



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

«ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ PHASED
ARRAY»

Εκπόνηση: Γεώργιος Π. Παπαστεργίου, ΑΕΜ: 2651

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Κυργιαζόγλου

ΚΟΖΑΝΗ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2024

Πρόλογος

Πρόλογος-Ευχαριστίες,

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΥΠΕΡΗΧΩΝ PHASED ARRAY» εκπονήθηκε στο εργαστήριο MEANDER NDT Lab του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στο πλαίσιο του προπτυχιακού μαθήματος «Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι».

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αθανάσιο Κυργιαζόγλου για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και για την καθοριστική συνδρομή του στην παροχή του εργαστηριακού εξοπλισμού. Εν συνεχεία, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην εταιρεία TECHNOLOGY & QUALITY CONTROL CENTER τόσο για την εκπαίδευσή μου πάνω στους μη καταστροφικούς ελέγχους όσο και για την παροχή πολύτιμου εξοπλισμού και γνώσεων.

Με εκτίμηση,
Παπαστεργίου Γεώργιος

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	2
Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract	6
1.Εισαγωγή.....	7
1.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ)	7
1.2 Ιστορική αναδρομή της τεχνικής Phased Array	9
1.3 Βασικές αρχές του Phased Array	11
1.4 Δημιουργία δέσμης υπερήχων με κεφαλές Phased Array	12
1.5 Συμβατικός Υπέρηχος	13
1.6 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα μεθόδου Phased Array.....	15
2. Τεχνολογία Phased Array.....	16
2.1 Χαρακτηριστικά κεφαλών.....	16
2.2 Τύποι κεφαλών Phased Array.....	18
2.3 «Παπουτσάκια»-σφήνες κεφαλών Phased Array	19
2.4 Υλικό Σύζευξης	21
2.5 Λοβοί.....	22
2.6 Focal Laws.....	24
3. Απεικονίσεις Σαρώσεων	25
3.1 Σάρωση τύπου A (A-scan)	26
3.2 Σάρωση τύπου B (B-scan).....	27
3.3 Σάρωση τύπου C (C-scan).....	28
3.4 Σάρωση τύπου S (S-scan).....	29
3.5 Καμπύλη TCG.....	30
4. Συγκολλήσεις	31

4.1 Μέθοδοι συγκόλλησης	32
4.2 Σφάλματα/ασυνέχειες συγκολλήσεων	34
5. Διαδικασία ελέγχου με την μέθοδο Phased Array	38
5.1 Πρότυπα ελέγχων (Standards)	38
5.2 Πιστοποιήσεις/ Levels	39
5.3 Προϋποθέσεις ελέγχου	40
5.4 Απαιτήσεις ελέγχου	41
5.5 Βαθμονόμηση	43
5.6 Αβεβαιότητα	45
6. Έλεγχος δοκιμίου με τη μέθοδο Phased Array	47
6.1 Δημιουργία πλάνου σάρωσης (Scan Plan)	49
6.2 Βαθμονόμηση του Sonatest Veo+	52
6.2.1 Αναφορά Ελέγχου	52
6.2.2 Δοκίμια Βαθμονόμησης	54
6.3 Έλεγχος Δοκιμίου	60
7. Συμπεράσματα και Προτάσεις	65
7.1 Συμπεράσματα	65
7.2 Προτάσεις	66
Βιβλιογραφία	67
Βιβλιογραφία	67
Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις/ Πηγές	69

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας «Έλεγχος συγκολλητών δοκιμών με τη μέθοδο υπερήχων Phased Array» που εκπονήθηκε στο εργαστήριο «MEANDER NDT LAB» του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στο πλαίσιο του προπτυχιακού μαθήματος «Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι».

Στην εισαγωγή γίνεται μια αναφορά στους μη καταστροφικούς ελέγχους και επιχειρείται μια ιστορική αναδρομή της τεχνικής Phased Array και των βασικών αρχών στις οποίες συνίσταται. Επίσης, παρουσιάζεται η μέθοδος-αρχές του συμβατικού υπερήχου, ο οποίος και συγκρίνεται με τη μέθοδο Phased Array και επισημαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

Κατόπιν, στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Phased Array και συγκεκριμένα δίνονται πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των κεφαλών τους, τους τύπους των κεφαλών, τα «παπουτσάκια»-σφήνες, το υλικό σύζευξης, τους λοβούς και τα focal laws που σχηματίζονται στην τεχνική.

Στο τρίτο κεφάλαιο συζητούνται οι απεικονίσεις σαρώσεων, δηλαδή οι διάφορες οπτικές πλευρές σαρώσεων και γίνεται αναφορά στην καμπύλη TCG.

Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διάφορες τεχνοτροπίες εκτέλεσης των συγκολλήσεων και οι διάφορες ασυνέχειες-σφάλματα που εμφανίζονται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο προβάλλεται η διαδικασία ελέγχου με τη μέθοδο Phased Array και απαριθμούνται κατά σειρά τα πρότυπα ελέγχου, οι πιστοποιήσεις, οι προϋποθέσεις και οι απαιτήσεις ελέγχου, η βαθμονόμηση και η αβεβαιότητα του επακόλουθου αποτελέσματος.

Συνακόλουθα, στο έκτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα το κεντρικό θέμα της παρούσας εργασίας που είναι ο έλεγχος δοκιμίου με τη μέθοδο Phased Array, θίγονται και εξετάζονται η δημιουργία πλάνου σάρωσης, η βαθμονόμηση του μηχανήματος «Sonatest veo +» και η εκτέλεση του ελέγχου του δοκιμίου.

Εν κατακλείδι, ακολουθούν τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτείνονται προβληματισμοί για μελλοντική έρευνα. Επίσης, παρατίθεται η αντίστοιχη βιβλιογραφία με τις συνακόλουθες ηλεκτρονικές διευθύνσεις-πηγές.

Abstract

The subject of this thesis, titled "Ultrasonic Phased Array Testing of Welded Specimens", was conducted at the "MEANDER NDT LAB" of the Department of Mechanical Engineering at the University of Western Macedonia, within the framework of the undergraduate course "Non-Destructive Testing".

In the introduction, a reference is made to non-destructive testing (NDT), along with a historical overview of the Phased Array technique and the basic principles on which it is based. Additionally, the principles of conventional ultrasound are presented, which are then compared to the Phased Array method, highlighting their respective advantages and disadvantages.

Next, in the second chapter, the characteristics of the Phased Array technology are discussed, with specific information provided on the properties of the probes, the types of probes, wedges, couplant materials, lobes, and the focal laws that are formed in this technique.

In the third chapter, scan visualizations are discussed, particularly the various aspects of scans, with reference to the Time-Corrected Gain (TCG) curve.

Subsequently, in the fourth chapter, different welding techniques and the discontinuities or defects that may occur are presented.

In the fifth chapter, the process of inspection using the Phased Array method is outlined, including a detailed enumeration of inspection standards, certifications, requirements, calibration, and the uncertainty of the resulting measurements.

Consequently, the central topic of this thesis is presented in the sixth chapter, which is the inspection of a specimen using the Phased Array method. The chapter discusses the creation of a scanning plan, the calibration of the "Sonatest veo +" device, and the execution of the specimen inspection.

Finally, the thesis concludes with the conclusions and proposes considerations for future research. Additionally, the corresponding bibliography and related electronic sources are provided.

1.Εισαγωγή

1.1 Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ)

Ο Μη Καταστροφικός Έλεγχος (ΜΚΕ) αναφέρεται σε μια τεχνική επιθεώρησης που διεξάγεται σε διάφορα αντικείμενα, είτε μεταλλικά είτε μη μεταλλικά, χωρίς να προκαλεί τροποποιήσεις ή αλλοιώσεις. Ο πρωταρχικός στόχος των ΜΚΕ είναι να προσδιορίσει την παρουσία ή την απουσία ασυνεχειών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργικότητα ή τη χρησιμότητα ενός αντικειμένου ή μιας δομής στην οποία αποτελεί μέρος. Εκτός από αυτό, οι μη καταστροφικοί έλεγχοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση διαφορετικών ιδιοτήτων του αντικειμένου που επιθεωρείται, όπως διαστάσεις, πάχος, σύνθεση συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητας σε κράμα, σκληρότητα και μέγεθος κόκκων [1].

Ο όρος μη καταστροφικός έλεγχος περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούν ελαστικά κύματα, διεισδυτικές ακτινοβολίες, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, χημικούς αισθητήρες και πολλά άλλα. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διαφορετικές μεθόδους, όλες μοιράζονται μια κοινή φυσική βάση όπως η ακουστική, η οπτική, ο μαγνητισμός κ.λπ. Ωστόσο, ποικίλλουν στην πρακτική εφαρμογή τους είτε σε εργαστηριακές ρυθμίσεις είτε σε λειτουργίες πεδίου σε πραγματικό χρόνο, όπως κατά τη λειτουργία ενός εξαρτήματος ή κατασκευής [1].

Η εξέταση της «υγείας» ενός εξαρτήματος είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη εκτεταμένων ζημιών σε ολόκληρο τον μηχανισμό και τη μείωση των δαπανών επισκευής, την αποφυγή πιθανής διάβρωσης ή βλάβης και τη διασφάλιση ότι η ποιότητα των κατασκευασμένων εξαρτημάτων πληροί τα απαραίτητα πρότυπα [1].

Οι τεχνικές/μέθοδοι επιθεώρησης μη καταστροφικού ελέγχου έχουν καταστεί απαραίτητες στον κλάδο σήμερα, επιτρέποντας την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του υλικού χωρίς να προκαλούνται βλάβες και διασφαλίζοντας την ασφάλεια τόσο του εξαρτήματος όσο και των χειριστών. Αυτή η προσέγγιση εξοικονομεί χρόνο και χρήμα στην αξιολόγηση προϊόντων, την αντιμετώπιση προβλημάτων και τις ερευνητικές προσπάθειες.

Κυριότερες εφαρμογές των ΜΚΕ:

- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Αεροδιαστημική
- Κατασκευές
- Βιομηχανία
- Σιδηρόδρομους
- Αγωγούς Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου
- Εργοστάσια Παραγωγής Ενέργειας
- Ιατρική

Κυριότερες μέθοδοι Μη Καταστροφικού Ελέγχου είναι οι εξής [2]:

- Οπτικές Μέθοδοι
- Ραδιογραφικές Μέθοδοι
- Έλεγχος με Διεισδυτικά Υγρά
- Μέθοδος Μαγνητικών Σωματιδίων
- Μέθοδος Δινορρευμάτων
- Μέθοδοι Υπερήχων
- Μέθοδος Θερμογραφίας
- Μέθοδος Ακουστικής Εκπομπής

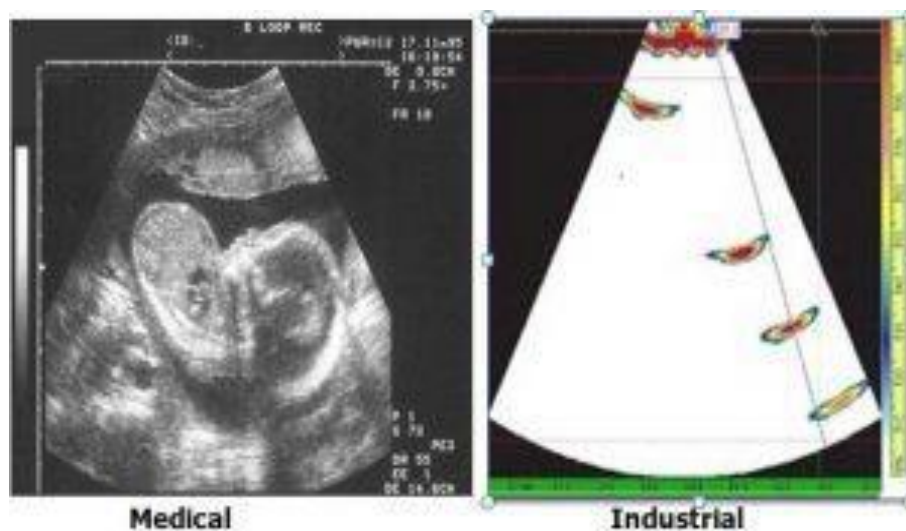
Η επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου βασίζεται στη δομή, τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του εξεταζόμενου υλικού. Για παράδειγμα, η μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων είναι κατάλληλη για σιδηρομαγνητικά υλικά, ενώ η ακτινογραφία μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα μεταλλικά ή μη μεταλλικά υλικά, ανεξάρτητα από το σχήμα ή τη δομή τους [2].

Σήμερα, διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται σε μη καταστρεπτικές δοκιμές. Η δοκιμή διείσδυσης υγρού είναι μια απλή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ελαττωμάτων εφαρμόζοντας μια υγρή διεισδυτική χρωστική ουσία σε μια επιφάνεια, όπου απορροφάται σε περιοχές με ρωγμές ή κενά, καθιστώντας ορατά τα ελαττώματα. Οι ηλεκτρομαγνητικές δοκιμές ανιχνεύουν ατέλειες χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενα πεδία ή απομακρυσμένα πεδία, εντοπίζοντας τόσο επιφανειακά όσο και εσωτερικά ελαττώματα. Η δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων είναι αποτελεσματική για σιδηρομαγνητικά υλικά, απεικονίζοντας ρωγμές με μαγνητισμό του υλικού. Η υπερηχητική δοκιμή ανιχνεύει βαθιές τρύπες και μικρά ελαττώματα παράγοντας ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας. Η θερμογραφία χρησιμοποιεί υπέρυθρες ακτίνες για να χαρτογραφήσει τις αλλαγές θερμοκρασίας που προκαλούνται από ελαττώματα, επιτρέποντας την ανίχνευσή τους. Η μελέτη των μη καταστροφικών υπερηχητικών δοκιμών, ιδιαίτερα της τεχνικής Phased Array, θα διερευνηθεί ως μία από τις προηγμένες μεθόδους σε αυτόν τον τομέα [2].

1.2 Ιστορική αναδρομή της τεχνικής Phased Array

Ο υπέρηχος είναι ευρέως αναγνωρισμένος από το κοινό για τη χρήση του σε ιατρικές εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνται ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας για να παρέχουν λεπτομερείς απεικονίσεις των εσωτερικών οργάνων και διάγνωση της κατάστασης των ατόμων. Στα ιατρικά υπερηχογραφήματα, συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικές πολυστοιχειακές κεφαλές, γνωστές ως κεφαλές συστοιχίας διαφοράς φάσης (Phased Array). Παρά ταύτα, οι υπέρηχοι με συστοιχίες διαφοράς φάσης δεν περιορίζονται μόνο στον ιατρικό τομέα. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας υπέρηχων - Phased Array (PA) στον βιομηχανικό τομέα ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Μέχρι τα μέσα της ίδιας δεκαετίας, οι εξελίξεις στα συνθετικά πιεζοηλεκτρικά υλικά επέτρεψαν την ανάπτυξη πιο περίπλοκων κεφαλών συστοιχιών φάσης [3].

Τα πρώτα χρόνια, η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε έργα κρίσιμης μηχανικής, όπως σε άξονες και εξαρτήματα στροβίλων πυρηνικών σταθμών. Τα πιο πρόσφατα χρόνια, έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση στη χρήση αυτών των συστημάτων στον βιομηχανικό τομέα για σκοπούς όπως ο έλεγχος συγκόλλησης, η ανίχνευση ρωγμών σε υλικά, η επιθεώρηση δεσμών μεταξύ διαφορετικών υλικών στις κατασκευές και η ακριβής μέτρηση του πάχους του υλικού [3].



Εικόνα 1.2.1: Απεικόνιση ιατρικής και βιομηχανικής εφαρμογής με την τεχνική phased array [25].

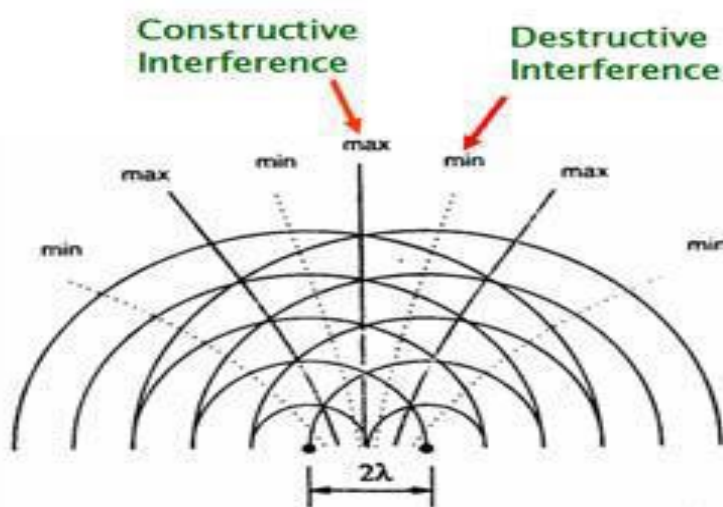
Στις πρώτες δεκαετίες εφαρμογής των συστημάτων υπερήχων, τα εμπορικά όργανα υπερήχων κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις ομάδες με βάση τον αριθμό των κεφαλών και τη μέθοδο λειτουργίας τους: α) Συστήματα με κεφαλές ενός στοιχείου που χρησιμοποιούσαν έναν πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο για την παραγωγή και λήψη ηχητικών κυμάτων, β) κεφαλές δύο στοιχείων που διέθεταν ξεχωριστούς κρυστάλλους για την παραγωγή και λήψη ηχητικών κυμάτων και γ) συστήματα ρίψης-σύλληψης (pitch-and-catch) ή διαμέσου μετάδοσης (through-transmission) που χρησιμοποιούσαν δύο κεφαλές ενός στοιχείου παράλληλα [3].

Αυτές οι τρεις ομάδες συστημάτων υπερήχων εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως από τα εμπορικά συστήματα υπερήχων για την ανίχνευση ατελειών και τη μέτρηση πάχους στη βιομηχανία. Ωστόσο, τα συστήματα συστοιχιών διαφοράς φάσης αποκτούν σταθερά εξέχουσα θέση και σημασία στον κόσμο των μη καταστροφικών δοκιμών με υπερήχους [3].

1.3 Βασικές αρχές του Phased Array

Η τεχνική υπερήχων Phased Array (PA) προσφέρει αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνική υπερήχων (UT). Ορισμένα από αυτά είναι η δυνατότητα πιο αποτελεσματικής πρόσβασης σε δυσπρόσιτες περιοχές, καθώς χρειάζεται επαφή μόνο με μια πλευρά του προς εξέταση δοκιμίου. Επιπλέον, υφίσταται μεγαλύτερη πιθανότητα ανίχνευσης ελαττωμάτων στο υπό εξέταση υλικό (μεγάλη πιθανότητα ανίχνευσης), μειωμένη εμφάνιση ψευδώς θετικών αποτελεσμάτων και δυνατότητα εγγραφής και επεξεργασίας αποτελεσμάτων ελέγχου [4].

Τα όργανα συστοιχίας διαφοράς φάσεων (phased array) λειτουργούν με βάση το φαινόμενο της συμβολής, δηλαδή της ενισχυτικής (constructive) και της αποσβεστικής (destructive) αλληλεπίδρασης (interference) δύο ή και περισσότερων κυμάτων. Η έννοια του φαινομένου της συμβολής χρονολογείται από το 1801, όταν ο Άγγλος επιστήμονας Thomas Young χρησιμοποίησε δύο πηγές φωτός για να παράγει μοτίβα παρεμβολής κύματος. Μέσα από αυτό το πείραμα, ο Thomas Young επιβεβαίωσε με επιτυχία ότι τα κύματα με ταυτόσημη φάση ενισχύουν το ένα το άλλο, ενώ τα κύματα με διαφορετικές φάσεις εξουδετερώνουν το ένα το άλλο [5].

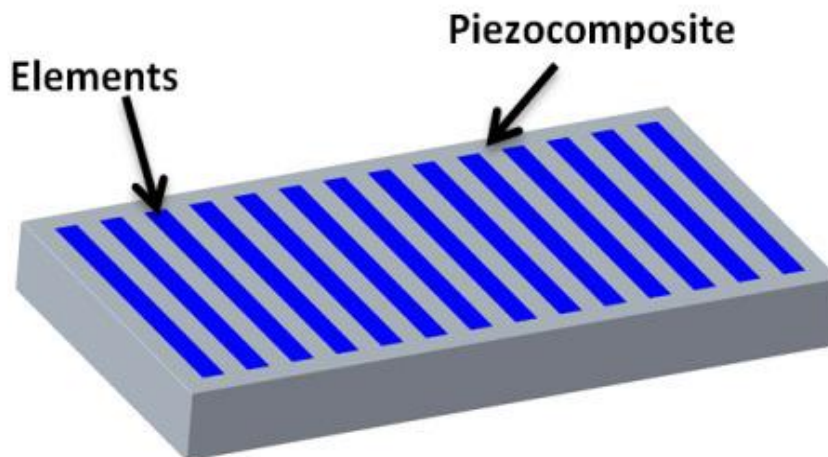


Εικόνα 1.3.1: Μοτίβο παρεμβολής δυο σημειακών σημείων [26].

Με την χρονική μετατόπιση των κυματικών μετώπων που προέρχονται από δύο ή περισσότερες πηγές, είναι δυνατόν να ελεγχθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή ως διαφορά (ή μετατόπιση) φάσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατευθυνθεί ή να εστιαστεί η ενέργεια ενός κύματος [3].

1.4 Δημιουργία δέσμης υπερήχων με κεφαλές Phased Array

Μια κεφαλή PA κατασκευάζεται με την προσθήκη πιεζοκεραμικών ράβδων σε μια ομοιόμορφη διάταξη ή σε μια διάταξη μορφής «πίνακα» η οποία βρίσκεται μέσα σε ένα εποξειδικό (μονωτικό) υλικό [4].



Εικόνα 1.4.1: Διάταξη πιεζο-ηλεκτρικών στοιχείων στην κεφαλή Phased Array [27].

Μια τυπική κεφαλή συστοιχίας φάσης (PA) περιλαμβάνει από 16 έως 256 πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία μπορούν να διαμορφωθούν σε διαφορετικά μοτίβα (γραμμικά, τετραγωνικά, κυκλικά κ.λπ.), σχηματίζοντας μια ενιαία δέσμη υπερήχων. Η κατεύθυνση και τα χαρακτηριστικά αυτής της δέσμης εξαρτώνται από τη χρονική διαφορά διέγερσης των επιμέρους στοιχείων (κρυστάλλων). Εισάγοντας συγκεκριμένες χρονικές καθυστερήσεις στη διέγερση των κρυστάλλων, μπορούμε να ρυθμίσουμε τη γωνία της συνισταμένης δέσμης και το σημείο εστίασής της (focusing) [5].

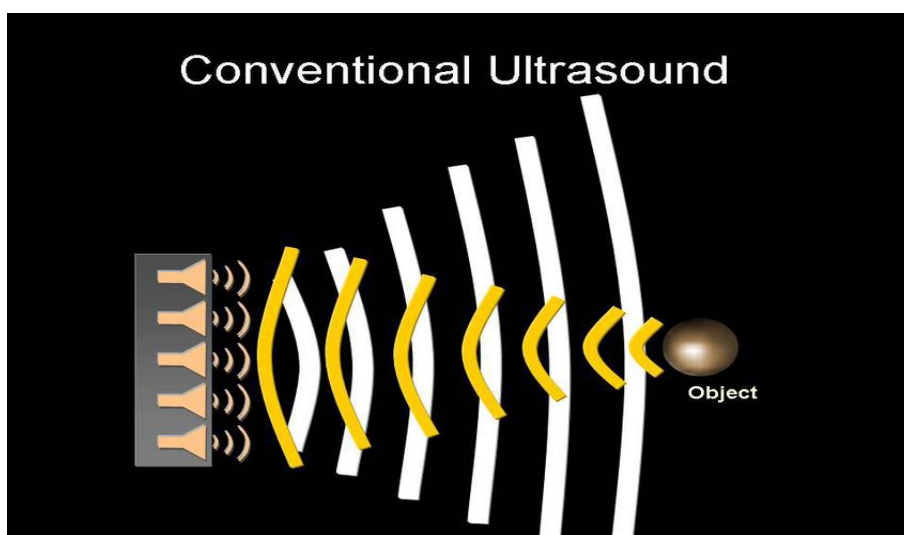
Συνήθως, οι συχνότητες των κεφαλών εμπίπτουν στο εύρος των 2MHz έως 10MHz και τα στοιχεία διεγείρονται σε ομάδες που κυμαίνονται από 4 έως 32 στοιχεία ή ακόμα και μεμονωμένα. Επιπλέον, ένα σύστημα PA (phased array) περιέχει μια συσκευή που καθοδηγεί ηλεκτρονικά τη δέσμη υπερήχων και μετατρέπει τα δεδομένα σε εικόνα [6].

1.5 Συμβατικός Υπέρηχος

Η επιθεώρηση με τη χρήση υπερήχων (Ultrasonic Testing, UT) θεωρείται μία από τις θεμελιώδεις και κοινώς χρησιμοποιούμενες μεθόδους στο ευρύ φάσμα των Μη Καταστροφικών Ελέγχων (ΜΚΕ) που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την εξέταση της εσωτερικής δομής ενός υλικού χρησιμοποιώντας ακουστικά κύματα υψηλής συχνότητας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η λειτουργικότητα του υλικού παραμένει ανεπηρέαστη και παρέχει άμεσα αποτελέσματα [7].

Ο έλεγχος με υπερήχους βασίζεται στη διάδοση ακουστικών κυμάτων, τα οποία είναι μηχανικές ταλαντώσεις που διαδίδονται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα. Όταν τα κύματα αυτά συναντούν διεπιφάνειες διαφορετικών υλικών, ανακλώνται ή διαθλώνται, επιτρέποντας τον εντοπισμό ελαττωμάτων όπως κενά ή μη μεταλλικά εγκλείσματα σε συγκολλήσεις. Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά αποτελεσματική για την ανίχνευση σφαλμάτων τόσο κοντά στην επιφάνεια όσο και σε μεγάλα βάθη μέσα στο υλικό [7], [8].

Η χρήση υπερήχων είναι ιδανική για την ανίχνευση εσωτερικών επίπεδων σφαλμάτων, όπως ρήγματα και ατελείς τήξεις. Επιπλέον, οι μετρήσεις για την ανίχνευση της ελάττωσης του πάχους των υλικών, λόγω διάβρωσης ή μηχανικής φθοράς, πραγματοποιούνται επίσης με τη μέθοδο υπερήχων. Πρόκειται για μια σχετικά γρήγορη μέθοδο εφαρμογής, που προσφέρει αποτελέσματα υψηλής ευαισθησίας και είναι εφαρμόσιμη σε μια ευρεία ποικιλία υλικών [3], [8].



Εικόνα 1.5: Αναπαράσταση λειτουργίας συμβατικού υπερήχου [28].

Η συμβατική υπερηχογραφία, γνωστή και ως συμβατικός υπέρηχος, είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου που χρησιμοποιεί υπερήχους για τον εντοπισμό, την εξέταση και τον έλεγχο ελαττωμάτων ή ανωμαλιών σε υλικά. Η τεχνολογία της συμβατικής υπερηχογραφίας έχει εξελιχθεί σημαντικά, με την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων που περιλαμβάνουν ψηφιακούς αισθητήρες και αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος, αυξάνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων [3], [8].

Οι συμβατικές κεφαλές υπερήχων που χρησιμοποιούνται για μη καταστροφικούς ελέγχους αποτελούνται από ένα ενεργό στοιχείο που παράγει και λαμβάνει υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα, ή από ένα ζεύγος στοιχείων, με το ένα να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μετάδοση και το άλλο αποκλειστικά για τη λήψη των κυμάτων. Οι συμβατικές κεφαλές μονού στοιχείου συγχωνεύουν τα αποτελέσματα όλων των συνιστωσών της δέσμης που προσκρούει στην περιοχή του στοιχείου, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της εσωτερικής κατάστασης του υλικού [3], [8].

Συνοψίζοντας, η μέθοδος υπερηχογραφίας αποτελεί έναν αξιόπιστο και ευρέως χρησιμοποιούμενο τρόπο για την εκτέλεση Μη Καταστροφικών Δοκιμών, παρέχοντας γρήγορα, ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα που συμβάλλουν στη διασφάλιση της ποιότητας και της ακεραιότητας των υλικών στη βιομηχανία. Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας των υπερήχων ενισχύει ακόμα περισσότερο τις δυνατότητες και την αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου, καθιστώντας την αναντικατάστατο εργαλείο για την ανίχνευση ελαττωμάτων και ανωμαλιών σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών [3], [8].

1.6 Πλεονεκτήματα/Μειονεκτήματα μεθόδου Phased Array

Πλεονεκτήματα

- Απαιτείται πρόσβαση στο δοκίμιο μόνο από μία πλευρά.
- Τα αποτελέσματα είναι άμεσα διαθέσιμα.
- Παρέχει υψηλή ακρίβεια, ιδίως στην ανίχνευση τοπικών ατελειών.
- Το βάθος διείσδυσης είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου [2].

Μειονεκτήματα

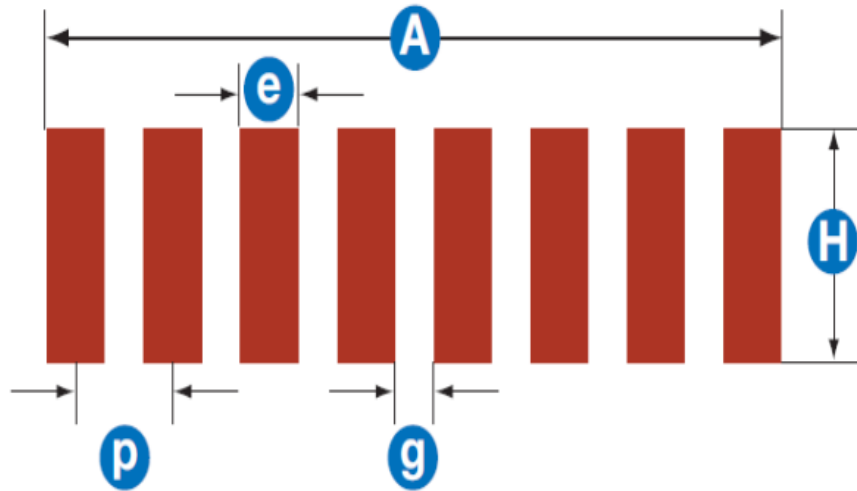
- Απαιτεί πιο εξειδικευμένο προσωπικό για την εκτέλεση του ελέγχου, γεγονός που αυξάνει το κόστος της διαδικασίας.
- Είναι δύσκολο να ελεγχθούν υλικά με υψηλή τραχύτητα, ακανόνιστο σχήμα ή μη ομοιογενή δομή.
- Υλικά που έχουν χαμηλή ικανότητα μετάδοσης του ήχου στο εσωτερικό τους, όπως ο χυτοσίδηρος ή άλλα χονδρόκοκκα υλικά, είναι δύσκολο να ελεγχθούν με αυτήν τη μέθοδο. Επιπλέον, σε αυτές τις περιπτώσεις, τα σήματα θορύβου είναι πολύ υψηλά.
- Για τη σωστή λειτουργία της μεθόδου απαιτούνται πρότυπα αναφοράς για τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού καθώς και για τον χαρακτηρισμό των ασυνεχειών[2].

2. Τεχνολογία Phased Array

2.1 Χαρακτηριστικά κεφαλών

Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Τύπος : Υπάρχουν διάφοροι τύποι κεφαλών επαφής με το δοκίμιο, όπως κεφαλές άμεσης επαφής, βύθισης, γραμμής καθυστέρησης και γωνιακής δέσμης. Η πλειοψηφία των κεφαλών είναι γωνιακής δέσμης, σχεδιασμένες να χρησιμοποιούνται με πλαστική σφήνα που είτε δημιουργεί την επιθυμητή γωνία ελέγχου είτε είναι μηδενικής γωνίας.
- Συχνότητα : Οι περισσότεροι έλεγχοι για την ανίχνευση ελαττωμάτων πραγματοποιούνται σε συχνότητες μεταξύ 2 MHz και 10 MHz, με τις περισσότερες κεφαλές συστοιχίας διαφοράς φάσης να λειτουργούν σε αυτό το εύρος. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν κεφαλές που λειτουργούν σε χαμηλότερες ή υψηλότερες συχνότητες. Όπως και στις συμβατικές κεφαλές υπερήχων, η διείδυση αυξάνεται με χαμηλότερες συχνότητες, ενώ η ανάλυση και η εστιακή ευκρίνεια βελτιώνονται με υψηλότερες συχνότητες.
- Αριθμός πιεζοηλεκτρικών στοιχείων : Οι κεφαλές συστοιχίας διαφοράς φάσης συνήθως διαθέτουν από 16 έως 128 στοιχεία, ενώ μερικές μπορεί να έχουν έως και 256. Όσο περισσότερα στοιχεία έχει η κεφαλή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα εστίασης και διεύθυνσης της δέσμης υπερήχων, επιτρέποντας την κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής. Παρ' όλα αυτά, αυτό αυξάνει και το κόστος της κεφαλής και του οργάνου. Κάθε στοιχείο μπορεί να διεγείρεται και να πάλλεται ανεξάρτητα, δημιουργώντας έτσι την επιθυμητή δέσμη. Η διάσταση αυτών των στοιχείων αναφέρεται συχνά ως η ενεργή ή οδηγός κατεύθυνση.
- Μέγεθος των στοιχείων : Όσο μικρότερο είναι το πλάτος των στοιχείων, τόσο καλύτερη είναι η ικανότητα διεύθυνσης της δέσμης υπερήχων. Για να καλυφθεί μεγαλύτερη περιοχή ελέγχου, απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων, κάτι που αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής της κεφαλής [9], [10].



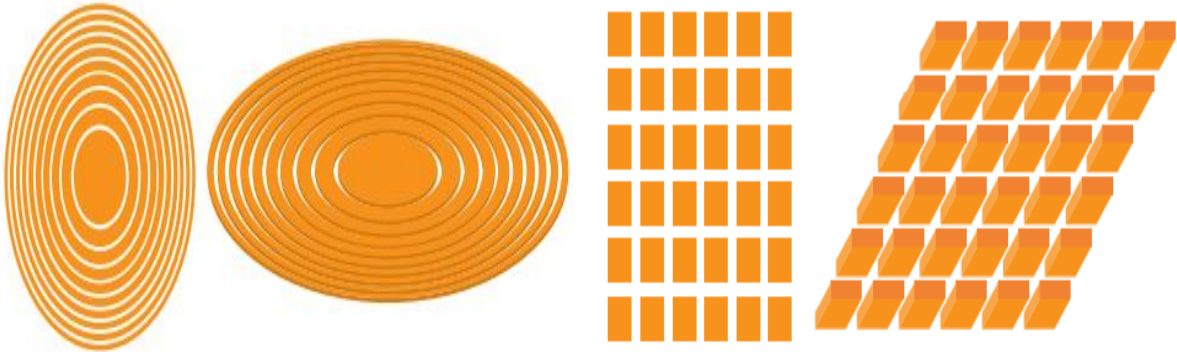
Εικόνα 2.1.1: Βασικοί παράμετροι κατά τον σχεδιασμό κεφαλών Phased Array [29].

Όπου:

- A: Συνολική διάμετρος.
- e: Μέγεθος στοιχείου.
- p: Μεταξύ δυο διαδοχικών στοιχείων η απόσταση των κέντρων τους.
- g: Απόσταση από το τέλος ενός στοιχείου μέχρι την αρχή του επόμενου ή απόσταση διάκενου.
- H: Ύψος κάθε στοιχείου ή παθητική διάσταση.

2.2 Τύποι κεφαλών Phased Array.

Ανάλογα, με τον τύπο και την διάταξη των στοιχείων που περιέχει μια κεφαλή Phased Array, διακρίνεται σε:



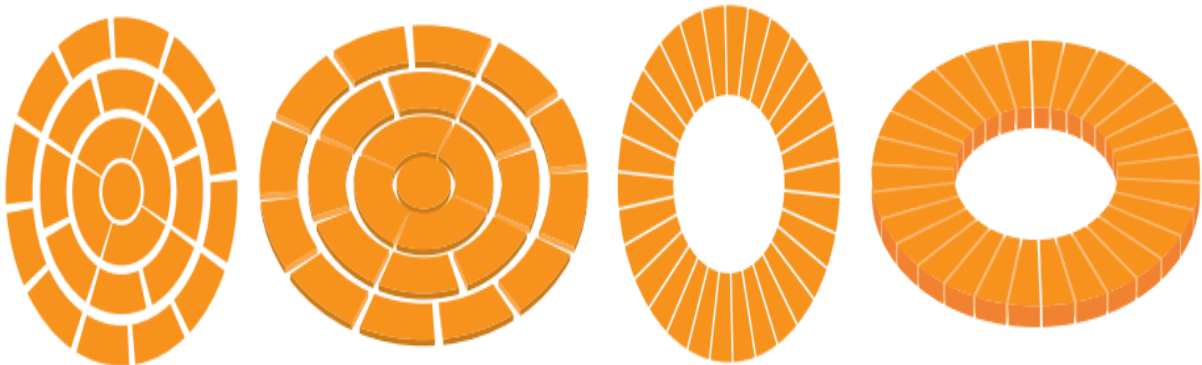
Εικόνα 2.2.1: 1-D δακτυλιοειδείς κεφαλές [4].

Εικόνα 2.2.2: 2-D Matrix κεφαλές [4].



Εικόνα 2.2.3: 1-D Γραμμικές κεφαλές [4].

Εικόνα 2.2.4: 1.5-D Matrix κεφαλές [4].



Εικόνα 2.2.5: 1-D Κυκλικές κεφαλές [4].

Εικόνα 2.2.6: Δακτυλιοειδείς τμηματικές κεφαλές [4].

2.3 «Παπουτσάκια»-σφήνες κεφαλών Phased Array

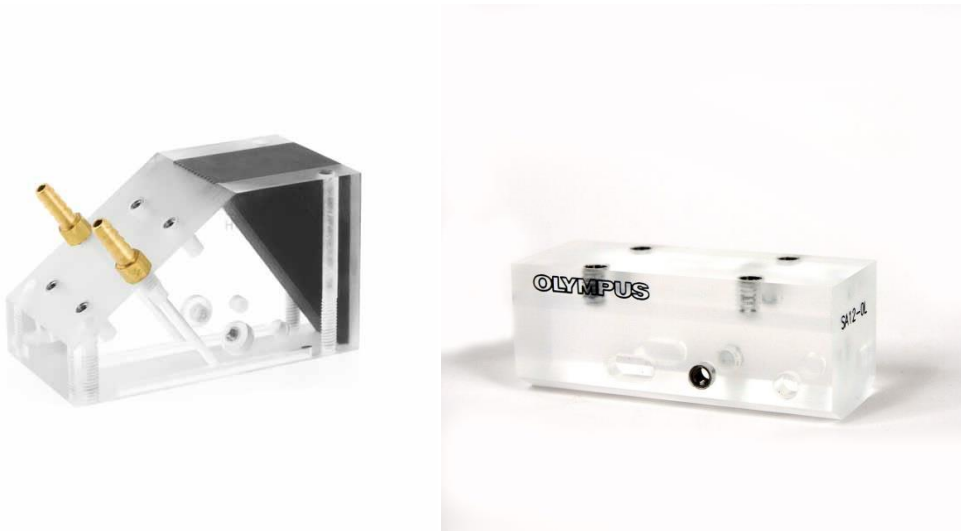
Οι σφήνες στις κεφαλές συστοιχίας φάσεων έχουν παρόμοια λειτουργία με αυτές στις συμβατικές κεφαλές. Ο κύριος σκοπός τους είναι να ελέγχουν τη γωνία και το σημείο εξόδου της δέσμης υπερήχων, να διασφαλίζουν ότι το ηχητικό κύμα μεταδίδεται σωστά από την κεφαλή στο υλικό, να διαμορφώνουν τον τύπο του κύματος που παράγεται και να αποτρέπουν τη φθορά της κεφαλής από την τριβή.

Οι σφήνες κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους:

Σφήνες διάτμησης: οι οποίες μοιάζουν με συμβατικές σφήνες και διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και τύπους.

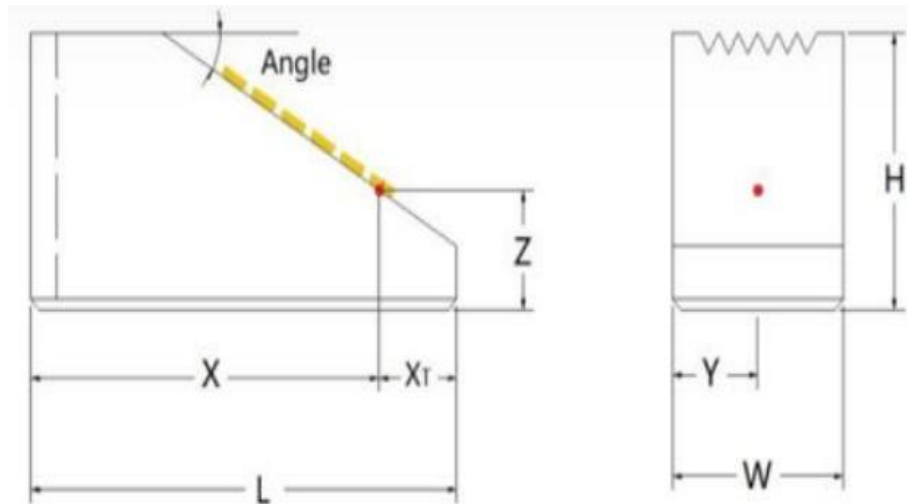
Σφήνες μηδενικής γωνίας: οι οποίες είναι επίπεδες πλαστικές πλάκες, που χρησιμοποιούνται για την προστασία της όψης της κεφαλής από γρατσουνιές και εκδορές.

Οι παρακάτω εικόνες αποτελούν παραδείγματα ορισμένων τυπικών σφηνών κεφαλής phased array [3], [5].



Εικόνα 2.3.1: Δυο ενδεικτικοί τύποι σφηνών κεφαλών phased array [30], [31].

Οι διαστάσεις κάθε σφήνας είναι συγκεκριμένες και απαραίτητες για τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται από το σύστημα Phased Array. Οι κατασκευαστές παρέχουν τυπικά βιβλιοθήκες χαρακτηριστικών σφήνας για γρήγορη και εύκολη επιλογή από χρήστες οργάνων με φάσεις συστοιχίας.



Εικόνα 2.3.2: Βασικές διαστάσεις σφήνας Phased Array [32].

Όπου:

- **Angle:** Η γωνία της σφήνας.
- **Z:** Η κατακόρυφη απόσταση από την βάση της σφήνας του μέσου του
- **X_T:** Η οριζόντια απόσταση από το τέλος της σφήνας του μέσου του πρώτου στοιχείου [4].
- **L:** Το μήκος της σφήνας.
- **H:** Το ύψος τη σφήνας.
- **W:** Το πλάτος της σφήνας.

2.4 Υλικό Σύζευξης

Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη σύζευξη είναι τυπικά σε υγρή μορφή και εξυπηρετεί το σκοπό της ενίσχυσης της μετάδοσης υπερήχων από τον μετατροπέα στο υπό έρευνα δείγμα. Η παρουσία αυτού του υλικού σύζευξης είναι ζωτικής σημασίας καθώς βοηθά στην εξάλειψη του αέρα, που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες αντανακλάσεις και να εμποδίσει τη διάδοση του κύματος υπερήχων μέσα στο δείγμα. Επιπλέον, η χρήση υλικού σύζευξης καθίσταται απαραίτητη κατά την εξέταση υλικών με ανώμαλες επιφάνειες, καθώς επιτρέπει την ομαλή κίνηση του μετατροπέα πάνω από το δείγμα, εξασφαλίζοντας ακριβείς μετρήσεις και συλλογή δεδομένων. Οι ουσίες που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη σύζευξη περιλαμβάνουν λάδι, γράσο, νερό, υγρά σιλικόνης και γλυκερίνη, το καθένα προσφέροντας μοναδικές ιδιότητες κατάλληλες για συγκεκριμένες απαιτήσεις δοκιμών.

Η τεχνική εμβάπτισης εφαρμόζεται συχνά για σενάρια που περιλαμβάνουν σάρωση σε όλο το δείγμα ή διεξαγωγή ακριβών μετρήσεων. Αυτή η μέθοδος, περιλαμβάνει τη βύθιση τόσο της κεφαλής του μετατροπέα όσο και του δοκιμαστικού τεμαχίου σε ένα μέσο σύζευξης, τυπικά νερό. Με την υιοθέτηση της προσέγγισης δοκιμής υπερήχων εμβάπτισης, ένα σταθερό περιβάλλον σύζευξης διατηρείται αβίαστα ενώ ο χειριστής κινεί την κεφαλή του μετατροπέα και εκτελεί την εξέταση. Αυτή η τεχνική αποδεικνύεται πλεονεκτική σε καταστάσεις όπου η συνεπής και αξιόπιστη σύζευξη είναι απαραίτητη για την επίτευξη ακριβών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 2.4.1: Έλεγχος με υλικό σύζευξης [33].

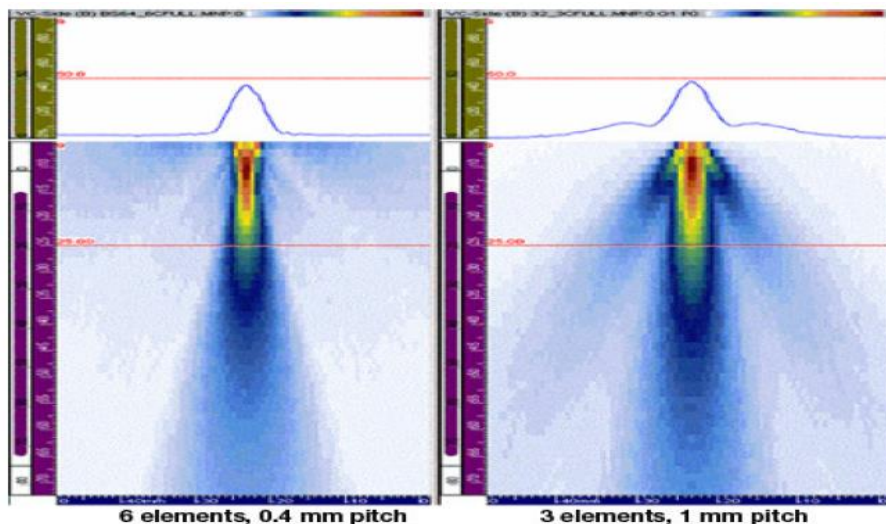


Εικόνα 2.4.1: Έλεγχος με τεχνική εμβάπτισης [33].

2.5 Λοβοί

Η ηχητική δέσμη μέσα στο υλικό αποτελείται από την κύρια δέσμη (κύριος λοβός) που χρησιμοποιείται για την εξέταση υλικών, αλλά μερικές φορές δημιουργούνται και ανεπιθύμητοι πλευρικοί λοβοί. Αυτοί οι πλευρικοί λοβοί είναι ανεπιθύμητοι και καταβάλλονται προσπάθειες για την ελαχιστοποίησή τους. Παράγονται δύο τύποι πλευρικών λοβών: αυτοί που προκαλούνται από διαρροή ακουστικής πίεσης που δημιουργεί στοιχεία σε διάφορες κατευθύνσεις και οι λοβοί εσχάρας που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της ακουστικής πίεσης κατά μήκος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων [4].

Η παρουσία πλευρικών λοβών είναι ανεπιθύμητη, καθώς δεν είναι εφικτό να περιοριστούν μόνο στα συστήματα Phased Array, αφού εμφανίζονται και κατά την χρήση κεφαλών συμβατικού υπερήχου. Οπότε ενδεικτικά για την αποφυγή των πλευρικών λοβών συνιστάται είτε αύξηση της συχνότητας είτε χρήση στοιχείων μικρότερου μεγέθους είτε μείωση του αναμενόμενου εύρους περιστροφής της δέσμης είτε μείωση του pitch είτε αύξηση του ενεργού ανοίγματος δέσμης. Σε γενικές γραμμές δηλαδή θα πρέπει να τίθεται σε εφαρμογή ο τύπος: $e < \frac{\lambda}{2}$ [4], [5].

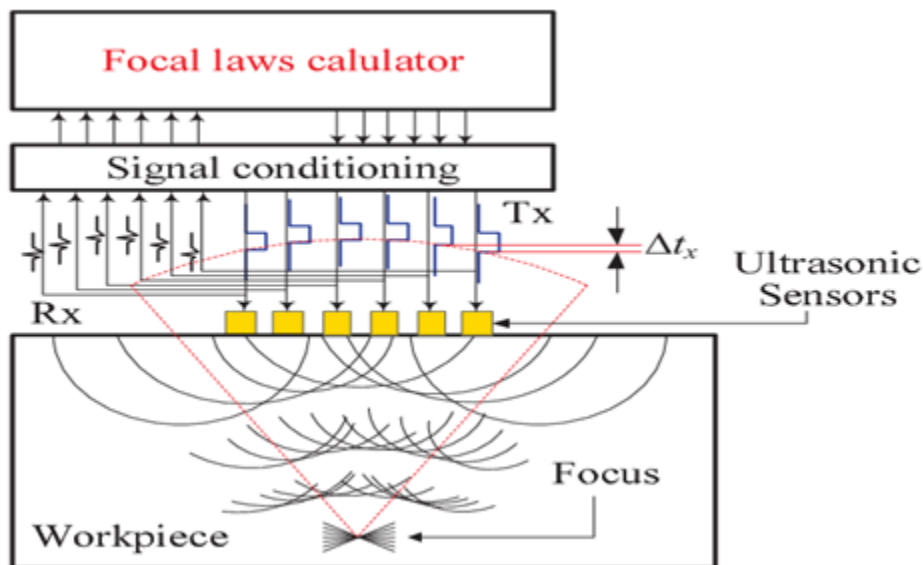


Εικόνα 2.5.1: Προφίλ δέσμης υπερήχων με διαφορετικό αριθμό στοιχείων [11].

Επεξήγηση εικόνας 2.5.1: Γίνεται αντιληπτό πως η κάθε απεικόνιση δείχνει μια διαφορετική κατάσταση από την άλλη. Αρχικά, η αριστερή απεικόνιση παράγεται από 6 στοιχεία τα οποία έχουν απόσταση από κέντρο σε κέντρο 0,4 mm και η δέσμη είναι διαμορφωμένη κωνικά. Αντίθετα, η δεξιά απεικόνιση παράγεται από 3 στοιχεία τα οποία έχουν απόσταση από κέντρο σε κέντρο 1 mm και στη δέσμη έχουν διαμορφωθεί δυο τραχείς λοβοί με περίπου γωνία 30° ως προς τον κεντρικό άξονα της δέσμης υπερήχων. Γενικά, η παρουσία των τραχέων λοβών εξαρτάται από το αν το μέγεθος του κάθε στοιχείου είναι μικρότερο από το μισό του μήκους κύματος. Τέλος, ο πιο απλοϊκός τρόπος ελαχιστοποίησης των τραχέων λοβών είναι η χρήση μιας κεφαλής που θα επιτυγχάνει μικρή απόσταση μεταξύ των κέντρων του κάθε στοιχείου [2].

2.6 Focal Laws

Ο όρος focal law αναφέρεται σε μια μαθηματική εξίσωση που περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων που απαιτούνται για τη δημιουργία της επιθυμητής δέσμης υπερήχων. Κάθε συσκευή Phased Array είναι εξοπλισμένη με λογισμικό που καθορίζει τους κατάλληλους focal laws. Αυτό το λογισμικό υπολογίζει τις απαραίτητες χρονικές καθυστερήσεις για την ενεργοποίηση κάθε ομάδας στοιχείων προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό εύρος γωνιών, πλάτος δέσμης και σημείο εστίασης, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις ιδιότητες της κεφαλής, της σφήνας και του υλικού που μελετάται. Γενικότερα, κάθε δέσμη που παράγεται αντιπροσωπεύει και ένα focal law [5].

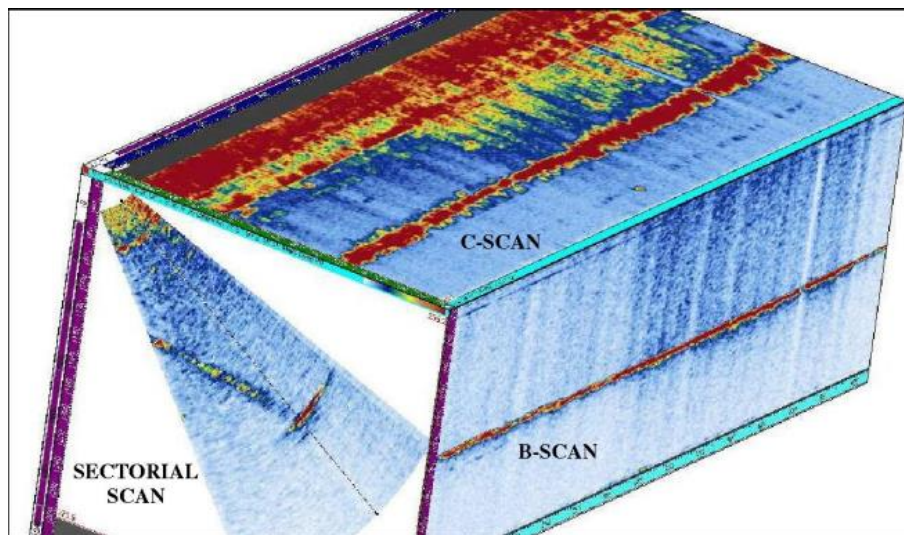


Εικόνα 2.6.1: Απεικόνιση λειτουργίας των focal laws [34].

Στη αξιμουθιακή σάρωση, κάθε γωνία απαιτεί ένα focal law. Για παράδειγμα, εάν το εύρος γωνίας σε μία σάρωση είναι από 45 έως 70 μοίρες με αλλαγή βήματος 1 μοίρας, χρειάζονται 26 focal laws. Ομοίως, μια γραμμική σάρωση με 25 δέσμες υπερήχων ίδιας γωνίας αλλά διαφορετικών σημείων απαιτεί 25 focal laws. Ο μέγιστος αριθμός focal laws που μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα από τους υπέρηχους Phased Array εξαρτάται από τον υποστηριζόμενο μέγιστο αριθμό focal laws της συσκευής.

3. Απεικονίσεις Σαρώσεων

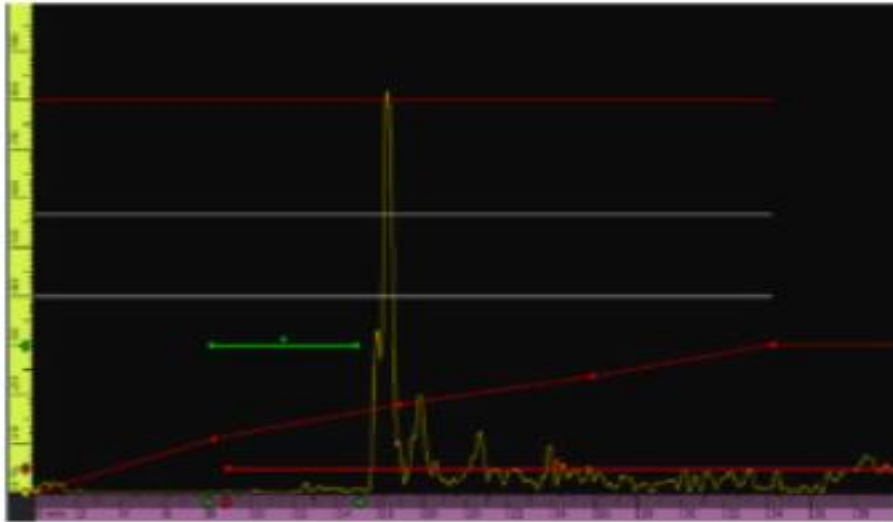
Τα υπερηχητικά όργανα με συστοιχίες διαφοράς φάσης είναι πάντοτε πολυκαναλικά, αν και χρησιμοποιούν μόνο μία κεφαλή. Κάθε κανάλι συνδέεται με ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο της κεφαλής. Τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να απεικονίζουν ένα εύρος γωνιών ελέγχου από μία μόνο θέση, χάρη στα πολλαπλά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία που περιέχονται στην κεφαλή. Κατά την παραλαβή των επιστρεφόμενων ηχώ, κάθε κανάλι λαμβάνει μια διαφορετική ηχώ. Αυτά τα παραλαμβανόμενα σήματα αποστέλλονται στο ενσωματωμένο σύστημα ψηφιακής καταγραφής, το οποίο τα επεξεργάζεται συλλογικά και τα προβάλλει στην οθόνη ως μια απεικόνιση της ζώνης ελέγχου. Αυτές οι απεικονίσεις επιτρέπουν στον χειριστή να ερμηνεύει ευκολότερα τις διαφοροποιήσεις των σημάτων από σημείο σε σημείο εντός της ζώνης ελέγχου και να εξετάζει τις επιστρεφόμενες ηχώ των διαφόρων ελαττωμάτων υπό διαφορετικές γωνίες. Έτσι, με κάθε απεικόνιση προσφέρεται μια διαφορετική οπτική γωνία στην εξέταση και αξιολόγηση του δοκιμίου [3].



Εικόνα 3: Απεικονίσεις Phased Array [35].

3.1 Σάρωση τύπου A (A-scan)

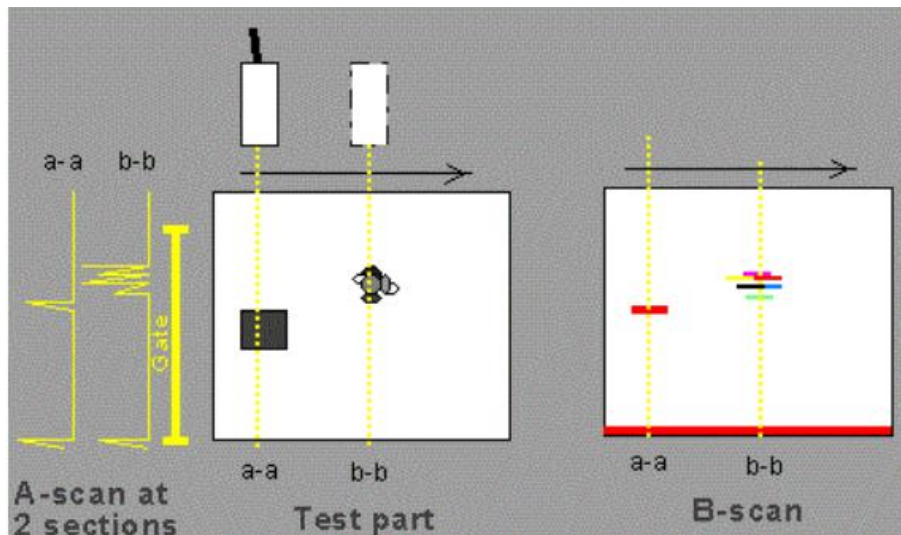
Η σάρωση τύπου A είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται στην επιθεώρηση με υπερήχους. Αυτή η τεχνική παρουσιάζει την ανακλώμενη ενέργεια σε μία οθόνη με τη μορφή σημάτων. Στον οριζόντιο άξονα της οθόνης απεικονίζεται ο παρερχόμενος χρόνος (ή η απόσταση), ο οποίος αντιπροσωπεύει τον χρόνο που χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το υλικό και να επιστρέψει στην κεφαλή. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται το ύψος ή η ένταση του σήματος, δηλαδή η ηχητική ενέργεια που επιστρέφει στην κεφαλή [11].



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση σάρωσης τύπου A [36].

3.2 Σάρωση τύπου B (B-scan)

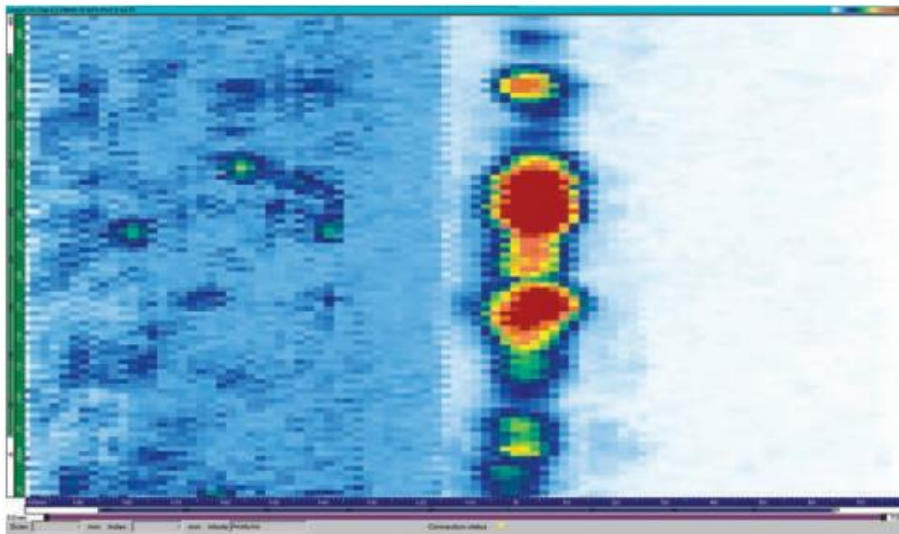
Η σάρωση τύπου B (B-Scan) παρέχει μια τομογραφική απεικόνιση του δοκιμίου μέσω σάρωσης κατά μήκος της επιφάνειάς του. Στην οθόνη, ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την απόσταση που διανύει η κεφαλή κατά τη σάρωση (θέση), ενώ ο κατακόρυφος άξονας αναπαριστά το βάθος των ασυνεχειών. Όταν χρησιμοποιούνται κάθετες κεφαλές Phased Array, η απεικόνιση αυτή ονομάζεται End View, ενώ με τη χρήση γωνιακών κεφαλών Phased Array, ονομάζεται Side View [11].



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση σάρωσης τύπου B [11].

3.3 Σάρωση τύπου C (C-scan)

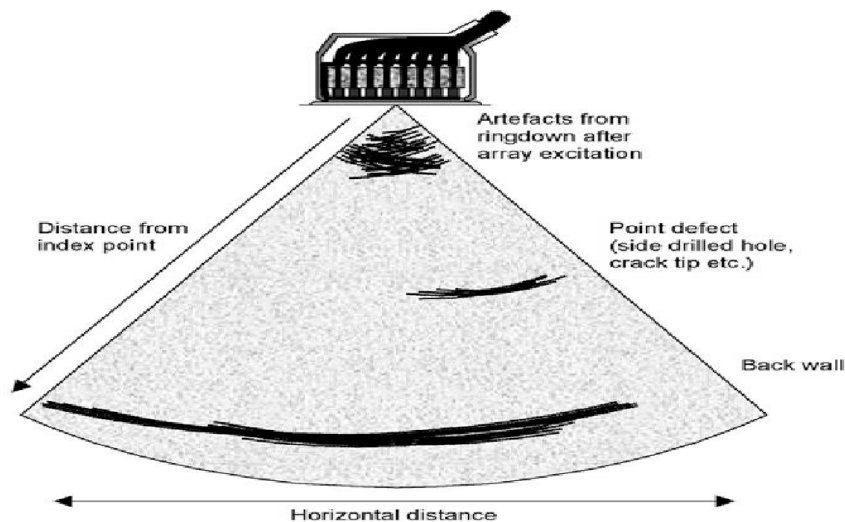
Η σάρωση τύπου C (C-Scan) παρέχει μια κάτοψη της επιφάνειας του δοκιμίου, απεικονίζοντας τα ελαττώματα ως περιοχές με διαφορετική χρωματική αποτύπωση, συγχρονισμένα με την κίνηση της κεφαλής καθώς αυτή διασχίζει την επιφάνεια του υλικού. Στην περίπτωση χρήσης γωνιακών κεφαλών Phased Array, η σάρωση τύπου C αναφέρεται και ως Top View, όπου ο ένας κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τη γωνία-VPA που χρησιμοποιείται, ενώ ο άλλος κατακόρυφος άξονας δείχνει τη θέση της σάρωσης όπως καταγράφεται από τον καταγραφέα θέσης (encoder) [5].



Εικόνα 3.3: Απεικόνιση σάρωσης τύπου C (κάτοψης, C-scan) [12].

3.4 Σάρωση τύπου S (S-scan)

Η S-Σάρωση αποτελεί μια μέθοδο παρουσίασης δεδομένων που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε συστήματα συστοιχίας διαφοράς φάσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κάθε πιεζοηλεκτρικό στοιχείο της κεφαλής εκπέμπει ένα ηχητικό κύμα και καταγράφει το πλάτος και τον χρόνο επιστροφής του επιστρεφόμενου κύματος. Έτσι, κάθε στοιχείο της κεφαλής έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει μια A-Σάρωση. Για τη δημιουργία της S-Σάρωσης, το κάθε πιεζοηλεκτρικό στοιχείο εστιάζει το παραγόμενο κύμα του σε διαφορετική γωνία. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται μια A-Σάρωση για κάθε γωνία εστίασης από τις επιστρεφόμενες ηχώ. Στη συνέχεια, όλες αυτές οι A-Σαρώσεις συνδυάζονται για να προκύψει η S-Σάρωση.



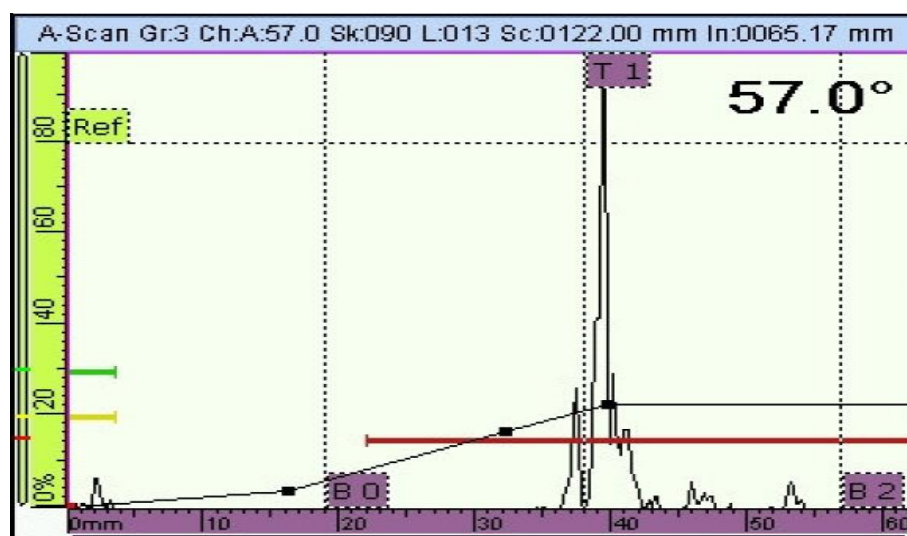
Εικόνα 3.4: Απεικόνιση σάρωσης τύπου S (S-scan) [37].

3.5 Καμπύλη TCG

Η καμπύλη TCG (Time-Compensated Gain) για τη συστοιχία φάσεων είναι μια καμπύλη που χρησιμοποιείται σε συστήματα συστοιχίας φάσεων και απαντά συνήθως σε ραντάρ ή παρόμοιες εφαρμογές παρακολούθησης και ανίχνευσης. Σκοπός της καμπύλης είναι να ρυθμίζει τη ευαισθησία/ύψος του σήματος με το πέρασμα του χρόνου/απόστασης.

Τα συστήματα συστοιχίας φάσεων χρησιμοποιούν πολλαπλές κεφαλές πομπού και δέκτη, οι οποίες μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν ως προς τις κατευθύνσεις τους. Η λειτουργική αξία της καμπύλης TCG συνίσταται στη διόρθωση τυχόν αποκλίσεων και βλαβών σήματος που προκύπτουν από διαφορετικές γεωμετρίες και αποστάσεις κεφαλής.

Η διαδικασία TCG συνήθως συνεπάγεται τη λήψη μετρήσεων σε διαφορετικές θέσεις και αποστάσεις για την αξιολόγηση των διακυμάνσεων στο κέρδος (gain) των κεφαλών με την πάροδο του χρόνου. Αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της καμπύλης TCG, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την εξίσωση του κέρδους κάθε κεφαλής, διασφαλίζοντας συνεπή απόκριση του συστήματος σε διάφορες κατευθύνσεις και αποστάσεις [8].



Εικόνα 3.5: Απεικόνιση καμπύλης TCG [4].

4. Συγκολλήσεις

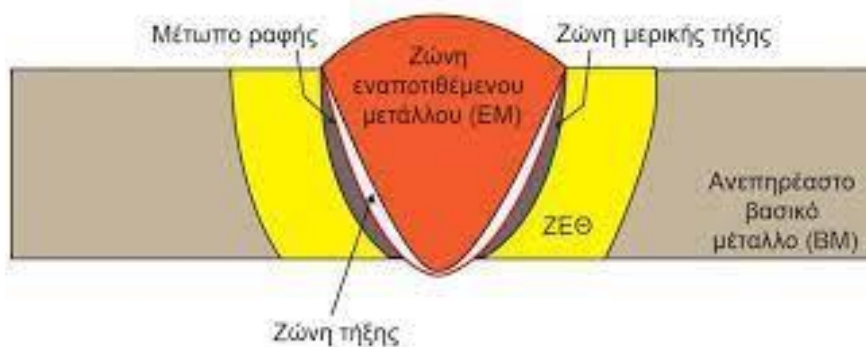
Η συγκόλληση αποτελεί τη διαδικασία ομογενοποίησης των υλικών στις επιφάνειες των μετάλλων που πρόκειται να συγκολληθούν, μέσω της εφαρμογής θερμότητας ή/και πίεσης, με ή χωρίς την προσθήκη πληρωτικού υλικού. Υλικά όπως αέρια προστασίας και πάστες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποβοήθηση της συγκεκριμένης μεθόδου [2].

Οι συγκολλήσεις κατατάσσονται στις μόνιμες συνδέσεις μεταξύ τεμαχίων. Αυτή η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω της θερμότητας και είναι κρυσταλλικής φύσεως, με στόχο το τελικό συγκολλημένο προϊόν να διαθέτει την ίδια αντοχή με τα αρχικά τεμάχια [2].

Στη συγκόλληση μεταλλικών υλικών χρησιμοποιείται συχνά η μέθοδος τήξης, όπου οι διεπιφάνειες τήκονται και ενώνονται. Οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε αυτογενείς και ετερογενείς. Στις αυτογενείς συγκολλήσεις, τα τεμάχια συγκόλλησης λιώνουν τοπικά και ανάμεσά τους τοποθετείται το ίδιο υλικό συγκόλλησης. Στις ετερογενείς συγκολλήσεις, τα τεμάχια δεν λιώνουν αλλά θερμαίνονται, ενώ το λιωμένο συγκολλητικό υλικό, το οποίο έχει διαφορετικές ιδιότητες, τοποθετείται ανάμεσά τους [3].

Οι αυτογενείς συγκολλήσεις χωρίζονται σε συγκολλήσεις με τόξο και χωρίς τόξο. Η συγκόλληση χωρίς τόξο είναι απλή, καθώς δημιουργείται φλόγα που λιώνει τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στη συγκόλληση [3].

Στις συγκολλήσεις με τόξο, δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στο κομμάτι που θα συγκολληθεί και σε ένα ηλεκτρόδιο. Η θερμότητα του τόξου λιώνει τις επιφάνειες και το ηλεκτρόδιο ή άλλο υλικό γεμίζει το κενό της σύνδεσης. Για να επιτευχθεί αυτό, το κομμάτι και το ηλεκτρόδιο συνδέονται με τους ακροδέκτες της ηλεκτρικής πηγής [3].























Εικόνα 4: Μέρη της θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη [39].



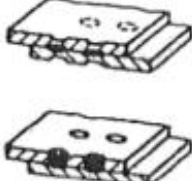

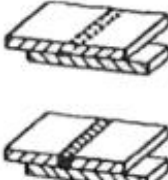









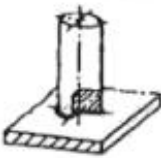






4.1 Μέθοδοι συγκόλλησης

Οι μέθοδοι συγκόλλησης με ηλεκτρικό τόξο περιλαμβάνουν:

- Τη χειρωνακτική συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο
- Τη μέθοδο συγκόλλησης με τόξο βολφραμίου και αδρανές αέριο (TIG)
- Τη μέθοδο συγκόλλησης με τόξο μετάλλου και αδρανές αέριο (MIG)
- Τη μέθοδο συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο
- Τη μέθοδο ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης

Κάθε μέθοδος συγκόλλησης αναπαρίσταται με ένα σύμβολο που δείχνει τις θέσεις των επιφανειών προς συγκόλληση και το σχήμα των ακμών που θα συγκολληθούν. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζονται οι τύποι των συγκολλήσεων και τα αντίστοιχα σύμβολά τους, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 2553 «Ενώσεις συγκολλήσεων σκληρών και μαλακών κολλήσεων – Συμβολική απεικόνιση και σχέδια» (1992).

No.	Είδος συγκόλλησης	Σχήμα	Σύμβολο
1	Μετωπική συγκόλληση με στρατζαρισμένες ακμές		
2	Μετωπική συγκόλληση κάθετης λάξευσης		
3	Μετωπική συγκόλληση λάξευσης μονού V		
4	Μετωπική συγκόλληση μονής λάξευσης		
5	Μετωπική συγκόλληση λάξευσης μονού V με ανοικτό πρόσωπο ρίζας		
6	Μετωπική συγκόλληση μονής λάξευσης με ανοικτό πρόσωπο ρίζας		
7	Μετωπική συγκόλληση λάξευσης μονού U		
8	Μετωπική συγκόλληση λάξευσης μονού J		
9	Συγκόλληση με υποστήριξη ρίζας		
10	Αυχενική συγκόλληση T		

11	Συγκόλληση λουμπάρι		
12	Συγκόλληση σημειακή		
13	Συγκόλληση ραφής		
14	Μετωπική συγκόλληση απότομης λοξοτομής μονού V		
15	Μετωπική συγκόλληση απότομης μονής λοξοτομής		
16	Συγκόλληση άκρης		
17	Συγκόλληση επιμετάλλωσης		
18	Επιφανειακός σύνδεσμος		
			
19	Κεκλιμένος σύνδεσμος		
20	Σύνδεσμος αναδίπλωσης		

Εικόνα 4.1: Είδη συγκολλήσεων και ο συμβολισμός τους [40].

4.2 Σφάλματα/ασυνέχειες συγκολλήσεων

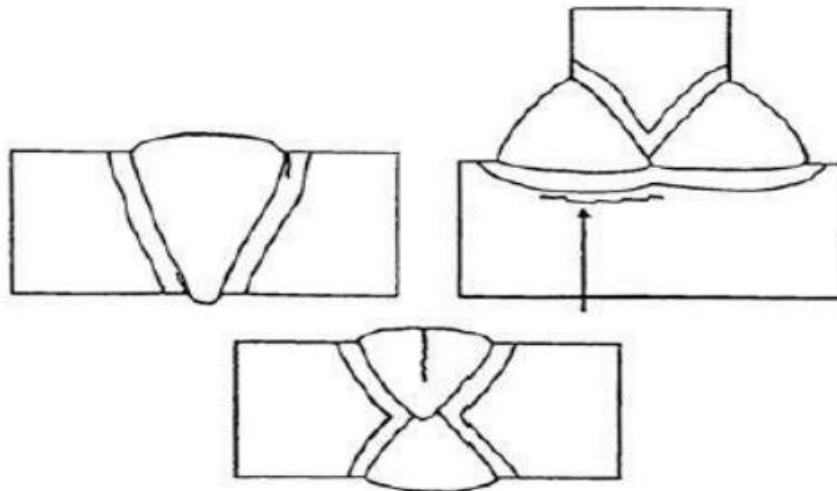
Τα σφάλματα/ασυνέχειες που εντοπίζονται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο του τόξου είναι:

- Ρωγμές
- Πορώδη δομή
- Εγκλείσματα μη μεταλλικών υλικών
- Ατελής συγχώνευση
- Ελλιπής διείσδυση στη ρίζα
- Επιφανειακές διαχωριστικές ελασματοποιήσεις

Όπου:

- Ρωγμές

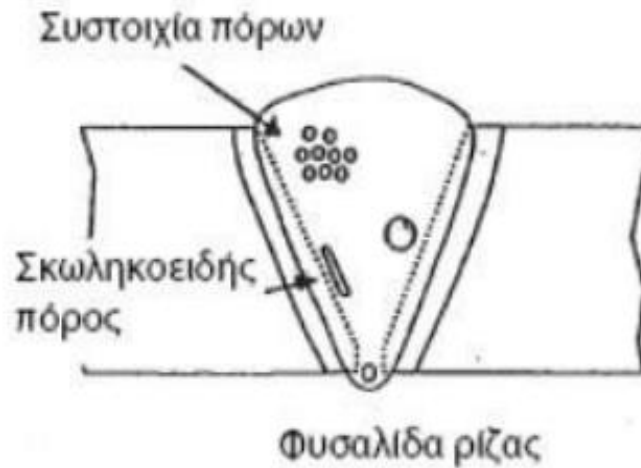
Οι ρωγμές μπορεί να εμφανιστούν σε σημεία όπως στο υλικό της συγκόλλησης, στη ζώνη τήξης, στην περιοχή που έχει επηρεαστεί από τη θερμότητα, και στο κύριο μέταλλο [3].



Εικόνα 4.2.1: Τύποι ρωγμών [11].

- Πορώδες

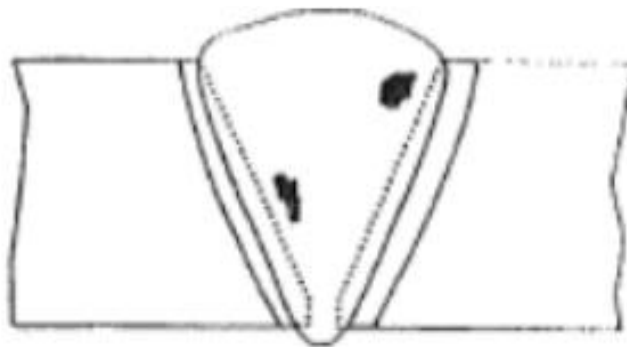
Το πορώδες μπορεί να εμφανιστεί σε διάφορες μορφές και προκύπτει από τον εγκλωβισμό αερίων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του υλικού συγκόλλησης. Οι αέριοι πόροι που σχηματίζονται συνήθως έχουν διάμετρο μικρότερη από 1,5 mm [3].



Εικόνα 4.2.2: Μορφές πορώδους [11].

- Μη μεταλλικά εγκλείσματα

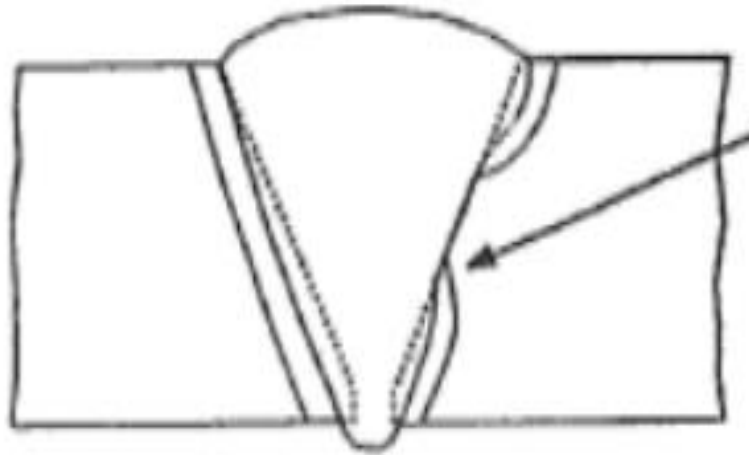
Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα, γνωστά επίσης ως εγκλείσματα σκωρίας, δημιουργούνται όταν δεν απομακρύνονται πλήρως οι σκωρίες από την επιφάνεια της συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, αυτά τα εγκλείσματα παγιδεύονται μέσα στο υλικό συγκόλλησης και μπορούν να εντοπιστούν σε οποιοδήποτε σημείο της συγκόλλησης [3].



Εικόνα 4.2.3: Είδη μη μεταλλικών εγκλεισμάτων [11].

- Ατελής τήξη

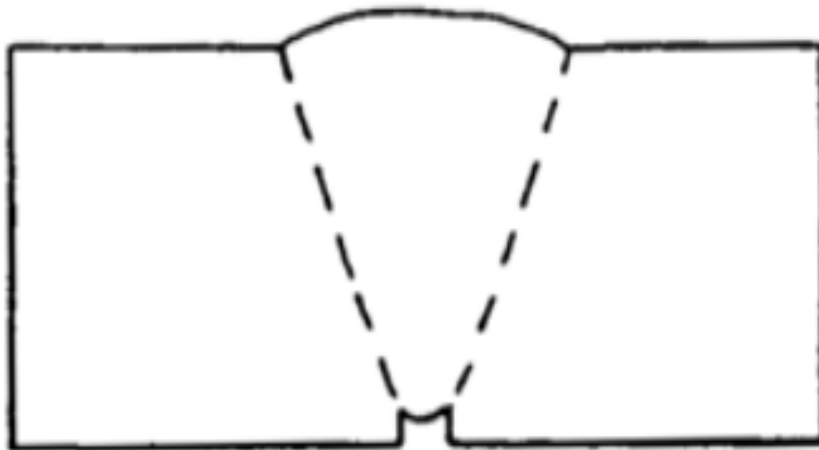
Η ατελής τήξη συμβαίνει όταν το συγκολλητικό τόξο δεν καταφέρνει να διεισδύσει επαρκώς, με αποτέλεσμα να μην λιώσει το άκρο ή το προηγούμενο πέρασμα της συγκόλλησης [3].



Εικόνα 4.2.4: Ατελής τήξη στο τοίχωμα της συγκόλλησης [11].

- Ελλιπής διείσδυση της ρίζας

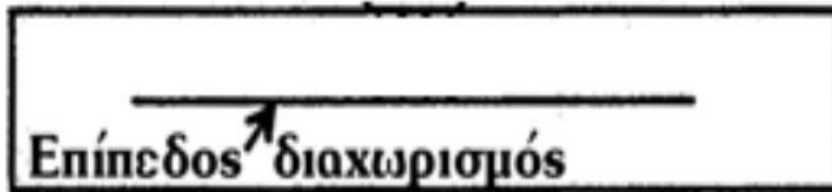
Η ελλιπής διείσδυση της ρίζας εμφανίζεται όταν το υλικό συγκόλλησης δεν καταφέρνει να εισχωρήσει επαρκώς στη ρίζα της σύνδεσης [3].



Εικόνα 4.2.5: Ελλιπής διείσδυση ρίζας [11].

- Επιφανειακοί διαχωρισμοί λόγω ελασματοποίησης

Ο επιφανειακός διαχωρισμός λόγω ελασματοποίησης είναι ένα ελάττωμα που επεκτείνεται παράλληλα με την επιφάνεια του ελάσματος και συνήθως εντοπίζεται στο μέσο του πάχους του. Η κατεύθυνση του διαχωρισμού είναι πάντα παράλληλη με τη διεύθυνση έλασης του αρχικού υλικού και εμφανίζεται όταν η γραμμή τήξης της συγκόλλησης είναι παράλληλη με την επιφάνεια του ελάσματος.



Εικόνα 4.2.6: Διαχωρισμός ελασματοποίησης (επίπεδος) [11].

5. Διαδικασία ελέγχου με την μέθοδο Phased Array

5.1 Πρότυπα ελέγχων (Standards)

Τα πρότυπα είναι τυποποιημένες συμφωνίες που είναι παγκοσμίως αναγνωρισμένες και περιλαμβάνουν λεπτομερείς τεχνικές προδιαγραφές ή συγκεκριμένα κριτήρια που χρησιμεύουν ως βάση για τη διασφάλιση της συνέπειας και της εγκυρότητας των υλικών, του εξοπλισμού, των διαδικασιών επιθεώρησης και των αποτελεσμάτων. Αυτά τα πρότυπα καθορίζονται από αξιόπιστες οντότητες σε παγκόσμια ή εθνική κλίμακα, συμπεριλαμβανομένων οργανισμών αφιερωμένων στη διατήρηση της ποιότητας και της ομοιομορφίας σε διάφορους κλάδους. Με την τήρηση αυτών των προτύπων, οι οργανισμοί μπορούν να εγγυηθούν την αξιοπιστία και την ακεραιότητα των διαδικασιών, των προϊόντων και των υπηρεσιών τους, ενισχύοντας τελικά την εμπιστοσύνη μεταξύ των ενδιαφερομένων και των καταναλωτών [13]:

- ASTM (American Society for Testing and Material)
- ASME (American Society of Mechanical Engineers)
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- AWS (American Welding Society)
- DIN (German Institute for Standardization)
- ΕΛΟΤ (Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης)
- EN (European Standards)
- ISO (International Organization for Standardization)

5.2 Πιστοποιήσεις/ Levels

Η διαδικασία επιθεώρησης χρησιμεύει ως ολοκληρωμένος γραπτός λογαριασμός που περιγράφει λεπτομερώς όλες τις θεμελιώδεις παραμέτρους, τη μεθοδολογία και τα προληπτικά μέτρα που πρέπει να τηρούνται κατά τη διάρκεια της μη καταστροφικής εξέτασης σύμφωνα με τα πρότυπα και τις προδιαγραφές του ελέγχου. Πριν από την έναρξη του ελέγχου, η διαδικασία διατυπώνεται και απαιτεί έγκριση από πιστοποιημένο άτομο Επιπέδου III ικανό στη συγκεκριμένη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Η έγκριση αυτή σηματοδοτεί την αναγνώριση του περιεχομένου της διαδικασίας από το επίπεδο III και την αποδοχή της λογοδοσίας για την εκτέλεσή της.

Κάθε πρωτόκολλο συμμορφώνεται κυρίως με τα πρότυπα που ορίζονται από την Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών (ASME) για να εξασφαλίσει την υψηλότερη ποιότητα και αξιοπιστία της διαδικασίας δοκιμών. Η σχολαστική φύση της διαδικασίας επιθεώρησης υπογραμμίζει τη σημασία του σχολαστικού σχεδιασμού και της τήρησης των καθιερωμένων κατευθυντήριων γραμμών για την εγγύηση της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας των μη καταστρεπτικών δοκιμών. Η συμμετοχή εμπειρογνομόνων επιπέδου III στη διαδικασία έγκρισης εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο ικανότητας και επάρκειας στη διεξαγωγή των διαδικασιών δοκιμών σύμφωνα με τα πρότυπα του κλάδου.

5.3 Προϋποθέσεις ελέγχου

Πριν από την έναρξη της επιθεώρησης των συγκολλήσεων για εξέταση ΡΑ, είναι σημαντικό ο χειριστής-επιθεωρητής να είναι εξοπλισμένος με τις απαραίτητες θεμελιώδεις λεπτομέρειες. Αυτές περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως ο τύπος του βασικού μετάλλου και η μορφή του προϊόντος του, για παράδειγμα, εάν είναι χυτό, σφυρηλατημένο ή ελασματοποιημένο. Επιπλέον, πρέπει να διευκρινιστεί το στάδιο της δοκιμής, είτε διεξάγεται πριν ή μετά την εφαρμογή οποιασδήποτε θερμικής επεξεργασίας. Η κατανόηση της προετοιμασίας και των διαστάσεων άλεσης, γνωστή και ως διαμόρφωση συγκόλλησης, είναι ζωτικής σημασίας για μια ολοκληρωμένη διαδικασία επιθεώρησης. Επιπλέον, η κατάσταση της επιφάνειας των συγκολλήσεων παίζει σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση και πρέπει να ληφθεί υπόψη. Η γνώση σχετικά με τη διαδικασία συγκόλλησης ή οποιασδήποτε σχετικές πληροφορίες σχετικά με αυτήν είναι ζωτικής σημασίας για ακριβείς διαδικασίες επιθεώρησης [5].

Επιπλέον, η γνώση των απαιτήσεων για τα στοιχεία των εκθέσεων αναφοράς διασφαλίζει την αποτελεσματική διεξαγωγή της διαδικασίας επιθεώρησης. Η κατανόηση των κριτηρίων αποδοχής και απόρριψης είναι απαραίτητη για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης. Επιπλέον, η εξοικείωση με το επίπεδο ελέγχου και το πεδίο εφαρμογής των ελέγχων, το οποίο περιλαμβάνει απαιτήσεις για εγκάρσιες ενδείξεις, είναι ζωτικής σημασίας για τη διεξοδική εξέταση. Τέλος, η ύπαρξη σαφών διαδικασιών για διορθωτικές ενέργειες όταν εντοπίζονται απαράδεκτες ενδείξεις είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ακεραιότητας της διαδικασίας επιθεώρησης και τη διασφάλιση της ακριβούς αναφοράς [5].

5.4 Απαιτήσεις ελέγχου

Οι γενικές απαιτήσεις επιθεώρησης περιλαμβάνουν διάφορες πτυχές που πρέπει να αντιμετωπιστούν διεξοδικά. Μια κρίσιμη πτυχή είναι η πληρότητα κάλυψης της περιοχής δοκιμής εντός της διαδικασίας δοκιμής σταδιακής συστοιχίας. Αυτή η περιοχή δοκιμής πρέπει να καλύπτει τον όγκο συγκόλλησης, τη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη (THB) και το βασικό μέταλλο. Ο έλεγχος του όγκου συγκόλλησης επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κάθε γωνία της δοκού σταδιακής συστοιχίας καθώς η κεφαλή διασχίζει κατά μήκος της συγκόλλησης. Σε περιπτώσεις όπου η ακριβής θέση είναι άγνωστη, η μετατόπιση εγκάρσιας σάρωσης (TSO) πρέπει να επαληθευτεί σε ελάχιστη απόσταση 25 mm ή το πάχος συγκόλλησης (t) και στις δύο πλευρές του ποδιού συγκόλλησης. Όσον αφορά το βασικό μέταλλο, ελέγχεται χρησιμοποιώντας μια παραδοσιακή κάθετη 0η κεφαλή σε συγκεκριμένη απόσταση για να ανιχνεύσει τυχόν ανακλαστήρες που θα μπορούσαν ενδεχομένως να διαταράξουν τον έλεγχο με τη γωνιακή κεφαλή φάσης συστοιχίας. Επιπλέον, κατά τη χρήση της τεχνικής S-Scan, είναι επιτακτική ανάγκη το βήμα (κλιμακωτή διακύμανση) των γωνιών να μην υπερβαίνει τον 1 βαθμό για να εξασφαλιστεί 50% επικάλυψη κάθε δέσμης για επαρκή κάλυψη [2].

Όσον αφορά την ευαισθησία σάρωσης σε ντεσιμπέλ (dB), το αρχικό επίπεδο αναφοράς κατά τη σάρωση πρέπει να ρυθμιστεί στο 80% του ύψους της οθόνης συν 6 dB. Ωστόσο, η πραγματική αξιολόγηση των ευρημάτων θα διεξαχθεί στο επίπεδο αναφοράς που βρίσκεται στο 80% του ύψους της οθόνης. Αυτή η αξιολόγηση περιλαμβάνει την αφαίρεση των 6 dB που προστέθηκαν αρχικά κατά τη σάρωση για την ακριβή ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η συχνότητα επανάληψης παλμών (PRF) παίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση βέλτιστων συνθηκών δοκιμής. Το PRF πρέπει να ρυθμίζεται σε επίπεδο όπου τυχόν ανακλώμενα σήματα από ανακλαστήρες στη μέγιστη απόσταση εντός του υλικού αποσυντίθενται πριν εκπέμπεται ο επόμενος παλμός. Η αποτυχία διατήρησης κατάλληλου PRF μπορεί να οδηγήσει σε φαντάσματα, τα οποία εκδηλώνονται ως ψευδή σήματα που εμποδίζουν τη διαδικασία αξιολόγησης [7].

Η απαίτηση επικάλυψης σάρωσης καθορίζει ότι οι συγκολλήσεις που εξετάζονται μέσω μιας καταγεγραμμένης σάρωσης μπορούν να τμηματιστούν για επιθεώρηση, εφόσον υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των τμημάτων σάρωσης. Ο ακριβής προσδιορισμός αυτής της επικάλυψης μεταξύ σαρώσεων θα πρέπει να διευκολύνεται χρησιμοποιώντας έναν κωδικοποιητή και πάντα σε σχέση με το αρχικό σημείο συγκόλλησης. Για παράδειγμα, μια συγκόλληση μήκους 2 μέτρων μπορεί να σαρωθεί αποτελεσματικά σε δύο μέρη, το πρώτο κυμαίνεται από 0 έως 1000 mm και το δεύτερο από 950 έως 2000 mm. Η τήρηση αυτών των σχολαστικών οδηγιών επιθεώρησης διασφαλίζει την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των συγκολλήσεων και ενισχύει τη συνολική αποτελεσματικότητα της διαδικασίας δοκιμής σταδιακής συστοιχίας [14].

5.5 Βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, είναι σημαντικό να επιδεικνύεται μεγάλη προσοχή καθώς ολόκληρη η διαδικασία ελέγχου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια και την αξιοπιστία της διαδικασίας βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανομή του πλήρους πλάτους της οθόνης της συσκευής σε ένα καθορισμένο εύρος απόστασης όπως επιθυμείτε, εξασφαλίζοντας ακριβείς και συνεπείς μετρήσεις. Για συστήματα συστοιχίας διαφορών φάσης, αρκετές βασικές βαθμονομήσεις είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης. Η βαθμονόμηση ταχύτητας είναι απαραίτητη λόγω των εγγενών διαφορών μεταξύ της ιδανικής ταχύτητας ήχου σε ένα υλικό και της πραγματικής ταχύτητας που μετράται από το όργανο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε πιθανά σφάλματα στις μετρήσεις. Επομένως, η βαθμονόμηση είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ακριβούς ταχύτητας με την οποία ο ήχος διαδίδεται μέσω του υλικού, ενισχύοντας την ακρίβεια των μετρήσεων [8].

- Στη βαθμονόμηση ταχύτητας, τα σήματα λαμβάνονται από την κάτω επιφάνεια του δοκιμαστικού τεμαχίου και η δεύτερη ανάκλαση του κύματος από την ίδια επιφάνεια για να εξακριβωθεί με ακρίβεια η ταχύτητα του ήχου. Η βαθμονόμηση καθυστέρησης κεφαλής είναι ζωτικής σημασίας καθώς η καθυστέρηση της σφήνας ποικίλλει ανάλογα με τη γωνία της, απαιτώντας αντίστοιχες ρυθμίσεις στον χρόνο καθυστέρησης της κεφαλής με βάση τις γωνίες σφήνας. Συνήθως, οι χρόνοι καθυστέρησης που σχετίζονται με τη γεωμετρία σφήνας είναι προ-προγραμματισμένοι στο λογισμικό του οργάνου, αλλά μπορούν να ρυθμιστούν με ακρίβεια κατά τη βαθμονόμηση για βελτιωμένη ακρίβεια. Κατά τη βαθμονόμηση καθυστέρησης κεφαλής, η δέσμη ανιχνεύει έναν ανακλαστήρα αναφοράς σταθεροποιημένο σε συγκεκριμένο βάθος ή απόσταση, εξασφαλίζοντας συνεπή και αξιόπιστη απόδοση [3].
- Η βαθμονόμηση κέρδους (Gain) είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σχηματισμού δέσμης, η οποία βασίζεται στις διαφραγματικές καθυστερήσεις των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Καθώς διαφορετικά πιεζοηλεκτρικά στοιχεία εντός της κεφαλής παρουσιάζουν ποικίλες ευαισθησίες, η εξασφάλιση ομοιόμορφου πλάτους της επιστρεφόμενης ηχώ είναι κρίσιμη για ακριβείς μετρήσεις. Μέσω βαθμονόμησης κέρδους, σαρώνεται ένας ανακλαστήρας αναφοράς σε σταθερό βάθος για να ομαλοποιήσει το πλάτος της επιστρεφόμενης ηχώ για όλες τις γωνίες δέσμης, βελτιώνοντας τις δυνατότητες οπτικοποίησης και ανίχνευσης σφαλμάτων. Η μέθοδος υπερήχων και η τεχνική Phased Array αξιοποιούν τη βαθμονόμηση για να τυποποιήσουν το εύρος ηχούς σε όλες τις γωνίες δέσμης, διευκολύνοντας την ολοκληρωμένη ανίχνευση και το μέγεθος σφαλμάτων [3].

- Η καμπύλη TVG/DAC (Time Variated Gain/Distance Amplitude Correction) είναι ζωτικής σημασίας για την αντιστάθμιση των επιπτώσεων εξασθένησης της δέσμης κατά τις επιθεωρήσεις A-Scan, όπου η ανακλώμενη ένταση ήχου μειώνεται με το μεγαλύτερο βάθος του ανακλαστήρα στο υλικό. Κατασκευάζοντας μια καμπύλη DAC χρησιμοποιώντας επίπεδες οπές πυθμένα ή πλευρικές οπές για κάθετες και γωνιακές κεφαλές, αντίστοιχα, μπορούν να συγκριθούν ποιοτικά διαφορετικά μεγέθη ανακλαστήρων σε διαφορετικά βάθη. Η ρύθμιση του κέρδους του οργάνου μέσω της καμπύλης TVG ή η χρήση καμπύλης DAC βοηθά στον αποτελεσματικό μετριάσμό των φαινομένων εξασθένησης της δέσμης. Τα όργανα με κεφαλές συστοιχίας διαφοράς φάσης προσφέρουν την ευελιξία κατασκευής καμπυλών TVG και DAC σε πολλαπλά σημεία, εξασφαλίζοντας ολοκληρωμένη κάλυψη του εύρους δέσμης. Αυτές οι καμπύλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων S-Scan, βελτιώνοντας σημαντικά τις δυνατότητες ανίχνευσης σφαλμάτων και την ακρίβεια απεικόνισης στη λειτουργία του οργάνου [3].



Εικόνα 5.5: Δοκίμια βαθμονόμησης [41].

5.6 Αβεβαιότητα

Η αβεβαιότητα σε μια συστοιχία φάσης αφορά τις αποκλίσεις ή τις ανακρίβειες στη διέγερση στοιχείων συστοιχίας, τις χωρικές λεπτομέρειες, τις γωνίες διεύθυνσης, τις θέσεις αισθητήρων και την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ αισθητήρων, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της διαμόρφωσης δέσμης και της επεξεργασίας σήματος. Επιπλέον, αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη γεωμετρία συστοιχιών και τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ήχου μπορεί να οδηγήσουν σε τυχαίες διακυμάνσεις στις αποκλίσεις φάσης, υπονομεύοντας κατά συνέπεια την αποτελεσματικότητα του Beamformer [15].

Ενδεικτικοί τρόποι ενίσχυσης της αποτελεσματικότητας της βαθμονόμησης και παράλληλα μείωση των αβεβαιοτήτων είναι οι έξης:

- Χρήση πολλαπλών ανιχνευτών μέτρησης για τη λήψη συντελεστών μετάδοσης σε διάφορες διαμορφώσεις κεφαλών, δημιουργώντας έναν πίνακα παραγόντων με περιορισμένο αριθμό σεναρίων για τον προσδιορισμό συντελεστών διέγερσης έτσι η γεωμετρία του συστήματος βελτιστοποιείται για να ελαχιστοποιηθούν οι ανακρίβειες [16].
- Χρήση ενός συστήματος βαθμονόμησης κεφαλής φάσης με ανιχνευτή μέτρησης και κάμερα obscura, για τη μείωση της διάρκειας μέτρησης και την ενίσχυση της σταθερότητας του συστήματος βαθμονόμησης. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για γρήγορη βαθμονόμηση κεφαλών συστοιχίας φάσης [16].
- Η ενσωμάτωση αποκεντρωμένων αλγορίθμων συναίνεσης συχνότητας και φάσης, όπως οι ενσωματωμένοι αλγόριθμοι DFPC και PSFPC φιλτραρίσματος Kalman, μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η μετατόπιση συχνότητας, η αναταραχή φάσης και οι αποκλίσεις συγχρονισμού μεταξύ κόμβων εντός καταναμημένων συστοιχιών φάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, οι αλγόριθμοι συμβάλλουν στη βελτίωση του κέρδους σχηματισμού δέσμης και στη μείωση των υπολειπόμενων σφαλμάτων φάσης [17].
- Η εφαρμογή της Ανάλυσης Διαστήματος (I.A.) προσφέρει ένα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για την αξιολόγηση ανοχών μοτίβου ισχύος σε συστοιχίες φάσης που μπορεί να έχουν σφάλματα σημείων ελέγχου. Αυτή η ανάλυση βοηθά να διασφαλιστεί ότι οι αποκλίσεις στις διεγέρσεις δεν οδηγούν σε παραβιάσεις των ορίων μοτίβων ισχύος [18].

Μια αβεβαιότητα πλάτους κυμαίνεται από $-0,5$ dB έως $0,5$ dB και μια αβεβαιότητα φάσης κυμαίνεται από -5° έως 5° για κάθε κατάσταση φάσης. Τα σφάλματα φάσης σε δέσμες συστοιχιών φάσεων έχουν μετρηθεί με ακρίβεια, υποδεικνύοντας ότι στην περίπτωση μικρών συστοιχιών, ένα σφάλμα φάσης 10° μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση σημείου 5% στο πλάτος δέσμης, ενώ σε μεγαλύτερες συστοιχίες, ένα σφάλμα φάσης 25° μπορεί να οδηγήσει σε μείωση 5% στην ευαισθησία του πίνακα [19].

Έχουν προταθεί διαφορετικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτών των αβεβαιοτήτων, κάποιες από αυτές είναι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης κέρδους με περιορισμούς συνόλου αβεβαιότητας, η τεχνική «all-on» (η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές παρακολούθησης, βαθμονόμησης, επεξεργασίας σημάτων και δεσμών παρακολούθησης σε συστήματα συστοιχίας φάσης) για την ακριβή εξέταση της διέγερσης στοιχείων, οι επαναληπτικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των πραγματικών διανυσμάτων κατεύθυνσης παρουσία χωρικών αβεβαιοτήτων και η χρήση της θεωρίας πληροφοριών για τον ποσοτικό προσδιορισμό αβεβαιοτήτων σε μετρήσεις ραντάρ όπως εμβέλεια, κατεύθυνση άφιξης και ιδιότητες σκέδασης [20], [21].

6. Έλεγχος δοκιμίου με τη μέθοδο Phased Array

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε έλεγχος με την τεχνική Phased Array σε ένα δοκίμιο συγκόλλησης με σκοπό να βρεθούν τυχόν ασυνέχειες του. Το προς εξέταση δοκίμιο είναι χαλύβδινη πλάκα συγκόλλησης της εταιρείας “TQCC”, με τα ονομαστικά της μεγέθη να είναι :

- Πάχος: 25mm
- Μήκος: 300mm
- Πλάτος: 390mm
- Πλάτος Συγκόλλησης: 30mm
- Είδος Συγκόλλησης: Μετωπική συγκόλληση μονού V

Τα πρότυπα με βάση τα οποία θα εξεταστούν τα δοκίμια, θα βαθμονομηθεί η συσκευή, θα κριθούν οι τυχόν ασυνέχειες, καθώς και θα ελεγχθεί ο εξοπλισμός, σύμφωνα με τη σειρά που χρησιμοποιήθηκαν, είναι τα εξής:

1. BS EN ISO 5817:2014 : “Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections”
2. ISO 17635:2016 : “Non-destructive testing of welds – General rules for fusion welds in metallic materials”
3. EVS-EN ISO 13588:2019 : “Non-destructive testing of welds- Ultrasonic testing- Use of automated phased array technology [ISO 13588:2019]”
4. ISO 17640: “Non-destructive testing of welds- Ultrasonic testing- Techniques, testing levels, and assessment”
5. BS EN ISO 19285:2017 : “Non-destructive testing of welds- Phased array ultrasonic testing [PAUT]- Acceptance levels [ISO 19285:2017]”
6. ISO 11666: “Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Acceptance levels”

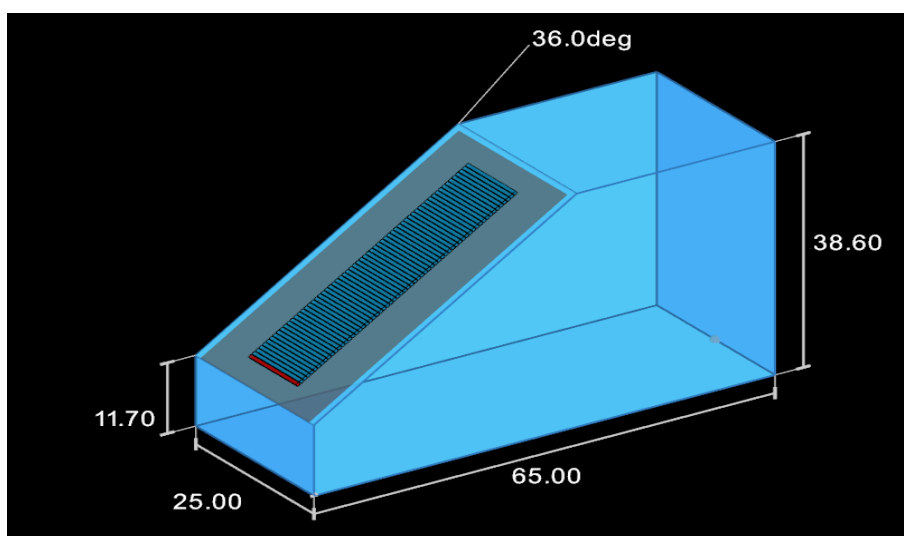
Εν συνεχεία, κατά την πραγματοποίηση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε η κεφαλή «X3A-SM64E», οι σφήνες «X3AW-N55S» για γωνιακό έλεγχο και «X3AW-OL25» για έλεγχο στις 90⁰ της εταιρείας Sonatest. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε Encoder μοντέλου «AE-ENCWP» με ταχύτητα καταγραφής 32 steps/mm της εταιρείας «Phoenix ISL». Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία του ελέγχου είναι το «Sonatest veo+» της εταιρείας Sonatest και επιπλέον το πρόγραμμα UTview για την απεικόνιση και ανάλυση των δεδομένων.

GENERAL	PHASED ARRAY (32:128PR)	UT-TOFD (2PR)	Live TFM
Multiscan Quantity	Up to 8 scans	Up to 2 scans (UT & TOFD)	Up to 6 scans
Pulsers/Receivers	32:128PR	2PR (4 connectors)	Up to 64 elements probe
Gain Range	80dB	100dB	80dB
Sampling Frequency	125 MHz @ 12-Bit	50/100/200 MHz @ 10-Bit	125 MHz @ 12-Bit (processing 16-Bit)
System Bandwidth	0.2 to 23 MHz	0.2 to 18 MHz	0.2 to 23 MHz
Max Pulse Rate Frequency	50,000 Hz	20,000 Hz	50,000 Hz
Pulse Voltage	100-50V ActiveEdge©	400-100V ActiveEdge©	100-50V ActiveEdge©
Focusing Mode	Natural or Constant Depth/Path/Offset	na	Focusing in all points TFM
S-Scan Resolution	Up to 0.1°	na	Down to 0.01mm
L-Scan Resolution	Down to 1 element or Double Resolution	na	Down to 0.01mm
Max PA Beams (focal laws)	Up to 1024 beams	na	Up to 500,000 Pixels
Tools - Measurements and Wizard	EXTRACTION BOX, 4 gates/A-Scan, TCG, DAC/Split-DAC	4 gates/A-Scan, TCG, DGS/ Split DGS, DAC/Split-DAC	12 TFM algorithms, Up to 4 modes per TFMiTM, EXTRACTION BOX, 4 gates, Velocity, TCG, Amplitude fidelity, up to 20 cursors/view
Onboard Scan Plan Tools	Onboard 3D live rendering	Operating Time	6 hours (hot swappable batteries)
Onboard Reporting Tools	PDF auto-report, Export data to CSV file, Save screen capture	Power Input	AC 110V/240V @ 50 Hz/60 Hz
Onboard PDF Reader Integrated	Ability to load and read and PDF documents	Unit Dimensions	115 x 225 x 355 mm (4.52 x 8.6)
Online Help Calibration	ACTIVE help genius for parameter optimisation procedures, reports	Weight	5.1 kg (11 lb) no battery, 460g
Standards	ISO18563 (EN16392) & EN12668	Environmental Rating	Designed for: IP66

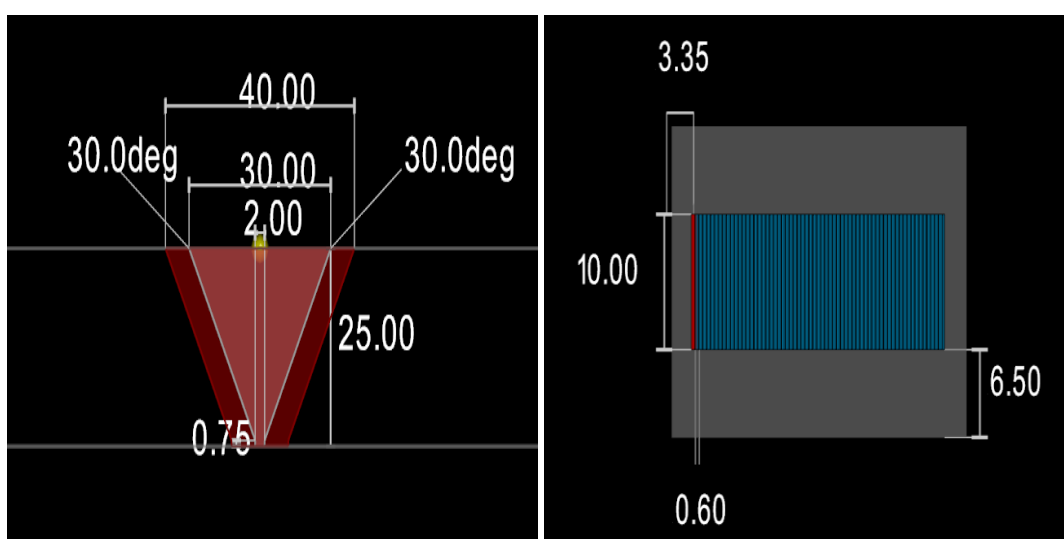
Εικόνα 6: Χαρακτηριστικά του οργάνου Sonatest veo+ [43].

6.1 Δημιουργία πλάνου σάρωσης (Scan Plan)

Ο σκοπός της δημιουργίας ενός πλάνου σάρωσης είναι να ρυθμιστεί η κεφαλή. Αναλυτικότερα, ορίζονται ο αριθμός των συνολικών στοιχείων, το πλήθος των ομάδων που θα διαιρεθούν τα στοιχεία, η απόσταση από το κέντρο μεταξύ δυο διαδοχικών στοιχείων και πολλά άλλα τα οποία έχουν προαναφερθεί στην ενότητα 2.1 και 2.2 της παρούσας εκπόνησης. Επιπλέον, μέσω του πλάνου σάρωσης δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες έτσι ώστε με ένα μόνο πέρασμα από κάθε πλευρά της συγκόλλησης να μπορούν να ελεγχθούν ταυτόχρονα όλα τα σημεία της συγκόλλησης, δηλαδή ο πόδας (ή καπάκι), η ρίζα και το σώμα της.



Εικόνα 6.1.1: Διαστάσεις σφήνας.

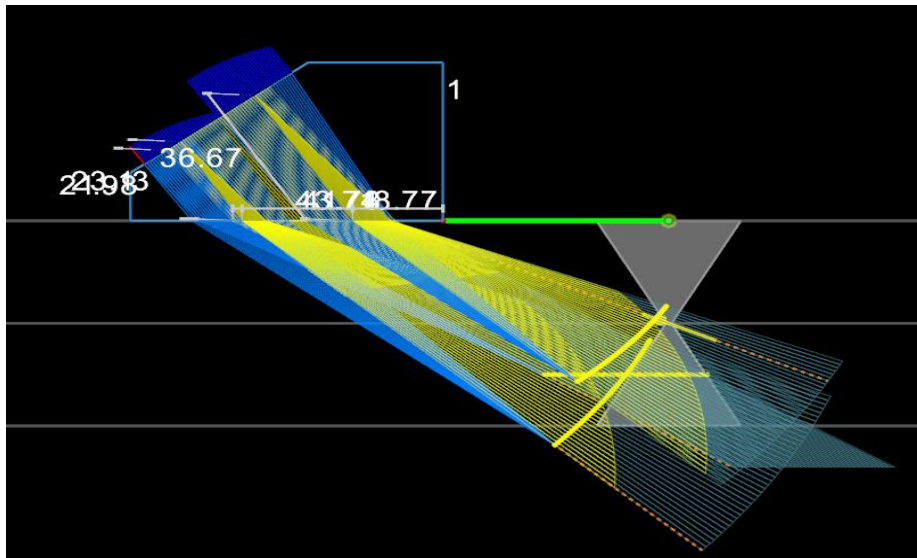


Εικόνα 6.1.2: Διαστάσεις συγκόλλησης εξεταζόμενου δοκιμίου και πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

Παρακάτω ακολουθούν οι προδιαγραφές του scan plan ελέγχοντας έτσι όλες τις θέσεις της συγκόλλησης:

Scan

- └ Scan 1 (Linear PE, 37.50 mm)
 - └ Angle (Angle 60.00°, Element Step 1)
 - └ Element Used (TX 1-64, RX 1-64)
 - └ Path (Start 0.00 mm, Range 120.00 mm, Auto: 1:4)
 - └ Filters (Auto: wide high)
 - └ Filter Width (Wide)
 - └ Digital FIR (Enabled)
- └ Scan 2 (Sectorial PE, Constant Path 85.00 mm)
 - └ Angle (Start 50.00°, Stop 70.00°, Resolution 0.50°)
 - └ Elements Used (TX 1-32, RX 1-32)
 - └ Path (Start 0.00 mm, Range 125.00 mm, Auto: 1:4)
 - └ Filters (Auto: wide high)
 - └ Filter Width (Wide)
 - └ Digital FIR (Enabled)
- └ Scan 3 (Sectorial PE, Constant Path 61.00 mm)
 - └ Angle (Start 50.00°, Stop 70.00°, Resolution 0.50°)
 - └ Elements Used (TX 33-64, RX 33-64)
 - └ Path (Start 0.00 mm, Range 100.00 mm, Auto: 1:4)
 - └ Filters (Auto: wide high)
 - └ Filter Width (Wide)
 - └ Digital FIR (Enabled)



Εικόνα 6.1.3: Κατευθύνσεις δέσμεων για διαφορετικά σημεία της συγκόλλησης.

Σημείωση: στην εικόνα 6.1.3 φαίνονται οι κατευθύνσεις των δέσμεων, οι οποίες προσεγγίζουν όλες τις θέσεις της συγκόλλησης. Η ίδια ακριβώς απεικόνιση είναι και για Skew 90^0 και για Skew 270^0 , δηλαδή και για δεξιά αλλά και για αριστερά της συγκόλλησης.

6.2 Βαθμονόμηση του Sonatest Veo+

6.2.1 Αναφορά Ελέγχου

Για την πραγματοποίηση όλων των επιπέδων ελέγχου, είναι απαραίτητη μια γραπτή αναφορά της διαδικασίας. Η αναφορά αυτή θα πρέπει να περιλαμβάνει τις επακόλουθες πληροφορίες σύμφωνα με το πρότυπο EVS-EN ISO 13588:2019 :

- Σκοπός και έκταση των δοκιμών
- Τεχνικές δοκιμών
- Επίπεδα δοκιμών
- Απαιτήσεις προσόντων/εκπαίδευσης προσωπικού
- Απαιτήσεις εξοπλισμού (συμπεριλαμβανομένων, αλλά όχι περιορισμένων, συχνότητα, ρυθμός δειγματοληψίας, απόσταση μεταξύ των στοιχείων, μέγεθος των στοιχείων)
- Ρυθμίσεις αναφοράς και/ή δοκιμαστικών μπλοκ
- Ρυθμίσεις του εξοπλισμού
- Διαθέσιμη πρόσβαση και συνθήκες επιφάνειας
- Δοκιμή του μητρικού υλικού
- Αξιολόγηση των ενδείξεων
- Επίπεδα αποδοχής και/ή επίπεδα καταγραφής
- Απαιτήσεις αναφοράς
- Περιβαλλοντικά και ζητήματα ασφάλειας

Οπότε γίνεται αναγκαίο πριν την πραγματοποίηση τόσο της βαθμονόμησης όσο και του ελέγχου του δοκιμίου μέσω της βοήθειας των χρησιμοποιούμενων προτύπων να οριστούν τα προαναφερόμενα. Αρχικά με βάση το BS EN ISO 5817:2014 επιλέχθηκαν όλα τα παρελκόμενα πρότυπα, καθώς αναφέρεται για δοκίμια πάχους μεγαλύτερα των 0.5 χιλιοστών και αναφέρεται επίσης για δοκίμια τα οποία έχουν συγκολληθεί με την μέθοδο συγκόλλησης τήξης (εξαιρώντας όμως τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με δέσμη). Επιπλέον, χάρη στο συγκεκριμένο πρότυπο και επιδιώκοντας την μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις του δοκιμίου της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε το επίπεδο ποιότητας B, το οποίο και είναι το πιο αυστηρό, για τον χαρακτηρισμό των ατελειών.

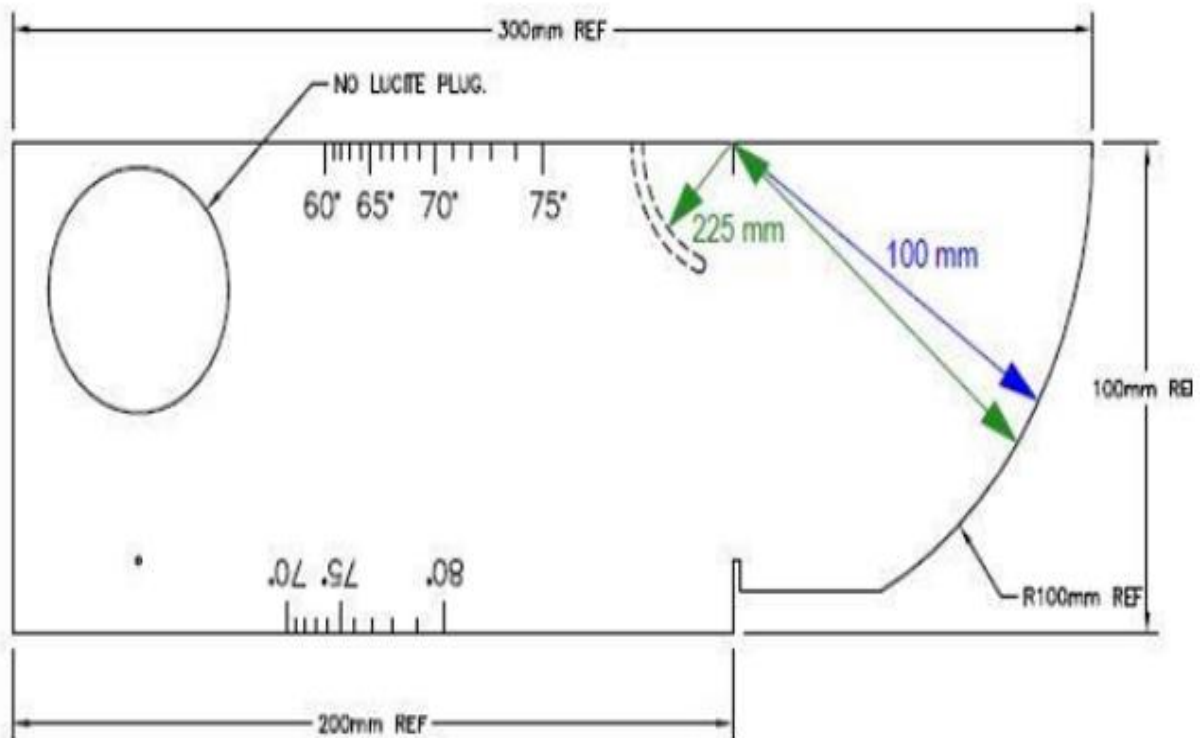
Στη συνέχεια, με βάση το πρότυπο ISO 17635:2016 έγινε ξεκάθαρο πως πέρα από την τεχνική των υπερήχων συστοιχίας φάσης (PAUT: PHASED ARRAY ULTRASOUND TESTING) θα πρέπει να προηγηθεί και οπτικός έλεγχος (VT: VISUAL TESTING) στο εξεταζόμενο δοκίμιο. Επίσης λόγω χρήσης της μεθόδου Phased Array και του επιπέδου ποιότητας B που επιλέχθηκε, συγκεκριμενοποιείται το κριτήριο χαρακτηρισμού και επιλέγεται το επίπεδο ποιότητας B-2. το οποίο αναφέρεται στα πρότυπα ISO 13588 και ISO 19285.

Από το πρότυπο EVS-EN ISO 13588:2019 εκλέχθηκαν πληροφορίες σχετικά με την γραμμική (linear) και γωνιακή (sectorial) σάρωση, με το πλήθος των νεκρών στοιχείων (1 έως 16), την απαιτούμενη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να είναι όλα τα συμβαλλόμενα μέρη αυτού του ελέγχου (0 έως 50 βαθμούς κελσίου), τον ορισμό της ευαισθησίας και των αποκλίσεων αυτής. Επιπρόσθετα, από το πρότυπο ISO 17640 πέρα από την εκλογή και άλλων στοιχείων σχετικά με τις αποκλίσεις της ευαισθησίας και τον ορισμό αυτής, κρίνεται αναγκαίο από τις διαστάσεις του δοκιμίου πως η βαθμονόμηση της ευαισθησίας του θα πρέπει να γίνει με την βοήθεια ενός άλλου δοκιμίου βαθμονόμηση με πλευρικές οπές διαμέτρου τριών χιλιοστών και πλήθος αυτών τις τρεις κατ' ελάχιστων οπές.

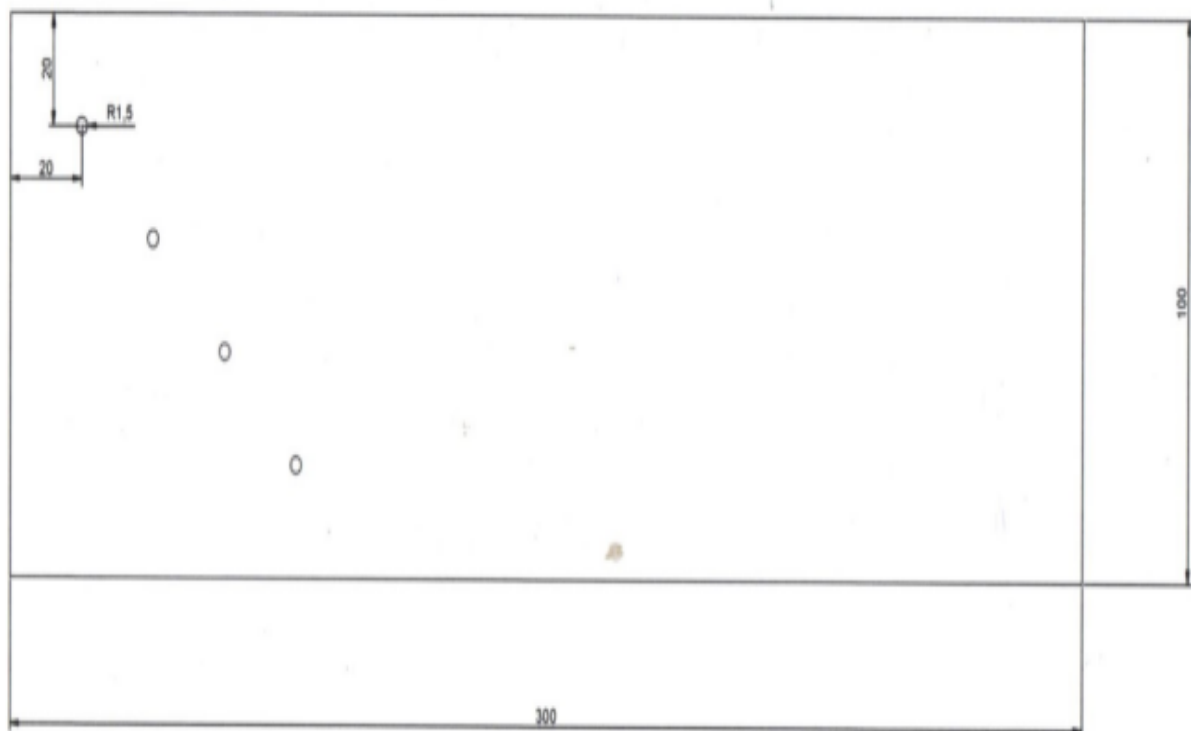
Τέλος, μέσω του προτύπου ISO 19285:2017 και του επιπέδου ποιότητας B-2 που έχει επιλεγεί ορίζονται τα κριτήρια αποδοχής ή απόρριψης των τυχών ασυνεχειών αφού έχει γίνει πρώτα η αξιολόγηση αυτών. Για την αξιολόγηση δίνονται δυο τεχνοτροπίες, η πρώτη γίνεται με βάση το “length and height” κριτήριο, ενώ η άλλη γίνεται με βάση “height and maximum amplitude” κριτήριο. Στην παρούσα μέτρηση χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο “height and maximum amplitude”, δηλαδή σύμφωνα με την παράγραφο 6.β και πίνακα 3 (table 3). Σε συνεργασία με το πρότυπο ISO 19285:2017 και το ISO 11666 προκύπτει το συμπέρασμα πως ο έλεγχος του δοκιμίου θα πραγματοποιηθεί για “Levels technique 1 for thicknesses 15 mm to 100mm – Acceptance level 2”. Με βάση αυτό, θα γίνει χρήση του διαγράμματος A.3 του προτύπου ISO 11666 για τον τελικό χαρακτηρισμό των ασυνεχειών.

6.2.2 Δοκίμια Βαθμονόμησης

Τα επακόλουθα δυο δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την βαθμονόμηση της κεφαλής (V1 δοκίμιο), όσο και για την δημιουργία της καμπύλης TCG.



Εικόνα 6.2.2.1: Διαστάσεις δοκιμίου βαθμονόμησης V1 [14].



Εικόνα 6.2.2.2: Διαστάσεις δοκιμίου TCG block.

6.2.3 Βαθμονόμηση χρονοκαθυστέρησης σφήνας, καθυστέρηση ευαισθησίας και TCG.

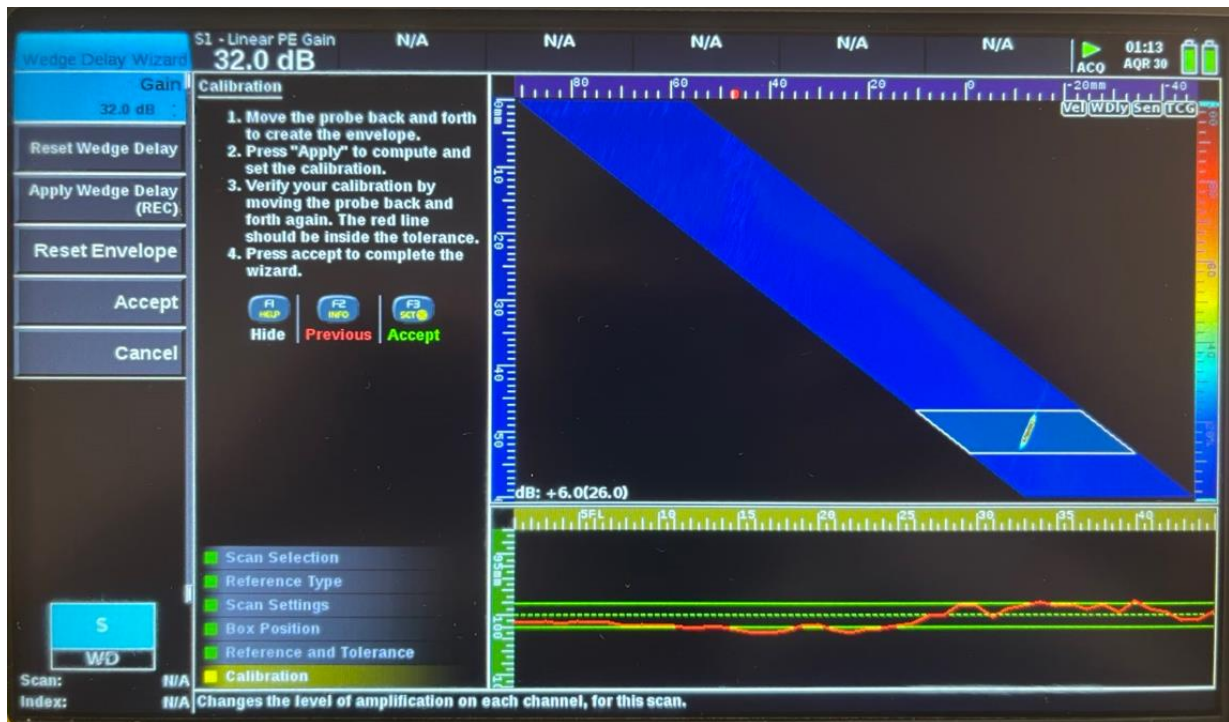
Βαθμονόμηση χρονοκαθυστέρησης σφήνας

Για την βαθμονόμηση χρονοκαθυστέρησης της σφήνας (Wedge Delay Calibration) χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο V1 (Εικόνα 6.2.2.1).

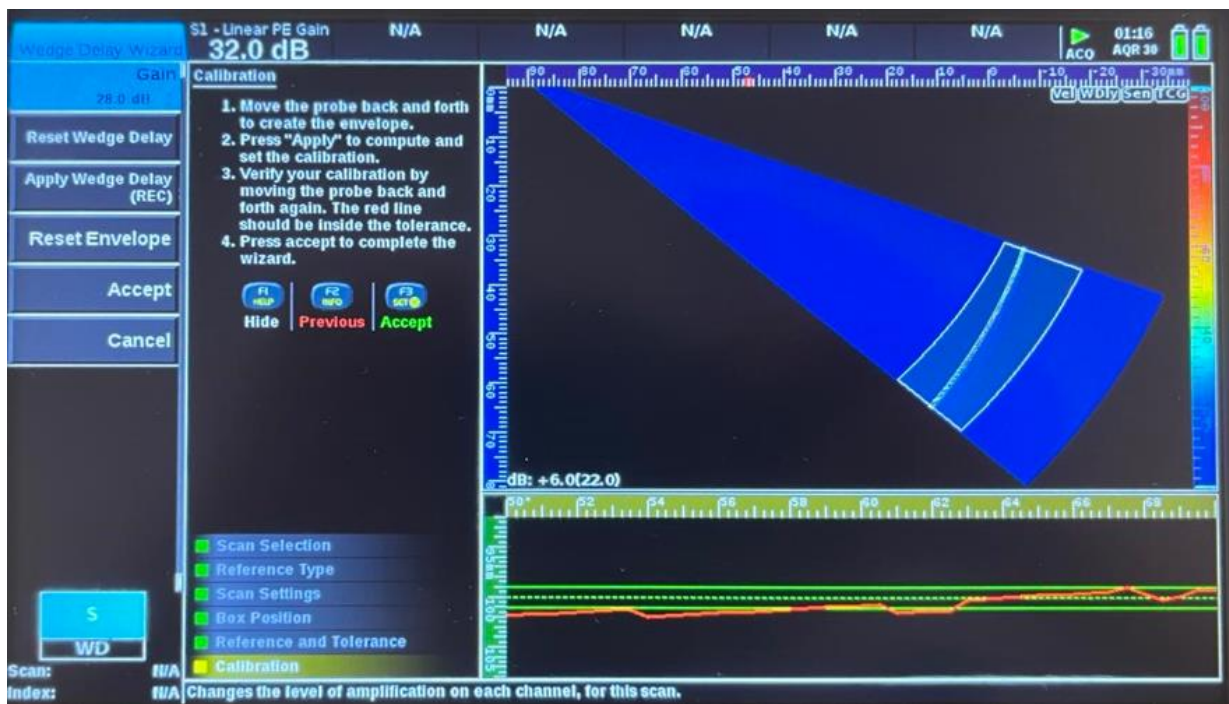


Εικόνα 6.2.3.1: Τοποθέτηση κεφαλής στο δοκίμιο για βαθμονόμηση καθυστέρησης σφήνας.

Η Α-Σάρωση και η S-Σάρωση που λαμβάνεται, αναφέρονται στην γωνία των 60° της δέσμης. Έπειτα, το σήμα μεγιστοποιείται και μέσω της ρύθμισης του κέρδους (gain) το μέγιστο πλάτος από την ανάκλιση πέφτει στο 80% της οθόνης. Κατά τη διαδικασία της γωνιακής σάρωσης στην απεικόνιση S-scan, όλες οι εικόνες A-scan που παράγονται από τον έλεγχο σε κάθε γωνία στοιβάζονται διαδοχικά η μία δίπλα στην άλλη, ώστε να συνθέσουν την τελική εικόνα. Το δοκίμιο σαρώνεται κατά μήκος με την κεφαλή, προκειμένου να εντοπιστούν οι μέγιστες τιμές του μονοπατιού του ήχου για όλες τις γωνίες της δέσμης. Η καμπύλη που δημιουργείται στη συσκευή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια της οθόνης, και σε περίπτωση που συμβεί αυτό, η καμπύλη διαγράφεται και το κέρδος μειώνεται έως ότου προκύψει καμπύλη που βρίσκεται εντός των ορίων της οθόνης. Είναι να αναγκαίο να σημειωθεί πως πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για όλα τα πλάνα σάρωσης.



Εικόνα 6.2.3.2: Βαθμονόμηση χρονοκαθυστέρησης σφήνας για τύπο αναφοράς (Ref Type) Depth SDH.

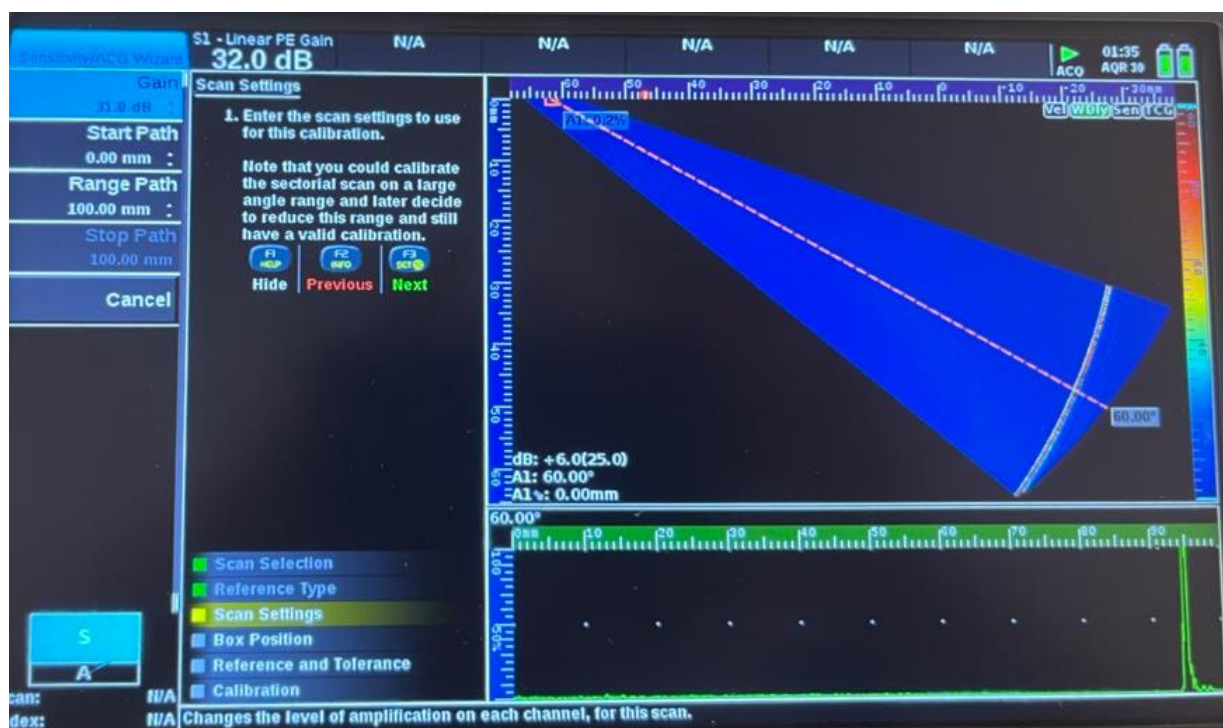


Εικόνα 6.2.3.3: Βαθμονόμηση χρονοκαθυστέρησης σφήνας για τύπο αναφοράς (Ref Type) Radius.

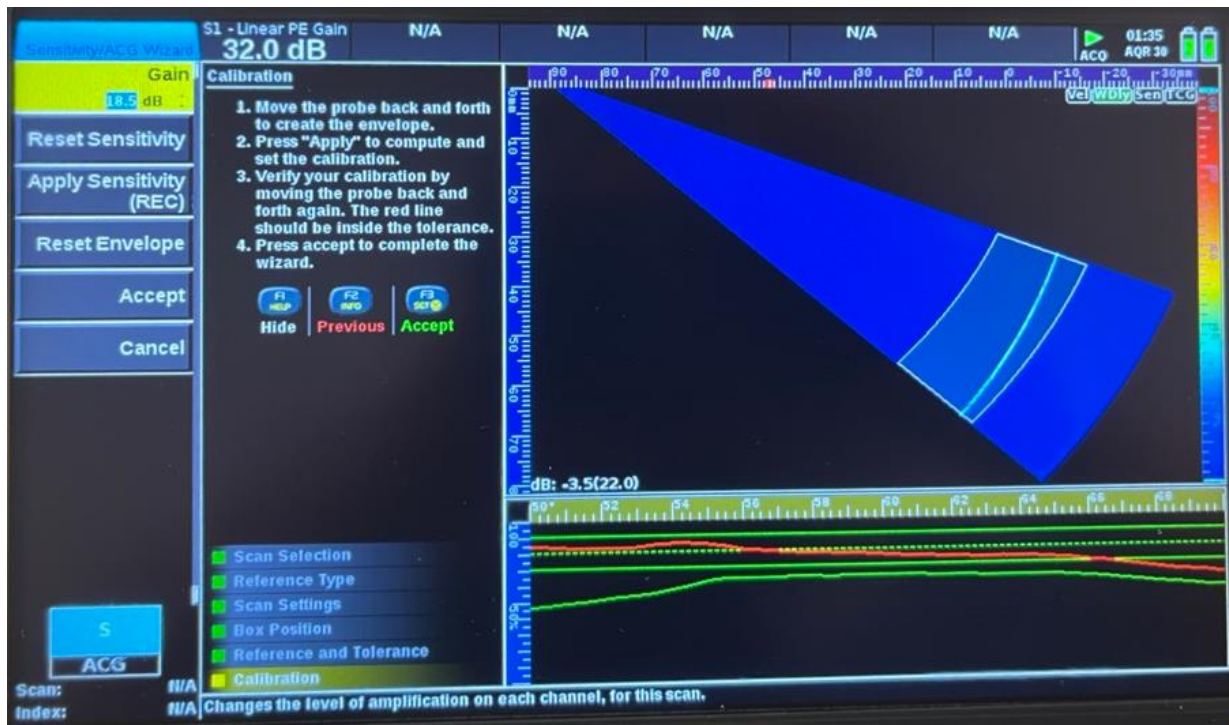
Σημείωση: Το όργανο έχει πλέον βαθμονομηθεί ως προς την χρονοκαθυστέρηση της σφήνας και παρέχει την ίδια μέτρηση για το μονοπάτι του ήχου σε όλες τις γωνίες της δέσμης.

Βαθμονόμηση ευαισθησίας

Για την βαθμονόμηση της ευαισθησίας (sensitivity) χρησιμοποιείται το ίδιο δοκίμιο βαθμονόμησης με αυτό που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως. Η κεφαλή τοποθετείται στο κάτω μέρος του δοκιμίου που φαίνεται στην εικόνα 6.2.3.1 με σκοπό να πετυχαίνει την οπή. Η Α-σάρωση που πραγματοποιείται αντιστοιχεί στη γωνία των 60° της δέσμης. Το δοκίμιο σαρώνεται κατά μήκος με την κεφαλή, μέχρι να εντοπιστεί το μέγιστο σήμα από την ανάκλαση του ήχου στην οπή. Στη συνέχεια, το σήμα αυτό ρυθμίζεται ώστε να καταλαμβάνει το 80% της οθόνης. Η καμπύλη που δημιουργείται στη συσκευή δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια της οθόνης, και σε περίπτωση που συμβεί αυτό, η καμπύλη διαγράφεται και το κέρδος μειώνεται έως ότου προκύψει καμπύλη που βρίσκεται εντός των ορίων της οθόνης.



Εικόνα 6.2.3.4: Μέγιστο πλάτος σήματος από την οπή.



Εικόνα 6.2.3.5: Τελική μορφή καμπύλης ευαισθησίας.

Καμπύλη TCG

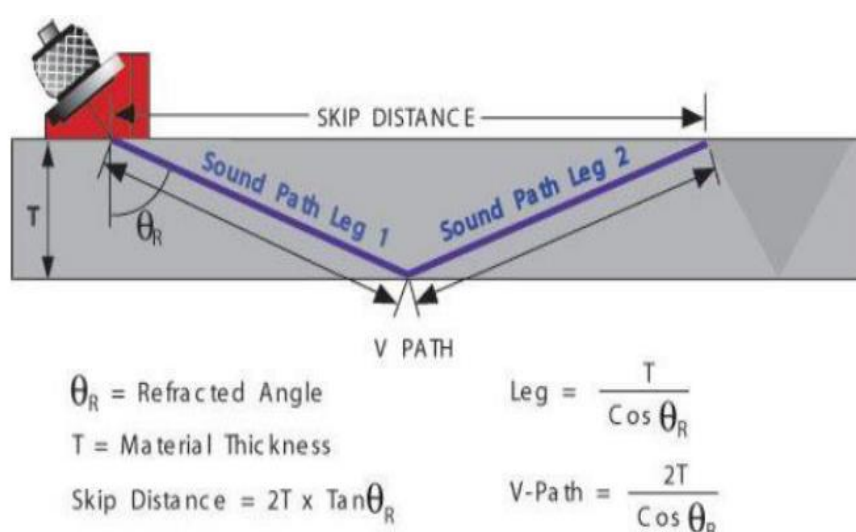
Η κεφαλή τοποθετείται στην επάνω επιφάνεια του δείγματος δοκιμής (Εικόνα 6.2.2.2). Το δοκίμιο αυτό διαθέτει 4 οπές των 3 mm, σε βάθος 20 mm, 40 mm, 60 mm και 80 mm. Στη συνέχεια, πραγματοποιείτε σάρωση της επιφάνειας κατά μήκος, μέχρις ότου προσδιοριστεί η μέγιστη ένδειξη από την αρχική οπή σε κάθε γωνία της δέσμης της. Οι διαστάσεις της πύλης πρέπει να βαθμονομηθούν έτσι ώστε να αντιπροσωπεύεται αποκλειστικά το σήμα που προέρχεται από την πρώτη οπή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δημιουργηθούν καμπύλες πλάτους για όλες τις γωνίες από τη δεύτερη και την τρίτη οπή. Έτσι, η καμπύλη TCG διαμορφώνεται τελικά από το όργανο.



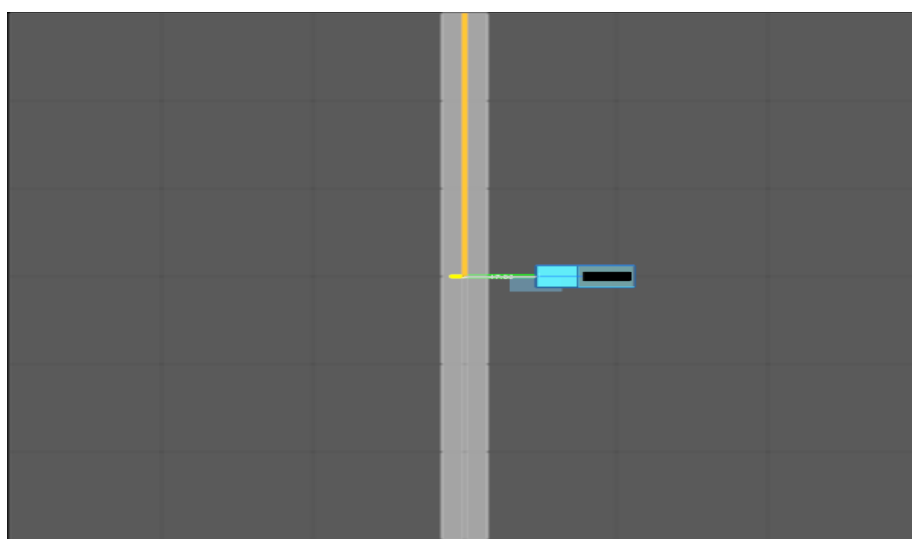
Εικόνα 6.2.3.6: Τελική μορφή καμπύλης TCG.

6.3 Έλεγχος Δοκιμίου

Αρχικά, πριν γίνει ο έλεγχος της συγκόλλησης θα πρέπει να ελεγχθεί το μέταλλο βάσης, το οποίο ελέγχεται με τη χρήση μιας κάθετης κεφαλής 0° για τυχόν εμφανίσεις των “laminations”, οι οποίες εμποδίζουν τον έλεγχο τους με γωνιακές κεφαλές. Μετά την πραγματοποίηση καλού καθαρισμού του δοκιμίου και έλεγχο αυτού με την κάθετη κεφαλή γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχει κάποιο είδος ασυνέχειας στο μέταλλο βάσης. Υστέρα, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η εξίσωση $1\ skip = 2 \cdot t \cdot \tan(\theta)$, όπου t : πάχος τεμαχίου, θ : η γωνία με την οποία φεύγει η δέσμη από την κεφαλή (60 μοίρες) και 1 skip: βηματική απόσταση (86.6 mm), με αποτέλεσμα να βρεθεί ακριβώς από ποια θέση (στα $1/2$ skip άρα 43.3 mm) θα τοποθετηθεί η κεφαλή για την υλοποίηση του ελέγχου.



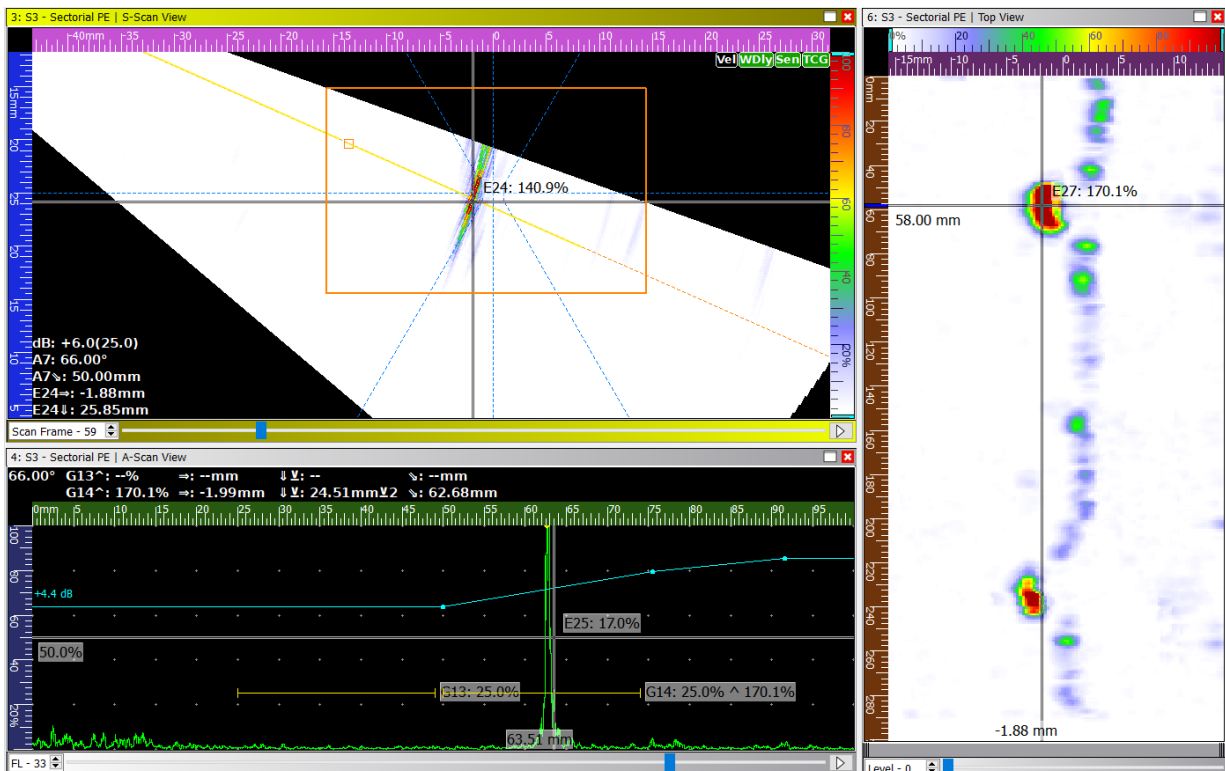
Εικόνα 6.3.1: Τρόπος υπολογισμού skip distance και V-path [44].



Εικόνα 6.3.2: Καθορισμός θέσης και πορείας της κεφαλής.

Ασυνέχεια Νο1

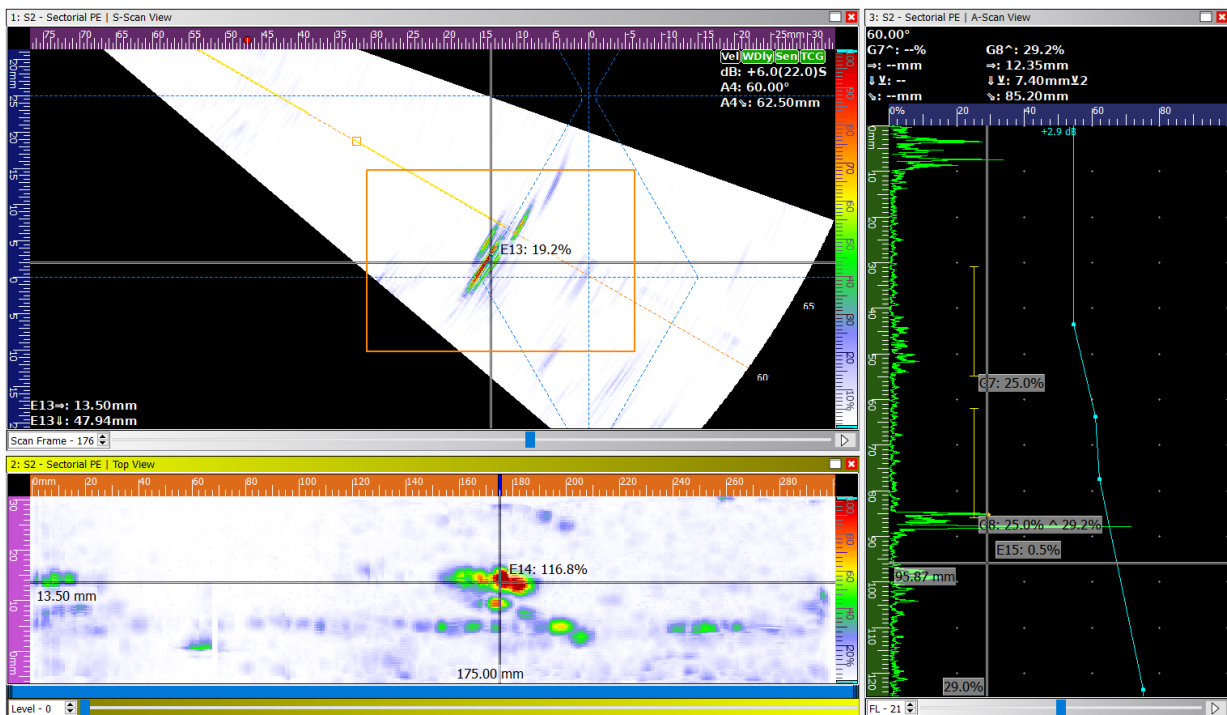
- Skew 90°.
- Εντοπίζεται στο group 3 στο S3-Sectorial.
- 48 mm από την αρχή της συγκόλλησης.
- 71 mm συνολικό μήκος ασυνέχειας, άρα μήκος ασυνέχειας πραγματικό 23 mm.
- Ατελής τήξη στη ρίζα, αφού το σήμα στον S3 πέφτει απότομα και είναι αρκετά ίσιο και πολύ ψηλό.
- Βάθος ασυνέχειας στα 21 mm.
- Through Wall Height (TWH) στα 4 mm.
- $\frac{L}{t} = \frac{23}{25} \approx 0.9$, όπου L:Length και t:πάχος τεμαχίου, άρα acceptance level είναι -6dB από reference, οπότε η ασυνέχεια κόβεται άρα είναι μη αποδεκτή.
- $20\log\left(\frac{100.2}{80}\right) = 1.95$, όπου 100.2 το ύψος της ασυνέχειας, ενώ 80 το ύψος του reference level, έτσι υπολογίζεται το maximum amplitude, το οποίο έχει διαφορά από το reference level σύμφωνα με διάγραμμα A.3.



Εικόνα 6.3.3: Ατελής τήξη- Skew 90°.

Ασυνέχεια Νο2

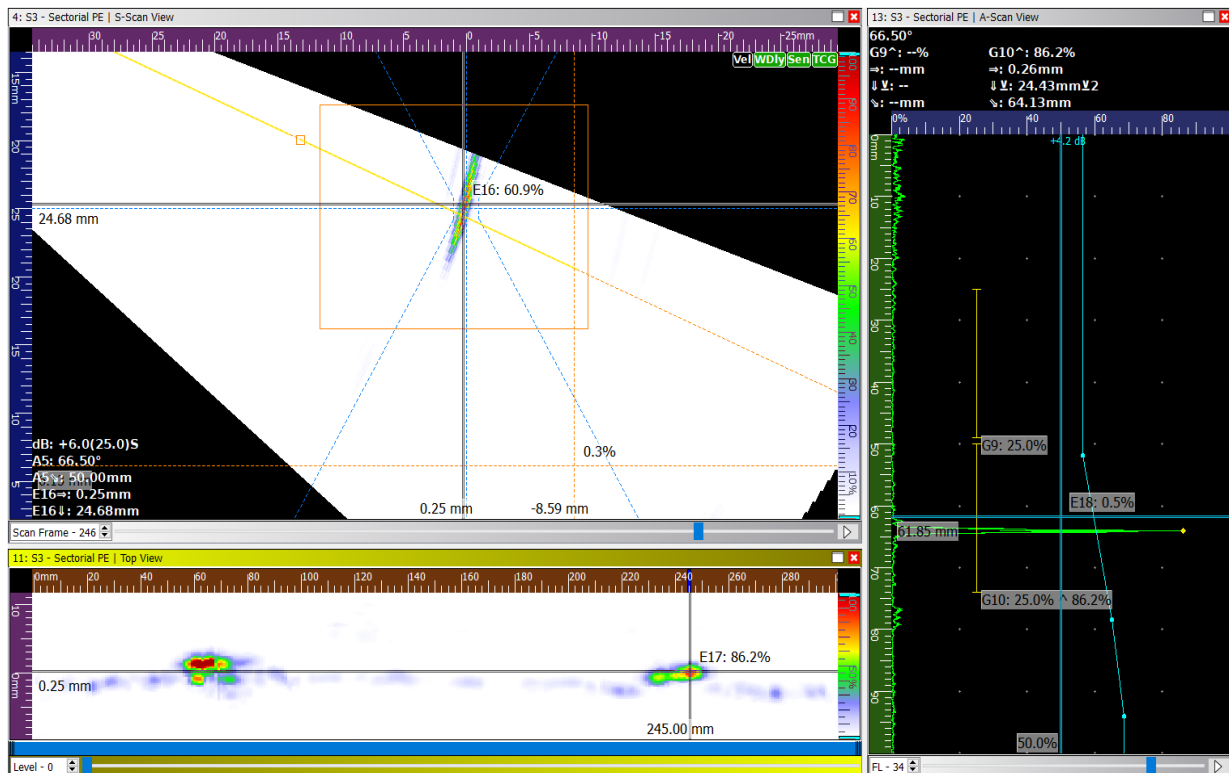
- Skew 270° .
- Εντοπίζεται στο group 2 στο S2-Sectorial.
- 173 mm από την αρχή της συγκόλλησης.
- 185 mm συνολικό μήκος ασυνέχειας, άρα μήκος ασυνέχειας πραγματικό 12 mm.
- Ρήγμα στον πόδα, αφού το σήμα στον S2 έχει πολλές και ψηλές κορυφές που εναλλάσσονται.
- Βάθος ασυνέχειας στα 0 mm.
- Through Wall Height (TWH) στα 5 mm.
- $\frac{L}{t} = \frac{12}{25} = 0.48$, όπου L:Length και t:πάχος τεμαχίου.
- $20 \log \left(\frac{71}{80} \right) \leq 0$, όπου 71 το ύψος της ασυνέχειας, ενώ 80 το ύψος του reference level, έτσι υπολογίζεται το maximum amplitude, το οποίο βρίσκεται κάτω από το reference level, κάτω δηλαδή από -4dB.
- Άρα αποδεκτή και δεν χρειάζεται να καταγραφεί.



Εικόνα 6.3.4: Ρήγμα (Πόροι με στεροειδή)- Skew 270° .

Ασυνέχεια Νο3

- Skew 270°.
- Εντοπίζεται στο group 3 στο S3-Sectorial.
- 228 mm από την αρχή της συγκόλλησης.
- 251 mm συνολικό μήκος ασυνέχειας, άρα μήκος ασυνέχειας πραγματικό 23 mm.
- Ατελής διείσδυση στη ρίζα, αφού το σήμα στον S3 πέφτει απότομα και είναι αρκετά ίσιο αι πολύ ψηλό.
- Βάθος ασυνέχειας στα 21 mm.
- Through Wall Height (TWH) στα 4 mm.
- $\frac{L}{t} = \frac{23}{25} \approx 0.9$, όπου L:Length και t:πάχος τεμαχίου.
- $20 \log \left(\frac{86.2}{80} \right) = 0.64$, όπου 86.2 το ύψος της ασυνέχειας, ενώ 80 το ύψος του reference level, έτσι υπολογίζεται το maximum amplitude, το οποίο έχει διαφορά από το reference level σύμφωνα με διάγραμμα A.3.
- Άρα μη αποδεκτή και επιπλέον χαρακτηρίζεται ως “surface breaking” (επιφανειακό σπάσιμο).



Εικόνα 6.3.4: Ατελής διείσδυση στη ρίζα - Skew 270°.

Σχόλια:

- Με βάση το κριτήριο 6.α και πίνακα 3 (table 3), η ασυνέχεια No2 κόβεται γιατί το TWH είναι μεγαλύτερο του δυο και επιπλέον χαρακτηρίζεται και “surface breaking”. Παράλληλα, με βάση το ίδιο κριτήριο και πίνακα, οι ασυνέχειες No1 και No3 κόβονται και πάλι.
- Μετά τον έλεγχο που έγινε και με το κριτήριο 6.α, γίνεται κατανοητό πως με το κριτήριο 6.β και μόνο θα γίνει ο έλεγχος της παρούσας διαδικασίας. Επειδή ο υπέρηχος δεν έχει την ικανοποιητική ικανότητα να μετράει γωνιακή διακριτική ικανότητα αρά δεν είναι και ακριβές το αποτέλεσμα για TWH είναι μια εκτίμηση και επίσης γιατί είναι μικρότερο από το άνοιγμα της δέσμης.

7. Συμπεράσματα και Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της τεχνικής συστοιχίας διαφοράς φάσης (Phased Array) για τον έλεγχο ενός συγκολλητού δοκιμίου. Διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Στο πλαίσιο της τεχνολογικής εξέλιξης για τον έλεγχο δοκιμίων στους Μη Καταστροφικούς Ελέγχους επήλθε μετάβαση από τον συμβατικό υπέρηχο στην τεχνική Phased array.
- Η εφαρμογή της τεχνικής Phased array για βαθμονόμηση δοκιμίων αποτελεί μια πιο έγκυρη και πιο γρήγορη διαδικασία σε σχέση με τον συμβατικό υπέρηχο.
- Η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.
- Σημειώθηκε σημαντική πιθανότητα εντοπισμού της πλειοψηφίας των αποκλίσεων και μια συγκριτικά ακριβής οριοθέτηση αυτών.
- Η ασάφεια που είναι εγγενής στις μετρήσεις οφείλεται στις παραμέτρους που έχουν προκαθοριστεί πριν από την αξιολόγηση. Είναι επιτακτική ανάγκη να προσπαθούμε με συνέπεια να ελαχιστοποιήσουμε την αβεβαιότητα σχετικά με τη συσκευή που έχουμε στη διάθεσή μας.
- Κατά τη χρήση του μηχανήματος, θα πρέπει ο χειριστής του να διαθέτει μεγάλη εμπειρία στο πώς πραγματοποιείται η διαδικασία της βαθμονόμησης και του ελέγχου, ώστε να είναι σε θέση να αξιολογήσει και να ερμηνεύσει ορθά τα σήματα που λαμβάνει.
- Οι ρυθμίσεις που θα επιλεγούν για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης και του ελέγχου θα πρέπει να συνυφαίνονται με τις απαιτήσεις και με τις προδιαγραφές του εκάστοτε εξεταζόμενου δοκιμίου.
- Η τεκμηριωμένη διαδικασία ελέγχου αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της διαδικασίας ελέγχου. Επομένως, πρέπει να διατυπώνεται από ειδικευμένα άτομα που διαθέτουν εμπειρία στη μεθοδολογία ελέγχου. Μετά τη λήψη της έγκρισης, η διαδικασία πρέπει να τηρείται αυστηρά και τυχόν αποκλίσεις πρέπει να τεκμηριώνονται. Η πρακτική αυτή εγγυάται την ακεραιότητα των υφιστάμενων μηχανισμών ελέγχου.
- Με την ανάλυση της καμπύλης TCG προκύπτουν οι θέσεις και το πλήθος των ασυνεχειών του εξεταζόμενου δοκιμίου μέσω της ερμηνείας και κατανόησης του γραφήματος.

7.2 Προτάσεις

Θέματα που προέκυψαν στην διάρκεια εκτέλεσης της παρούσας εργασίας και που χρήζουν περαιτέρω έρευνας:

- Μη καταστρεπτικές δοκιμές που χρησιμοποιούν τη μεθοδολογία συστοιχίας διαφορών φάσης σε διάφορες γεωμετρικές διαμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένων σωληνώσεων, κυλινδρικών αξιολογήσεων ή αξιολογήσεων πάχους σε διάφορα υλικά.
- Η διαμόρφωση υπολογιστικών αλγορίθμων για την εξομοίωση της τεχνικής υπερήχων και την αντιπαράθεση των αποτελεσμάτων με εμπειρικές μετρήσεις.
- Αξιολόγηση πηγών αβεβαιότητας και υπολογισμός της συνολικής αβεβαιότητας στο πλαίσιο χαρακτηρισμού ασυνέχειας χρησιμοποιώντας την τεχνική PAUT.
- Σύγκριση PAUT και ραδιογραφίας σχετικά με τη μέτρηση, την ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- Μη καταστρεπτικές δοκιμές χρησιμοποιώντας μια υβριδική προσέγγιση που ενσωματώνει το TOFD και τη δοκιμή υπερήχων Phased Array (PAUT).

Βιβλιογραφία

Βιβλιογραφία

- [1] Φασνάκης Γ., «ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΠΗΝΙΩΝ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2022.
- [2] Τσακίρογλου Α., «Μελέτη της τεχνικής Phased Array στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο με υπερήχους», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2019.
- [3] Καραφυλλίδης Χ., «Μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο υπερήχων και την τεχνική *phased array*», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2015.
- [4] Κωτούζας Κ., «Τεχνική ελέγχου *phased array* – Σημειώσεις θεωρίας », 2nd edition, 2015.
- [5] Κουσίδης Σ., «Έλεγχος Συγκολλήσεων με την Τεχνική Υπερήχων *Phased Array*», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2021.
- [6] Χρηστίδης Θ., «Έλεγχος με υπερήχους – Τεχνική *phased array*», 2nd edition, 2010.
- [7] ASME V Mandatory Appendix V: 2021 – Phased array E-scan and S-scan linear scanning examination techniques.
- [8] Παπαστεργίου Γ., «Χρήση του οργάνου υπερήχων Olympus Omniscan SX (Phased Array) για τον έλεγχο συγκολλητών δοκιμίων», Σπουδαστική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2024.
- [9] Ματίκας Θ., Αγγέλης Δ., “Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι”, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, ISBN: 978-960-603-120-5, Copyright © ΣΕΑΒ, 2015 (www.kallipos.gr).
- [10] S.Cohran, “Part 12. Fundamentals of ultrasonic Phased arrays”, Insight – Non Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol 48 No 4 April 2006.
- [11] Κουσίδης Σ., «Μη καταστροφικός Έλεγχος – Μέθοδος Υπερήχων», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2013.
- [12] Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications, Published by RD Tech.
- [13] Κυργιαζόγλου Α., Παραδόσεις του μαθήματος Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2022.

- [14] ASTM E-2700-14 – Standard practice for contact ultrasonic testing of welds using phased arrays.
- [15] Elhamsadat Anarajifirooz & Sergey Loyka, Robustness of Massive MIMO to Location and Phase Errors, April 2023, pp 440-444.
- [16] Si Tang & Zhengpeng Wang, Fast Phased Array Calibration Method Based on Multiple Measuring Probes, IEEE, Beihang University, November 2020.
- [17] M. Rashid & Jeffrey A. Nanzer, Online Expectation-Maximization Based Frequency and Phase Consensus in Distributed Phased Arrays, IEEE Transactions on Communications, July 2022, Volume 71, pp 3721-3735, προσπελάσιμο σε (<https://typeset.io/papers/online-expectation-maximization-based-frequency-and-phase-2i0zgay2>).
- [18] Paolo Rocca & Nicola Anselmi & Lorenzo Poli & Luca Manica & Andrea Massa & Ennio Giaccari, Modeling uncertainty in phased arrays through the interval analysis, IEEE, University of Trento, pp 1157-1158, προσπελάσιμο σε (<https://typeset.io/papers/modeling-uncertainty-in-phased-arrays-through-the-interval-1vktedce585>).
- [19] ΚΕΚ ΙΒΕΠΕ, «Μη Καταστρεπτικές Δοκιμές - Επιθεώρηση Συγκολλήσεων», Αθήνα.
- [20] Dazhuan Xu & Chao Shi & Ying Zhou & Weilin Tu, Spatial information in phased-array radar, Iet Communications (The Institution of Engineering and Technology), August 2020, Volume 14, pp 2141-2150, προσπελάσιμο σε (<https://typeset.io/papers/spatial-information-in-phased-array-radar-25747kcj8d>).
- [21] Jooku Hahn & Hwi Kim, Uncertainty-managed phase-shifting digital holography, Kyungpook National University & Korea University Sejong Campus, November 2012, Volume 37, pp 4492-4494 προσπελάσιμο σε (<https://typeset.io/papers/uncertainty-managed-phase-shifting-digital-holography-439fvjghfz>).
- [22] ASNT SNT-TC-1A: 2016 – Recommended practice for training, qualification and certification of NDT personnel.
- [23] Olympus, “Phased array testing: Basic theory for Industrial applications”, Published by Olympus Scientific Solutions Americas, USA, 201.
- [24] Sasha Schediwy & Danny Price & Fred Dulwich & Ben Mort, A quantitative analysis of how phase errors affect the beam quality of phased arrays, IEEE, University of Oxford, pp 256-260, προσπελάσιμο σε (<https://typeset.io/papers/a-quantitative-analysis-of-how-phase-errors-affect-the-beam-ixwpk5b9s8>).

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις/ Πηγές

- [25] <http://qntbd.com/phased-array-ultrasonic-testing/>
- [26] <http://h2physics.org/?cat=47>
- [27] <https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Pereira-Jr/publication/315040923/figure/fig1/AS:516017202962432@1500039496843/Phased-array-probe-linear.png>
- [28] <https://images.app.goo.gl/pecQhz6NnTduUUBc9>
- [29] <https://static2.olympus-ims.com/data/Image/intro/PhasedArrayElements.jpg?rev=6886>
- [30] <https://images.app.goo.gl/AAeL8ECw7fZ1R4TBA>
- [31] [https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-sx/#!/cms\[focus\]=cmsContent10536](https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-sx/#!/cms[focus]=cmsContent10536)
- [32] <https://nextndt.com/phased-array-ultrasonic-testing-paut-ordering-guide/>
- [33] https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm
- [34] <https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/1e128d1170b0d3a9b7c7f12c7e6b90e7787ca4c2/2-Figure1-1.png>
- [35] <http://www.tqcc.gr/μη-καταστροφικές-δοκιμές/μκδ-μέθοδοι/υπέρηχοι>
- [36] <https://www.semanticscholar.org/paper/Phased-Array-Ultrasonic-Detection-%26-Sizing-of-in-1-Chartier/4e179a70b950f44561ba05c728be4630e88e4e11/figure/8>
- [37] <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102974>
- [38] <https://images.app.goo.gl/8NbdQAY9V1UGpCvV9>
- [39] <https://images.app.goo.gl/kcq5Hv2fMC7dvTgg7>
- [40] <https://images.app.goo.gl/Ku48BbqorHXwzm8v8>
- [41] <https://images.app.goo.gl/jY5kXcKDn71BCicJ9>
- [42] <https://images.app.goo.gl/L5bgmd4YfbVNFQeP6>
- [43] https://sonatest.com/application/files/7217/1146/0082/286315_Veo3_Brochure_-0324.pdf
- [44] <https://www.nde-d.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/SelectedApps/weldments.htm>