmed: **The echo heights are proportional to their area or The echo heights are proportional to the square of their diameter.**

Example: The flat-bottom hole with a diameter of 2 mm has an echo which is 4 times that of a 1 mm flat-bottom hole because the area has quadrupled. However, if the echoes from two drill holes at different depths are compared then an additional distance dependence of the echo heights is established, Fig. 60.

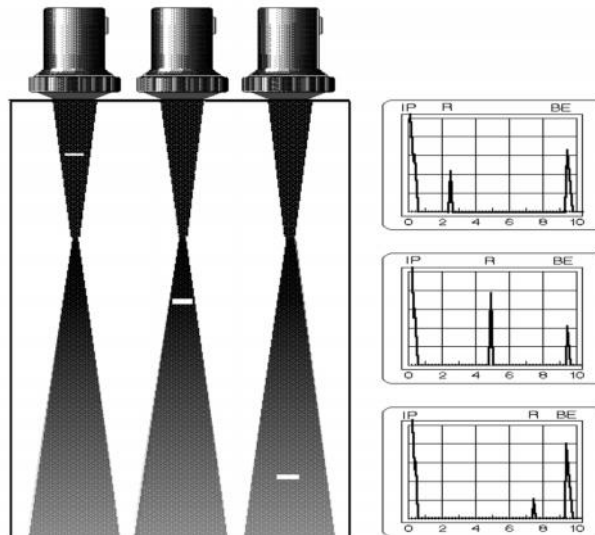


Fig. 60 Reflectors at different depths and their echoes

With accurate tests using flat-bottom holes at different depths a simple law can be found, at least in the far field of the applied sound beam: **The echo heights inversely reduce to the square of their distance.**

This does not normally apply to the nearfield of the sound beam! Here, the test results show that the echo heights within the focus reach their highest amplitude and are reduced again at shorter distances, Fig. 61.

If such curves are put on transparent scales having the CRT format then we immediately have the possibility to comparatively evaluate echoes from unknown reflectors and those from natural reflectors, i.e. the echo height of the discontinuity is compared to that of a circular disk. The discontinuity in Fig. 62 reflects the sound waves the same as a circular disk having a diameter of 4 mm.

Due to the fact that we can only assess the sound reflected from the discontinuities we must of course not equate the diameter of 4 mm with the "true size" of the discontinuity. We therefore refer to them as an **equivalent disk-shaped reflector** or

as **equivalent reflector size (ERS)**. The equivalent reflector size only corresponds to the true reflector size of a discontinuity in an ideal case which is when it is circular and exactly hit vertical to the acoustic axis.

In practice this almost never occurs which means that the true size of a discontinuity is normally **larger** than the equivalent reflector size. A law for this cannot be derived because the echo height is strongly dependent on the characteristics of the discontinuity, this means its geometry, orientation to the sound beam and the surface quality. For example, a pore (spherically shaped gas inclusion) with a diameter of 2 mm has an equivalent reflector size of 1 mm; an angled flat reflector 5 mm long gives, according to orientation, a result of ERS 0 (not detectable) to perhaps ERS 2.

This uncertainty in the evaluation of the discontinuity is however neutralized when other possibilities and techniques in ultrasonic testing are used to inspect detected discontinuities closer. An experienced ultrasonic operator can, without additional expense, accurately give information about the discontinuity which he has detected. Scanning the discontinuity from different directions, assessing the echo shape and the behavior of the display when moving the probe (**echo dynamics**) are just a few techniques which can be successfully applied.

Despite the remaining uncertainty with evaluation of natural discontinuities the above method of discontinuity evaluation is applied in many countries due to the fact that the method is based on well proven laws in the sound field. It is therefore **reproducible**, i.e. the evaluation results are independent of testing device and operator.

The so-called **DGS scales** or discontinuity evaluation can be obtained from the probe manufacturer for many probes and various calibration ranges. **DGS** means that the scale is allocated an echo at the **Distance**, with correctly set **Gain** and (equivalent reflector) **Size**. However, the modern version of the DGS scale would need some explanation because it was developed to fulfill the requirements of the most common specifications in practical testing: If, on a certain test object whose purpose and therefore stress values are known, an ultrasonic test is to be carried out then firstly, if necessary with destructive testing, it should be established how large the permitted material flaw should be. Of course, the position of such a flaw in the material and its rate of occurrence play a part.

If a permitted flaw size has been determined then this size is multiplied with the safety factor which, amongst others, also takes the evaluation uncertainty of the ultrasonic test into account. The corresponding echo amplitude curve for this size is now of importance for the ultrasonic test. The ultrasonic operator scans the test object with the probe and only needs to record the indications which exceed this **recording curve**, Fig. 63.

Consequently, only one curve is necessary for the evaluation. Due to the fact that, depending on the application, different **recording limits** occur, it must be possible to allocate other equivalent reflector sizes to this curve. This allocation is shown by a table positioned at the top right of the scale: starting from a defined default setting of the instrument, the **auxiliary gain** is taken from the table which belongs to the required recording value and added to the gain controls. If the correct range calibration has been made then test object scanning can now begin. When an indication from the test object exceeds the recording curve then this result is to be recorded in writing and evaluated. If required, the **test instructions** provide the following measures: rejection, repair or further tests for exact assessment of the discontinuity (**diagnosis**).

Fig. 64 shows testing of a forged part. The recording curve corresponds to Equivalent Reflector Size 3. The detected discontinuity, at a depth of 110 mm, exceeds the curve, i.e. all reflector data must now be recorded into a predetermined form.

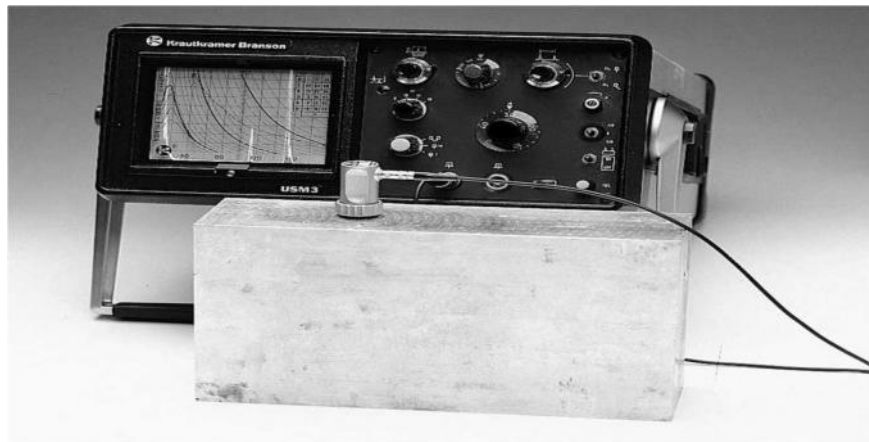


Fig. 64 Discontinuity evaluation with a DGS scale

6.3 Sound attenuation

In addition to the laws which establish the behaviour of disk shaped reflectors within the sound beam of a probe (**distance and size laws**) another effect can be observed: **The sound attenuation**. The sound attenuation is caused by the structure of the test object but is also strongly dependent on the frequency and the wave mode of the applied probe. Only when these effects are known can they be considered by the discontinuity evaluation. However, the evaluation becomes more difficult, time consuming and more unreliable so that DGS evaluation can be burdened with tolerances which are too great.

6.4 The reference block method

These uncertainties in evaluation can be reduced when there is a so-called **reference block** available which is made of the same material as the object to be tested and which also contains artificial reflectors whose echoes can be directly compared to the discontinuity echoes from the test object. The application of the **reference block method** is, in practice, made in two different ways:

6.4.1 Comparison of echo Amplitudes

The test object is tested with a high gain setting by which the smallest detectable reflector is displayed. An echo indication is **peaked**, i.e. the maximum echo indication is achieved by careful movement of the probe and the echo peak set by adjustment of the gain to a predetermined height, e.g. 80% CRT screen height (**reference height**), Fig. 65.

Using the same settings, the reflector from the reference block is scanned which is approximately positioned at the same distance as the discontinuity, Fig. 66.

The quantitative unit for evaluation is now the gain change of the ultrasonic instrument which is necessary to set the **reference Echo** to the reference height, Fig. 67.

Result: The discontinuity echo is 8 dB higher than the reference echo because the gain must be increased by 8 dB (from 34 dB to 42 dB).

The recording limit normally corresponds to the echo height of the reference reflector whose size is to be determined, the same as the DGS method, before the ultrasonic test.

6.4.2 Distance amplitude curve

All reflectors in the reference block are scanned before the test, their maximum echo heights marked on the attachment scale of the display and joined by a curve, Fig. 68.

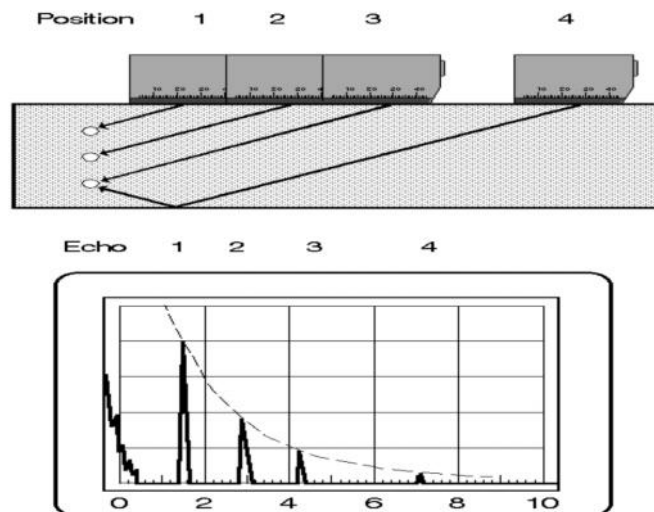


Fig. 68 Reference block with side drilled holes and resulting echoes

The curve produced is called the **Distance Amplitude Curve**, or DAC for short. When a discontinuity echo appears, an immediate assessment can be made whether or not the discontinuity echo exceeds the DAC. In addition to this a determination is made, by a corresponding gain change, to see by how many dBs an echo exceeds the curve. This **excess recording echo height (EREH)** is our reproducible measure for the evaluation and reporting of the discontinuity.

The advantages of the reference block method with a DAC are:

1. That it is no longer necessary to compare each discontinuity echo with the corresponding reference echo from the reference block but to directly make the evaluation with the DAC.
2. That the heavy reference block need not be transported to the testing location.

3. That the recording of a DAC for certain applications is only required once because the curve is documented on a transparency or in the memory of a modern ultrasonic test instrument.

By recording the curve using reflectors in a test object comparable to the work piece, this curve contains all the influences in the test object (distance law, sound attenuation, surface losses). Corresponding corrections are therefore not necessary. Regarding the evaluation results, we must understand here that the effect of the discontinuity (geometry, orientation and surface quality) is not taken a great deal into account the same as the DGS method. Therefore, the result of a discontinuity evaluation with the reference block method has the same uncertainty as the DGS method.

The preference regarding which method to use is subjective. The corresponding national test specifications normally state the test method to be used so that the operator is not able to make his own decision. If no data is available, the test situation should be analyzed in order to decide which method be best used:

Firstly, it must be established whether a reference block exists which corresponds to the test object. If yes, then the test can be carried out simply and reproducibly with the reference block method. If no reference block is available then the DGS method can be used, or a reference block must be subsequently produced comparable to the test object.

However, in many cases the DGS method can be used without difficulty, namely when the test object is made of low alloy steel, has a simple geometry, a low sound attenuation and an even surface quality. The test should be carried out with a narrow band standard probe with a frequency between 1 MHz and 6 MHz for which there is a DGS diagram or a DGS scale.

The new computer controlled instruments normally support the program controlled recording of DACs. With the USD 10 the recorded DAC is automatically converted to a horizontal line. This is known as **time corrected gain (TCG)**, Fig. 69.

The recording curve is therefore an horizontal line so that the evaluation can be visually and acoustically supported using a **monitor gate** (flaw alarm), Fig. 70a-c. At the same time for each echo, the excess recording echo height is displayed in dB (DBR value in the measurement line of the USD 10) in addition to the data for discontinuity location.

Of course, the recorded curves, including the complete instrument settings, can be stored. It is therefore guaranteed that any later tests can be carried out with the same settings. By storing the instrument settings, including the active A-Scans with the discontinuity echo, the operator has all the data available for producing a test report at any time.

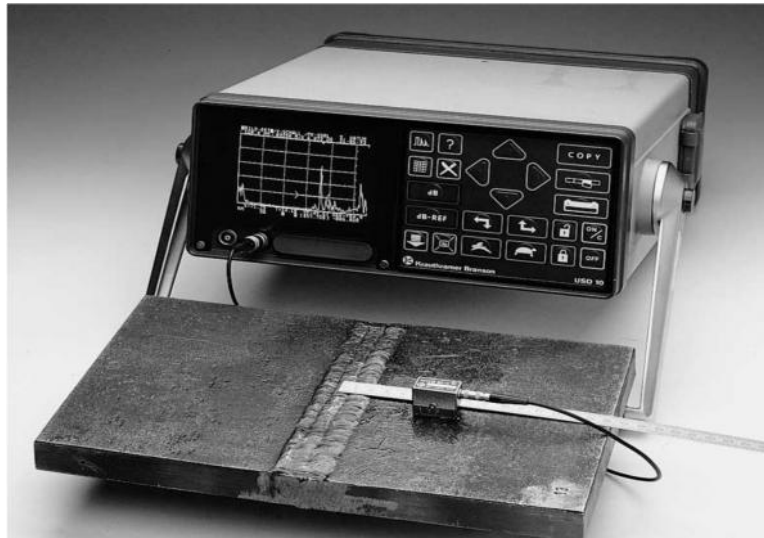


Fig. 70a Weld testing with the USD 10

7. Documentation

The higher the value of a test object or the greater the importance of a component with regard to the safety requirements of the complete object, e.g. an aircraft bolt, then the more important the required ultrasonic documentation becomes (**product liability**). On the one hand this documentation proves that the test was completely and correctly carried out, and on the other hand enables the test to be repeated at any time under the same conditions (**test reproducibility**).

The documentation, the **test report** of an ultrasonic test, roughly consists of 3 parts:

- a. Data concerning the test object and the test method.
- b. Data concerning the testing device.
- c. Results of the test:

Typical tabular list of all detected and evaluated discontinuities, refer to the example report, if necessary, a drawing of the test object with flaw positions.

The operator must record data during the test, especially data of the detected discontinuity. Creation of the actual report is normally made later in the office. The recordings must be frequently supplemented by calculations before the operator transfers them into the report. The creation of a test report very often takes as much time as the actual test itself and should be taken into account when determining test expenditure. Even when working conscientiously, transfer or calculation errors cannot be excluded, especially with large amounts of data.

Modern ultrasonic instruments with memory and data transfer functions greatly improve recording of the adjustment data and test results during the test as well as creation of the test report and therefore ease the operator of a burden, who can then concentrate on the test task. By directly storing of all discontinuity data in the instrument, transfer errors can be excluded, position coordinates of the detected discontinuities are entered into the instrument and are therefore contained in the stored data set along with the A-Scan. If required, the documentation can be printed at the test location, Fig. 71.

Individual documentation matched to the test task is carried out with a PC. The possibilities for measurement data processing are as versatile as the programs offered on the market. In order to make the application of data communication with a digital ultrasonic instrument flexible, a utility program is very often used. This is normally a program which is easy to operate and enables reliable data transfer between PC and test instrument.

In addition to this, all stored instrument settings (= **Data set**), the corresponding adjustment parameters (= **Function lists**), the display contents (= **A-Scans**) as well as the individual parameters can be recalled and stored on a floppy disk or hard disk. Function lists are filed into an ASCII format, A-Scans and LCD menus in normal graphic formats (PCX, IMG). A data set corresponds to a complete instrument adjustment and is saved in a hexadecimal format. This guarantees that by return transfer of the data set to the test instrument exactly the same instrument settings are available. The function lists and graphics are now available to the operator for further use.

Now he is able to use his own program (word processing, database) for individual design of his own test documentation. Instrument settings and display graphics are simply read into his program. This routine work is easily made by a so called **Macro**. A macro is nothing more than a list of commands belonging to the user program being used and runs automatically thus creating the required documentation. The names of the files to be processed are requested, in dialog, by the operator.

The following report is an example of documentation automatically produced for a weld test. The test was made with the USK 7 D and the indications from the discontinuities stored in the instrument. Finally, all data (function lists and A-Scans) were stored on a disk using the program **UltraDoc**. The test report was made with a macro from the program **WordPerfect 5.1**:

Ultrasonic test report
(example referring to AD-Merkblatt HP 5/3)

Manufacturer	SLV-Duisburg	Weld test	Specimen No. 1
Weld type:	V	Weld preparation:	30°
Welding method:	Covered electrode	Parent material:	ST 52
Added material:	unknown	Test volume:	Weld + HAZ
Test surface:	1,2 (see drawing)	Test surface condition:	evenly rough
Weld thickness:	25 mm	Weld width:	32 mm
Weld length:	200 mm	Reference points:	see drawing
Misc.:	Evaluation with DGS scale		
Test instrument:	USK 7 D	Calibration range:	200 mm
Sensitivity setting:	ERS 3 + 6 dB	Corrections:	+ 14 dB transfer loss
Probe:	MWB 70 4E	Frequency:	4 MHz
Angle of incidence:	70°	Scanning position:	see drawing
Standard Calibration block:	V2	Reference block:	R25/C
Couplant:	ZG 5	Pre-test:	nothing found
Test class:	b	Recording threshold:	ERS 3

Indications to be recorded:

No.	Sec.	l1	lmax	l2	t	dt	d	Dir	dB	Findings / remarks
1	1	0	20	30	0	4	21	2	+ 18	Root crack
2	1	0	30	32	- 1	3	23	1	+ 6	Root crack
3	1	166	191	201	0	2	21	2	+ 6	Root crack
4	1	163	168	201	- 1	2	22	1	+ 2	Root crack
5	1	-	126	-	2	-	19	1	- 8	Pore/small inclusion near edge
6	1	-	50	-	0	-	22	6	- 6	Transverse crack

Test location:	Cologne	Date:	12.3.1991
Operator:	J. Smith	Test result:	Repair necessary
Signature:		Supervisor:	H. Müller

8. Diagnosis of indications (outlook)

As opposed to the tasks of an ultrasonic operator, dealt with up until now, the diagnosis of indications is not only based on measured ascertainable parameters. The interpretation of the echo is an additional task. This interpretation normally requires many years of practical experience including carrying out comparison tests of ultrasonic findings with the results of a destructive test on a test object which is no longer to be used.

Methods for diagnosis of indications as well as signal analysis techniques using auxiliary equipment are outside the bounds of this introduction to ultrasonic testing. For this, there is a range of literature available as well as many special publications which we would like to point out to the reader.