ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΕΛΕΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΘΕΜΕΛΑΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: *ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

-ΑΘΗΝΑ ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2016-

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Σύνθετα Υλικά 1
1.1 Εισαγωγή 1
1.2 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών 2
1.3 Βασικά Δομικά Μέρη Σύνθετου Υλικού 3
1.3.1 Μήτρες 3
1.3.2 Ενισχυτικές Ίνες 5
1.4 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών στη Ναυπηγική 8
1.5 Ατέλειες στις Ναυπηγικές Κατασκευές από Σύνθετα Υλικά 10
Κεφάλαιο 2: Μη Καταστροφικός Έλεγχος 19
2.1 Εισαγωγή 19
2.2 Μέθοδοι μη Καταστροφικού Έλεγχου 20
Κεφάλαιο 3: Υπερηχητικά Κύματα 29
3.1 Εισαγωγή 29
3.2 Είδη Υπερηχητικών Κυμάτων 30
3.3 Υπερηχητικά Κύματα και Συνοριακές Επιφάνειες Δύο Υλικών 33
3.3.1 Κάθετη Πρόσπτωση Ηχητικού Κύματος στη Συνοριακή Επιφάνεια Δύο Υλικών . 33
3.3.2 Πλάγια Πρόσπτωση Υπερηχητικών Κυμάτων στη Διαχωριστική Επιφάνεια Δύο Υλικών 35
3.4 Απόσβεση Υπερηχητικών Κυμάτων (Attenuation) 36
Κεφάλαιο 4: Πιεζοηλεκτρικές Κεφαλές 39
4.1 Εισαγωγή 39
4.2 Αρχή Παραγωγής Υπερήχων-το Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο 39
4.3 Είδη Αισθητήρων 41
4.3.1 Αισθητήρες Επαφής 42
4.3.2 Αισθητήρες Εμβάπτισης 44
4.4 Επιλογή Πιεζοηλεκτρικής Κεφαλής για τον Έλεγχο Σύνθετων Υλικών 45
Κεφάλαιο 5: Μη Καταστροφικός Έλεγχος με Υπερήχους 49
5.1 Ιστορική Αναδρομή 49
5.2 Διατάξεις Ελέγχου με Υπερήχους 50
5.2.1 Εισαγωγή 50
5.2.2 Φορητές Διατάξεις Ελέγχου 51

5.2.3 Αυτοματοποιημένες Διατάξεις Υπερήχων Εμβαπτιζόμενου Ελέγχου 52
5.3 Μέθοδοι Ελέγχου με Υπερήχους..... 53
5.4 Μέθοδοι Απεικόνισης Δεδομένων 57
5.5 Σύγκριση Μετάλλων και Σύνθετων Υλικών κατά τον Έλεγχο με Υπερήχους. 60
Κεφάλαιο 6: Πληροφορίες της Πειραματικής Διαδικασίας..... 61
6.1 Εισαγωγή 61
6.2 Κατασκευαστικές Πληροφορίες Δοκιμίων..... 65
6.3 Εξοπλισμός μη Καταστροφικού Ελέγχου 72
6.3.1 ULTRAPAC II..... 72
6.3.1.1 Ρύθμιση Βασικών Παραμέτρων..... 74
6.3.2 POCKET UT™..... 80
6.3.2.1 Ρύθμιση Βασικών Παραμέτρων..... 81
6.4 Προσδιορισμός της Ταχύτητας των Κυμάτων Υπερήχων στα Δοκίμια..... 84
Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα μη Καταστροφικού Ελέγχου 91
7.1 Δοκίμιο Α1 92
7.1.1 Έλεγχος με POCKET UT™ 92
7.1.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής..... 101
7.1.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan..... 108
7.2 Δοκίμιο Β1..... 108
7.2.1 Έλεγχος με POCKET UT™ 108
7.2.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής..... 118
7.2.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan..... 126
7.3 Δοκίμιο Β2..... 132
7.3.1 Έλεγχος με POCKET UT™ 133
7.3.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής..... 141
7.3.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan..... 149
7.4 Δοκίμια C1 και C2..... 155
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα-Προτεινόμενη Έρευνα..... 157
8.1 Δοκίμια Α1 158
8.2 Δοκίμιο Β1..... 159
8.3 Δοκίμιο Β2..... 159

8.4 Δοκίμια C1 και C2 160
8.5 Διαδικασία Ελέγχου με Άγνωστη τη Θέση των Ατελειών 161
8.6 Προτεινόμενη Έρευνα 162
Βιβλιογραφία 163

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κύριο Νικόλαο Τσούβαλη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω, επίσης, στον Αστρινό Παπαδάκη και την κυρία Χαρά Σαράφογλου, για τη σημαντική βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της ενασχόλησής μου με την παρούσα διπλωματική, καθώς επίσης και στα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου για τη συνεισφορά τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία MISTRAS HELLAS, η οποία μας παραχώρησε την συσκευή POCKET UT™ και συντέλεσε στην έγκαιρη και επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Γιώργο, τη μητέρα μου Μαρία και τα αδέλφια μου Μιχάλη και Γιάννη για τη συμπαράσταση τους όλα αυτά τα χρόνια και τη Μαριλένα για τη βοήθεια της στην παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 1: Σύνθετα Υλικά

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο σύνθετα, αναφερόμαστε στα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συνιστώντα υλικά, τα οποία έχουν μεταξύ τους σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Τα συστατικά αυτά, ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν μέσα στο σύνθετο υλικό, διακρίνονται στη μήτρα (matrix) και στην ενίσχυση (reinforcement).

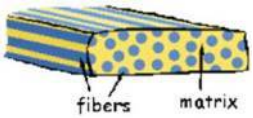
Σημαντικό στοιχείο του παραπάνω ορισμού είναι η μακροσκοπική παρατήρηση, δηλαδή, για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των συνθέτων, πρέπει μακροσκοπικά να αποτελείται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, τα οποία έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους. Αντίθετα, διαφορετικά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σε μικροσκοπική κλίμακα, αλλά το νέο υλικό είναι ομογενές, δηλαδή τα συστατικά μέρη του δεν μπορούν να διακριθούν με γυμνό μάτι. Τέτοια υλικά είναι τα κράματα.

Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές. Το μικρό βάρος, η υψηλή ειδική αντοχή, το υψηλό μέτρο ειδικής ελαστικότητας, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής, καθώς και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών που τα έχουν οδηγήσει στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για ένα μεγάλο πλήθος θαλάσσιων και αεροδιαστημικών εφαρμογών.

1.2 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών

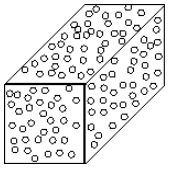
Τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατανεμηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: στα ινώδη σύνθετα υλικά, στα σύνθετα υλικά σωματιδίων και στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous Composite Materials) αποτελούνται από τη μήτρα (matrix) και τις ενισχυτικές ίνες (Σχήμα 1.1). Οι ίνες ενός άλλου υλικού κατανέμονται μέσα στη μήτρα είτε άτακτα, είτε με συγκεκριμένη πλέξη και προσανατολισμό. Ως ίνες, θεωρούνται εκείνες οι ενισχύσεις που έχουν τη μία τους διάσταση (μήκος) πολύ μεγαλύτερη από τις άλλες δύο.



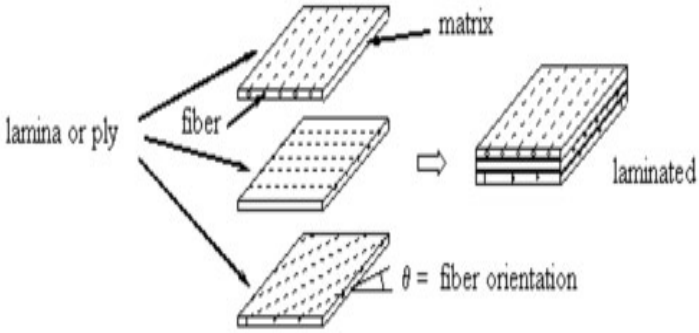
Σχήμα 1.1: Ινώδης Σύνθετο Υλικό

Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων (Particulate Composite Materials) αποτελούνται από σωματίδια ενός ή περισσότερων υλικών, τοποθετημένα μέσα στη μήτρα κατά άτακτο τρόπο (Σχήμα 1.2). Ως σωματίδια, θεωρούνται εκείνες οι ενισχύσεις που έχουν και τις τρεις διαστάσεις τους περίπου ίδιες, όπως τα σφαιρίδια, οι κοντές ράβδοι, ή οι νιφάδες.



Σχήμα 1.2: Σύνθετο Υλικό Σωματιδίων

Τέλος, τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (Laminated Composite Materials) αποτελούνται από στρώσεις δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών (ή και ενός, αλλά με διαφορετικούς προσανατολισμούς), οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, καθώς αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις ινωδών σύνθετων υλικών.



Σχήμα 1.3: Πολύστρωτο Σύνθετο Υλικό

1.3 Βασικά Δομικά Μέρη Σύνθετου Υλικού

1.3.1 Μήτρες

Όπως προαναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα και την ενίσχυση. Οι μήτρες στα σύγχρονα σύνθετα υλικά μπορεί να είναι οργανικές, μεταλλικές ή κεραμικές, όμως στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τις οργανικές μήτρες (ρητίνες). Αρχικά η μήτρα είναι σε υγρή μορφή, καταλήγει όμως στο τέλος της διαδικασίας του πολυμερισμού ως στερεό, με σκοπό να σταθεροποιεί, να υποστηρίζει και να προστατεύει τις ενισχύσεις. Επιπρόσθετα, εξασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων μεταξύ των ινών. Παράλληλα, εξασφαλίζει την ακεραιότητα του σύνθετου υλικού, όταν κάποιες ίνες αστοχήσουν, μεταφέροντας τα φορτία στις γειτονικές άθικτες ίνες μέσω διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη μήτρα.

Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, δηλαδή πολυμερή, τα οποία, όταν αναμειγνύονται με σκληρυντή ή/και καταλύτη, αντιδρούν μη αναστρέψιμα για να σχηματιστεί ένα σκληρό τελικό προϊόν. Όταν τελειώσει η διαδικασία πολυμερισμού και στερεοποίησης, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες δεν επανέρχονται στην υγρή τους κατάσταση, ακόμα και αν θερμανθούν, παρά το γεγονός ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες αλλάζουν σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πολυεστερικές, βινυλεστερικές, εποξικές και φαινολικές ρητίνες, οι οποίες θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

- Πολυεστερικές ρητίνες

Η αντίδραση μεταξύ μίας αλκοόλης και ενός οργανικού οξέως έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εστέρα και νερού. Ενώνοντας ειδικές αλκοόλες, όπως η γλυκόλη, μαζί με διβασικά οργανικά οξέα, και με την προσθήκη κατάλληλων μονομερών, σχηματίζεται ο πολυεστέρας. Με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιώντας δηλαδή διαφορετικά οξέα και αλκοόλες, δημιουργείται μία μεγάλη ποικιλία πολυεστέρων με διαφορετικές ιδιότητες.

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι πολυεστερικών ρητινών, οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους στη χημική τους σύσταση. Οι ορθοφθαλικοί πολυεστέρες είναι πιο φθηνοί και οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι στην κατασκευή μικρών σκαφών, ενώ οι ισοφθαλικοί είναι πιο ακριβοί, έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και αντοχή στο νερό και χρησιμοποιούνται συνήθως σε υψηλότερων απαιτήσεων ναυπηγικές κατασκευές.

Οι πολυεστερικές ρητίνες πολυμερίζονται από μόνες τους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα. Για να καθοριστεί ο πολυμερισμός τους μέσα σε σαφή χρονικά όρια προστίθενται και άλλα προϊόντα, όπως οι καταλύτες, οι επιταχυντές και οι αναστολείς. Ο χρόνος πολυμερισμού τους εξαρτάται από την ποσότητα του καταλύτη που προστίθεται και από την εξωτερική θερμοκρασία. Ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι από λίγα λεπτά μέχρι μερικές ώρες. Οι καταλύτες προστίθενται λίγο πριν τη χρήση της ρητίνης. Δε λαμβάνουν μέρος σε καμία αντίδραση, απλώς προκαλούν την έναρξη της διαδικασίας πολυμερισμού. Ο επιταχυντής

προστίθεται για να επιταχύνει τη διαδικασία πολυμερισμού και οι αναστολείς για να την επιβραδύνουν.

Ο πολυμερισμός είναι μια εξώθερμη αντίδραση, όπου το ποσό της θερμότητας που εκλύεται εξαρτάται από το πάχος του υλικού που κατασκευάζεται, το οποίο εάν είναι υπερβολικά μεγάλο, μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του υλικού, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας.

Τέλος, όσον αφορά στη χρησιμότητα τους, οι πολυεστερικές ρητίνες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες ρητίνες για ναυπηγική χρήση. Η μεγάλη εφαρμογή τους οφείλεται στο λογικό τους κόστος, στην ευκολία μορφοποίησης τους (hand lay up, spray up) και στην καλή συμπεριφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Χαρακτηριστικό παράδειγμα που επιβεβαιώνει την ευρεία εφαρμογή των πολυεστερικών ρητινών είναι ότι περίπου ενάμιση εκατομμύριο τόνοι του υλικού αυτού χρησιμοποιούνται ετησίως στις ΗΠΑ (SSC 2012).

- Βινυλεστερικές ρητίνες

Οι βινυλεστερικές ρητίνες παράγονται από τις εποξικές και μοιάζουν χημικά με αυτές, ενώ η διαδικασία σκλήρυνσής τους μοιάζει με εκείνη των πολυεστερικών, είναι δηλαδή εξώθερμη. Οι ρητίνες αυτές, συγκρινόμενες με τις ισοφθαλικές πολυεστερικές ρητίνες, παρουσιάζουν καλύτερη αντίσταση στο νερό και στα χημικά, καλύτερη διατήρηση της αντοχής και της δυσκαμψίας σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση και κόπωση. Αν και οι βινυλεστερικές ρητίνες χαρακτηρίζονται από σημαντικά πλεονεκτήματα, δε χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω του μεγάλου τους κόστους, συγκριτικά πάντα με τις πολυεστερικές.

- Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν μία πολύ μεγάλη κατηγορία ρητινών και παρουσιάζουν υψηλή απόδοση συγκριτικά με τις ρητίνες άλλων κατηγοριών. Οι εποξικές ρητίνες πλεονεκτούν έναντι των περισσότερων τύπων ρητίνης όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες και στην αντίσταση σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι αυξημένες κολλητικές τους ιδιότητες και η πολύ καλή αντίσταση τους στο νερό τις καθιστούν ιδανικές για ναυπηγικές χρήσεις. Χρησιμοποιούνται ως κύριο υλικό για σκάφη υψηλών απαιτήσεων, αλλά και ως εξωτερική επικάλυψη (gel coat), η οποία παρέχει μία ομαλή χρωματισμένη εξωτερική επιφάνεια στο σκάφος, αλλά και προστατεύει τις ακόλουθες στρώσεις ινών-ρητίνης από την άμεση επαφή τους με το νερό.

Οι εποξικές ρητίνες έχουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων. Η ρητίνη και οι ουσίες που την πολυμερίζουν (σκληρυντές) σχηματίζουν ένα σύστημα με χαμηλή ρευστότητα, το οποίο είναι εύκολο στη χρήση. Οι εποξικές ρητίνες πολυμερίζονται εύκολα και γρήγορα σε μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 150°C. Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των ρητινών αυτών είναι ότι παρουσιάζουν πολύ μικρή συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση και έτσι ελαχιστοποιούνται οι παραμένουσες εσωτερικές τάσεις στο υλικό.

Οι εποξικές ρητίνες παρουσιάζουν υψηλή κολλητική ικανότητα, υψηλές μηχανικές ιδιότητες, μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση και αντίσταση σε χημικά. Διαφέρουν από τις πολυεστερικές στο ότι, για να πολυμεριστούν, απαιτείται η προσθήκη σκληρυντή αντί για καταλύτη. Ο σκληρυντής είναι συνήθως μια αμίνη, η οποία συμμετέχει στον πολυμερισμό της ρητίνης, σε αντίθεση με τον καταλύτη.

Τέλος, οι εποξικές ρητίνες έχουν κόστος πολύ υψηλότερο από τους κοινούς ισοφθαλικούς πολυεστέρες, το οποίο μπορεί να γίνει έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο, για ειδικές εποξικές ρητίνες.

- Φαινολικές ρητίνες

Βασικό πλεονέκτημα των φαινολικών ρητινών είναι η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Η καλή αυτή συμπεριφορά τους οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (530°C σε σχέση με τους 370°C των πολυεστερικών). Η καλή συμπεριφορά τους σε συνθήκες φωτιάς ενισχύεται από τη χαμηλή ταχύτητα διάδοσης φλόγας και από τη χαμηλή εκπομπή καπνού. Οι ιδιότητες αυτές οδήγησαν σε αυξημένη χρήση των φαινολικών ρητινών σε πυράντοχες εσωτερικές φρακτές, σε καταστρώματα και σε στοιχεία επίπλωσης.

Κατά τον πολυμερισμό τους παράγεται υδρατμός και δημιουργούνται φυσαλίδες εντός του πολύστρωτου. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλή χημική έλξη προς το νερό, η οποία οδηγεί σε απορρόφηση νερού τρεις φορές περισσότερου από τους ισοφθαλικούς πολυεστέρες. Τα μειονεκτήματα αυτά δεν επιτρέπουν τη χρήση τους σε κατασκευές οι οποίες απαιτούν αντοχή και καλή συμπεριφορά σε θαλάσσιο περιβάλλον.

1.3.2 Ενισχυτικές Ίνες

Ο ρόλος των ενισχυτικών ινών είναι η αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του συστήματος της ρητίνης. Είναι ικανές να φέρουν μόνο εφελκυστικό φορτίο σε μορφή νήματος, μη εμποτισμένου με ρητίνη, και συνεισφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής, θλιπτικής, καμπτικής και διατμητικής δυσκαμψίας και αντοχής ενός ινώδους πολύστρωτου από σύνθετα υλικά. Η ενσωμάτωση των ινών, οι οποίες δρουν σα μικροσκοπικοί συγκρατητές των ρωγμών, μετατρέπει μια ψαθυρή ρητίνη σε ένα ανθεκτικό σύνθετο υλικό.

Οι ίνες χαρακτηρίζονται από την υψηλή τιμή του λόγου μήκους προς τη διάμετρο, καθώς και από το γεγονός ότι, η διάμετρός τους πλησιάζει σαν τιμή το μέγεθος των κρυστάλλων του υλικού των ινών. Με τον τρόπο αυτό, οι κρύσταλλοι προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Λόγω της διαμόρφωσης τους αυτής, οι ίνες περιέχουν πολύ λιγότερες ατέλειες. Έτσι, δικαιολογείται το γεγονός πως οι ίνες έχουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένες, όταν αυτό είναι σε οποιαδήποτε άλλη μορφή.

Η συνεισφορά των ενισχυτικών ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού καθορίζεται από τέσσερις βασικούς παράγοντες.

Οι παράγοντες αυτοί είναι:

• Μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών ινών
• Η επιφανειακή επίδραση μεταξύ ινών-ρητίνης
• Το ποσοστό των ενισχυτικών ινών στο σύνθετο υλικό
• Ο προσανατολισμός των ινών στο σύνθετο υλικό

Οι ενισχύσεις των πολύστρωτων που χρησιμοποιούνται στην ναυπηγική είναι στη συντριπτική τους πλειοψηφία ίνες γυαλιού. Περιορισμένη, αλλά συνεχώς αυξανόμενη, χρήση παρατηρείται και στις ίνες από άνθρακα και aramid σε ναυπηγικές κατασκευές υψηλών επιδόσεων.

- Ίνες Γυαλιού

Τα κύρια χαρακτηριστικά των ινών γυαλιού είναι η υψηλή αντοχή τους, η σχετικά χαμηλή δυσκαμψία τους και το χαμηλό κόστος τους. Ο τύπος Ε των ινών αυτών είναι, μακράν των άλλων, ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος ενίσχυσης στις ναυπηγικές εφαρμογές.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται μεμονωμένα η μία από την άλλη και μπορούν να ενωθούν πολλές μαζί δημιουργώντας νήματα (strands). Παράλληλα, μη στριμμένα μεταξύ τους νήματα, μπορούν να ενωθούν και να δημιουργήσουν πλεξίδες νημάτων (rovings). Οι πλεξίδες νημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είναι, στην πλειοψηφία, όμως, των εφαρμογών όπου υπάρχουν υψηλότερες απαιτήσεις αντοχής, οι πλεξίδες πλέκονται και δημιουργούν υαλοϋφάσματα με διάφορες μορφές πλέξης.

Τα υαλοϋφάσματα (Σχήμα 1.4) έχουν συνήθως επίπεδη ύφανση και ισοσταθμισμένη διαμόρφωση. Ισοσταθμισμένη διαμόρφωση σημαίνει ότι έχουν τον ίδιο αριθμό ινών στις δύο κάθετες διευθύνσεις (warp,fill). Μπορούν να κατασκευαστούν και μη ισοσταθμισμένα υφάσματα με οποιαδήποτε αναλογία ινών στις δύο κάθετες διευθύνσεις.

Σχήμα 1.4: Υαλοϋφασμα (Woven Roving)

Εκτός από πλεξίδες νημάτων, για την παραγωγή υφασμάτων πυκνής πλέξης (woven fabrics, clothes), μπορούν να χρησιμοποιηθούν και απλά νήματα, τα οποία έχουν υποστεί περιστροφή (yarns), είναι ελαφρύτερα από τα προηγούμενα και έχουν υψηλότερη αντοχή και κόστος.

Παράλληλα, υπάρχουν και μονοαξονικά υφάσματα (unidirectional rovings or clothes), στα οποία οι ίνες είναι παράλληλες και ο προσανατολισμός τους είναι προς μια διεύθυνση. Σε

αυτή την κατηγορία των υφασμάτων ανήκουν και τα πεπλεγμένα υφάσματα, τα οποία έχουν τρισδιάστατο σχήμα και διαθέτουν ενισχύσεις και κατά τη διεύθυνση του πάχους. Τέλος, διαφορετικός τύπος υφάσματος προκύπτει από νήματα γυαλιού τα οποία κόβονται σε μήκος 6-50mm και συνδέονται σε τυχαία διάταξη με ειδικό συνδετικό.Με τον τρόπο αυτό, σχηματίζεται το υαλοπίλημα, ένα χαλαρό ύφασμα με τυχαίο προσανατολισμό ινών (Σχήμα 1.5).

Σχήμα 1.5: Υαλοπίλημα (CSM)

- Ίνες άνθρακα και γραφίτη

Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη παράγονται με οξείδωση και θερμική πυρόλυση του πολυακρυλονιτριλίου, ενός πολυμερούς που βασίζεται στο ακρυλονιτρίλιο. Όπως όλα τα πολυμερή, τα μόρια του πολυακρυλονιτριλίου αποτελούνται από μακριές αλυσίδες, οι οποίες ευθυγραμμίζονται κατά τη διαδικασία παραγωγής και σχηματίζουν τις ίνες άνθρακα. Όταν θερμανθούν στις κατάλληλες συνθήκες, οι αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τα ανθρακονήματα, τα οποία έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα από 80-95%.

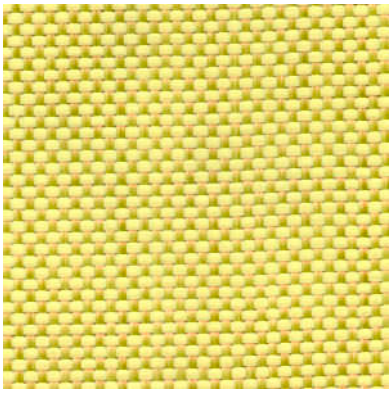
Η διαδικασία παραγωγής των ινών άνθρακα και γραφίτη είναι αρκετά ακριβή, οδηγώντας συνήθως σε δύο κύριους τύπους ινών: τις ίνες υψηλής αντοχής, οι οποίες χρησιμοποιούνται περισσότερο, και τις ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας, οι οποίες είναι ακριβότερες από τις πρώτες. Το μεγάλο κόστος των ινών άνθρακα περιορίζει τη χρήση τους μόνο σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, στις οποίες δικαιολογείται το υψηλό κόστος. Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται μόνο σε ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην κατασκευή ταχύπλοων υδροπτέρυγων και σε υψηλών απαιτήσεων υποβρύχια οχήματα, καθώς εκεί απαιτείται μεγάλη αντοχή σε λυγισμό.

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται, όπως και οι ίνες γυαλιού, σε διάφορες μορφές. Συγκεκριμένα, διατίθενται σε υφάσματα (Σχήμα 1.6) με διάφορους τρόπους πλέξης, σε μονοδιευθύνοντα υφάσματα, σε προεμποτισμένα υφάσματα (prepregs) και σε λωρίδες.

Σχήμα 1.6 : Ύφασμα από ανθρακονήματα

- Ίνες aramid

Οι ίνες aramid ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερών ινών και κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1964 από την εταιρία DuPont. Στο εμπόριο διατίθενται με την ονομασία Kevlar. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ινών aramid είναι η πολύ υψηλή ειδική αντοχή τους σε εφελκυσμό και διάτμηση, αλλά και το μικρό ειδικό τους βάρος. Έχουν, όμως, χαμηλή αντοχή σε κάμψη και σε θλίψη, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για χρήση σε κατασκευές που υπόκεινται σε θλιπτικά ή καμπτικά φορτία. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ο υψηλός συντελεστής απόσβεσης σε κραδασμούς, που οφείλεται στη δομή των ινών, και ο οποίος τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε δυναμικά φορτιζόμενες κατασκευές. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες ινών aramid: το Kevlar, το Kevlar 29 και το Kevlar 49. Το Kevlar χρησιμοποιείται ως ενίσχυση ελαστικών και το Kevlar 29 στην κατασκευή καλωδίων και σχοινιών, καθώς και στην αντιβαλλιστική θωράκιση. Το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από τις ίνες γυαλιού και από τις ίνες άνθρακα.



Σχήμα 1.7: Ύφασμα από ίνες aramid

1.4 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών στη Ναυπηγική

Η πρώτη σοβαρή απόπειρα χρήσης των ινωδών σύνθετων υλικών για την κατασκευή μικρών σκαφών έγινε από το Ναυτικό των ΗΠΑ στην αρχή της δεκαετίας του 1940, με περιορισμένη επιτυχία. Η ανάπτυξη, στην αρχή της δεκαετίας 1950, της μεθόδου επίστρωσης με το χέρι οδήγησε σε γρήγορη ανάπτυξη της βιομηχανίας κατασκευής μικρών σκαφών, με αποτέλεσμα σήμερα να έχουμε σχεδόν πλήρη αντικατάσταση του παραδοσιακού

κατασκευαστικού υλικού, δηλαδή του ξύλου, για την κατασκευή μεγάλου εύρους τύπων μικρών σκαφών.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης σύνθετων υλικών στη ναυπηγική είναι η χρήση τους για δημιουργία γαστρών μικρών σκαφών όπως κανό, μικρά ταχύπλοα, σκάφη αναψυχής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8, λάντζες και σωσίβιες λέμβοι. Επιπλέον, μία εξίσου σημαντική εφαρμογή των ινωδών σύνθετων υλικών είναι στα πολεμικά σκάφη και κυρίως στα σκάφη ναρκοπολέμου, τυπικό παράδειγμα των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9. Τα σύνθετα υλικά, λόγω του μη μαγνητικού τους χαρακτήρα, χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σκαφών χαμηλής μαγνητικής υπογραφής, ώστε να αποφεύγεται η ενεργοποίηση των μαγνητικών ναρκών.

Σχήμα 1.8: Τυπικό σκάφος αναψυχής με γάστρα από GFRP

Σχήμα 1.9: Πολεμικό ναρκαλιευτικό του νορβηγικού πολεμικού ναυτικού

Πέρα από την εφαρμογή των σύνθετων υλικών στα μικρά σκάφη, ινώδη σύνθετα υλικά εμφανίζονται και σε διάφορα τμήματα πλοίων μεγάλων διαστάσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σετ καμινάδων των κρουαζιερόπλοιων "Costa Classica " και "Costa Romantika" 50,000 κόρων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10 **(**IFREMER 1992).

Σχήμα 1.10: Σετ καμινάδων "Costa Romantica"

Επιπρόσθετο παράδειγμα είναι η χρήση GFRP για την κατασκευή υπερκατασκευών, αποφεύγοντας έτσι αποτελεσματικά την ανεπιθύμητη αλληλεπίδραση γάστρας-υπερκατασκευής. Σύνθετα υλικά συναντάμε στις δεξαμενές ποντοπόρων πλοίων τύπου LNG καθώς και στις διάφορες σωληνώσεις των πλοίων.

Τα σύνθετα υλικά προσφέρουν την προοπτική της μείωσης του βάρους, της αντοχής σε φωτιά και της χαμηλής συντήρησης. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση τους, όπως είναι φανερό από τα λίγα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν, είναι ευρεία και αναμένεται να γίνει ακόμα εντονότερη σε μελλοντικές εφαρμογές.

1.5 Ατέλειες στις Ναυπηγικές Κατασκευές από Σύνθετα Υλικά

Όπως παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, τα σύνθετα υλικά έχουν βρεθεί στην πρώτη θέση μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται σε διάφορες θαλάσσιες κατασκευές. Μία βασική πτυχή για το σχεδιασμό αυτών των κατασκευών είναι να είμαστε σε θέση να επωφεληθούμε πλήρως από τις ιδιότητες τους, καταλήγοντας πάντα σε μία ελαφρότερη και οικονομικά χαμηλή κατασκευή. Μία σημαντική παράμετρος, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη αυτού του σκοπού, είναι οι σχεδιαστές να είναι σε θέση να γνωρίζουν τα χαρακτηριστικά των ατελειών και των βλαβών που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά, καθώς επίσης και τον τρόπο που αυτές συνδέονται με τους μηχανισμούς αστοχίας, καταλήγοντας σε αξιόπιστες και ακέραιες κατασκευές.

Ως ατέλεια, ορίζεται οποιαδήποτε απόκλιση από την προκαθορισμένη γεωμετρία, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μίας κατασκευής και γενικότερα, οτιδήποτε υποβαθμίζει την ποιότητα ενός σύνθετου υλικού. Οι κατασκευαστικές ατέλειες είναι οι ατέλειες που έχουν προκύψει κατά την κατασκευαστική διαδικασία (Hayman,Beggreen & Tsouvalis 2007). Οι ατέλειες αυτές δημιουργούνται ή εισάγονται ηθελημένα ή αθέλητα και η παρουσία τους (αριθμός ατελειών, μέγεθος κάθε ατέλειας) στο σύνθετο υλικό παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς καθορίζει την αντοχή του και συνδέεται με τους μηχανισμούς αστοχίας.

Ως βλάβη, ορίζεται οποιαδήποτε απόκλιση από την προκαθορισμένη γεωμετρία ή τις φυσικές ιδιότητες μίας κατασκευής και δημιουργείται από μηχανική, θερμική ή άλλη καταπόνηση (Hayman,Beggreen & Tsouvalis 2007). Η βλάβη σε ένα σύνθετο υλικό έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή της εσωτερικής δομής του, κάτι που εκδηλώνεται με τη μορφή ρωγματώσεων στη ρητίνη, με την αποκόλληση ινών ρητίνης, με τη θραύση των ινών και με την αποκόλληση των στρώσεων. Βλάβη μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια της χρήσης ή κατά το στάδιο της παραγωγής.

Οι τρεις βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι ατέλειες σύμφωνα με τον Astrom (1997) είναι:

- Ατέλειες στη δομή του σύνθετου υλικού, οι οποίες επηρεάζουν την ικανότητα μεταφοράς φορτίου. Οι ατέλειες αυτές είναι ο πιο ανεπιθύμητος τύπος.
- Γεωμετρικές ατέλειες, για παράδειγμα αποκλίσεις από συγκεκριμένο πάχος, κυματοειδείς επιφάνειες, κακή επιπεδότητα. Οι ατέλειες αυτές μειώνουν την ικανότητα

μεταφοράς φορτίου και για το λόγο αυτό πιθανότατα να μπορούσαν να συμπεριληφθούν στις ατέλειες στη δομή του υλικού.

- Αισθητικές ατέλειες, οι οποίες επηρεάζουν την εξωτερική εμφάνιση μίας κατασκευής, αλλά που δεν επηρεάζουν τη λειτουργία της.

Οι κυριότερες ατέλειες που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα σύνθετο μίας στρώσης, σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό ή σε ένα υλικό τύπου sandwich και ανήκουν κυρίως στις δύο πρώτες κατηγορίες είναι :

- **Φυσαλίδες αέρα εγκλωβισμένες στη μήτρα (voids)**

Όλα τα σύνθετα υλικά, ανεξάρτητα από τα συστατικά και τη μέθοδο κατασκευής τους, περιέχουν στο εσωτερικό τους μικροσκοπικά κενά (Σχήμα 1.11). Εμφανίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια του "curing", δηλαδή της διαδικασίας πολυμερισμού του υλικού κατά την παραγωγή του. Συνήθως οφείλονται σε εγκλωβισμένο αέρα, ο οποίος συνυπάρχει με το υλικό μας όσο αυτό κατασκευάζεται. Το μέγεθος τους, μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να επηρεάσει σημαντικά τη δομή του υλικού. Μεγάλο ενδιαφέρον έχουν οι περιπτώσεις στις οποίες τα κενά αυτά έχουν επίπεδη μορφή και μεγάλο μέγεθος και εμφανίζονται στις διεπιφάνειες των στρώσεων ενός πολύστρωτου συνθέτου. Τότε, τα "voids" οδηγούν στο φαινόμενο της αποκόλλησης των στρώσεων, γνωστό ως delamination, το οποίο αποτελεί σημαντική βλάβη του υλικού, και θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια. Η παρουσία των φυσαλίδων μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες ενός πολύστρωτου, καθώς η παρουσία τους δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων και οι ίδιες οι φυσαλίδες λειτουργούν ως σημεία έναρξης ρωγμών. Αποδεκτό ποσοστό περιεκτικότητας σε φυσαλίδες σε ένα σύνθετο υλικό είναι από 1-5%.

Σχήμα 1.11: Φυσαλίδες αέρα (SSC-463, 2012)

- **Πτυχώσεις των στρώσεων (wrinkles)**

Οι πτυχώσεις είναι κατασκευαστικές ατέλειες, οι οποίες μπορούν να δημιουργηθούν, τόσο σε πολύστρωτες κατασκευές, όσο και σε κατασκευές sandwich. Συνήθως δημιουργούνται από στρώσεις οι οποίες έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις από την επιφάνεια όπου τοποθετούνται, με αποτέλεσμα το τσάκισμα της επιφάνειας της στρώσης και τη δημιουργία πτύχωσης. Στις ναυπηγικές κατασκευές οι ρυτίδες εμφανίζονται κυρίως στα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα σύνθετα υλικά, σε μεγάλης κλίμακας παραγωγικές διαδικασίες. Ανάλογα με το βάρος και την

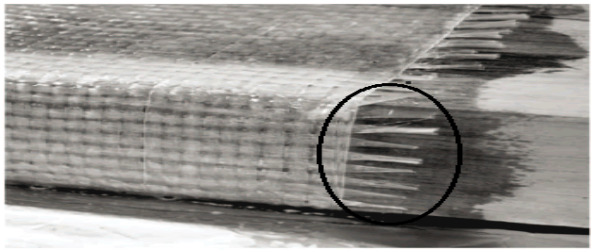
ύφανση των στρώσεων, η πτύχωση, όταν δημιουργηθεί, μπορεί να επηρεάσει γειτονικές στρώσεις, αλλά, και σε ορισμένες περιπτώσεις, όλο το πάχος του σύνθετου υλικού. Οι πτυχώσεις είναι ικανές να ελαττώσουν σημαντικά την αντοχή ενός πολύστρωτου, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που επηρεάζουν. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση σύνθετου υλικού μίας και μονό στρώσης, η μείωση της αντοχής είναι τόσο σημαντική που απαιτεί άμεση επισκευή του ελαττώματος (Hayman, Beggreen & Tsouvalis 2007).

Σχήμα 1.8: Πτύχωση σε κατασκευή sandwich που επηρεάζει μία αλλά και περισσότερες στρώσεις

- **Ατέλειες-ελαττώματα ενισχυτικών ινών (fiber reinforcement defects)**

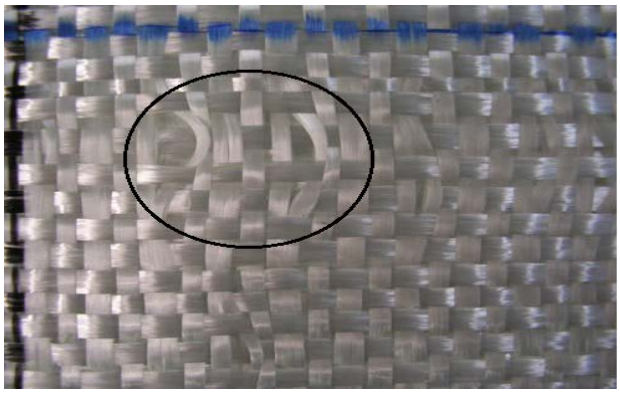
Χαρακτηριστικό των υφασμάτων, στα περισσότερα είδη ενίσχυσης, είναι η μεγάλη ευαισθησία τους, η οποία οδηγεί στην εύκολη εμφάνιση ελαττωμάτων κατά την επεξεργασία τους.

Αναλυτικότερα, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα υφάσματα πρέπει να κοπούν σε συγκεκριμένες διαστάσεις, κάτι που οδηγεί σε ξέφτισμα των νημάτων στις άκρες. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται εντονότερα στα woven roving υφάσματα και οδηγεί σε μεταβλητά πάχη και μείωση της αντοχής στις ακμές της κατασκευής.



Σχήμα 1.12: Ξέφτισμα ινών σε ύφασμα woven roving

Επίσης, κατά τη διαδιακασία κοπής, μεταφοράς και γενικότερα επεξεργασίας, η επαφή των υφασμάτων με αιχμηρά αντικείμενα ή αιχμηρές επιφάνειες, προκαλεί διαταραχή της πλέξης, η οποία μπορεί να έχει τη μορφή της καταστροφής των ινών ή την απόκλιση των νημάτων από την προκαθορισμένη διεύθυνση τους (Σχήμα 1.13), με άμεσο αποτέλεσμα την εισαγωγή ελαττωμάτων στην πολύστρωτη κατασκευή, που μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή της.

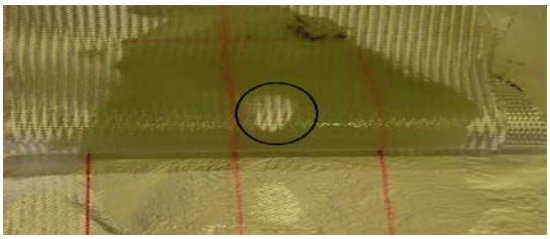


Σχήμα 1.13: Διαταραχή πλέξης από επαφή με αιχμηρό αντικείμενο

Τέλος, στην κατηγορία αυτών των ελαττωμάτων μπορεί να συμπεριληφθεί και η απόκλιση από την ενδεικνυόμενη περιεκτικότητα των ενισχυτικών ινών, επηρεάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου (Hayman, Beggreen & Tsouvalis 2007).

- **Ξερές ζώνες (Dry zones-spots)**

Είναι περιοχές του πολύστρωτου, όπου οι ενισχυτικές στρώσεις δεν έχουν εμποτιστεί πλήρως με ρητίνη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.14. Στην τεχνική όπου ο εμποτισμός των ενισχυτικών στρώσεων πραγματοποιείται με το χέρι (hand lay-up) εμφανίζονται ξερές ζώνες, κυρίως λόγω χρήσης ρητινών χαμηλού ιξώδους για τον εμποτισμό μεγάλων κάθετων επιφανειών. Τότε, οι ρητίνες ρέουν με αποτέλεσμα το μη πλήρη εμποτισμό των ενισχυτικών στρώσεων. Η παραπάνω ατέλεια μπορεί να σχηματιστεί και από άλλες αιτίες, οι οποίες προκαλούνται από τον κακό σχεδιασμό της μεθόδου κατασκευής. Για παράδειγμα, υψηλοί ρυθμοί έγχυσης–αναρρόφησης, ρητίνες με μεγάλη ρευστότητα, πρόωρος πολυμερισμός της ρητίνης και κακή τοποθέτηση των γραμμών έγχυσης-αναρρόφησης και παροχής της ρητίνης, αποτελούν τις συχνότερες αιτίες εμφάνισης της ατέλειας αυτής.



Σχήμα 1.14: Εμφάνιση dry zone σε σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού

- **Γεωμετρικές ατέλειες**

Οι γεωμετρικές ατέλειες έχουν να κάνουν με τις αποκλίσεις από το προκαθορισμένο σχήμα, μιας πολύστρωτης κατασκευής. Οι αποκλίσεις αυτές εμφανίζονται μετά το τέλος της κατασκευαστικής διαδικασίας και οι πιο συνηθισμένες μορφές τους είναι η μεταβολή του πάχους του πολύστρωτου, τοπικά ή σε όλη την έκταση του, η στρέβλωση και οι κυματοειδείς επιφάνειες. Η μεταβολή του πάχους, ως ατέλεια, μπορεί να προκληθεί από διάφορες αιτίες,

όπως είναι οι περιοχές με μειωμένη ή αυξημένη περιεκτικότητα σε ρητίνη και οι επικαλύψεις των ενισχυτικών στρώσεων. Οι στρεβλώσεις και οι κυματοειδείς επιφάνειες οφείλονται στις θερμικές τάσεις, που αναπτύσσονται κατά τη στερεοποίηση και συρρίκνωση της ρητίνης. Οι ατέλειες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας της σύνθετης κατασκευής να αναλαμβάνει φορτία και ιδιαίτερα στην περίπτωση των πλακών, είναι πιθανόν να προκληθεί αστοχία από λυγισμό, όταν αυτές υποβάλλονται σε επίπεδη θλίψη ή διάτμηση. Επιπροσθέτως, οι γεωμετρικές ατέλειες προκαλούν προβλήματα συμβατότητας, όταν η σύνθετη κατασκευή πρέπει να συναρμολογηθεί ως τμήμα ενός μεγαλύτερου συνόλου. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι οι γεωμετρικές ατέλειες είναι πρακτικά αδύνατον να εξαλειφθούν, μπορεί όμως να μειωθεί ο αντίκτυπος της ύπαρξη τους, εάν είναι γνωστά τα αίτια δημιουργίας τους, ώστε να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό μίας σύνθετης κατασκευής.

- **Αποκολλήσεις στρώσεων (delaminations)**

Η αποκόλληση των στρώσεων είναι ο αποχωρισμός των στρώσεων ενός πολύστρωτου σύνθετου υλικού, λόγω της αστοχίας του εσωτερικού δεσμού μεταξύ της ρητίνης και των ενισχυτικών υφασμάτων ανάμεσα στις στρώσεις. Μπορεί να λάβει χώρα, είτε κατά την κατασκευαστική διαδικασία, είτε κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μίας πολύστρωτης κατασκευής.

Κατά την κατασκευαστική διαδικασία, η ατέλεια αυτή μπορεί να προκληθεί σε στρώσεις που έχουν προσβληθεί από σκόνη, υγρασία ή ακαθαρσίες και εμποδίζεται ο δεσμός μεταξύ ρητίνης και ενισχυτικών ινών. Ένας ακόμα παράγοντας, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει την αποκόλληση των στρώσεων, είναι η συρρίκνωση της ρητίνης κατά τον πολυμερισμό της. Κατά τη συρρίκνωση της ρητίνης δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρορωγμών. Καθώς η συρρίκνωσή της συνεχίζεται, έχουμε συνένωση των μικρορωγμών και δημιουργία περιοχών αποκόλλησης των στρώσεων. Το ποσοστό της συρρίκνωσης, και κατ' επέκταση η πιθανότητα για την εκδήλωση της συγκεκριμένης ατέλειας, εξαρτώνται από το είδος της ρητίνης. Για παράδειγμα, οι πολυεστερικές ρητίνες συρρικνώνονται περισσότερο από τις εποξικές. Η σοβαρότητα της ατέλειας αυτής εξαρτάται από το μέγεθός και τη θέση της ως προς το πάχος της πολύστρωτης κατασκευής.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, η πολύστρωτη κατασκευή δέχεται δυναμικά και στατικά φορτία. Κατά την επιβολή αυτών των φορτίων έχουμε ανάπτυξη των διαστρωματικών τάσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχών αποκόλλησης μεταξύ των στρώσεων. Εντονότερο είναι το φαινόμενο της αποκόλλησης όταν έχουμε επιβολή φορτίων σε περιοχές της κατασκευής στις οποίες υπάρχει μεταβολή της γεωμετρίας, για παράδειγμα στις γάστρες των πλοίων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.15 (SSC 2012).

Επιπλέον, αποκολλήσεις στρώσεων μπορούν να δημιουργηθούν και από κατεργασίες σε έτοιμες πολύστρωτες κατασκευές, όπως με την κοπή ή με τη δημιουργία οπών.

Σχήμα 1.15: Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποχώρησης στρώσεων στη γάστρα σκαφών λόγω επιβολής φορτίων

Συνοψίζοντας, πρέπει να τονιστεί ότι οι αποκολλήσεις των στρώσεων συνδέονται με την ύπαρξη και άλλων κατασκευαστικών ατελειών και είναι ίσως ο πιο σημαντικός τύπος ατέλειας-βλάβης, που παρουσιάζεται στις θαλάσσιες κατασκευές από σύνθετα υλικά.

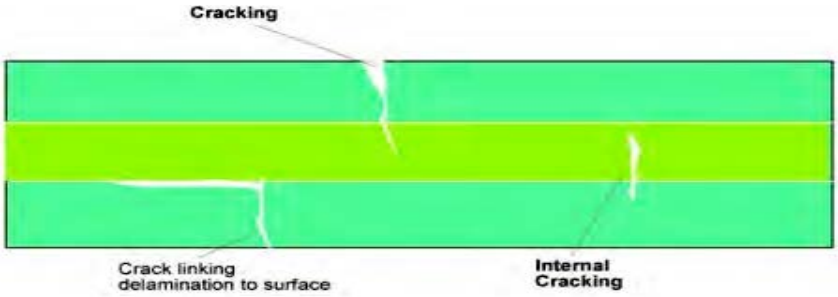
Πέρα από την αποχώρηση των στρώσεων κατά τη λειτουργία των σύνθετων υλικών, υπάρχουν και άλλες εξίσου σημαντικές βλάβες, οι οποίες επηρεάζουν της μηχανικές ιδιότητες των υλικών, και κατ' επέκταση την ακεραιότητα όλης της θαλάσσιας κατασκευής, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι:

- **Εμφάνιση και ανάπτυξη ρωγμών**

Η δημιουργία ρωγμών (Σχήμα 1.16) σε ένα σύνθετο υλικό κατά το στάδιο παραγωγής του, οφείλεται στην ύπαρξη και άλλων ατελειών, όπως οι φυσαλίδες αέρα, ή λόγω παραμενουσών τάσεων που προκύπτουν κατά την πραγματοποίηση των εξώθερμων χημικών αντιδράσεων (SSC 2012).

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των σύνθετων υλικών μπορεί να προκύψει δημιουργία νέων ρωγμών, αλλά και επέκταση των ήδη υπαρχόντων. Η εμφάνιση ρωγμών είναι αποτέλεσμα της εντατικής κατάστασης και του περιβάλλοντος. Μέσω των ρωγμών δεν μπορούν να μεταβιβαστούν τάσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση την μηχανικής αντοχής του συνθέτου. Η δημιουργία και η διάδοσή τους επιταχύνεται από την παρουσία υψηλών θερμοκρασιών, υπεριώδους ακτινοβολίας και χημικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με υψηλές τάσεις και παραμορφώσεις.

Η εμφάνιση και η έκταση των ρωγμών επηρεάζεται άμεσα, τόσο από το είδος των φορτίων, όσο και από τη διεύθυνσή τους ως προς την διεύθυνση των ενισχυτικών ινών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ρηγμάτωση της μήτρας, η οποία είναι ένας τρόπος αστοχίας των σύνθετων υλικών κατά την επιβολή εναλλασσόμενων φορτίων. Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας γίνεται φανερός από μία υπόλευκη απόχρωση της ρητίνης.



Σχήμα 1.16: Σχηματική αναπαράσταση εμφάνισης ρωγμών σε στρώση από σύνθετο υλικό

- **Αστοχία-απουσία δεσμών**

Με τον όρο αστοχία δεσμών αναφερόμαστε, είτε στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα, είτε στην αποκόλληση μεταξύ δύο στρώσεων στην περίπτωση πολύστρωτου σύνθετου υλικού (delamination, που ήδη έχει αναπτυχθεί), είτε στην αποχωρισμό περιβλήματος και πυρήνα σε κατασκευές sandwich.

Για την πρώτη περίπτωση, η αστοχία του δεσμού μεταξύ ίνας και ρητίνης αποτελεί μηχανισμό αστοχίας των σύνθετων υλικών κατά την επιβολή μηχανικών φορτίσεων και επηρεάζει έντονα τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αστοχία σύνθετων υλικών σε κόπωση, στην οποία προκύπτει αρχικά αποκόλληση των ινών από τη μήτρα, ακολουθούμενη από ρηγμάτωση της μήτρας.

Όσον αφορά τις κατασκευές τύπου sandwich, η απουσία δεσμών είναι ένα από τα σημαντικότερα σφάλματα. Η αστοχία του δεσμού (debond), που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.17, μπορεί να εμφανιστεί κατά την παραγωγική διαδικασία, αν το στρώμα κόλλας που χρησιμοποιείται για την ένωση του περιβλήματος (skin) με τον πυρήνα (core) είναι ελλιπής τμηματικά, ή αν οι επιφάνειες προς ένωση δεν έχουν προετοιμαστεί κατάλληλα. Είναι δύσκολο να εντοπιστεί με οπτική επιθεώρηση, καθώς δεν προκαλεί διαταραχή του περιβλήματος. Αποκόλληση μπορεί να εμφανιστεί και κατά τη χρήση των υλικών αυτών και οφείλεται κυρίως στην επιβολή μηχανικών φορτίσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό στο οποίο, κατά την κάμψη των πλακών τύπου sandwich, αναπτύσσεται μία μεγάλη διατμητική δύναμη ολίσθησης στο δεσμό μεταξύ skin και core, με αποτέλεσμα, αν ο δεσμός αστοχήσει, τα περιβλήματα να δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους, μειώνοντας έτσι την ικανότητα παραλαβής φορτίου.

Σχήμα 1.17: Σχηματική αναπαράσταση debond

- **Διείσδυση υγρασίας στο υλικό**

Η επίδραση της υγρασίας στα σύνθετα υλικά είναι πολύ έντονη, ειδικά, όπως προαναφέρθηκε, όταν συνδυάζεται με υψηλές θερμοκρασίες. Η υγρασία διαχέεται μέσα στη μήτρα των σύνθετων υλικών και ο βαθμός στον οποίο αυτό συμβαίνει εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Η είσοδος της υγρασίας επηρεάζει τις θερμομηχανικές της ιδιότητες και προκαλεί τη χημική της υποβάθμιση. Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να υπολογισθεί ο βαθμός και ο ρυθμός εισόδου της υγρασίας, καθώς αυτό μπορεί να καθορίσει τη διάρκεια ζωής του συνθέτου.

Επίσης, η υγρασία μειώνει τις ιδιότητες του υλικού σε διάτμηση και σε αξονική φόρτιση. Ακόμα, προκαλεί ένα είδος «φουσκώματος» στο εσωτερικό του υλικού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην έντονη ανάπτυξη τοπικών εσωτερικών τάσεων.

Παρ' όλα τα παραπάνω, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η υγρασία δρα θετικά σε ένα σύνθετο υλικό, όπως στην περίπτωση που ένα σύνθετο έχει στο εσωτερικό του κενά (voids). Τότε, η υγρασία που θα εισχωρήσει στο υλικό, θα αποθηκευτεί αρχικά στις θέσεις των voids, βελτιώνοντας τις τοπικές συνθήκες συνέχειας. Έτσι, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ασυνέχειας που προκαλούν τα κενά, και πλέον αυτά δρουν ως περιορισμοί στις τοπικές μετατοπίσεις.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι παραπάνω έγινε αναφορά στις ατέλειες και στις βλάβες εκείνες, των οποίων η ύπαρξη ή η έκταση δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή με οπτική επιθεώρηση της κατασκευής, αλλά απαιτείται η χρήση μη καταστροφικών μεθόδων εξέτασης και συγκεκριμένα υπερηχητικού ελέγχου.

Κεφάλαιο 2: Μη Καταστροφικός Έλεγχος

2.1 Εισαγωγή

Όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενη ενότητα σήμερα συναντάμε σύνθετα υλικά σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στους κατασκευαστές για ελαφρύτερες και ανθεκτικότερες στην διάβρωση κατασκευές. Η ανάπτυξη της χρήσης αυτών των υλικών δημιούργησε υψηλές απαιτήσεις ποιοτικού ελέγχου. Οι απαιτήσεις για αξιόπιστες κατασκευές επέφεραν νέες εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας και στην επιστήμη των υλικών με στόχο καλύτερες και λεπτομερέστερες διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου.

Για τον ποιοτικό έλεγχο μιας κατασκευής είναι γνωστές δύο μέθοδοι, οι καταστροφικοί έλεγχοι (Destructive Testing- DT) και οι μη καταστροφικοί έλεγχοι (Non- Destructive Testing-NDT).

Ο μη καταστροφικός έλεγχος ορίζεται ως η εφαρμογή διαφόρων μεθόδων εξέτασης, για τον έλεγχο υλικών ή συστημάτων, χωρίς να αλλοιώνεται ή να επηρεάζεται η μελλοντική τους χρησιμότητα. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται δεν αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά των υλικών, ούτε επηρεάζουν τις φυσικές ή τις μηχανικές τους ιδιότητες και οι περισσότερες από αυτές είναι ακίνδυνες για τον άνθρωπο. Μπορούν να εφαρμοστούν και σε κατασκευές που βρίσκονται σε λειτουργία, γι’ αυτό ο μη καταστροφικός έλεγχος έχει ιδιαίτερη αξία σε κατασκευές υψηλού κινδύνου (αεροπλάνα, πυρηνικοί αντιδραστήρες, δεξαμενές καυσίμων, πλοία). Με τη βοήθειά του, αποφασίζεται η ακεραιότητα υλικών, συστημάτων, και κατασκευών.

Καίριας σημασίας είναι η συμβολή του μη καταστροφικού ελέγχου στην ασφάλεια των κατασκευών. Σήμερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η χρήση τους δεν περιορίζεται απλά στον εντοπισμό των ελαττωμάτων-βλαβών, αλλά έχουν την ικανότητα να παρέχουν ποσοτικοποιημένες μετρήσεις. Μπορεί, δηλαδή, όχι μόνο να εντοπίσει τα ελαττώματα, αλλά και να μετρήσει το μέγεθος τους, να εντοπίσει τη θέση τους και να προσδιορίσει το σχήμα τους. Συνεπώς, με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων, μια αστοχία μπορεί να προβλεφθεί χωρίς να προκαλέσει καταστροφικά αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να αποφευχθούν οι περιβαλλοντικές καταστροφές, οι απώλειες ζωών και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος που μπορεί να επιφέρει μια αστοχία υλικού σε μια κατασκευή.

Οι μη καταστροφικοί έλεγχοι είναι αρκετά αξιόπιστοι, γίνονται στον τόπο λειτουργίας της κατασκευής, είναι γρήγοροι και δεν απαιτούν την καταστροφή της κατασκευής, χρησιμοποιούνται, και για τους λόγους αυτού χρησιμοποιούνται κόρον για τον έλεγχο σύνθετων κατασκευών στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Για τους λόγους αυτούς σήμερα η ανάγκη για σύγχρονες έρευνες και αξιολογήσεις για εφαρμογή των μη καταστροφικών ελέγχων σε θαλάσσιες κατασκευές είναι μεγάλη.

2.2 Μέθοδοι μη Καταστροφικού Έλεγχου

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί αρκετοί μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου. Για να γίνει η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένο το πρόβλημα και να υπάρχει η γνώση των βασικών αρχών λειτουργίας κάθε μεθόδου, δεδομένου ότι δεν έχουν όλες οι μέθοδοι την ικανότητα να ανιχνεύουν όλους τους τύπους ατελειών-βλαβών, ώστε να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές της. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στις ευρύτερα χρησιμοποιημένες μεθόδους στον έλεγχο των υλικών, για την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας κάθε μεθόδου.

- **Οπτική επιθεώρηση (visual inspection)**

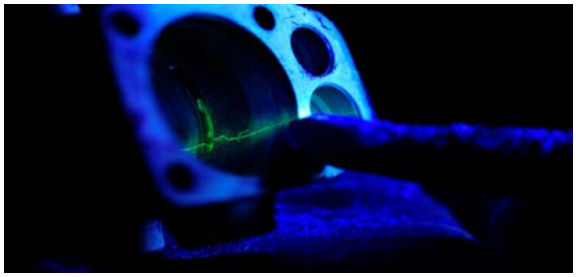
Η οπτική επιθεώρηση είναι η πιο κοινή μορφή ελέγχου δομικών συστημάτων από σύνθετα και άλλα υλικά. Είναι η μη καταστροφική μέθοδος που παρέχει τα μέσα για τον έλεγχο επιφανειακών ατελειών, όπως είναι η διάβρωση, οι ρωγμές και άλλες επιφανειακές ασυνέχειες. Μπορεί να γίνει με γυμνό οφθαλμό ή με τη χρήση μεγάλης ποικιλίας οπτικού εξοπλισμού και κάποια από τα βασικά ελαττώματα σύνθετου υλικού που μπορούν να ανιχνευτούν με την μέθοδο αυτή είναι εμφανείς παραμορφώσεις κατά το πάχος, η κακή διαβροχή των ινών, φυσαλίδες αέρα και επιφανειακές ρωγμές που για τον εντοπισμό τους ο οπτικός έλεγχος είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος (SSC 2012). Μεγάλη συνεισφορά στο μη καταστροφικό έλεγχο δυσπρόσιτων σημείων στο εσωτερικό κατασκευών (εσωτερικό κινητήρων) είναι η χρήση εύκαμπτων (fiber scopes) και άκαμπτων (boroscopes) ενδοσκοπίων. Τα ενδοσκόπια είναι συσκευές που χρησιμοποιούν σύστημα οπτικών ινών για την μεταβίβαση της εικόνας από το αντικείμενο που εξετάζεται στο προσοφθάλμιο σύστημα (Χασίωτης 2012).

Σχήμα 2.1: α) Οπτική επιθεώρηση με τη χρήση ενδοσκοπίου και β) Εικόνες από ενδοσκόπιο

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι η οπτική επιθεώρηση συνοδεύεται κατά τον έλεγχο μιας δομής με κάποια άλλη πιο εξελιγμένη τεχνολογικά μορφή μη καταστροφικού ελέγχου για την τελική εξαγωγή των συμπερασμάτων. Το γεγονός αυτό έγκειται αφενός στο ότι η μέθοδος περιορίζεται σε εξωτερικούς ή επιφανειακούς ελέγχους και αφετέρου στο ότι η αξιοπιστία των συμπερασμάτων που προκύπτουν κατά τον έλεγχο βασίζεται στην οπτική οξυδέρκεια του ελεγκτή-παρατηρητή.

- **Η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών (liquid penetrant inspection)**

Η μέθοδος αύτη βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων υγρών να εισέρχονται σε χαραμάδες ή ρωγμές και να παραμένουν εκεί ακόμα και όταν η επιφάνεια του υλικού καθαριστεί από αυτά τα υγρά. Κατά την εκτέλεση της μεθόδου η επιφάνεια που βρίσκεται υπό εξέταση ψεκάζεται με υγρό διάλυμα, το οποίο αφήνεται να εμποτίσει τις διάφορες ατέλειες που καταλήγουν στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, η επιφάνεια καθαρίζεται ώστε να αφαιρεθεί το πλεονάζον υγρό και έπειτα ψεκάζεται με υγρό η στερεό εμφανιστή, με την ιδιότητα να εμφανίσει το διεισδυτικό υγρό που έχει εισχωρήσει στις ατέλειες (Σχήμα 2.2). Η οπτική επιθεώρηση είναι το τελικό βήμα, ώστε να ολοκληρωθεί η εξέταση. Για καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται φθορίζοντα διεισδυτικά υγρά και η επιθεώρηση γίνεται σε υπεριώδης φωτισμό.

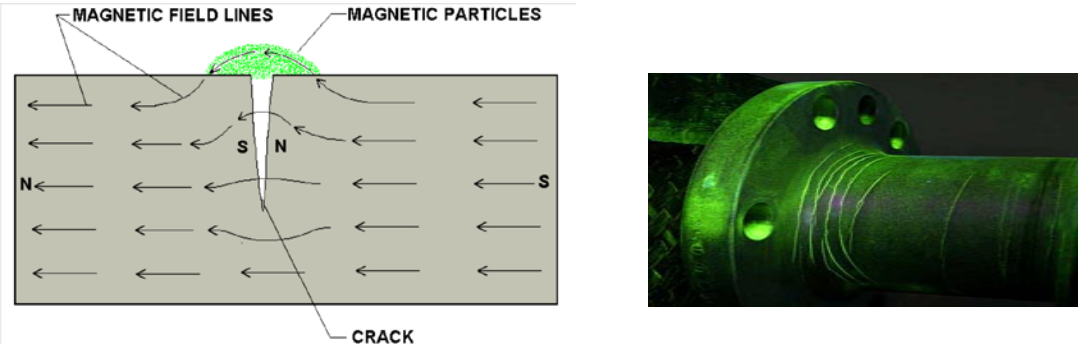


Σχήμα 2.2: Εντοπισμός ρωγμής με χρήση διεισδυτικών υγρών

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος των διεισδυτικών υγρών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων και ατελειών στο εσωτερικό του υλικού και επιπλέον δεν εφαρμόζεται στα σύνθετα υλικά.

- **Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων (magnetic particle inspection)**

Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων αποτελεί μια μη καταστροφική μέθοδο που μπορεί να εντοπίσει ασυνέχειες και σφάλματα σε υλικά που μπορούν να μαγνητιστούν (φερομαγνητικά). Βασίζεται στο γεγονός ότι όταν ένα υλικό μαγνητίζεται, οι ασυνέχειες που υπάρχουν και βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του, προκαλούν την απόκλιση του μαγνητικού πεδίου. Στα σημεία που υπάρχει ασυνέχεια οι μαγνητικές γραμμές εξέρχονται από την επιφάνεια του υλικού όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3. Η απόκλιση αυτή, και κατ' επέκταση η ύπαρξη της ασυνέχειας, γίνεται αντιληπτή με την εφαρμογή φερρομαγνητικών σωματιδίων είτε με τη μορφή σκόνης είτε ως σωματίδια μέσα σε υγρό φορέα (νερό, λάδι) πάνω στην επιφάνεια. Τα σωματίδια έλκονται, στα σημεία που παρουσιάζεται η απόκλιση, και δίνουν προσεγγιστικά το μέγεθος, τη θέση και το σχήμα της ασυνέχειας.

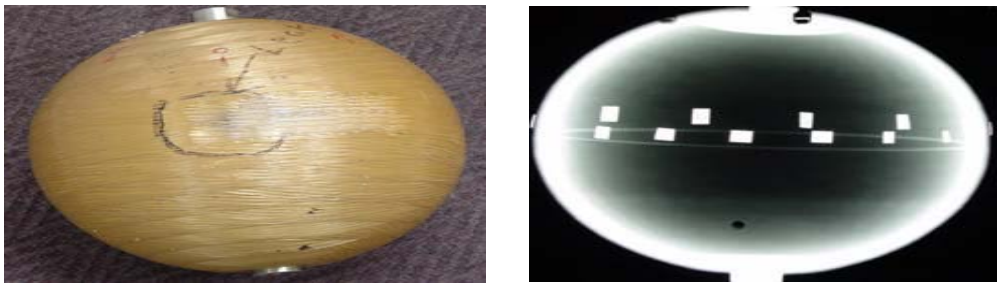


Σχήμα 2.3 : Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου και οι ενδείξεις

Η μέθοδος αυτή δεν εφαρμόζεται στα σύνθετα υλικά λόγω του μη μαγνητικού χαρακτήρα τους.

- **Ραδιογραφικές μέθοδοι (radiographic methods)**

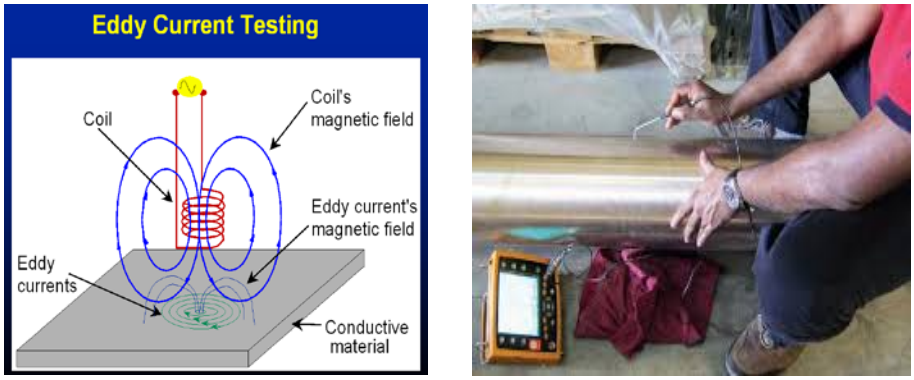
Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στις μεθόδους εξέτασης υλικών που βασίζονται στην απορρόφηση ακτινοβολίας, είτε αυτή είναι ηλεκτρομαγνητική είτε είναι πυρηνική. Το προς εξέταση υλικό τοποθετείται μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και του μέσου αποτύπωσης. Η ύπαρξη ατελειών, οι διαφορές στην πυκνότητα και στο πάχος δίνουν διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης στο υλικό, το οποίο εξετάζεται. Οι διαφοροποιήσεις, στην εξερχόμενη από το υλικό ακτινοβολία, καταγράφονται σε ραδιογραφικό film ή άλλα μέσα (Σχήμα 2.4). Με αυτήν την διαδικασία, μπορούν να εντοπιστούν ατέλειες και να καθοριστεί το μέγεθος τους. Η θέση των ατελειών αυτών, όμως, δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς μέσα στον όγκο του υλικού με την εν λόγω μέθοδο. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται περισσότερες από μια λήψεις.



Σχήμα 2.4: Αποτύπωση με τη χρήση ραδιογραφικών μεθόδων.

- **Η μέθοδος των δινορευμάτων (eddy currents)**

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με την μέθοδο των δινορεύματων είναι μια σημαντική και ευρύτατα διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου μεταλλικών υλικών και βασίζεται στην αρχή πως το ηλεκτρικό ρεύμα θα διέλθει μέσα από οποιονδήποτε αγωγό ο οποίος υπόκειται σε εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται γύρω από ένα πηνίο, παράγει εναλλασσόμενο δινορεύμα στο αγώγιμο υλικό και στη συνέχεια το δινορεύμα παράγει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιτάσσεται και τροποποιεί το αρχικό του πηνίου. Το τελικό μαγνητικό πεδίο είναι η πηγή των πληροφοριών, το οποίο αναλύεται κατάλληλα και έτσι μπορούν να εντοπιστούν ρωγμές, κενά, εγκλείσματα και να μετρηθούν διάφορες ιδιότητες όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μαγνητική διαπερατότητα, η σκληρότητα κ.α. Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται στα σύνθετα υλικά.

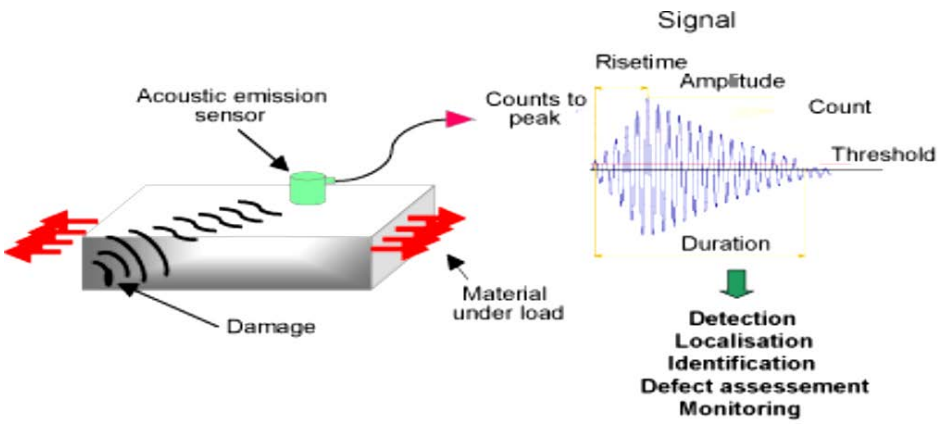


Σχήμα 2.5: Η μέθοδος των δινορευμάτων και η εφαρμογή της

- **Η ακουστική εκπομπή (acoustic emission)**

Η μέθοδος των ακουστικών εκπομπών αποτελεί κατά κύριο λόγο μια βοηθητική-συμπληρωματική μέθοδο για τον εντοπισμό ασυνεχειών. Η ακουστική εκπομπή αναφέρεται στην παραγωγή παροδικών ελαστικών ηχητικών κυμάτων που παράγονται από μια ξαφνική ανακατανομή της πίεσης σε ένα υλικό. Όταν μια δομή υποβάλλεται σε ένα εξωτερικό ερέθισμα (ή αλλαγή σε πίεση, φόρτιση, ή θερμοκρασία), τότε πραγματοποιείται έκκληση ενέργειας, υπό μορφή κυμάτων πίεσης, τα οποία διαδίδονται στην επιφάνεια και καταγράφονται από αισθητήρες (Σχήμα 2.6). Είναι φανερό ότι ακουστική εκπομπή δεν υπάρχει χωρίς την εφαρμογή φορτίων. Έτσι συνήθως η μέθοδος εκτελείται κάτω από

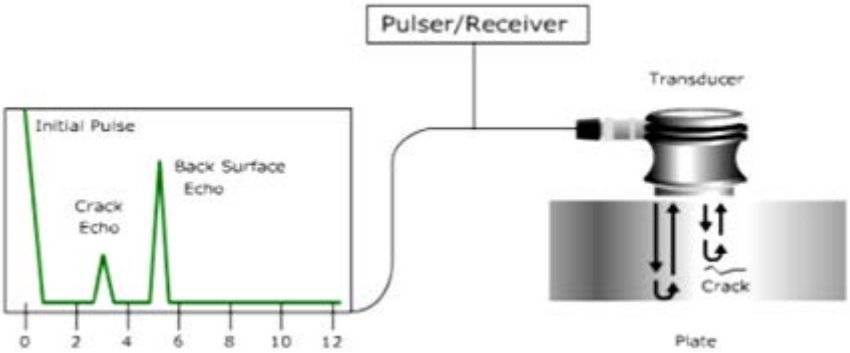
ελεγχόμενη φόρτιση της κατασκευής. Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής ανιχνεύει την εξέλιξη των ατελειών-ελαττωμάτων, σε αντίθεση με τις περισσότερες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου, οι οποίες ανιχνεύουν την ύπαρξη (Προδρομίδης 2013), (Εργαστηριακές Σημειώσεις 2009).



Σχήμα 2.6: Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής

- **Η μέθοδος των υπερήχων (ultrasonic testing)**

Ο έλεγχος με υπερήχους χρησιμοποιεί την ελαστική ενέργεια των υπερήχων για την ανίχνευση-αξιολόγηση ατελειών, διαστατικές μετρήσεις, χαρακτηρισμό υλικών κ.α. Τα κύματα αυτά κατά τη διάδοσή τους μέσα στα υλικά χάνουν μέρος της ενέργειας τους και ανακλώνται όταν προσπίπτουν σε διεπιφάνειες. Ένα τυπικό σύστημα επιθεώρησης UT, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 και αποτελείται από διάφορες μονάδες όπως ο αισθητήρας υπερήχων και οι συσκευές εμφάνισης των αποτελεσμάτων. Ο υπέρηχος εισάγεται και διαδίδεται στα υλικά υπό μορφή ελαστικών κυμάτων. Όταν υπάρχει μια ασυνέχεια (όπως μια ρωγμή) μέρος της ενέργειας θα ανακλαστεί. Στη συνέχεια οι ανακλασεις καταγράφονται από ειδικές συσκευές και αναλύονται. Με αυτό τον τρόπο, καθορίζεται η ύπαρξη ατελειών και υπολογίζεται η θέση και το σχήμα τους (Λούτας 2013).



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των υπερήχων

Ακολουθεί ο συνοπτικός Πίνακας 2.1 όπου παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηρίστηκα των αναφερόμενων μεθόδων.

Πίνακας 2.1: Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των μη καταστροφικών μεθόδων που περιγράφτηκαν

Μέθοδος	**Βασική αρχή**	**Εφαρμογές**	**Πλεονεκτήματα**	**Περιορισμοί**
Οπτικός έλεγχος	Χρησιμοποιεί φυσικό ή τεχνητό φωτισμό με λήψη από το ανθρώπινο μάτι ή άλλο φωτοευαίσθητο αισθητήρα	Ποικίλες εφαρμογές σε πολλές βιομηχανίες από έλεγχο πρώτη ύλης έως τελικού προϊόντος	Χαμηλό κόστος και μικρή απαιτούμενη εκπαίδευση. Ευρύ πεδίο εφαρμογών	Μόνο επιφανειακές ατέλειες ανιχνεύονται. Απαιτεί προσβασιμότητα και φυσικό ή τεχνητό φωτισμό
Διευσδυτικά υγρά	Υγρό με ορατή ή φθορίζουσα βαφή απλώνεται σε επιφάνειες και εισέρχεται σε ασυνέχειες μέσω του τριχοειδούς φαινομένου	Θεωρητικά κάθε στερεό μη απορροφητικό υλικό με μη επιστρωμένη επιφάνεια	Σχετικά εύκολη στη χρήση και με φθηνά υλικά. Πολύ ευαίσθητη και ευέλικτη. Ελάχιστη εκπαίδευση	Ανιχνεύει ατέλειες που φτάνουν μέχρι την επιφάνεια μόνο. Απαιτεί σχετικά λεία και καθαρή επιφάνεια
Μαγνητικά σωματίδια	Το αντικείμενο μαγνητίζεται και πολύ μικρά φερρομαγνητικά σωματίδια απλώνονται στην επιφάνεια ευθυγραμμιζόμενα με τις ασυνέχειες	Όλα τα φερρομαγνητικά υλικά. Για επιφανειακές και ελάχιστα υποεπιφανειακές ασυνέχειες.	Σχετικά απλή στη χρήση. Φθηνό κόστος εξοπλισμού/υλικών Αρκετά ευαίσθητη και γρήγορη	Μόνο για επιφανειακές και μερικές υποεπιφανειακές ατέλειες. Φερρομαγνητικά υλικά μόνο.
Ραδιογραφία	Ακτίνες γ ή χ διαπερνούν το υπό εξέταση αντικείμενο και αποτυπώνουν το ίχνος τους σε ειδικό φιλμ. Οι ασυνέχειες επηρεάζουν τη διάδοση των ακτινών.	Σχεδόν κάθε υλικό και γεωμετρία μπορεί να ελεγχθεί.	Παρέχει μόνιμο αρχείο καταγραφής και υψηλή ευαισθησία. Κατ' όγκων έλεγχος.	Περιορισμοί πάχους ανάλογες της πυκνότητας του υλικού που εξετάζεται. Ανιχνευσιμότητα ατελειών εξαρτάται από την κατευθυντικότητα τους. Επικίνδυνη λόγω ακτινοβολίας.
Υπέρηχοι	Υπερηχητικά κύματα παράγονται από ειδικούς αισθητήρες και ταξιδεύουν εντός του υλικού. Οι ατέλειες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της διάδοσης	Τα πιο πολλά υλικά μπορούν να ελεγχθούν εφόσον δεν έχουν υψηλή τραχύτητα και πολύπλοκη γεωμετρία	Ακριβή αποτελέσματα υψηλής ευαισθησίας. Πληροφορίες για το πάχος, βάθος και γεωμετρία ατελειών. Προσβασιμότητα από τη μία πλευρά.	Μη μόνιμο αρχείο καταγραφής (συνήθως). Προβληματική σε υλικά με πολύ υψηλή απόσβεση, επιφανειακή τραχύτητα και πολύπλοκη γεωμετρία. Απαιτεί συζευκτικό μέσο.
Δινορεύματα	Εντοπισμένα ηλεκτρικά πεδία παράγονται σε αγώγιμο δοκίμιο με ηλ/μαγνητική επαγωγή	Όλα τα ηλεκτρικά αγώγιμα υλικά μπορούν να ελεγχθούν	Γρήγορη, ευέλικτη, ευαίσθητη. Δεν απαιτεί επαφή. Αυτοματοποίηση	Απαιτητική στην κατανόηση των μεταβλητών που την ελέγχουν. Μικρό βάθος διείσδυσης. Τραχύτητα.
Ακουστική εκπομπή	Ανίχνευση με ειδικούς αισθητήρες ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται κατά την εξέλιξη των ατελειών.	Σωληνώσεις, πιεστικά δοχεία, συγκολλήσεις, σύνθετα υλικά και κατασκευές υπό φορτίο	Επιθεώρηση μεγάλων επιφανειών. Πιθανή πρόγνωση αστοχίας	Αισθητήρες σε επαφή με κατασκευή. Πολλοί αισθητήρες για εντοπισμό βλάβης. Απαιτητική σε επεξεργασία σήματος.

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 προς αυτή.	0	0	3	3	0	0	0
Κοντά στην επιφάνεια τριών διαστάσεων.	0	0	3	3	2	3	3
Στο εσωτερικό δύο διαστάσεων κάθετες στην επιφάνεια.	0	0	1	2	0	0	1
Στο εσωτερικό δύο διαστάσεων παράλληλες στην επιφάνεια.	0	0	3	3	0	0	1
Στο εσωτερικό τριών διαστάσεων .	0	0	3	3	0	0	3

(0)= Δεν ανιχνεύει (1)=Δεν ενδείκνυται (2)=Ενδείκνυται (3)=Ιδανική για την εφαρμογή
Επιφάνεια : αυτή που είναι κατάλληλη για να γίνει η εξέταση.

Σχήμα 2.8: Μη καταστροφικές μέθοδοι και η ικανότητα τους στην ανίχνευση ατελειών-βλαβών

Η μέθοδος των υπερήχων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους. Η υψηλή διεισδυτική ικανότητα, η υψηλή ευκρίνεια, η δυνατότητα εφαρμογής σε όλα τα υλικά καθώς και η χρήση φορητών συσκευών την καθιστούν μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου. Στο παραπάνω Σχήμα 2.8 (Χασιώτης 2012), παρουσιάζεται η ικανότητα όλων των προαναφερθεισών μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου στην ανίχνευση και εντοπισμό διάφορων τύπων ατελειών-βλαβών.

Η μέθοδος των υπερήχων φαίνεται να μην έχει την ικανότητα να δώσει λύσεις στον εντοπισμό όλων των τύπων ατελειών. Συγκεκριμένα, η μέθοδος των υπερήχων με κάθετη δέσμη (straight beam) δείχνει να μην μπορεί να δώσει απαντήσεις σε ατέλειες-βλάβες δύο διαστάσεων, όπως είναι οι ρωγμές. Στις περιπτώσεις αυτές η εξέταση συμπληρώνεται με τη χρήση υπερήχων γωνιακής δέσμης (angle beam), που δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις. Όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 2.1 και αυτή η μέθοδος έχει περιορισμούς στην χρήση της όπως είναι οι περιπτώσεις υλικών με πολύ υψηλή απόσβεση, επιφανειακή τραχύτητα κ.α.

Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσεται αναλυτικότερα η μέθοδος των υπερήχων. Θα περιγραφούν οι βασικές αρχές των υπερηχητικών κυμάτων, τα κύρια μέρη που αποτελούν μια διάταξη υπερήχων και οι μέθοδοι εξέτασης. Βεβαίως, η ανάλυση θα επικεντρωθεί στην εφαρμογή της μεθόδου στα σύνθετα υλικά, καθώς και στις ιδιαιτερότητες και στις δυσκολίες που πρέπει να ξεπεραστούν, ώστε ο έλεγχος σύνθετων υλικών με τη χρήση υπερήχων να είναι αξιόπιστος.

Κεφάλαιο 3: Υπερηχητικά Κύματα

3.1 Εισαγωγή

Τα ηχητικά κύματα δεν είναι τίποτε άλλο παρά κύματα ελαστικότητας που μεταδίδονται στον αέρα κυρίως και έχουν κατάλληλη συχνότητα και ένταση ώστε να μας προκαλούν το αίσθημα της ακοής. Ο ήχος σαν ελαστικό κύμα που είναι μεταδίδεται σε στερεά, υγρά και αέρια σώματα, αλλά όχι στο κενό.

Οι ήχοι ανάλογα με την συχνότητά τους χωρίζονται σε υπόηχους με συχνότητα μικρότερη των 16 Hz και σε υπέρηχους με συχνότητα μεγαλύτερη των 20 KHz.

Οι υπέρηχοι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε πλήθος επιστημών όπως η Ιατρική και χρησιμοποιούνται επίσης σαν μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου για την εύρεση ασυνεχειών μεταλλικών και άλλων προϊόντων, τη μέτρηση του πάχους υλικών και άλλες εφαρμογές. Οι υπέρηχοι που χρησιμοποιούνται στον μη καταστροφικό έλεγχο έχουν συχνότητες από 0.1 MHz έως και 25 MHz με τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους εκείνους που οι συχνότητες τους κυμαίνονται μεταξύ 1 και 6 MHz.

Η χρήση των υπερηχητικών κυμάτων οφείλεται κυρίως στην ιδιότητά τους να διεισδύουν στο εσωτερικό των υλικών, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα καταγραφής τους και παράστασής τους γραφικά. Τα υπερηχητικά κύματα διέπονται από τους νόμους της ακουστικής και περιγράφονται από τα ίδια μεγέθη με τα ηχητικά κύματα. Τα μεγέθη αυτά είναι :

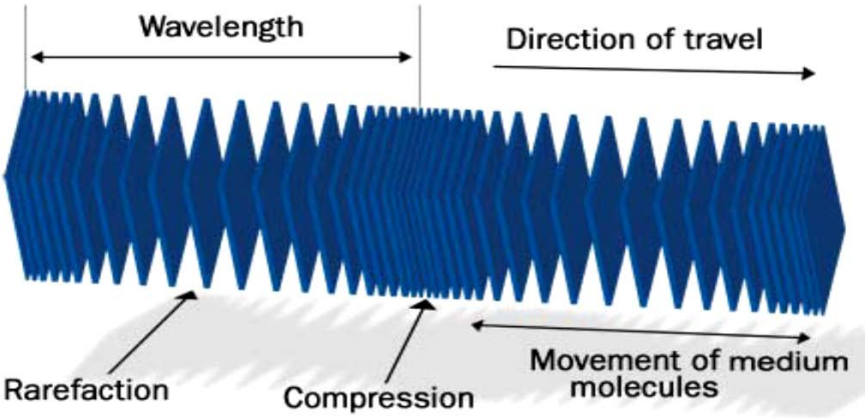
- Η συχνότητα (frequency) f: ορίζεται ως ο αριθμός των ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου. Η μονάδα συχνότητας είναι το Hz.
- Το μήκος κύματος (wavelength) λ: είναι η απόσταση, προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δύο γειτονικών σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση. Το μήκος κύματος δίνεται από τη σχέση $\lambda=c/f$.
- Η ταχύτητα διάδοσης (velocity) c: είναι η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το κύμα σ' ένα μέσο και είναι χαρακτηριστική του μέσου.
- Πλάτος ταλάντωσης (amplitude) A: είναι η μέγιστη απομάκρυνση ενός ταλαντευόμενου σωματιδίου από τη θέση ισορροπίας του. Το πλάτος ταλάντωσης εξαρτάται από το ποσό της ενέργειας που παρέχεται στο ελαστικό μέσο.

3.2 Είδη Υπερηχητικών Κυμάτων

Τα υπερηχητικά κύματα όπως ήδη αναφέρθηκε διαδίδονται στα ελαστικά μέσα, στερεά, υγρά και αέρια, αλλά δεν διαδίδονται στο κενό. Τα δομικά σωματίδια του ελαστικού μέσου, ταλαντώνονται γύρω από μια θέση ισορροπίας και μεταφέρουν τη δόνηση τους σε άλλα γειτονικά, κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τη διάδοση των κυμάτων χαρακτηρίζουν δύο διευθύνσεις, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου. Η σύμπτωση ή όχι των δύο αυτών διευθύνσεων, δημιουργεί την πρώτη διάκριση των υπερηχητικών κυμάτων σε εγκάρσια (shear) και διαμήκη (longitudinal). Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου οι διαστάσεις του υλικού, που είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερες από το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης, παράγονται και άλλα είδη κυμάτων. Από αυτά θα αναφερθούν τα κύματα πλακών, ή κύματα Lamb, και τα επιφανειακά κύματα (surface waves), τα οποία χρησιμοποιούνται, επίσης, στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών.

- **Διαμήκη υπερηχητικά κύματα**

Τα διαμήκη υπερηχητικά κύματα, ή κύματα πιέσεως, είναι ο τύπος κυμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εξέταση των υλικών. Στα διαμήκη κύματα, οι ταλαντώσεις εμφανίζονται στη διαμήκη κατεύθυνση ή στην κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων (Σχήμα 3.1). Τα κύματα συμπίεσης μπορούν να διαδοθούν τόσο στα υγρά όσο και στα στερεά επειδή η ενέργεια ταξιδεύει μέσω της ατομικής δομής από μια σειρά συμπιέσεων και αραιώσεων (Λούτας 2013).

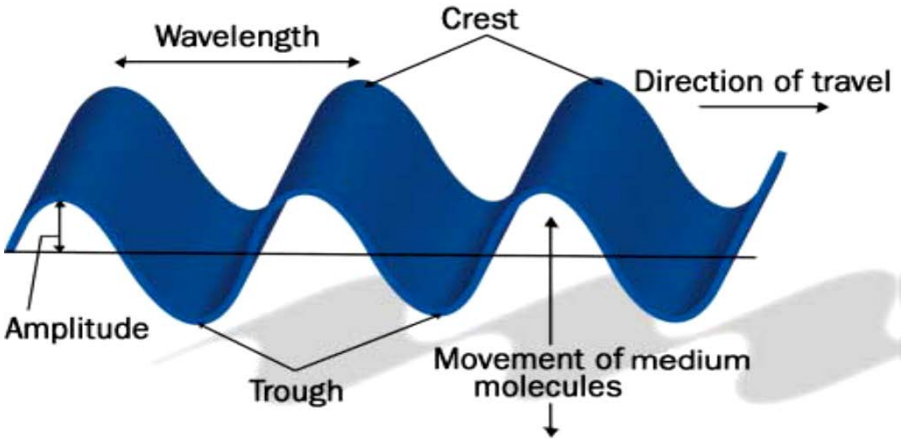


Σχήμα 3.1: Διαμήκη κύματα

Έχουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης από όλους τους τύπους κυμάτων και για δεδομένη συχνότητα και υλικά διάδοσης προκύπτει από τον τύπο c=λ*f ότι έχουν το μεγαλύτερο μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνώσεων ή αραιώσεων ή διαφορετικά η απόσταση μεταξύ δύο επιπέδων, στα οποία τα δομικά σωματίδια βρίσκονται στην ίδια κατάσταση κίνησης.

- **Εγκάρσια υπερηχητικά κύματα**

Στα εγκάρσια ή διατμητικά κύματα, τα μόρια ταλαντώνονται σε διεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση της διάδοσης (Σχήμα 3.2). Τα εγκάρσια κύματα δεν διαδίδονται στα υγρά ή τα αέρια στα οποία δεν υφίσταται διάτμηση, μπορούν όμως να διαδοθούν σε ορισμένα παχύρρευστα υγρά, που παρουσιάζουν μεγάλη συνεκτικότητα (Πρασιανάκης 1993). Τα εγκάρσια κύματα δημιουργούνται από ειδικές κεφαλές εγκαρσίων κυμάτων ή από τα διαμήκη κύματα, εάν εκμεταλλευτούμε κατάλληλα τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης, όταν τα διαμήκη κύματα προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών.



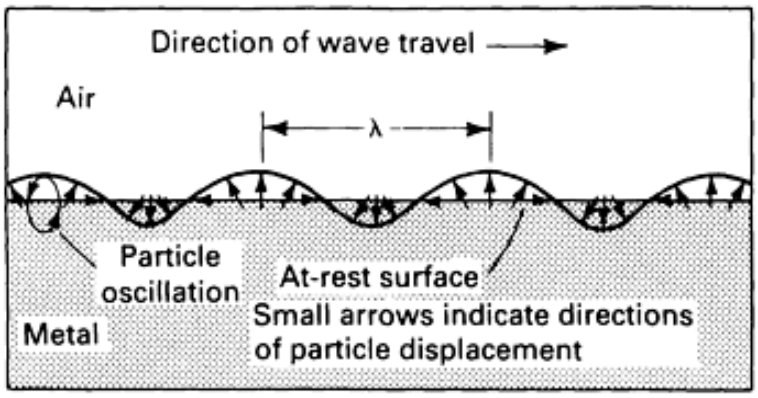
Σχήμα 3.2: Εγκάρσια κύματα

Το χαρακτηριστικό των εγκαρσίων κυμάτων είναι η δημιουργία κορυφών (crests) και κοιλάδων (trough) στα δομικά σωματίδια του μέσου διάδοσης. Ως μήκος κύματος ορίζεται η

απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ορέων ή κοιλάδων. Τέλος έχουν ταχύτητα διάδοσης περίπου τη μισή των διαμηκών.

- **Επιφανειακά κύματα (Rayleigh waves)**

Πρόκειται για κύματα που μεταδίδονται στην επιφάνεια των στερεών σε βάθος ενός περίπου μήκους κύματος. Στα επιφανειακά κύματα, τα δομικά σωματίδια συνδυάζουν την εγκάρσια και τη διαμήκη κίνηση, με αποτέλεσμα να κινούνται σε ελλειπτική τροχιά όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 (Χασίωτης 2012). Ο μεγάλος άξονας της έλλειψης είναι κάθετος στην επιφάνεια του στερεού. Διαδίδονται με ταχύτητα που είναι περίπου ίση με το 90% αυτής των εγκαρσίων κυμάτων στο ίδιο υλικό. Τα επιφανειακά κύματα παράγονται, όταν τα διαμήκη προσπίπτουν σε μια επιφάνεια υπό γωνία, που η τιμή της είναι ίση ή μεγαλύτερη της δεύτερης κρίσιμης γωνίας. Ως δεύτερη κρίσιμη γωνία ορίζεται η γωνία πρόσπτωσης που έχει τέτοια τιμή ώστε η παραγόμενη γωνία διάθλασης του εγκάρσιου κύματος να είναι ίση με 90°. Διεισδύουν μέσα στο στερεό υλικό, σε βάθος που είναι ίσο με ένα μήκος κύματος και έχουν την ιδιότητα να ταξιδεύουν στην επιφάνεια ακόμη και αν αυτή παρουσιάζει ελαφρά καμπυλότητα και ανακλώνται όπου συναντούν ακμές ή γωνίες.



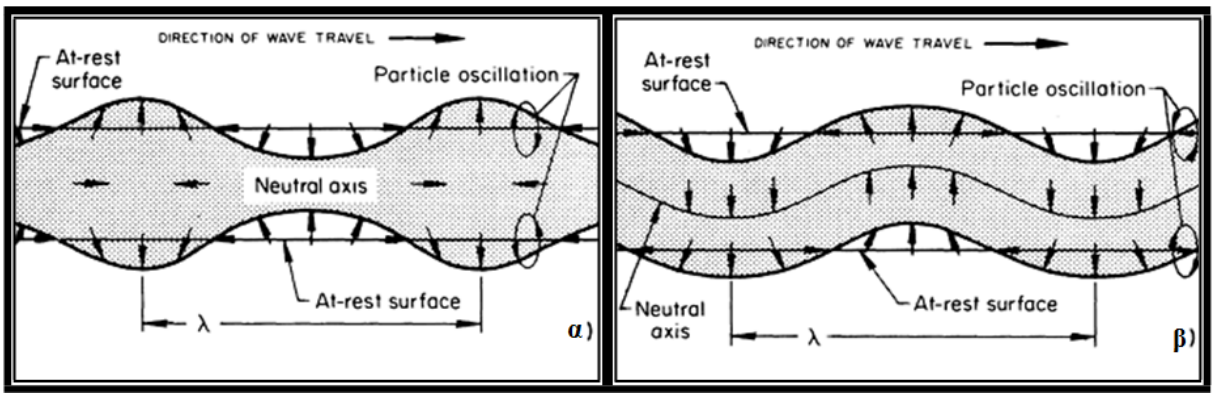
Σχήμα 3.3: Επιφανειακά κύματα

Τα επιφανειακά κύματα είναι χρήσιμα επειδή είναι πολύ ευαίσθητα στις ατέλειες επιφάνειας (και άλλα χαρακτηριστικά γνωρίσματα επιφάνειας πχ. τραχύτητα) και ακολουθούν την επιφάνεια γύρω από τις καμπύλες. Λόγω αυτού, τα κύματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιθεωρήσουν περιοχές που άλλα κύματα έχουν δυσκολία προσέγγισης.

- **Κύματα πλακών ή κύματα Lamb**

Τα κύματα πλακών είναι παρόμοια με τα κύματα επιφάνειας με τη διαφορά ότι μπορούν να παραχθούν μόνο σε υλικά με πάχος μερικά μήκη κύματος. Πρόκειται για σύνθετα παλμικά κύματα που διαδίδονται παράλληλα στην επιφάνεια και σε όλο το πάχος του υλικού. Η διάδοση των κυμάτων Lamb εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού. Επηρεάζονται επίσης πολύ από τη συχνότητα δοκιμής και το πάχος. Τα κύματα Lamb

ταξιδεύουν αρκετά μέτρα στα υλικά (χωρίς σημαντική απόσβεση) και είναι έτσι χρήσιμα πχ. σε έλεγχο σωληνώσεων. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνησης των δομικών σωματιδίων. Εάν τα δομικά σωματίδια κινούνται συμμετρικά, ως προς τον ουδέτερο άξονα της πλάκας, έχουμε τα διασταλτικά (dilatational) κύματα (Σχήμα 3.4 α), ενώ εάν κινούνται αντισυμμετρικά, έχουμε τα καμπτικά (bending) (Σχήμα 3.4 β).

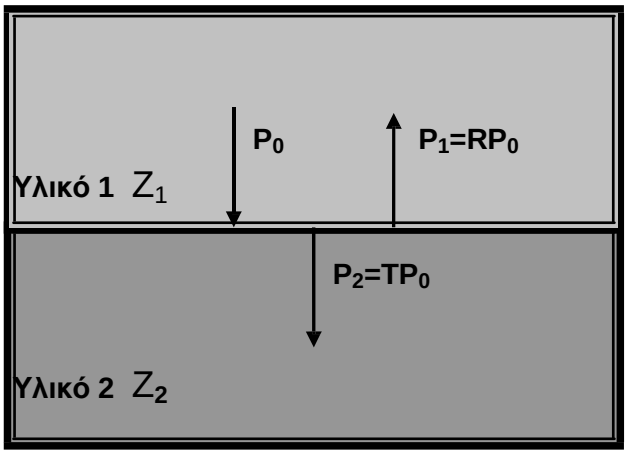


Σχήμα 3.4: Κύματα Lamb **α)** διασταλτικά **β)** καμπτικά

3.3 Υπερηχητικά Κύματα και Συνοριακές Επιφάνειες Δύο Υλικών

3.3.1 Κάθετη Πρόσπτωση Ηχητικού Κύματος στη Συνοριακή Επιφάνεια Δύο Υλικών

Στην εξέταση των υλικών με υπερήχους, τα υπερηχητικά κύματα σε όλες τις περιπτώσεις διαδίδονται σε δύο μέσα . Αυτά μπορεί να είναι το μέσο σύζευξης (couplant) που θα αναλυθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο και στη συνέχεια το εξεταζόμενο υλικό (test piece) ή οι διαδοχικές στρώσεις ενός υλικού. Σε κάποιο σημείο υπάρχει η διαχωριστική επιφάνεια, που σημειώνει το τέλος του μέσου σύζευξης και την αρχή του εξεταζόμενου υλικού. Εάν ένα ηχητικό κύμα συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, τότε ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας του περνά στο άλλο υλικό, ενώ άλλο μέρος ανακλάται από αυτήν (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Κάθετη πρόσπτωση κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

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

$$\mathbf{Z = \rho \cdot c} \tag{3.1}$$

όπου ρ η πυκνότητα του υλικού και c η ταχύτητα του ήχου σε αυτό. Εάν ένα ηχητικό κύμα περάσει σε ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1, και συναντήσει κάθετα μια διαχωριστική επιφάνεια με ένα άλλο υλικό ακουστικής αντίστασης Z_2, τότε ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης R, από τη σχέση:

$$\mathbf{R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}} \tag{3.2}$$

Εάν οι τιμές των ακουστικών αντιστάσεων Z_1,Z_2 είναι ίσες, τότε δεν έχουμε ανάκλαση και όλο το ποσό της ακουστικής πίεσης εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό. Στην περίπτωση που οι τιμές των ακουστικών αντιστάσεων διαφέρουν κατά πολύ, το ποσό της ακουστικής πίεσης που ανακλάται μπορεί να φτάσει και το 100%.

Στην συνέχεια, ορίζεται ο συντελεστής διάδοσης (Transmission coefficient) **T** σύμφωνα με τη σχέση 3.3 και ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ακουστικής πίεσης που εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό.

$$\mathbf{T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}} \tag{3.3}$$

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 κι εξαρτάται από τις τιμές των ακουστικών αντιστάσεων Z_1 και Z_2.

Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ισχύει η σχέση 3.4:

$$\mathbf{P_0 + P_1 = P_2} \tag{3.4}$$

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 :

$$\mathbf{P_0 + RP_0 = TP_0} \tag{3.5}$$

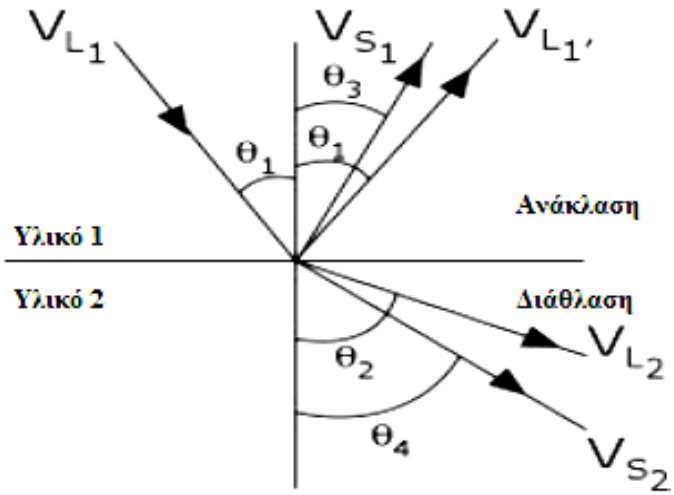
$$\mathbf{1 + R = T} \tag{3.6}$$

Εάν οι ακουστικές αντιστάσεις δύο 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 δύο υλικών, οπότεισχύει T=1 .

3.3.2 Πλάγια Πρόσπτωση Υπερηχητικών Κυμάτων στη Διαχωριστική Επιφάνεια Δύο Υλικών

Παρόλο που στην παρούσα διπλωματική εργασία τα εξεταζόμενα δοκίμια ελέγχθηκαν με υπερηχητική δέσμη κάθετη στην επιφάνειά τους είναι σημαντική η αναφορά και στην πλάγια πρόσπτωση των υπερηχητικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών. Η πάνω επιφάνεια των δοκιμίων μπορεί να μην είναι κάθετη στην υπερηχητική δέσμη, λόγω κατασκευής των δοκιμίων ή και στήριξης τους, και επιπλέον στο εσωτερικό των εξεταζόμενων υλικών υπάρχουν συνθήκες που έχουν ως αποτέλεσμα και των δύο είναι η πλάγια πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης σε διαχωριστικές επιφάνειες. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι οι στρώσεις στο εσωτερικό μιας πολύστρωτης πλάκας δεν είναι βέβαιο ότι είναι παράλληλες με την πάνω και την κάτω επιφάνεια, αλλά μπορεί να σχηματίζουν μια κυματοειδή επιφάνεια, που μπορεί να οφείλεται σε περιοχές με αυξημένη ή μειωμένη περιεκτικότητα σε ρητίνη. Επίσης, τα νήματα των ενισχυτικών στρώσεων μετά τη στερεοποίηση της ρητίνης αποκτούν ελλειπτικό σχήμα ως προς το πλάτος τους, με αποτέλεσμα η υπερηχητική δέσμη να μην προσπίπτει κάθετα σε αυτά.

Όταν ένα ηχητικό κύμα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια υλικών με γωνία πρόσπτωσης διάφορη των 0° ως προς άξονα κάθετο στην πάνω επιφάνεια, όπως συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, τότε συμβαίνουν πολύ διαφορετικά φαινόμενα. Και 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 ενέργειας του σε άλλο είδος κύματος, τόσο στο ανακλώμενο όσο και στο διαθλώμενο μέρος του.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα με όλα τα πιθανά είδη κυμάτων κατά την πρόσπτωση υπό γωνία Θ_1 διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η πρόσπτωση ενός διαμήκους κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, όπως και τα παραγόμενα ανακλώμενα και διαθλώμενα εγκάρσια και διαμήκη κύματα.

Παρατηρείται ότι παράγονται τέσσερα είδη κυμάτων, δύο από ανάκλαση και δύο από διάθλαση. Επίσης, τόσο στην ανάκλαση όσο και στη διάθλαση, παράγεται από ένα διάμηκες και ένα εγκάρσιο κύμα. Εννοείται ότι όταν το υλικό είναι υγρό ή αέριο τα εγκάρσια κύματα εξαφανίζονται. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί ότι το εγκάρσιο κύμα δε διαθλάται τόσο όσο το διάμηκες. Αυτό εμφανίζεται επειδή τα εγκάρσια κύματα ταξιδεύουν πιο αργά από τα διαμήκη κύματα. Επομένως, η διαφορά ταχύτητας μεταξύ του προσπίπτοντος διαμήκους κύματος και του εγκαρσίου κύματος δεν είναι τόσο μεγάλη όπως είναι μεταξύ προσπίπτοντος και ανακλασθέντος διαμήκους κύματος. Επίσης σημειώνεται ότι όταν ένα διάμηκες κύμα ανακλάται μέσα στο υλικό, το εγκάρσιο κύμα ανακλάται σε μικρότερη γωνία από το ανακλασθέν διάμηκες. Αυτό οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι η ταχύτητα του εγκάρσιου είναι μικρότερη από του διαμήκους (Λούτας 2013).

Οι διευθύνσεις όλων των κυμάτων, τόσο του προσπίπτοντος όσο και των ανακλώμενων και διαθλώμενων, καθορίζονται από την γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση κάθε ενός απ' αυτά με την κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών. Σ' αυτήν την περίπτωση πρόσπτωσης των ηχητικών κυμάτων, ισχύουν οι ίδιοι φυσικοί νόμοι που ισχύουν και στη οπτική. Συγκεκριμένα ισχύει ο γνωστός νόμος του Snell :

$$\frac{\sin\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{L2}} \tag{3.7}$$

και παίρνει την μορφή:

$$\frac{\sin\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{L2}} = \frac{\sin\theta_3}{V_{S1}} = \frac{\sin\theta_4}{V_{S2}} \tag{3.8}$$

Αυτή η σχέση ισχύει για κάθε είδους κύμα, εγκάρσιο ή διάμηκες, είτε πρόκειται για ανάκλαση είτε για διάθλαση. Αναλύοντας την σχέση 3.7 έχουμε ότι θ_1 είναι η γωνία πρόπτωσης του διαμήκους κύματος και θ_2 η γωνία διάθλασης του και V_{L1}, V_{L2} οι ταχύτητες του διαμήκους κύματος στο υλικό 1 και 2 αντίστοιχα. Ενώ θ_3 και θ_4 είναι οι γωνίες ανάκλασης και διάθλασης του προκύπτοντος εγκάρσιου κύματος με τις αντίστοιχες ταχύτητες του στο υλικό 1 (V_{S1}) και εντός του υλικού 2 (V_{S2}).

3.4 Απόσβεση Υπερηχητικών Κυμάτων (Attenuation)

Η ένταση της υπερηχητικής δέσμης που επιστρέφει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή, μετά τη διάδοση της στο εξεταζόμενο υλικό, είναι πολύ μικρότερη από την ένταση της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης. Η απώλεια αυτή της έντασης της δέσμης των υπερήχων εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και είναι αποτέλεσμα κυρίως της διασποράς (scattering) και

της απορρόφησης (absorption) που περιγράφονται συνολικά με τον όρο απόσβεση (attenuation).

Η απορρόφηση είναι η μετατροπή μια ποσότητας μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων σε θερμική. Καθώς ο ήχος διαπερνά ένα υλικό, μια ποσότητα ενέργειας καταναλώνεται για την δόνηση των μορίων που μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω τριβής. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση της ενέργειας του υπερηχητικού κύματος. 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.

Η διασπορά είναι η σπουδαιότερη αιτία εξασθένησης και προκαλείται από την αλλαγή διευθύνσεων των ηχητικών κυμάτων, καθώς αυτά ανακλώνται σε διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες εντός του υλικού και σαν φαινόμενο γίνεται εντονότερο όταν η θεωρούμενη διαχωριστική επιφάνεια γίνεται ίση με το 10 % του μήκους κύματος (ASM HANDBOOK VOL 17). Η διασπορά των υπερηχητικών κυμάτων, ιδιαίτερα στα σύνθετα υλικά είναι ένα έντονο φαινόμενο, που πολλές φορές έχει σαν αποτέλεσμα ο έλεγχος με υπερήχους να γίνεται από δύσκολος έως ανέφικτος. Οφείλεται στο γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά είναι ετερογενή και ανισότροπα. Η φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται στο εσωτερικό τους πολλές διαχωριστικές επιφάνειες. Ως διαχωριστικές επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν οι ενισχυτικές στρώσεις, τα νήματα των στρώσεων, τα εγκλείσματα αέρα και οι οποιεσδήποτε ατέλειες και βλάβες, ανάλογα με το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης που χρησιμοποιείται.

Η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων πρέπει να σημειωθεί ότι εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα του ήχου. Όταν αυξάνεται η συχνότητα περισσότερα μορίων δονούνται (απορρόφηση) και επιπλέον έχουμε αύξηση της ευαισθησίας της υπερηχητικής δέσμης σε μικρούς ανακλαστήρες μεγέθους παραπλήσιου στο μήκος κύματος του ήχου, με άμεσο αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόσβεση. Τέλος η απόσβεση δεν είναι ίδια σε όλα τα υλικά. Έτσι σε σχέση με τα μέταλλα, τα σύνθετα έχουν μεγαλύτερη απόσβεση λόγω της ετερογενούς φύσης τους.

Κεφάλαιο 4: Πιεζοηλεκτρικές Κεφαλές

4.1 Εισαγωγή

Οι κεφαλές υπερήχων (ultrasonic transducers) αποτελούν ίσως τη σημαντικότερη παράμετρο στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών με υπερήχους καθώς με το είδος, τα χαρακτηριστικά και, κατ' επέκταση, τις ιδιότητες μιας κεφαλής υπερήχων, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία και η εγκυρότητα ενός ελέγχου.

Στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών χρησιμοποιούνται αποκλειστικά πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, δηλαδή αισθητήρες που για την παραγωγή των υπερήχων στηρίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται μόνο πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, εντούτοις υπάρχουν διάφοροι τύποι. Η κατηγοριοποίηση των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών είναι ένα αντικείμενο που αλλάζει, ανάλογα με την ακολουθούμενη μέθοδο ελέγχου και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Κάθε τύπος κεφαλής λειτουργεί σύμφωνα με συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου και τα κατασκευαστικά της στοιχεία της προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες, που την καθιστούν κατάλληλη να ανταπεξέλθει σε ορισμένες μόνο εφαρμογές. Γίνεται αντιληπτό ότι δεν υπάρχουν κεφαλές οι οποίες να ικανοποιούν όλα τα είδη ελέγχου και όλες τις εφαρμογές.

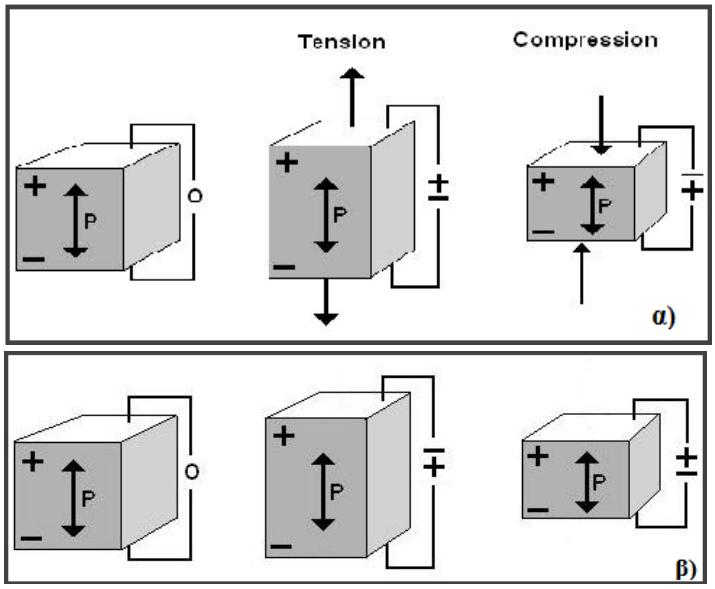
4.2 Αρχή Παραγωγής Υπερήχων-το Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο

Η μετατροπή των ηλεκτρικών παλμών σε μηχανικές δονήσεις/μετατοπίσεις και η μετατροπή των επιστρεφόμενων μηχανικών δονήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια είναι η βάση για τον έλεγχο με υπερήχους. Το ενεργό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι η καρδιά του αισθητήρα δεδομένου ότι μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική ενέργεια, και αντίστροφα. Το ενεργό στοιχείο είναι βασικά ένα κομμάτι πολωμένου υλικού (δηλ. μερικά μέρη του μορίου του είναι θετικά φορτισμένα, ενώ άλλα μέρη του μορίου είναι αρνητικά

φορτισμένα). Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό, τα πολωμένα μόρια θα ευθυγραμμιστούν με το ηλεκτρικό πεδίο, με συνέπεια τη δημιουργία δίπολων μέσα στη μοριακή ή κρυσταλλική δομή του υλικού. Αυτή η ευθυγράμμιση των μορίων θα αναγκάσει το υλικό να αλλάξει διαστάσεις. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως electrostriction. Επιπλέον, ένα μόνιμα πολωμένο υλικό όπως ο χαλαζίας (SiO2) ή titanate βάριου (BaTiO3) θα παραγάγει ηλεκτρικό πεδίο όταν το υλικό αλλάζει διαστάσεις ως αποτέλεσμα μιας επιβληθείσας μηχανικής δύναμης. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **πιεζοηλεκτρικό.**

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

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο όμως λειτουργεί και αντίστροφα. 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 την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Εάν για παράδειγμα με κάποιο τρόπο εμποδιστεί η αλλαγή των δύο διαστάσεων του κύβου, τότε με την τρίτη του διάσταση θα ασκεί θλιπτικές δυνάμεις στο μέσο (νερό, αέρας, μέταλλο), που 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 σαν αποτέλεσμα την παραγωγή διαμηκών κυμάτων. Το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαμηκών υπερηχητικών κυμάτων.



Σχήμα 4.1: α) Ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο **β)** Ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

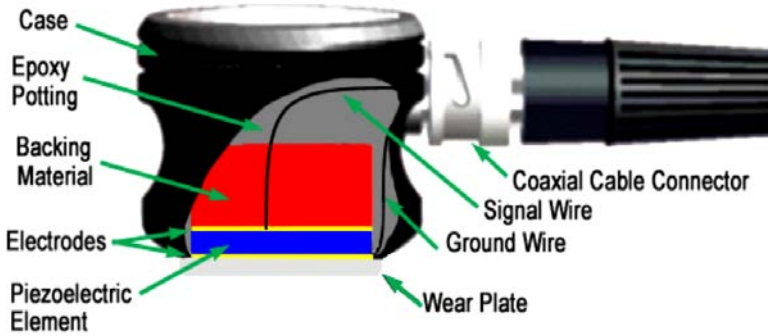
Χρησιμοποιώντας είτε την ευθεία είτε την ανάστροφη λειτουργία των πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων κατασκευάζονται οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές (transducers), οι οποίες είναι το σημαντικότερο στοιχείο ενός συστήματος υπερήχων. Το ενεργό στοιχείο των περισσότερων αισθητήρων υπερήχων σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικό κεραμικό, το οποίο μπορεί να κοπεί με διάφορους τρόπους προκειμένου να παραχθούν οι διαφορετικοί τύποι κυμάτων. Πριν την εισαγωγή των πιεζοκεραμικών τη δεκαετία του ‘50, πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι από ορυκτό χαλαζία και magnetostrictive υλικά χρησιμοποιήθηκαν πρώτα. Όταν ανακαλύφθηκαν τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, έγιναν σύντομα το κυρίαρχο υλικό για αισθητήρες λόγω των καλών πιεζοηλεκτρικών ιδιοτήτων τους και της ευκολίας κατασκευής τους σε ποικίλες μορφές και μεγέθη. Το πρώτο πιεζοκεραμικό γενικής χρήσης ήταν τιτανιούχο βάριο, ακολουθούμενο το ‘60 από ζιρκόνιο του μολύβδου (PZT: Pb[ZrTi]O3).

Το πάχος του στοιχείου προσδιορίζει την επιθυμητή συχνότητα του αισθητήρα. Ένα λεπτό στοιχείο δονείται με μήκος κύματος διπλάσιο του πάχους του. Έτσι τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία κόβονται σε πάχος μισού του επιθυμητού μήκους κύματος. Όσο υψηλότερη η συχνότητα του αισθητήρα τόσο λεπτότερο το ενεργό στοιχείο (Λούτας 2013).

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.

4.3 Είδη Αισθητήρων

Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.2, οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές δημιουργούνται από την τοποθέτηση του κρύσταλλου σε κατάλληλο περίβλημα και σε απόλυτη επαφή με το υλικό υποστήριξης (backing material), για να επιτυγχάνεται μικρή διάρκεια παλμού. Το υλικό υποστήριξης είναι συνήθως epoxy (πλαστικό με ισχυρή απορρόφηση).



Σχήμα 4.2: Τα κύρια συστατικά μέρη ενός τυπικού αισθητήρα επαφής

Μπροστά από τον κρύσταλλο υπάρχει ακρυλικό υλικό, προκειμένου να διαφυλάσσεται ο κρύσταλλος από τριβή, φθορά ή σπάσιμο. Αυτό το ακρυλικό υλικό μπορεί να έχει την μορφή "σφήνας", ώστε να δίνεται η κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης στη διεπιφάνεια ακρυλικού υλικού- δοκιμίου δημιουργώντας έτσι τις γωνιακές κεφαλές που θα αναπτυχθούν σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Η βασική κατηγοριοποίηση των αισθητήρων γίνεται αρχικά με βάση το εάν πρόκειται για κεφαλές επαφής ή βύθισης, εν συνεχεία μονού ή διπλού στοιχείου εάν αποτελούνται δηλαδή από έναν ή δύο κρυστάλλους αντίστοιχα και τέλος αν πρόκειται για αισθητήρες κάθετης ή γωνιακής πρόσπτωσης.

4.3.1 Αισθητήρες Επαφής

Κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής είναι οι κεφαλές που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον και πρόκειται για αισθητήρες που τα αποτελούμενα μέρη τους είναι εκείνα που ήδη έχουν περιγραφεί στην εισαγωγή. Κατά τον έλεγχο ενός δοκιμίου με χρήση κεφαλής επαφής, τα ηχητικά κύματα εισέρχονται στο υλικό με άμεση επαφή κεφαλής-δοκιμίου ή μέσω κάποιου υλικού σύζευξης όπως νερό, λάδι ή γλυκερίνη, τόσο για την προστασία του αισθητήρα από φθορά λόγω τριβής όσο και για την μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας του προς εξέταση δοκιμίου.

Οι σημαντικότερες κεφαλές επαφής είναι:

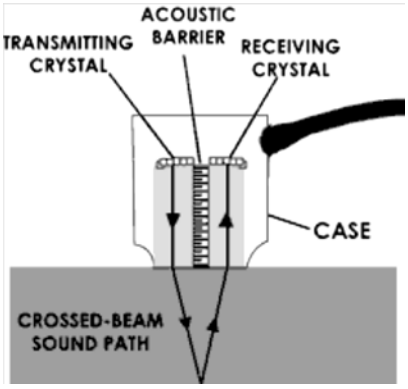
- **Κάθετες απλές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές**

Οι απλές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές έχουν ένα μονό κρύσταλλο και λειτουργούν με την μέθοδο παλμού-ηχούς που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Με λίγα λόγια μια απλή κεφαλή εκπέμπει προς το εξεταζόμενο υλικό παλμούς μερικών μηκών κύματος κατά διαλείμματα μερικών μsec. Στα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα, όπου ο κρύσταλλος αδρανεί, δέχεται τον ανακλώμενο παλμό από το άλλο άκρο του υλικού ή από οποιαδήποτε ασυνέχεια του υλικού.

Σχήμα 4.3: Τυπικές απλές πιεζοηλεκτρικές κεφαλές

- **Κάθετες κεφαλές διπλού στοιχείου**

Οι διπλές κεφαλές έχουν δύο κρυστάλλους, οι οποίοι λειτουργούν συνεχώς, ο μεν ένας ως πομπός υπερήχων, ο δε άλλος ως δέκτης υπερήχων (Σχήμα 4.4). Οι κρύσταλλοι είναι ελαφρώς κεκλιμένοι υπό γωνία 0° έως και 12°, ανάλογα με την χρήση τους. Με τον τρόπο αυτόν αυξάνεται η ευαισθησία των κεφαλών στα μικρά βάθη. Μεταξύ των δύο κρυστάλλων υπάρχει ηχομόνωση από φελλό.



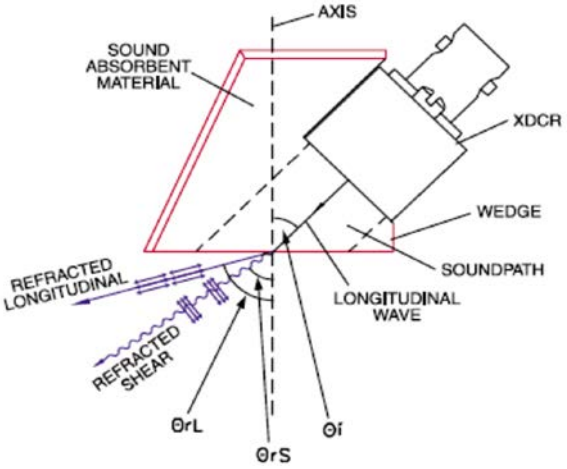
Σχήμα 4.4: Σκαρίφημα κάθετης κεφαλής διπλού στοιχείου

Οι διπλές κεφαλές πλεονεκτούν έναντι των απλών στο ότι δεν παρουσιάζουν νεκρή ζώνη. Νεκρή ζώνη είναι ο χρόνος κρούσης του κρυστάλλου και στην ουσία απεικονίζεται στην οθόνη σαν μια προέκταση του αρχικού παλμού. Σφάλματα ή άλλοι ανακλαστήρες που βρίσκονται στην περιοχή της νεκρής ζώνης της δέσμης δεν μπορούν να ανιχνευτούν. Συμπερασματικά οι διπλές κεφαλές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανίχνευση ατελειών πολύ κοντά στην επιφάνεια του υλικού.

- **Γωνιακές κεφαλές μονού κρυστάλλου**

Οι γωνιακές κεφαλές φέρουν ένα σφηνοειδές στέλεχος επαφής από plexiglass (που κοινά λέγεται πέλμα ή παπουτσάκι), πάνω στο οποίο επικάθεται ο κρύσταλλος, και είναι διαμορφωμένο κατά διάφορες γωνίες. Η γωνία της σφήνας καθορίζει την γωνία με την οποία ο υπέρηχος προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια (γωνία προσπτώσεως). Εν συνεχεία σύμφωνα με το νόμο του Snell όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, από αυτή τη γωνία καθορίζεται και η γωνία με την οποία ο ήχος διαπερνά το δοκίμιο (γωνία διαθλάσεως). Το

ηχοαπορροφητικό υλικό (υλικό απόσβεσης), στο πίσω μέρος του κρυστάλλου ελέγχει το μήκος των παλμών υπερήχων απορροφώντας την ηχητική ενέργεια και παράγοντας οξείς και βραχείς παλμούς. Οι γωνιακές κεφαλές χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον έλεγχο των συγκολλήσεων.

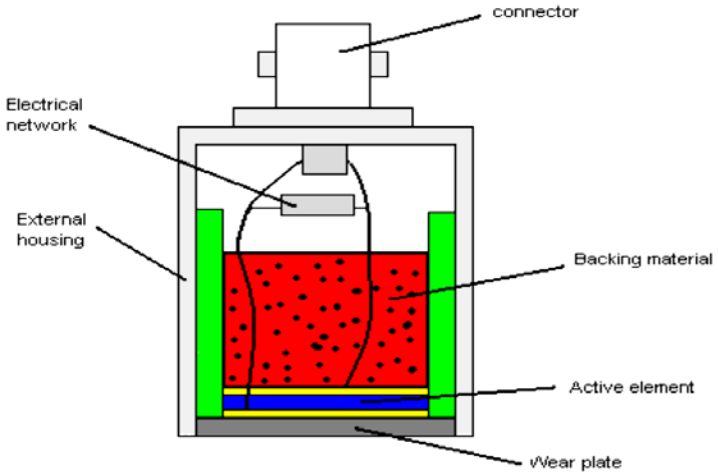


Σχήμα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση βασικών χαρακτηριστικών γωνιακής κεφαλής

Όπως προαναφέρθηκε κατά τον έλεγχο των δοκιμίων της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν κυρίως κάθετες κεφαλές μονού κρυστάλλου, και επιπρόσθετα κεφαλές βύθισης για τον εντοπισμό κάποιων σφαλμάτων. Για τον λόγο αυτό θα ακολουθήσει μία σύντομη περιγραφή και των κεφαλών βύθισης.

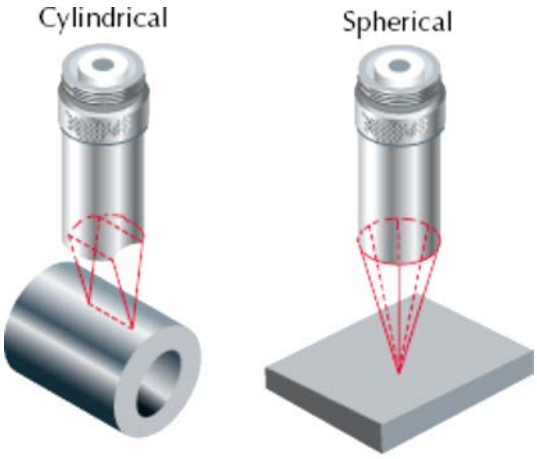
4.3.2 Αισθητήρες Εμβάπτισης

Οι αισθητήρες εμβάπτισης αποτελούνται από τα ίδια μέρη (Σχήμα 4.6) που παρουσιαστήκαν στην εισαγωγή. Με τον όρο εμβαπτιζόμενες χαρακτηρίζονται όλες οι κεφαλές που χρησιμοποιούνται για δοκιμές σε υγρό περιβάλλον και λειτουργούν μόνο βυθισμένες σε υγρό, χωρίς να έρχονται σε επαφή με το αντικείμενο που εξετάζεται.



Σχήμα 4.6: Δομή πιεζοηλεκτρικής κεφαλής

Η βασικότερη κατηγορία αυτών των αισθητήρων είναι οι εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές με εστίαση (Σχήμα 4.7). Οι εστιαζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές είναι διαθέσιμες σε δύο τύπους, στις σφαιρικά εστιαζόμενες (spherical) και στις κυλινδρικά εστιαζόμενες (cylindrical). Η εστίαση επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, είτε με την προσαρμογή ακουστικών φακών στις επίπεδες κεφαλές, είτε δημιουργώντας καμπυλότητα στο ίδιο το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο των κεφαλών.



Σχήμα 4.7: Εστιαζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές

Σκοπός της εστίασης είναι η συγκέντρωση περισσότερης ακουστικής ενέργειας σε συγκεκριμένο σημείο, ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα της κεφαλής.

4.4 Επιλογή Πιεζοηλεκτρικής Κεφαλής για τον Έλεγχο Σύνθετων Υλικών

Η επιλογή της κεφαλής είναι καθοριστική, αρχικά για τη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων της πειραματικής διάταξης των υπερήχων και στη συνέχεια για τη συλλογή και την ποιότητα των δεδομένων από τον έλεγχο των εξεταζόμενων υλικών. Η επιλογή κεφαλής για μια δοκιμή υπερήχων επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους της δοκιμής και του υλικού του εκάστοτε δοκιμίου. Σ' αυτές τις παραμέτρους περιλαμβάνονται: το είδος και το μέγεθος των ελαττωμάτων που θα ανιχνευθούν, το είδος του υλικού και η απόσταση που πρέπει να διατρέξει ο ήχος μέσα στο υλικό.

Η σωστή επιλογή κατάλληλου αισθητήρα για την διεξαγωγή του ελέγχου γίνεται ακόμα πιο ζωτικής σημασίας κατά τον έλεγχο πολύστρωτων σύνθετων υλικών, καθώς τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά είναι εκ κατασκευής ετερογενή και ανισότροπα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων σε σχέση με άλλα υλικά.

Επομένως, το πρώτο μέλημα του χειριστή, που διεξάγει τον έλεγχο πολύστρωτων σύνθετων υλικών, είναι να επιλέξει μια κεφαλή που θα παρέχει ικανή διεισδυτική ικανότητα ώστε να ελεγχθεί το υλικό σε όλο το πάχος του. Η διαδικασία επιλογής ξεκινά με τον προσδιορισμό της κεντρικής συχνότητας (test frequency) της κεφαλής.

Η συχνότητα αρχικά επηρεάζει το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων υπερηχητικών κυμάτων. Όπως είναι γνωστό, αλλάζοντας τη συχνότητα όταν η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή, για δεδομένο υλικό, αλλάζει το μήκος κύματος των κυμάτων. Με αύξηση της συχνότητας και με σταθερή ταχύτητα του ήχου, το μήκος κύματος μειώνεται. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται έχει σημαντικό αντίκτυπο στην πιθανότητα ανίχνευσης των ατελειών. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι μια ατέλεια θα πρέπει να έχει μέγεθος μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται, ώστε να υπάρχει αρκετή πιθανότητα να ανιχνευθεί.

Εξίσου σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζονται με την μεταβολή της συχνότητας της κεφαλής είναι η ευαισθησία της και η διακριτική της ικανότητα. Η ευαισθησία μίας κεφαλής υπερήχων χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη ασυνέχεια (ανακλαστήρα) που μπορεί να ανιχνεύσει, ενώ με τον όρο διακριτική ικανότητα δηλώνεται η ικανότητα διάκρισης μεταξύ δύο πολύ κοντινών ατελειών. Γενικότερα ισχύει ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα, η δέσμη γίνεται στενότερη, προσφέροντας καλύτερη ευαισθησία και διακριτική ικανότητα.

Η αύξηση όμως της κεντρικής συχνότητας της κεφαλής δεν επηρεάζει μόνο θετικά την απόδοση της. Το βασικό ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζεται είναι η μείωση της διεισδυτικής ικανότητας της υπερηχητικής δέσμης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο λόγω της απόσβεσης που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά, εάν αναλογιστούμε την προαναφερθείσα ακουστική τους συμπεριφορά. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι, στα σύνθετα υλικά η εκλογή της καταλληλότερης συχνότητας είναι συνάρτηση του πάχους του εξεταζόμενου υλικού, του πάχους των στρώσεων αν πρόκειται για πολύστρωτο υλικό, καθώς επίσης και του μεγέθους των ατελειών που επιθυμούμε να εντοπίσουμε. Οι κεφαλές υψηλής συχνότητας είναι κατάλληλες για την εξέταση σύνθετων υλικών μικρού πάχους. Σε υλικά με μεγαλύτερο πάχος, λόγω του υψηλού συντελεστή απόσβεσης, η ηχητική δέσμη δεν καταφέρνει να εισχωρήσει σε όλο το πάχος του υλικού, με αποτέλεσμα να μένουν περιοχές που δεν εξετάζονται. Συμπερασματικά, όσο αυξάνεται το πάχος του πολύστρωτου σύνθετου υλικού, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κεφαλές με χαμηλότερη συχνότητα, ώστε να ελεγχθεί το υλικό σε όλο το πάχος του.

Τέλος όσον αφορά στην συχνότητα του αισθητήρα, η μεταβολή της επηρεάζει και την απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης. Γενικά ισχύει ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα της κεφαλής έχουμε μεγαλύτερη απόσβεση του σήματος.

Στην συνέχεια ακολουθεί ο συνοπτικός Πίνακας 4.1 για το πως επηρεάζεται η απόδοση του αισθητήρα μας με την μεταβολή της συχνότητας.

Πίνακας 4.1: Μεταβολή απόδοσης κεφαλής συναρτήσει της μεταβολής της κεντρικής συχνότητας

Χαμηλή Συχνότητα	**Υψηλή Συχνότητα**
Μεγάλο μήκος κύματος	Μικρό μήκος κύματος
Μεγαλύτερος διασκορπισμός δέσμης	Μικρότερος διασκορπισμός δέσμης
Καλύτερη διεισδυτικότητα	Χειρότερη διεισδυτικότητα
Μικρότερη απόσβεση	Μεγαλύτερη απόσβεση
Μικρότερη ευαισθησία	Μεγαλύτερη ευαισθησία

Η διάμετρος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα για να επιτευχθεί όσο τον δυνατόν αποδοτικότερος έλεγχος ενός υλικού. Η διάμετρος της ηχητικής δέσμης καθορίζει την ευαισθησία της κεφαλής, καθώς όσο μικρότερη είναι τόσο περισσότερη ενέργεια ανακλάται από τις ατέλειες. Η απόκλιση της δέσμης ελαττώνεται με την αύξηση της διαμέτρου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, αλλά είναι ένα φαινόμενο που δεν επηρεάζει τον έλεγχο των σύνθετων υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πάχη που ελέγχονται είναι μικρά, της τάξεως των χιλιοστών ή εκατοστών, με αποτέλεσμα η απόκλιση να θεωρείται αμελητέα. Επιπλέον με την αύξηση της διαμέτρου μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερη διεισδυτικότητα της ηχητικής δέσμης με λιγότερη αποδυνάμωση.

Πίνακας 4.2: Μεταβολή απόδοσης κεφαλής συναρτήσει της μεταβολής της διαμέτρου της

Μεγάλη Διάμετρος	**Μικρή Διάμετρος**
Μεγαλύτερη Διεισδυτικότητα	Χειρότερη Διεισδυτικότητα
Μικρότερος διασκορπισμός δέσμης	Μεγαλύτερος διασκορπισμός δέσμης
Μικρότερη απόσβεση	Μεγαλύτερη απόσβεση
Μικρότερη ευαισθησία	Μεγαλύτερη ευαισθησία

Τέλος ο χειριστής πέρα από την κατάλληλη συχνότητα και διάμετρο της κεφαλής, πρέπει να επιλέξει μεταξύ κεφαλών μονού ή διπλού κρυστάλλου. Τα πλεονεκτήματα του μονού κρυστάλλου είναι η καλύτερη διεισδυτικότητα για ίδιο μέγεθος κεφαλής και η μεγαλύτερη ευαισθησία, ενώ όσον αφορά στις κεφαλές διπλού κρυστάλλου βασικό χαρακτηριστικό τους είναι το γεγονός ότι δεν παρουσιάζουν νεκρή ζώνη, πράγμα που σημαίνει ότι εμφανίζουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα για σφάλματα που βρίσκονται κοντά στη επιφάνεια του υλικού.

Κεφάλαιο 5: Μη Καταστροφικός Έλεγχος με Υπερήχους

5.1 Ιστορική Αναδρομή

Πριν από το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το sonar , η τεχνική αποστολής ηχητικών κυμάτων μέσω του νερού και η μελέτη των ανακλάσεων χρησιμοποιήθηκε για να χαρακτηρίσει αντικείμενα στο νερό και ενέπνευσε τους πρώτους ερευνητές υπερήχων για να ερευνήσουν τους τρόπους να εφαρμοστεί η ιδέα στην ιατρική διάγνωση. Το 1929 και το 1935, ο Sokolov μελέτησε τη χρήση των υπερηχητικών κυμάτων στην ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων. Ο Mulhauser, το 1931, έλαβε ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη χρησιμοποίηση των υπερηχητικών κυμάτων, χρησιμοποιώντας δύο αισθητήρες για να ανιχνεύσει ατέλειες σε στερεά.

Αμέσως μετά το τέλος του Δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου, οι ερευνητές στην Ιαπωνία άρχισαν να ερευνούν τις ιατρικές διαγνωστικές ικανότητες του υπερήχου. Τα πρώτα υπερηχητικά όργανα χρησιμοποίησαν μια απεικόνιση κυματομορφών σε οθόνη παλμογράφου . Η δουλειά των Ιαπώνων στον υπέρηχο ήταν άγνωστη σχετικά στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη μέχρι τη δεκαετία του '50. Οι ερευνητές παρουσίασαν έπειτα στη διεθνή ιατρική κοινότητα τα συμπεράσματά τους στη χρήση του υπερήχου για να ανιχνεύσουν τους χολόλιθους καθώς επίσης και καρκινικούς όγκους. Οι πρωτοπόροι στον τομέα του υπερήχου στις Ηνωμένες Πολιτείες προσέφεραν πολλές καινοτομίες και σημαντικές ανακαλύψεις κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών. Οι ερευνητές έμαθαν να χρησιμοποιούν τον υπέρηχο για να ανιχνεύσουν πιθανό καρκίνο και για να απεικονίσουν τους όγκους σε ζωντανά υποκείμενα και σε ιστούς.

Ο έλεγχος με υπερήχους (UT) ασκείται εδώ και πολλές δεκαετίες. Οι αρχικές γρήγορες εξελίξεις στον εξοπλισμό που ευνοήθηκαν από τις τεχνολογικές προόδους από το 1950

συνεχίζονται μέχρι σήμερα με την εξέλιξη στους υπολογιστές να έχει δώσει την δυνατότητα στους τεχνικούς για χρήση μικρότερων οργάνων με σαφώς περισσότερες ικανότητες από τα αρχικά. Μαζί με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, ο έλεγχος κίνησης και η ρομποτική έχουν συμβάλει στην πρόοδο των επιθεωρήσεων με υπερήχους. Υπολογιστές μπορούν να προγραμματιστούν για να επιθεωρήσουν μεγάλα, σύνθετης γεωμετρίας αντικείμενα, με ένα ή πολλαπλούς αισθητήρες.

Σήμερα, έχουν αναπτυχθεί ποσοτικές θεωρίες για να περιγράψουν την αλληλεπίδραση των υπερήχων με τις ατέλειες. Οι ποσοτικές περιγραφές από ΜΚΕ, όπως η πιθανότητα της ανίχνευσης μιας ατέλειας, έχουν γίνει αναπόσπαστο τμήμα της στατιστικής αξιολόγησης του κινδύνου. Οι διαδικασίες μέτρησης που αναπτύχθηκαν αρχικά για τα μέταλλα έχουν επεκταθεί και σε πιο προηγμένα υλικά όπως τα σύνθετα, όπου η ανισοτροπία και η ανομοιογένεια είναι σημαντικά ζητήματα. Η ταχείας πρόοδος στις ικανότητες ψηφιοποίησης και υπολογιστικών ικανοτήτων έχουν αλλάξει τις μεθόδους απεικόνισης πολλών οργάνων ελέγχου καθώς και τον τύπο των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων του ελέγχου. Υψηλής ευκρίνειας συστήματα απεικόνισης και δυνατότητες πολλαπλών μετρήσεων για το χαρακτηρισμό μιας ατέλειας έχουν προστεθεί στις διαθέσιμες επιλογές. Το ενδιαφέρον αυξάνεται όχι μόνο στην ανίχνευση, χαρακτηρισμό και ταξινόμηση των ατελειών, αλλά και στον χαρακτηρισμό των υλικών. Οι στόχοι κυμαίνονται από τον προσδιορισμό των θεμελιωδών μικροδομικών χαρακτηριστικών όπως το μέγεθος των κόκκων, ο προσανατολισμός τους ή το πορώδες, ως τις ιδιότητες του υλικού που σχετίζονται με μηχανισμούς αστοχίας όπως η κόπωση, ο ερπυσμός, και η δυσθραυστότητα.

5.2 Διατάξεις Ελέγχου με Υπερήχους

5.2.1 Εισαγωγή

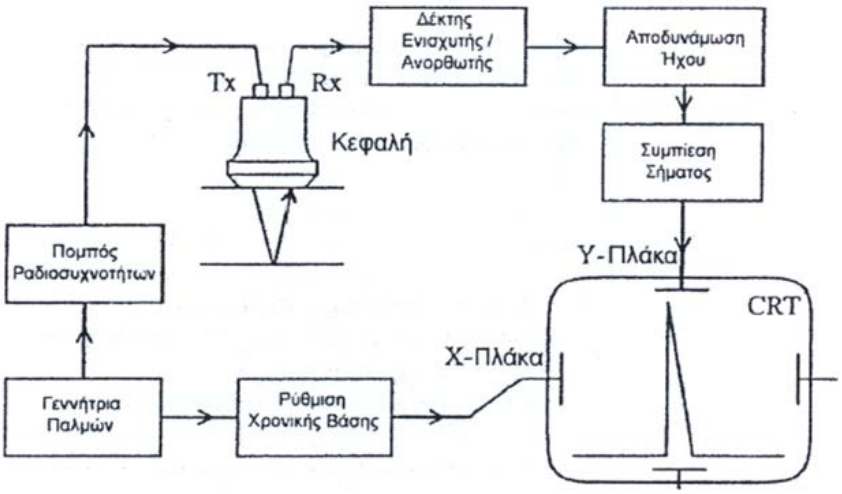
Ο έλεγχος με υπερήχους σε προϊόντα από σύνθετα υλικά διεξάγεται είτε κατά την παραγωγική διαδικασία, είτε σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας, παρακολουθώντας την κατασκευή σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αναλόγως του είδους ελέγχου, χρησιμοποιείται ο κατάλληλος εξοπλισμός.

Κατά την παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιούνται κατά βάση αυτοματοποιημένες διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου και πολύ λιγότερο φορητές χειροκίνητες συσκευές. Χρησιμοποιώντας τις αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχεται περιοδικά αντιπροσωπευτικό δείγμα της παραγωγής, σύμφωνα πάντα και με τις ισχύουσες σχετικές προδιαγραφές ή οδηγίες.

Αντίθετα για τον έλεγχο κατά την λειτουργία, χρησιμοποιούνται κυρίως φορητές χειροκίνητες συσκευές. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια με την συνδρομή της τεχνολογίας, σταδιακά εισάγονται όλο και περισσότερα στοιχεία αυτοματισμού σε αυτούς τους ελέγχους.

Ανάλογα με τις διατάξεις ελέγχου αξιοποιούνται τόσο οι αντίστοιχες μεθοδολογίες σάρωσης και απεικόνισης όσο και οι κατάλληλες τεχνικές, που θα αναφερθούν αναλυτικότερα στη συνέχεια.

Ένα διάγραμμα μιας τυπικής διάταξης ελέγχου με υπερήχους θα μπορούσε να είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 5.1: Τυπικό διάγραμμα διάταξης υπερήχων με αισθητήρες πομπού-δέκτη

Η σκανδάλη, δίνει το έναυσμα για κάθε παλμό σε μια γεννήτρια παλμών, ο οποίος με τη σειρά του ενεργοποιεί τον πομπό ραδιοσυχνοτήτων που προκαλεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο στον κρύσταλλο της κεφαλής και συνεπώς προκύπτει η εκπομπή υπερήχων.

Ταυτόχρονα η σκανδάλη ενεργοποιεί τη ρύθμιση χρονικής βάσης του Παλμογράφου Καθοδικών Ακτινών (CRT) αλλά και προξενεί την εμφάνιση του αρχικού παλμού στην οθόνη του παλμογράφου. Εάν επιστρέφει ήχος στην κεφαλή, μετατρέπεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε ηλεκτρική τάση, η οποία ενισχύεται και οδηγείται στις πλάκες Y του παλμογράφου, οπότε εμφανίζεται ύψος σήματος ανάλογα με την ένταση του επιστρέφοντος ήχου. Το σήμα τοποθετείται στην οριζόντια κλίμακα, μέσω των πλακών X, με βάση το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την εκπομπή του υπερήχου μέχρι την επιστροφή του.

Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας μιας τυπικής διάταξης ελέγχου, παρόλ' αυτά με κάποιες διαφοροποιήσεις παράγονται διάφορες διατάξεις που μπορούν να ταξινομηθούν σε φορητές διατάξεις ελέγχου και αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου με εμβάπτιση.

5.2.2 Φορητές Διατάξεις Ελέγχου

Με τις φορητές συσκευές γίνεται χειροκίνητος σημειακός έλεγχος, με επαφή της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής της διάταξης πάνω στο εξεταζόμενο υλικό, αφού πρώτα η περιοχή καλυφθεί με ένα στρώμα υλικού σύζευξης (π.χ. λάδι, γράσο, γλυκερίνη ή νερό). Η τοποθέτηση υλικού σύζευξης γίνεται με σκοπό την απομάκρυνση του αέρα, ο οποίος έχει χαμηλή ακουστική αντίσταση, καθώς επίσης για το γέμισμα όλων των επιφανειακών ανωμαλιών (όπως τραχύτητα). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται τόσο το ομαλό γλίστρημα της κεφαλής πάνω στο προς εξέταση υλικό όσο και η προστασία της κεφαλής από γρήγορη φθορά.

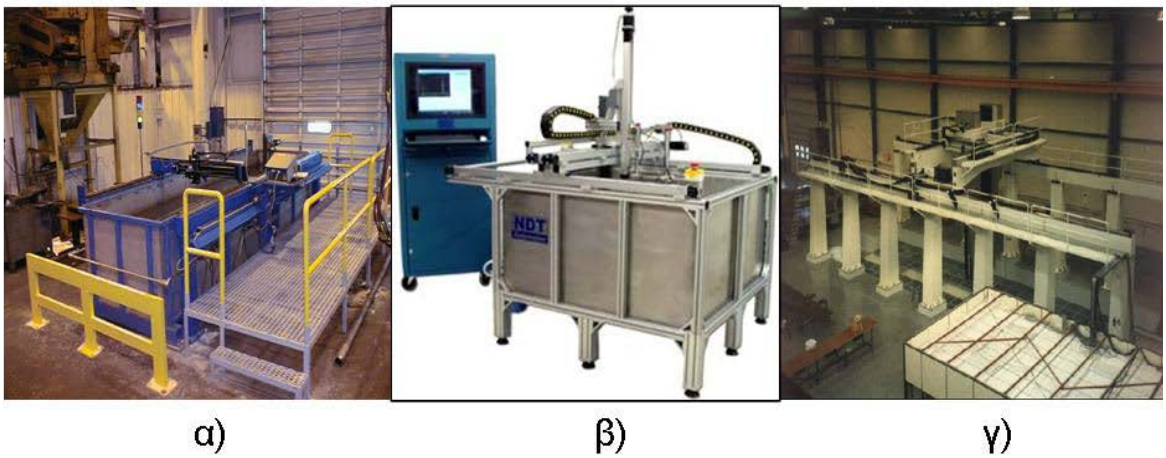
Με το χειροκίνητο έλεγχο γίνονται συνήθως παχυμετρήσεις και ανίχνευση ατελειών-βλαβών σε μια κατασκευή. Οι μέθοδοι απεικόνισης που χρησιμοποιούνται είναι αυτές των A-scan και B-scan, όμως τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια για τη δημιουργία φορητών συσκευών που να παρέχουν και άλλες απεικονίσεις όπως C-scan. Οι μέθοδοι απεικόνισης θα παρουσιαστούν εκτενέστερα σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Σχήμα 5.1: α) Χειροκίνητη εξέταση με φορητή συσκευή υπερήχων σε δοχείο πίεσης από σύνθετα υλικά **β)** φορητή συσκευή υπερήχων **γ)** φορητή συσκευή με δυνατότητες εντοπισμού και διαστασιολόγησης ατελειών

5.2.3 Αυτοματοποιημένες Διατάξεις Υπερήχων Εμβαπτιζόμενου Ελέγχου

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, συνηθέστερα το νερό, το οποίο αναλαμβάνει να διαδώσει την υπερηχητική δέσμη από την κεφαλή στο εξεταζόμενο υλικό. Η υπερηχητική δέσμη προσπίπτει κάθετα στο εξεταζόμενο υλικό. Στον έλεγχο αυτόν χρησιμοποιούνται διαμήκη υπερηχητικά κύματα. Υπάρχει όμως η δυνατότητα η πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης να γίνεται υπό γωνία και να χρησιμοποιηθούν γωνιακές τεχνικές ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται εγκάρσια κύματα ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης που επιλέγεται.

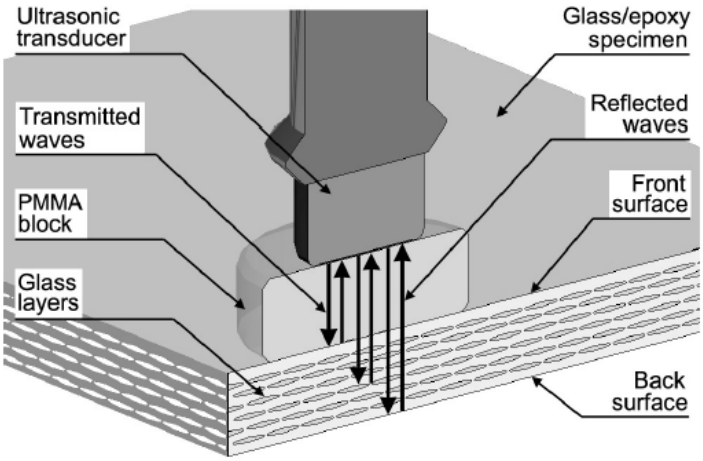
Οι διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου είναι αυτοματοποιημένες και διακρίνονται σε συμβατικές, μικρών και μέσων διαστάσεων και σε διατάξεις μεγάλου μεγέθους. Οι διατάξεις μικρού και μεσαίου μεγέθους χρησιμοποιούνται για την εξέταση αντίστοιχων σε μέγεθος τεμαχίων. Αποτελούνται από τη δεξαμενή μέσα στην οποία εμβαπτίζεται το εξεταζόμενο υλικό, από ένα ηλεκτροκίνητο φορείο πάνω στο οποίο προσαρμόζονται οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές και από μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μέσω της οποίας γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων, καθορίζεται η κίνηση του φορείου, ο τρόπος σάρωσης και γενικότερα ρυθμίζεται η λειτουργία όλης της διάταξης. Οι διατάξεις μεγάλου μεγέθους αποτελούνται από τα ίδια βασικά μέρη αλλά υπάρχουν και διατάξεις που δεν χρησιμοποιούν δεξαμενή. Στις διατάξεις αυτές δεν υπάρχει δεξαμενή για την εμβάπτιση των εξεταζόμενων υλικών, αλλά χρησιμοποιούνται ακροφύσια (squirters) που εκτοξεύουν πίδακες νερού προς το εξεταζόμενο υλικό. Μέσω των πιδάκων γίνεται η σύζευξη της κεφαλής με το εξεταζόμενο υλικό. Τέλος στις διατάξεις μεγάλου μεγέθους, ανεξάρτητα από την τεχνική εξέτασης που χρησιμοποιείται, παρέχεται η δυνατότητα η κεφαλή να ακολουθεί το προφίλ της εξεταζόμενης επιφάνειας.



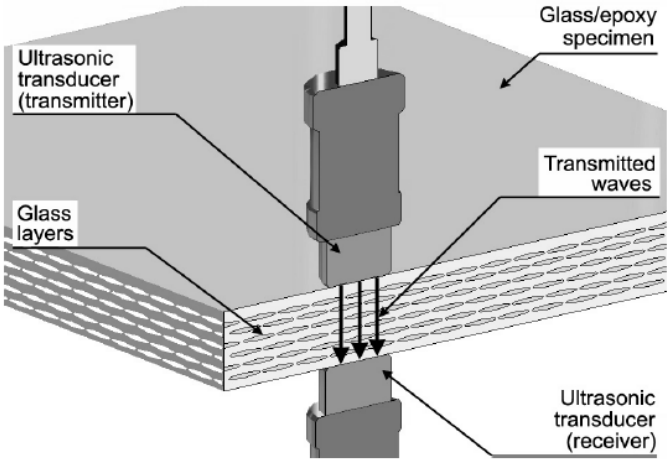
Σχήμα 5.3: Αυτοματοποιημένες διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου **α)** μεγάλων διαστάσεων με δεξαμενή **β)** μικρών και μέσων διαστάσεων **γ)** μεγάλων διαστάσεων με squirters

5.3 Μέθοδοι Ελέγχου με Υπερήχους

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών με υπερήχους. Αυτές είναι η μέθοδος της παλμοηχούς (pulse echo method) και η μέθοδος της διέλευσης (through transmission method). Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο της διέλευσης μετράται η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων, ενώ στη μέθοδο της παλμοηχούς μετράται τόσο η απόσβεση όσο και ο χρόνος διάδοσης (time of flight TOF) των κυμάτων. Ως χρόνος διάδοσης ορίζεται το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που ένα υπερηχητικό κύμα παράγεται από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή, μέχρι τη στιγμή που το ίδιο ή ένα μέρος του διεγείρει ξανά την κεφαλή, επιστρέφοντας ως ανάκλαση από το ελεγχόμενο υλικό. Μια ακόμα τεχνική διαφορά στην εφαρμογή των δύο μεθόδων είναι το γεγονός ότι στη μέθοδο της διέλευσης είναι απαραίτητη η χρήση δύο πιεζοηλεκτρικών κεφαλών, οι οποίες έχουν σχέση πομπού-δέκτη των υπερηχητικών κυμάτων, ενώ στη μέθοδο της παλμοηχούς η εξέταση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μιας μόνο κεφαλής.



Σχήμα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση χαρακτηριστικών ελέγχου σύνθετου υλικού με την μέθοδο της παλμοηχούς



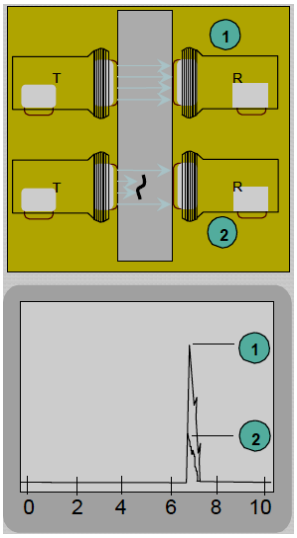
Σχήμα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση χαρακτηριστικών ελέγχου σύνθετου υλικού με την μέθοδο της διέλευσης

Αναλυτικότερα έχουμε:

- **Η μέθοδος της διέλευσης (Through transmission)**

Η μέθοδος της διέλευσης χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών, για τον χαρακτηρισμό υλικών και για την παχυμέτρηση κατασκευών με μεγάλο πάχος και υψηλό συντελεστή απόσβεσης. Οι διατάξεις ελέγχου που λειτουργούν με τη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούν δύο πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις απέναντι επιφάνειες του εξεταζόμενου υλικού και είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους. Η μια κεφαλή εκπέμπει τα υπερηχητικά κύματα, ενώ η άλλη λειτουργεί ως δέκτης της δέσμης των υπερήχων.

Η μέθοδος στηρίζεται στην καταγραφή της έντασης της υπερηχητικής δέσμης, που διέρχεται μέσα από το υλικό που εξετάζεται. Μετράται δηλαδή η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων, που μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως είναι η ύπαρξη ατελειών, η ύπαρξη διαχωριστικών επιφανειών και η ακουστική αντίσταση του υλικού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, όταν η υπερηχητική δέσμη συναντήσει μια ατέλεια ή μια επιφάνεια ανάκλασης, ένα μέρος της ανακλάται και έτσι η έντασή της που φτάνει στην κεφαλή-δέκτη είναι μικρότερη από αυτή της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης. Έτσι οι ατέλειες ανιχνεύονται συγκρίνοντας την ένταση της υπερηχητικής δέσμης που περνά μέσα από το υπό εξέταση υλικό με την ένταση της υπερηχητικής δέσμης που περνά μέσα από ένα πρότυπο αναφοράς κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό και με την ίδια διαδικασία με το εξεταζόμενο. Όταν υπάρξει ατέλεια, το ύψος του παλμού που εμφανίζεται στην οθόνη είναι μικρότερο από το ύψος του παλμού από την εξέταση του προτύπου αναφοράς.



Σχήμα 5.6: Η διάταξη ελέγχου με τη μέθοδο της διέλευσης: απεικόνιση 1 σε υγιή περιοχή του υλικού και 2 σε περιοχή του υλικού που περιέχει ατέλεια

Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος πρέπει οι ανιχνευόμενες ατέλειες να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από το ήμισυ του μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης, γιατί διαφορετικά, λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως η δέσμη περνά κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της πίσω από τις ατέλειες χωρίς να ανακλαστεί.

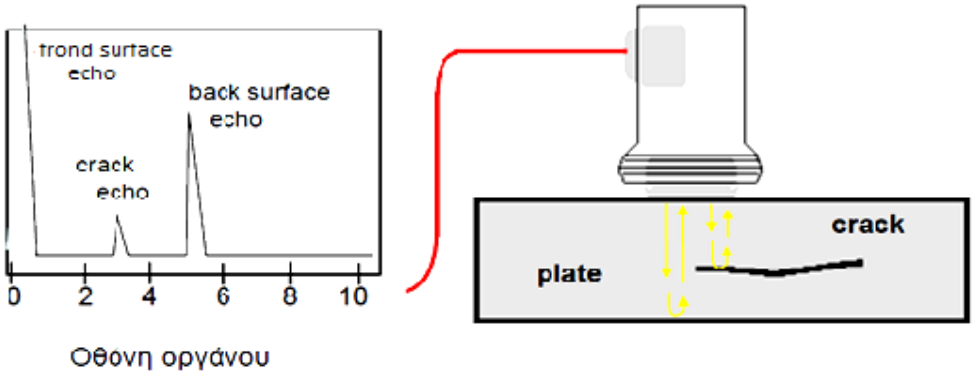
Η μέθοδος της διέλευσης παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά δεν μπορεί να προσδιορίσει το σημείο ως προς το πάχος του εξεταζόμενου υλικού όπου βρίσκεται η ατέλεια. Επιπλέον δεν έχει την δυνατότητα να ξεχωρίσει ατέλειες που παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά απόσβεσης. Δύο ακόμα μειονεκτήματα παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Πρώτον, η επίτευξη ιδανικής σύζευξης μεταξύ των κεφαλών και του εξεταζόμενου υλικού και δεύτερον η ανάγκη για τέλεια ευθυγράμμιση των δύο κεφαλών μεταξύ τους. Στην πρώτη περίπτωση, η ελλιπής σύζευξη των κεφαλών προκαλεί διαφοροποιήσεις στη ένταση της υπερηχητικής δέσμης, οι οποίες λαμβάνονται από την κεφαλή δέκτη και οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα για την κατάσταση του υλικού. Ομοίως η λανθασμένη ευθυγράμμιση οδηγεί στη λήψη υπερηχητικής δέσμης μειωμένης έντασης που δεν αποδίδεται σε ελάττωμα του υλικού.

- **Η μέθοδος της παλμοηχούς (pulse echo method)**

Η μέθοδος της παλμοηχούς είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος στον έλεγχο με υπερήχους και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δοκιμίων της παρούσας διπλωματικής. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών, για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών (E,ν,G) υλικών και για παχυμετρήσεις.

Οι περισσότερες διατάξεις υπερήχων που λειτουργούν με τη μέθοδο της παλμοηχούς αποτελούνται σε γενικές γραμμές από τις συσκευές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1 και περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 5.2.1. Στη μέθοδο της παλμοηχούς, μικρής διάρκειας υπερηχητικοί παλμοί εισάγονται στο εξεταζόμενο υλικό σε καθορισμένα χρονικά

διαστήματα. Εάν οι υπερηχητικοί παλμοί στην πορεία τους συναντήσουν μια επιφάνεια ανάκλασης, ολόκληρο το ποσό της ενέργειάς τους ή μέρος της ανακλάται. Το ποσό της ανακλώμενης ενέργειας καταγράφεται καθώς και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του αρχικού παλμού και της λαμβανόμενης ανάκλασης.



Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση της αρχής λειτουργίας της μεθόδου της παλμοηχούς

Φτάνοντας τα υπερηχητικά κύματα στην εμπρός επιφάνεια, ένα μέρος τους ανακλάται και ένα μέρος τους εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό. Το ποσό της ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων που εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό εξαρτάται από την ακουστική του αντίσταση. Το ανακλώμενο μέρος του υπερηχητικού κύματος, ακολουθώντας την ίδια διαδρομή αλλά με αντίθετη κατεύθυνση, φτάνει στην κεφαλή υπερήχων και μέσω των ηλεκτρονικών μερών της διάταξης καταγράφεται ο παλμός της εμπρός επιφάνειας (front surface echo) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.

Το μέρος της υπερηχητικής δέσμης που εισέρχεται μέσα στο εξεταζόμενο υλικό διαδίδεται με ταχύτητα η οποία εξαρτάται από το υλικό. Στην πορεία της η δέσμη ενδέχεται να συναντήσει κάποια ατέλεια-ανακλαστήρα, η οποία να είναι κάθετη ή σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης. Τότε ένα ποσό της ενέργειας της εισερχόμενης στο υλικό υπερηχητικής δέσμης ανακλάται πίσω προς την πιεζοηλεκτρική κεφαλή. Το ποσό αυτό εξαρτάται από το μέγεθος του ανακλαστήρα, από το είδος της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής και από άλλους παράγοντες που θα αναφερθούν σε επόμενες παραγράφους. Μέσω της ίδιας διαδικασίας που αναφέρθηκε για τον παλμό της πάνω επιφάνειας εμφανίζεται στην οθόνη ο παλμός crack echo (Σχήμα 5.7) ο οποίος αντιστοιχεί στην ανάκλαση που δημιουργεί η ατέλεια. Παρατηρείται ότι το ύψος του παλμού (amplitude) είναι μικρότερο από το ύψος του παλμού της εμπρός επιφάνειας. Αυτό εξαρτάται από το είδος της ατέλειας, από την ακουστική της αντίσταση, από το μέγεθος της και από τον προσανατολισμό της ως προς την υπερηχητική δέσμη.

Τέλος, μέρος της υπερηχητικής δέσμης συνεχίζει τη διαδρομή της μέσα στο εξεταζόμενο υλικό και συναντά την πίσω επιφάνεια, όπου ανακλάται και διατρέχοντας την αντίθετη πορεία φτάνει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή. Εμφανίζεται έτσι ο παλμός της πίσω επιφάνειας που στην αγγλική ορολογία ονομάζεται "back wall echo" (βλ. Σχήμα 5.7). Ο παλμός της πίσω επιφάνειας είναι πολύ σημαντικός κατά το έλεγχο με υπερήχους, καθώς από την εμφάνιση του ή όχι εξαρτάται η αξιοπιστία ενός ελέγχου.

Η λειτουργία της μεθόδου περιγράφηκε χρησιμοποιώντας ένα ιδανικό παράδειγμα που μπορεί να συναντήσει κανείς στα μέταλλα. Στα σύνθετα υλικά εμφανίζονται πολύ διαφορετικές συνθήκες, οι οποίες δημιουργούν μεγάλες δυσκολίες τόσο στη διεξαγωγή του ελέγχου όσο και στην αξιολόγηση- εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

Όλη η παραπάνω ανάλυση στηρίχθηκε στην απεικόνιση των παλμών σε μια οθόνη. Η απεικόνιση αυτή ονομάζεται απεικόνιση εύρους (Amplitude-scan or A-scan). Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφεί αναλυτικά η απεικόνιση αυτή όπως και άλλες που χρησιμοποιούν τα σύγχρονα συστήματα υπερήχων για τον μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών.

5.4 Μέθοδοι Απεικόνισης Δεδομένων

Στα συστήματα ελέγχου με υπέρηχους υπάρχουν τρείς μέθοδοι απεικόνισης των δεδομένων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι :

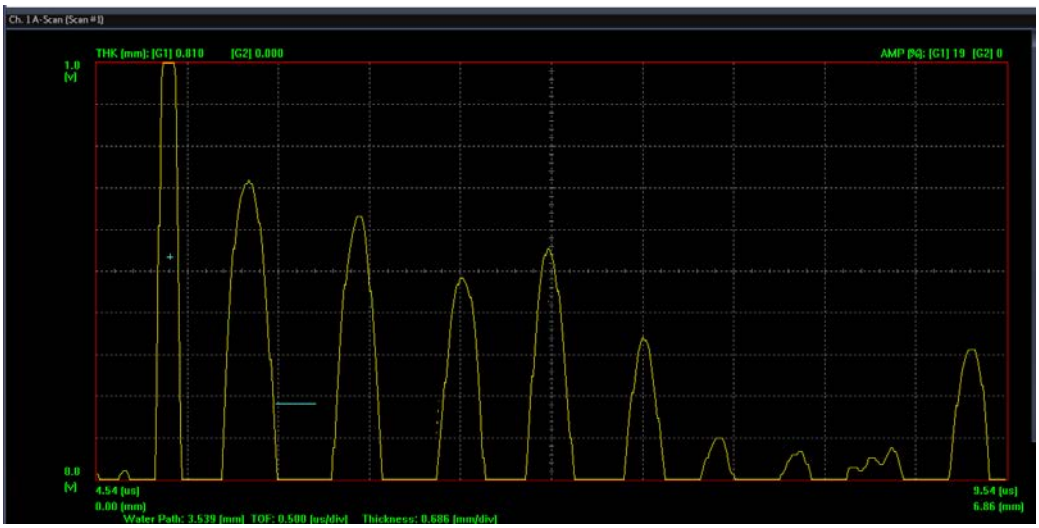
- Η απεικόνιση εύρους (Amplitude-scan) **A-scan**
- Η απεικόνιση λαμπρότητας (Brightness-scan) **B-scan**.
- Η απεικόνιση αντίθεσης (Contrast-scan) **C-scan**

Η μέθοδος A-scan είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και εμφανίζεται στις φορητές διατάξεις ελέγχου. Οι αυτοματοποιημένες διατάξεις ελέγχου εμβάπτισης δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει και τους τρεις τρόπους απεικόνισης ανάλογα με την πληροφορία που θέλει να παράγει.

Αναλυτικότερα έχουμε:

- **Απεικόνιση εύρους (Amplitude-scan) A-scan**

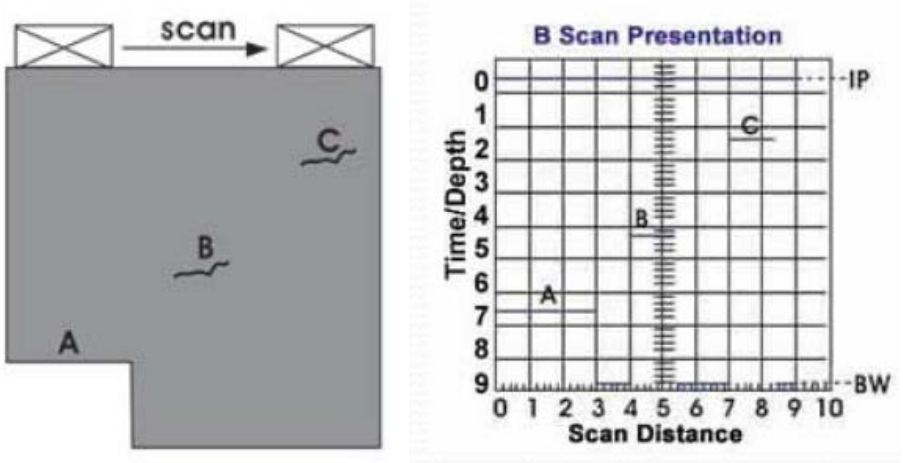
Σε ένα διάγραμμα A-scan απεικονίζεται η χρονική διάρκεια που μεσολάβησε από την εκπομπή του υπερήχου μέχρι να επιστρέψει στην κεφαλή λόγω ανάκλασης σε κάποια ατέλειας (άξονας X), και η σχετική ένταση της ανάκλασης αυτής (άξονας Y), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.8. Τα δεδομένα που προκύπτουν από τη μέτρηση του χρόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της θέσης του ανακλαστήρα, για δεδομένη ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Αντίστροφα, όταν είναι γνωστή η θέση του ανακλαστήρα, π.χ. η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας που αντιστοιχεί στο πάχος ενός δοκιμίου, δύναται να προσδιοριστεί η ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Στις διατάξεις που διαθέτουν και άλλες απεικονίσεις, το A-scan αποτελεί την βάση για την ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων ώστε να εξαχθούν οι απεικονίσεις B-scan και C-scan.



Σχήμα 5.8: Απεικόνιση A-scan από τον έλεγχο σύνθετου υλικού με ενισχυτικές ίνες γυαλιού

- **Απεικόνιση Λαμπρότητας (Brightness-scan) B-scan**

Σε ένα διάγραμμα B-scan απεικονίζεται η τομή του δοκιμίου, όπου στον οριζόντιο άξονα (βλ. Σχήμα 5.9, Scan Distance) δίνεται η θέση της ατέλειας ως προς τη διεύθυνση κίνησης της κεφαλής και στον κατακόρυφο άξονα (βλ. Σχήμα 5.9, Time\Depth) το πάχος που βρίσκεται από την εμπρός επιφάνεια. Στην απεικόνιση B-scan δύναται να καταγραφεί τόσο το σχήμα μεμονωμένων μεγάλων ασυνεχειών, όσο και η κατανομή τους στην τομή του δοκιμίου. Το B-scan αναπαράγεται με τη χρήση πυλών διέγερσης στο A-scan, δηλαδή χρονικά διαστήματα που επιθυμεί ο χρήστης να ελεγχθούν. Όποτε η ένταση των σημάτων ξεπερνά το πλάτος της πύλης, ένα σημείο παράγεται στο B-scan. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένας περιορισμός σε αυτήν την τεχνική είναι ότι πιθανοί σκεδαστές ενδέχεται να υπερκαλυφθούν από μεγαλύτερες ατέλειες κοντά στην επιφάνεια.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα B-scan

-
-

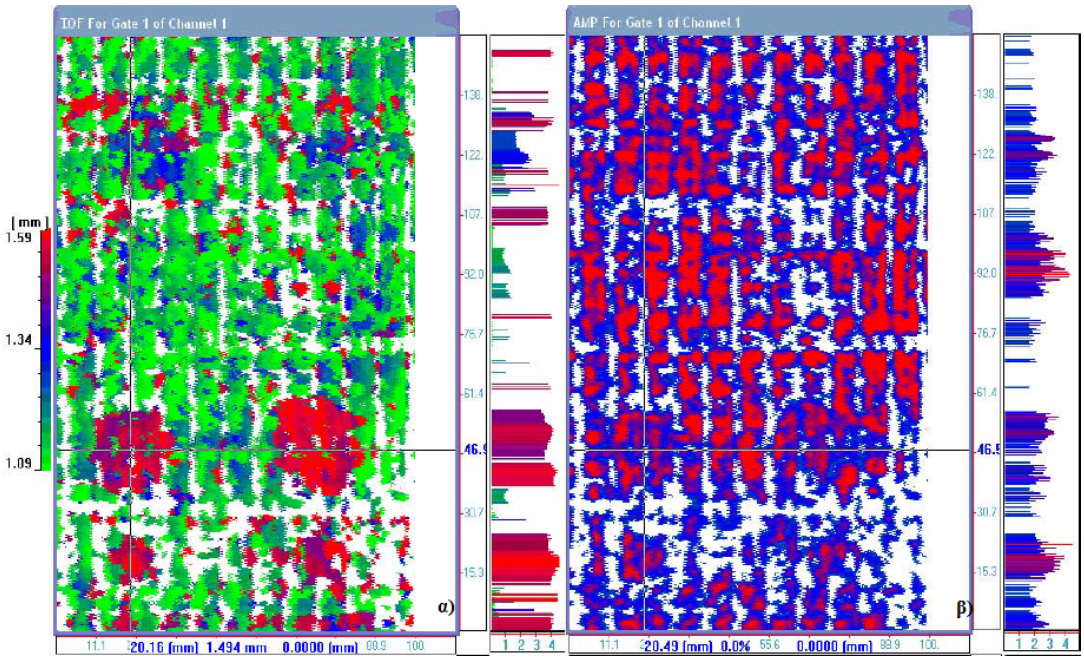
- **Η απεικόνιση αντίθεσης (Contrast-scan) C-scan**

Η μέθοδος αυτή παρέχει τη δυνατότητα της απεικόνισης μιας ασυνέχειας στην επιφάνεια-κάτοψη του δοκιμίου, για διάφορες χρονικές στιγμές του ταξιδιού της υπερηχητικές δέσμης μέσα στο προς εξέταση υλικό. Παράγεται κατόπιν συγχρονισμένης κίνησης του αισθητήρα κατά δύο διευθύνσεις, με αξιοποίηση του λαμβανόμενου σε κάθε σημείο σήματος.

Η απεικόνιση της κάτοψης του δοκιμίου σε διάφορα στιγμιότυπα επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση "χρονικών παραθύρων" (gates), στο λαμβανόμενο διάγραμμα A-scan (το gate φαίνεται στο Σχήμα 5.7 και πρόκειται για την οριζόντια γραμμή με μπλε χρώμα). Τα παράθυρα αυτά τοποθετούνται σε κατάλληλες χρονικές στιγμές, προκειμένου να σημειώνουν, καταγράφουν και απεικονίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου ή/και πιθανές ασυνέχειες της δομής του, σε διάφορα βάθη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.10. Διάγραμμα C-scan παράγεται κάθε φορά που ένας παλμός τέμνει το gate.

Υπάρχουν συγκεκριμένες στρατηγικές που ακολουθούνται τόσο για την τοποθέτηση του gate, όσο και του κατωφλιού (threshold) πάνω από το οποίο και πάνω καταγράφονται παλμοί.

Στο παραγόμενο διάγραμμα C-scan αποδίδεται γραφικά και με χρωματική διακύμανση, έγχρωμη ή της κλίμακας του γκρι, η αντίστοιχη διακύμανση του πάχους του δοκιμίου, αλλά και του ποσοστού της ακουστικής ενέργειας που ανακλάται από αυτό.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα C-scan σύνθετου δοκιμίου με ενισχυτικές ίνες γυαλιού : α) Απεικόνιση ποσοστού ανακλώμενης ακουστικής ενέργειας β) Απεικόνιση πάχους δοκιμίου

5.5 Σύγκριση Μετάλλων και Σύνθετων Υλικών κατά τον Έλεγχο με Υπερήχους.

Ενώ ο έλεγχος με υπερήχους στα μέταλλα εμφανίζει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια δεν παρουσιάζεται κάτι αντίστοιχο στον έλεγχο σύνθετων υλικών, παρά μόνο σε προηγμένους τεχνολογικά τομείς όπως η αεροναυπηγική. Το γεγονός αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τις δυσκολίες που προκύπτουν κατά τον έλεγχο των σύνθετων υλικών με υπερήχους.

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα μέταλλα είναι εκ κατασκευής ετερογενή και ανισότροπα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων. Η εναλλαγή μεταξύ στρώσεων ρητίνης και εμποτισμένων με ρητίνη ενισχυτικών στρώσεων, δημιουργεί πολλές διαχωριστικές επιφάνειες και έτσι εμφανίζονται έντονα τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διασποράς και της απορρόφησης των υπερηχητικών κυμάτων. Τα τρία αυτά φαινόμενα, που περιγράφονται με τον όρο απόσβεση προκαλούν τη μείωση της ενέργειας των κυμάτων, με συνέπεια να μειώνεται η διεισδυτική ικανότητα της ηχητικής δέσμης, καθώς περνά μέσα από τις επάλληλες στρώσεις. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των στρώσεων σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό, πράγμα που επιφέρει ανάλογη αύξηση στο πάχος του, τόσο αυξάνεται η απόσβεση των υπερηχητικών κυμάτων.

Κατά των έλεγχο με υπερήχους αρχικό μέλημα του χειριστή είναι να επιλέξει μια κατάλληλη κεφαλή με κεντρική συχνότητα τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται ο αποδοτικότερος έλεγχος. Οι κεφαλές υψηλής συχνότητας είναι κατάλληλες για την εξέταση σύνθετων υλικών μικρού πάχους. Σε υλικά με μεγαλύτερο πάχος, λόγω του υψηλού βαθμού απόσβεσης, η ηχητική δέσμη δεν καταφέρνει να διαπεράσει όλο το πάχος του υλικού, με αποτέλεσμα να μένουν περιοχές που δεν εξετάζονται. Συμπερασματικά, όσο αυξάνεται το πάχος του πολύστρωτου σύνθετου υλικού ενδείκνυται να χρησιμοποιούνται κεφαλές με χαμηλότερη συχνότητα, ώστε να ελεγχθεί το υλικό σε όλο το πάχος του.

Όπως αναφέρθηκε τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά της ηχητικής δέσμης. Ειδικά στα σύνθετα υλικά χαρακτηριστικό της διασποράς είναι οι κοντινές ανακλάσεις των οποίων το πλάτος (amplitude) μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μέσα στο υλικό. Οι κοντινές αυτές ανακλάσεις ονομάζονται «θόρυβος» ή «γρασίδι» (grass). Μέσα στους παλμούς αυτούς ενδεχομένως να βρίσκεται και κάποιος παλμός που προέρχεται από την ανάκλαση κάποιας ατέλειας. Σε αυτή τη περίπτωση επειδή είναι δύσκολο να διαχωριστεί ο εν λόγο παλμός από τον υπόλοιπο θόρυβο, δεν μπορούν να βγουν εύκολα συμπεράσματα για την ύπαρξη ατέλειας.

Τέλος όπως έχει αναφερθεί η απεικόνιση A-scan γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό ατελειών, για την παχυμέτρηση υλικών και για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου σε υλικά με γνωστό πάχος. Όλα αυτά μπορούν να συμβούν μόνο στα μέταλλα ακόμα και με φορητές συσκευές που παρέχουν μόνο την απεικόνιση A-scan. Στα σύνθετα υλικά η απεικόνιση A-scan μας δίνει τις ανακλάσεις που προέρχονται από συγκεκριμένο σημείο του υλικού. Λόγω της ετερογενούς φύσης τους, η απεικόνιση αλλάζει ριζικά από σημείο σε σημείο, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολο να γίνει οποιαδήποτε αξιολόγηση του A-scan για τον προσδιορισμό ατελειών.

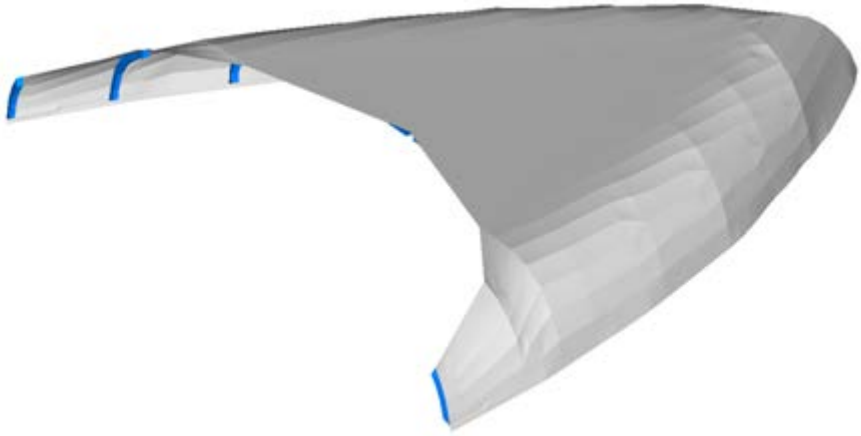
Κεφάλαιο 6: Πληροφορίες της Πειραματικής Διαδικασίας

6.1 Εισαγωγή

Με αφορμή ήδη υπάρχουσες μελέτες του ερευνητικού προγράμματος Mosaic, πραγματοποιήθηκε η κατασκευή τριών δοκιμίων τύπου sandwich (A,B,C), το καθένα από τα οποία αποτελείται από διαφορετικό συνδυασμό υλικών. Σκοπός της κατασκευής είναι τα συγκεκριμένα δοκίμια να αποτελέσουν τα πρότυπα αναφοράς (reference standards) που θα χρησιμοποιηθούν κατά τον έλεγχο με υπερήχους σε κατασκευές αποτελούμενες από τα ίδια υλικά.

Οι βασικές εφαρμογές που συναντώνται στη ναυπηγική, και που ήταν το εφαλτήριο της κατασκευής των δοκιμίων, είναι το κάλυμα πλώρης (bow enclosure) πλοίων εμπρορευματοκιβωτίων και τα μπαλκόνια των καμπινών ενός κρουαζιερόπλοιου, καθώς και ο τρόπος σύνδεσης αυτών με την υπόλοιπη μεταλλική κατασκευή του πλοίου.

Αναλυτικότερα, με τον όρο bow enclosure αναφερόμαστε σε μία σύνθετη κατασκευή με συγκεκριμένες διαστάσεις, η οποία τοποθετείται στην πλώρη του πλοίου. Το αεροδυναμικό της σχήμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1 (MOSAIC D1.2 2012), βελτιώνει το αεροδυναμικό προφίλ του πλοίου, μειώνοντας την αντίσταση του αέρα. Με τη χρήση του bow enclosure επιτυγχάνεται η προστασία του καταστρώματος και του τυχόντος υπαρκτού εκτιθέμενου φορτίου πάνω σε αυτό, από τα κύματα που προσκρούουν στην πλώρη. Επιπρόσθετα, δημιουργεί ένα καταφύγιο για το πλήρωμα, ενώ το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση ελλιμενισμού (MOSAIC D1.2 2012).



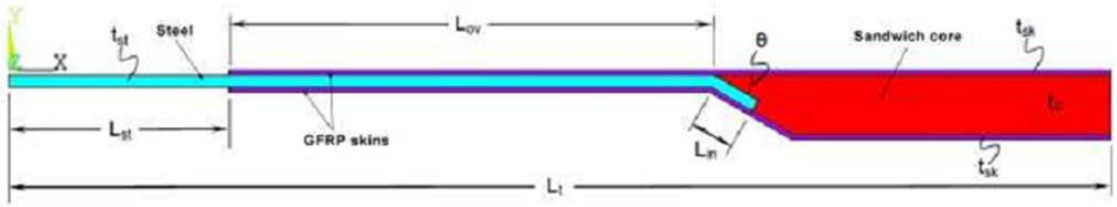
Σχήμα 6.1: Η αεροδυναμική μορφή του bow enclosure

Το bow enclosure συναντάται σε ήδη υπάρχοντα πλοία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2 και 6.3 (MOSAIC D1.2 2012), αλλά η χρήση του στη ναυπηγική είναι ακόμη περιορισμένη. Λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση του bow enclosure, αλλά και των πλεονεκτημάτων των σύνθετων υλικών στη ναυπηγική γενικότερα, υπάρχει η προοπτική ευρύτερης χρήσης της εν λόγω κατασκευής.

Σχήμα 6.2: Bow enclosure σε Platform supply vessel-Stril Polar

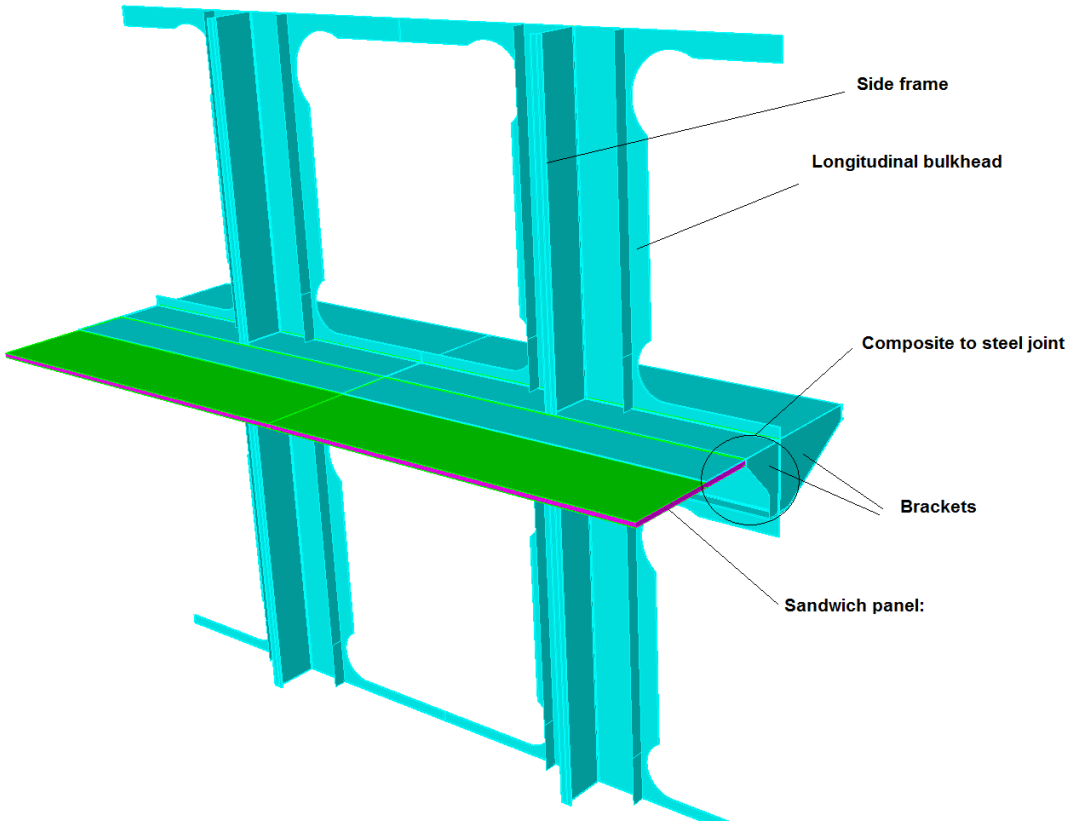
Σχήμα 6.3: Bow enclosure σε Container ship

Η κατασκευή αυτή, που αποτελείται από τον πυρήνα και από περιβλήματα σύνθετου υλικού με ενισχυτικές ίνες, συνδέεται με το υπόλοιπο μέρος του πλοίου με σύνδεση κατά συμβολή (Join Type A), όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.4 (MOSAIC D4.2 2012).



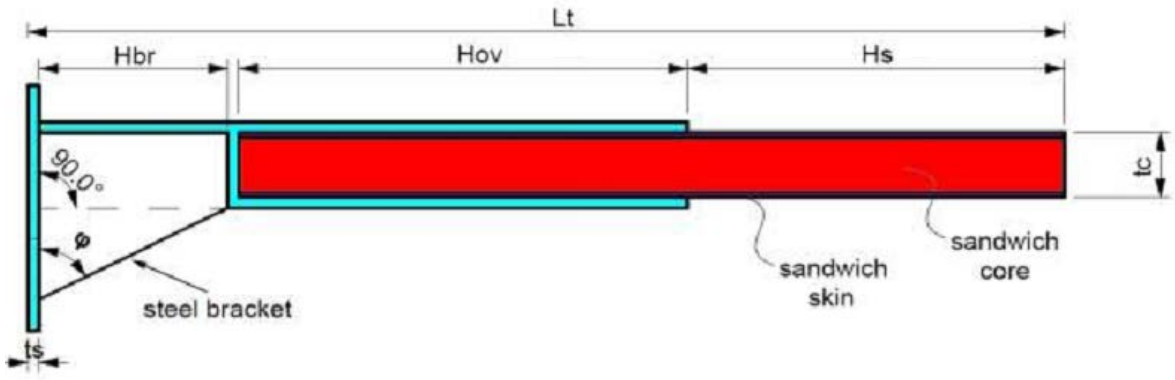
Σχήμα 6.4: Σχηματική αναπαράσταση δεσμού μεταξύ bow enclosure και μεταλλικής πλώρης του πλοίου

Όσον αφορά στην προεξοχή των μπαλκονιών, αυτή είναι μία κατασκευή που συναντάται κατά κόρον στα κρουαζιερόπλοια. Δεδομένου ότι η τάση της ναυπηγικής βιομηχανίας είναι η οικοδόμηση πλοίων με σχεδόν όλες τις καμπίνες να έχουν μπαλκόνι, το συνολικό βάρος αυτού του στοιχείου μπορεί να φτάσει εύκολα αρκετές εκατοντάδες τόνους. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε στο πλαίσιο του MOSAIC η δυνατότητα να αντικατασταθούν οι χαλύβδινες αυτές προεξοχές με αντίστοιχες κατασκευές από σύνθετα υλικά τύπου sandwich, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5 (MOSAIC D4.2 2012).



Σχήμα 6.5: Αναπαράσταση προεξοχής μπαλκονιού από υλικό τύπου sandwich

Αναλυτικότερα, αυτό που προτάθηκε ήταν η κατασκευή της προεξοχής από υλικό τύπου sandwich του οποίου τα περιβλήματα να είναι σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και το εσωτερικό από πυρήνα ξύλου Balsa. Η προεξοχή από σύνθετο υλικό θα ενώνεται με το μεταλλικό κύτος του πλοίου με δεσμό τύπου T (Joint Type C), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 (MOSAIC D4.2 2012).



Σχήμα 6.6: Σχηματική αναπαράσταση δεσμού προεξοχής μπαλκονιού και μεταλλικού κύτους του πλοίου

Βασιζόμενοι, λοιπόν, στις δύο αυτές κατασκευές, καθώς και στον τρόπο με τον οποίο ενώνονται με το μεταλλικό μέρος του πλοίου, δημιουργήθηκαν τα εξής δοκίμια τύπου sandwich :

- Δοκίμιο A: με περιβλήματα από σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα από ξύλο Balsa.
- Δοκίμια B1 και B2: με περιβλήματα από σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής με πάχη t_1 και t_2,αντίστοιχα.
- Δοκίμια C1 και C2: με περιβλήματα από χάλυβα υψηλής αντοχής και πάχη t_1 και t_2, σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα από ξύλο Balsa.

Όλα τα παραπάνω δοκίμια είναι βαθμιδωτά. Η μορφή αυτή μας έδινε τη δυνατότητα να ελέγξουμε τα επιμέρους τμήματα των δοκιμίων τύπου sandwich, αλλά και το συνδυασμό τους, και να εξάγουμε συμπεράσματα για το πώς το κάθε υλικό επηρεάζει τον εντοπισμό των ατελειών.

Τα δοκίμια αυτά, στα οποία κατά την κατασκευαστική διαδικασία είχαν τοποθετηθεί τεχνητές ατέλειες, ελέγχθηκαν με τρεις μεθόδους. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα υλικά και το μέγεθος των τεχνητών ατελειών είναι όμοια σε όλα τα δοκίμια και οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι ατέλειες επιλέχθηκαν με γνώμονα τις πιθανές θέσεις ελλατωμάτων που μπορούν να εμφανιστούν σε αντίστοιχες πραγματικές κατασκευές. Τόσο η κατασκευή, όσο και οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν θα αναλυθούν στα επόμενα υποκεφάλαια.

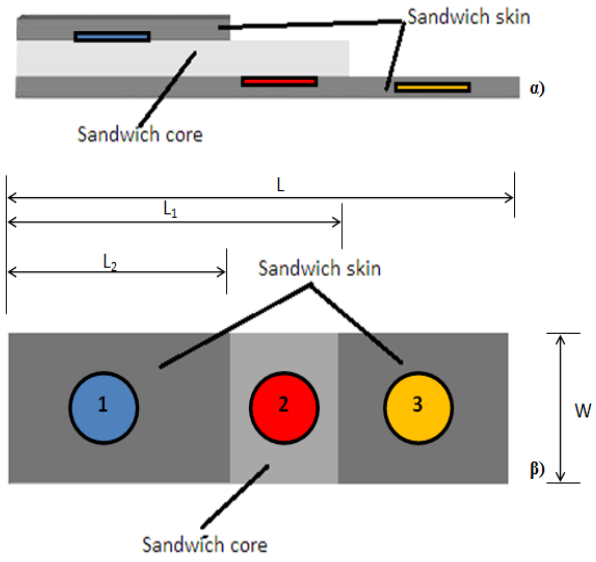
6.2 Κατασκευαστικές Πληροφορίες Δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατασκευάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι δοκιμίων, ως προς το συνδυασμό των υλικών, στο καθένα από τα οποία τοποθετήθηκαν τρεις τεχνητές ατέλειες. Σκοπός της κατασκευής αυτής ήταν να προσομοιωθούν οι κύριες μορφές ελλατωμάτων των σύνθετων υλικών και μετέπειτα να ελεγχθεί το κατά πόσο μπορεί να γίνει εντοπισμός των ατελειών αυτών με τη χρήση υπερήχων.

Όσον αφορά τα δοκίμια, αναλυτικότερα έχουμε :

- Δοκίμιο Α:

Το δοκίμιο Α είναι ένα τυπικό δοκίμιο τύπου sandwich, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.7, το οποίο αποτελείται από περιβλήματα σύνθετου υλικού με ενισχυτικές ίνες γυαλιού (GFRP), πάχους 2.5 mm έκαστο, και από τον πυρήνα από ξύλο Balsa, πάχους 30 mm. Το δοκίμιο αυτό προέκυψε από την κατασκευή bow enclosure, η οποία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελείται από περιβλήματα ινώδους σύνθετου υλικού και πυρήνα από ξύλο Balsa.



Main dimensions:

t_c = 30 mm (core thickness)

$t_{sk} \approx$ 2.5 mm (skin thickness)

L = 200 mm

L_1 = 140 mm

L_2 = 70 mm

W = 100 mm

H = 35 mm (total sandwich thickness)

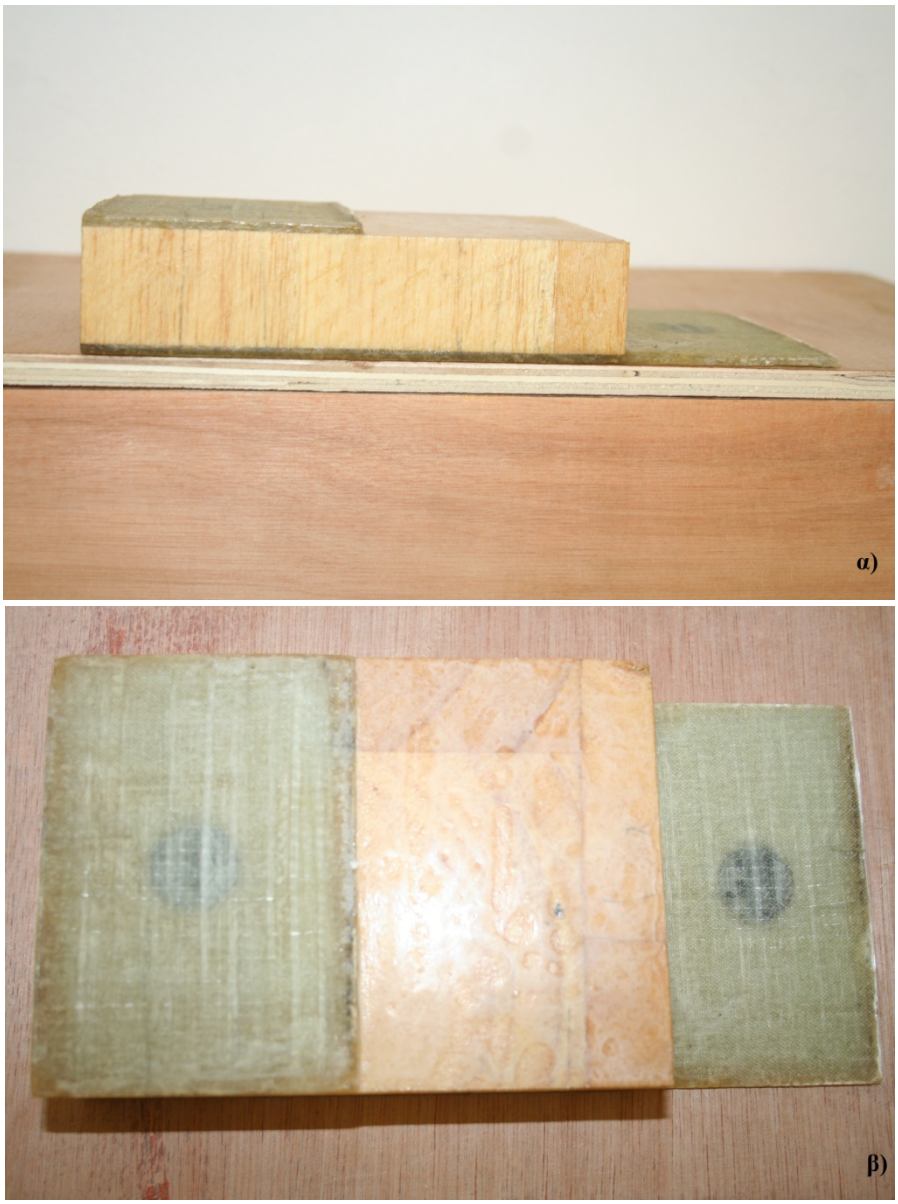
Σχήμα 6.7: Σκαρίφημα δοκιμίου Α και ο αντίστοιχες διαστάσεις : α) προφίλ και β) κάτοψη δοκιμίου

Όπως φαίνεται και στο σκαρίφημα του δοκιμίου, τοποθετήθηκαν τρεις τεχνητές ατέλειες, οι οποίες εμφανίζονται με αρίθμηση 1, 2 και 3 και με μπλε, κόκκινο και κίτρινο χρώμα αντίστοιχα. Για τη δημιουργία της ατέλειας 1 τοποθετήθηκαν δύο κυκλικά κομμάτια γυαλόχαρτου 400 grade με διάμετρο 20 mm και κολλημένα μεταξύ τους από τη μεριά της τραχιάς επιφάνειας τους, στη διεπιφάνεια του GFRP και του πυρήνα. Σκοπός της ατέλειας αυτής είναι να προσομοιάσει την αστοχία του δεσμού μεταξύ περιβλήματος και πυρήνα, η οποία αποτελεί μία πολύ συχνή μορφή αστοχίας σε κατασκευές τύπου sandwich.

Η ατέλεια 2 τοποθετήθηκε και αυτή στη διεπιφάνεια πυρήνα και περιβλήματος έχοντας τον ίδιο σκοπό με την ατέλεια 1. Για τη δημιουργία της χρησιμοποιήθηκε πολύ λεπτή στρώση από χάλυβα υψηλής αντοχής με κυκλική διατομή διαμέτρου 20 mm.

Τέλος, η ατέλεια 3 δημιουργήθηκε ακριβώς όπως και η ατέλεια 1 και τοποθετήθηκε στο μέσο περίπου του πάχους του κάτω περιβλήματος, με σκοπό να προσομοιώσει μία τυπική αποκόλληση στρώσεων ενός πολύστρωτου σύνθετου υλικού.

Το δοκίμιο που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.8.

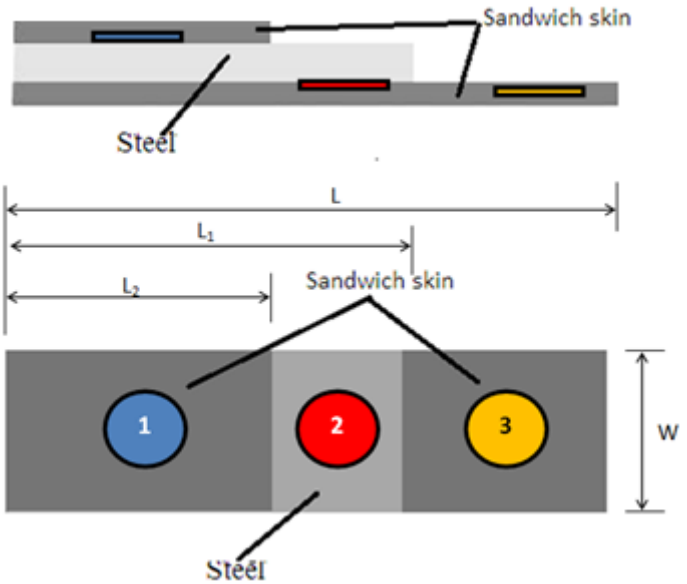


Σχήμα 6.8: Τα δοκίμιο Α που κατασκευάστηκε: α) προφίλ δοκιμίου β) κάτοψη

- Δοκίμια Β1 και Β2

Το δοκίμιο τύπου Β είναι κατασκευή sandwich με περίβλημα σύνθετου υλικού με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα από χάλυβα υψηλής αντοχής. Από αυτόν τον τύπο sandwich κατασκευάστηκαν δυο δοκίμια, το Β1 και το Β2, με διαφορετικό πάχος πυρήνα

όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Στα δύο δοκίμια τοποθετήθηκαν τρεις ατέλειες ομοίως με το δοκίμιο Α, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.9.

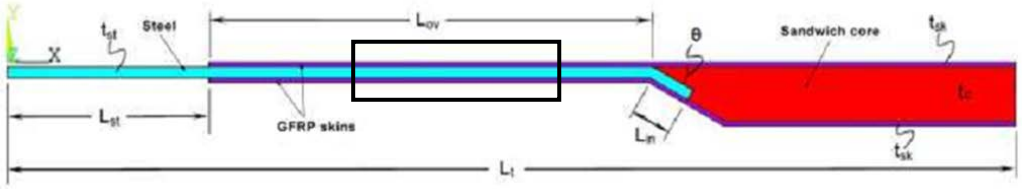


Σχήμα 6.9: Σκαρίφημα δοκιμίου Β: α) προφίλ και β) κάτοψη δοκιμίου

Πίνακας 6.1: Διαστάσεις των δοκιμίων Β1 και Β2

B1	**B2**
t_{st} = 6 mm	t_{st} = 10 mm
$t_{sk} \approx$ 2.5 mm	$t_{sk} \approx$ 2.5 mm
L = 200 mm	L = 200 mm
L_1 = 140 mm	L_1 = 140 mm
L_2 = 70 mm	L_2 = 70 mm
W = 100 mm	W = 100 mm
H = 11 mm	H = 15 mm

Τα δοκίμια τύπου Β προέκυψαν από τη σύνδεση του bow enclosure με το υπόλοιπο μέρος του πλοίου, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10: Σχηματική αναπαράσταση σύνδεσης κατα συμβολή, όπου σημειώνεται το τμήμα από το οποίο προέκυψαν τα δοκίμια τύπου Β.

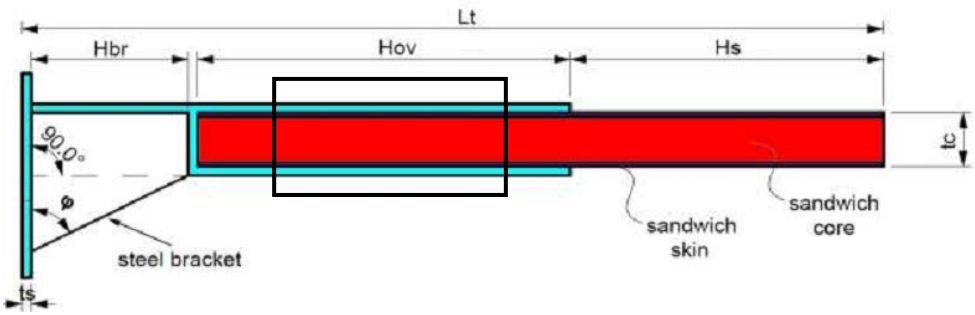
Τα προκύπτοντα δοκίμια Β1 και Β2 παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 6.11 και 6.12 αντίστοιχα:

Σχήμα 6.11: Δοκίμιο Β1: α) προφίλ β) κάτοψη δοκιμίου

Σχήμα 6.12: Δοκίμιο B2: α) προφίλ και β) κάτοψη δοκιμίου

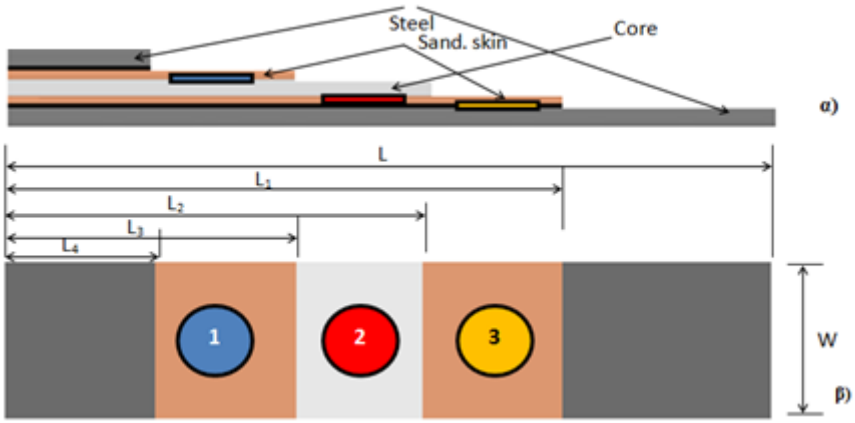
- Δοκίμια C1 και C2

Τέλος, έχουμε τα δοκίμια τύπου C, τα οποία αποτελούνται από ένα συμβατικό sandwich με περιβλήματα από σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα Balsa, το οποίο περιβάλλεται από δύο χαλύβδινα ελάσματα. Από αυτόν τον τύπο δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια, το C1 και το C2, με μόνη διαφορά το πάχος του χάλυβα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.2. Τα δοκίμια τύπου C κατασκευάστηκαν με βάση τον τρόπο που συνδέονται οι προεξοχές των μπαλκονιών με το υπόλοιπο μεταλλικό μέρος του πλοίου, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Σχηματική αναπαράσταση σύνδεσης τύπου Τ, όπου σημειώνεται το τμήμα από το οποίο προέκυψαν τα δοκίμια τύπου C

Και στα δύο δοκίμια τοποθετήθηκαν οι ίδιες ατέλειες με τα δοκίμια τύπου Α και Β. Η πρώτη ατέλεια τοποθετήθηκε στη διεπιφάνεια σύνθετου υλικού και πυρήνα, η δεύτερη στην διεπιφάνεια πυρήνα και σύνθετου υλικού και η τρίτη στη διεπιφάνεια σύνθετου υλικού και χάλυβα. Οι ατέλειες παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.14.



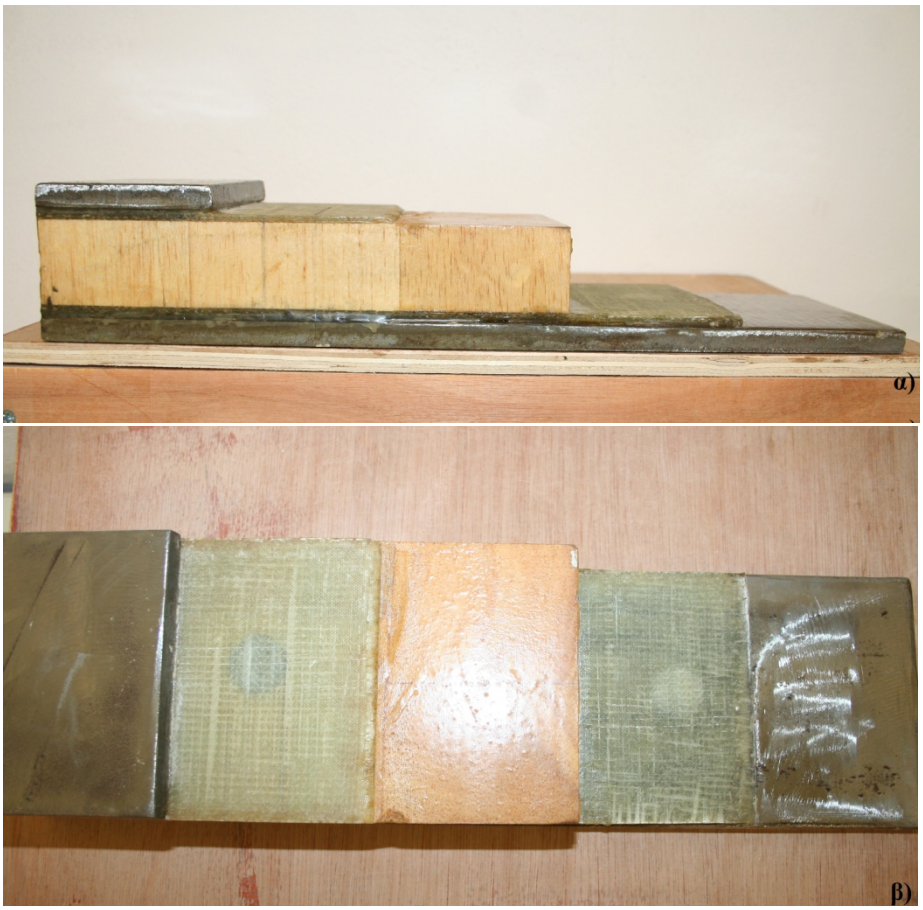
Σχήμα 6.14: Σκαρίφημα δοκιμίων τύπου C: α) προφίλ δοκιμίου και β) κάτοψη

Πίνακας 6.2 : Διαστάσεις δοκιμίων C1 και C2

C1	C2
t_{st} = 6 mm	t_{st} = 10 mm
$t_{sk} \approx$ 2.5 mm	$t_{sk} \approx$ 2.5 mm
t_c = 30 mm	t_c = 30 mm
L = 350 mm	L = 350 mm
L_1 = 280 mm	L_1 = 280 mm
L_2 = 210 mm	L_2 = 210 mm
L_3 = 140 mm	L_3 = 140 mm
L_4 = 70 mm	L_4 = 70 mm
W = 100 mm	W = 100 mm
H = 41 mm	H = 45 mm

Με βάση λοιπόν το προτεινόμενο σκαρίφημα και τις διαστάσεις, κατασκευάστηκαν τα δοκίμια που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.15 και 6.16.

Σχήμα 6.13: Δοκίμιο C1: α)προφίλ και β) κάτοψη δοκιμίου



Σχήμα 6.14: Δοκίμιο C2: α) προφίλ και β) κάτοψη δοκιμίου

6.3 Εξοπλισμός μη Καταστροφικού Ελέγχου

Όπως έχει τονιστεί ήδη, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος με υπερήχους των δοκιμίων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, με στόχο τον εντοπισμό των τεχνητών ατελειών. Για τον έλεγχο αυτόν χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις υπερήχων, το ULTRAPAC II και η φορητή συσκευή POCKET UT™ της εταιρείας MISTRAS.

6.3.1 ULTRAPAC II

Η συσκευή βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της σχολής. Είναι ένα αυτοματοποιημένο σύστημα υπερήχων, υψηλής ευκρίνειας, που παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των υλικών, τόσο με επαφή, όσο και με βύθιση, χρησιμοποιώντας μία από τις δύο βασικές μεθόδους εξέτασης, είτε την pulse echo είτε την through transmission. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται σε πραγματικό χρόνο από υπολογιστική μονάδα (Η/Υ) με τις απεικονίσεις A-scan, B-scan και C-scan. Η διάταξη ULTRAPAC II αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Δεξαμενή εμβάπτισης, η οποία αποτελείται από plexiglass που φέρει προσαρμοσμένο φορείο για την κίνηση της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής στο χώρο ελέγχου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.17. Το φορείο αποτελείται από δύο οριζόντιους βραχίονες που επιτρέπουν την κίνηση της κεφαλής σε δυο διευθύνσεις. Στο σύστημα αυτό είναι προσαρτημένος και ένας κάθετος, ως προς τους άλλους δυο, βραχίονας, στο άκρο του οποίου τοποθετείται η κεφαλή και επιτρέπεται, έτσι, η κατακόρυφη κίνηση της. Η κίνηση των βραχιόνων γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτροκίνητων μοτέρ, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητης μετακίνησης.

Σχήμα 6.17: Δεξαμενή εμβάπτισης και το φορείο κίνησης της κεφαλής της διάταξης ULTRAPAC II

- Υπολογιστική μονάδα (συμβατή με IBM), η οποία περιλαμβάνει την κάρτα διέγερσης και αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής σημάτων AD-IPR-1210 και τη μονάδα ελέγχου σερβοκινητήρων για την κίνηση της κεφαλής PAC-SMC4. Η κάρτα AD-IPR-1210 είναι μια 12 bit συσκευή αναλογικής-ψηφιακής (analog to digital) μετατροπής σήματος με ενσωματωμένη την κάρτα διέγερσης και καταγραφής των σημάτων (pulser-receiver). Η κάρτα AD-IPR-1210 προσαρμόζεται στο motherboard του υπολογιστή σε μια θύρα PCI. Παρέχει την δυνατότητα εκπομπής ηλεκτρικών παλμών της τάξεως των 300-400 volt και διάρκειας μικρότερης των 10 nsec, των οποίων ρυθμίζεται ο ρυθμός επανάληψης (pulse repetition rate), η ενέργεια και άλλα χαρακτηριστικά τους. Το τμήμα λήψης σημάτων παρέχει τη δυνατότητα διάφορων ρυθμίσεων, όπως το εύρος των λαμβανόμενων σημάτων, μεταξύ 0.5-30 MHz, την ενίσχυση τους από -20 έως 80 dB και τη χρήση φίλτρων (high pass-low pass).

  Η κάρτα PAC-SMC4 ελέγχει την κίνηση των βραχιόνων, οι οποίοι μπορούν να κινούνται με ταχύτητα που μπορεί να φτάσει τις 20 in/sec (500 mm/sec) και με βήμα 0.00275 in (0.07 mm). Βέβαια, οι ταχύτητες αυτές προσδιορίζονται από την ανάλυση που επιθυμείται, από την κεφαλή που χρησιμοποιείται και από άλλους παράγοντες.

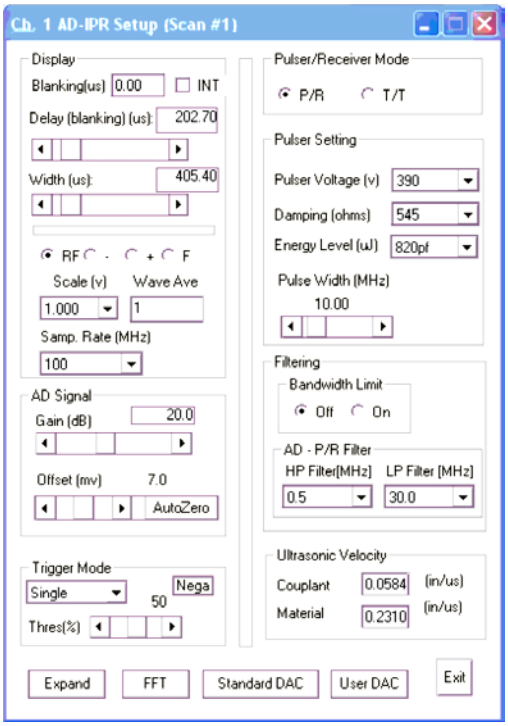
- Λογισμικό ελέγχου, καταγραφής και απεικόνισης ULTRAWIN. Είναι ένα λογισμικό συλλογής, αποθήκευσης και γραφικής απεικόνισης των δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο. Λειτουργεί σε περιβάλλον Windows XP και επιτρέπει τον έλεγχο και τη ρύθμιση των παραμέτρων των καρτών AD-IPR-1210 και PAC-SMC4.

6.3.1.1 Ρύθμιση Βασικών Παραμέτρων

Κατά τη διαδικασία ελέγχου, αρχικά πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα κάποιες παράμετροι της συσκευής που ισχύουν, τόσο κατά τον έλεγχο με επαφή, όσο και με βύθιση, για να έχουμε όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στην καρτέλα AD-IPR Setup του Σχήματος 6.18, μας δίνεται η δυνατότητα να καθορίσουμε τις παραμέτρους, τόσο της κάρτας διέγερσης και καταγραφής (pulser-receiver), όσο και της κάρτας αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής σήματος (analog to digital). Οι παράμετροι θα παρουσιαστούν, όχι με τη σειρά που φαίνονται στο Σχήμα 6.15, αλλά με τη σειρά που ρυθμίζονται κατά τον έλεγχο των σύνθετων υλικών. Ταυτόχρονα, στην οθόνη του υπολογιστή είναι ανοιχτή και η απεικόνιση A-scan του δοκιμίου, με αποτέλεσμα ο χρήστης να παρακολουθεί τις αλλαγές που επιφέρουν οι ρυθμίσεις του στα λαμβανόμενα σήματα. Το πρώτο πράγμα που ορίζεται είναι η μέθοδος εξέτασης. Το λογισμικό μάς παρέχει δύο επιλογές, αυτή της μεθόδου της παλμοηχούς P/R και της μεθόδου της διέλευσης T/T. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ο έλεγχος θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο της παλμοηχούς P/R.

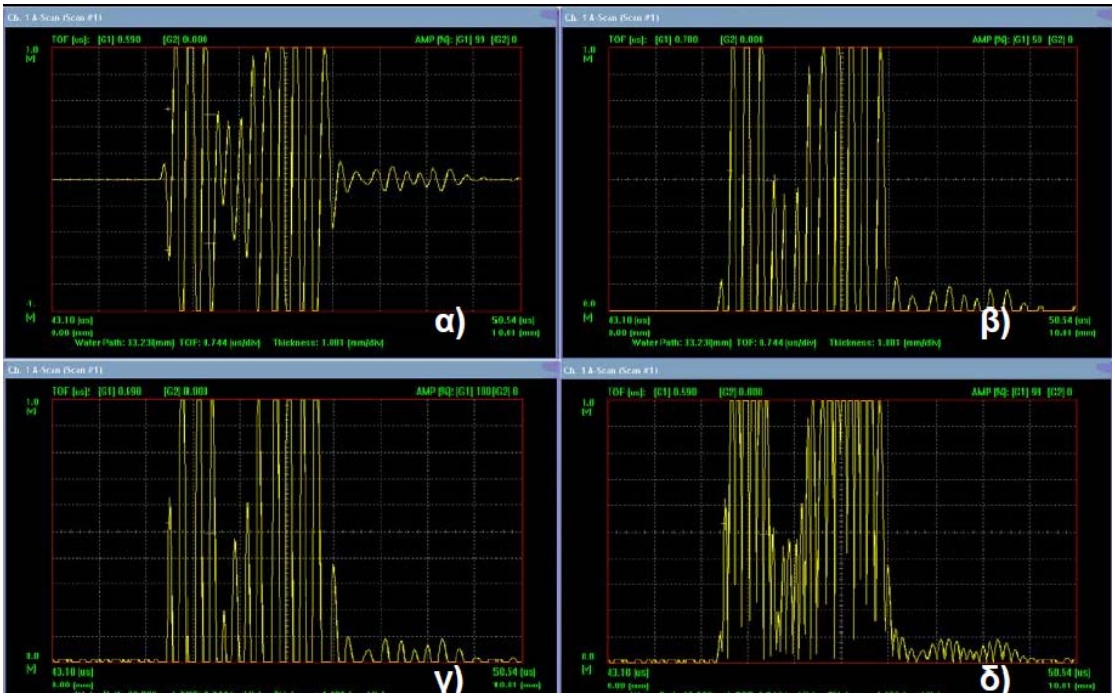


Σχήμα 6.18: Παράθυρο διαλόγου AD-IPR Setup

Έπειτα, ορίζεται η απεικόνιση A-scan από το Display (Σχήμα 6.15). Με τις επιλογές Delay και Width ο χρήστης καθορίζει το χρονικό παράθυρο που θα παρακολουθεί. Αναλυτικότερα, με την εντολή Delay μετακινούμε την απεικόνιση του A-scan, ώστε να παρατηρούμε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια της πορείας των υπερηχητικών κυμάτων. Στην περίπτωση

των σύνθετων υλικών, ενδείκνυται να παρακολουθούμε το πρώτο set ανακλάσεων μετά τον αρχικό παλμό, διότι, λόγω της μεγάλης απόσβεσης που παρουσιάζουν, εμφανίζουν συνήθως πολύ εξασθενημένο δεύτερο set, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο, και κάποιες φορές αδύνατο, να αξιοποιηθεί. Με την επιλογή Width καθορίζουμε το μέγεθος των υποδιαστημάτων του A-scan, δηλαδή μέχρι ποια τιμή του πάχους του δοκιμίου θέλουμε να παρουσιάζεται στην οθόνη. Η επιλογή αυτή ρυθμίζεται ώστε όλες οι ανακλάσεις να είναι ευδιάκριτες.

Ακολούθως, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον τρόπο απεικόνισης των ανακλάσεων, μέσω των επιλογών (RF), (-), (+), (F), ο οποίος καθορίζεται από τις ανάγκες του ελέγχου. Ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί την πλήρη κυματομορφή (RF), μόνο τα θετικά της ανορθωμένης κυματομορφής (+), μόνο τα αρνητικά (-), ή ,τέλος, την πλήρως ανορθωμένη κυματομορφή (F). Οι διάφορες απεικονίσεις φαίνονται στο Σχήμα 6.19. Επίσης, μέσα από την επιλογή Display καθορίζεται η κλίμακα Scale του κάθετου άξονα στο παράθυρο A-scan, ο αριθμός των κυματομορφών (Wave average) και η συχνότητα δειγματοληψίας (Sample Rate MHz). Για να έχουμε ολοκληρωμένη και σωστή απεικόνιση A-scan στο τμήμα Ultrasonic Velocity, εισάγονται οι ταχύτητες του μέσου σύζευξης και του εξεταζόμενου υλικού.



Σχήμα 6.19: α) Πλήρης κυματομορφή **β)** μόνο τα θετικά της ανορθωμένης μορφής **γ)** μόνο τα αρνητικά της ανορθωμένης μορφής **δ)** πλήρως ανορθωμένη μορφή

Έχοντας ρυθμίσει το παράθυρο του A-scan για τον έλεγχο του σύνθετου υλικού, παρατηρείται ότι η απόσβεση είναι πολύ μεγάλη, σε σημείο που να μην εμφανίζεται η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας του υλικού. Μέσω της επιλογής AD signal (Σχήμα 6.15), αυξάνουμε το Gain και ενισχύουμε την ένταση ολόκληρης της κυματομορφής με καθορισμένο αριθμό dB. Η ενίσχυση πρέπει να είναι τόση ώστε οι παλμοί των πρώτων

ανακλάσεων να είναι λίγο κάτω από το 100% FSH. Στο ίδιο σημείο του παραθύρου διαλόγου υπάρχει η επιλογή offset (mv). Μέσα από την επιλογή αυτή καθορίζεται από πόσα mv και πάνω θα εφαρμοστεί στην κυματομορφή η ενίσχυση που επιλέχθηκε. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ο θόρυβος και οι αδικαιολόγητες ανακλάσεις με μικρότερη ένταση (mv) μπορούν να αποκλειστούν από την ενίσχυση και έτσι να μην μπερδευτούν με τις ανακλάσεις που προέρχονται από τις στρώσεις ή τις ατέλειες.

Κατά τον έλεγχο των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, στην απεικόνιση A-scan εμφανίζονται πολλοί παλμοί οι οποίοι είναι ανακλάσεις από τις διάφορες στρώσεις του υλικού ή ατέλειες. Για να μπορέσουμε να παρακολουθήσουμε συγκεκριμένες ανακλάσεις, δηλαδή συγκεκριμένο πάχος του υλικού, υπάρχει η διαδικασία ορισμού των **Gates.** Το gate είναι ένα χρονικό παράθυρο, το οποίο ορίζεται από τον χρήστη της διάταξης Ultrapac, προκειμένου να παρακολουθεί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και να καταγράφει τους παλμούς που ενδέχεται να παρουσιαστούν στο διάστημα αυτό.

Ο ορισμός των gates είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας ώστε να ληφθούν ορθά αποτελέσματα. Το ULTRAPAC II παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα ορισμού δύο gates, το gate 1 και το gate 2. Στο παράθυρο διαλόγου των gates που φαίνεται στο Σχήμα 6.20 υπάρχει η επιλογή να ενεργοποιηθεί κάθε ένα ή και τα δύο gates ταυτόχρονα, μαρκάροντας την επιλογή On.

Στην καρτέλα ορισμού των gates, η επιλογή **Sync** επιτρέπει στο χρήστη να συγχρονίζει τα gates, είτε με τον αρχικό παλμό (**Initial Pulse**), είτε με την πρώτη ηχώ (**First echo**). Πρώτη ηχώ θεωρείται το πρώτο σήμα μετά τον αρχικό παλμό και είναι η ηχώ της εμπρός επιφάνειας του εκάστοτε δοκιμίου που βρίσκεται υπό εξέταση. Η επιλογή αυτή είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση που στο υπό εξέταση δοκίμιο η εμπρός επιφάνεια δεν είναι κάθετη στη δέσμη των υπερήχων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση όλων των σημάτων που λαμβάνονται από το δοκίμιο στον άξονα των χρόνων στο A-scan.

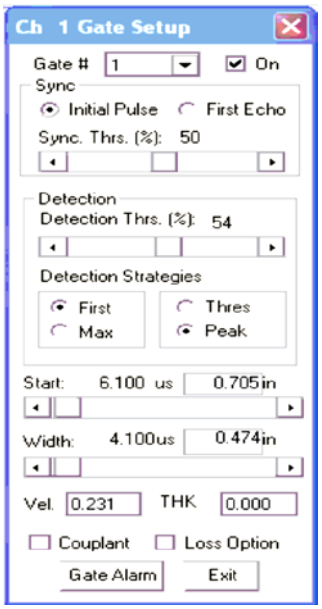
Στην περίπτωση που παρατηρείται μετακίνηση των σημάτων, πρέπει τα gates να συγχρονίζονται με την πρώτη ηχώ (**First Echo**). Με αυτό τον τρόπο, τα gates θα μετακινούνται και αυτά σε σχέση με την πρώτη ηχώ και θα παρακολουθούν συνεχώς τη δεδομένη περιοχή του υλικού, πράγμα που δε συμβαίνει αν τα gates συγχρονίζονται με τον αρχικό παλμό (**Initial Pulse**). Στην περίπτωση αυτή, τα gates είναι ακίνητα και παρακολουθούν μία συγκεκριμένη περιοχή στον άξονα των χρόνων, η οποία, όμως, μπορεί να μην αντιστοιχεί στο τμήμα του όγκου του υλικού που έχουμε αποφασίσει να μελετήσουμε.

Αφού για τους σκοπούς του συγκεκριμένου ελέγχου έχουμε επιλέξει τα gates να συγχρονίζονται με την πρώτη ηχώ, σημαντική είναι η ρύθμιση **Sync Thres**. Η παράμετρος αυτή καθορίζει από ποιο ποσοστό και πάνω μία κορυφή θεωρείται αξιόπιστη να ληφθεί ως πρώτη ηχώ και κατ' επέκταση να συγχρονιστεί το ενεργοποιημένο gate με αυτή. Για υψηλά ποσοστά, ο σταυρός που δείχνει πότε ενεργοποιείται το gate, μετακινείται στον αρχικό παλμό και το gate συγχρονίζεται με αυτόν. Αντίθετα, για χαμηλά ποσοστά, η διάταξη μπορεί να λάβει σαν αρχική ηχώ κορυφές που προκύπτουν από θόρυβο ή κορυφές με μικρότερο amplitude μπροστά από την πραγματική πρώτη ηχώ.

Έπειτα, στο παράθυρο διαλόγου των gates συναντάται η επιλογή **Detection Thres**. Η επιλογή αυτή καθορίζει σε ποιο ακριβώς ύψος θα βρίσκεται το gate. Για κορυφές (σήματα)

που έχουν μεγάλο amplitude, τα gates τοποθετούνται αρκετά ψηλά, αφού η κορυφή που θέλουμε να καταγράψουμε πρέπει να τα τέμνει σίγουρα. Προσοχή χρειάζεται στον καθορισμό του detection thres για κορυφές με μικρό amplitude, όπως για παράδειγμα η κορυφή της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου (back wall echo).

Ακολούθως, ορίζεται η θέση του gate ως προς τον άξονα του χρόνου, με την επιλογή **Start**, καθορίζοντας την απόσταση ή το χρόνο από τον αρχικό παλμό. Με την επιλογή **Width** ορίζεται το πλάτος του gate και έτσι εμμέσως ορίζεται και το τέλος του gate.



Σχήμα 6.20: Gate setup

Έτσι, σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό, με ένα gate που έχει μικρό πλάτος, μπορούμε να καταγράψουμε μία μόνο στρώση, ενώ με gate μεγαλύτερου πλάτους δύο ή περισσότερες στρώσεις αλλά ακόμα και τις ανακλάσεις από όλο το υλικό.

Μετά τον καθορισμό της θέσης και του πλάτους του gate, πρέπει να οριστεί ο τρόπος με τον οποίο το gate θα καταγράφει τα σήματα που το τέμνουν. Στο λογισμικό ULTRAWIN δίνονται τέσσερις επιλογές, ή αλλιώς στρατηγικές ανίχνευσης (detection strategies). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20 υπάρχουν δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει τις επιλογές **First** και **Max** και η δεύτερη τις επιλογές **Thres** και **Peak**. Οι επιλογές αυτές πρέπει πάντα να είναι συνδυασμός μίας επιλογής από την πρώτη ομάδα και μίας επιλογής από τη δεύτερη. Με τον τρόπο αυτόν προκύπτουν τέσσερις στρατηγικές καταγραφής σημάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.21 και αναλύονται παρακάτω.

Σχήμα 6.21: Γραφική αναπαράσταση των τεσσάρων στρατηγικών ανίχνευσης

Οι προαναφερθείσες στρατηγικές είναι :

- First Peak: Το gate καταγράφει την πρώτη κορυφή που το κόβει και το TOF (Time of flight) υπολογίζεται μέχρι το σημείο της κορυφής.
- Max Peak: Το gate καταγράφει την κορυφή με το μέγιστο amplitude από αυτές που το κόβουν και το TOF υπολογίζεται μέχρι το σημείο της κορυφής.
- First Thres: Το gate καταγράφει την πρώτη κορυφή που το κόβει και το TOF υπολογίζεται μέχρι το σημείο που η πρώτη πλευρά της κορυφής κόβει το Gate.
- Max Thres: Το gate καταγράφει την μέγιστη κορυφή από αυτές που το κόβουν και το TOF υπολογίζεται όπως και στη στρατηγική First Thres.

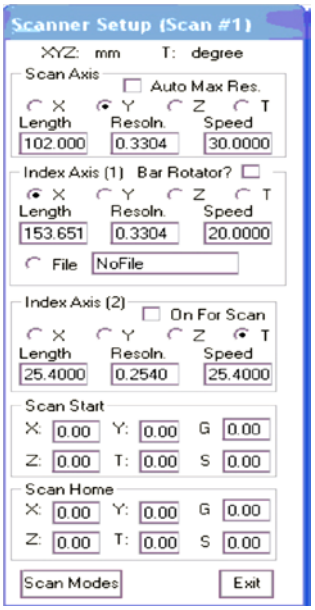
Τέλος, στο παράθυρο διαλόγου των Gates (Σχήμα 6.20), ορίζεται η ταχύτητα διάδοσης διαμηκών κυμάτων για το εξεταζόμενο υλικό (Vel) και το πάχος του υλικού που έχει μετρηθεί με μηχανικά μέσα.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι όλες αυτές οι παράμετροι ρυθμίστηκαν για τον έλεγχο τον δοκιμίων με επαφή και απεικόνιση των αποτελεσμάτων με A-scan. Παρ' όλα αυτά, κατά την πειραματική διαδικασία, σε κάποια δοκίμια έγινε έλεγχος με εμβάπτιση των δοκιμίων, κατά τον οποίο έπρεπε να ρυθμιστούν κάποιες επιπρόσθετες παράμετροι.

Αρχικά, πρέπει να οριστεί η επιφάνεια σάρωσης. Με τον όρο επιφάνεια σάρωσης εννοούμε την επιφάνεια πάνω από την οποία θα περάσει η πιεζοηλεκτρική κεφαλή και θα ληφθούν δεδομένα. Η επιφάνεια σάρωσης, στην περίπτωση μας, είναι η επιφάνεια των δοκιμίων με διαστάσεις 70x100 mm. Υπάρχει, βέβαια, η δυνατότητα να οριστεί και μικρότερο τμήμα της επιφάνειας.

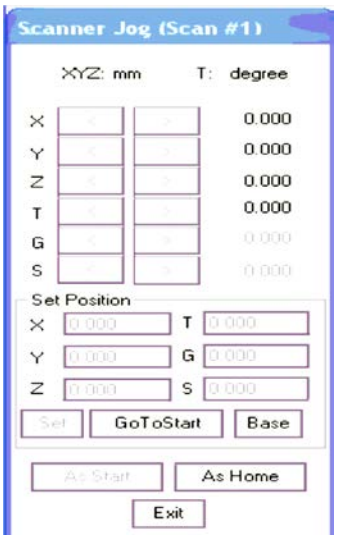
Η ρύθμιση ξεκινά από το παράθυρο διαλόγου Scanner set up, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.22. Αρχικά, επιλέγεται ο Scan Axis, που μπορεί να είναι οποιοσδήποτε από τους άξονες X-Y. Οι άξονες X-Y βρίσκονται σε επίπεδο παράλληλο με τον πυθμένα της δεξαμενής, ο οποίος ταυτίζεται με το επίπεδο της εμπρός επιφάνειας του δοκιμίου. Στον άξονα Z βρίσκεται η κεφαλή και είναι κάθετος στο επίπεδο X-Y. Για τον Scan Axis που επιλέγεται, ορίζεται το μήκος του (Length), η ταχύτητα με την οποία θα κινείται η κεφαλή και η ανάλυση. Αναλόγως, καθορίζεται και ο Index Axis, ο οποίος δεν μπορεί να είναι ο ίδιος με τον Scan Axis.

Στην επιλογή Length, στο παράθυρο διαλόγου Scanner set up, εισάγονται οι διαστάσεις του δοκιμίου. Στον Scan Axis ορίζεται το πλάτος του δοκιμίου (100 mm) και στον Index Axis το μήκος (70 mm). Η ανάλυση (resolution) ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων, από τα οποία παίρνουμε δεδομένα, τόσο στον Scan Axis, όσο και στον Index Axis. Η ανάλυση μπορεί να φτάσει τα 0.07 mm (0.00275 in). Η ταχύτητα των δύο αξόνων (Speed) μπορεί να λάβει την ανώτερη τιμή των 500 mm/sec.



Σχήμα 6.22: Scanner setup

Η τελευταία παράμετρος που πρέπει να ορισθεί, για να ξεκινήσει σωστά η σάρωση, είναι το σημείο αναφοράς. Μέσω του παράθυρου διαλόγου Scanner Jog (Σχήμα 6.23), καθορίζεται το σημείο αναφοράς της σάρωσης. Το σημείο αναφοράς είναι η αρχή του τρισορθογώνιου συστήματος αξόνων x-y-z και βρίσκεται πάνω στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο της κεφαλής. Με βάση το σημείο αυτό, η διάταξη καταγράφει τις αποστάσεις, τόσο στο επίπεδο X-Y, όσο και στον άξονα Z. Ως αρχή του συστήματος αξόνων ορίζεται το σημείο του όγκου της δεξαμενής, σύμφωνα με το οποίο, μετά το τέλος της σάρωσης στο επίπεδο X-Y, θα έχουν καταγραφεί οι διαστάσεις του δοκιμίου και κατά τον άξονα Z το πάχος του υλικού.



Σχήμα 6.23: Scanner Jog

6.3.2 POCKET UT™

Η συσκευή αυτή είναι ιδιοκτησία του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο φορητό επαναφορτιζόμενο σύστημα υπερήχων υψηλής ευκρίνειας, που παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των υλικών με τις μεθόδους εξέτασης pulse echo και through transmission. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται σε πραγματικό χρόνο στην οθόνη αφής της συσκευής όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.24, με τις απεικονίσεις A-scan, B-scan και C-scan.

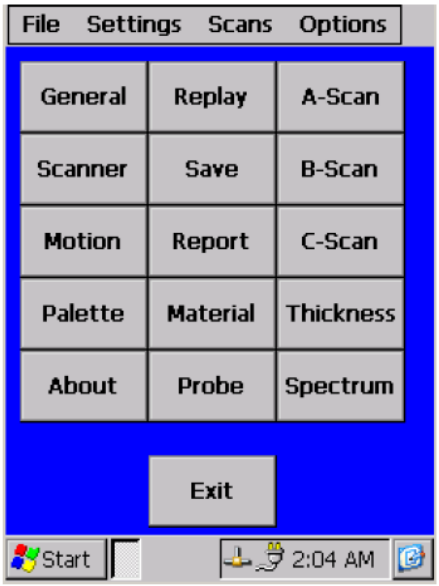
Σχήμα 6.24: Συσκευή POCKET UT™

Η συσκευή αυτή, πέρα από την απευθείας παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην οθόνη αφής, παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη, μέσω ενός εύχρηστου πληκτρολογίου, να επεξεργαστεί, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, διάφορες παραμέτρους για αποδοτικότερο έλεγχο.

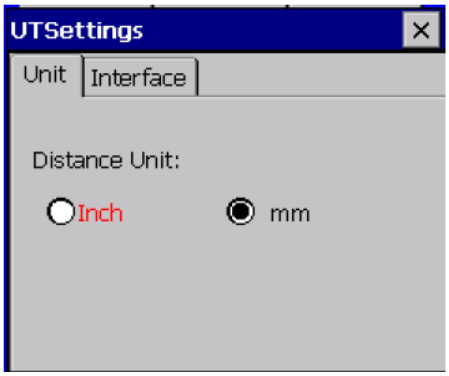
Το λογισμικό της συσκευής είναι Windows, κατατάσσοντάς το σε μία εύχρηστη συσκευή για τον εντοπισμό ατελειών (Flaw Detector), αλλά και για μία απλή παχυμέτρηση. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του, βέβαια, είναι ότι παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα φορητού ελέγχου με C-scan.

6.3.2.1 Ρύθμιση Βασικών Παραμέτρων

Ενεργοποιώντας το Pocket UT^{TM}, το πρώτο πράγμα που εμφανίζεται στην οθόνη είναι το αρχικό μενού (Σχήμα 6.25), μέσω του οποίου ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις μονάδες που επιθυμεί να έχουν τα αποτελέσματα (mm ή in), από την καρτέλα general, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.26. Επιπλέον, μπορεί να γίνει επιλογή του τρόπου απεικόνισης των αποτελεσμάτων μεταξύ A-scan, B-scan και C-scan.



Σχήμα 6.25: Αρχικό μενού



Σχήμα 6.26: General Menu

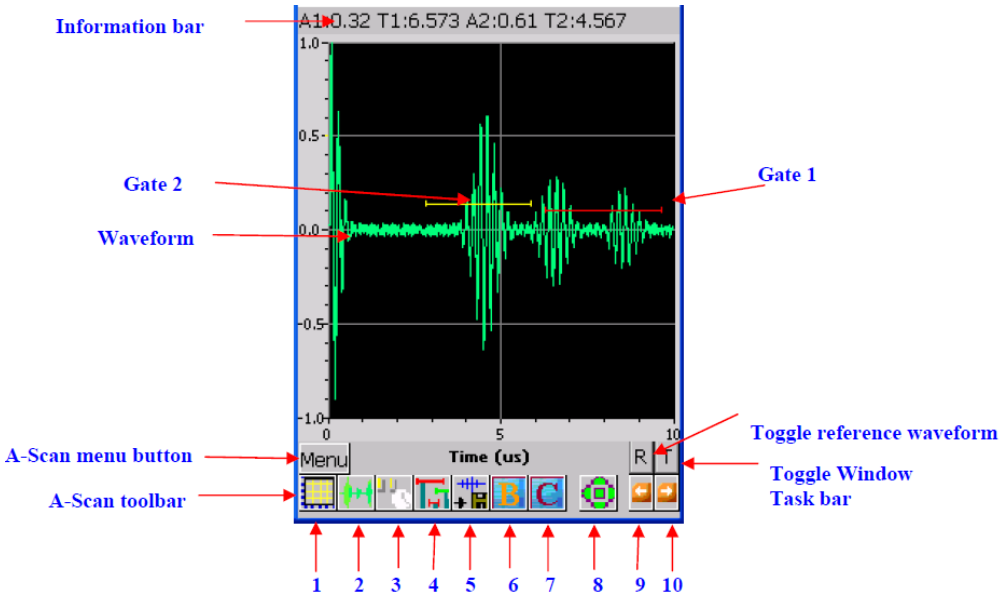
Πρέπει να τονιστεί ότι τα βήματα που θα περιγραφούν αφορούν μόνο τον έλεγχο με απεικόνιση των αποτελεσμάτων με A-scan, καθώς αυτός εφαρμόστηκε και στην παρούσα διπλωματική.

Συνεχίζοντας με το αρχικό μενού, μία επιπλέον σημαντική παράμετρος που πρέπει να ορισθεί πριν ξεκινήσει ο έλεγχος, είναι η ταχύτητα των κυμάτων για το εκάστοτε υλικό στην καρτέλα material (Σχήμα 2.27).

Σχήμα 2.27: Material Menu

Από την καρτέλα **Material list** μπορεί να γίνει η επιλογή new και να εισάγουμε το όνομα του υλικού, την ταχύτητα διαμήκους κύματος στο κελί velocity και το πάχος του υλικού, ενώ υπάρχει και η επιλογή να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα με σκοπό την επανάχρησή τους. Ο καθορισμός των δεδομένων αυτών είναι πολύ σημαντικός, καθώς σχετίζονται με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν κατά τον έλεγχο.

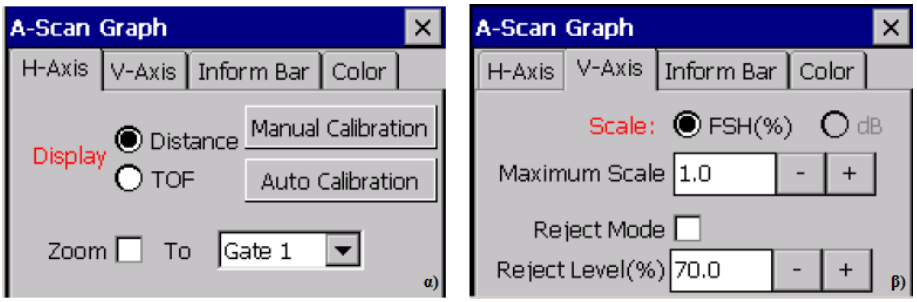
Στη συνέχεια επιλέγουμε την καρτέλα A-scan και εμφανίζεται στην οθόνη το Σχήμα 6.28. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι σχεδόν ίδιες με το ULTRAPAC II και για το λόγο αυτό δε θα αναλυθούν εκτενέστερα παρά μόνο θα παρουσιαστούν.



1: Graph settings
2: A/D hardware settings
3: P/R and DAC hardware settings
4: Gate settings
5: Save waveform
6: Switch to B-scan mode
7: Switch to C-scan mode
8: Toggle motion control bar
9: Switch to Main window
10: Switch to previous inspection mode

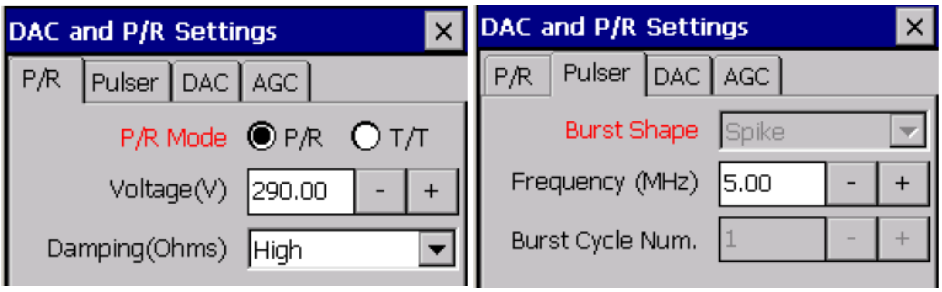
Σχήμα 6.28: Παράθυρο A-scan

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να ορίσει ο χρήστης είναι τα χαρακτηριστικά της απεικόνισης, όπως το μέγεθος που επιθυμεί να εμφανίζεται στον οριζόντιο και στον κατακόρυφο άξονα. Επιλέγοντας λοιπόν το **Graph Settings,** στην οθόνη εμφανίζεται μία καρτέλα, στην οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ο Χ άξονας να απεικονίζει ή την απόσταση κατά το πάχος που εμφανίζεται η κυματομορφή ή το χρόνο που απαιτείται να ταξιδέψει το κύμα μέσα στο υλικό μέχρι να προσκρούσει σε κάποια διαχωριστική επιφάνεια (TOF), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.29α. Επιπλέον, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ο χρήστης μπορεί να ορίσει αν στον κατακόρυφο άξονα επιθυμεί να εμφανίζεται η ένταση τον παλμών σε dB ή σε ποσοστό του ύψους της οθόνης (%FSH) υπό κλίμακα, με τη μέγιστη τιμή να είναι από 0.1 έως και 1, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.29β. Οι καρτέλες inform bar και color δε μας ενδιαφέρουν στην παρούσα διπλωματική, καθώς σχετίζονται με την απεικόνιση C-scan.



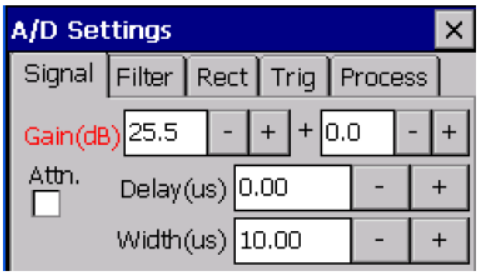
Σχήμα 6.29: A-scan graph menu: α) οι ρυθμίσεις για τον οριζόντιο άξονα και β) για τον κατακόρυφο άξονα

Αφού έχουμε ρυθμίσει τον τρόπο που θα παρουσιάζονται τα δεδομένα μας στην οθόνη της συσκευής, επιλέγουμε την καρτέλα DAC and P/R settings. Στο μενού αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον τρόπο που θα γίνει ο έλεγχος, καθώς και να εισάγει τα χαρακτηριστικά της κεφαλής επαφής που θα χρησιμοποιήσει (Σχήμα 6.30).



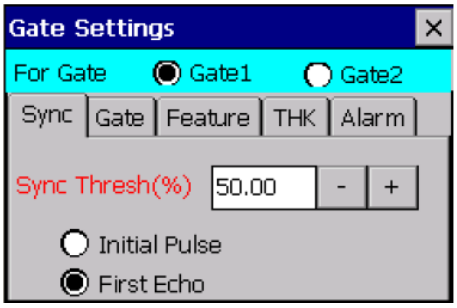
Σχήμα 6.30: DAC and P/R menu

Το επόμενο στάδιο είναι ο καθορισμός του απαιτούμενου gain, delay, width, low pass και high pass filter, με την ίδια λογική που περιγράφηκαν στο ULTRAPAC II. Όλες αυτές οι παράμετροι ρυθμίζονται από το **A/D settings** (Σχήμα 2.31).



Σχήμα 2.31: A/D menu

Το τελευταίο που μένει να ρυθμιστεί είναι τα gates. Με την ίδια ακριβώς φιλοσοφία με το ULTRAPAC II, από την καρτέλα **gate settings** μπορούμε να ενεργοποιήσουμε όποιο gate επιθυμούμε,από τα δύο που μας παρέχει η συσκευή, είτε και τα δύο μαζί όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.32. Στη συνέχεια, μπορούμε να ορίσουμε να συγχρονίζονται με τον αρχικό παλμό ή με την πρώτη ηχώ και να ρυθμίσουμε το start, width, detection threshold, την στρατηγική ανίχνευσης όπως max peak, καθώς και την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Οι παράμετροι αυτές δεν θα αναλυθούν περαιτέρω καθώς ορίζονται όμοια με τις αντίστοιχες παραμέτρους της προηγούμενης συσκευής.



Σχήμα 6.32: Gate menu

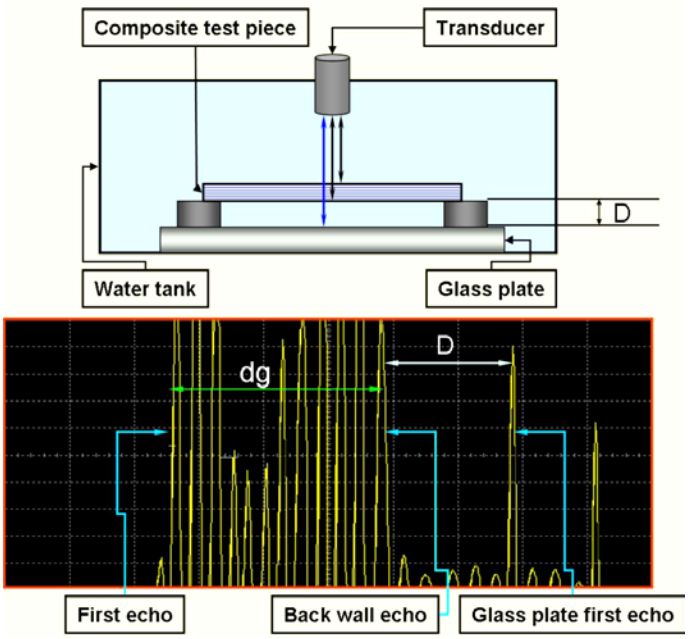
Πρέπει να τονιστεί ότι οι παράμετροι και τα βήματα που αναλύθηκαν είναι τα βασικότερα, όπως και στο ULTRAPAC II, και αφορούν την πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής. Αφού λοιπόν οι συσκευές έχουν ρυθμιστεί σωστά, μπορεί να ξεκινήσει ο πειραματικός έλεγχος με πρώτο μέλημα τον καθορισμό των ταχυτήτων των κυμάτων για το εκάστοτε υλικό, αντικείμενο που θα αναλυθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

6.4 Προσδιορισμός της Ταχύτητας των Κυμάτων Υπερήχων στα Δοκίμια

Όπως είναι φανερό από την ενότητα 6.2, τα υλικά που απαρτίζουν τα δοκίμια μας είναι: σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού, χάλυβας υψηλής αντοχής και ξύλο Balsa. Για να είναι σωστός ο έλεγχος, και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα που εξάγονται από αυτόν, πρέπει να καθοριστεί η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων μέσα στο εκάστοτε υλικό. Οι ταχύτητες σε κάποια υλικά, όπως η ταχύτητα στον χάλυβα, είναι ήδη γνωστές από υπάρχουσες έρευνες, αλλά υπάρχουν και υλικά όπως το Balsa, στο οποίο η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων δεν εμφανίζεται στην βιβλιογραφία. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει η διαδικασία καθορισμού των ταχυτήτων διάδοσης για το κάθε υλικό, αλλά και του συνδυασμού τους.

Πρωταρχικός στόχος ήταν ο καθορισμός της ταχύτητας του διαμήκους κύματος στο σύνθετο υλικό. Με γνώμονα πληροφορίες που αντλήθηκαν από Χασιώτη (2012), τοποθετήθηκε στον πυθμένα της δεξαμενής μία πλάκα από γυαλί διαστάσεων 30x30 mm και πάχους 20 mm. Η σκοπιμότητα της χρήσης της πλάκας γυαλιού θα αναλυθεί στη συνέχεια. Πάνω στην πλάκα γυαλιού μπαίνουν κυλινδρικές ανοξείδωτες βάσεις γνωστών διαστάσεων, και πάνω σε αυτές στηρίζεται το δοκίμιο B1 με σκοπό να μελετηθεί το πάχος του κάτω του περιβλήματος, το οποίο αποτελείται από σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού. Προηγουμένως, έχει μετρηθεί το πάχος του περιβλήματος με μηχανικά μέσα (παχύμετρο) και έχει καταγραφεί, έστω ως dx.

Μετά τη δημιουργία της παραπάνω διάταξης φέρνουμε την κεφαλή υπερήχων πάνω από το δοκίμιο και στην οθόνη του A-scan παίρνουμε τις ανακλάσεις του. Η όλη διάταξη και οι ανακλάσεις φαίνονται στο Σχήμα 6.33 (Χασιώτης 2012).



Σχήμα 6.33: Γραφική αναπαράσταση του υπολογισμού της άγνωστης ταχύτητας Cx των δοκιμίων

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η διάταξη μάς βοήθησε να εντοπίσουμε τον παλμό, ο οποίος προέρχεται από την ανάκλαση της δέσμης των υπερήχων στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Αυτό πραγματοποιήθηκε λόγω της παρουσίας της πλάκας γυαλιού, η οποία δημιουργεί μια ισχυρή ανάκλαση (Glass plate first echo) σε συγκεκριμένη απόσταση (έστω D) από την ανάκλαση της πίσω επιφάνειας. Η απόσταση αυτή είναι ίση με το ύψος των κυλινδρικών ανοξείδωτων βάσεων μετρημένη σε μsec. Έτσι, από τη γνωστή ανάκλαση του γυαλιού, μπορούμε να προσδιορίσουμε ποιος παλμός αντιστοιχεί στην πίσω επιφάνεια. Η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας θα είναι αυτή που απέχει απόσταση D από την ανάκλαση της πλάκας γυαλιού. Τότε στην οθόνη του A-scan μετράμε την απόσταση μεταξύ της ανάκλασης της εμπρός επιφάνειας και της πίσω επιφάνειας και την ορίζουμε έστω ως dg. Το πάχος αυτό είναι πλασματικό, καθώς η μέτρηση γίνεται με την ταχύτητα του ήχου στο αλουμίνιου. Αυτό που μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας το πάχος dg και την ταχύτητα του ήχου στο

αλουμίνιο $C_{αλ}$ είναι ο χρόνος διέλευσης των υπερήχων μέσα από το δοκίμιο σύμφωνα με τη σχέση 6.1:

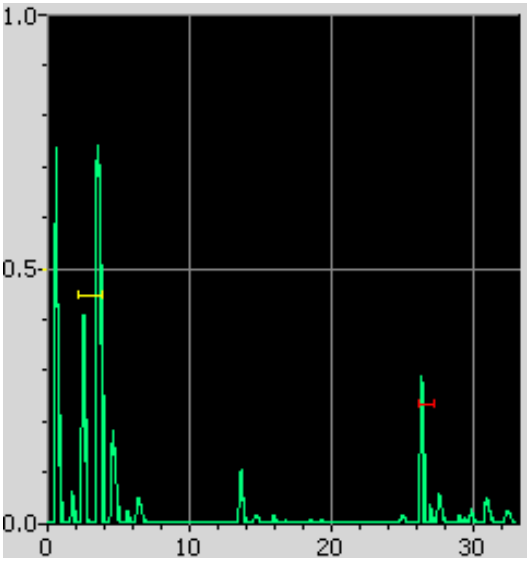
$$t=\frac{2d_g}{C_{αλ}} \tag{6.1}$$

Ακριβώς τον ίδιο χρόνο που υπολογίστηκε από την παραπάνω σχέση θα χρειαστούν τα κύματα υπερήχων για να διαπεράσουν το δοκίμιο με την πραγματική ταχύτητα Cx. Εφαρμόζοντας την ίδια σχέση για το μηχανικά μετρούμενο πάχος του δοκιμίου dx και για την άγνωστη ταχύτητα προκύπτει η σχέση 6.2:

$$t=\frac{2d_x}{C_x} \tag{6.2}$$

Ο συντελεστής 2 χρειάζεται γιατί τα κύματα υπερήχων διατρέχουν το πάχος του δοκιμίου δύο φορές. Έτσι, εξισώνοντας τις σχέσεις 6.1 και 6.2, και αντικαθιστώντας το γνωστό χρόνο (1.85 μsec) και το πάχος (2.5 mm), υπολογίζεται η άγνωστη ταχύτητα Cx του δοκιμίου, η οποία προκύπτει **2.7 mm/μsec**.

Ως προς το ξύλο Balsa, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δε βρέθηκε κάποια βιβλιογραφική πληροφορία για τον καθορισμό της ταχύτητας και φάνηκε να μην είναι δυνατός ο καθορισμός της με την προηγούμενη διάταξη. Για το λόγο αυτό, έγινε απόπειρα να υπολογιστεί η ταχύτητα με τη χρήση της συσκευής POCKET UT™. Αφού εισαγάγαμε μία συγκεκριμένη ταχύτητα, και συγκεκριμένα αυτήν στο αλουμίνιο, έγινε προσπάθεια ανίχνευσης του παλμού που προέρχεται από την πίσω επιφάνεια του Balsa, το οποίο είναι ο πυρήνας του δοκιμίου A1. Το σήμα που εμφανίστηκε στην οθόνη της συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.34.



Σχήμα 6.34: Κυματομορφή του Balsa στο δοκίμιο A1 με χρήση POCKET UT™

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.34, ο πρώτος παλμός που εμφανίζεται είναι ο αρχικός παλμός (Initial Pulse) και προκύπτει από την διέγερση της κεφαλής. Ο επόμενος ισχυρός παλμός προκύπτει από την εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου και εκεί τοποθετούμε το gate 1 (η κίτρινη οριζόντια γραμμή), ώστε να υπολογίσουμε το χρόνο που χρειάζεται για να προκύψει αυτός ο παλμός. Στη συνέχεια, με βάση όσα ισχύουν στα μέταλλα, έγινε η υπόθεση ότι ο επόμενος ισχυρός παλμός είναι από την πίσω επιφάνεια και έτσι τοποθετήσαμε το gate 2 (κόκκινη οριζόντια γραμμή) για να πάρουμε και εκεί μια μέτρηση του χρόνου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ο ενδιάμεσος από τα δυο gates παλμός, πιθανότατα να προέκυψε από κάποια εσωτερική κατά το πάχος ανάκλαση, γεγονός που δικαιολογείται από την πορώδη δομή του συγκεκριμένου υλικού. Αφού αφαιρέσαμε τις δύο χρονικές ενδείξεις, προέκυψε ο χρόνος που χρειάζεται η δέσμη για να διανύσει όλο το πάχος του δοκιμίου. Χρησιμοποιώντας τη σχέση 6.2 και γνωρίζοντας το πραγματικό πάχος του πυρήνα του δοκιμίου A1, προέκυψε η ταχύτητα **8.56 mm/μsec**, η οποία κατά τον μετέπειτα έλεγχο φάνηκε να δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά το χάλυβα υψηλής αντοχής, η ταχύτητα του βρέθηκε βιβλιογραφικά να είναι **5.92 mm/μsec** και έγινε επαλήθευση της τιμής αυτής με απλή παχυμέτρηση που έδωσε κοντινές τιμές.

Αφού λοιπόν καθορίστηκαν οι ταχύτητες διάδοσης για τα επιμέρους υλικά, έγινε και μια προσπάθεια εκτίμησης της ταχύτητας διάδοσης της δέσμης των υπερήχων σε ολόκληρο το δοκίμιο τύπου sandwich. Ο καθορισμός των ταχυτήτων αυτών ήταν απαραίτητος, καθώς για τον εντοπισμό μίας εκ των τριών ατελειών που υπήρχαν σε κάθε δοκίμιο, η υπερηχητική δέσμη έπρεπε να διαπεράσει, τόσο το περίβλημα, όσο και τον πυρήνα των δοκιμίων τύπου sandwich.

Αρχικά, έγινε εκτίμηση της ταχύτητας αυτής με υπολογιστικές μεθόδους. Με γνώμονα ότι ο συνολικός χρόνος που θα χρειαστεί η δέσμη να διαπεράσει όλο το πάχος του δοκιμίου είναι το άθροισμα των αντίστοιχων χρόνων που χρειάζεται η δέσμη για να διαπεράσει τα επιμέρους τμήματα της κατασκευής, καταλήξαμε στην σχέση 6.3:

$$\frac{\mathbf{d_{total}}}{\mathbf{C_{total}}} = \frac{\mathbf{d_1}}{\mathbf{C_1}} + \frac{\mathbf{d_2}}{\mathbf{C_2}} + \frac{\mathbf{d_3}}{\mathbf{C_3}} \tag{6.3}$$

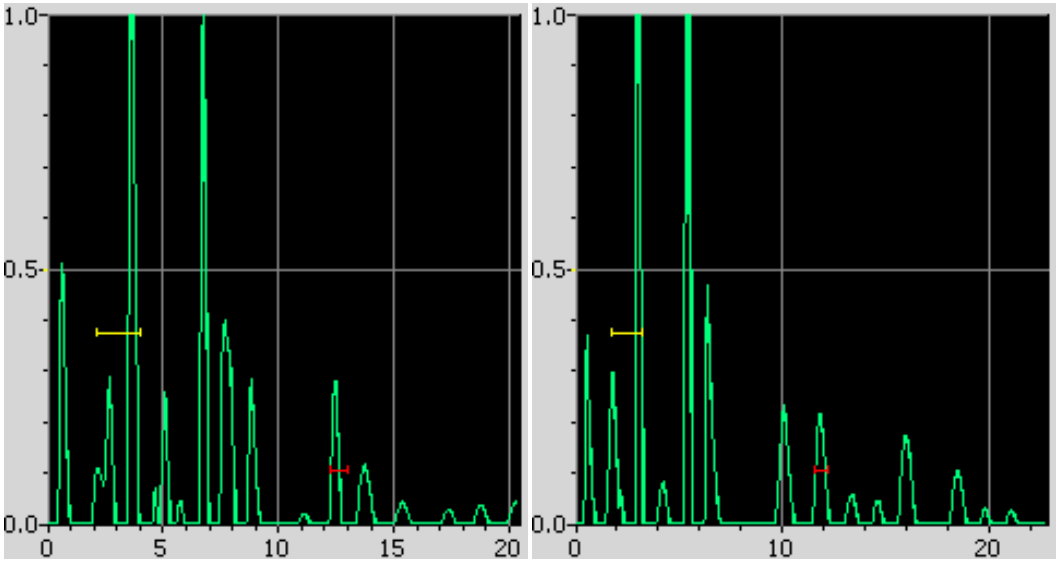
Στη σχέση 6.3, το d_{total} και C_{total} αναφέρονται στο πάχος όλου του δοκιμίου και στην ταχύτητα σιάδοσης της υπερηχητικής δέσμης εντός αυτού, ενώ με δείκτες 1, 2, 3 ορίζονται τα πάχη και οι ταχύτητες του εμπρός περιβλήματος, του πυρήνα και του πίσω περιβλήματος αντίστοιχα. Από τη σχέση αυτή, οι ταχύτητες και τα πάχη των επιμέρους τμημάτων είναι ήδη γνωστά, όπως γνωστό είναι και το συνολικό πάχος, το οποίο μετρήθηκε με μηχανικά μέσα. Άρα, όπως είναι κατανοητό, η συνολική ταχύτητα διάδοσης εντός του κάθε δοκιμίου μπορεί να υπολογιστεί με άμεση εφαρμογή της παραπάνω σχέσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3

Πίνακας 6.3: Ταχύτητα διάδοσης υπερηχητικής δέσμης στο εκάστοτε υλικό

Τύπος Δοκιμίου	**Ταχύτητα Διάδοσης (mm/μsec)**
A1	6.53
B1	3.83
B2	4.24
C1	6.36
C2	8.59

Από τον παραπάνω πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί μια διαφοροποίηση της ταχύτητας εντός του δοκιμίου B2 σε σχέση με το δοκίμιο B1. Η διαφορά αυτή μπορεί να δικαιολογηθεί από την αύξηση του πάχους του χαλύβδινου πυρήνα που επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης με βάση την σχέση 6.3. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο προκύπτει και διαφορετική ταχύτητα διάδοσης εντός τον δοκιμίων C1 και C2.

Οι τιμές αυτές λειτούργησαν ως μία πρώτη εκτίμηση, ενώ η τελική τιμή καθορίστηκε με τη συσκευή POCKET UT^{TM}, με την ίδια λογική η οποία είχε χρησιμοποιηθεί και για τον καθορισμό της ταχύτητας στο Balsa. Πρέπει να τονιστεί ότι, με βάση τις κεφαλές που είχαμε στη διάθεσή μας, ήταν εφικτό να καθοριστούν μόνο οι ταχύτητες εντός των δοκιμίων B1 και B2. Τα υπόλοιπα δοκίμια, είτε είχαν ιδιαίτερα μεγάλο πάχος (δοκίμια C1 και C2), είτε ο συνδυασμός των υλικών τους προκαλούσε έντονη απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης (δοκίμιο A1), με άμεσο αποτέλεσμα και στις δυο περιπτώσεις να καθίσταται δύσκολος ο εντοπισμός του παλμού της πίσω επιφάνειας. Αφού έγινε στο POCKET UT^{TM} εισαγωγή της ταχύτητας η οποία προέκυψε από τη σχέση 6.3, τα σήματα που προέκυψαν στην οθόνη παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.32 και 6.33.



Σχήμα 6.33: Κυματομορφή του δοκιμίου B1 στα αριστερά και B2 στα δεξιά με χρήση POCKET UT^{TM}

Πρέπει να σημειωθεί ότι το gate 2 τοποθετήθηκε στον παλμό που προέκυψε από την πίσω επιφάνεια του χάλυβα, αφού για την ανίχνευση της ατέλειας, η δέσμη έπρεπε να διαπεράσει

το ένα περίβλημα από σύνθετο υλικό και το χαλύβδινο πυρήνα. Οι ταχύτητες που προέκυψαν ήταν **6.69 και 5.39 mm/μsec.**

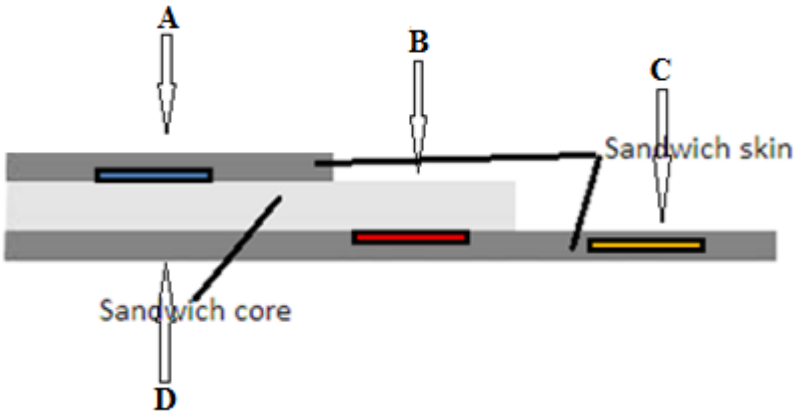
Ακολουθεί συνοπτικός Πίνακας 6.4 με τις ταχύτητες, τόσο των επιμέρους υλικών, όσο και του συνδυασμού τους:

Πίνακας 6.4: Οι ταχύτητες διάδοσης της υπερηχητικής δέσμης για το κάθε υλικό και δοκίμιο

Τύπος Υλικού-Δοκιμίου	**Ταχύτητα Διάδοσης (mm/μsec)**
GFRP	2.70
BALSA	8.56
Χάλυβας Υψηλής Αντοχής	5.92
Δοκίμιο A1	6.53
Δοκίμιο B1	6.69
Δοκίμιο B2	5.39
Δοκίμιο C1	6.36
Δοκίμιο C2	8.59

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα μη Καταστροφικού Ελέγχου

Ο έλεγχος όλων των δοκιμίων έγινε, όπως έχει αναφερθεί, με δύο συσκευές, το ULTRAPAC II και το POCKET UT^{TM}, με τεχνική επαφής και με απεικόνιση των δεδομένων με μορφή A-scan. Σκοπός του ελέγχου είναι να εντοπιστούν και οι τρείς ατέλειες. Τα σημεία στα οποία έγινε ο έλεγχος παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Θέσεις που έγινε ο έλεγχος της κάθε ατέλειας

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.1, η προσπάθεια εντοπισμού της ατέλειας 1 (βλ. Σχήμα 6.7) έγινε από δύο θέσεις (A και D), με σκοπό το συνδυασμό και των δύο επιμέρους υλικών, περιβλήματος και πυρήνα, αλλά και την εκτίμηση της αποδοτικότητας του ελέγχου από την θέση D. Επιπλέον, η θέση αυτή αποτελεί τη συνήθη θέση σάρωσης, στην οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος σε μία πραγματική κατασκευή τύπου sandwich, όπου ο χρήστης δεν έχει τη δυνατότητα ξεχωριστού έλεγχου των συνιστώντων μερών.

Ο έλεγχος όλων των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με κεφαλή επαφής. Λόγω της χρήσης κεφαλών επαφής, ήταν αναγκαία η παρουσία υλικού σύζευξης. Το μέσο σύζευξης απλώνεται στην περιοχή η οποία θα εξεταστεί, ώστε να σχηματιστεί ένα στρώμα μεταξύ της κεφαλής και της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού. Το στρώμα αυτό πρέπει να έχει συγκεκριμένο πάχος, ώστε να μπορεί η κεφαλή να είναι συνεχώς σε επαφή με την επιφάνεια. Η έλλειψη μέσου σύζευξης θα έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της επιφάνειας της κεφαλής η οποία έρχεται σε επαφή με το εξεταζόμενο υλικό. Αντίθετα, περίσσεια μέσου σύζευξης θα επιφέρει μείωση της ηχητικής ενέργειας που διαδίδεται στο υλικό. Οι προαναφερθείσες μεταβολές στο πάχος του στρώματος του μέσου σύζευξης, έχουν ανάλογες μεταβολές στην ευαισθησία του ελέγχου. Στο συγκεκριμένο έλεγχο, ως μέσω σύζευξης χρησιμοποιήθηκε η γλυκερίνη.

Η κεφαλή που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια και για όλες τις ατέλειες ήταν κεφαλή επαφής με κεντρική συχνότητα 2.25 MHz και διάμετρο 0.5 in. Σκοπός της επιλογής αυτής είναι η εκμετάλλευση της μεγάλης διεισδυτικότητας που προσφέρει η συγκεκριμένη συχνότητα, χωρίς να ενδιαφερόμαστε για τη χαμηλή της ευαισθησία, καθώς στόχος του ελέγχου ήταν ο εντοπισμός μίας τεχνητής ατέλειας κάθε φορά.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την εξέταση των δοκιμίων θα παρουσιαστούν με την παράθεση των A-scan απεικονίσεων. Πριν από κάθε απεικόνιση θα παρατίθενται οι ρυθμίσεις (setup) των διατάξεων ULTRAPAC II και POCKET UT^{TM}, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν για τη λήψη των δεδομένων. Οι κυματομορφές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, και οι οποίες αντιστοιχούν στο τμήμα του δοκιμίου που ελέγχεται κάθε φορά, θα απεικονίζουν παλμούς από την περιοχή όπου βρίσκεται η ατέλεια, καθώς και από υγιή περιοχή του δοκιμίου, με σκοπό την άμεση σύγκριση και αξιολόγηση των δύο κυματομορφών. Ταυτόχρονα, θα γίνεται και σχολιασμός των απεικονίσεων.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε και έλεγχος των δοκιμίων με τεχνική εμβάπτισης και απεικόνισης των δεδομένων με τη μορφή C-scan. Αυτή η διαδικασία ελέγχου δεν αποτελεί κύρια μέθοδο ανίχνευσης των ατελειών στην παρούσα διπλωματική και ο ρόλος της ήταν η επαλήθευση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν από τις δύο μεθόδους επαφής.

7.1 Δοκίμιο A1

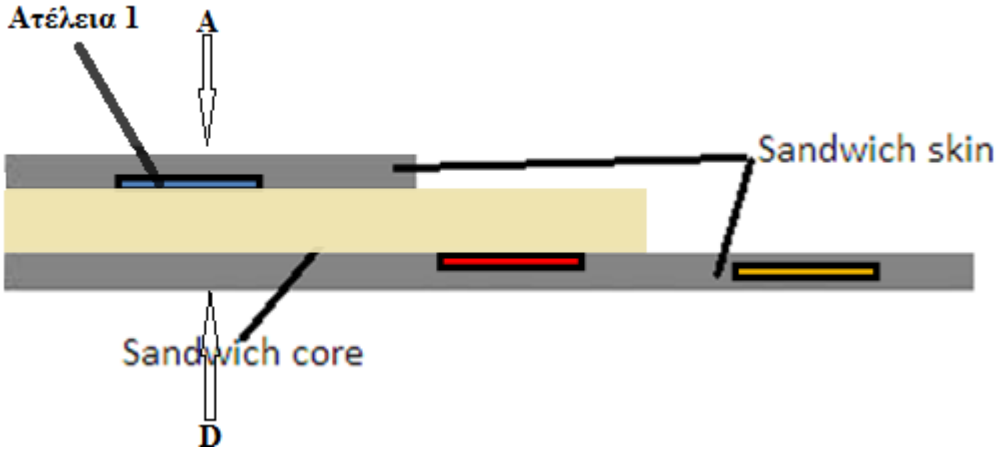
7.1.1 Έλεγχος με POCKET UT^{TM}

Το δοκίμιο A1 είναι ένα σύνθετο δοκίμιο τύπου sandwich, στο περίβλημα του οποίου συναντάται σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και στον πυρήνα ξύλο Balsa. Στο δοκίμιο αυτό, όπως και στα υπόλοιπα, έχουν τοποθετηθεί τρεις τεχνητές ατέλειες. Για την κάθε ατέλεια παρουσιάζεται το κατάλληλο setup του οργάνου, το οποίο εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό της, όπως και οι αντίστοιχες κυματομορφές, στις οποίες φαίνεται ο παλμός που αντιστοιχεί στην ατέλεια. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ατέλεια No 1 εντοπίστηκε και από το πίσω περίβλημα του δοκιμίου, όπως παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 7.1.

Αναλυτικότερα έχουμε:

- **Ατέλεια Νο 1**

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζεται το setup του οργάνου που εφαρμόστηκε και στη συνέχεια, στα Σχήματα 7.3 και 7.4 τα σήματα από την περιοχή της ατέλειας, η θέση της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 7.2, όπως και αυτά από την υγιή περιοχή του δοκιμίου.

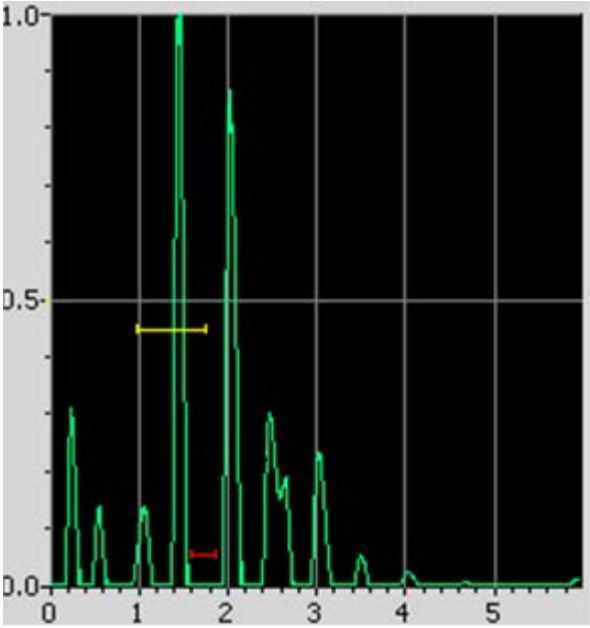


Σχήμα 7.2: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 1

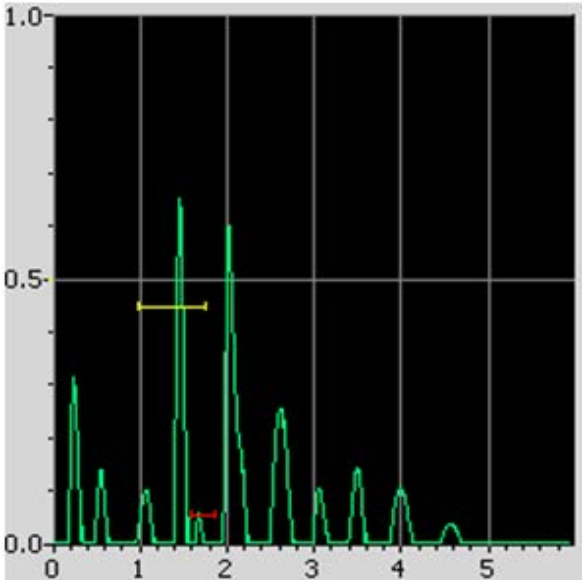
Πίνακας 7.1: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	4.44 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	22 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	47%	6%
Gate Start	0.98 mm	1.58 mm
Gate Width	0.65 mm	0.32 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Όπως φαίνεται και στο setup του Πίνακα 7.1, κατά την εκτέλεση χρησιμοποιήθηκαν δύο gates. Αυτό έγινε γιατί, ως σημείο αναφοράς για τη μέτρηση του πάχους, το πρόγραμμα έθετε τον αρχικό παλμό, δηλαδή τον παλμό που παραγόταν από τη διέγερση της κεφαλής και όχι εκείνον που αντιστοιχούσε στην εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό, το gate 1 ορίστηκε να ακολουθεί τον παλμό που αντιστοιχεί στην εμπρός επιφάνεια, ώστε η μέτρηση που προέκυπτε να αφαιρούνταν από την ένδειξη του gate 2 το οποίο ακολουθεί τον παλμό της ατέλειας, με τελικό σκοπό να προκύπτει το σωστό πάχος όπου εμφανίζεται η ατέλεια. Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές που προέκυψαν.



Σχήμα 7.3: Κυματομορφή από υγιή περιοχή του εμπρός περιβλήματος GFRP



Σχήμα 7.4: Κυματομορφή όπου εμφανίζεται ο παλμός της εμπρός επιφάνειας της ατέλειας και τέμνει το gate 2 (οριζόντια κόκκινη γραμμή)

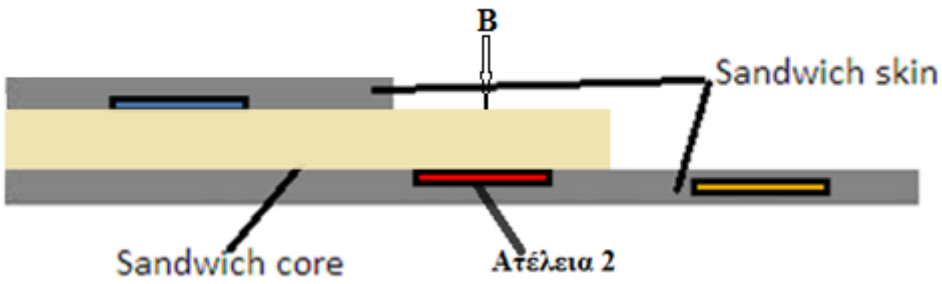
Η ατέλεια, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 7.2, φαίνεται να εντοπίστηκε σε πάχος 0.2 mm, τιμή που δεν ήταν απόλυτα λογική, βάσει του ότι το περίβλημα GFRP έχει πάχος 2.5 mm και το πάχος της ατέλειας είναι περίπου 1.25 mm, καθώς αποτελείται από δύο στρώσεις γυαλόχαρτου Grade 400. Το γεγονός αυτό, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η ατέλεια 1 δε βρίσκεται στη διεπιφάνεια περιβλήματος-πυρήνα, πράγμα αντίθετο με τα σκαριφήματα των δοκιμίων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρ' όλες τις αμφιβολίες που δημιουργήθηκαν, φάνηκε ότι ο ίδιος παλμός εμφανιζόταν και στον έλεγχο με τη συσκευή ULTRAPAC II, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, η ατέλεια 1 έπρεπε να εντοπισθεί και από το πίσω περίβλημα (θέση D), διαπερνώντας δηλαδή η υπερηχητική δέσμη το σύνθετο υλικό και τον

πυρήνα από Balsa. Η παρουσία, τόσο του σύνθετου υλικού, όσο και του μεγάλου πάχους πυρήνα, οδήγησε στην έντονη απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης, καθιστώντας αδύνατο τον εντοπισμό της ατέλειας με την κεφαλή 2.25 MHz. Στο εργαστήριο της σχολής υπήρχε η δυνατότητα χρήσης και κεφαλής 0.5 MHz, της οποίας, όμως, η μεγάλη διάμετρος δεν επέτρεψε την εφαρμογή της για τον παρόντα έλεγχο.

- **Ατέλεια No 2**

Η ατέλεια αυτή βρίσκεται στη διεπιφάνεια πυρήνα Balsa και περιβλήματος από σύνθετο υλικό (Σχήμα 7.5). Πρέπει να τονιστεί ότι, ο εντοπισμός της συγκεκριμένης ατέλειας ήταν αρκετά δύσκολος, καθώς η απόσβεση της δέσμης εντός του Balsa ήταν μεγάλη. Στη συνέχεια ακολουθούν οι ρυθμίσεις και οι κυματομορφές που προέκυψαν.

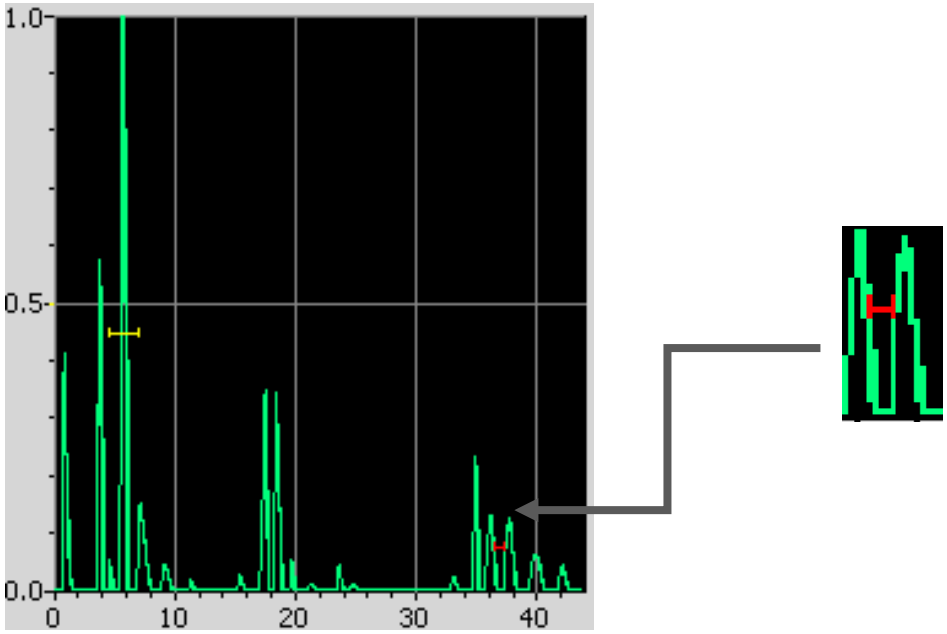


Σχήμα 7.5: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 2

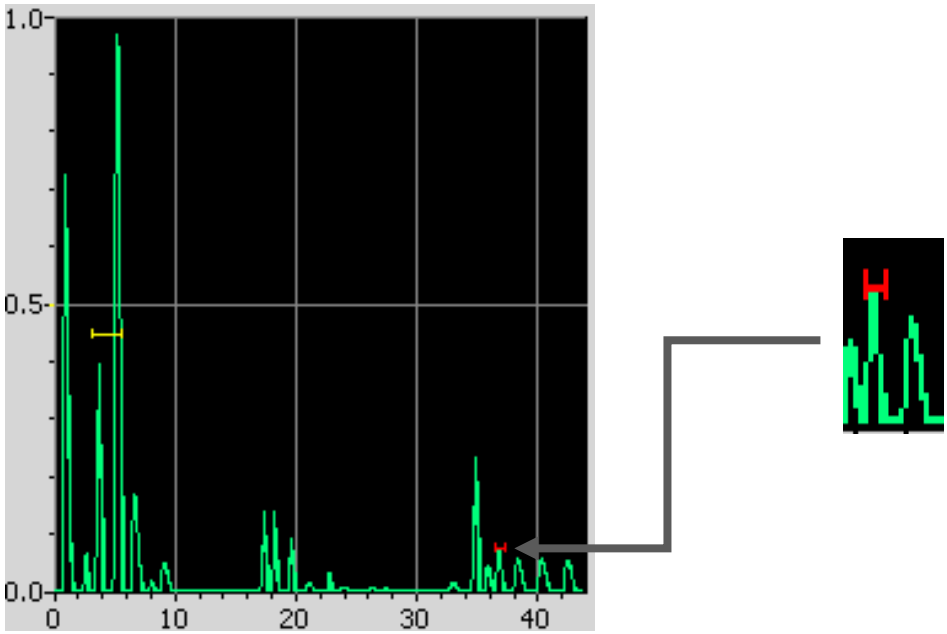
Πίνακας 7.2: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	9.33 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	44 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	47%	8%
Gate Start	5 mm	36 mm
Gate Width	2.8 mm	0.15 mm
Gate Velocity	8.56 mm/mis	8.56 mm/ms

Κατά τον έλεγχο, ήταν αναγκαία η ενίσχυση του σήματος κατά 44 dB, τιμή υψηλότερη από την αντίστοιχη που ορίστηκε κατά τον έλεγχο του GFRP. Από τις εξαγόμενες κυματομορφές φάνηκε ότι το ξύλο Balsa παρουσιάζει μεγαλύτερη απόσβεση, πράγμα που μπορεί να δικαιολογηθεί από την πορώδη δομή του. Παρά το μεγάλο gain που δόθηκε και πάλι η κυματομορφή που προέκυψε δεν ήταν πολύ ευανάγνωστη, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.6 και 7.7, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν επιφυλάξεις για τον εντοπισμό της ατέλειας.



Σχήμα 7.6: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του πυρήνα Balsa

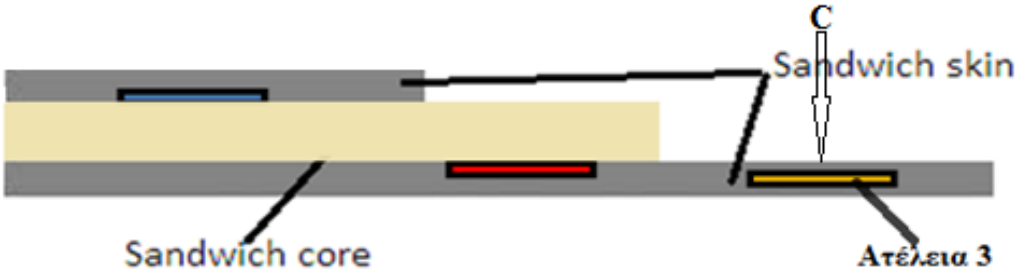


Σχήμα 7.7: Κυματομορφή όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Ο παλμός που φάνηκε να αντιστοιχεί στην ατέλεια, προέκυψε από τις ενδείξεις των gates να ανακλάται σε πάχος 31.54 mm, τιμή αρκετά λογική, καθώς το gate 2 τοποθετήθηκε σε τιμή που αντιστοιχεί στο εσωτερικό του GFRP και όχι στην διεπιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος. Σε διαφορετική περίπτωση, το σήμα της ατέλειας θα ήταν μπερδεμένο με τον παλμό που θα προέκυπτε από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι τα ενδιάμεσα υψηλά σήματα προκύπτουν πιθανότατα από ανακλάσεις εντός του Balsa, γεγονός που μπορεί να επιβεβαιωθεί από την πορώδη δομή του.

- **Ατέλεια Νο 3**

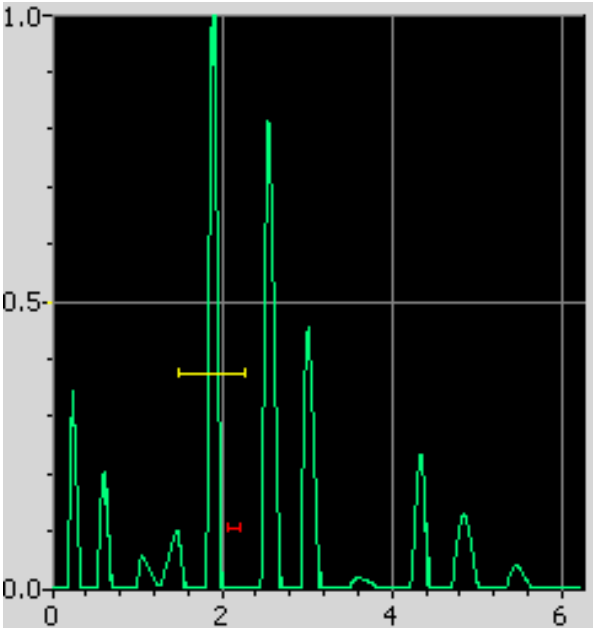
Για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν οι ίδιες ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν και για την ατέλεια 1, καθώς η υπερηχητική δέσμη διαπερνά το ίδιο υλικό (GFRP) και στις δυο περιπτώσεις. Κατά τον έλεγχο αυτό, δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα και τα σήματα που προέκυψαν ήταν αρκετά καθαρά, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 7.9 και 7.10, κάτι που επέτρεψε να γίνει μία αξιόπιστη εκτίμηση. Στη συνέχεια ακολουθεί σκαρίφημα της θέσης της ατέλειας (Σχήμα 7.8), καθώς και ο Πίνακας 7.3 με τις ρυθμίσεις του οργάνου.



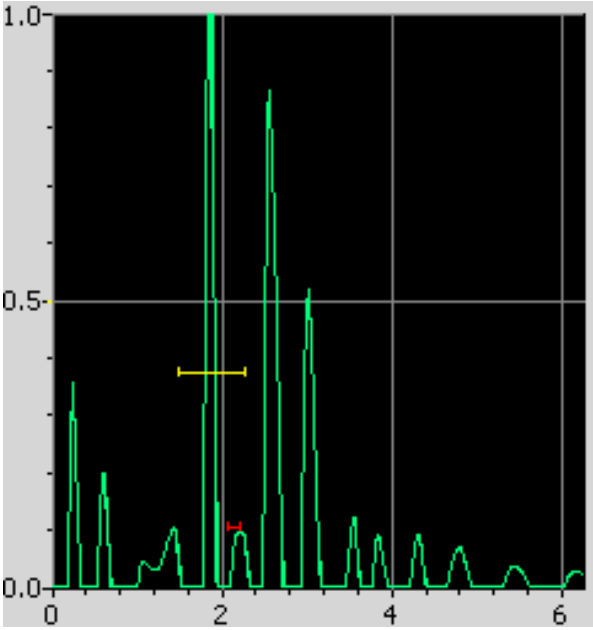
Σχήμα 7.8: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 3

Πίνακας 7.3: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	4.44 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	44 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	37%	10%
Gate Start	1.2mm	2mm
Gate Width	1.2 mm	0.15 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms



Σχήμα 7.9: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του πίσω περιβλήματος GFRP



Σχήμα 7.10: Κυματομορφή όπου εμφανίζεται ο παλμός της εμπρός επιφάνειας της ατέλειας

Η ατέλεια, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, ήταν τοποθετημένη στο μισό του πάχους του περιβλήματος το οποίο είχε συνολικό πάχος 2.5 mm. Παρ' όλα αυτά, η ατέλεια σύμφωνα με τις ενδείξεις των gates φάνηκε να εντοπίζεται σε απόσταση 0.37 mm από την εμπρός επιφάνεια του GFRP, πράγμα που δημιούργησε αμφιβολίες για το αν ο παλμός που έτεμνε το gate προέρχονταν από την ατέλεια.

Μία πρώτη επαλήθευση του προηγούμενου ελέγχου ήταν η σάρωση του GFRP από την πίσω επιφάνεια, με σκοπό να υπολογιστεί η απόσταση της πίσω επιφάνειας της ατέλειας από το πίσω μέρος του περιβλήματος. Αφού, λοιπόν, εκτιμήθηκε ότι η απόσταση ήταν 0.55 mm, υπολογίστηκε το πάχος της ατέλειας να είναι 1.1 mm, αποτέλεσμα αρκετά ικανοποιητικό, αφού με μηχανικά μέσα το πάχος δύο γυαλόχαρτων Grade 400 είναι περίπου ίσο με 1.25 mm.

Η τελική επαλήθευση, όμως, πραγματοποιήθηκε με έλεγχο του δοκιμίου και με τη διάταξη ULTRAPAC II, η οποία, όπως θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα, έδωσε αποτελέσματα που συνέκλιναν ικανοποιητικά.

7.1.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο έλεγχος του κάθε δοκιμίου πραγματοποιήθηκε και με τη διάταξη ULTRAPAC II με κεφαλή επαφής 2.25 MHz και διάμετρο 0.5 in. Σκοπός της εφαρμογής της δεύτερης διάταξης ελέγχου με επαφή είναι να εξεταστεί το κατά πόσο τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών διατάξεων συγκλίνουν. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, για την κάθε ατέλεια θα παρουσιάζεται το αντίστοιχο setup και οι αντίστοιχες κυματομορφές.

- **Ατέλεια Νο 1**

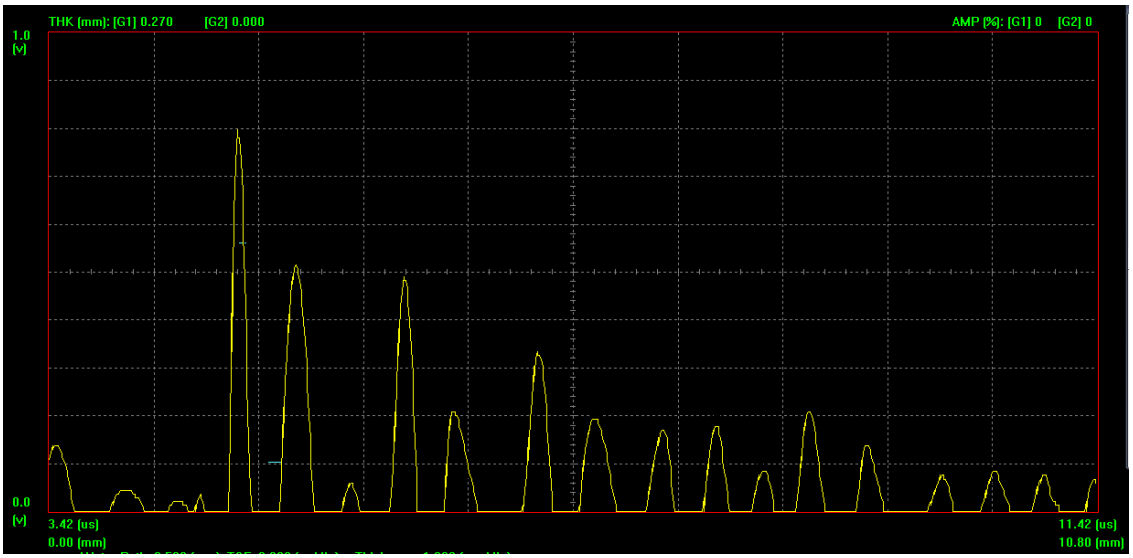
Για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής, δε χρειάζεται πλέον η τοποθέτηση δυο gates. Με την επιλογή delay γίνεται κατάλληλη μετακίνηση της κυματομορφής, ώστε στην οθόνη να απεικονίζεται μόνο η χρονική ιστορία που μας ενδιαφέρει. Μετέπειτα, εν αντιθέσει με την προηγούμενη διάταξη, το ULTRAPAC II δίνει τη δυνατότητα να οριστεί ως σημείο αναφοράς της μέτρησης του πάχους ο παλμός που προκύπτει από την εμπρός επιφάνεια του σύνθετου υλικού. Επιπλέον, φάνηκε ότι κατά τη χρήση του προγράμματος τα σήματα που λαμβάνονταν ήταν αρκετά εξασθενημένα και χρειάστηκε αρκετά μεγάλη ενίσχυση, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

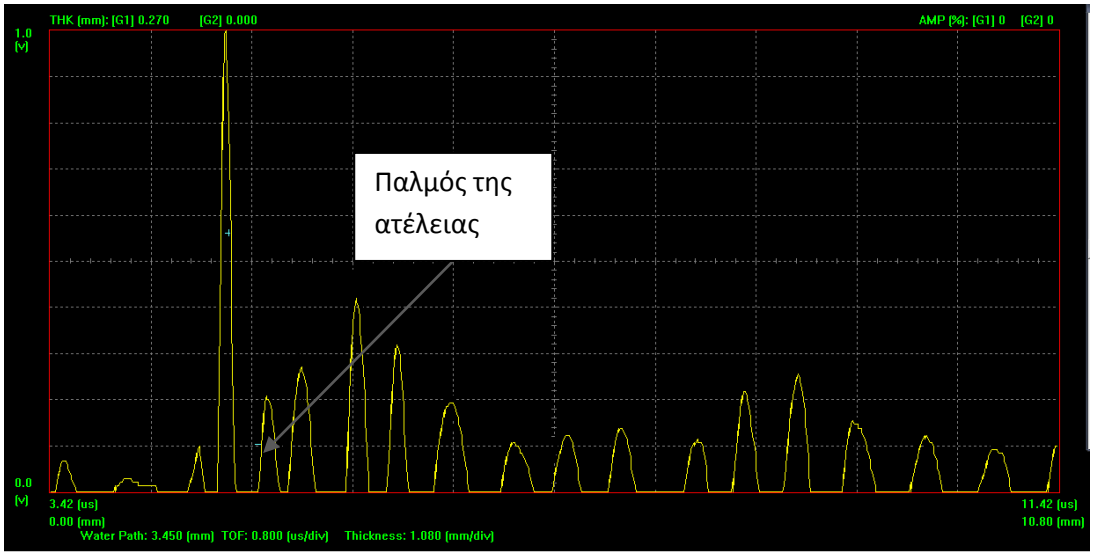
Analog / Digital Settings		
Delay	3.42 ms	
Width	8 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60,5 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	OFF
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	58%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	12%	10%
Gate Start	0.1 mm	2mm
Gate Width	0.2 mm	0.15 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Όπως πολύ εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί, μία βασική διαφορά με το αντίστοιχο setup που εφαρμόστηκε στον προηγούμενο έλεγχο(βλ. Πίνακα 7.1) είναι η εφαρμογή του delay. Το delay κάθε φορά ρυθμιζόταν κατάλληλα, ώστε να "πετάμε" εκτός παραθύρου τους αρχικούς παλμούς που προέκυπταν λόγω διέγερσης της κεφαλής, με σκοπό το gate να συγχρονίζεται

πάντα με τον παλμό της εμπρός επιφάνειας. Στη συνέχεια, στα Σχήματα 7.11 και 7.12 παρουσιάζονται οι κυματομορφές που αντλήθηκαν κατά τον έλεγχο.



Σχήμα 7.11: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος GFRP



Σχήμα 7.12: Κυματομορφή όπου παρουσιάζεται ο παλμός της ατέλειας

Η ατέλεια βρέθηκε να είναι σε βάθος 0.27 mm από την εμπρός επιφάνεια, ένδειξη που ήταν αρκετά κοντά με εκείνη που προέκυψε κατά τον έλεγχο με POCKET UT^{TM} (0.2 mm).

Όπως και στον προηγούμενο έλεγχο, η ατέλεια αυτή δεν μπόρεσε να εντοπιστεί κατά τη σάρωση από την πίσω μεριά του δοκιμίου, λόγω της μεγάλης απόσβεσης της υπερηχητικής δέσμης.

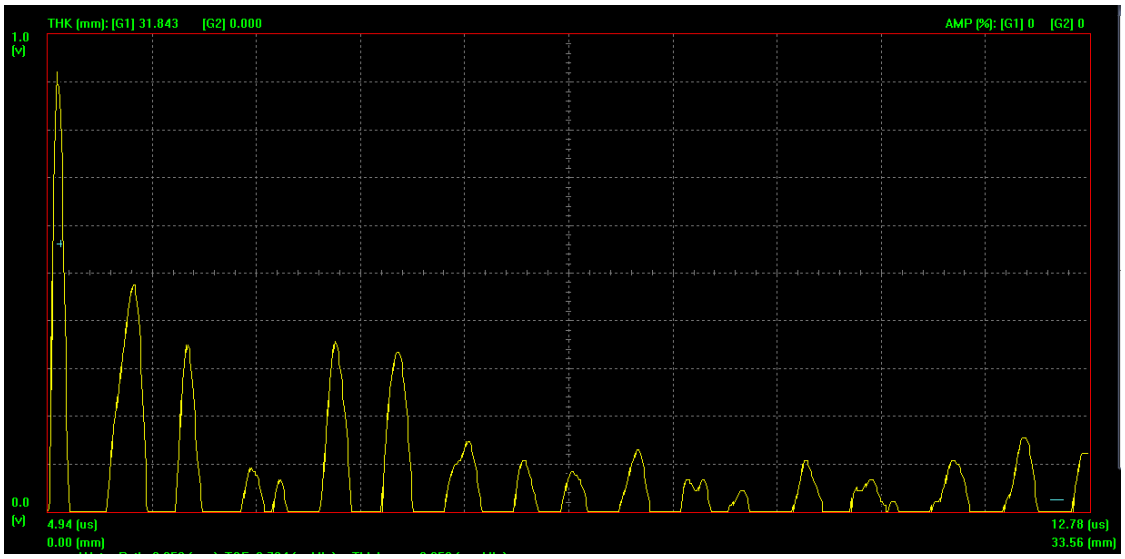
- **Ατέλεια Νο 2**

Ο εντοπισμός της ατέλειας αυτής και σε αυτή τη διάταξη παρουσίασε αρκετές δυσκολίες. Οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.

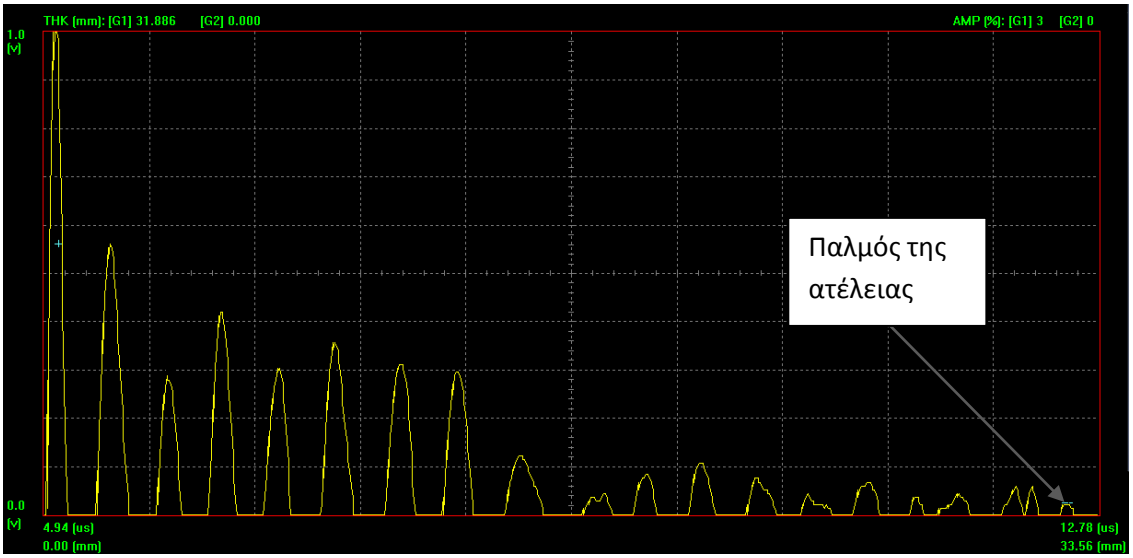
Πίνακας 7.5: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	4.94 ms	
Width	7.74 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	62 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	OFF
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	58%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	4%	10%
Gate Start	31.7 mm	2mm
Gate Width	0.2 mm	0.15 mm
Gate Velocity	8.56 mm/ms	8.56 mm/ms

Όπως φαίνεται και από τις ρυθμίσεις, εφαρμόστηκε ένα αρκετά μεγάλο gain, το οποίο ήταν απαραίτητο λόγω της μεγάλης απόσβεσης της υπερηχητικής δέσμης εντός του Balsa. Επιπρόσθετα, όπως θα φανεί και στα Σχήματα 7.13 και 7.14, τα παραγόμενα σήματα δεν ήταν τόσο ευανάγνωστα όσο εκείνα που παράχθηκαν με το POCKET UT^{TM}, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολος ο εντοπισμός του σήματος της ατέλειας. Η διαφοροποίηση αυτή, πιθανότατα να οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δύο οργάνων, καθώς επίσης και στο ότι το ULTRAPAC II, σε αντίθεση με το POCKET UT^{TM}, εφαρμόζεται αποδοτικότερα σε δοκιμές βύθισης.



Σχήμα 7.13: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του πυρήνα Balsa



Σχήμα 7.14: Κυματομορφή πυρήνα Balsa όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Κατά τον έλεγχο αυτό, φάνηκε ότι η ατέλεια βρίσκεται σε πάχος 31.886 mm από την εμπρός επιφάνεια, αποτέλεσμα πολύ κοντά σε εκείνο του πρώτου ελέγχου. Η κυματομορφή που προέκυψε, παρά το μεγάλο gain που εφαρμόστηκε, ήταν αρκετά εξασθενημένη, καθιστώντας αδύνατο τον εντοπισμό της συγκεκριμένης ατέλειας. Με βάση τον αντίστοιχο έλεγχο που πραγματοποιήθηκε με το POCKET UT^{TM}, έγινε τοποθέτηση του gate στο πάχος που προέκυψε από τον έλεγχο αυτό. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε η χρονική περιοχή του gate, με σκοπό τον εντοπισμό πιθανού καινούργιου παλμού ο οποίος θα προέκυπτε λόγω της ύπαρξης της ατέλειας.

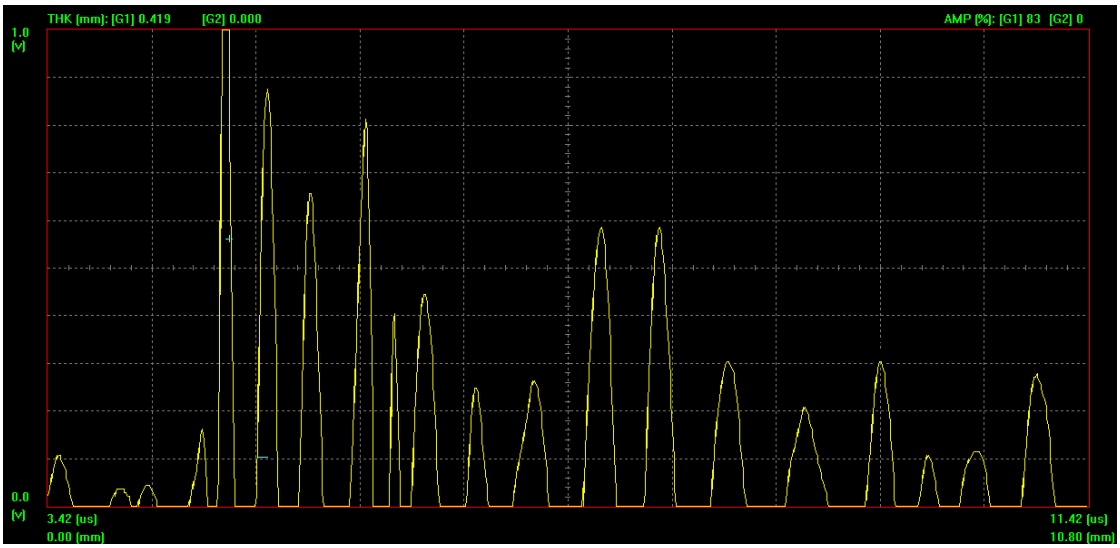
- **Ατέλεια Νο 3**

Η διαδικασία ελέγχου για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής ήταν όμοια με εκείνη της ατέλειας 1 και δεν παρουσίασε ιδιαίτερες δυσκολίες. Στη συνέχεια ακολουθούν οι ρυθμίσεις και οι εξαγόμενες κυματομορφές.

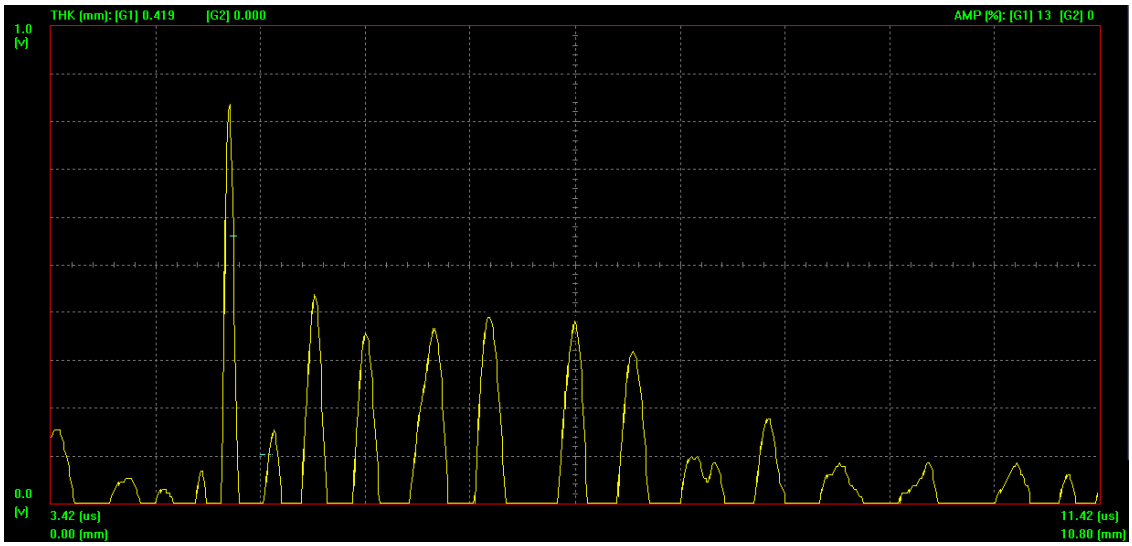
Πίνακας 7.6: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3

Analog / Digital Settings		
Delay	3.42 ms	
Width	8 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60,5 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	OFF
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	58%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	11%	10%
Gate Start	0.3 mm	2mm
Gate Width	0.2 mm	0.15 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το setup είναι σχεδόν όμοιο με εκείνο που εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 (Πίνακας 7.4), καθώς η υπερηχητική δέσμη διαπερνά το ίδιο υλικό. Στη συνέχεια, στα Σχήματα 7.15 και 7.16, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν.



Σχήμα 7.15: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του πίσω περιβλήματος GFRP



Σχήμα 7.16: Κυματομορφή του πίσω περιβλήματος όπου παρουσιάζεται ο παλμός της ατέλειας

Καθώς η κεφαλή βρίσκεται στην περιοχή της ατέλειας, μεταξύ πρώτου και δεύτερου παλμού παρατηρείται να προκύπτει ένας καινούργιος παλμός, πράγμα που δε συμβαίνει όταν η κεφαλή βρίσκεται σε υγιή περιοχή του τμήματος που μελετάται. Η ατέλεια φάνηκε να βρίσκεται σε πάχος 0.42 mm από την εμπρός επιφάνεια του κάτω περιβλήματος, αποτέλεσμα που ήταν αρκετά κοντά σε εκείνο που προέκυψε από τη φορητή συσκευή POCKET UT^{TM}.

Τέλος, για το δοκίμιο A1 ακολουθεί ο Πίνακας 7.7 ο οποίος συνοψίζει τα αποτελέσματα των δύο διατάξεων ελέγχου.

Πίνακας 7.7: Συνοπτική παρουσίαση της θέσης κάθε ατέλειας κατά το πάχος και με τις δύο διατάξεις έλεγχου

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1	0.27 mm	0.2 mm
2	31.54 mm	31.84 mm
3	0.37	0.42 mm

7.1.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan.

Οι κυματομορφές οι οποίες προκύπτουν κατά τον έλεγχο των σύνθετων υλικών, όπως φάνηκε και από τα ανωτέρω σχήματα, χαρακτηρίζονται από πολλούς παλμούς που προέρχονται από το εσωτερικό των δοκιμίων. Η ύπαρξη των παλμών αυτών μπορεί να οδηγήσει το χρήστη σε λάθος εκτιμήσεις, όπως για παράδειγμα το να θεωρήσει ότι κάποιος παλμός οφείλεται σε ατέλεια, ενώ στην πραγματικότητα αυτός δημιουργείται από την ανάκλαση της δέσμης σε κάποια ίνα.

Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκε η δοκιμή βύθισης με κεφαλή 2.25 MHz και απεικόνιση των δεδομένων με C-scan με το ULTRAPAC II. Η χρήση αυτής της δοκιμής είχε καθαρά ρόλο επαλήθευσης των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από τη δοκιμή επαφής, καθώς μέσω της απεικόνισης C-scan παρέχεται η δυνατότητα σχηματικής παρουσίασης της ατέλειας, ή έστω κάποιου ίχνους της.

Για να είναι επιτυχής ο εντοπισμός της ατέλειας με τη δοκιμή βύθισης, πρέπει η υπερηχητική δέσμη να προσκρούει κάθετα στην επιφάνεια του δοκιμίου, γεγονός που δε συνέβαινε με το δοκίμιο A1. Το εν λόγω δοκίμιο, λόγω της παρουσίας του Balsa, επέπλεε, με αποτέλεσμα να μη δύναται να τοποθετηθεί σε απόλυτη καθετότητα ως προς την κεφαλή. Το γεγονός αυτό κατέστησε αδύνατο τον έλεγχο του δοκιμίου.

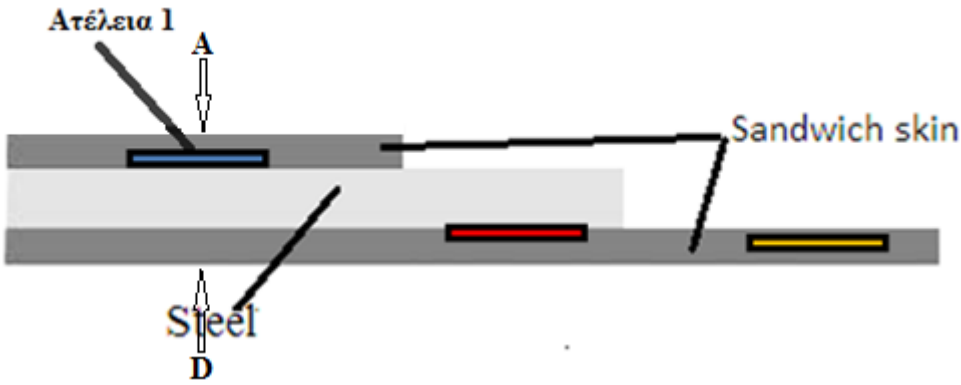
7.2 Δοκίμιο B1

Το δοκίμιο B1 αποτελείται από περιβλήματα GFRP και χαλύβδινο πυρήνα. Ο έλεγχος των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε από τις ίδιες θέσεις που έγιναν οι σαρώσεις του δοκιμίου A1 και με τις ίδιες διατάξεις ελέγχου(βλ. Σχήμα 7.1).

7.2.1 Έλεγχος με POCKET UT™

- **Ατέλεια No 1**

Οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν για την ατέλεια αυτή είναι σχεδόν όμοιες με την αντίστοιχη ατέλεια του δοκιμίου A1, καθώς και εδώ η ατέλεια βρίσκεται στη διεπιφάνεια περιβλήματος-πυρήνα (Σχήμα 7.17), όπως επίσης και το υλικό που διαπερνά η υπερηχητική δέσμη είναι σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.8 με αναλυτικότερες πληροφορίες για το setup του οργάνου που εφαρμόστηκε.

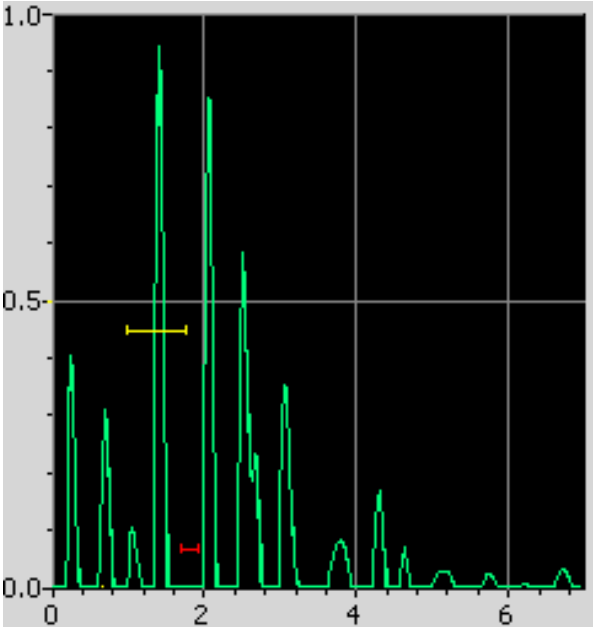


Σχήμα 7.17: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 1

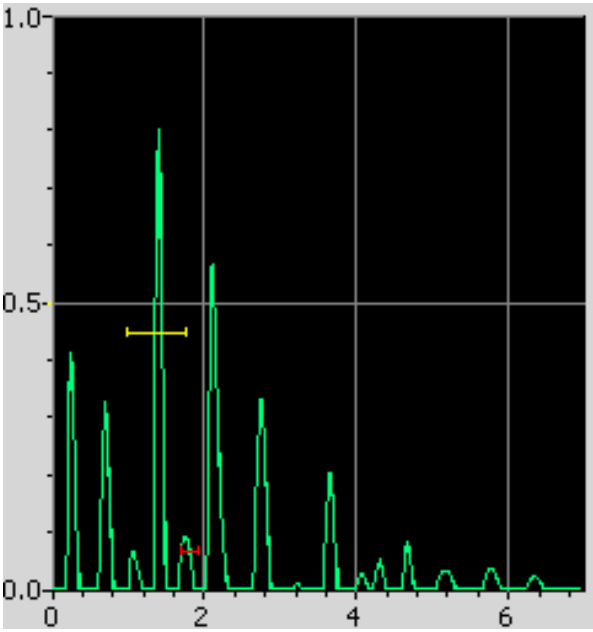
Πίνακας 7.8: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	5.13 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	23 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	45%	8%
Gate Start	1 mm	1.7 mm
Gate Width	0.9 mm	0.25 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Όπως παρατηρείται, κατά τον έλεγχο ενεργοποιήθηκαν και τα δυο gates, για τον ίδιο λόγο που σχολιάστηκε και για το δοκίμιο A1. Επιπλέον, για τον εντοπισμό της ατέλειας, εφαρμόστηκε το ίδιο gain με την αντίστοιχη ατέλεια του δοκιμίου A1. Μετά την εφαρμογή των ρυθμίσεων, τα σήματα που παράχθηκαν παρουσιάζονται στα Σχήμα 7.18 και 7.19.



Σχήμα 7.18: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του περιβλήματος



Σχήμα 7.19: Κυματομορφή του περιβλήματος όπου παρουσιάζεται ο παλμός της ατέλειας

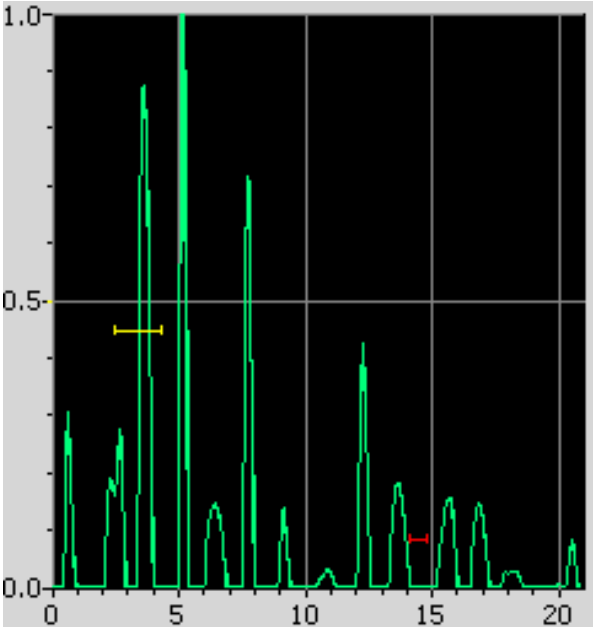
Η κυματομορφή που προέκυψε ήταν αρκετά ευανάγνωστη και η ατέλεια, σύμφωνα με τις ενδείξεις των gates, βρίσκεται σε πάχος 0.85 mm από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος.

Η ατέλεια 1 εντοπίστηκε κατά τη σάρωση από το πίσω μέρος του δοκιμίου (θέση D), δηλαδή στη θέση 4, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Σχήμα 7.1. Οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.9.

Πίνακας 7.9: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 από το πίσω περίβλημα

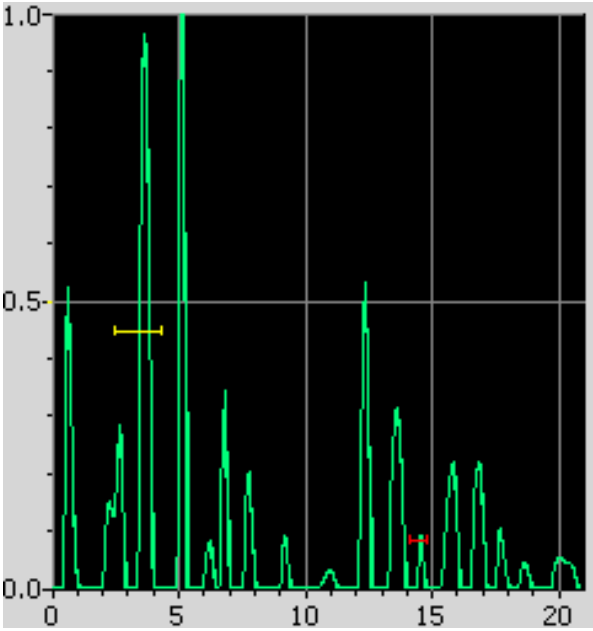
Analog / Digital Settings		
Delay	0 micro sec	
Width	9.25 micro sec	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	32 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	45%	8%
Gate Start	3.2 mm	14 mm
Gate Width	1.3 mm	0.7 mm
Gate Velocity	6.69 mm/micro sec	6.69 mm/micro sec

Συγκριτικά με τις ρυθμίσεις που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 7.8, παρατηρείται ότι σε αυτόν τον έλεγχο εφαρμόστηκε μεγαλύτερο gain, γεγονός αναμενόμενο, καθώς το πάχος που πρέπει να διαπεράσει η υπερηχητική δέσμη για τον εντοπισμό της ατέλειας είναι πολύ μεγαλύτερο. Επιπλέον, μεγαλύτερη είναι και η απόσβεση που υφίσταται η υπερηχητική δέσμη, τόσο λόγω του μεγάλου πάχους, όσο και λόγω της παρουσίας των δύο διαφορετικών υλικών περιβλήματος-πυρήνα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.20 και 7.21.



Σχήμα 7.20: Κυματομορφή υγιούς περιοχής δοκιμίου.

Το gate 2 (οριζόντια κόκκινη γραμμή) τοποθετήθηκε μετά τον παλμό της διεπιφάνειας χάλυβα-συνθέτου. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.21, όταν η κεφαλή βρίσκεται στην περιοχή της ατέλειας, προκύπτει ένας καινούργιος παλμός ο οποίος τέμνει το gate και οφείλεται στην ατέλεια.



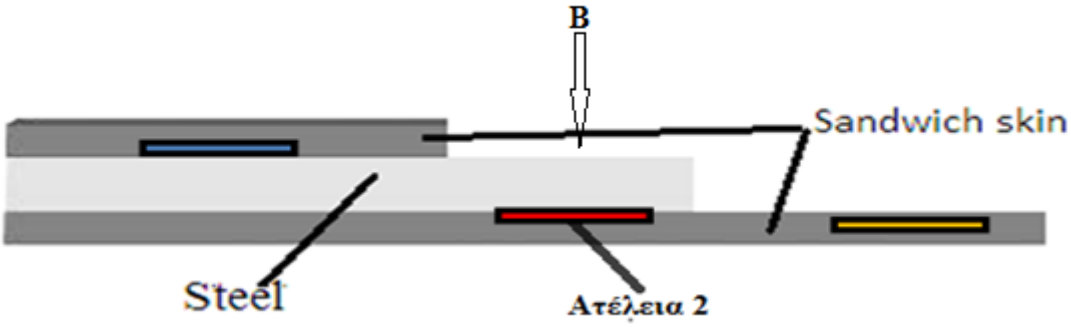
Σχήμα 7.21: Κυματομορφή του δοκιμίου όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Σύμφωνα με τις ενδείξεις, η ατέλεια βρίσκεται σε απόσταση 10.26 mm από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Γνωρίζοντας, τώρα, πόσο απέχει η ατέλεια 1 από την εμπρός και την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου, μπορεί να γίνει υπολογισμός του πάχους της ατέλειας κάτι το οποίο αποτελεί και μια πρώτη επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Η ατέλεια, λοιπόν, έχει

πάχος 1.15 mm, τιμή που παρουσιάζει μικρή απόκλιση από το πραγματικό πάχος δύο στρώσεων γυαλόχαρτου, που με μηχανικά μέσα προέκυψε 1.25 mm.

- **Ατέλεια No 2**

Ο εντοπισμός αυτής της ατέλειας δεν παρουσίασε τις ίδιες δυσκολίες με τον αντίστοιχο της ατέλειας 1. Αυτό συμβαίνει, καθώς το υλικό που έπρεπε να διαπεράσει η υπερηχητική δέσμη ήταν χάλυβας υψηλής αντοχής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.22, υλικό που χαρακτηρίζεται από ομοιογενή δομή και στο οποίο η δέσμη δεν υφίσταται τόσο έντονη απόσβεση όσο στο σύνθετο υλικό. Το setup που εφαρμόστηκε παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 7.10.

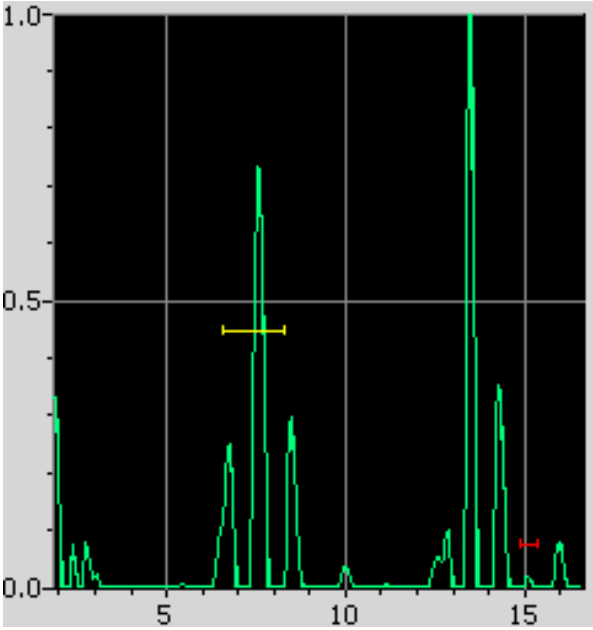


Σχήμα 7.22: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 2

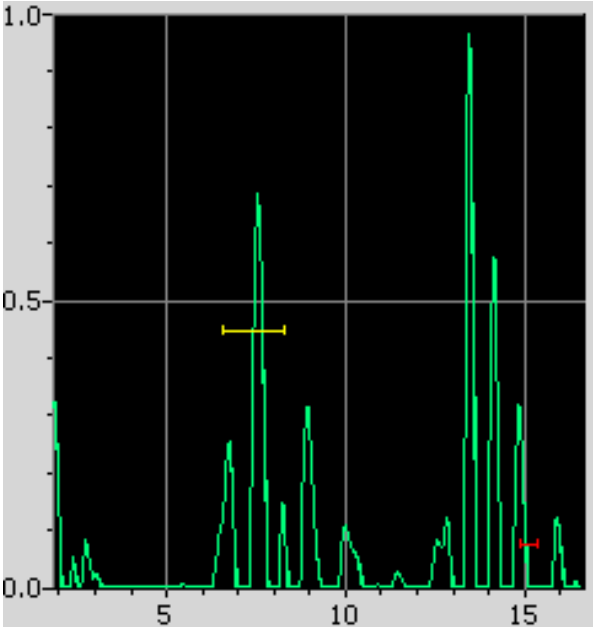
Πίνακας 7.10: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	5.06 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	14 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	45%	8%
Gate Start	6.5 mm	14.8 mm
Gate Width	8.5 mm	0.3 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms

Χαρακτηριστικό της μικρής απόσβεσης, την οποία παρουσιάζει η υπερηχητική δέσμη στον χάλυβα υψηλής αντοχής, είναι το μικρό ποσό ενίσχυσης που εφαρμόστηκε στην κυματομορφή, συγκριτικά πάντα με το αντίστοιχο πόσο κατά τον έλεγχο για τον εντοπισμό της ατέλειας 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 7.23 και 7.24.



Σχήμα 7.23: Κυματομορφή υγιούς περιοχής χαλύβδινου πυρήνα

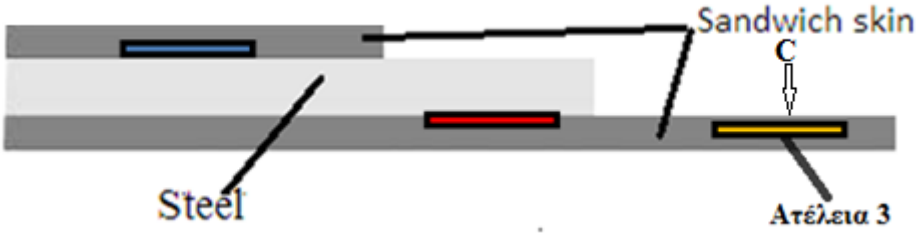


Σχήμα 7.24: Κυματομορφή χαλύβδινου πυρήνα όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Σύμφωνα με τα λαμβανόμενα σήματα, η ατέλεια φάνηκε να βρίσκεται σε πάχος 7.4 mm από την εμπρός επιφάνεια του πυρήνα. Ο παλμός που τέμνει το gate προέρχεται από την ανάκλαση της δέσμης στην πίσω επιφάνεια της ατέλειας. Το gate τοποθετήθηκε εκεί, καθώς ο παλμός από την εμπρός επιφάνεια της ατέλειας πιθανότατα να ταυτίζεται με το γειτονικό στα αριστερά παλμό, ο οποίος προέρχεται από τη διεπεφάνεια χάλυβα-συνθέτου, γεγονός που καθιστούσε δύσκολο τον εντοπισμό του.

- **Ατέλεια No 3**

Οι ρυθμίσεις για τον εντοπισμό της ατέλειας 3 ήταν πανομοιότυπες με εκείνες της ατέλειας 1, αφού και εδώ για τον εντοπισμό της ατέλειας, η δέσμη έπρεπε να διαπεράσει το σύνθετο με ενισχυτικές ίνες γυαλιού υλικό όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.25.

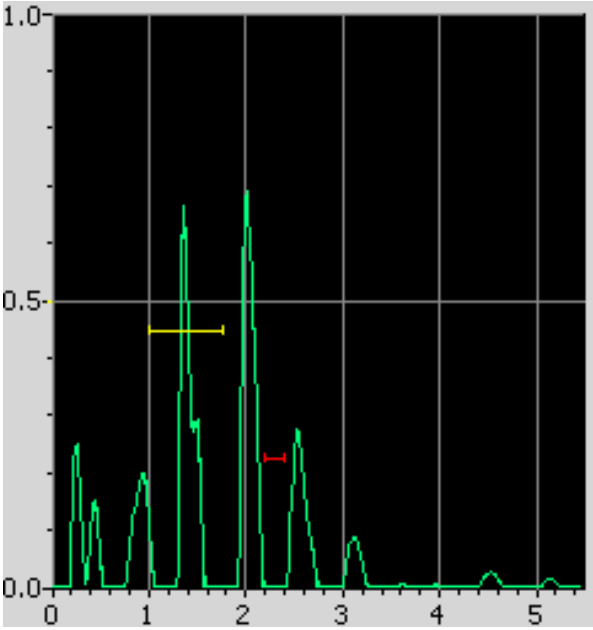


Σχήμα 7.25: Σκαρίφημα απεικόνισης ατέλειας 3

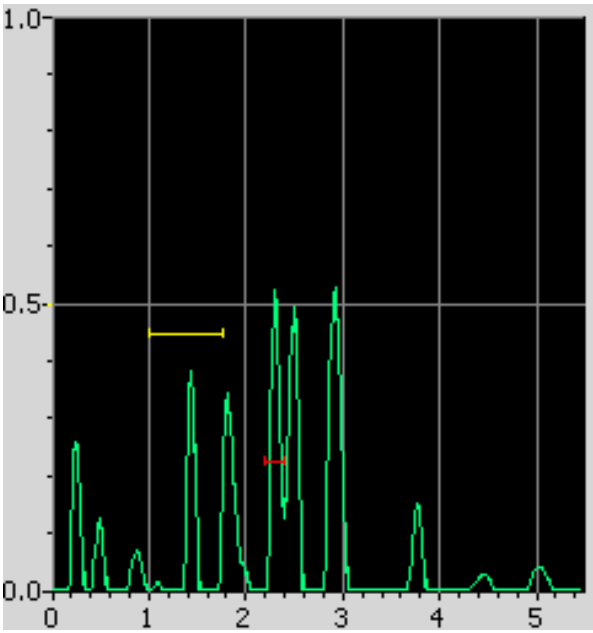
Πίνακας 7.11: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας No 3

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	5.13 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	23 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	45%	25%
Gate Start	1 mm	2.2 mm
Gate Width	0.8 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Τα σήματα που πρόεκυψαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.26 και 7.27.



Σχήμα 7.26: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος



Σχήμα 7.27: Κυματομορφή περιβλήματος όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τη σύγκριση των ανωτέρω κυματομορφών, ο παλμός της εμπρός επιφάνειας παρουσιάζει αποδυνάμωση όταν η κεφαλή βρίσκεται πάνω από την περιοχή της ατέλειας. Η αποδυνάμωση αυτή μπορεί να προέκυψε, είτε λόγω διαφοροποίησης του πάχους, είτε λόγω στιγμιαίας απώλειας της επαφής μεταξύ αισθητήρα και εμπρός επιφάνειας. Παρά το γεγονός αυτό, ο παλμός της ατέλειας φάνηκε να μην επηρεάζεται και εντοπίστηκε σε πάχος 0.8 mm από την εμπρός επιφάνεια.

7.2.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής

Όπως και στο δοκίμιο Α1, έτσι και στο Β1, πραγματοποιήθηκε και ένας δεύτερος έλεγχος επαφής για να παρατηρηθεί το κατά πόσο συγκλίνουν τα αποτελέσματα των δύο διατάξεων. Στην συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα.

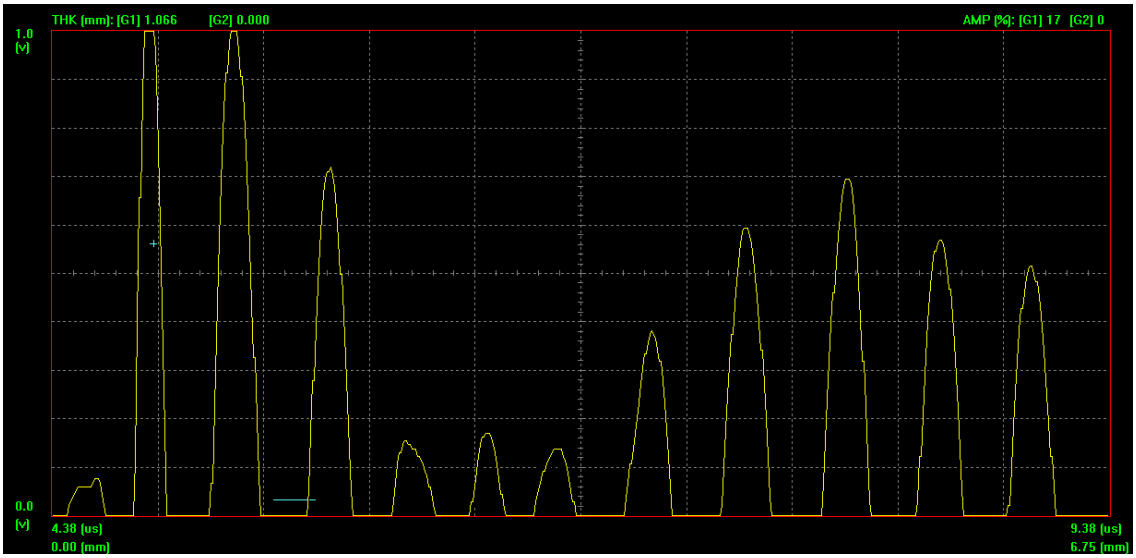
- **Ατέλεια No 1**

Ο έλεγχος για την ατέλεια 1 παρουσίασε, όπως είναι λογικό, λόγω της θέσης της ατέλειας, πολλά κοινά στοιχεία με τον αντίστοιχο έλεγχο που πραγματοποιήθηκε για την ατέλεια του δοκιμιού Α1. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.12 με τις ρυθμίσεις του οργάνου.

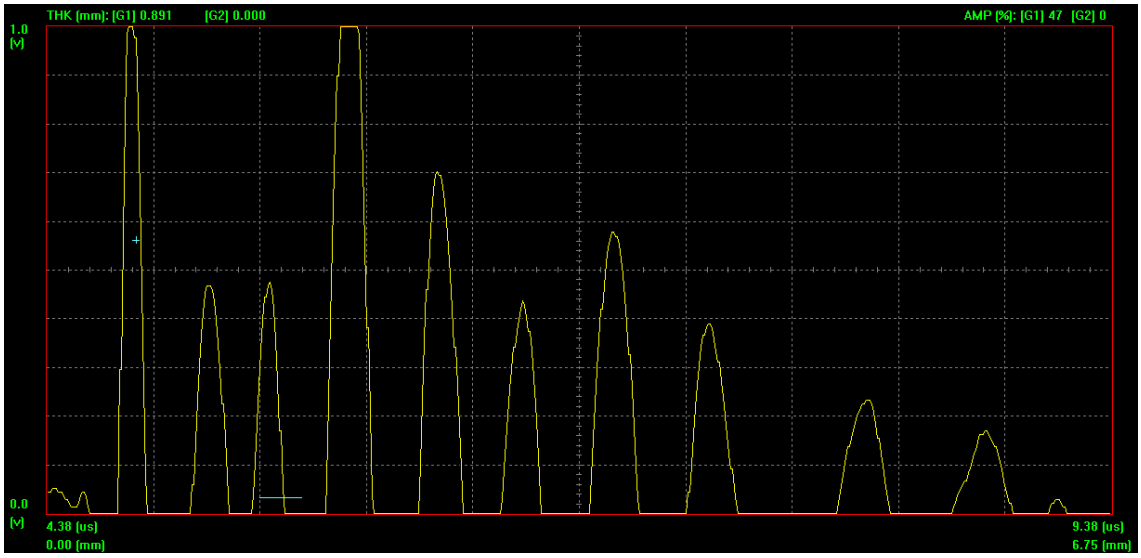
Πίνακας 7.12: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	4.38 micro sec	
Width	5 micro sec	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60.1 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	55%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	2%	25%
Gate Start	0.6 mm	2.2 mm
Gate Width	0.4 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/micro sec	2.7 mm/micro sec

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι εφαρμόστηκε ένα σχεδόν όμοιο setup με εκείνο που εφαρμόστηκε στην αντίστοιχη ατέλεια του δοκιμίου A1. Ακολουθούν τα σήματα που προέκυψαν στα Σχήματα 7.28 και 7.29.



Σχήμα 7.28: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος



Σχήμα 7.29: Κυματομορφή περιβλήματος όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

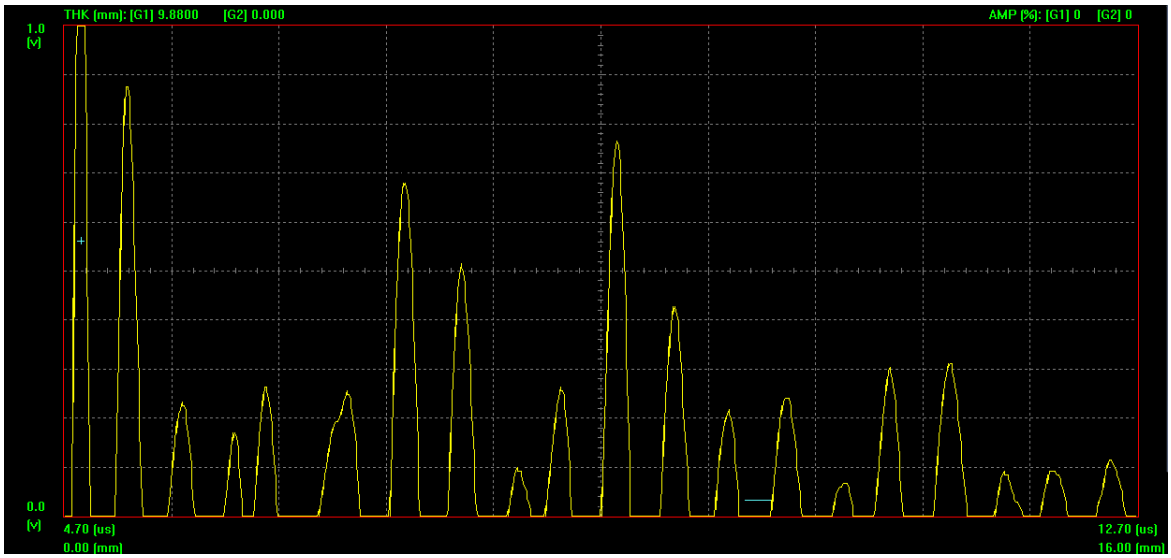
Όπως φαίνεται από τα σχήματα, το σήμα της ατέλειας ήταν αρκετά ισχυρό και δε δημιούργησε πρόβλημα στον εντοπισμό της. Το τεχνητό σφάλμα βρέθηκε να είναι σε απόσταση 0.9 mm από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος, τιμή που παρουσίαζε μικρή απόκλιση από εκείνην που προέκυψε με το POCKET UT^{TM}.

Η ατέλεια αυτή εντοπίστηκε και από το πίσω περίβλημα, με σκοπό τον υπολογισμό της θέσης της ατέλειας, το πάχος της, καθώς και τη σύγκριση αυτών των τιμών με τις αντίστοιχες του προηγούμενου ελέγχου. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.13 με το setup που εφαρμόστηκε.

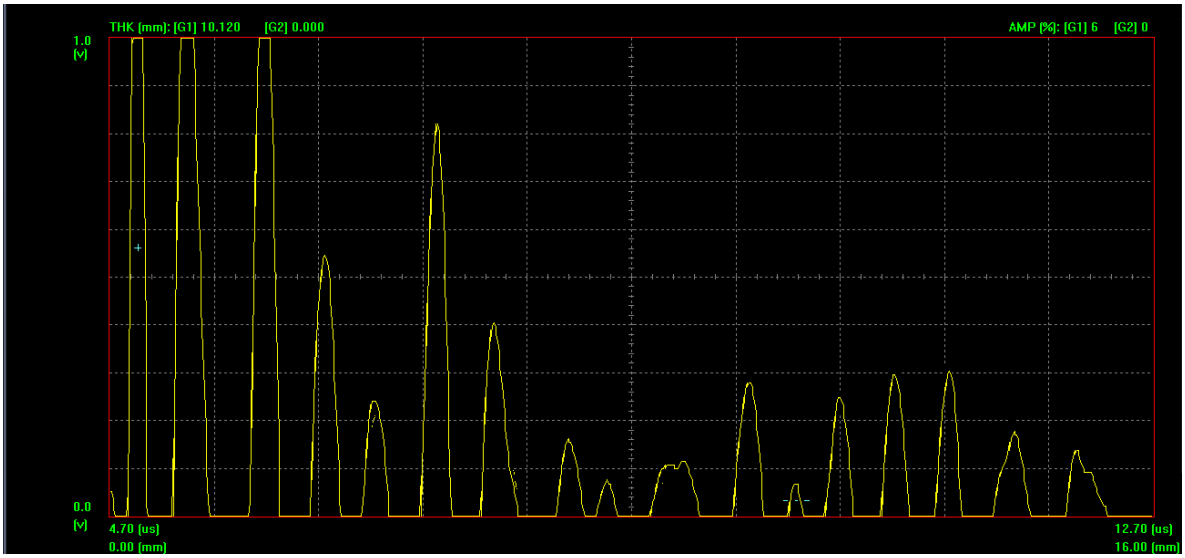
Πίνακας 7.13: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 από το πίσω περίβλημα

Analog / Digital Settings		
Delay	4.7 micro sec	
Width	8 micro sec	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	63 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	58%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	5%	25%
Gate Start	10 mm	2.2 mm
Gate Width	0.3 mm	0.2 mm
Gate Velocity	6.69 mm/micro sec	6.69 mm/micro sec

Για τον εντοπισμό της ατέλειας, η υπερηχητική δέσμη έπρεπε να διαπεράσει το πίσω περίβλημα από GFRP και το χαλύβδινο πυρήνα. Η ύπαρξη δύο διαφορετικών υλικών, όπως και το αρκετά μεγάλο πάχος από τον συνδυασμό τους, οδήγησε σε μεγάλη απόσβεση της δέσμης, με αποτέλεσμα να ήταν αναγκαία η εφαρμογή μεγάλης ενίσχυσης. Τα σήματα που προέκυψαν ακολουθούν στη συνέχεια στα Σχήματα 7.30 και 7.31.



Σχήμα 7.30: Κυματομορφή υγιούς περιοχής δοκιμίου



Σχήμα 7.31: Κυματομορφή δοκιμίου όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Από τα σήματα που προέκυψαν δεν ήταν εύκολος ο εντοπισμός της ατέλειας. Για το λόγο αυτό, το gate τοποθετήθηκε σύμφωνα με τα ευρήματα του ελέγχου με το POCKET UT^{TM} και εξετάστηκε η γύρω περιοχή. Πράγματι, φάνηκε να εμφανίζεται ένας καινούριος παλμός σε πάχος 10.12 mm από την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Η τιμή αυτή εμφανίζει σημαντική διαφοροποίηση από εκείνη του προηγούμενου ελέγχου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ερωτηματικά για τον επιτυχή εντοπισμό της ατέλειας. Πιθανότατα, με χρήση κεφαλής μικρότερης συχνότητας να ήταν επιτυχής ο ακριβής εντοπισμός της ατέλειας, καθώς με τη μικρότερη συχνότητα η δέσμη θα παρουσίαζε εντονότερη διεισδυτικότητα, μειώνοντας παράλληλα το θόρυβο λόγω μικρότερης ευαισθησίας της. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ το εργαστήριο της σχολής έχει στην διάθεση της κεφαλή με κεντρική συχνότητα 0.5 MHz, δεν ήταν δυνατό αυτή να χρησιμοποιηθεί, λόγω της μεγάλης διαμέτρου της.

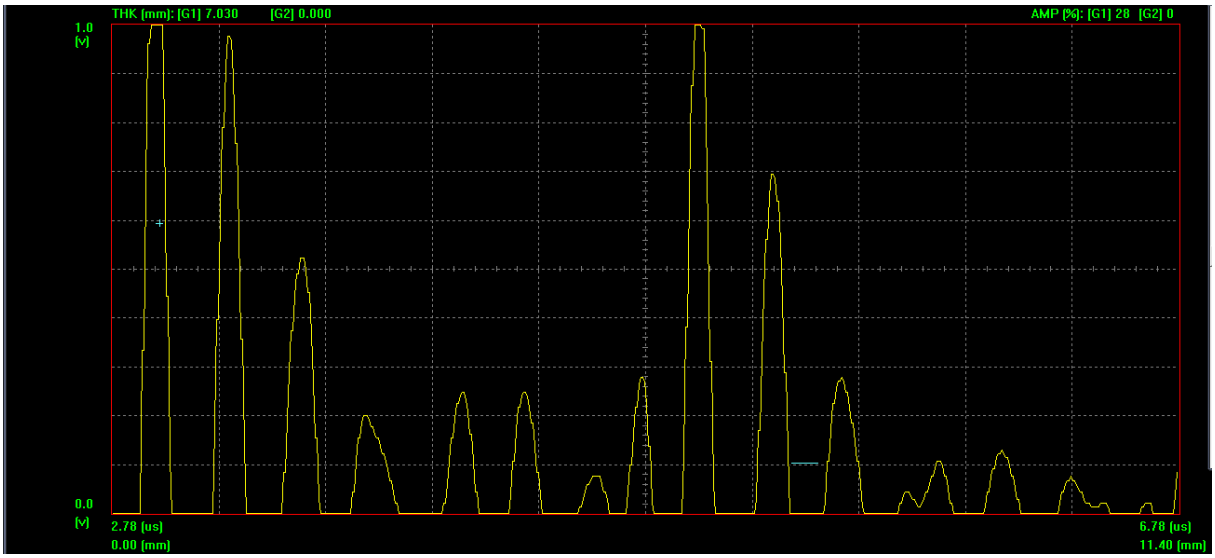
- **Ατέλεια Νο 2**

Ο έλεγχος αυτός, όπως και στον αντίστοιχο για το δοκίμιο Α1, δεν παρουσίασε δυσκολίες, αφού και εδώ το υλικό που έπρεπε να διαπεράσει η υπερηχητική δέσμη για τον εντοπισμό της ατέλειας είναι χάλυβας υψηλής αντοχής, στον οποίο η δέσμη εμφανίζει χαμηλής έντασης απόσβεση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 7.14 με το setup που εφαρμόστηκε.

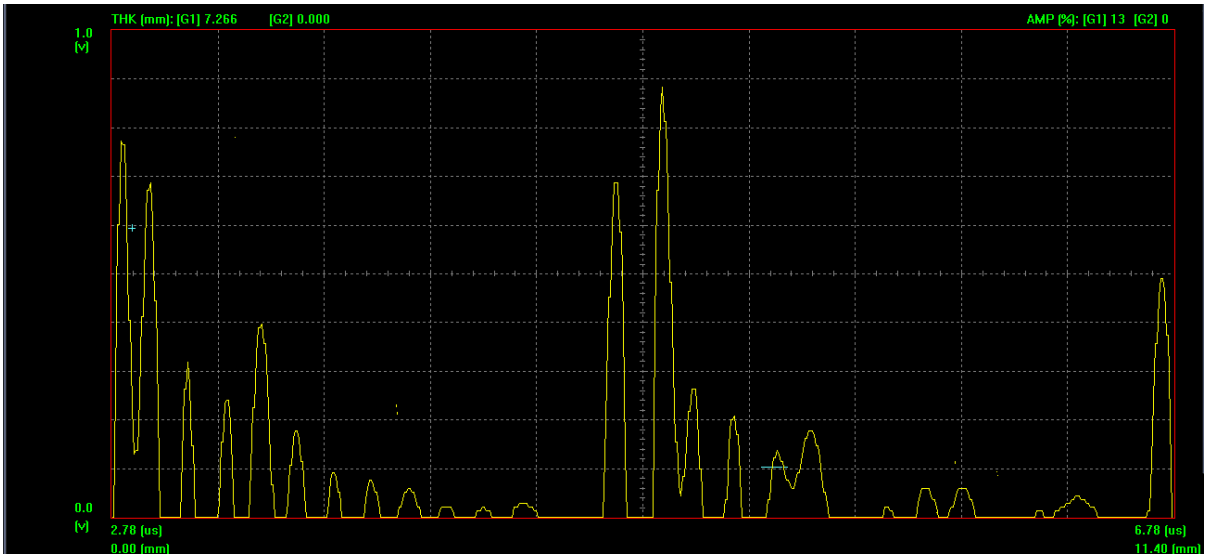
Πίνακας 7.14 : Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	2.78 ms	
Width	4 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	25 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	59%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	11%	25%
Gate Start	7 mm	2.2 mm
Gate Width	0.4 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms

Σε αυτή την περίπτωση τα σήματα, λόγω του ότι το υλικό που σαρώθηκε ήταν χάλυβας υψηλής αντοχής, ήταν αρκετά ισχυρά, με αποτέλεσμα να μην ήταν απαραίτητη η μεγάλη ενίσχυση των σημάτων. Τα σήματα που προέκυψαν κατά τον έλεγχο απεικονίζονται στα Σχήματα 7.31 και 7.32 .



Σχήμα 7.32: Κυματομορφή υγιούς περιοχή χαλύβδινου πυρήνα



Σχήμα 7.33: Κυματομορφή χαλύβδινου πυρήνα όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Όπως έχει αναφερθεί, η επιφάνεια των χαλύβδινων πυρήνων έφερε μια επικάλυψη ρητίνης. Κατά την διαδικασία του ελέγχου, το προστατευτικό στρώμα αφαιρέθηκε, ώστε στην αρχή της κυματομορφής να λαμβάνεται μόνο ο παλμός της εμπρός επιφάνειας του χάλυβα. Παρά την προσπάθεια προσεκτικής αφαίρεσης της ρητίνης, στην επιφάνεια παρέμειναν, όπως ήταν αναμενόμενο, μικρά υπολείμματα, γεγονός που μπορεί να αιτιολογήσει την εμφάνιση του καινούργιου παλμού, δίπλα σε εκείνον της εμπρός επιφάνειας, όπως παρουσιάστηκε στην κυματομορφή του Σχήματος 7.33. Παρά τη μεταβολή αυτή, ο εντοπισμός της ατέλειας δεν επηρεάστηκε και η ατέλεια βρέθηκε να είναι στα 7.27 mm, τιμή χωρίς σημαντική διαφοροποίηση από εκείνη που προέκυψε από το POCKET UT.

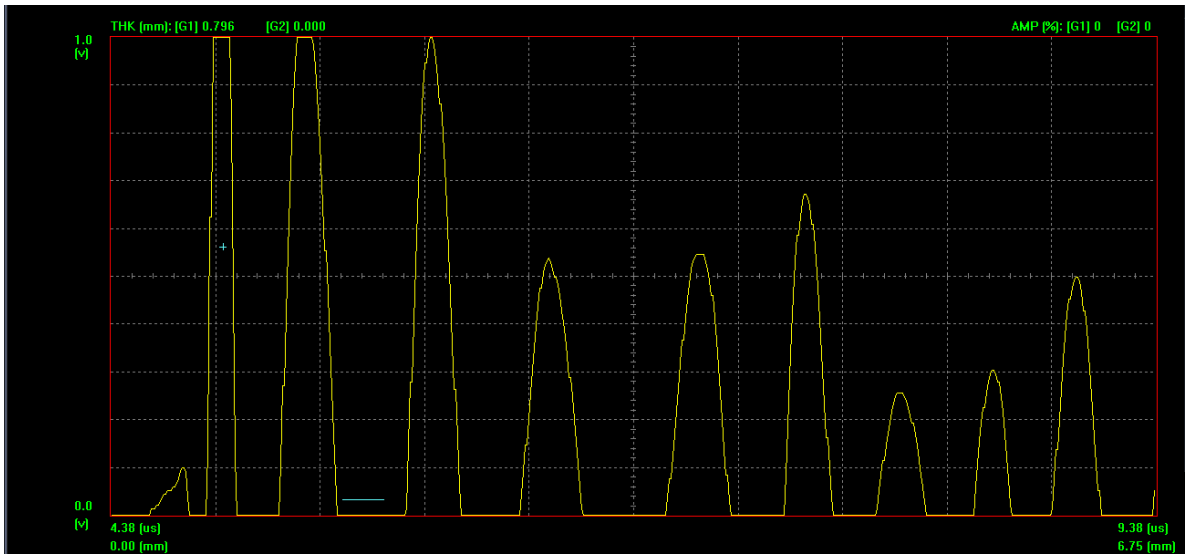
- **Ατέλεια Νο 3**

Ο έλεγχος για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής ήταν σχεδόν όμοιος με εκείνον που διεξήχθη για τον εντοπισμό της ατέλειας 3, καθώς το υλικό που διαπέρνα η δέσμη είναι το ίδιο. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.15 με τις ρυθμίσεις του οργάνου που εφαρμόστηκαν.

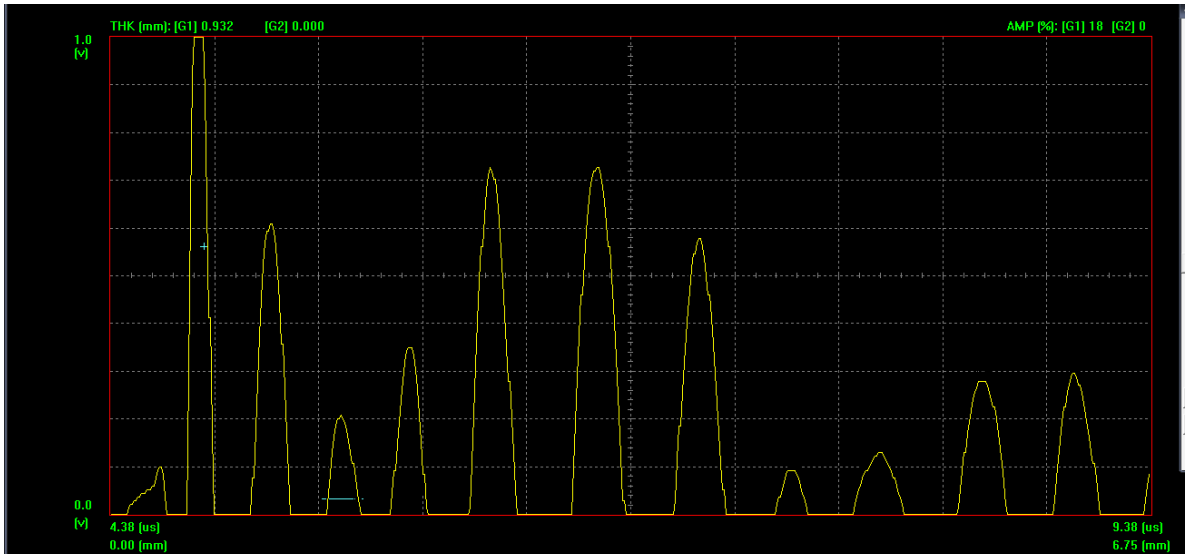
Πίνακας 7.15: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3

Analog / Digital Settings		
Delay	4.38 ms	
Width	5 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60.1 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	58%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	4%	25%
Gate Start	0.7 mm	2.2 mm
Gate Width	0.4 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν κατά τον έλεγχο στα Σχήματα 7.34 και 7.35.



Σχήμα 7.34: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος



Σχήμα 7.35: Κυματομορφή πίσω περιβλήματος που εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Όπως φαίνεται, το σήμα της ατέλειας ήταν αρκετά δυνατό και οδηγούσε σε αξιόπιστη εκτίμηση. Η ατέλεια βρέθηκε στα 0.93 mm κατά το πάχος, τιμή πολύ κοντινή με την αντίστοιχη του POCKET UT.

Συνοπτικά και για τις δύο διατάξεις ελέγχου με επαφή ακολουθεί ο Πίνακας 7.16.

Πίνακας 7.16: Συνοπτική παρουσίαση της θέσης κάθε ατέλειας κατά το πάχος και με τις δύο διατάξεις έλεγχου

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1	0.89 mm	0.85 mm
2	7.27 mm	7.44 mm
3	0.93 mm	0.80 mm

7.2.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δύο διατάξεις με μέθοδο επαφής επαληθεύτηκαν και με δοκιμή βύθισης, με κεφαλή ίδιας συχνότητας. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε με τοποθέτηση των gates με βάση τα προηγούμενα εξαγόμενα αποτελέσματα, με απώτερο σκοπό να επαληθεύονταν με σχηματική απεικόνιση της ατέλειας.

Ένα χαρακτηριστικό του εν λόγω ελέγχου είναι ο σωστός ορισμός του delay. Στις προηγούμενες δοκιμές, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο POCKET UT^{TM} το delay ήταν μηδέν, ενώ στη δοκιμή επαφής με ULTRAPAC II ήταν ένας σταθερός αριθμός της τάξεως των 4 μs, για όλες σχεδόν τις ατέλειες του κάθε δοκιμίου. Το delay που εφαρμόστηκε κατά τον έλεγχο βύθισης αυτού του δοκιμίου, όπως αυτό που εφαρμόστηκε και στους επόμενους με δοκιμή εμβάπτισης, είναι αρκετά μεγαλύτερο, της τάξεως των 12 μs και πάνω, και προσαρμόζεται κατάλληλα στην κάθε περίπτωση για τον εντοπισμό της εκάστοτε ατέλειας. Η αύξηση της χρονικής καθυστέρησης και η μεταβολή της για την κάθε ατέλεια, ορίζεται γιατί στην εν λόγω δοκιμή η υπερηχητική δέσμη διαπερνά εντός του νερού, με αποτέλεσμα ο παλμός της εμπρός επιφάνειας να εμφανίζεται κάθε φορά σε απόσταση ίση με την απόσταση της εμπρός επιφάνειας του τμήματος που μελετάται από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

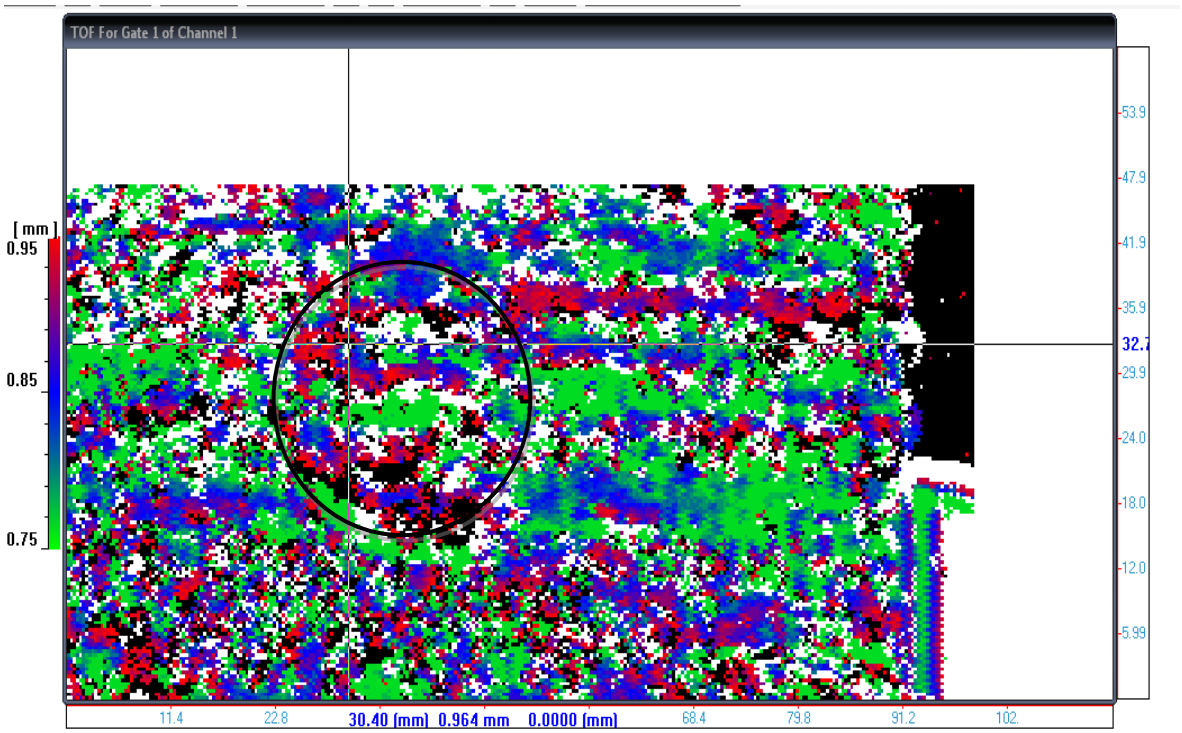
- **Ατέλεια Νο 1**

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 7.18 με τις ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 7.18: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan

Analog / Digital Settings		
Delay	12,42 ms	
Width	3.7 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	25 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	0.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	92%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	20%	25%
Gate Start	0.75 mm	2.2 mm
Gate Width	0.2 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/mse	2.7 mm/ms
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Ένα πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί παρατηρώντας τον ανωτέρω πίνακα, είναι η μικρή τιμή ενίσχυσης που εφαρμόστηκε στην κυματομορφή, συγκριτικά με το αντίστοιχο setup που προέκυψε κατά τον έλεγχο της εν λόγω ατέλειας με δοκιμή επαφής (βλ. Πίνακας 7.8). Φάνηκε κατά τον έλεγχο όλων των δοκιμίων, ότι δεν ήταν αναγκαία η επιβολή μεγάλου gain κατά τον έλεγχο με δοκιμή εμβάπτισης. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το gate τοποθετήθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να ορίζεται μία περιοχή έλεγχου γύρω από το αποτέλεσμα που προέκυψε με τη μέθοδο επαφής. Ακολουθεί στο Σχήμα 7.36 η απεικόνιση C-scan που προέκυψε.



Σχήμα 7.36: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 1

Το αποτέλεσμα της σάρωσης δεν ήταν ικανοποιητικό, καθώς η ατέλεια ανιχνεύεται με δυσκολία από έναν παρατηρητή που δε γνωρίζει τη θέση της. Παρ' όλα αυτά, γνωρίζοντας από τα σκαριφήματα των δοκιμίων τη θέση της ατέλειας, τοποθετήθηκε ο κύκλος που απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα και φάνηκε να υπάρχει μέσα σε αυτόν ένα ίχνος της ατέλειας σε πάχος περίπου 0.95 mm από την επάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Όμως, οι ισχυρές ανακλάσεις της ρητίνης και των ινών πάνω από αυτή, δε μας επέτρεψαν να παράγουμε εικόνας καλύτερη ποιότητα

Οι μαύρες περιοχές που εμφανίζονται στο Σχήμα 7.36 παρατηρήθηκαν κατά τον έλεγχο σχεδόν όλων των δοκιμίων. Μία πιθανή εξήγηση θα μπορούσε να είναι η κλίση που παρουσίαζαν τα δοκίμια εκ κατασκευής, γεγονός που δεν επέτρεπε την κάθετη πρόσπτωση της δέσμης στην πάνω επιφάνεια των δοκιμίων. Όπως έχει ήδη τονιστεί, για να είναι επιτυχής ο έλεγχος με δοκιμή εμβάπτισης με χρήση της διάταξης ULTAPAC II είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η κάθετη πρόπτωση της υπερηχητικής δέσμης.

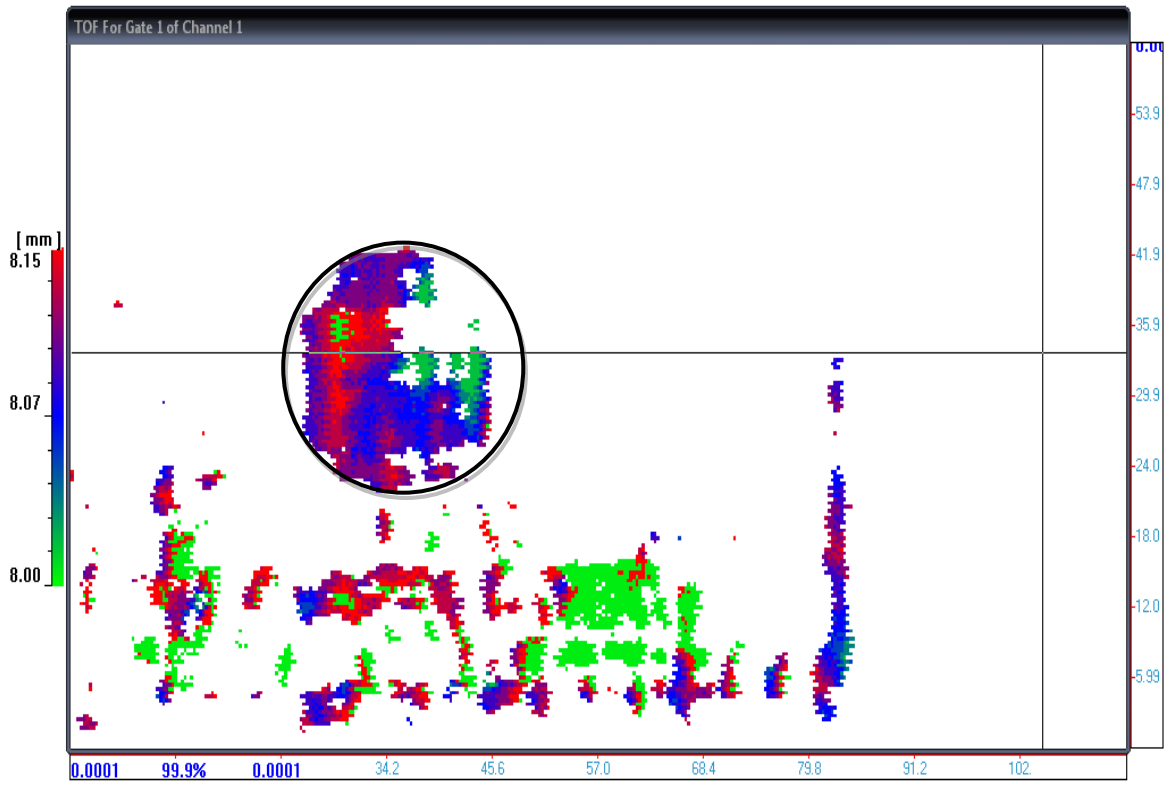
- **Ατέλεια Νο 2**

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σάρωση για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και με κεφαλή εμβάπτισης κεντρικής συχνότητας 5 MHz. Όμως, επειδή όλοι οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν με κεφαλή 2.25 MHz, επιλέχθηκε να χρησιμοποιήθει και σε αυτόν τον έλεγχο. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.19 με το setup που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 7.19: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan

Analog / Digital Settings		
Delay	14 ms	
Width	5.58 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	27 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	0.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	91%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	10%	25%
Gate Start	8 mm	2.2 mm
Gate Width	0.15 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Πρέπει να σημειωθεί ότι το gate 1 δεν τοποθετήθηκε κοντά στις τιμές που προέκυψαν από τους δύο ελέγχους με κεφαλή επαφής. Αυτό επιλέχθηκε, λόγω του ότι οι ανακλάσεις που λαμβάνονταν από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος κάτω από τον πυρήνα ήταν πολύ ισχυρές, με αποτέλεσμα να μην παράγεται μία ευανάγνωστη και αξιόπιστη απεικόνιση. Ακολουθεί η απεικόνιση που προέκυψε κατά τον έλεγχο στο Σχήμα 7.37.



Σχήμα 7.37: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 2

Το gate τοποθετήθηκε στην κάτω επιφάνεια της ατέλειας, η οποία φάνηκε να είναι στο 8.07 με 8.15 mm από την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου.

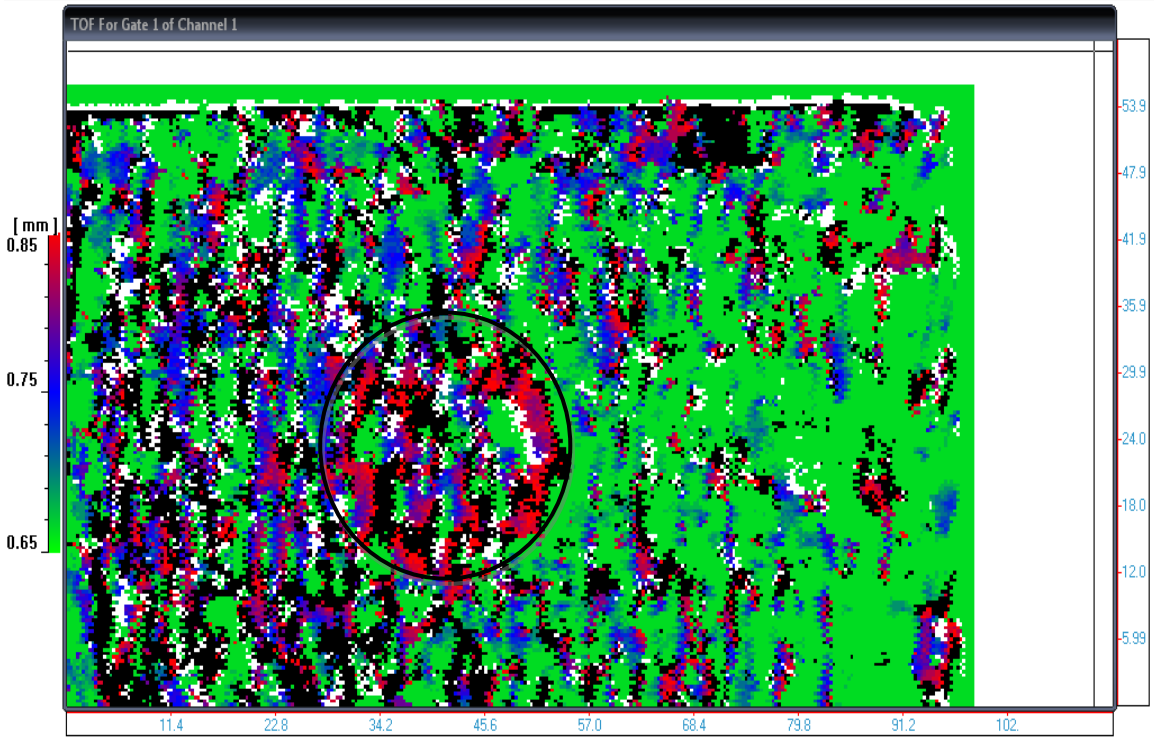
- **Ατέλεια Νο 3**

Οι ρυθμίσεις του οργάνου που εφαρμόστηκαν για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής ήταν όμοιες με εκείνες που παρουσιάστηκαν στην ατέλεια 1. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο Πίνακας 7.19 με το setup του εν λόγω έλεγχου.

Πίνακας 7.19: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan

Analog / Digital Settings		
Delay	11.08 ms	
Width	5.92 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	25 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	0.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	92%	58%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	20%	25%
Gate Start	0.65 mm	2.2 mm
Gate Width	0.2 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Ακολουθεί η απεικόνιση C-scan που προέκυψε στο Σχήμα 7.38.



Σχήμα 7.38: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 3

Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα, παρουσιάζεται μόνο το περίγραμμα της ατέλειας και όχι μια πλήρης σχηματική απεικόνιση, όπως φαίνεται και εντός του μαύρου κύκλου στο Σχήμα 7.38. Η ατέλεια βρίσκεται σε πάχος 0.85 mm από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος, ένδειξη που βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα των δύο ελέγχων που προηγήθηκαν με δοκιμή επαφής.

Ο εντοπισμός της ατέλειας 1 από την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου δεν κατάφερε να πραγματοποιηθεί λόγω της μορφής των δοκιμίων. Τα δοκίμια όντας με μορφή σκαλοπατιών δεν επέτρεπαν τη διατήρηση της απαραίτητης κάθετης πρόσπτωσης της υπερηχητικής δέσμης.

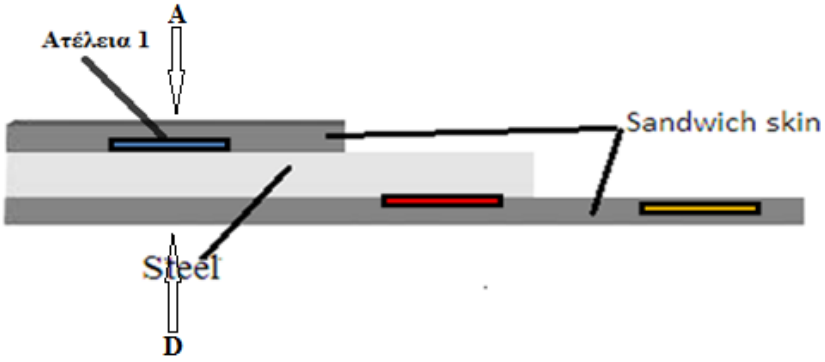
7.3 Δοκίμιο B2

Το δοκίμιο B2 είναι σχεδόν το ίδιο με το δοκίμιο B1, με τη μόνη διαφορά ότι ο χαλύβδινος πυρήνας έχει μεγαλύτερο πάχος. Η ομοιότητα των δύο δοκιμίων υπήρξε πολύ σημαντική κατά την πειραματική διαδικασία, καθώς, με βάση το ότι η δέσμη έπρεπε να διαπεράσει τα ίδια υλικά για τον εντοπισμό των ατελειών, μάς δινόταν η δυνατότητα αξιοποίησης όμοιων ρυθμίσεων οργάνου με εκείνες του δοκιμίου B1. Επιπλέον, λύνοντας ήδη τις όποιες δυσκολίες παρουσιάστηκαν κατά τον έλεγχο του δοκιμίου B1, ο εντοπισμός των ατελειών του εν λόγω δοκιμίου πραγματοποιήθηκε ταχύτερα και ευκολότερα. Τέλος, από τα εξαγόμενα αποτελέσματα φάνηκε ότι αυτή η αύξηση του πάχους του πυρήνα δε δημιούργησε επιπρόσθετα δυσκολίες που έπρεπε να αντιμετωπιστούν.

7.3.1 Έλεγχος με POCKET UT™

- **Ατέλεια No1**

Η ατέλεια αυτή βρίσκεται, όπως και στο δοκίμιο B1, στη διεπιφάνεια σύνθετου υλικού-πυρήνα (Σχήμα 7.39). Ακολουθεί ο Πίνακας 7.20 με τις ρυθμίσεις του οργάνου.

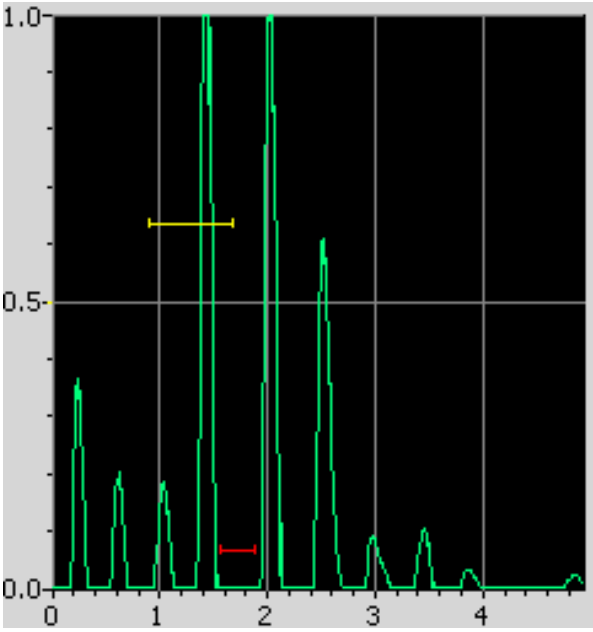


Σχήμα 7.39: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 1

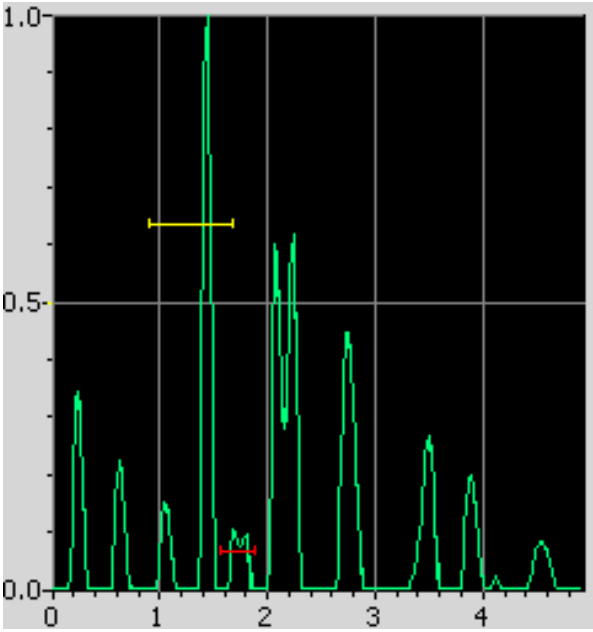
Πίνακας 7.20: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	3.7 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	23 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	62%	8%
Gate Start	0.8 mm	1.5 mm
Gate Width	1 mm	0.4 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Όπως φαίνεται, έγινε χρήση όμοιου setup με εκείνο που εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό της αντίστοιχης ατέλειας του δοκιμίου B1. Τα σήματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.40 και 7.41.



Σχήμα 7.40: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος



Σχήμα 7.41: Κυματομορφή περιβλήματος όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

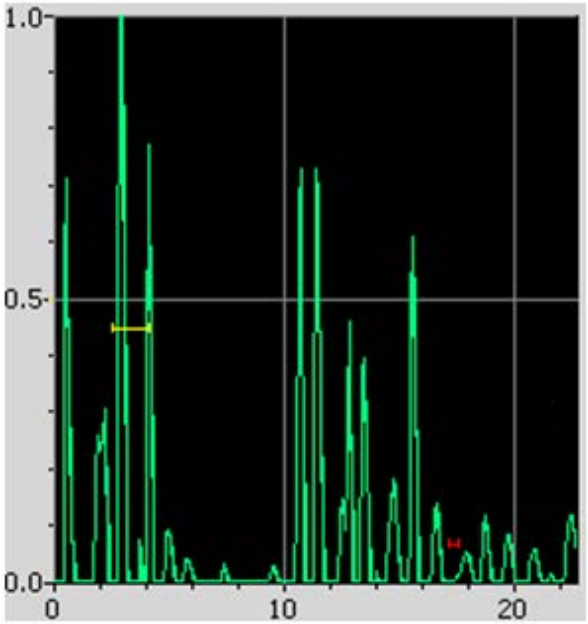
Η ατέλεια, σύμφωνα με τις ενδείξεις των gates, φάνηκε να βρίσκεται σε απόσταση 0.24 mm από την εμπρός επιφάνεια του σύνθετου υλικού. Η τιμή αυτή δημιούργησε επιφυλάξεις για τον επιτυχή εντοπισμό της ατέλειας, καθώς σύμφωνα με το σκαρίφημα, η ατέλεια ήταν τοποθετημένη στη διεπιφάνεια. Με γνώμονα ότι το πάχος του περιβλήματος είναι 2.5 mm, εκτιμήθηκε ότι η ατέλεια βρίσκεται σε εκείνη την περιοχή. Παρ' όλα αυτά, φάνηκε να συγκλίνει και με τον επόμενο έλεγχο που θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα.

Η ατέλεια αυτή, όμως, εντοπίστηκε και από το πίσω περίβλημα (θέση D), με σκοπό, τόσο την διαστασιολόγησή της, όσο και την εκτίμηση του κατά πόσο θα επηρέαζε η αύξηση του πάχους του πυρήνα στον εντοπισμό της ατέλειας. Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 7.21 με το setup που εφαρμόστηκε.

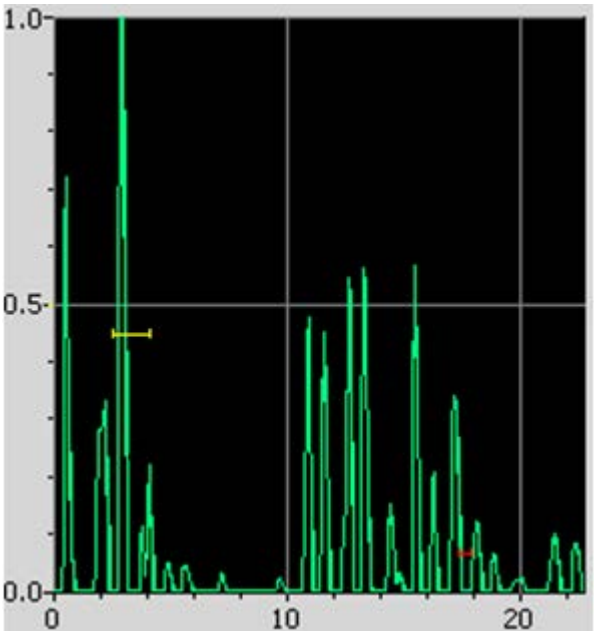
Πίνακας 7.21: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	4.26 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	34 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	48%	8%
Gate Start	2.8 mm	17.7 mm
Gate Width	2.2 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.39 mm/ms	5.39 mm/ms

Αν γίνει σύγκριση του παραπάνω πίνακα με εκείνον που παρουσιάστηκε στον αντίστοιχο έλεγχο για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 στο δοκίμιο B1, παρατηρείτε μια αύξηση της ενίσχυσης του σήματος. Αυτή η αύξηση ήταν αναγκαία λόγω μεγαλύτερου πάχους πυρήνα, το οποίο οδήγησε σε σήματα ελαφρώς πιο αποδυναμωμένα από τα αντίστοιχα του δοκιμίου B1, λόγω εντονότερης απόσβεσης. Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές που προέκυψαν στα Σχήματα 7.42 και 7.43.



Σχήμα 7.42: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του δοκιμίου

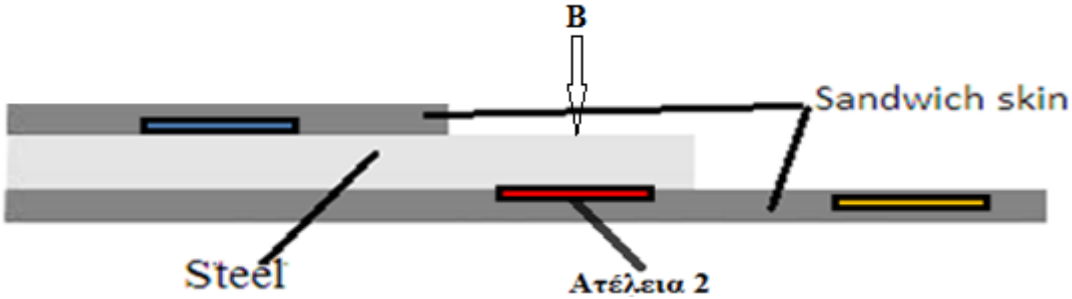


Σχήμα 7.43: Κυματομορφή δοκιμίου όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Το σήμα της ατέλειας ήταν αρκετά ισχυρό, με αποτέλεσμα να συντελέσει σε μία αρκετά αξιόπιστη εκτίμηση της θέσης της. Η ατέλεια βρέθηκε στα 14.62 mm από την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Γνωρίζοντας την απόσταση της ατέλειας από την εμπρός και πίσω επιφάνεια του δοκιμίου, μπορεί να εκτιμηθεί το πάχος της, το οποίο υπολογίστηκε στο 1.2 mm. Η τιμή αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από το πραγματικό πάχος που έχουν δύο κολλημένα γυαλόχαρτα Grade 400.

- **Ατέλεια No 2**

Η ατέλεια αυτή βρίσκεται στη διεπιφάνεια χάλυβα-σύνθετου υλικού, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7.42. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.21 όπου παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις του οργάνου.

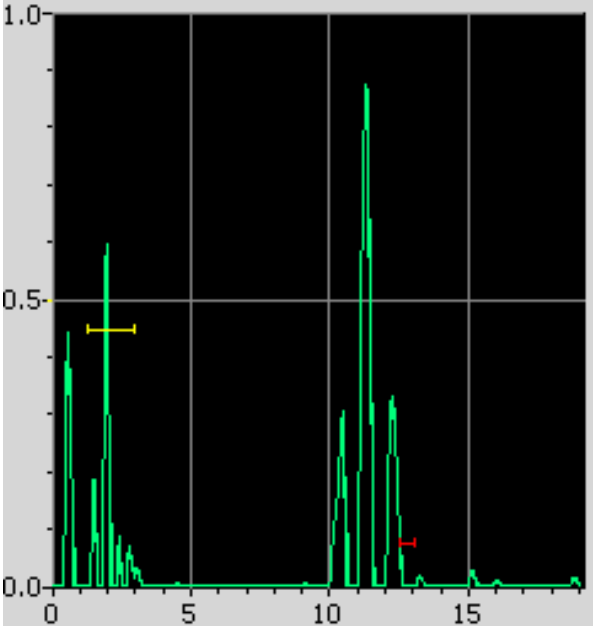


Σχήμα 7.42: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 2

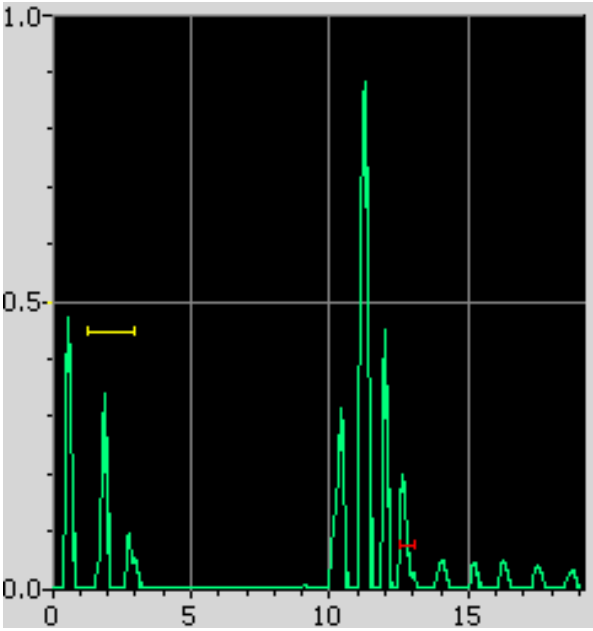
Πίνακας 7.21: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	4.26 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	14 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	48%	8%
Gate Start	1.5 mm	12.8 mm
Gate Width	1.6 mm	0.4 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms

Το setup αυτό είναι όμοιο με το αντίστοιχο του δοκιμίου B1. Αξιοσημείωτη είναι η χαμηλή ενίσχυση που απαιτήθηκε να εφαρμοστεί, γεγονός που δικαιολογείται από τη χαμηλότερη απόσβεση που υφίσταται η υπερηχητική δέσμη εντός του χάλυβα. Οι κυματομορφές που προέκυψαν αναπαριστώνται στα Σχήματα 7.43 και 7.44.



Σχήμα 7.43: Κυματομορφή υγιούς περιοχής χαλύβδινου πυρήνα

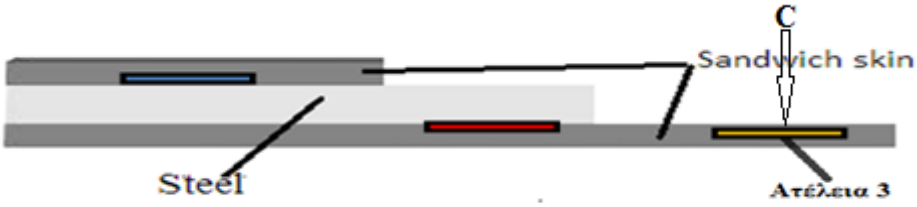


Σχήμα 7.44 : Κυματομορφή χαλύβδινου πυρήνα όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Η κυματομορφή που προέκυψε ήταν αρκετά ευανάγνωστη και η ατέλεια βρέθηκε να είναι σε πάχος 10.7 mm από την εμπρός επιφάνεια του πυρήνα. Τέλος, παρατηρήθηκε μία αποδυνάμωση του παλμού της εμπρός επιφάνειας, η οποία μπορεί να οφείλεται σε μεταβολή του πάχους του προστατευτικού στρώματος της ρητίνης που ήταν τοποθετημένη σε αυτή.

- **Ατέλεια No 3**

Η ατέλεια αυτή είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό του κάτω περιβλήματος και περίπου στο μέσου του πάχους (Σχήμα 7.45). Ακολουθεί ο Πίνακας 7.22 με το setup που εφαρμόστηκε.

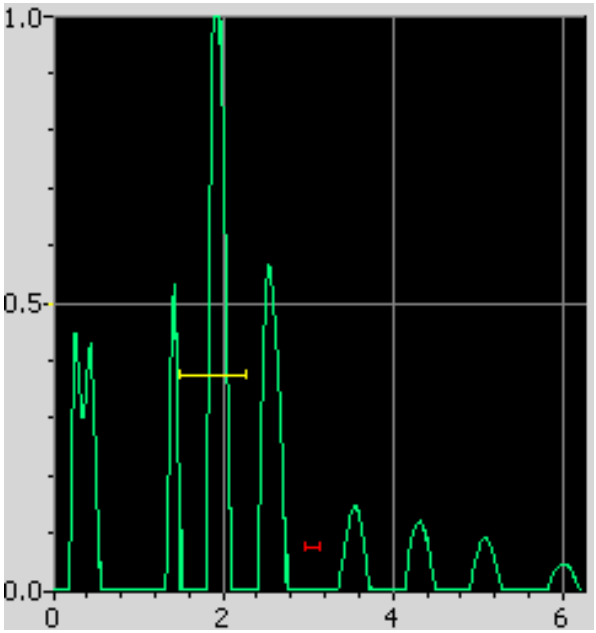


Σχήμα 7.45: Σκαρίφημα απεικόνισης της ατέλειας 3

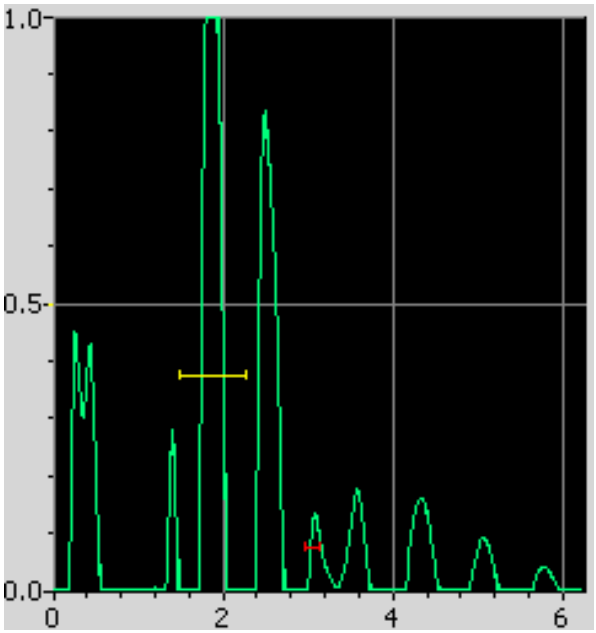
Πίνακας 7.22: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3

Analog / Digital Settings		
Delay	0 ms	
Width	4.26 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	23 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2.5 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	On
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	50%	50%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	40%	8%
Gate Start	1.3 mm	2.85 mm
Gate Width	1.08 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/m	2.7 mm/ms

Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές που προέκυψαν κατά τον έλεγχο στα Σχήματα 7.46 και 7.47.



Σχήμα 7.46: Κυματομορφή υγιούς περιοχής κάτω περιβλήματος



Σχήμα 7.47: Κυματομορφή από κάτω περίβλημα όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Η ατέλεια αυτή εντοπίστηκε χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες και βρέθηκε σε πάχος 1.2 mm από την εμπρός επιφάνεια του πίσω περιβλήματος.

7.3.2 Έλεγχος με τη Διάταξη ULTRAPAC II με Κεφαλή Επαφής

Όπως πραγματοποιήθηκε και στα δυο προηγούμενα δοκίμια, έτσι και στο δοκίμιο B2 η προσπάθεια εντοπισμού των ατελειών συνεχίστηκε με χρήση της διάταξης ULTRAPAC II και με κεφαλή επαφής κεντρικής συχνότητας 2.25 MHz.

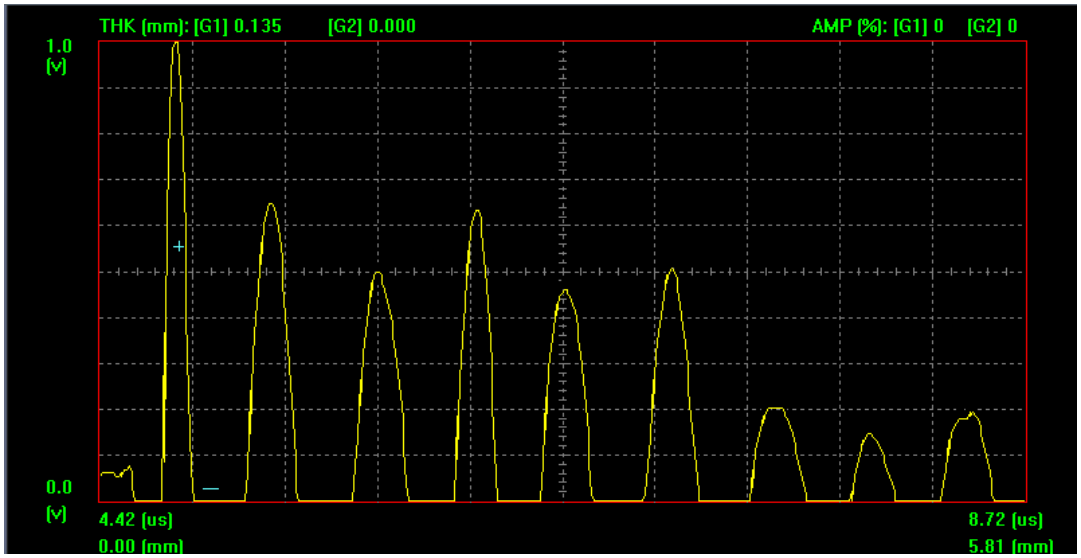
- **Ατέλεια No 1**

Τα περιβλήματα του δοκίμιου B1 και B2 αποτελούνται από το ίδιο σύνθετο υλικό. Λόγω της ομοιότητας αυτής, οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν όμοιες με εκείνες στον αντίστοιχο έλεγχο του δοκιμίου B1. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.22 όπου παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις του οργάνου.

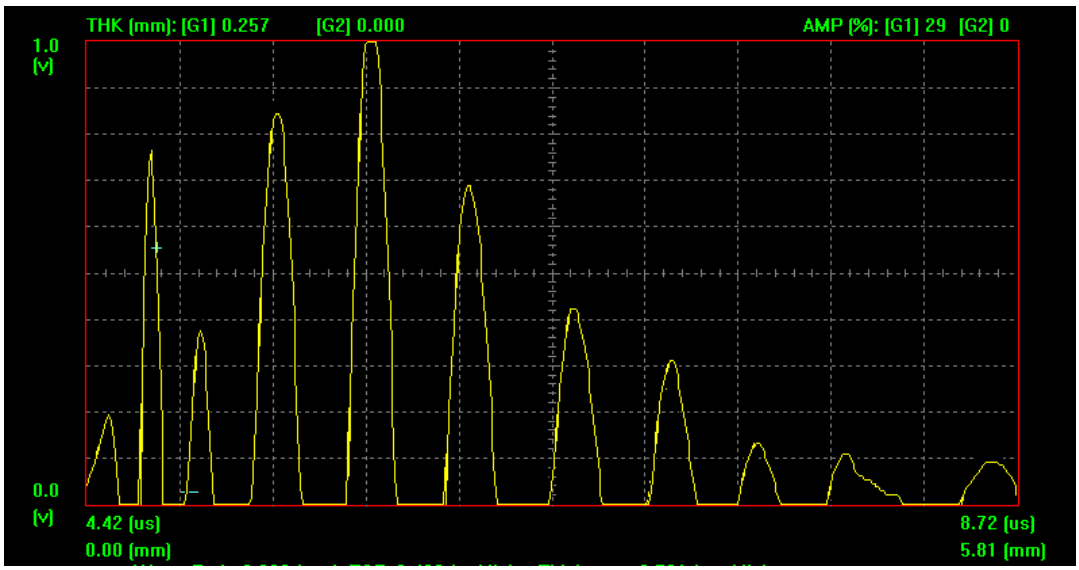
Πίνακας 7.22: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	4.42 ms	
Width	4.3 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60.1 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	55%	55%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	2%	8%
Gate Start	1.026 mm	2.85 mm
Gate Width	0.135 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/ms	2.7 mm/ms

Χαρακτηριστικό γνώρισμα και αυτού του setup είναι η επιβολή μεγάλης ενίσχυσης στην κυματομορφή, τεχνική που εφαρμόστηκε και κατά τον εντοπισμό της αντίστοιχης ατέλειας του δοκιμίου B1. Ακολουθούν οι κυματομορφές που προέκυψαν στα Σχήματα 7.48 και 7.49.



Σχήματα 7.48: Κυματομορφή υγιούς περιοχής περιβλήματος



Σχήματα 7.49: Κυματομορφή περιβλήματος όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

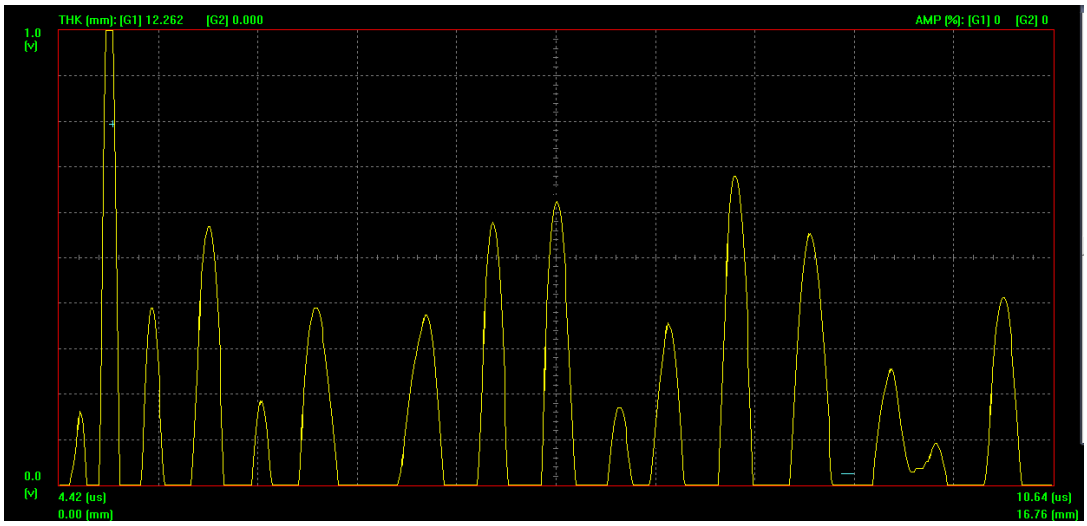
Συγκρίνοντας τις δυο άνωθεν κυματομορφές, παρατηρείται ότι στην περιοχή του gate, όταν η κεφαλή βρίσκεται πάνω από τη θέση της ατέλειας, εμφανίζεται ένας καινούργιος παλμός, ο οποίος οφείλεται στην ύπαρξή της. Από την ένδειξη του gate, η ατέλεια βρέθηκε να είναι σε πάχος 0.26 mm από την εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου. Η τιμή αυτή δεν εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από εκείνη που προέκυψε με το POCKET UT^{TM}.

Όπως και στις άλλες περιπτώσεις, έτσι και εδώ έγινε προσπάθεια εντοπισμού της εν λόγω ατέλειας από την πίσω μεριά του δοκιμίου. Στην συνέχεια, ακολουθεί ο Πίνακας 7.23 με το setup που χρησιμοποιήθηκε κατά τον έλεγχο.

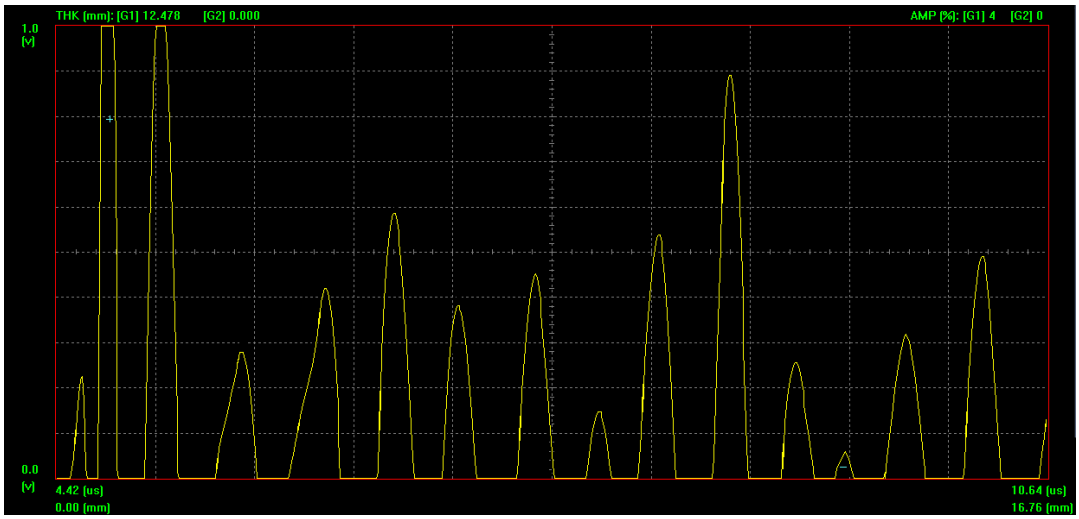
Πίνακας 7.23: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1

Analog / Digital Settings		
Delay	4.42 ms	
Width	6.22 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	65 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	79%	79%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	2%	8%
Gate Start	12.62 mm	2.85 mm
Gate Width	0.242 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.39 mm/ms	5.39 mm/ms

Λόγω της παρουσίας δύο διαφορετικών υλικών, καθώς επίσης και του μεγαλύτερου σε πάχους χαλύβδινου πυρήνα, η απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης ήταν μεγάλη, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η επιβολή μεγάλης ενίσχυσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν στα Σχήματα 7.50 και 7.51.



Σχήματα 7.50: Κυματομορφή υγιούς περιοχής δοκιμίου



Σχήματα 7.51: Κυματομορφή δοκιμίου όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Η κυματομορφή που προέκυψε ήταν αρκετά ευανάγνωστη και, σύμφωνα με την ένδειξη του gate, η ατέλεια βρέθηκε να είναι σε βάθος 12.48 mm από την πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Η τιμή αυτή είχε σημαντική διαφοροποίηση από εκείνην που προέκυψε κατά τον προηγούμενο αντίστοιχο έλεγχο με δοκιμή επαφής. Το γεγονός αυτό δημιούργησε ερωτηματικά ως προς το αν ο εντοπισμός της ατέλειας ήταν επιτυχής και για το ποια είναι τελικά η θέση της ατέλειας.

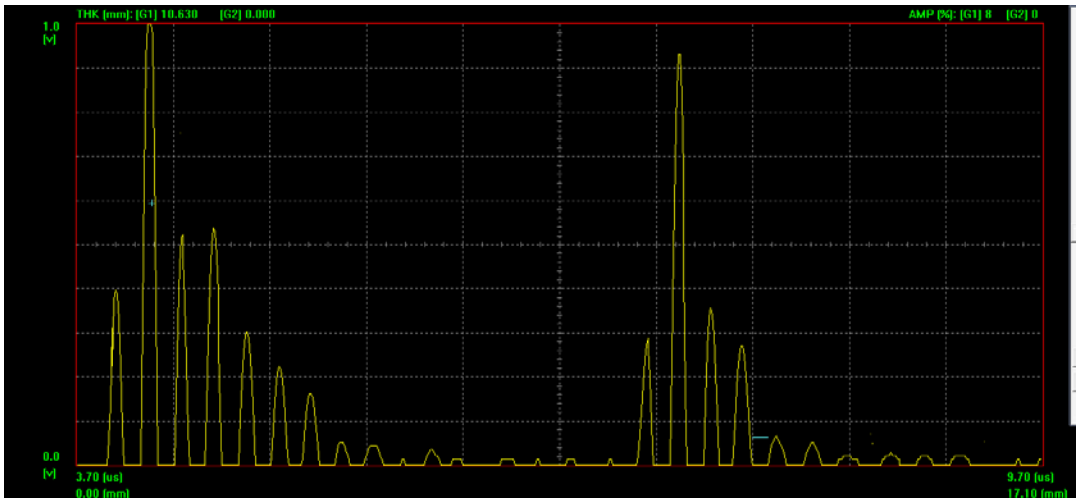
- **Ατέλεια Νο 2**

Παρά τον μεγαλύτερο κατά το πάχος πυρήνα, οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν ήταν όμοιες με εκείνες που εφαρμόστηκαν κατά τον εντοπισμό της αντίστοιχης ατέλειας του δοκιμίου Β1. Επιπλέον, εκ του αποτελέσματος, φάνηκε ότι η αύξηση του πάχους δε δημιούργησε περαιτέρω δυσκολίες κατά την διεξαγωγή του ελέγχου. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.24 με τις ρυθμίσεις του οργάνου.

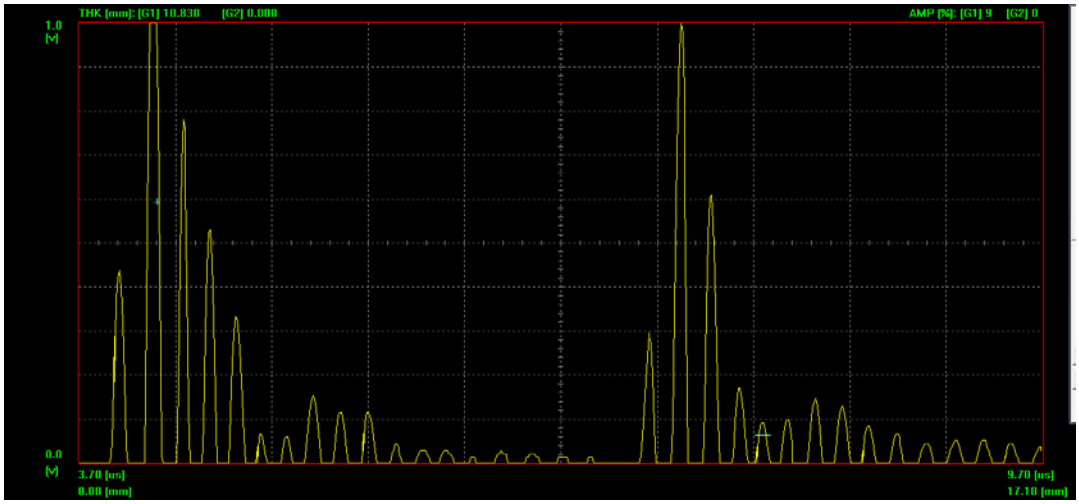
Πίνακας 7.24: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2

Analog / Digital Settings		
Delay	3.7 ms	
Width	9 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	26 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	59%	59%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	8%	8%
Gate Start	10.6 mm	2.85 mm
Gate Width	0.3 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms

Έπειτα από σύγκριση του παραπάνω πίνακα με τον αντίστοιχο του δοκιμίου Β1, μπορεί να παρατηρηθεί μια μικρή αύξηση του gain. Λόγω του μεγαλύτερου πάχους πυρήνα, η απόσβεση που υπέστει η υπερηχητική δέσμη σε αυτή την περίπτωση ήταν ελαφρώς εντονότερη, με αποτέλεσμα να ήταν αναγκαία μια μικρή αύξηση της ενίσχυσης. Στη συνέχεια εμφανίζονται οι εξαγόμενες κυματομορφές στα Σχήματα 7.52 και 7.53.



Σχήμα 7.52: Κυματομορφή υγιούς περιοχή χαλύβδινου πυρήνα



Σχήμα 7.53: Κυματομορφή χαλύβδινου πυρήνα όπου εμφανίζεται ο παλμός της ατέλειας

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω σχήματα, κατά τον έλεγχο της περιοχής της ατέλειας προέκυψε ένας καινούργιος παλμός. Το gate τοποθετήθηκε κατάλληλα με την ίδια λογική που εφαρμόστηκε και στο δοκίμιο B1 και, σύμφωνα με την ένδειξή του, η ατέλεια φάνηκε να βρίσκεται σε πάχος 10.83 mm από την εμπρός επιφάνεια του πυρήνα. Η τιμή αυτή συνέκλινε ικανοποιητικά σε εκείνη που προέκυψε στον αντίστοιχο έλεγχο με το POCKET UT^{TM}.

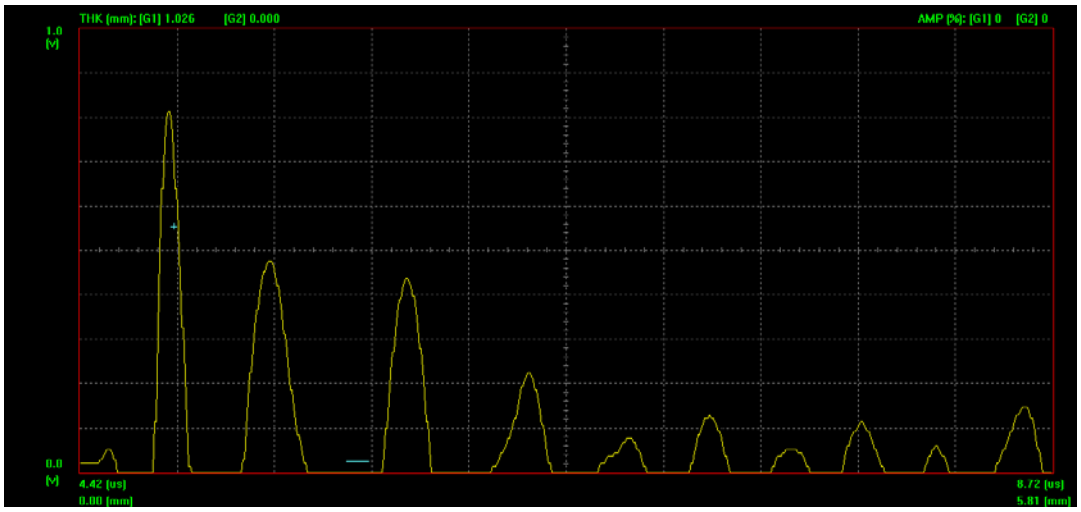
- **Ατέλεια Νο 3**

Ο έλεγχος της ατέλειας αυτής, όπως και στις άλλες περιπτώσεις, ήταν σχεδόν όμοιος με εκείνον που εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό της ατέλειας 1, καθώς η υπερηχητική δέσμη και εδώ έπρεπε να διαπεράσει το σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο Πίνακας 7.25 με το setup που χρησιμοποιήθηκε.

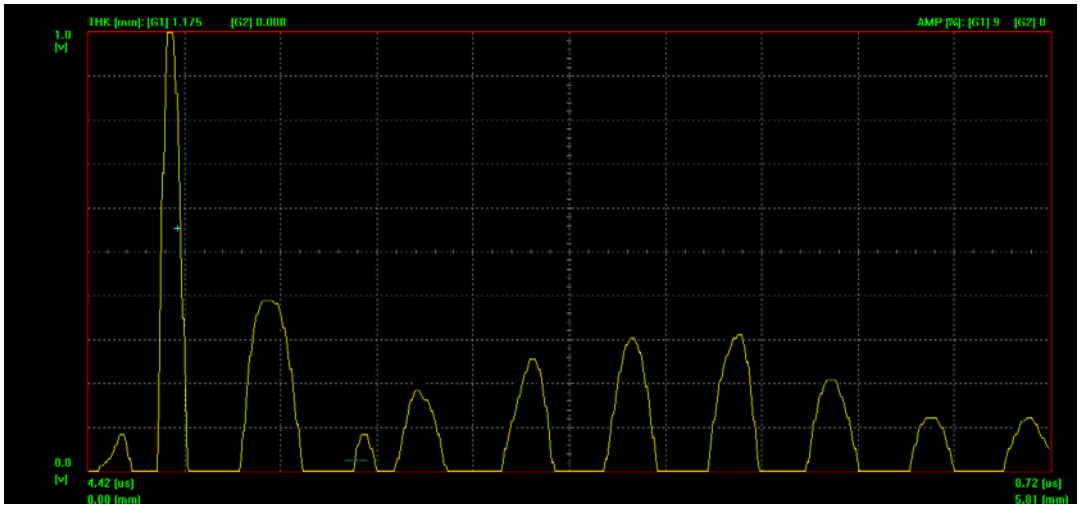
Πίνακας 7.25: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3

Analog / Digital Settings		
Delay	4.42 ms	
Width	4.3 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	60.1 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	55%	55%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	2%	8%
Gate Start	0.95 mm	2.85 mm
Gate Width	0.3 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/micro sec	2.7 mm/micro sec

Ακολουθούν οι κυματομορφές που προέκυψαν κατά τον έλεγχο στα Σχήματα 7.54 και 7.55.



Σχήμα 7.54: Κυματομορφή υγιούς περιοχής του κάτω περιβλήματος GFRP



Σχήμα 7.55: Κυματομορφή του κάτω περιβλήματος όπου παρουσιάζεται ο παλμός της ατέλειας

Σύμφωνα με την ένδειξη του gate, η ατέλεια φάνηκε να βρίσκεται σε βάθος 1.18 mm από την πάνω επιφάνεια του περιβλήματος. Η τιμή αυτή παρουσίαζε αμελητέες διαφοροποιήσεις από την αντίστοιχη εξαγόμενη με το POCKET UT^{TM}.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 7.26, ο οποίος παρουσιάζει τα αποτελέσματα και με τις δύο μεθόδους επαφής.

Πίνακας 7.26: Συνοπτική παρουσίαση της θέσης κάθε ατέλειας κατά το πάχος και με τις δύο διατάξεις έλεγχου

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1	0.26 mm	0.24 mm
2	10.83 mm	10.70 mm
3	1.18 mm	1.20 mm

7.3.3 Επαλήθευση Αποτελεσμάτων με Χρήση της Διάταξης ULTRAPAC II και Απεικόνιση Αποτελεσμάτων με C-scan.

Όπως και στα άλλα δοκίμια, έτσι και εδώ, τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τις δύο μεθόδους επαφής επαληθεύτηκαν με τη μέθοδο βύθισης και με απεικόνιση των δεδομένων με C-scan. Η τοποθέτηση των gates πραγματοποιήθηκε με την ίδια λογική που παρουσιάστηκε και στο δοκίμιο B1.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες σχεδόν τις απεικονίσεις παρουσιάζονταν μαύρα στίγματα. Η εμφάνιση των στιγμάτων αυτών, και στο εν λόγω δοκίμιο, πιθανολογείται ότι προέκυπτε από την πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης υπό γωνία διάφορη των 90° ως προς την επιφάνεια των δοκιμίων.

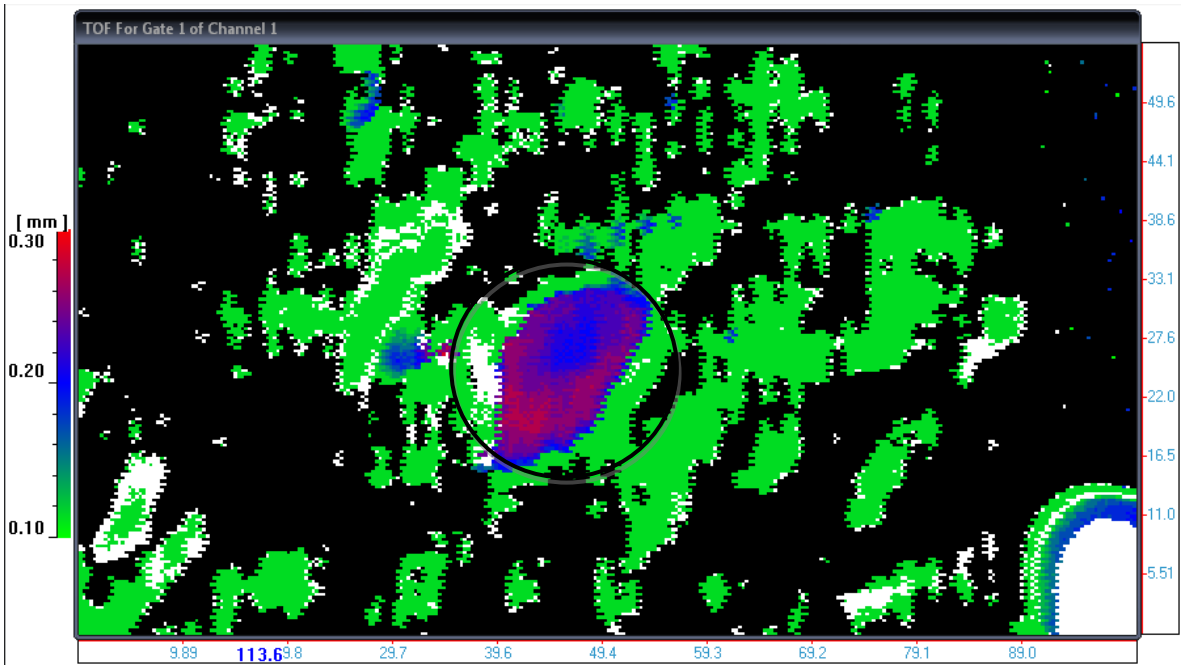
- **Ατέλεια Νο 1**

Ακολουθεί ο Πίνακας 7.27 με τις ρυθμίσεις του οργάνου.

Πίνακας 7.27: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan.

Analog / Digital Settings		
Delay	12.42 ms	
Width	3.7 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	25 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	92%	55%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	20%	8%
Gate Start	0.15 mm	2.85 mm
Gate Width	0.2 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7 mm/micro sec	2.7 mm/micro sec
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απεικόνιση C-scan που προέκυψε στο Σχήμα 7.56.



Σχήμα 7.56: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 1

Η απεικόνιση ήταν αρκετά ικανοποιητική και η ατέλεια ανιχνεύτηκε σε πάχος μεταξύ 0.2 και 0.3 mm από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος. Χαρακτηριστικό της απεικόνισης του σχήματος 7.56 είναι τα έντονα μαύρα στίγματα. Παρ' όλα αυτά, ο εντοπισμός και κατ' επέκταση η σχηματική αναπαράσταση της ατέλειας δεν επηρεάστηκαν.

Η ατέλεια αυτή, για τους ίδιους λόγους που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη ατέλεια του δοκιμίου B1, δεν μπόρεσε να εντοπιστεί με σάρωση από την πίσω μεριά του δοκιμίου.

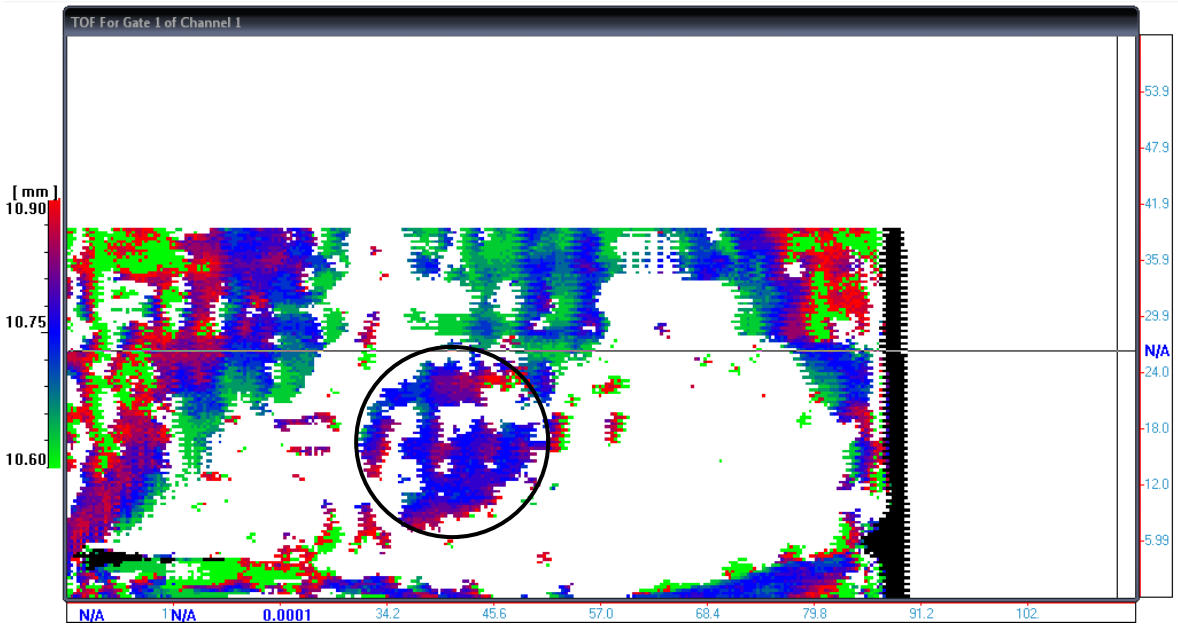
- **Ατέλεια No2**

Το υλικό που έπρεπε να σαρωθεί για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής ήταν χάλυβας υψηλής αντοχής. Λόγω της μικρότερης απόσβεσης που υφίσταται η υπερηχητική δέσμη, συγκριτικά με εκείνη εντός του σύνθετου υλικού, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κεφαλή με κεντρική συχνότητα 5 MHz για την πραγματοποίηση του ελέγχου. Παρά τη δυνατότητα αυτή και εδώ χρησιμοποιήθηκε κεφαλή 2.25 MHz για να υπάρχει συμφωνία όλων των ελέγχων. Ακολουθεί ο Πίνακας 7.28 με το setup που εφαρμόστηκε.

Πίνακας 7.28: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 2 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan

Analog / Digital Settings		
Delay	14.2 ms	
Width	5.92 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	28 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	92%	55%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	10%	8%
Gate Start	10.7 mm	2.85 mm
Gate Width	0.3 mm	0.2 mm
Gate Velocity	5.92 mm/ms	5.92 mm/ms
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Ακολουθεί η απεικόνιση που προέκυψε στο Σχήμα 7.57.



Σχήμα 7.57: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 2

Όπως φαίνεται και στο άνωθεν σχήμα, στα 10.75 mm περίπου από την εμπρός επιφάνεια του χαλύβδινου πυρήνα, παρουσιάστηκαν ίχνη της ατέλειας. Η τιμή επαλήθευε της ενδείξεις που είχαν προκύψει κατά τις δοκιμές επαφής.

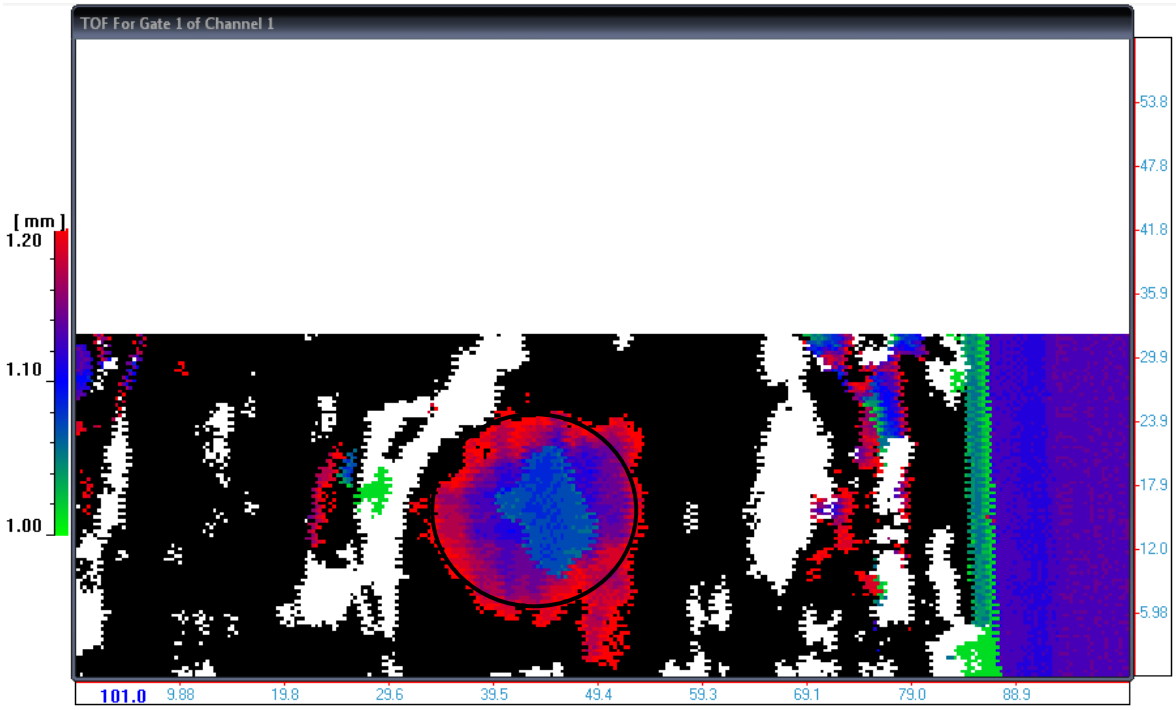
- **Ατέλεια Νο 3**

Για τον εντοπισμό της ατέλειας αυτής χρησιμοποιήθηκε πανομοιότυπο setup με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό της ατέλειας 1 και παρουσιάζεται στο κάτωθεν Πίνακα 7.29.

Πίνακας 7.29: Setup για τον εντοπισμό της ατέλειας 3 με κεφαλή βύθισης και απεικόνιση C-scan

Analog / Digital Settings		
Delay	18.22 ms	
Width	3.7 ms	
Sampling	100 MHz	
Wave Average	1	
Scale	1	
Display Mode	Positive Rectified	
Trigger Source	Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		
Pulser / Receiver Mode	P/R	
Pulser voltage	380	
Damping	2000 ohms	
Gain	25 dB	
Energy level	820 pf	
Low Pass Filter	7.5 MHz	
High Pass Filter	2 MHz	
Gate Settings		
	Gate 1	**Gate 2**
Gate Status	On	Off
Synchronization Mode	First echo	First echo
Synchronization Threshold	92%	55%
Detection Mode	Max Peak	Max Peak
Detection Threshold	10%	8%
Gate Start	1.15 mm	2.85 mm
Gate Width	0.2 mm	0.2 mm
Gate Velocity	2.7mm/micro sec	2.7 mm/micro sec
Scaner Settings		
Scan Axis	Y	
Scanning Axis Length	100	
Scanning Axis Resolution	0.330433547	
Scanning Axis Speed	30	
Index Axis	X	
Index Axis Length	70	
Index Axis Resolution	0.330433547	
Index Axis Speed	20	
Start Position	0	

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απεικόνιση της ατέλειας στο Σχήμα 7.58.

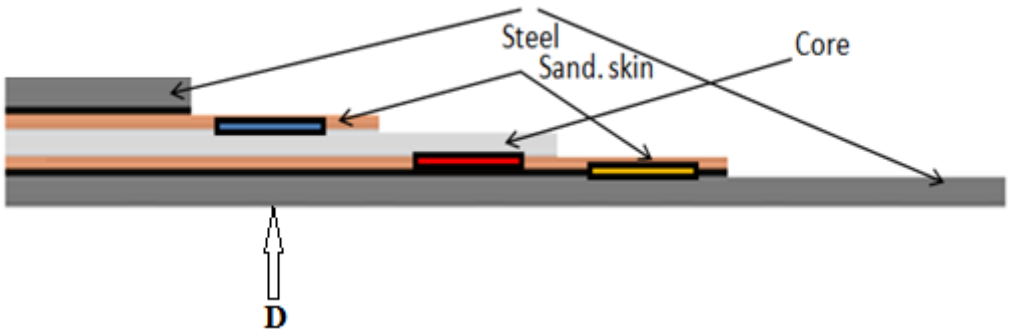


Σχήμα 7.58: Απεικόνιση C-scan της ατέλειας 3

Η απεικόνιση που προέκυψε ήταν αρκετά ικανοποιητική, δίνοντας μία σαφή σχηματική απεικόνιση της ατέλειας σε βάθος περίπου 10.2 mm από την εμπρός επιφάνεια του περιβλήματος. Η ένδειξη αυτή επιβεβαίωσε τις τιμές που προέκυψαν από τους προηγούμενους ελέγχους.

7.4 Δοκίμια C1 και C2

Τα δοκίμια αυτά, όπως έχει προαναφερθεί, αποτελούνται από χάλυβα υψηλής αντοχής, πολύστρωτο σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και πυρήνα από ξύλο Balsa, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7.59.



Σχήμα 7.59: Σκαρίφημα δοκιμίων τύπου C

Για το εν λόγω δοκίμιο έπρεπε να εντοπιστεί μόνο η ατέλεια 1 από τη θέση D, αφού μόνο σε αυτή την περίπτωση έχουμε διαφορετικό συνδυασμό υλικών, σε σχέση πάντα με τα άλλα δοκίμια.

Λόγω του συνδυασμού τριών διαφορετικών υλικών στα δοκίμια, καθώς επίσης και του μεγάλου πάχους που προέκυπτε, η υπερηχητική δέσμη αποσβενόταν έντονα και δεν μπορούσε να διεισδύσει σε όλο το πάχος. Το γεγονός αυτό δεν επέτρεψε τον έλεγχο των δοκιμίων με καμιά από τις τρείς μεθόδους.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα-Προτεινόμενη Έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι στόχοι που επιτεύχθηκαν, όπως επίσης και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του πειραματικού ελέγχου των δοκιμίων. Στη συνέχεια θα σχολιαστούν τα αίτια που οδήγησαν στην αδυναμία ελέγχου κάποιων δοκιμίων και μέσα από αυτά θα προταθεί αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής ξεκίνησε με τον καθορισμό των άγνωστων ταχυτήτων διάδοσης του διαμήκους κύματος εντός των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Αναφορικά με τα σύνθετα υλικά, τα οποία αποτέλεσαν και το περίβλημα όλων των δοκιμίων τύπου sandwich που ελέχθησαν, η δυσκολία καθορισμού της ταχύτητας διάδοσης εντός αυτών έγκειται στο γεγονός της δυσκολίας ανίχνευσης του παλμού της πίσω επιφάνειάς τους. Τα εν λόγω υλικά, λόγω της ετερογενούς τους δομής, προκαλούν μία έντονη απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης, με άμεσο αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός εξασθενημένου πίσω παλμού. Η εξασθένηση αυτή, καθιστά δύσκολη την εφαρμογή της διαδικασίας παχυμέτρησης και κατ' επέκτασην την εκτίμηση της ταχύτητας του υλικού.

Μία ακόμη δυσκολία που εμφανίζεται στον έλεγχο των σύνθετων υλικών είναι ότι, η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων αλλάζει για κάθε σύνθετο υλικό, στην περίπτωση που αλλάξει η διεύθυνση των ινών των στρώσεων ή η αναλογία μεταξύ ρητίνης και ινών, ακόμα και αν το σύνθετο υλικό έχει κατασκευαστεί από τα ίδια συνιστώντα μέρη και με την ίδια μέθοδο. Επιπλέον, δυσχερής ήταν και ο καθορισμός διάδοσης της υπερηχητικής δέσμης εντός του ξύλου Balsa, λόγω της πορώδους δομής του, η οποία προκαλούσε αποδυνάμωση της δέσμης των υπερήχων. Τέλος, αναφορικά με τις ταχύτητες διάδοσης, φάνηκε ότι ο καθορισμός τους στις περιπτώσεις συνδυασμού διαφορετικών

υλικών, λόγω έντονης απόσβεσης, παρουσίαζε τις περισσότερες δυσκολίες, δημιουργώντας ερωτηματικά για την επιτυχία του καθορισμού τους.

Ο πειραματικός έλεγχος συνεχίστηκε με την προσπάθεια εντοπισμού των ατελειών σε κάθε δοκίμιο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται για κάθε ένα ξεχωριστά, τόσο τα εξαγόμενα αποτελέσματα, όσο και τα προκύπτοντα συμπεράσματα.

8.1 Δοκίμια Α1

Το εντονότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά τον έλεγχο του εν λόγω δοκιμίου ήταν η παρουσία του Balsa στον πυρήνα του. Το υλικό αυτό, έχοντας πορώδη δομή, καθώς επίσης και μεγάλο πάχος, προκαλούσε μεγάλη απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης, δημιουργώντας επιτακτική ανάγκη για μεγάλη ενίσχυση του σήματος. Επιπρόσθετα, η κυματομορφή που προέκυψε, δεν ήταν αρκετά ευανάγνωστη, λόγω του θορύβου που προέκυπτε, πιθανότατα από την παρουσία των πόρων. Κατά τη σάρωση του δοκιμίου από την πίσω επιφάνειά του, δεν επετράπηκε η ανίχνευση της ατέλειας 1, εξαιτίας του μεγάλου πάχους του. Πιθανότατα, αν χρησιμοποιηθεί κεφαλή συχνότητας 0.5 MHz, να επιτευχθεί ο εντοπισμός της ατέλειας. Παρά τις όποιες δυσκολίες, οι υπόλοιπες ατέλειας φάνηκαν να εντοπίζονται σε πάχη που δεν παρουσίαζαν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μεθόδων ελέγχου με επαφή, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με τις δύο μεθόδους επαφής

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1 από την πανω επιφάνεια	0.27 mm	0.20 mm
1 από την κάτω επιφάνεια	-	-
2	31.54 mm	31.84 mm
3	0.37 mm	0.42 mm

Μία πρώτη παρατήρηση που προέκυψε από τα ανωτέρω αποτελέσματα είναι ότι η θέση των ατελειών 1 και 3 δεν συμφωνούσε με τα σχέδια κατασκευής των δοκιμίων. Η ατέλεια 1, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, ήταν τοποθετημένη στη διεπιφάνεια σύνθετου υλικού-Balsa και βάσει αυτού θα έπρεπε να ανιχνεύεται στην περιοχή των 2.5 mm από την εμπρός επιφάνεια. Επιπρόσθετα, η ατέλεια 2, με βάση τα σχέδια κατασκευής, ήταν τοποθετημένη στο εσωτερικό του πίσω περιβλήματος περί το μέσον του πάχους, δηλαδή σε βάθος 1.25 mm περίπου. Παρά τις διαφοροποιήσεις αυτές, φάνηκε ότι ο παλμός της ατέλειας εμφανιζόταν στην ίδια θέση και στις δύο μεθόδους.

Ο πειραματικός έλεγχος για το εν λόγω δοκίμιο ολοκληρώθηκε και με επαλήθευση των παραπάνω τιμών με δοκιμή βύθισης και απεικόνιση C-scan. Για να καταστεί επιτυχής ο συγκεκριμένος έλεγχος, πρέπει να εξασφαλίζεται η κάθετη πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης στην εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου. Σε αντίθετη περίπτωση, παρατηρείται μετακίνηση των παλμών, με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται οι επιθυμητές περιοχές του πάχους και έτσι στην οθόνη μας να εμφανίζονται μαύρα στίγματα. Το δοκίμιο Α1, λόγω της

ύπαρξης του Balsa επέπλεε, με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η αναγκαία καθετότητα της δέσμης.

8.2 Δοκίμιο B1

Κατά τον έλεγχο του δοκιμίου αυτού, δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερα προβλήματα τα οποία να χρίζουν αντιμετώπισης. Επιπλέον, φάνηκε ότι αν καθοριστεί ένα κατάλληλο setup για τον έλεγχο του σύνθετου υλικού του περιβλήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά σε όλα τα δοκίμια, αφού η υπερηχητική δέσμη διαπερνά το ίδιο υλικό. Στο εν λόγω δοκίμιο εντοπίστηκαν και οι τρεις ατέλειες, ενώ και σε αυτή την περίπτωση, κατά τον έλεγχο της ατέλειας 1 από την πίσω επιφάνεια, η κυματομορφή ενισχύθηκε έντονα, λόγω του μεγάλου πάχους και κατ΄ επέκτασην της έντονης απόσβεσης εντός του δοκιμίου. Ακολουθεί ο συνοπτικός Πίνακας 8.2 με τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Πίνακας 8.2: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με τις δύο μεθόδους επαφής

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1 από την πανω επιφάνεια	0.89 mm	0.85 mm
1 από την κάτω επιφάνεια	10.26 mm	10.12 mm
2	7.27 mm	7.44 mm
3	0.93 mm	0.80 mm

Στο δοκίμιο αυτό, εν αντιθέσει με το προαναφερθέν, πραγματοποιήθηκε εντοπισμός των τριών ατελειών και με τη μέθοδο C-scan. Οι απεικονίσεις της ατέλειας 1 και 2 δεν ήταν ποιοτικά καλές, καθώς το ίχνος της ατέλειας που εμφανιζόταν, γινόταν αντιληπτό μόνο γνωρίζοντας προκαταβολικά τη θέση της στο επίπεδο. Οι έντονοι παλμοί, οι οποίοι προέρχονταν από την ρητίνη ή τις ίνες στην περιοχή του πάχους των ατελειών, δεν επέτρεπαν την ακριβή σχηματική απεικόνιση της ατέλειας. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των απεικονίσεων του δοκιμίου ήταν τα μαύρα στίγματα που αναφέρθηκαν προηγούμενως. Παρά τις όποιες δυσκολίες, τα εξαγόμενα αποτελέσματα ήταν σε πλήρη συμφωνία με εκείνα του Πίνακα 8.2.

Η ατέλεια 1, κατά τη σάρωση από την πίσω μεριά του δοκιμίου, δεν εντοπίστηκε, λόγω της μορφής του δοκιμίου. Το κλιμακωτό σχήμα του δεν εξασφάλιζε κάθετη πρόσπτωση της δέσμης, με αποτέλεσμα να υπάρχει μετακίνηση των παλμών και το gate να καταγράφει παλμούς που δεν αντιστοιχούσαν στην ατέλεια.

8.3 Δοκίμιο B2

Για το δοκίμιο B2, πάρα το μεγαλύτερο χαλύβδινο πυρήνα, συγκριτικά με εκείνο του B1, χρησιμοποιήθηκε σχεδόν όμοιο setup με το προαναφερθέν δοκίμιο. Εκ των υστέρων, φάνηκε ότι η αύξηση του πυρήνα δεν προκαλούσε μεγάλες διαφοροποιήσεις στις κυματομορφές. Το γεγονός αυτό, δικαιολογείται από το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στον πυρήνα, εντός του

οποίου η υπερηχητική δέσμη δεν αποσβενόταν έντονα. Μια μικρή διαφοροποίηση υπήρχε στην κυματομορφή η οποία αντιστοιχούσε στη σάρωση του δοκιμίου από την πίσω μεριά για τον εντοπισμό της ατέλειας 1, λόγω μεγαλύτερου συνολικού πάχους του δοκιμίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα στον Πίνακα 8.3.

Πίνακας 8.3: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων με τις δύο μεθόδους επαφής

Ατέλεια	ULTRAPAC II	POCKET UT
1 από την πανω επιφάνεια	0.26 mm	0.24 mm
1 από την κάτω επιφάνεια	12.48 mm	14.62 mm
2	10.83 mm	10.70 mm
3	1.18 mm	1.20 mm

Στον έλεγχο αυτό παρατηρήθηκε μία διαφοροποίηση στα αποτελέσματα της ατέλεια 1, κατά τη σάρωση από την πίσω μεριά. Όμως, λόγω της μεγάλης αποδυνάμωσης της δέσμης, δεν ήταν δυνατό να εξακριβωθεί ποιο από τα δύο αποτελέσματα ήταν σωστό. Βάσει, βέβαια, των παχών του πυρήνα και του περιβλήματος, τα οποία μετρήθηκαν με μηχανικά μέσα, η ένδειξη του ULTRAPAC II φαίνεται να είναι πιο αντιπροσωπευτική. Παρ' όλα αυτά, όπως ειπώθηκε ήδη, οι ενδείξεις δε συμφωνούσαν πάντα με τον αρχικό σχεδιασμό των δοκιμίων, όποτε η εκτίμηση αυτή δεν είναι απόλυτα βέβαιη.

Οι απεικονίσεις C-scan που προέκυψαν, ήταν καλύτερες από εκείνες του δοκιμίου B1. Εδώ, οι τρείς ατέλειες, απεικονίστηκαν σχηματικά σε περιοχές πάχους αντίστοιχες με εκείνες του άνωθεν πίνακα. Και σε αυτό το δοκίμιο, για τους ίδιους λόγους, δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός της ατέλειας 1, κατά τη σάρωση από την πίσω μεριά του δοκιμίου.

8.4 Δοκίμια C1 και C2

Τα δοκίμια αυτά κατασκευάστηκαν με συνδυασμό τριών διαφορετικών υλικών: χάλυβα υψηλής αντοχής, σύνθετο υλικό με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και ξύλο Balsa. Ο συνδυασμός αυτός οδήγησε στη δημιουργία πολύ μεγάλων κατά το πάχος δοκιμίων. Τόσο το μεγάλο πάχος, όσο και η ύπαρξη των διαφορετικών υλικών, προκαλούσε εντονότατη αποδυνάμωση της υπερηχητικής δέσμης, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο έλεγχος των εν λόγω δοκιμίων. Πιθανότατα, με χρήση κεφαλής συχνότητας 0.5 MHz να ήταν δυνατή, τόσο η διείσδυση της δέσμης σε όλο το πάχος, όσο και ο εντοπισμός των ατελειών.

Κάποια γενικότερα συμπεράσματα που αφορούν όλον τον πειραματικό έλεγχο, είναι ότι, όταν ήταν αναγκαίο η δέσμη να διαπεράσει μεγάλου πάχους δοκίμια, η απόσβεση ήταν έντονη και η κυματομορφή που προέκυπτε ήταν αρκετά δυσανάγνωστη για να είναι αξιόπιστος ο εντοπισμός των ατελειών. Η χρήση κεφαλής με κεντρική συχνότητα 0.5 MHz και διάμετρο μικρότερη ή ίση με τη διάμετρο των ατελειών, θα οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα.

Όσον αφορά τον έλεγχο με δοκιμή βύθισης, λόγω της εκ κατασκευής μικρής κλίσης που είχαν τα δοκίμια, οι απεικονίσεις φάνηκε να μην ήταν ικανοποιητικές, λόγω της μη κάθετης πρόσπτωσης της δέσμης στην εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου.

8.5 Διαδικασία Ελέγχου με Άγνωστη τη Θέση των Ατελειών

Όπως παρουσιάστηκε κατά την περιγραφή των δοκιμίων σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι θέσεις των ατελειών ήταν γνωστές. Κατά τον έλεγχο όμως πραγματικών κατασκευών, η δυνατότητα γνώσης της ύπαρξης και της θέσης των ατελειών είναι περιορισμένη και τις περισσότερες φορές ανύπαρκτη. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν τα βήματα και οι ενέργειες που θα ακολουθούσαμε, με την τεχνογνωσία την οποία ήδη έχουμε λάβει από τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας, αν για τα ίδια δοκίμια και τους ίδιους συνδυασμούς υλικών, οι θέσεις των ατελειών ήταν άγνωστες.

Τα βήματα και τα setup που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, θα αφορούν μόνο τον έλεγχο με δοκιμή επαφής και με τις δύο διατάξεις ελέγχου, η οποία ήταν η βασική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των ατελειών. Τέλος, η ανάλυση που θα ακολουθήσει, θα αφορά τα δοκίμια A1, B1 και B2, στα οποία πραγματοποιήθηκε και η ανίχνευση των ατελειών.

Πρώτο μέλημά μας είναι ο καθορισμός των ταχυτήτων των υπερηχητικών κυμάτων εντός των διαφορετικών υλικών, από τα οποία αποτελούνται τα δοκίμιά μας. Για τη διαδικασία αυτή, πρέπει να εφαρμοστούν οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στο υποκεφάλαιο 6.4. Αφού έχουν ορισθεί οι διάφορες ταχύτητες, σχεδιάζουμε στην εμπρός επιφάνεια του κάθε τμήματος που θέλουμε να σαρώσουμε, έναν κάναβο, με μέγεθος κελιού 10x10 mm. Με τον τρόπο αυτό, μπορούμε να ορίσουμε διάφορες θέσεις όπου θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος, αφού πλέον δε γνωρίζουμε τη θέση της κάθε ατέλειας στο επίπεδο.

Στη συνέχεια, ορίζουμε τις ρυθμίσεις των δύο διατάξεων ελέγχου. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι, εκτός από τις ρυθμίσεις των gates και συγκεκριμένα το start και το width του κάθε gate, οι υπόλοιπες ρυθμίσεις θα είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στα setup του κεφαλαίου 7 για την κάθε ατέλεια του κάθε δοκιμίου, αφού εξαρτώνται από το υλικό και το πάχος που τμήματος που μελετάται. Αναλυτικότερα, για τον έλεγχο του GFRP και για τα τρία δοκίμια, για το POCKET UT^{TM} θα χρησιμοποιούσαμε τις ρυθμίσεις του Πίνακα 7.1 ενώ για το ULTRAPAC II τον Πίνακα 7.4. Για τον πυρήνα Balsa του δοκίμιο A1 τα setup των Πινάκων 7.7 και 7.6, για το χαλύβδινο πυρήνα του δοκιμίου B1 τους Πίνακες 7.10 και 7.14 και για το πυρήνα του B2 τους Πίνακες 7.21 και 7.24.

Όσον αφορά τις ρυθμίσεις των χρονικών παραθύρων, πλέον δε γνωρίζουμε τη θέση της κάθε ατέλειας κατά το πάχος. Για το λόγο αυτό, απαιτείται να πραγματοποιηθούν δοκιμές, ώστε να ελεγχθεί τμηματικά όλο το πάχος του δοκιμίου. Μία αξιόπιστη τεχνική είναι να χωρίσουμε το πάχος του κάθε τμήματος που μελετάται σε υποδιαστήματα, με μήκος 10% περίπου του συνολικού πάχους του τμήματος. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να γίνει ένας πρώτος έλεγχος, ορίζοντας την αρχή του gate στα 0.00 mm και το πλάτος του στα 0.25 mm,

ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχει ατέλεια κοντά στην εμπρός επιφάνεια του τμήματος που μελετάται.

Σε κάποιο σχεδιασμένο τετράγωνο του κανάβου, και αφού τα gates έχουν ορισθεί σε κατάλληλο πάχος, θα εντοπιστεί ένας καινούργιος παλμός, αυτός από την ατέλεια, ο οποίος δε θα εμφανίζεται στα άλλα σημεία σάρωσης. Με τον τρόπο αυτό και μαρκάροντας τα κελία του κανάβου στα οποία εμφανίζεται ο παλμός από την ατέλεια, μπορούμε να την οριοθετήσουμε, εντοπίζοντας την αρχή και το τέλος της στο επίπεδο. Η απόσταση στην οποία βρίσκεται η ατέλεια από την εμπρός επιφάνεια του δοκιμίου, θα προκύπτει από την ένδειξη του gate, όταν ο παλμός της ατέλειας θα το τέμνει. Για να είμαστε βέβαιοι ότι ο παλμός της ατέλειας θα εντοπιστεί από το gate, πρέπει να οριστεί σε ύψος περίπου 5% του ύψους της οθόνης του οργάνου. Η τιμή αυτή είναι αρκετά αξιόπιστη, δίνοντας τη δυνατότητα να διαβαστεί και ένας πολύ εξασθενημένος παλμός ο οποίος προέρχεται από ατέλεια, χωρίς παράλληλα να επιτρέπει σε τυχόν θόρυβο να το τέμνει.

Τέλος, από την προηγούμενη ανάλυση, είναι φανερό ότι η γνώση των θέσεων των ατελειών μείωσε τις απαιτούμενες δοκιμές και κατέστησε ευκολότερο τον εντοπισμό των ατελειών.

8.6 Προτεινόμενη Έρευνα

Κατά την εκτέλεση του πειραματικού ελέγχου με δοκιμή βύθισης και χρήση της διάταξης ULTRAPAC II, η δυσκολία εντοπισμού των ατελειών έγκειται στη μη κάθετη πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης. Υπάρχουν, όμως, στην αγορά αυτοματοποιημένες διατάξεις εμβάπτισης, οι οποίες δίνουν λύσεις στο εν λόγω πρόβλημα. Το λογισμικό των διατάξεων αυτών δίνει την δυνατότητα κατάλληλης ρύθμισης του βραχίονα, στον οποίο βρίσκεται η κεφαλή, ώστε να είναι πάντα κάθετος ως προς την εμπρός επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου.

Στη δοκιμή επαφής, σε περίπτωση που το υπερηχητικό κύμα προσπέσει υπό γωνία στην επιφάνεια του δοκιμίου, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τη διασπορά της υπερηχητικής δέσμης. Η διασπορά αυτή, σε συνδυασμό με τη μεγάλη απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης, αν το εξεταζόμενο δοκίμιο ήταν σύνθετο υλικό, θα καθιστούσε πολύ δύσκολο τον εντοπισμό ατελειών.

Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμη η δημιουργία και στη συνέχεια ο υπερηχητικός έλεγχος καμπυλωτών δοκιμίων, με τον ίδιο συνδυασμό υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και στην παρούσα εργασία, ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο αυτή η εκ κατασκευής καμπυλότητα θα εμποδίσει τον εντοπισμό των ατελειών.

Βιβλιογραφία

Ξένη

- ASM HANDBOOK VOL 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control.
- ASM HANDBOOK VOL 21. COMPOSITES.
- Astrom BT(1997). Manufacturing of Polymer Composite Materials. Chapman and Hall London UK.
- Hayman B., Beggreen C. And Tsouvalis N (2007). A Review of the Causes of Production Defects in Marine Composite Structures and their Influence on Performance. Proc. 1th International Conference on Marine Structures.
- IFREMER. Peter Pavies and Lionel Lemoine (1992).Nautical Construction with Composite Materials. International Conference Paris 1992.
- MOSAIC (2012). D1.2- Selection of Application Cases and Definition of Required Implementation Steps: Composites.
- MOSAIC (2012). D4.2- On Board in Tegration and Design of Composite Components.
- OLYMPUS PANAMETRICS Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing.
- Pocket UT™ and Pocket UTwin™ Software User's Guide Rev. 6 November, 2009.
- Ship Structure Committee (2012). Inspection Techniques for Marine Composite Construction and NDE.
- ULTRAWIN™ Software USER'S MANUAL Rev 2.58 October, 2002.

Ελληνική

- Αναλυτικές Εργαστηριακές Σημειώσεις του μαθήματος Ναυπηγική Τεχνολογία. Παχυμετρήσεις και Έλεγχος Συγκολλήσεων με Υπερήχους. Αθήνα 2009.
- Λούτας Θ. Καθηγητής Π.Π. Διαφάνειες μαθήματος Μη Καταστροφικές Δοκιμές και Έλεγχοι. Πάτρα 2013.
- Προδρομίδης Γ. (2013). Μη Καταστροφικός Έλεγχος Συγκολλήσεων Αλουμινίου με την Μέθοδο των Υπερήχων.
- Πρασιανάκης Γιάννης Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ. Μη καταστροφικος έλεγχος των υλικών. Η μέθοδος των υπερήχων. Γ Έκδοση Αθήνα 1993.
- Τσούβαλης Νικόλαος Καθηγητής ΕΜΠ. Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά. Αθήνα 1998.
- Χασιώτης Θ. (2012). Μη Καταστροφικός Έλεγχος Πολύστρωτων Συνθετών Υλικών Ναυπηγικών Εφαρμογών με τη Χρήση Αυτοματοποιημένης Διάταξης Υπερήχων Εμβαπτιζομένου Έλεγχου.