



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ
ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ ΕΜΒΑΠΤΙΖΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ»**

ΧΑΣΙΩΤΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Ν.ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ, Αν. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

-ΑΘΗΝΑ 2012-

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στο Κ. Στρατή Μπαδογιάννη για την σημαντική βοήθεια και καθοδήγηση κατά την διάρκεια της προσπάθειας μου, καθώς και στα μέλη του εργαστηρίου για την συνεισφορά τους κατά την κατασκευή των δοκιμών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης, το τμήμα σύνθετων υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας που με δέχτηκε και μου επέτρεψε να χρησιμοποιήσω τον εξοπλισμό του με σκοπό την λήψη περισσότερων δεδομένων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Γιώργο, την μητέρα μου Ελένη και την αδελφή μου Έφη για την συμπαράσταση και την βοήθεια τους.

Περιεχόμενα	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .	1
1.1 Εισαγωγή.	1
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.	1
1.3 Συστατικά μέρη σύνθετων υλικών.	2
1.3.1 Μήτρες.	2
1.3.2 Πολυεστερικές Ρητίνες.	3
1.3.3 Βινυλεστερικές Ρητίνες.	4
1.3.4 Εποξικές ρητίνες.	5
1.3.5 Φαινολικές Ρητίνες.	5
1.3.6 Πολυμερισμός και σκλήρυνση των ρητινών.	6
1.3.7 Ενισχυτικές ίνες.	6
1.3.8 Ίνες Γυαλιού.	8
1.3.9 Ίνες Άνθρακα-Γραφίτη.	10
1.3.10 Ίνες Aramid.	11
1.4 Κατασκευαστική διαμόρφωση των ινωδών σύνθετων υλικών.	11
1.5 Κατασκευαστικές μέθοδοι σύνθετων υλικών.	13
1.6 Ατέλειες και βλάβες που παρουσιάζονται στα σκάφη από σύνθετα υλικά.	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.	26
2.1 Εισαγωγή στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο.	26
2.2 Επιλογή μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου.	27
2.3 Μέθοδοι μη καταστροφικού ελέγχου.	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ	34
3.1 Εισαγωγή.	34
3.2 Είδη υπερηχητικών κυμάτων.	34
3.2.1 Διαμήκη υπερηχητικά κύματα.	35
3.2.2 Εγκάρσια υπερηχητικά κύματα.	35
3.2.3 Επιφανειακά κύματα (Rayleigh waves).	36
3.2.4 Κύματα πλακών ή κύματα του Lamb.	37
3.3 Υπερηχητικά κύματα και συνοριακές επιφάνειες δύο υλικών.	37
3.3.1 Κάθετη πρόσπτωση ηχητικού κύματος στη συνοριακή επιφάνεια δύο υλικών.	37
3.3.2 Πλάγια πρόσπτωση υπερηχητικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών.	40
3.4 Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων (Attenuation).	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ.	46
4.1 Εισαγωγή.	46
4.2 Αρχή παραγωγής υπερήχων. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.	46
4.3 Γενική διάταξη εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών (immersion transducers).	48
4.4 Το ηχητικό πεδίο των εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών μονού κρυστάλλου, καθέτου δέσμης.	50
4.5 Εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές με εστίαση (focused immersion transducers).	54
4.6 Επιλογή πιεζοηλεκτρικής κεφαλής για τον έλεγχο σύνθετων υλικών.	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.	63
5.1 Εισαγωγή.	63
5.2 Διατάξεις ελέγχου με υπερήχους.	63
5.3 Αυτοματοποιημένες διατάξεις υπερήχων εμβαπτιζόμενου ελέγχου.	64

5.4 Βασικές μέθοδοι ελέγχου με υπερήχους.	66
5.5 Η μέθοδος της διέλευσης (Through transmission).	67
5.6 Η μέθοδος της παλμοηχούς (pulse echo method).	68
5.7 Μέθοδοι απεικόνισης δεδομένων στα αυτοματοποιημένα συστήματα υπερήχων με τη μέθοδο της παλμοηχούς.	73
5.7.1 Η απεικόνιση εύρους (Amplitude-scan) A-scan.	73
5.7.2 Η απεικόνιση Αντίθεσης (Contrast-scan) C-scan.	75
5.7.3 Απεικόνιση Λαμπρότητας (Brightness-scan) B-scan.	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.	77
6.1 Εισαγωγή.	77
6.2 Περιγραφή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.	77
6.3 Γεωμετρία δοκιμίων.	78
6.4 Παρασκευή των ενισχυτικών στρώσεων για τα δοκίμια CFRP και GFRP.	81
6.5 Μορφοποίηση με έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum infusion).	84
6.5.1 Περιγραφή εξοπλισμού και υλικών στη μέθοδο έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού.	85
6.5.2 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού.	90
6.6 Μορφοποίηση ρητίνης με απλή επαφή και επίστρωση με το χέρι (hand lay up).	99
6.7 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή των δοκιμίων.	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ULTRAPAC II.	103
7.1 Διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου ULTRAPAC II.	103
7.2 Προετοιμασία δεξαμενής.	107
7.3 Το μέσο σύζευξης.	108
7.4 Τοποθέτηση δοκιμίων στη δεξαμενή.	109
7.5 Ρύθμιση των αρχικών παραμέτρων της διάταξης ULTRAPAC.	110
7.5.1 Βαθμονόμηση της συσκευής ULTRAPAC.	110
7.5.2 Προσδιορισμός της ταχύτητας των κυμάτων υπερήχων στα δοκίμια.	111
7.5.3 Ορισμός της επιφάνειας σάρωσης (Scanner set up).	113
7.5.4 Ορισμός σημείου αναφοράς και έναρξης της σάρωσης (Scanner Jog).	115
7.5.5 Ρύθμιση των παραμέτρων στο παράθυρο διαλόγου AD-IPR Setup.	116
7.5.6 Καμπύλη DAC (Distance-amplitude correction curve).	119
7.5.7 Ορισμός των Gates.	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.	124
8.1 Εισαγωγή-Τεχνικές εξέτασης-Παρουσίαση δεδομένων.	124
8.2 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I).	125
8.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις.	125
8.3 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 3η-4η στρώση.	126
8.3.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK.	126
8.3.2 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	130
8.3.3 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ MAX-THRES ΚΑΙ FIRST-THRES.	132
8.3.4 ΚΕΦΑΛΗ 15MHZ FOCUSED ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	135
8.4 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 4η -5η στρώση.	137
8.4.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK.	137
8.4.2 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-THRESH.	139
8.4.3 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	141
8.5 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 7η -8η στρώση.	146

8.5.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK.	146
8.5.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	148
8.5.3 ΚΕΦΑΛΗ 15ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	150
8.6 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) BACKWALL.	151
8.6.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	151
8.6.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-THRESH.	155
8.7 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Hand layup (CFRP-H.L).	158
8.7.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις.	158
8.8 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I).	159
8.8.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις.	159
8.9 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I) FIRST LAYER.	160
8.9.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK.	160
8.9.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	162
8.10 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I) 3-4th LAYER.	163
8.10.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	163
8.11 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I) 4-5th LAYER.	165
8.11.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK.	165
8.12 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Hand layup (GFRP-H.L).	168
8.12.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις.	168
8.13 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.	169
Βιβλιογραφία.	172
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο σύνθετα χαρακτηρίζονται τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συνιστάμενα μέρη, τα οποία έχουν μεταξύ τους σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Τα συνιστάμενα αυτά υλικά συνδυάζονται σε μακροσκοπική κλίμακα για τον σχηματισμό του σύνθετου υλικού, που έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. 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 τα συστατικά μέρη έχουν διακριτά όρια μεταξύ τους και μπορούν να εντοπιστούν με γυμνό μάτι. Αντίθετα, διαφορετικά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σε μικροσκοπική κλίμακα, αλλά το νέο υλικό είναι ομογενές. Τα συστατικά μέρη δεν μπορούν να διακριθούν με γυμνό μάτι. Τέτοια υλικά είναι τα κράματα.

Ιστορικά η αρχή της χρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών είναι άγνωστη. Η ιδέα όμως του συνδυασμού διαφορετικών υλικών για την κατασκευή ενός νέου, με καλύτερες ιδιότητες, χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο εδώ και χιλιάδες χρόνια. Υπάρχουν αναφορές για κάποιες μορφές σύνθετων υλικών, για παράδειγμα η προσθήκη άχυρου σε τούβλα από πηλό και οι μεσαιωνικές πανοπλίες που κατασκευάζονταν από στρώσεις διάφορων υλικών. Με τη σημερινή τους μορφή, σαν πολλά υποσχόμενη κατηγορία κατασκευαστικών υλικών, εμφανίζονται στα μέσα του 20^{ου} αιώνα.

Σκοπός της δημιουργίας των σύνθετων υλικών είναι η παραγωγή κατασκευαστικών στοιχείων με καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά (χάλυβας, αλουμίνιο, ξύλο). Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η αυξημένη αντοχή και η δυσκαμψία, το μειωμένο βάρος και η αντοχή σε διάβρωση.

1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

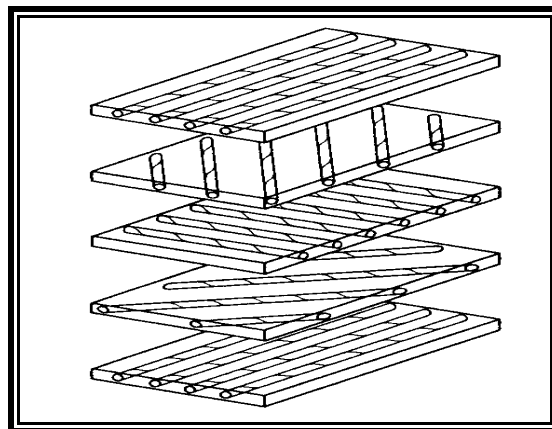
Τα σύνθετα υλικά με τη μορφή που έχουν σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, στα ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous Composite Materials), στα σύνθετα υλικά σωματιδίων (Particulate Composite Materials) και στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (Laminated Composite Materials).

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα και τις ενισχυτικές ίνες. Μέσα στη μήτρα κατανέμονται οι ίνες ενός άλλου υλικού, είτε τυχαία, είτε με συγκεκριμένη διάταξη. Τα σύνθετα υλικά

σωματιδίων αποτελούνται από τη μήτρα και από σωματίδια ενός ή περισσότερων υλικών, τα οποία βρίσκονται διασκορπισμένα, με άτακτο τρόπο, μέσα στη μήτρα. Ως σωματίδια θεωρούνται οι ενισχύσεις που έχουν ίσες και τις τρεις διαστάσεις τους, όπως τα σφαιρίδια, οι κοντές ράβδοι και οι νιφάδες.

Τέλος, τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά, στη μελέτη των οποίων επικεντρώνεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αποτελούνται από στρώσεις ενός ή περισσότερων υλικών που συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια της μήτρας. Οι στρώσεις μπορεί είναι από το ίδιο ή από διαφορετικά υλικά, με τον ίδιο ή και διαφορετικό προσανατολισμό ινών. (Σχήμα 1.1) Συνεπώς, με την τοποθέτηση επάλληλων στρώσεων και με συγκεκριμένο προσανατολισμό, μπορούν να ρυθμιστούν η αντοχή και η δυσκαμψία του πολύστρωτου, ανάλογα με τις ανάγκες κατά την λειτουργία του.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των συστατικών μερών των σύνθετων υλικών, δηλαδή της μήτρας και των ενισχυτικών ινών. Η ανάλυση εστιάζεται στα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την κατασκευή πολύστρωτων σύνθετων υλικών.



Σχήμα 1.1 : Επάλληλες στρώσεις.

1.3 Συστατικά μέρη σύνθετων υλικών

1.3.1 Μήτρες

Ως μήτρα χαρακτηρίζεται εκείνο το συστατικό του σύνθετου υλικού το οποίο περιβάλλει και σταθεροποιεί τις ενισχυτικές ίνες, ενώ παράλληλα δίνει το τελικό σχήμα στη σύνθετη κατασκευή. Η μήτρα, σαν μέρος του σύνθετου υλικού, αν και έχει χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις ενισχυτικές ίνες, επιτελεί διάφορες λειτουργίες μέσω των οποίων αναδεικνύονται οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Καταρχάς, 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 με διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη μήτρα.

Οι μήτρες στα σύγχρονα σύνθετα υλικά μπορεί να είναι οργανικές, μεταλλικές ή κεραμικές. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί μόνο με τις οργανικές μήτρες (ρητίνες), κατηγορία των οποίων χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων που εξετάζονται. Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις θερμοπλαστικές και τις θερμοσκληρυνόμενες.

Οι θερμοπλαστικές μήτρες, είναι πολυμερή τα οποία σε αυξημένες θερμοκρασίες συνήθως 150-200°C μαλακώνουν και τελικά λιώνουν, ενώ σκληραίνουν ξανά όταν ψύχονται. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί όσο συχνά επιθυμείται, χωρίς να έχει σημαντικές συνέπειες στις ιδιότητες του υλικού. Μέσω αυτής της διαδικασίας γίνεται η μορφοποίηση των ρητινών της κατηγορίας αυτής. Οι συγκεκριμένες ρητίνες δεν είναι προς το παρόν κατάλληλες για την κατασκευή μεγάλων σκαφών. Έχουν εφαρμογή σε μικρές γάστρες και σε εξειδικευμένα τμήματα σκαφών.

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι πολυμερή, τα οποία όταν αναμειγνύονται με σκληρυντή ή καταλύτη, αντιδρούν μη αναστρέψιμα για να σχηματιστεί ένα σκληρό τελικό προϊόν. Όταν τελειώσει η διαδικασία πολυμερισμού και στερεοποίησης, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες δεν επανέρχονται ξανά 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, οι βινυλεστερικές, οι εποξικές και οι λιγότερο χρησιμοποιούμενες φαινολικές. Στις ναυπηγικές κατασκευές χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες.

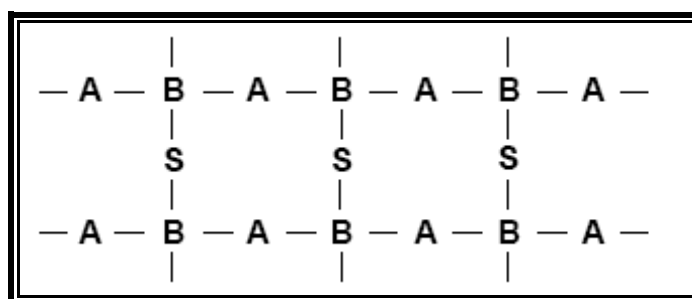
1.3.2 Πολυεστερικές Ρητίνες

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

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πολυεστέρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Οι δύο αυτοί τύποι είναι οι ορθοφθαλικοί πολυεστέρες, που είναι χαμηλότερου κόστους και ευρέως χρησιμοποιούμενοι, και οι ισοφθαλικοί πολυεστέρες, που είναι πιο υψηλότερου κόστους, με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, καλύτερη αντοχή στο νερό και χρησιμοποιούνται σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων.

Οι περισσότερες πολυεστερικές ρητίνες είναι παχύρρευστες και περιέχουν στυρένιο σε ποσοστό μέχρι και 50%. Ο ρόλος του στυρενίου είναι διπλός. Πρώτον, διευκολύνει την επεξεργασία της ρητίνης καθώς την κάνει πιο λεπτόρρευστη και δεύτερον, επιτρέπει στη ρητίνη να πολυμεριστεί και να μετατραπεί από την υγρή μορφή σε στερεή, σχηματίζοντας διασταυρούμενες μοριακές αλυσίδες σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο.

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 την χρησιμοποίηση της ρητίνης. Δεν λαμβάνουν μέρος σε καμία αντίδραση, απλώς προκαλούν την έναρξη της διαδικασίας πολυμερισμού. Ο επιταχυντής προστίθεται για να επιταχύνει την διαδικασία πολυμερισμού και οι αναστολείς για να την επιβραδύνουν. Μετά την προσθήκη και του καταλύτη και του επιταχυντή ξεκινά η διαδικασία πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο ρόλος του στυρενίου, που συμβολίζεται με S, στη διασταύρωση των αλυσίδων του πολυμερούς, οι οποίες συμβολίζονται με A και B. Όπου B οι ελεύθερες ρίζες της αλυσίδας.



Σχήμα 1.2 : Ρόλος του στυρενίου στον πολυμερισμό.

Η αντίδραση πολυμερισμού είναι εξώθερμη. Το ποσό της θερμότητας που εκλύεται εξαρτάται από το πάχος του υλικού που κατασκευάζεται, το οποίο εάν είναι υπερβολικό, μπορεί να καταστραφεί από τη μεγάλη αύξηση θερμοκρασίας. Επίσης, κατά τον πολυμερισμό της ρητίνης παρουσιάζεται συρρίκνωση του όγκου της περίπου 5-8%.

Τέλος, όσο αφορά στην χρησιμοποίησή τους, οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες ρητίνες για ναυπηγική χρήση. Η ευρεία εφαρμογή τους οφείλεται στο λογικό τους κόστος, στην ευκολία μορφοποίησης τους (hand lay up, spray up) και στην καλή τους συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον.

1.3.3 Βινυλεστερικές Ρητίνες

Οι βινυλεστερικές ρητίνες έχουν παρόμοια μοριακή δομή με τις πολυεστερικές ρητίνες, περιέχουν, όμως, μικρότερο αριθμό εστερομάδων, οι οποίες είναι δεκτικές στην απορρόφηση νερού με υδρόλυση. Αυτό συνεπάγεται την καλύτερη συμπεριφορά των βινυλεστερικών ρητινών σε υγρό περιβάλλον, επειδή έχουν καλύτερη αντίσταση στο νερό και σε άλλα χημικά. Οι βινυλεστερικές ρητίνες έχουν καλύτερη αντοχή και δυσκαμψία σε σχέση με τις πολυεστερικές, έχουν επίσης καλύτερη αντοχή σε κρούση και σε κόπωση. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν σαν αποτέλεσμα

οι βινιλεστερικές ρητίνες να έχουν διπλάσιο κόστος από τις πολυεστερικές. Χρησιμοποιούνται σε περιορισμένο βαθμό σε μικρά σκάφη υψηλών απαιτήσεων.

1.3.4 Εποξικές ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες αποτελούν μια πολύ μεγάλη κατηγορία ρητινών που παρουσιάζουν πολύ υψηλή απόδοση σε σχέση με τις υπάρχουσες ρητίνες άλλων κατηγοριών. Οι εποξικές ρητίνες υποσκελίζουν τους περισσότερους τύπους ρητίνης όσο 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 σαν gel-coat.

Οι εποξικές ρητίνες έχουν ένα μεγάλο αριθμό χρήσιμων ιδιοτήτων. Η ρητίνη και οι παράγοντες που την πολυμερίζουν (σκληρυντές) σχηματίζουν ένα σύστημα με χαμηλή ρευστότητα, που είναι εύκολο στη χρήση. Οι εποξικές ρητίνες πολυμερίζονται εύκολα και γρήγορα, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία μεταξύ 5-150°C. Μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες των εποξικών ρητινών είναι και ότι παρουσιάζουν πολύ μικρή συρρίκνωση κατά την σκλήρυνση και έτσι ελαχιστοποιούνται οι εσωτερικές τάσεις στο υλικό.

Η υψηλή κολλητική ικανότητα και οι υψηλές μηχανικές ιδιότητες συνδυάζονται με μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση και με αντίσταση σε χημικά. Οι εποξικές ρητίνες 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 που είναι κατά δύο με τρεις φορές υψηλότερο από τους κοινούς ισοφθαλικούς πολυεστέρες και μπορεί να γίνει έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο, για ειδικές εποξικές ρητίνες.

1.3.5 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.

Έχουν όμως, μειονεκτήματα που δεν επιτρέπουν τη χρήση τους σε κατασκευές οι οποίες απαιτούν αντοχή και καλή συμπεριφορά σε θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τον πολυμερισμό τους παράγεται υδρατμός και δημιουργεί φυσαλίδες στο πολύστρωτο, με αποτέλεσμα

την μειωμένη αντοχή. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλή χημική έλξη προς το νερό, που οδηγεί σε απορρόφηση νερού, τρεις φορές περισσότερο από τους ισοφθαλικούς πολυεστέρες.

1.3.6 Πολυμερισμός και σκλήρυνση των ρητινών

Με την προσθήκη του καταλύτη ή του σκληρυντή, η ρητίνη θα αρχίσει να γίνεται πιο παχύρρευστη μέχρι που θα σταματήσει να είναι υγρή και θα χάσει την ικανότητα της να ρέει. Το σημείο αυτό ονομάζεται 'gel point'. Μετά το σημείο αυτό, η ρητίνη θα συνεχίσει να σκληραίνει μέχρι που, μετά από ένα ορισμένο διάστημα, να αποκτήσει την πλήρη σκληρότητά της και τις μηχανικές της ιδιότητες.

Η παραπάνω αντίδραση είναι μια εξώθερμη διαδικασία. Γενικά, οι πολυεστερικές ρητίνες παράγουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας και αποκτούν γρηγορότερα τις μηχανικές τους ιδιότητες, σε σχέση με τις εποξικές ρητίνες. Η ταχύτητα με την οποία εξελίσσεται η διαδικασία πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης εξαρτάται, στις μεν πολυεστερικές και βινυλεστερικές από την ποσότητα του καταλύτη, στις δε εποξικές από το είδος του σκληρυντή.

Η διαδικασία πολυμερισμού και σκλήρυνσης μπορεί να επιταχυνθεί με την πρόσδοση ποσού θερμότητας. Συνεπώς, για υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες η ρητίνη θα σκληρύνει γρηγορότερα. Εμπειρικά, εάν η ρητίνη σ' ένα πολύστρωτο σκληραίνει σε 25 λεπτά στους 20°C, θα σκληρύνει σε 12 λεπτά στους 30°C.

Η σκλήρυνση σε υψηλές θερμοκρασίες έχει ένα πλεονέκτημα και ένα μειονέκτημα. Το πλεονέκτημα είναι ότι, σε αυξημένες θερμοκρασίες, ενισχύεται η διασταύρωση των μορίων του πολυμερούς, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Το μειονέκτημα είναι ότι, αν δεν γίνει καλός υπολογισμός στο χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή ενός πολύστρωτου και η ρητίνη αρχίσει να σκληραίνει πριν το τέλος του εμποτισμού όλων των στρώσεων, το πολύστρωτο καταστρέφεται.

1.3.7 Ενισχυτικές ίνες

Ο ρόλος των ενισχυτικών ινών είναι να αυξήσουν τις μηχανικές ιδιότητες του συστήματος της ρητίνης, η οποία χρησιμοποιείται για την κατασκευή του σύνθετου υλικού. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ινών. Ο καθένας έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και επηρεάζει το σύνθετο υλικό με διαφορετικό τρόπο.

Οι ίνες χαρακτηρίζονται από την υψηλή τιμή του λόγου μήκους προς 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, 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 μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών ινών είναι σημαντικά μεγαλύτερες από της ρητίνης χωρίς ενίσχυση. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι οι ίνες είναι ικανές να φέρουν μόνο εφελκυστικά φορτία και συνεισφέρουν στο μεγαλύτερο μέρος της εφελκυστικής, θλιπτικής, καμπτικής και διατμητικής δυσκαμψίας και αντοχής σ' ένα σύνθετο υλικό. Οι κυριότερες μηχανικές ιδιότητες των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων ινών παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών.

Είδος ινών	σ_T (MPa)	E (GPa)	γ (g/cm ³)	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας
CARBON HS	3500	160-270	1,8	90-150
CARBON IM	5300	270-325	1,8	150-180
CARBON HM	3500	325-440	1,8	180-140
CARBON UHM	2000	440+	2,0	200+
Aramid LM	3600	60	1,45	40
Aramid HM	3100	120	1,45	80
Aramid UHM	3400	180	1,47	120
GLASS-E	2400	69	2,50	27
GLASS-S2	3450	86	2,50	34
GLASS-quarz	3700	69	2,20	31

Ο δεσμός μεταξύ της ρητίνης και της εξωτερικής επιφάνειας της ίνας είναι καθοριστικός καθώς αυτός εξασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά των φορτίων από τη μια ίνα στην άλλη, ενώ παράλληλα εμποδίζει το σπάσιμο των ινών και την αποκόλληση ινών-ρητίνης κατά τη φόρτιση. Ο δεσμός αυτός ενισχύεται με ειδική επιφανειακή κατεργασία των ινών, με την οποία αυξάνεται ταυτόχρονα και η ικανότητα διαβροχής των ινών από τη ρητίνη.

Το ποσοστό των ενισχυτικών ινών σ' ένα σύνθετο υλικό παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητές του. Επειδή οι ίνες έχουν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ίνες, αυξάνονται και οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Πρακτικά, όμως, υπάρχει ένα ανώτατο

όριο αφού οι ίνες για να επιδείξουν τις μηχανικές τους ιδιότητες πρέπει να είναι πλήρως καλυμμένες με ρητίνη. Στην περίπτωση που αυξηθεί πολύ η περιεκτικότητα σε ίνες, η αντοχή τους μειώνεται καθώς δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα ρητίνης για να τις συγκρατήσει.

Τέλος, οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή ενός σύνθετου υλικού καθορίζονται από τον προσανατολισμό των ινών, πράγμα φυσικό αφού οι ίνες μπορούν να αναλάβουν μόνο εφελκυστικά φορτία, εφόσον έχουν τις μεγαλύτερες τιμές των μηχανικών τους ιδιοτήτων κατά το μήκος τους. Αυτό οδηγεί στην ανισοτροπικότητα των σύνθετων υλικών, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί πλεονέκτημα, καθώς οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν κατά τη διεύθυνση των κύριων φορτίων και έτσι να περιορίζεται η περίσσεια υλικού.

Σήμερα στα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών ίνες, οι οποίες μπορεί να έχουν τη μορφή νημάτων ή πλεγμένων υφασμάτων. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των περισσότερο χρησιμοποιούμενων ινών και των τύπων τους (υφάσματα, νήματα) στη ναυπηγική.

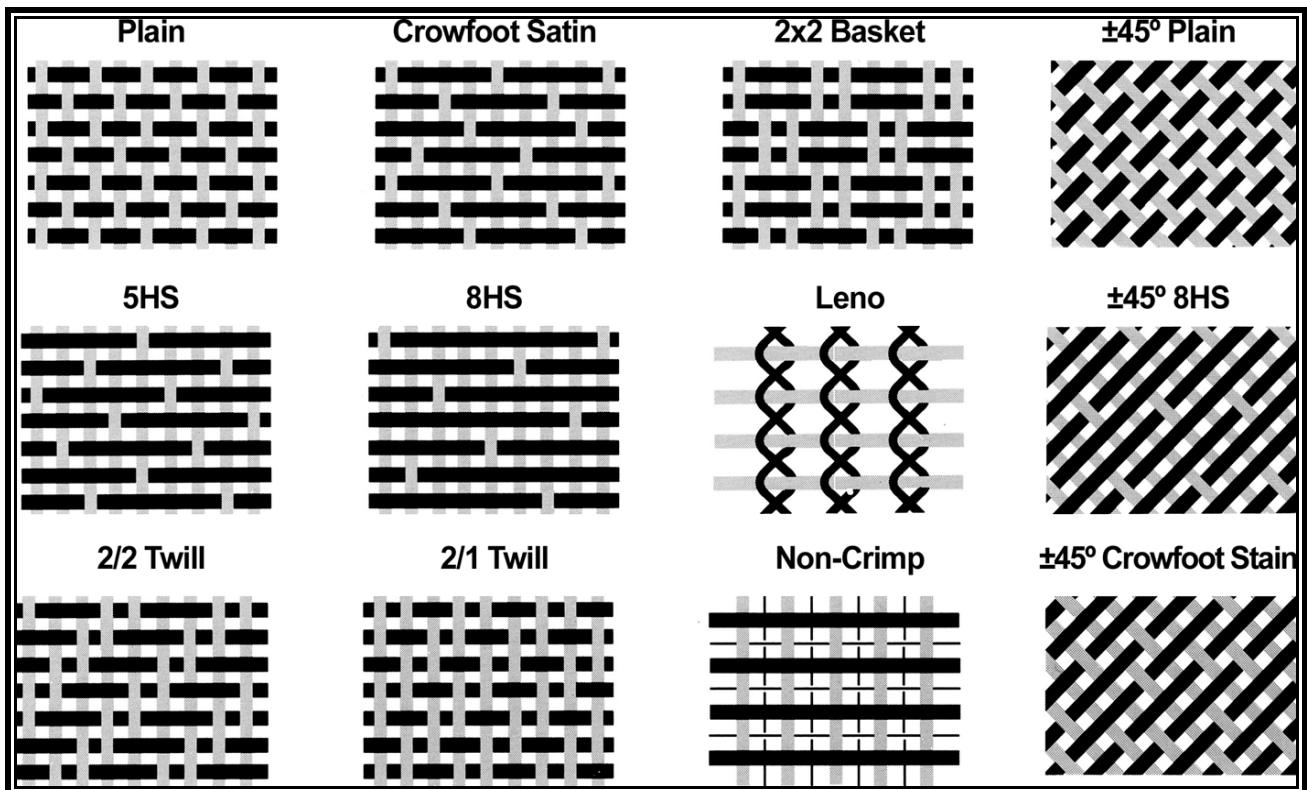
1.3.8 Ίνες Γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού δημιουργούνται όταν τηγμένο γυαλί περάσει μέσα από οπές διαμέτρου 0.8-3.0 mm και στη συνέχεια τραβηχτεί με μεγάλη ταχύτητα, ώστε οι παραγόμενες ίνες να έχουν διάμετρο από 3-19 μm . Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή αντοχή, η σχετικά χαμηλή δυσκαμψία, το γεγονός ότι δεν απορροφούν νερό και το χαμηλό κόστος.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται μεμονωμένα ή μια 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, σε ορισμένες κατασκευαστικές μεθόδους, στην πλειοψηφία, όμως, των εφαρμογών οι πλεξίδες πλέκονται και δημιουργούν υαλοϋφάσματα με διάφορες μορφές πλέξης. Τα υφάσματα χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές εκείνες που υπάρχουν υψηλότερες απαιτήσεις αντοχής.

Τα υαλοϋφάσματα 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. Επιπλέον, μπορούμε να έχουμε και διαφόρων ειδών πλέξεις στα υφάσματα, οι οποίες τους δίνουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι συνηθέστερες μορφές πλέξεων.

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



Σχήμα 1.3 : Είδη πλέξεων υφασμάτων

Παράλληλα, υπάρχουν και μονοαξονικά υφάσματα (unidirectional rovings or clothes), στα οποία οι ίνες είναι παράλληλες και ράβονται ή συγκρατούνται μεταξύ τους προσανατολισμένες 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, τα νήματα γυαλιού κόβονται σε μήκος 6-50 mm και συνδέονται σε τυχαία διάταξη με ειδικό συνδετικό. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το υαλοπίλημα (Σχήμα 1.4), ένα χαλαρό ύφασμα με τυχαίο προσανατολισμό ινών.



Σχήμα 1.4 : Υαλοπίλημα (CSM).

Εκτός από τους διάφορους τύπους ενισχύσεων, οι οποίοι προκύπτουν από τη διάταξη των ινών, υπάρχουν και διαφορετικοί τύποι ινών που παρέχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ο συνηθέστερος τύπος ινών γυαλιού είναι ο τύπος E. Παράγονται ,ακόμα, ίνες γυαλιού τύπου S που έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, αλλά αυξημένο κόστος και ίνες τύπου S-2, που βρίσκονται μεταξύ των δύο προηγούμενων από άποψη κόστους και ιδιοτήτων.

1.3.9 Ίνες Άνθρακα-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%. Οι ίνες άνθρακα, με περαιτέρω θερμική κατεργασία, παράγουν δύο κύριους τύπους ινών, τις ίνες υψηλής αντοχής (high strength HS), όταν θερμαίνονται στους 1500-2000°C και τις ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus HM), όταν θερμαίνονται σε θερμοκρασίες 2500-3000°C, καθώς λαμβάνει χώρα η αντίδραση γραφίτισης και οι ίνες έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 99%.

Οι ίνες άνθρακα διατίθενται, όπως και οι ίνες γυαλιού, σε διάφορες μορφές. Συγκεκριμένα, διατίθενται σε υφάσματα με διάφορες μορφές πλέξεων, σε μονοδιευθύνοντα υφάσματα, σε προεμπροτισμένα υφάσματα (prepregs) και σε λωρίδες.



Σχήμα 1.5 : Ύφασμα από ανθρακονήματα.

Το κόστος των ινών άνθρακα περιορίζει την χρησιμοποίησή τους σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, στις οποίες δικαιολογείται το υψηλό κόστος. Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται μόνο σε ορισμένες εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στην κατασκευή ταχύπλων

υδροπτέρυγων και σε υψηλών απαιτήσεων υποβρύχια οχήματα, καθώς εκεί απαιτείται μεγάλη αντοχή σε λυγισμό.

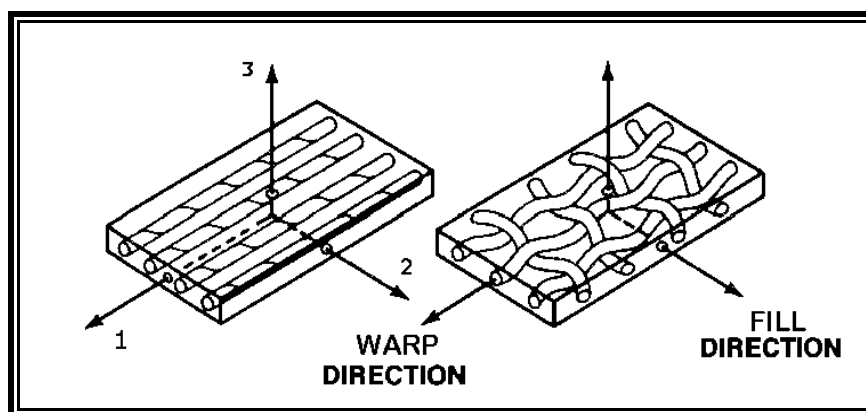
1.3.10 Ίνες Aramid

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 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 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, το Kevlar 29 στην κατασκευή καλωδίων και σχοινιών, καθώς και στην αντιβαλλιστική θωράκιση και το Kevlar 49 έχει αρκετές εφαρμογές στις κατασκευές από FRP. Το κόστος τους είναι υψηλότερο και από τις ίνες γυαλιού και από τις ίνες άνθρακα.

1.4 Κατασκευαστική διαμόρφωση των ινωδών σύνθετων υλικών

Το βασικό δομικό στοιχείο των ινωδών σύνθετων υλικών είναι η στρώση (layer, ply, lamina), η οποία αποτελείται συνήθως από επίπεδη, αλλά και μερικές φορές από καμπύλη τοποθέτηση ινών μέσα στη μήτρα (ρητίνη). Οι ίνες μπορεί να έχουν οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες μορφές, δηλαδή μπορεί να είναι σε μορφή υφάσματος με οποιαδήποτε πλέξη, σε μορφή κοντών ινών συνδεδεμένες με συνδετικό (binder) ή σε μονοαξονικά υφάσματα. Όταν οι ίνες αυτές εμποτιστούν με ρητίνη σχηματίζεται η στρώση.

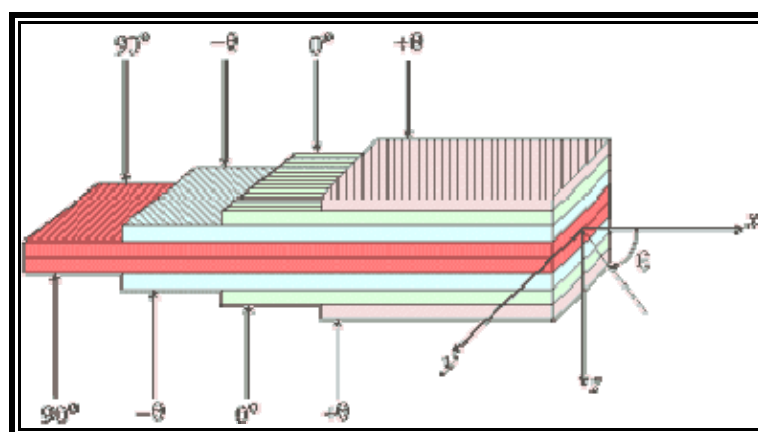
Στο παρακάτω Σχήμα 1.6 φαίνονται δύο τυπικές στρώσεις ενός σύνθετου υλικού με μονοαξονική ενίσχυση και με ενίσχυση σε μορφή υφάσματος. Παρουσιάζονται οι κύριοι άξονες της στρώσης 1,2,3. Ο άξονας 1 είναι παράλληλος με τη διεύθυνση των ινών στην περίπτωση της μονοαξονικής ενίσχυσης, ενώ στην περίπτωση υφάσματος συμπίπτει με τη διεύθυνση με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή με τη διεύθυνση warp. Ο άξονας 2 είναι κάθετος στη διεύθυνση των ινών σε μονοαξονική ενίσχυση, ενώ σε υφάσματα με οποιαδήποτε μορφή πλέξης συμπίπτει με τη διεύθυνση fill, δηλαδή με τη διεύθυνση με τις χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Ο άξονας 3 είναι κάθετος στο επίπεδο που σχηματίζουν οι άξονες 1 και 2 και έχει τη διεύθυνση του πάχους της στρώσης. Στην περίπτωση του υαλοπηλίσματος οι άξονες 1 και 2 μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διεύθυνση.



Σχήμα 1.6 : Στρώσεις σύνθετων υλικών και οι κύριοι άξονες τους.

Η διαδοχική τοποθέτηση μεμονωμένων στρώσεων η μια πάνω στην άλλη, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του πολύστρωτου. Οι στρώσεις που επικάθονται η μια πάνω στην άλλη, μπορεί να έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς των κυρίων αξόνων σε σχέση με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου Σχήμα 1.7.

Επίσης, δεν είναι απαραίτητο να κατατάσσονται συμμετρικά ως προς το μέσο επίπεδο του πολύστρωτου. Για να σχηματιστεί το πολύστρωτο οι επιμέρους στρώσεις κολλιούνται μεταξύ τους με το ίδιο υλικό, τη ρητίνη που χρησιμοποιείται για την παρασκευή της κάθε στρώσης. Τα πολύστρωτα υλικά μπορούν να κατασκευαστούν από στρώσεις με διαφορετικό είδος ενίσχυσης, όπως για παράδειγμα από υαλοϋφασμα και υαλοπίλημα, αλλά και από στρώσεις με διαφορετικές ίνες από άποψη υλικού.



Σχήμα 1.7 : Πολύστρωτο σύνθετο υλικό.

Σκοπός των επάλληλων στρώσεων είναι να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου και οι διευθύνσεις με τις υψηλότερες τιμές να συμπίπτουν με τις διευθύνσεις των φορτίων που δέχεται. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η γεωμετρία των ινών καθώς και ο προσανατολισμός των κύριων διευθύνσεων των στρώσεων, είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός πολύστρωτου.

Ωστόσο, οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών επηρεάζονται δραματικά τόσο από τα αρχικά υλικά όσο και από τη μέθοδο κατασκευής. Η κατασκευαστική διαδικασία είναι αυτή που θα αναδείξει, ή θα υποβαθμίσει, τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών στο σύνθετο υλικό που δημιουργείται.

1.5 Κατασκευαστικές μέθοδοι σύνθετων υλικών

Κατ' αρχάς, η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την κατασκευή ινωδών σύνθετων υλικών είναι η μορφοποίηση με απλή επαφή (contact molding). Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ανοικτό καλούπι πάνω στο οποίο γίνεται η επίστρωση της ρητίνης και των ενισχυτικών ινών. Η επίστρωση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Πρώτον, με ψεκασμό (spray-up), όπου πλεξίδες νημάτων, κομμένες σε μήκος από 25-50 mm, ψεκάζονται ταυτόχρονα με τη ρητίνη από ειδικό πιστόλι ψεκασμού. Στη συνέχεια το μείγμα μορφοποιείται με ρολούς με το χέρι μέχρι να αποκτήσει την τελική του μορφή. Δεύτερον, με επίστρωση με το χέρι (hand lay-up), όπου υγρή ρητίνη εναποτίθεται πάνω στο καλούπι, ή σε προηγούμενη στρώση, με την βοήθεια ενός πινέλου ή ενός πιστολιού ψεκασμού.

Άλλη κατασκευαστική μέθοδος, είναι η μορφοποίηση με πίεση (compression moulding). Κατά τη μέθοδο αυτή ασκείται πίεση συνοδευόμενη συνήθως από θερμότητα, για να επιτευχθεί αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες, απομάκρυνση των κενών αέρα και καλύτερος πολυμερισμός της ρητίνης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ένα ελαστικό διάφραγμα (μεμβράνη, σάκος) τοποθετείται πάνω από το καλούπι και το μη στερεοποιημένο πολύστρωτο και στεγανοποιείται αεροστεγώς η όλη διάταξη. Στη συνέχεια αναρροφάται ο αέρας από το χώρο κάτω από το διάφραγμα και έτσι το πολύστρωτο φορτίζεται με πίεση 1 atm (vacuum bag moulding). Εάν η παραπάνω διάταξη μπει σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης, εκεί επιτυγχάνονται υψηλότερες πιέσεις 5-15 atm και κατά συνέπεια καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (autoclave moulding).

Με τη μέθοδο της περιέλιξης ινών (filament winding) ενισχυτικές ίνες τυλίγονται γύρο από αξονικό καλούπι, το οποίο καθορίζει την εσωτερική γεωμετρία με την βοήθεια αυτοματοποιημένης διάταξης που καθορίζει την ταχύτητα και την γωνία περιέλιξης. Με τον τρόπο αυτό, κατασκευάζονται εκ περιστροφής συμμετρικές κατασκευές, με υψηλά επίπεδα ποιότητας όπως οι γάστρες για υψηλών απαιτήσεων υποβρύχια οχήματα, δίκτυα σωληνώσεων κ.α.

Η μέθοδος έκχυσης ρητίνης (resin transfer moulding) χρησιμοποιεί δύο καλούπια, ένα αρσενικό και ένα θηλυκό. Στο ανοικτό καλούπι τοποθετούνται οι ίνες χωρίς να εμποτιστούν με ρητίνη. Αφού κλείσει το καλούπι εκχύνεται η ρητίνη με πίεση. Με τη μέθοδο αυτή μπορούν να παραχθούν προϊόντα με υψηλές απαιτήσεις ανοχών και λείες εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες. Άλλες μέθοδοι, που δεν χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική, είναι η μορφοποίηση με διαιρετό καλούπι (matched die moulding) και η μορφοποίηση με έλξη (pultrusion).

1.6 Ατέλειες και βλάβες που παρουσιάζονται στα σκάφη από σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά ήρθαν για να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά σε ορισμένες εφαρμογές, παρέχοντας καλύτερες ιδιότητες και μειωμένο βάρος. Η εισαγωγή τους στις κατασκευές συνοδεύτηκε από την εισαγωγή νέων τύπων ατελειών-ελαττωμάτων (defects-imperfections) και βλαβών. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών των ατελειών και των βλαβών, που εμφανίζονται στα σύνθετα υλικά, καθώς και του τρόπου που συνδέονται με τους μηχανισμούς αστοχίας, είναι καίριας σημασίας, ώστε να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα και η αξιοπιστία των κατασκευών.

Ως ατέλεια ορίζεται οποιαδήποτε απόκλιση από την προκαθορισμένη γεωμετρία, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μιας κατασκευής και γενικότερα, οτιδήποτε υποβαθμίζει την ποιότητα ενός σύνθετου υλικού. Οι ατέλειες δημιουργούνται ή εισάγονται ηθελημένα ή αθέλητα κατά την κατασκευαστική διαδικασία. Η παρουσία τους (αριθμός ατελειών, μέγεθός τους) στο σύνθετο υλικό παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς καθορίζει την αντοχή του και συνδέεται με τους μηχανισμούς αστοχίας. Οι ατέλειες αυτές επειδή εμφανίζονται κατά την κατασκευή του σύνθετου υλικού χαρακτηρίζονται σαν κατασκευαστικές ατέλειες. Η εμφάνιση και το είδος τους εξαρτάται από την κατασκευαστική μέθοδο που χρησιμοποιείται, από τα χρησιμοποιούμενα υλικά και από τη γεωμετρία της κατασκευής.

Ως βλάβη ορίζεται οποιαδήποτε απόκλιση από την προκαθορισμένη γεωμετρία ή τις φυσικές ιδιότητες μιας κατασκευής, η οποία δημιουργείται από μηχανική, θερμική ή άλλη καταπόνηση. Η βλάβη λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κατασκευής και μπορεί να έχει σαν αφετηρία κάποια κατασκευαστική ατέλεια. Η βλάβη σε ένα σύνθετο υλικό έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή της εσωτερικής δομής του, που εκδηλώνεται με τη μορφή ρωγματώσεων στη ρητίνη, με την αποκόλληση ινών ρητίνης, με τη θραύση των ινών και με την αποκόλληση των στρώσεων.

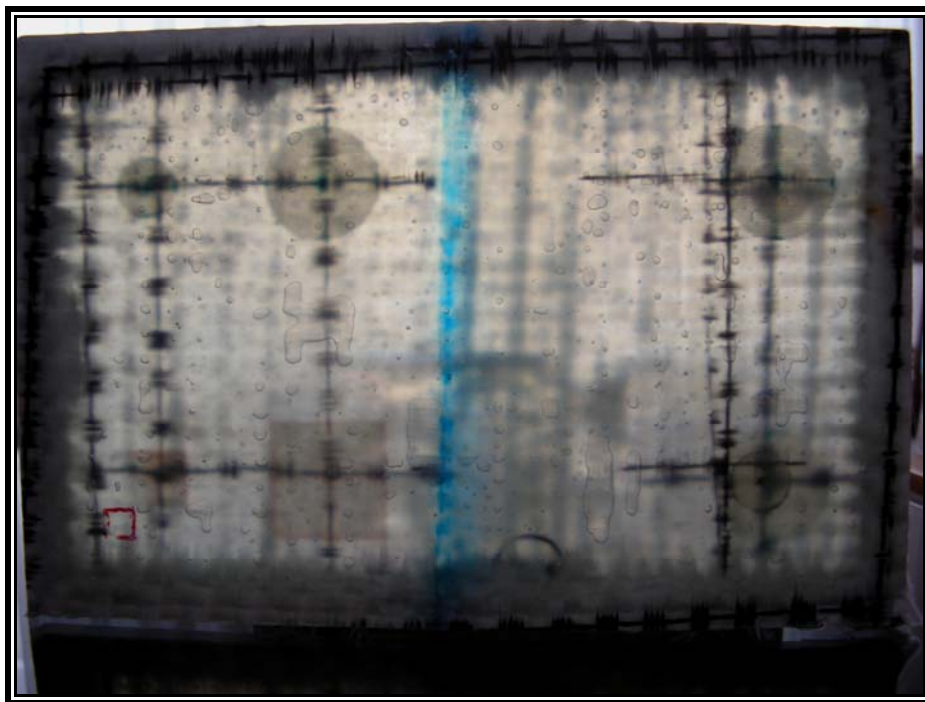
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μας απασχολήσουν οι ατέλειες που δημιουργούνται κατά την κατασκευή και οι βλάβες που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία πλωτών κατασκευών από σύνθετα υλικά. Παρακάτω γίνεται αναφορά στις ατέλειες και στις βλάβες εκείνες, των οποίων η ύπαρξη ή η έκταση δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή με οπτική επιθεώρηση της κατασκευής, αλλά απαιτείται η χρήση μη καταστροφικών μεθόδων εξέτασης και συγκεκριμένα υπερηχητικού ελέγχου.

Οι ατέλειες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες Åström (1997) [1].

- Ατέλειες στη δομή του σύνθετου υλικού, που επηρεάζουν την αντοχή και τις μηχανικές ιδιότητές του. Ο τύπος των ατελειών αυτών είναι ο πιο ανεπιθύμητος.
- Γεωμετρικές ατέλειες. Για παράδειγμα αποκλίσεις από συγκεκριμένο πάχος, κυματοειδείς επιφάνειες.
- Αισθητικές ατέλειες που επηρεάζουν την εξωτερική εμφάνιση μιας κατασκευής, αλλά που δεν επηρεάζουν την λειτουργία της.

Οι ατέλειες που αναφέρονται παρακάτω ανήκουν στις δύο πρώτες κατηγορίες και είναι:

- **Φυσαλίδες αέρα εγκλωβισμένες στη μήτρα (voids).** Όλα τα σύνθετα υλικά, ανεξάρτητα από τα συστατικά τους και τη μέθοδο κατασκευής τους, περιέχουν μικροσκοπικά κενά-φυσαλίδες (Σχήμα 1.8). Αυτά περιέχουν αέρα ή άλλα αέρια, τα οποία εγκλωβίζονται μέσα στο πολύστρωτο κατά την κατασκευαστική διαδικασία. Η κατασκευαστική διαδικασία καθορίζει την περιεκτικότητα σε φυσαλίδες ενός πολύστρωτου υλικού. Υπάρχουν κατασκευαστικές μέθοδοι που τα παραγόμενα πολύστρωτα έχουν μικρή περιεκτικότητα σε κενά-φυσαλίδες, όπως η μέθοδος της αναρρόφησης ρητίνης με κενό (vacuum infusion) και άλλες που δεν είναι ικανές να περιορίσουν το φαινόμενο. Για παράδειγμα στη μέθοδο hand lay up τα κενά-φυσαλίδες είναι σίγουρο ότι θα υπάρχουν, απλώς γίνεται προσπάθεια με ειδικά ρολά να μειωθεί το μέγεθος και ο αριθμός τους. 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 σ' ένα σύνθετο υλικό είναι από 1-5%.



Σχήμα 1.8 : Φυσαλίδες εγκλωβισμένες μεταξύ των στρώσεων.

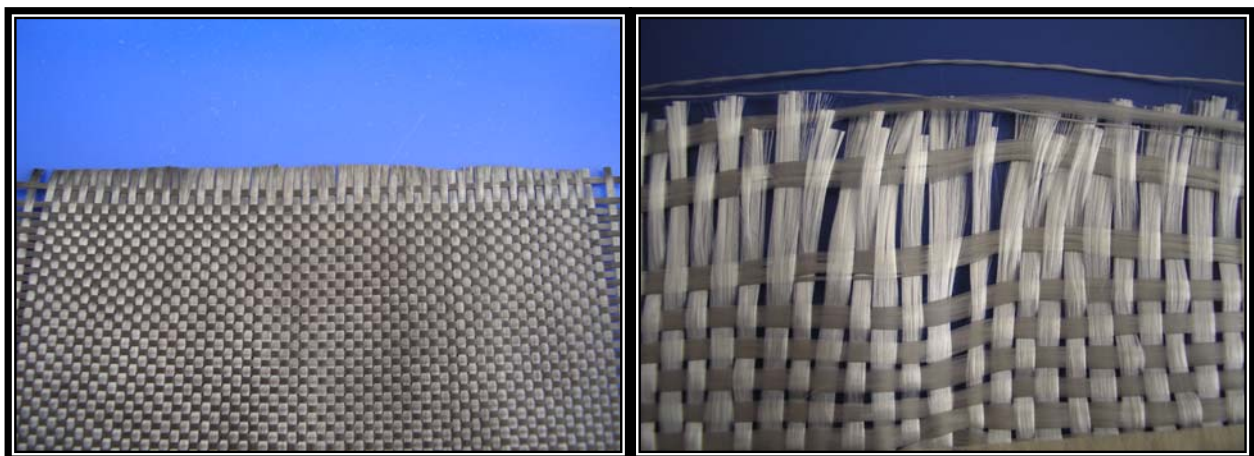
- **Πτυχώσεις των στρώσεων (wrinkles)[2].** Οι πτυχώσεις είναι κατασκευαστικές ατέλειες, οι οποίες μπορούν να δημιουργηθούν τόσο σε πολύστρωτες κατασκευές όσο και σε κατασκευές sandwich. Συνήθως δημιουργούνται από κακή τοποθέτηση και επεξεργασία των στρώσεων. Υπάρχουν δύο είδη πτυχώσεων. Το πρώτο είδος δημιουργείται από στρώσεις που έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με την επιφάνεια που θα τοποθετηθούν, με αποτέλεσμα το τσάκισμα του υφάσματος της στρώσης και τη δημιουργία της πτύχωσης. Το δεύτερο είδος πτύχωσης δημιουργείται από στρώσεις μικρότερων διαστάσεων, που δεν είναι ικανές να

καλύψουν την επιφάνεια στην οποία θα τοποθετηθούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι επόμενες στρώσεις να γεφυρώνουν το κενό και έτσι να δημιουργείται μια πτύχωση προς το εσωτερικό της κατασκευής[3]. 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 (Σχήμα 1.9). Οι πτυχώσεις είναι ικανές να ελαττώσουν σημαντικά την αντοχή ενός πολυστρωτου, ανάλογα με τον αριθμό των στρώσεων που επηρεάζουν.



Σχήμα 1.9 : Πτύχωση σε κατασκευή sandwich που επηρεάζει μια αλλά και περισσότερες στρώσεις.

- **Ατέλειες-ελαττώματα ενισχυτικών ινών (fiber reinforcement defects).** Στα περισσότερα είδη ενίσχυσης, η ύφανση είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη και δεκτική σε ελαττώματα που προκαλούνται κατά την επεξεργασία των υφασμάτων και πριν τον εμποτισμό τους με ρητίνη. Με τον όρο επεξεργασία εννοούμε οποιαδήποτε μετατροπή των υφασμάτων από την μορφή των ρολών στο επιθυμητό σχήμα, καθώς και οποιαδήποτε μετακίνηση ή απόθεση μέχρι την τοποθέτησή τους για εμποτισμό με ρητίνη.

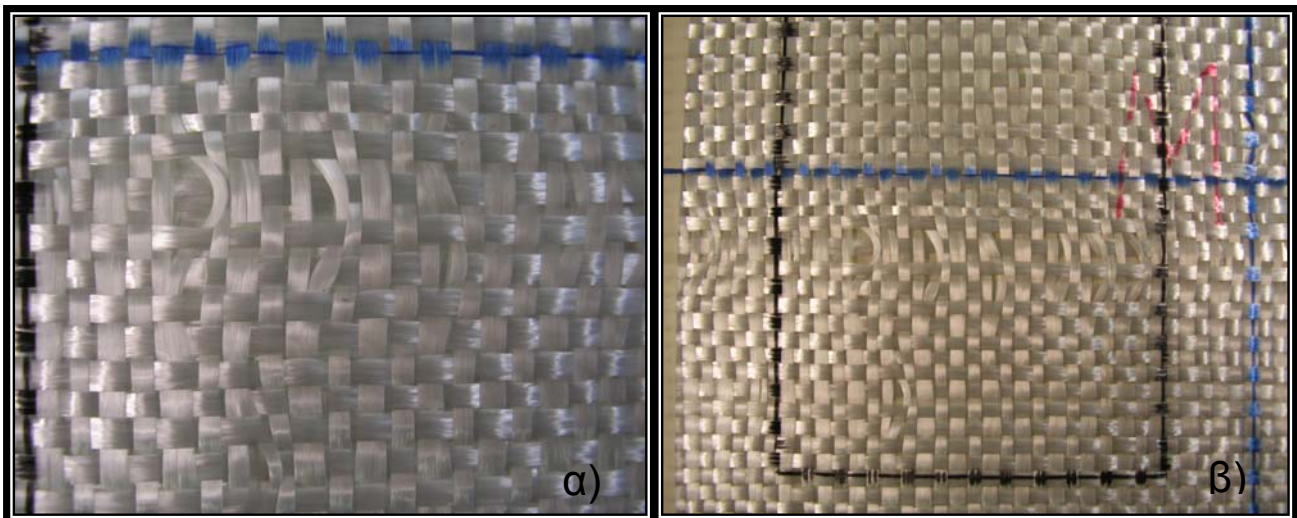


Σχήμα 1.10 : Ξέφτισμα στρώσεων woven roving υφασμάτων.

Αναλυτικότερα, στις περισσότερες περιπτώσεις τα υφάσματα πρέπει να κοπούν σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Κατά την κοπή παρατηρείται το ξέφτισμα των νημάτων στις άκρες

των υφασμάτων (Σχήμα 1.10), φαινόμενο που εμφανίζεται ιδιαίτερα στα woven roving υφάσματα και οδηγεί σε μεταβλητά πάχη και μείωση της αντοχής στις ακμές της κατασκευής.

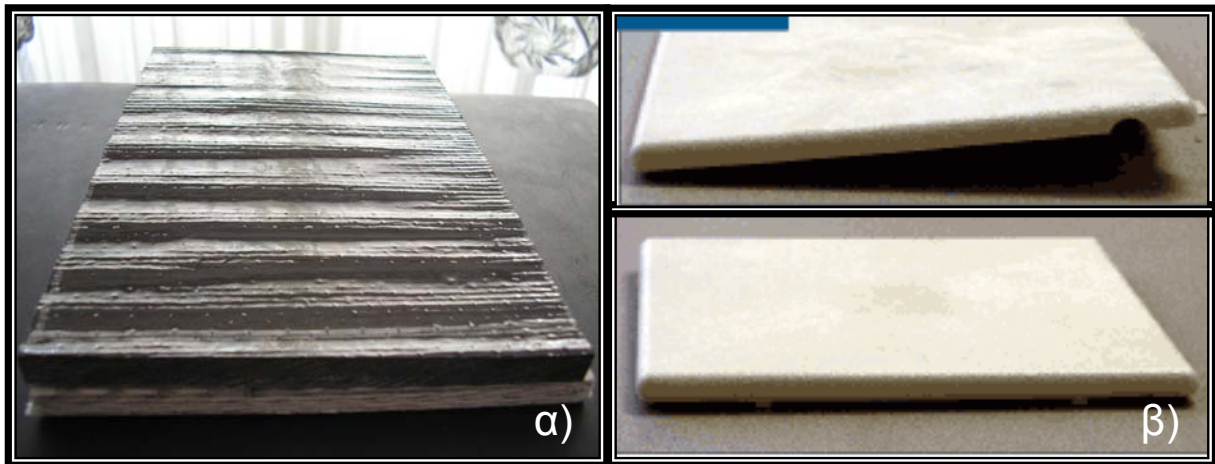
Επίσης, κατά τη διάρκεια της κοπής, της μεταφοράς και της γενικότερης επεξεργασίας, οποιαδήποτε επαφή των υφασμάτων με αιχμηρά αντικείμενα ή αιχμηρές επιφάνειες, προκαλεί διαταραχή της πλέξης, η οποία μπορεί να έχει την μορφή της καταστροφής των ινών ή την απόκλιση των νημάτων από την προκαθορισμένη διεύθυνση τους (Σχήμα 1.11), με αποτέλεσμα την εισαγωγή ελαττωμάτων-ατελειών στην πολύστρωτη κατασκευή, που μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή της. Τέλος, αυτής της μορφής ατέλειες(ξέφτισμα, διαταραχή της πλέξης, μετακίνηση νημάτων) μπορούν να εισαχθούν σε μια πολύστρωτη κατασκευή και κατά τον εμποτισμό των στρώσεων με ρητίνη στη μέθοδο hand lay-up, από τη χρήση των ρολών εμποτισμού, όταν ασκείται υπερβολική πίεση με το ρολό στις στρώσεις και όταν το ρολό κινείται με μεγάλη ταχύτητα πάνω στις στρώσεις.



Σχήμα 1.11 : α) Διαταραχή της πλέξης από επαφή με αντικείμενο β) Διαταραχή της πλέξης λόγω κακής αποθήκευσης.

- **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 (Σχήμα 1.12). 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 έχουν σαν γενεσιουργό αιτία τις θερμικές τάσεις, που αναπτύσσονται κατά την στερεοποίηση και συρρίκνωση της ρητίνης. Οι ατέλειες αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της ικανότητας της σύνθετης κατασκευής να αναλαμβάνει φορτία και ιδιαίτερα στην περίπτωση των πλακών, είναι πιθανόν να προκληθεί αστοχία από λυγισμό, όταν υποβάλλονται σε επίπεδη

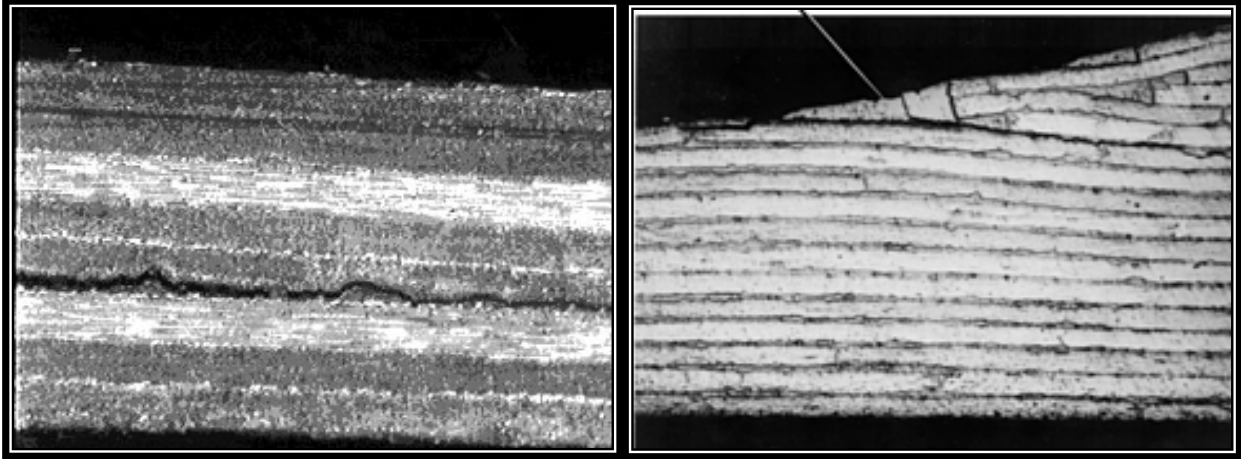
θλίψη ή διάτμηση. Επιπροσθέτως, οι γεωμετρικές ατέλειες προκαλούν προβλήματα συμβατότητας, όταν η σύνθετη κατασκευή πρέπει να συναρμολογηθεί ως τμήμα ενός μεγαλύτερου συνόλου. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι οι γεωμετρικές ατέλειες είναι πρακτικά αδύνατον να εξαλειφθούν, μπορεί όμως να μειωθεί ο αντίκτυπος της ύπαρξής τους, εάν είναι γνωστά τα αίτια δημιουργίας τους, ώστε να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό μιας σύνθετης κατασκευής.



Σχήμα 1.12 : α) Δοκίμιο με κυματοειδή επιφάνεια β) Δοκίμιο που έχει στρεβλώσει.

- **Αποκολλήσεις στρώσεων (delaminations)[2].** Ορίζεται ο αποχωρισμός των στρώσεων ενός πολυστρωτού σύνθετου υλικού, λόγω της αστοχίας του εσωτερικού δεσμού μεταξύ της ρητίνης και των ενισχυτικών υφασμάτων ανάμεσα στις στρώσεις (Σχήμα 1.13)[4]. Η αποκόλληση των στρώσεων μπορεί να λάβει χώρα είτε κατά την κατασκευαστική διαδικασία, είτε κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας πολυστρωτής κατασκευής, δηλαδή είναι και κατασκευαστική ατέλεια και βλάβη των σύνθετων υλικών. 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 που μπορεί να δημιουργήσει την αποκόλληση των στρώσεων, είναι η συρρίκνωση της ρητίνης κατά τον πολυμερισμό της. Κατά τη συρρίκνωση της ρητίνης δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα την 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, εξαρτάται από το είδος της ρητίνης (πολυεστερικές ρητίνες συρρικνώνονται περισσότερο από τις εποξικές). Η σοβαρότητα της ατέλειας αυτής εξαρτάται από το μέγεθός της και από τη θέση της, ως προς το πάχος της πολυστρωτής κατασκευής. Οι αποκολλήσεις των στρώσεων δείχνουν την προτίμηση να εκδηλώνονται μεταξύ στρώσεων που έχουν μεγάλες διαφορές στη γωνία μεταξύ των ινών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι αποκολλήσεις των στρώσεων δεν γίνονται αντιληπτές με οπτική επιθεώρηση, κατά τα αρχικά

στάδια δημιουργίας τους, παρά μόνο όταν αποκτήσουν αρκετά μεγάλο μέγεθος. Οι αποκολλήσεις των στρώσεων θα μας απασχολήσουν ξανά, όταν θα αναφερθούμε στις βλάβες των σύνθετων υλικών.



Σχήμα 1.13 : Αποκολλήσεις στρώσεων σε σύνθετα υλικά.

- «Ξερές ζώνες» (*Dry zones-spots*)[2]. Είναι περιοχές του πολύστρωτου, όπου οι ενισχυτικές στρώσεις δεν έχουν πλήρως εμποτιστεί με ρητίνη, δηλαδή στις περιοχές αυτές η περιεκτικότητα σε ρητίνη είναι λιγότερη από αυτή που απαιτείται (Σχήμα 1.14). Οι ξερές περιοχές, ως ατέλεια, εμφανίζεται τόσο στις τεχνικές όπου ο εμποτισμός των ενισχυτικών στρώσεων γίνεται χειροκίνητα (*hand lay-up*), όσο και στις τεχνικές όπου έχουμε έγχυση (RTM) ή αναρρόφηση (VARTM) της ρητίνης.



Σχήμα 1.14 : Γάστρα σκάφους αναψυχής με ξερές περιοχές.

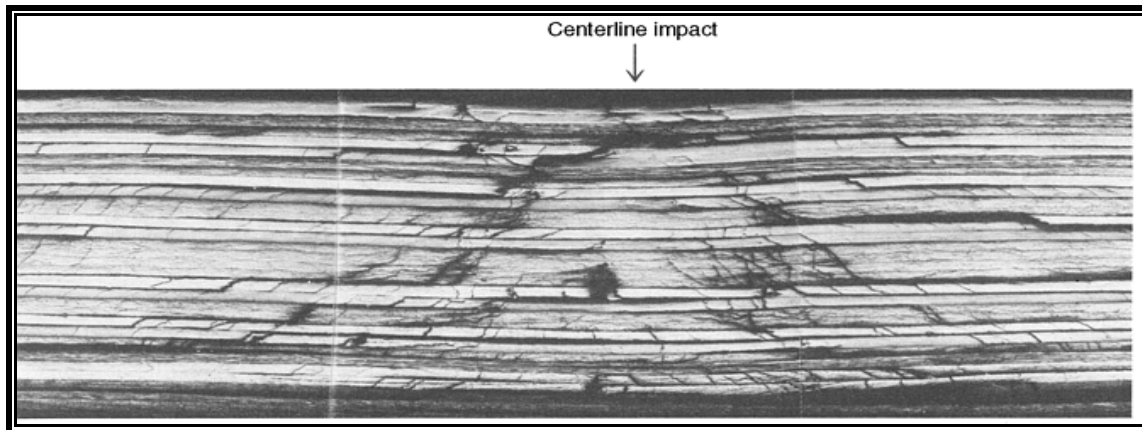
Στο χειροκίνητο εμποτισμό η συγκεκριμένη ατέλεια δημιουργείται όταν γίνεται προσπάθεια να εμποτιστούν ταυτόχρονα περισσότερες από μία στρώσεις ενισχυτικών υφασμάτων, καθώς και όταν γίνεται εμποτισμός υφασμάτων μεγάλου βάρους ($>1200\text{g/m}^2$). Επιπλέον, η παραπάνω

ατέλεια εμφανίζεται όταν πρέπει να εμποτιστούν μεγάλες κάθετες επιφάνειες σε συνδυασμό με ρητίνες χαμηλής ρευστότητας. Τότε οι ρητίνες ρέουν με αποτέλεσμα το στέγνωμα των ενισχυτικών στρώσεων. Στην περίπτωση των τεχνικών κατασκευής, στις οποίες γίνεται έγχυση ή αναρρόφηση της ρητίνης, οι ξερές περιοχές σχηματίζονται όταν η ρητίνη, κατά την προσπάθειά της να εμποτίσει το πολύστρωτο, εγκλωβίσει περιοχές ενίσχυσης που δεν είναι συνδεδεμένες με γραμμή αναρρόφησης ή εξαγωγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παγιδευτεί αέρας στα συγκεκριμένα σημεία και να σχηματίζονται «ξερές ζώνες». Η παραπάνω ατέλεια μπορεί να σχηματιστεί και από άλλες αιτίες, οι οποίες πηγάζουν 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.

Οι βλάβες που συναντώνται συνήθως στις πλωτές κατασκευές από σύνθετα υλικά προέρχονται από επαφές, από κρούσεις, από υπερβολικά φορτία και από την επίδραση του περιβάλλοντος. Οι κυριότερες είναι η ρωγμάτωση της ρητίνης, το σπάσιμο των ινών, οι αποκολλήσεις των στρώσεων, οι φουσκάλες και συνδυασμός όλων των προηγούμενων, που μπορεί να οδηγήσει μέχρι και στην απόσχιση τμημάτων μιας πολύστρωτης κατασκευής. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, στο σημείο αυτό δεν θα εξεταστούν βλάβες σε σύνθετα υλικά που προξενούνται από περιβαλλοντικούς παράγοντες και μπορούν να διαγνωστούν με οπτική επιθεώρηση, αλλά βλάβες, η έκταση ή η ύπαρξη των οποίων δεν μπορεί να προσδιοριστεί με τον τρόπο αυτό, αλλά μόνο με τη χρήση μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου.

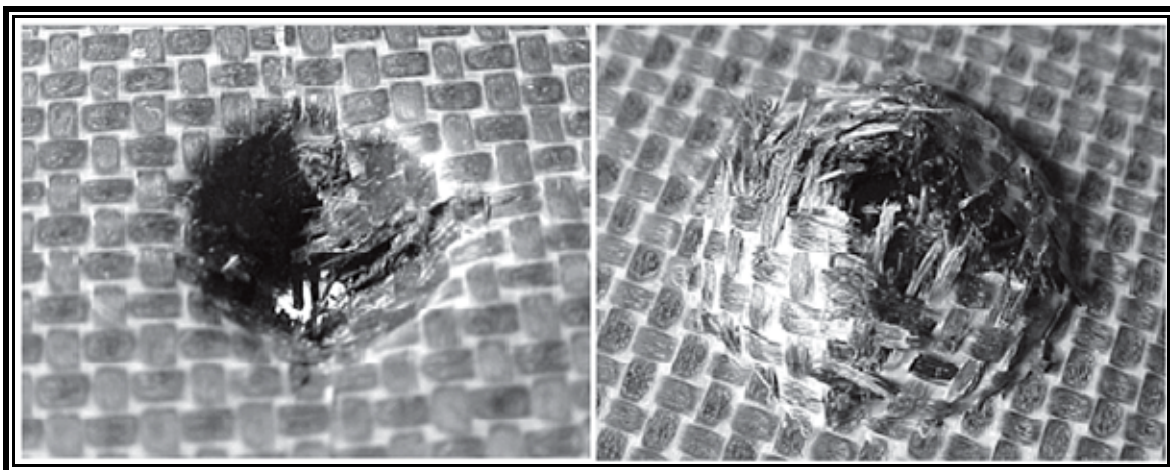
Οι επαφές μπορεί να είναι στατικές ή δυναμικές. Οι στατικές επαφές είναι συγκεντρωμένα φορτία που μπορούν να εφαρμοστούν στην γάστρα ενός σκάφους, από σύνθετα υλικά, ή σε άλλα τμήματα του κατά τον δεξαμενισμό, τη ρυμούλκηση ή την ανάρτησή του (στην περίπτωση που χρησιμοποιείται γερανός για την ανέλκυση-καθέλκυση) καθώς και από την τοποθέτηση ή μεταφορά βαρών και οδηγούν στην αποκόλληση των στρώσεων της πολύστρωτης κατασκευής.

Οι δυναμικές επαφές χαρακτηρίζονται ως κρούσεις και διακρίνονται σε χαμηλής ή υψηλής ενέργειας και σε διατρήσεις. Οι κρούσεις χαμηλής ενέργειας προκαλούν ρωγμές στη ρητίνη και αποκόλληση των στρώσεων χωρίς, όμως, να αφήνουν ορατά ίχνη στην επιφάνεια πρόσκρουσης (Σχήμα 1.15).



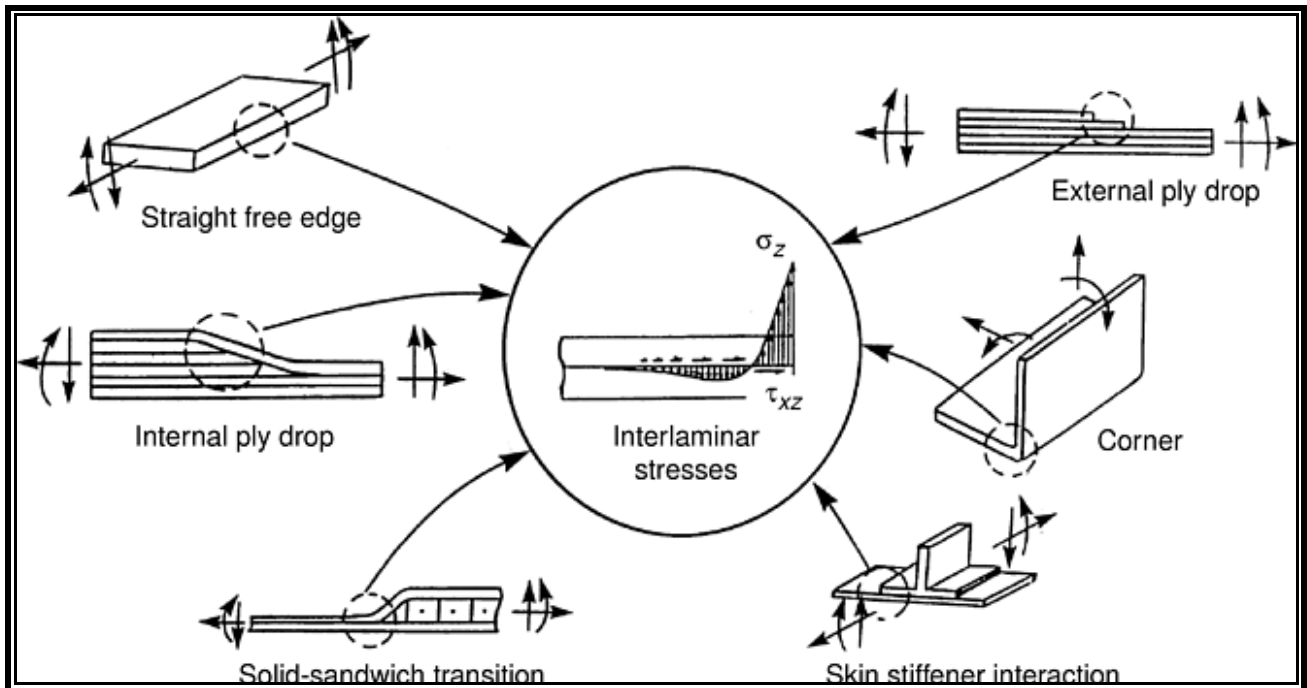
Σχήμα 1.15 : Διαγώνιες ρωγμές και αποκολλήσεις στρώσεων σε πολύστρωτο graphite/epoxy χωρίς εμφανείς αλλοιώσεις στην επιφάνεια πρόσκρουσης.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η βλάβη να μη γίνεται αντιληπτή. Έτσι αποκολλήσεις στρώσεων με μέγεθος που δεν είναι κρίσιμο για την ασφάλεια της κατασκευής μπορούν να εξελιχθούν με την επιβολή φορτίων. Οι κρούσεις υψηλής ενέργειας και οι διατρήσεις αφήνουν ορατά ίχνη στην επιφάνεια πρόσκρουσης και δημιουργούν ρωγμές στη ρητίνη, σπάσιμο των ινών και αποκόλληση των στρώσεων (Σχήμα 1.16). Το μέγεθος, όμως, της περιοχής που έχει επηρεαστεί δεν γίνεται αντιληπτό με οπτική επιθεώρηση.



Σχήμα 1.16 : Κρούση υψηλής ενέργειας 132 J σε πολύστρωτο δοκίμιο.

Αποκολλήσεις στρώσεων μπορούν να δημιουργηθούν και από την επιβολή φορτίων σε μια σύνθετη κατασκευή και μάλιστα σε περιοχές όπου αλλάζει η γεωμετρία μιας κατασκευής. Στις περιοχές αυτές μεγιστοποιούνται οι διαστρωματικές τάσεις και παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 1.17.



Σχήμα 1.17 : Περιοχές όπου εκδηλώνονται αποκολλήσεις στρώσεων σε σύνθετα υλικά.

Επιπλέον, αποκολλήσεις στρώσεων μπορούν να δημιουργηθούν και από κατεργασίες σε έτοιμες πολύστρωτες κατασκευές, όπως με την κοπή ή με τη δημιουργία οπών (Σχήμα 1.18). Για τον λόγο αυτό οι ταχύτητες περιστροφής των εργαλείων θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλες όσο μπορεί να αντέξει η ρητίνη, ώστε να μειώνονται οι κάθετες δυνάμεις στο πολύστρωτο.



Σχήμα 1.18 : Αποκόλληση στρώσεων κατά τη δημιουργία οπής.

Συνοψίζοντας, πρέπει να τονιστεί ότι οι αποκολλήσεις των στρώσεων συνδέονται με την ύπαρξη άλλων κατασκευαστικών ατελειών και, όπως διαφαίνεται από τα παραπάνω, είναι ίσως ο πιο

σημαντικός τύπος ατέλειας-βλάβης, που παρουσιάζεται στα σκάφη από σύνθετα υλικά. Η εξέλιξη των αποκολλήσεων μπορεί να απειλήσει την ακεραιότητα ενός σκάφους. Ενδεικτικό παράδειγμα της εξέλιξης των αποκολλήσεων στρώσεων είναι η αστοχία της γάστρας ενός Bertram SF 63'[3] που έλαβε χώρα το 2008 κατά τη διάρκεια ταξιδιού (Σχήμα 1.19).



Σχήμα 1.19 : Αποτέλεσμα της αποκόλλησης των στρώσεων σε γάστρα σκάφους αναψυχής.

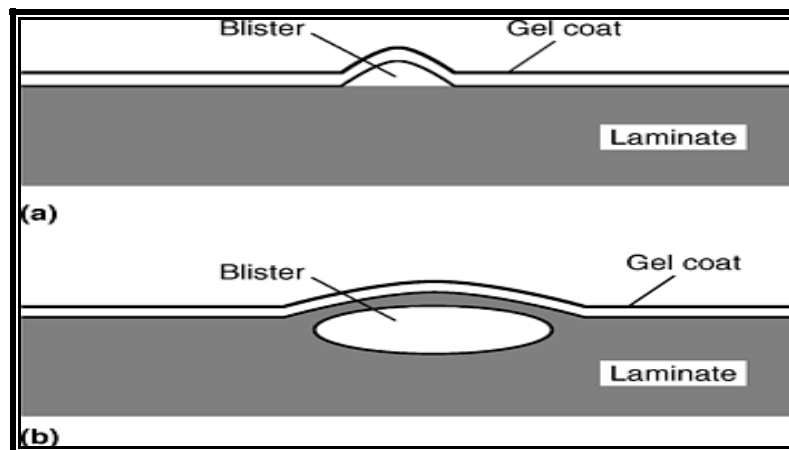
Το περιστατικό συνέβη με καλό καιρό και το σκάφος κατάφερε να γυρίσει σε λιμάνι χωρίς να βυθιστεί. Από το Σχήμα 1.19 φαίνεται ότι υπάρχουν αποκολλήσεις στρώσεων τόσο στο πολύστρωτο, που περιέργως αποτελείται μόνο από μονοδιευθύνοντα υφάσματα, όσο και μεταξύ του πολύστρωτου και του πυρήνα, καθώς η γάστρα είναι κατασκευή sandwich. Τα κομμάτια που έχουν αποσχιστεί είναι στρώσεις υαλοπιλήματος που έχουν τοποθετηθεί μεταξύ του πολύστρωτου και του gel coat και εδώ είναι φανερό ότι και αυτός ο δεσμός έχει καταρρεύσει. Το καταστροφικό αποτέλεσμα του παραπάνω σχήματος οφείλεται σε αποκολλήσεις στρώσεων που δεν εντοπίστηκαν και το μέγεθος τους αυξήθηκε. Οι αποκολλήσεις στρώσεων στα αρχικά τους στάδια δεν είναι εμφανείς με οπτική επιθεώρηση (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.20 : Αποκολλήσεις στρώσεων στην γάστρα ιστιοπλοϊκού μετά την απόξυση του gel coat και έλεγχο με μη καταστροφικές μεθόδους. Το περίγραμμα των αποκολλήσεων έχει σημειωθεί με κίτρινη κιμωλία.

Η ύπαρξη και το μέγεθος τους μπορεί να προσδιοριστεί μόνο με τη χρήση μη καταστροφικών μεθόδων όπως είναι οι υπέρηχοι και η θερμογραφία. Ιδιαίτερα με τη μέθοδο των υπερήχων, μπορούν να εντοπιστούν οι αποκολλήσεις, να προσδιοριστεί το μέγεθος τους αλλά και η θέση τους ως προς το πάχος του πολύστρωτου. Βέβαια πριν την επιθεώρηση με υπερήχους πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος κατασκευής του πολύστρωτου και να έχει καθοριστεί το μέγεθος των αποδεκτών αποκολλήσεων. Αυτό γιατί, οι γάστρες από σύνθετα υλικά έχουν υψηλά περιθώρια ανοχής σε ζημιά, λόγω του υψηλού συντελεστή ασφαλείας με τον οποίο σχεδιάζονται. Έτσι για παράδειγμα ο συντελεστής ασφαλείας για τα ναρκαλιευτικά σκάφη από σύνθετα υλικά είναι μεταξύ του 3 και του 6 πράγμα που επιτρέπει στη γάστρα να φέρει αποκόλληση τουλάχιστον 0.3 m σε μήκος χωρίς να επηρεάζονται οι ιδιότητες της [2].

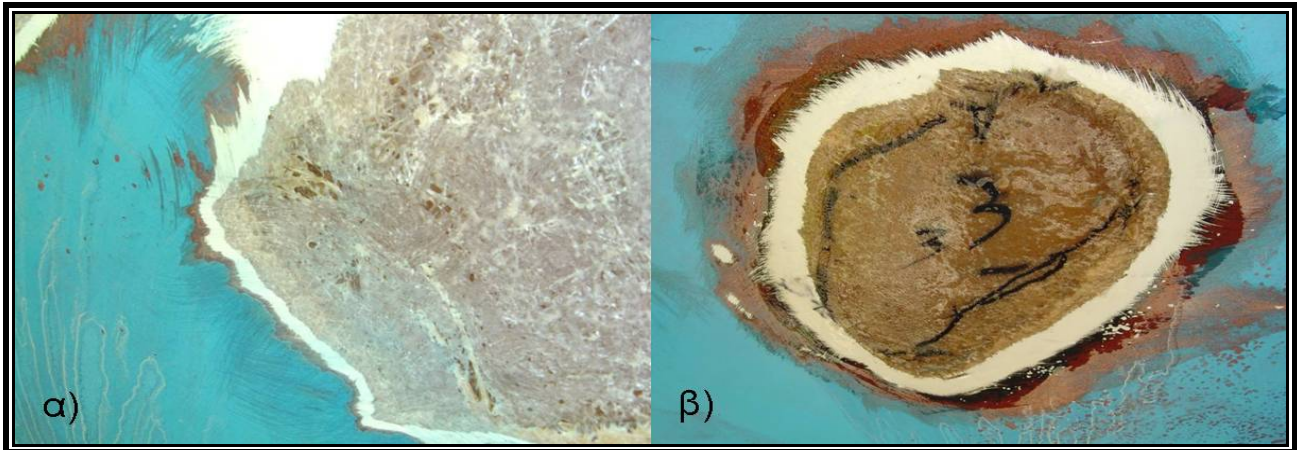
Μια ακόμα βλάβη που παρουσιάζεται στη γάστρα των σκαφών από σύνθετα υλικά είναι η δημιουργία φουσκάλων (blisters). Οι φουσκάλες παρουσιάζονται συνήθως στη γραμμή ένωσης του gel coat και του πολύστρωτου, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις λαμβάνουν χώρα και κάτω από αρκετές στρώσεις του πολύστρωτου (Σχήμα 1.21).



Σχήμα 1.21 : **a)**Φουσκάλα στην ένωση gel coat-πολύστρωτου **b)** φουσκάλα κάτω από στρώσεις του πολύστρωτου.

Οι φουσκάλες έχουν μέγεθος από 2 έως 50 mm (0.08 έως 2 in) σε διάμετρο και παρουσιάζουν ανύψωση της επιφάνειας του gel coat από 1 έως 3 mm [2]. Η δημιουργία τους οφείλεται σε ασυνέχειες του gel coat (πχ.πόροι) ή σε υδρόλυση του, που ακολουθείται από την απορρόφηση υγρασίας σύμφωνα με το φαινόμενο της όσμωσης. Συγκεκριμένα, η υγρασία διαπερνά το gel coat και φτάνει στο πολύστρωτο όπου η παρουσία υδρόφιλων υλικών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία όξινου διαλύματος με πυκνότητα υψηλότερη από αυτή του νερού. Το φαινόμενο της όσμωσης προσθέτει συνεχώς νέες ποσότητες νερού στο εσωτερικό της φουσκάλας με σκοπό της εξισορρόπηση των πυκνοτήτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της οσμωτικής πίεσης στο εσωτερικό της φουσκάλας και την αύξηση του μεγέθους της.

Υπάρχουν περιπτώσεις που σχηματίζονται μεγάλων διαστάσεων φουσκάλες (Σχήμα 1.22 β) και βρίσκονται κάτω από τη στρώση του mat υφάσματος. Στα περισσότερα σκάφη από σύνθετα υλικά, μεταξύ του gel coat και του πολύστρωτου παρεμβάλλεται μια στρώση chopped strand mat ώστε να μην αποτυπωθεί η πλέξη των υφασμάτων του πολύστρωτου στο gel coat. Η στρώση αυτή δημιουργεί τις προϋποθέσεις για τον σχηματισμό φουσκάλων στα σημεία που υπάρχουν κενά και στα σημεία που υπάρχει κακή διαβροχή από τη ρητίνη (Σχήμα 1.22 α).



Σχήμα 1.22 : α) Γάστρα σκάφους αναψυχής που μετά την αφαίρεση του gel coat αποκαλύπτονται κενά και σημεία που δεν έχουν εμποτιστεί με ρητίνη. β) Στη γάστρα του ίδιου σκάφους φουσκάλα μεγάλου μεγέθους.

Οι φουσκάλες μεγάλου μεγέθους μπορούν να επηρεάσουν το πολύστρωτο και να δημιουργηθούν αποκολλήσεις στρώσεων. Για το λόγο αυτό η χρήση μη καταστροφικών μεθόδων για τον προσδιορισμό των ορίων μεγάλων φουσκάλων αλλά και για τον εντοπισμό φουσκάλων μικρού μεγέθους είναι απαραίτητη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

2.1 Εισαγωγή στο Μη Καταστροφικό Έλεγχο

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 [4]. 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. Διάφοροι παράγοντες συνέβαλαν, ώστε να καθιερωθεί ως έλεγχος και να πάρει τη μορφή που έχει σήμερα.

Στη σημερινή εποχή παρατηρείται αύξηση στη ζήτηση για ταχύτερες μεταφορές. Οι μεταφορές αυτές μπορεί να είναι ανθρώπων, αγαθών ή πληροφοριών. Η ανάγκη για μεγαλύτερες ταχύτητες οδήγησε στο σχεδιασμό κατασκευών οι οποίες, χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα, από αυξημένη αντοχή σε καταπονήσεις, από μεγαλύτερη ασφάλεια και από υψηλό κόστος. Κάθε ένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνέβαλε καθοριστικά στην ανάδειξη του μη καταστροφικού ελέγχου ως τη διαδικασία, που μπορεί να εξασφαλίσει, την υπηρεσιακή αξιοπιστία και την ασφάλεια των κατασκευών.

Καθώς οι απαιτήσεις στην απόδοση των κατασκευών αυξάνονται, συγχρόνως δημιουργείται η ανάγκη για υψηλότερης ποιότητας πρωτογενή υλικά. Στο σημείο αυτό ο μη καταστροφικός έλεγχος καλείται να καθορίσει πρότυπα ποιότητας και με τη χρήση των μεθόδων του, τελικά να πιστοποιηθεί η ποιότητα των υλικών.

Καίριας σημασίας είναι η συμβολή του μη καταστροφικού ελέγχου στην ασφάλεια των κατασκευών. Σήμερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, δεν περιορίζεται απλά στον εντοπισμό των ελαττωμάτων-βλαβών, αλλά δίνει και ποσοτικοποιημένες μετρήσεις. Μπορεί, δηλαδή, όχι μόνο να εντοπίσει τα ελαττώματα-βλάβες, 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 ζώων και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος που μπορεί να επιφέρει μια αστοχία υλικού σε μια κατασκευή. Το κόστος αυτό αυξάνεται συνεχώς, καθώς οι κατασκευές είναι πολυπλοκότερες και αποτελούνται από περισσότερα υποσυστήματα. Η αστοχία ενός υποσυστήματος μπορεί να συμπαρασύρει και άλλα συστήματα, μεγαλύτερης ίσως αξίας, αλλά και ολόκληρη την κατασκευή.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, για να αξιοποιηθούν οι υπηρεσίες του μη καταστροφικού ελέγχου, οι κατασκευές θα πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να ελεγχθούν.

2.2 Επιλογή μεθόδου μη καταστροφικού ελέγχου

Ο μη καταστροφικός έλεγχος μπορεί να χωριστεί σε δύο διαδικασίες. Στη μη καταστροφική δοκιμή, στην οποία λαμβάνονται τα δεδομένα και στην εκτίμηση-αξιολόγηση των δεδομένων αυτών [5]. Το στάδιο της μη καταστροφικής δοκιμής είναι ύψιστης σημασίας, καθώς εκεί πρέπει να ληφθούν σημαντικές αποφάσεις, που θα επηρεάσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων και κατά συνέπεια την εκτίμηση-αξιολόγηση αυτών. Η πρώτη και σημαντικότερη απόφαση που πρέπει να ληφθεί είναι η επιλογή της κατάλληλης μη καταστροφικής μεθόδου ή του κατάλληλου συνδυασμού μεθόδων. Για να γίνει αυτό πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένη η εφαρμογή για την οποία εκτελείται ο μη καταστροφικός έλεγχος. Ενδεικτικά παρατίθενται οι παρακάτω εφαρμογές :

- Εντοπισμός βλαβών-ατελειών και εκτίμηση.
- Εντοπισμός διαρροών και εκτίμηση.
- Μετρολογία (μέτρηση διαστάσεων) και εκτίμηση.
- Χαρακτηρισμός της δομής ή της μικροδομής.
- Υπολογισμός των φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων.

Στην πρώτη περίπτωση του εντοπισμού βλαβών-ατελειών και εκτίμησης (flaw detection and evaluation), που είναι και το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, πρώτου επιλεγεί η κατάλληλη μη καταστροφική μέθοδος πρέπει να απαντηθούν τα ακόλουθα ερωτήματα:

- Ποιο είναι το είδος ή τα είδη των ατελειών, οι οποίες θα αναζητηθούν κατά τον έλεγχο του υλικού.
- Ποιο είναι το μέγεθος και ο προσανατολισμός των ατελειών, οι οποίες οδηγούν σε απόρριψη του υλικού.
- Ποια είναι η θέση, στην οποία αναμένεται να εντοπιστούν οι ατέλειες.
- Ποιο είναι το μέγεθος και το σχήμα του εξεταζόμενου υλικού.
- Ποια είναι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υλικού που θα εξεταστεί.

Αφού απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα θα πρέπει να προσδιοριστεί ο χρόνος που θα διεξαχθεί ο μη καταστροφικός έλεγχος, καθώς και αυτός καθορίζει την επιλογή της κατάλληλης μη καταστροφικής μεθόδου. Υπάρχουν τρεις χρονικές στιγμές που διεξάγεται ο μη καταστροφικός έλεγχος. Πρώτον, κατά τη φάση της κατασκευής, έτσι ώστε να προσδιοριστεί εάν ένα υλικό είναι δεκτό καθώς περνά από μια κατεργασία σε μια άλλη (in-process NDE or in-process inspection). Δεύτερον, ο μη καταστροφικός έλεγχος διεξάγεται στο τελικό προϊόν, ώστε να καθοριστεί εάν είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί (final NDE or final inspection). Τέλος, ο μη καταστροφικός έλεγχος μπορεί

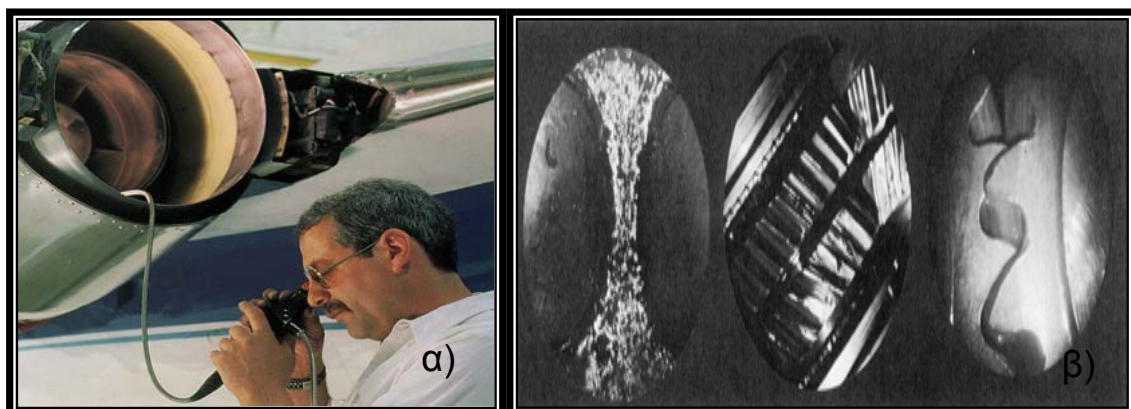
να γίνει κατά τη διάρκεια της χρήσης του προϊόντος, με σκοπό να καθοριστεί εάν είναι ικανό να συνεχίσει να λειτουργεί (in-service NDE or in-service inspection).

Από τη στιγμή που θα απαντηθούν όλα τα παραπάνω ερωτήματα και θα καθοριστεί πλήρως η εφαρμογή, επιλέγεται η μέθοδος ή ο συνδυασμός μεθόδων, που θα δώσουν αξιόπιστα δεδομένα.

2.3 Μέθοδοι μη καταστροφικού έλεγχου

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

- **Οπτική επιθεώρηση (visual inspection)** : Είναι μια μη καταστροφική μέθοδος, η οποία παρέχει τα μέσα για τον έλεγχο επιφανειακών ατελειών-βλαβών, όπως είναι η διάβρωση, οι ρωγμές και άλλες επιφανειακές ασυνέχειες. Η οπτική επιθεώρηση είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στον εντοπισμό και στην εξέταση επιφανειακών ρωγμών. Μπορεί να γίνει με γυμνό οφθαλμό ή με τη χρήση μεγάλης ποικιλίας οπτικού εξοπλισμού. Μεγάλη συνεισφορά έχει στο μη καταστροφικό έλεγχο δυσπρόσιτων σημείων στο εσωτερικό κατασκευών (εσωτερικό κινητήρων) Σχήμα 2.1α) με τη 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.



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

Τέλος, αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι σε όλες τις μη καταστροφικές μεθόδους που χρησιμοποιούν κάποιο σύστημα γραφικής αναπαράστασης των υλικών που εξετάζονται, οι

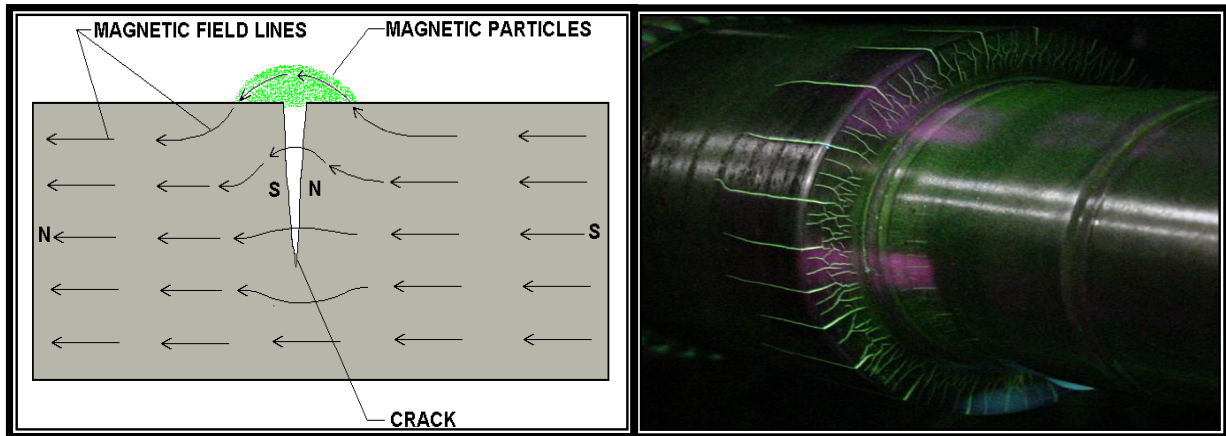
τελικές αποφάσεις και εκτιμήσεις γίνονται με οπτική επιθεώρηση των εικόνων αυτών. Έτσι για παράδειγμα στη μέθοδο των υπερήχων όλες οι απεικονίσεις (A-scan, B-scan,C-scan) επιθεωρούνται οπτικά για τη λήψη αποφάσεων.

- Η μέθοδος των δεισδυτικών υγρών (*liquid penetrant inspection*) [5] [6] : Στη μέθοδο αυτή, η επιφάνεια που βρίσκεται υπό έλεγχο ψεκάζεται με υγρό διάλυμα, το οποίο αφήνεται να εμποτίσει τις διάφορες ατέλειες που καταλήγουν στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, η επιφάνεια ψεκάζεται με υγρό ή στερεό εμφανιστή, με την ιδιότητα να εμφανίσει το δεισδυτικό 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 δεισδυτικά υγρά και η επιθεώρηση γίνεται σε υπεριώδες φως.



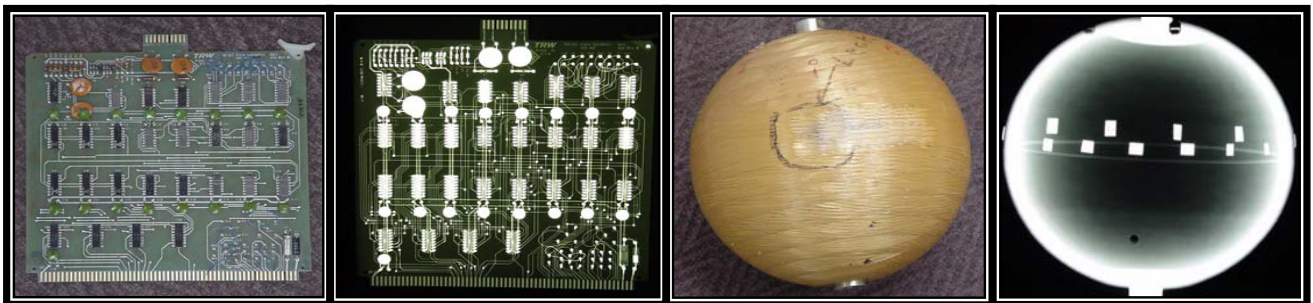
Σχήμα 2.2 : Τα τρία στάδια της μεθόδου των δεισδυτικών υγρών

- Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων (*magnetic particle inspection*). Η μέθοδος των μαγνητικών σωματιδίων είναι μια μη καταστροφική μέθοδος ανίχνευσης, εντοπισμού και κατά προσέγγιση προσδιορισμού επιφανειακών, ή κοντά στην επιφάνεια, ατελειών, σε υλικά που μπορούν να μαγνητιστούν (φερρομαγνητικά). 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 (Σχήμα 2.3). Η απόκλιση αυτή, και κατά συνέπεια 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.

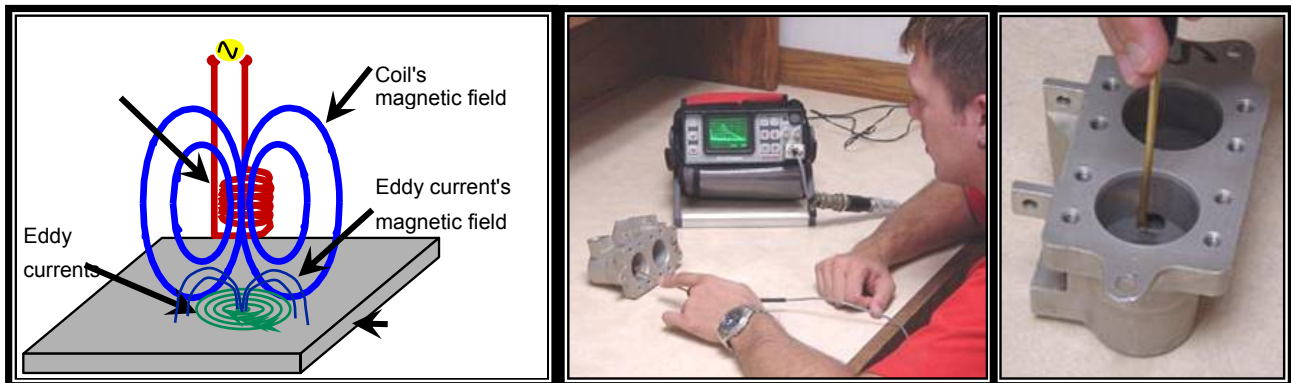
- *Ραδιογραφικές μέθοδοι (radiographic methods)* : Με τον όρο αυτό περιγράφονται οι μέθοδοι εξέτασης υλικών που βασίζονται στην απορρόφηση ακτινοβολίας, είτε αυτή είναι ηλεκτρομαγνητική είτε είναι πυρηνική. Το υπό εξέταση υλικό τοποθετείται μεταξύ της πηγής ακτινοβολίας και του μέσου αποτύπωσης. Η ύπαρξη 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 τον τρόπο αυτό, μπορούν να ανιχνευθούν ατέλειες (πχ ρωγμές) και να καθοριστεί το μέγεθος τους. Η θέση των ατελειών αυτών, όμως, δεν μπορεί να προσδιοριστεί ακριβώς μέσα στον όγκο του υλικού. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται περισσότερες από μια λήψεις.



Σχήμα 2.4 : Αποτυπώσεις με τη χρήση ραδιογραφικών μεθόδων.

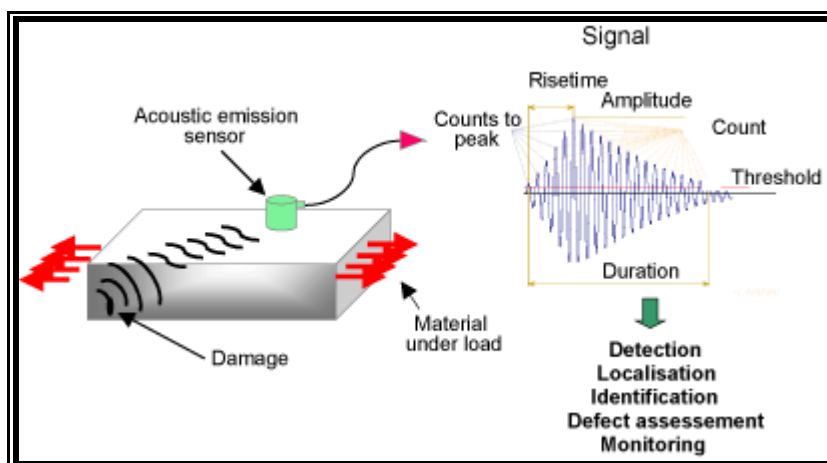
- *Η μέθοδος των δινορευμάτων (eddy currents)* [5][6] : Είναι μια σημαντική και ευρύτατα διαδεδομένη μη καταστροφική μέθοδος υπολογισμού και ελέγχου μεταλλικών υλικών. Τα δινορεύματα παράγονται σε ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό όταν αυτό υποβάλλεται σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο παράγεται γύρω από ένα πηνίο, παράγει εναλλασσόμενο δινόρευμα στο αγώγιμο υλικό και στη συνέχεια το δινόρευμα παράγει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιάσσεται και τροποποιεί το αρχικό του πηνίου (Σχήμα 2.5). 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.



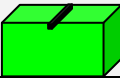
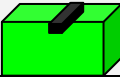
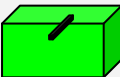
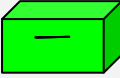
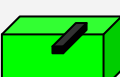
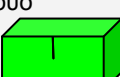

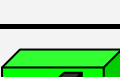
Σχήμα 2.5 : Η μέθοδος των δινορευμάτων και η αρχή λειτουργίας της

- *Η ακουστική εκπομπή (acoustic emission)* : Οι ακουστικές εκπομπές είναι ηχητικά κύματα, τα οποία παράγονται κατά την απότομη φόρτιση ή αποφόρτιση υλικών, με μηχανικά ή θερμικά φορτία. Οι πηγές των ακουστικών εκπομπών είναι οι πλαστικές παραμορφώσεις των υλικών, που συνδέονται με μηχανισμούς εξέλιξης ατελειών, όπως είναι η διάδοση ρωγμών. Όταν απότομες μετατοπίσεις συμβαίνουν στις πηγές αυτές, παράγονται ηχητικά κύματα, που διαδίδονται σ' όλη την κατασκευή και διεγείρουν μια πιεζοηλεκτρική κεφαλή (Σχήμα 2.6). Στη συνέχεια τα δεδομένα συλλέγονται και ακολουθεί ανάλυση και επεξεργασία. 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.



Σχήμα 2.6 : Η μέθοδος της ακουστικής εκπομπής

- Η μέθοδος των υπερήχων (*ultrasonic testing*) : Είναι μια μη καταστροφική μέθοδος κατά την οποία, υψηλής συχνότητας ηχητικά κύματα εισάγονται σε υλικά με σκοπό την ανίχνευση επιφανειακών ή εσωτερικών ατελειών, τον προσδιορισμό ορισμένων μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας E, μέτρο διάτμησης G, λόγος του Poisson κ.α.) και τη μέτρηση του πάχους. Τα κύματα αυτά κατά τη διάδοσή τους μέσα στα υλικά χάνουν μέρος της ενέργειάς τους και ανακλώνται όταν προσπίπτουν σε διεπιφάνειες. Στη συνέχεια καταγράφονται από ειδικές συσκευές και αναλύονται. Με αυτό τον τρόπο, καθορίζεται η ύπαρξη ατελειών και υπολογίζεται η θέση και το σχήμα τους. Παράλληλα, από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων αυτών υπολογίζονται οι παραπάνω μηχανικές ιδιότητες.

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 2.7 : Μη καταστροφικές μέθοδοι και η ικανότητά τους στην ανίχνευση ατελειών-βλαβών.

Η μέθοδος αυτή, συγκρινόμενη με τις προαναφερθείσες, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. 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 2.7 παρουσιάζεται η ικανότητα όλων των προαναφερθέντων μεθόδων μη καταστροφικού ελέγχου στην ανίχνευση και εντοπισμό διάφορων τύπων ατελειών-βλαβών.

Φαίνεται ότι η μέθοδος των υπερήχων έχει την ικανότητα να δώσει απαντήσεις σε όλους τους τύπους ατελειών-βλαβών. Ειδικότερα, 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.

Στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσεται αναλυτικά 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με υπερήχους χρησιμοποιεί ελαστικά μηχανικά κύματα για τον έλεγχο των υλικών. Συνήθως χρησιμοποιείται μια κατευθυνόμενη δέσμη μηχανικών ελαστικών κυμάτων υψηλής συχνότητας μεταξύ 20kHz και 20MHz. Η χρήση των υπερηχητικών κυμάτων οφείλεται κυρίως στην ιδιότητα τους να διεισδύουν στο εσωτερικό των υλικών, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα καταγραφής του και παράστασης του γραφικά. Τα υπερηχητικά κύματα διέπονται από τους νόμους της ακουστικής και περιγράφονται από τα ίδια μεγέθη με τα ηχητικά κύματα. Τα μεγέθη αυτά είναι :

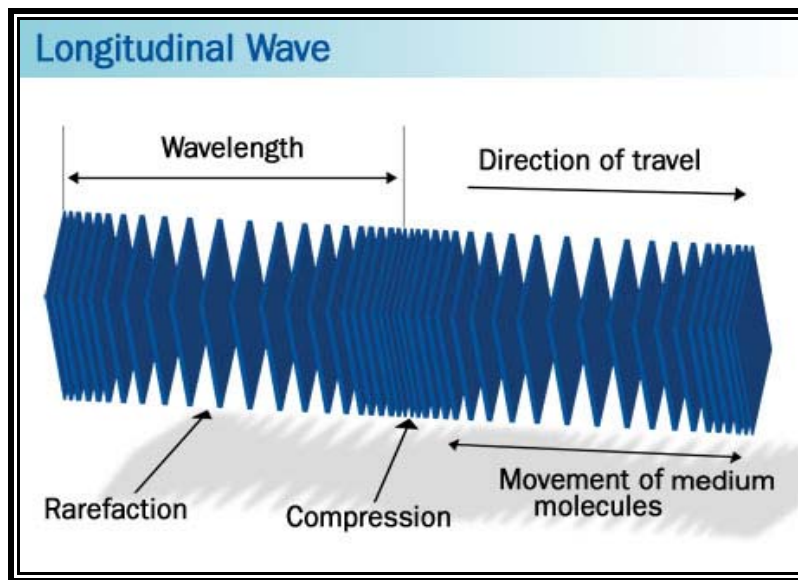
- Η συχνότητα (frequency) f : ορίζεται ως ο αριθμός των ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου. Η μονάδα συχνότητας είναι το Hz.
- Το μήκος κύματος (wavelength) λ : είναι η απόσταση, προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, δύο γειτονικών σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση. Το μήκος κύματος δίνεται από 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 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 του Lamb, και τα επιφανειακά κύματα (surface waves), τα οποία χρησιμοποιούνται, επίσης, στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών

3.2.1 Διαμήκη υπερηχητικά κύματα

Τα διαμήκη υπερηχητικά κύματα, ή κύματα πίεσεως, είναι ο τύπος κυμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως στην εξέταση των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαδίδονται και στις τρεις μορφές ύλης. Στα διαμήκη κύματα, η διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η διεύθυνση ταλάντωσης των δομικών σωματιδίων συμπίπτουν Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 : Διαμήκη κύματα.

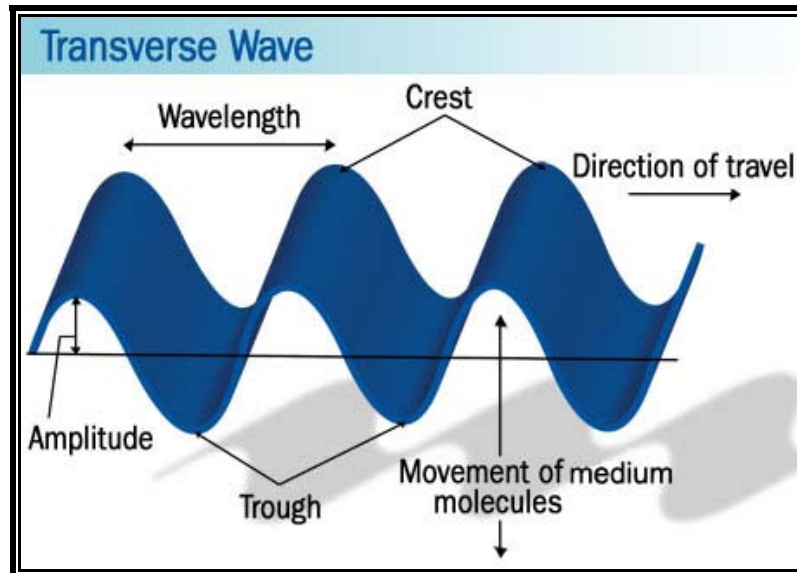
Το χαρακτηριστικό των διαμήκων κυμάτων είναι ότι δημιουργούνται στα δομικά σωματίδια του μέσου διάδοσης, πυκνώσεις (compressions) και αραιώσεις (rarefactions). Το μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυκνώσεων ή αραιώσεων ή διαφορετικά η απόσταση μεταξύ δύο επιπέδων, στα οποία τα δομικά σωματίδια βρίσκονται στην ίδια κατάσταση κίνησης.

3.2.2 Εγκάρσια υπερηχητικά κύματα

Στα εγκάρσια κύματα, η διεύθυνση ταλάντωσης των στοιχειωδών σωματιδίων είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος Σχήμα 3.2. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο σε υλικά που μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις, γι' αυτό καλούνται και κύματα διάτμησης. Επομένως, δεν διαδίδονται στα υγρά και στα αέρια. Διαδίδονται σε ορισμένα παχύρρευστα υγρά, που παρουσιάζουν μεγάλη συνεκτικότητα [6]. Τα εγκάρσια κύματα παράγονται 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.

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

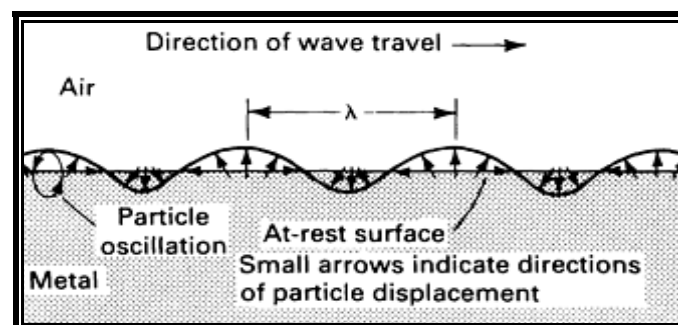
δύο διαδοχικών όρεων η κοιλάδων. Τα εγκάρσια κύματα εφαρμόζονται σε πολλές περιπτώσεις στο μη καταστροφικό έλεγχο και είναι απαραίτητα, κατά τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών ενός υλικού με τη μέθοδο των υπερήχων.



Σχήμα 3.2 : Εγκάρσια κύματα.

3.2.3 Επιφανειακά κύματα (Rayleigh waves)

Τα επιφανειακά κύματα είναι ένα άλλο είδος υπερηχητικών κυμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στον έλεγχο των υλικών. Διαδίδονται, στην επιφάνεια στερεών, με σχετικά μεγάλο πάχος. Στα επιφανειακά κύματα, τα δομικά σωματίδια συνδυάζουν την εγκάρσια και τη διαμήκη κίνηση, με αποτέλεσμα να κινούνται σε ελλειπτική τροχιά (Σχήμα 3.3) [5]. 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. Δεισδύουν μέσα στο στερεό υλικό, σε βάθος που είναι ίσο με ένα μήκος κύματος και έχουν την ιδιότητα να ακολουθούν το προφίλ της επιφάνειας στην οποία διαδίδονται.

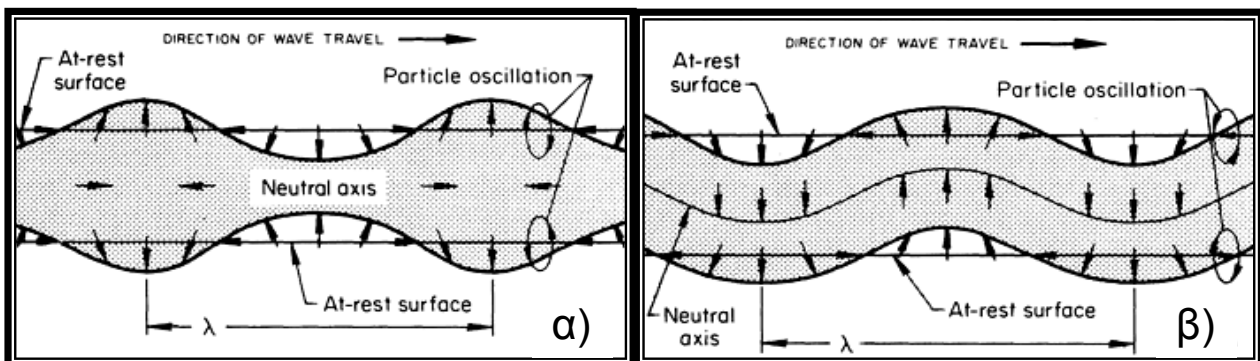


Σχήμα 3.3 : Επιφανειακά κύματα.

Για παράδειγμα, τα επιφανειακά κύματα θα διαδοθούν στην παράπλευρη επιφάνεια ενός κυλίνδρου και, αν δεν συναντήσουν κάποια ατέλεια, θα φτάσουν ξανά στο σημείο εισχώρησης. Τα κύματα Rayleigh είναι πολύ χρήσιμα στο μη καταστροφικό έλεγχο καθώς είναι πολύ ευαίσθητα στις επιφανειακές ατέλειες και ανακλώνται από απότομες αλλαγές στο προφίλ, όπως είναι οι ρωγμές. Τέλος, μπορούν να φτάσουν σε περιοχές που άλλα είδη κυμάτων συναντούν δυσκολία.

3.2.4 Κύματα πλακών ή κύματα του Lamb

Τα κύματα πλακών μοιάζουν με τα επιφανειακά κύματα. Παράγονται, όμως, σε πλάκες, των οποίων το πάχος είναι ίσο με μερικά μήκη κύματος και καταλαμβάνουν όλο το πάχος της πλάκας (Σχήμα 3.4). Η διάδοση τους εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, ενώ παράλληλα επηρεάζεται από τη συχνότητα του κύματος και το πάχος της πλάκας. Υπάρχουν δύο τύποι κυμάτων πλακών, που ορίζονται από το είδος της κίνηση 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).



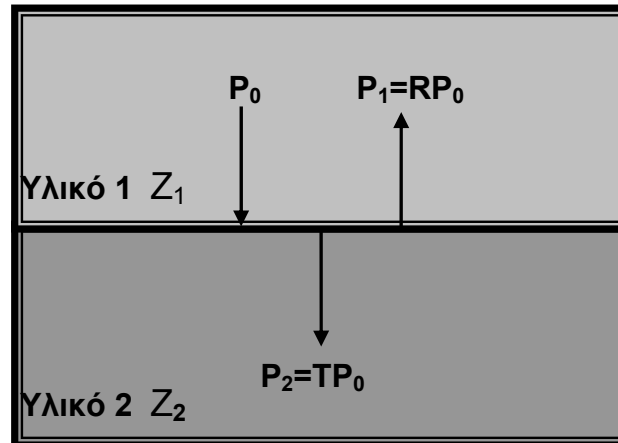
Σχήμα 3.4 : Κύματα του Lamb α) διασταλτικά β) καμπτικά.

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 (Σχήμα 3.5). Τα μέσα αυτά μπορεί να είναι το μέσο σύζευξης (couplant) και στη συνέχεια το εξεταζόμενο υλικό (test piece) ή η διαδοχικές στρώσεις ενός υλικού. Σε κάποιο σημείο μεταξύ των δύο υλικών, υπάρχει η διαχωριστική επιφάνεια, που σημειώνει το τέλος του μέσου σύζευξης και την αρχή του εξεταζόμενου υλικού. Όταν το υπερηχητικό κύμα, που διαδίδεται στο μέσο σύζευξης, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια, τότε ένα μέρος της ηχητικής ενέργειας του κύματος διαδίδεται στο εξεταζόμενο υλικό, ενώ το άλλο μέρος ανακλάται πίσω προς το μέσο

σύζευξης [6][7]. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα οποτεδήποτε το υπερηχητικό κύμα συναντά διαχωριστικές επιφάνειες και είναι ιδιαίτερα έντονο στα σύνθετα υλικά, καθώς κάθε στρώση έχει μια διαχωριστική επιφάνεια με την προηγούμενη και την επόμενη στρώση.



Σχήμα 3.5 : Κάθετη πρόσπτωση κύματος στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών.

Το χαρακτηριστικό των υλικών που καθορίζει το ποσό της ακουστικής πίεσης, που θα ανακλαστεί από τη διαχωριστική επιφάνεια, ονομάζεται ακουστική αντίσταση και εκφράζει την αντίσταση που προβάλλουν τα δομικά σωματίδια ενός υλικού στη διάδοση του ηχητικού κύματος. Η ακουστική αντίσταση δίνεται από τη σχέση (3.1) και η τιμή της είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό.

$$Z = \rho \cdot c \quad (3.1)$$

ρ = πυκνότητα του υλικού
 c = Ταχύτητα του ήχου στο υλικό

Οπότε, όταν ένα ηχητικό κύμα διαδίδεται σ'ένα υλικό ακουστικής αντίστασης Z_1 και συναντήσει κάθετα τη διαχωριστική επιφάνεια με ένα άλλο υλικό ακουστικής αντίστασης Z_2 ορίζεται ο συντελεστής ανάκλασης (Reflection coefficient) R σύμφωνα με τη σχέση (3.2).

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.2)$$

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%.

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

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.3)$$

Οι παραπάνω συντελεστές εκφράζουν το ποσοστό της ακουστικής πίεσης, που ανακλάται ή εισέρχεται στο υλικό. Η ακουστική πίεση είναι σημαντική ιδιότητα του υπερηχητικού κύματος και το τετράγωνο της καθορίζει την ακουστική ενέργεια του κύματος. Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να είναι θετικός ή αρνητικός. Το αρνητικό πρόσημο εκφράζει την αλλαγή φάσης του ανακλώμενου κύματος σε σχέση με το προσπίπτον στη διαχωριστική επιφάνεια. Αναλυτικότερα, εάν το προσπίπτον κύμα τη στιγμή που συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια έχει φτάσει στο θετικό μέγιστο της ακουστικής πίεσης, τότε την ίδια χρονική στιγμή, το ανακλώμενο κύμα θα βρίσκεται στο αρνητικό μέγιστο της ακουστικής πίεσης. Ο συντελεστής διάδοσης μπορεί να είναι μικρότερος ή μεγαλύτερος της μονάδας [7].

Στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υλικών ισχύει η συνέχεια της ακουστικής πίεσης σύμφωνα με τη σχέση (3.4).

$$P_0 + P_1 = P_2 \quad (3.4) \quad P_1 = R \cdot P_0 \quad (3.5) \quad P_2 = T \cdot P_0 \quad (3.6)$$

Όπου P_0 η ακουστική πίεση του προσπίπτοντος κύματος, P_1 η ακουστική πίεση του ανακλώμενου κύματος και P_2 η ακουστική πίεση του κύματος, που διαδίδεται τελικά στο εξεταζόμενο υλικό. Σύμφωνα με τις σχέσεις (3.4) (3.5) και (3.6) προκύπτει η ισότητα που συνδέει του δύο συντελεστές (3.7).

$$1 + R = T \quad (3.7)$$

Στο σημείο αυτό παρατίθενται δύο παραδείγματα, τα οποία περιγράφουν τη συμπεριφορά των υπερηχητικών κυμάτων κατά την κάθετη πρόσπτωση τους στη συνοριακή επιφάνεια δύο υλικών. Τα υλικά που επιλέγονται στο πρώτο παράδειγμα είναι ένα graphite-epoxy με ακουστική αντίσταση $Z_2 = 4.7 \cdot 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και το νερό με ακουστική αντίσταση $Z_1 = 1.48 \cdot 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Σκοπός του παραδείγματος αυτού είναι να περιγράψει τη χρονική στιγμή, κατά την οποία τα υπερηχητικά

κύματα, παραγόμενα από τη πιεζοηλεκτρική κεφαλή, έχουν διαδοθεί στο μέσο σύζευξης (νερό) και προσπίπτουν κάθετα στο εξεταζόμενο υλικό (graphite-epoxy).

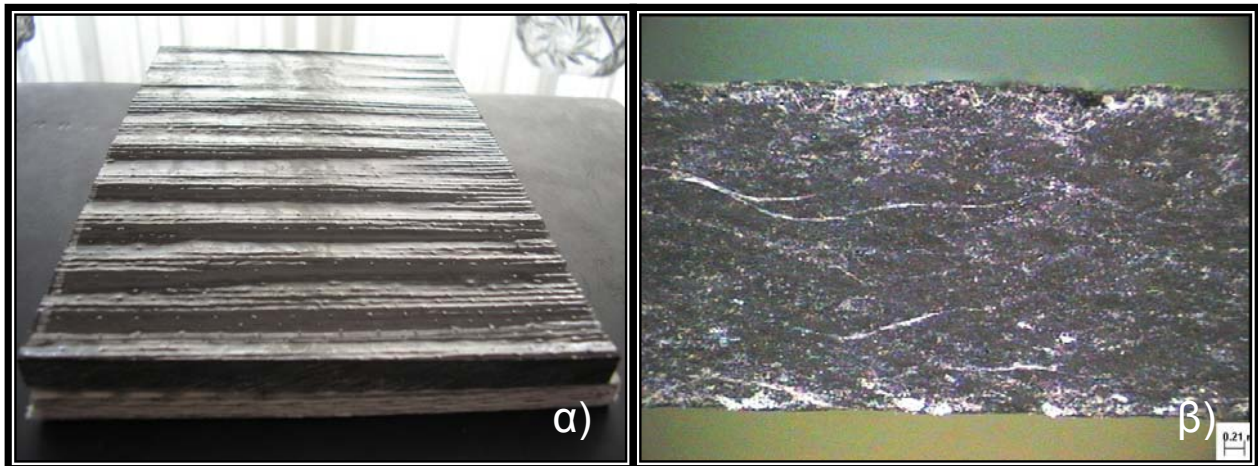
Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.2) ο συντελεστής ανάκλασης είναι $R=0.52$, που σημαίνει ότι το 52% της ακουστικής πίεσης των υπερηχητικών κυμάτων ανακλάται και το 48% εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό. Φαίνεται ότι σχεδόν το 50% της ακουστικής πίεσης χάνεται πριν τα υπερηχητικά κύματα εισχωρήσουν στο εξεταζόμενο υλικό. Για την καλύτερη ακουστική επαφή του μέσου σύζευξης και του εξεταζόμενου υλικού, θα ήταν προτιμότερο ως μέσο σύζευξης να χρησιμοποιηθεί η γλυκερίνη με ακουστική αντίσταση $Z=2.42 \cdot 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συντελεστής ανάκλασης να παίρνει τιμή $R=0.32$ και 20% περισσότερη ακουστική πίεση να εισέρχεται στο υλικό.

Στο δεύτερο παράδειγμα επιλέγεται και πάλι το υλικό graphite-epoxy με ακουστική αντίσταση $Z_1=4.7 \cdot 10^6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και ο αέρας με ακουστική αντίσταση $Z_2=411 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Το παράδειγμα αυτό εστιάζει στη χρονική στιγμή, που τα υπερηχητικά κύματα καθώς διαδίδονται μέσα στο σύνθετο υλικό graphite-epoxy συναντούν τη διαχωριστική επιφάνεια αέρα-σύνθετου υλικού. Συγκεκριμένα στα σύνθετα υλικά οι αποκολλησεις στρώσεων, οι ρωγμές και οι φυσαλίδες αντιστοιχούν σε διαχωριστικές επιφάνειες αέρα-σύνθετου υλικού [2]. Σ' αυτή τη μεγάλη μεταβολή της ακουστικής αντίστασης στηρίζεται ο μη καταστροφικός έλεγχος για να ανιχνεύσει ατέλειες-βλάβες μέσα στα σύνθετα υλικά. Η εναλλαγή των δεικτών στις ακουστικές αντιστάσεις δηλώνει σε ποιο υλικό διαδίδονται πρώτα τα υπερηχητικά κύματα. Πάλι βασιζόμενοι στη σχέση (3.2), ο συντελεστής ανάκλασης παίρνει τιμή $R= -0.999$. Φαίνεται λοιπόν, ότι καθώς τα υπερηχητικά κύματα συναντούν τις ατέλειες-βλάβες ανακλώνται κατά 100% και παράγονται ισχυρές ανακλάσεις, στις οποίες στηρίζεται ο έλεγχος με υπερήχους για τον εντοπισμό τους.

3.3.2 Πλάγια πρόσπτωση υπερηχητικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών

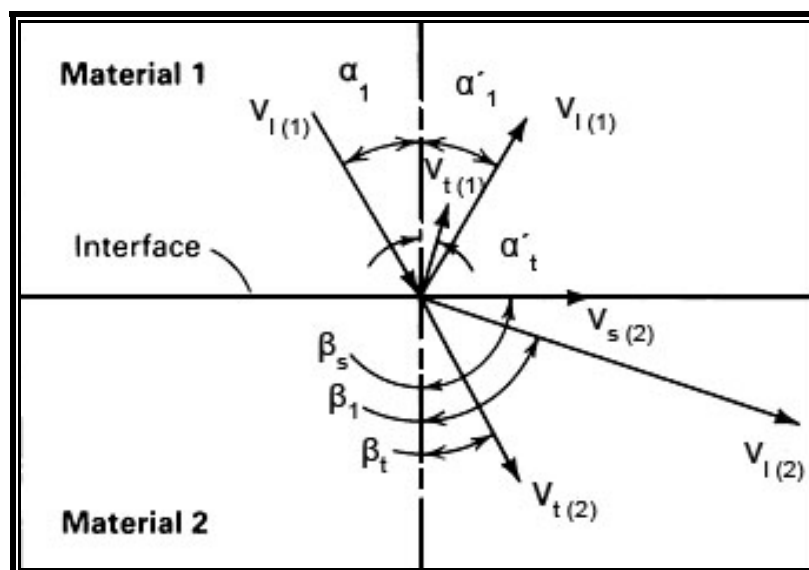
Με μια πρώτη ματιά, η αναφορά στην πλάγια πρόσπτωση των υπερηχητικών κυμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, φαίνεται περιττή, καθώς στον έλεγχο που διεξάγεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα εξεταζόμενα υλικά προσβάλλονται με υπερηχητική δέσμη κάθετη στην πάνω επιφάνεια τους. Τα πράγματα όμως είναι διαφορετικά, εκτός από το γεγονός ότι η πάνω επιφάνεια των δοκιμίων μπορεί να μην είναι κάθετη στην υπερηχητική δέσμη, λόγω κατασκευής των δοκιμίων (Σχήμα 3.6) ή και στήριξής τους, στο εσωτερικό των εξεταζόμενων υλικών υπάρχουν συνθήκες που έχουν σαν αποτέλεσμα την πλάγια πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης σε διαχωριστικές επιφάνειες. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι, οι στρώσεις στο εσωτερικό μιας πολύστρωτης πλάκας δεν είναι απαραίτητο να είναι παράλληλες με την πάνω και την κάτω επιφάνεια, αλλά 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 μη προσπίπτει κάθετα σ'αυτα.



Σχήμα 3.6 : Δοκίμιο carbon-epoxy **α)** με κυματοειδή πάνω επιφάνεια **β)** με κυματοειδείς στρώσεις στο εσωτερικό.

Στην περίπτωση αυτή δεν έχουμε μόνο διάδοση και ανάκλαση, πράγμα που συμβαίνει στην κάθετη πρόσπτωση, αλλά έχουμε αλλαγή στη διεύθυνση και στο είδος των κυμάτων που διαδίδονται, τόσο στο ανακλώμενο μέρος του υπερηχητικού κύματος όσο και στο διαθλώμενο. Τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν ολόκληρη την ηχητική δέσμη, ή μέρος της, και το συνολικό αποτέλεσμα των αλλαγών που παρατηρούνται εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και από την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων, που συναντούν τη διαχωριστική επιφάνεια [5].



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα με όλα τα πιθανά είδη κυμάτων κατά την πρόσπτωση υπό γωνία α_1 διαμήκους κύματος σε διαχωριστική επιφάνεια.

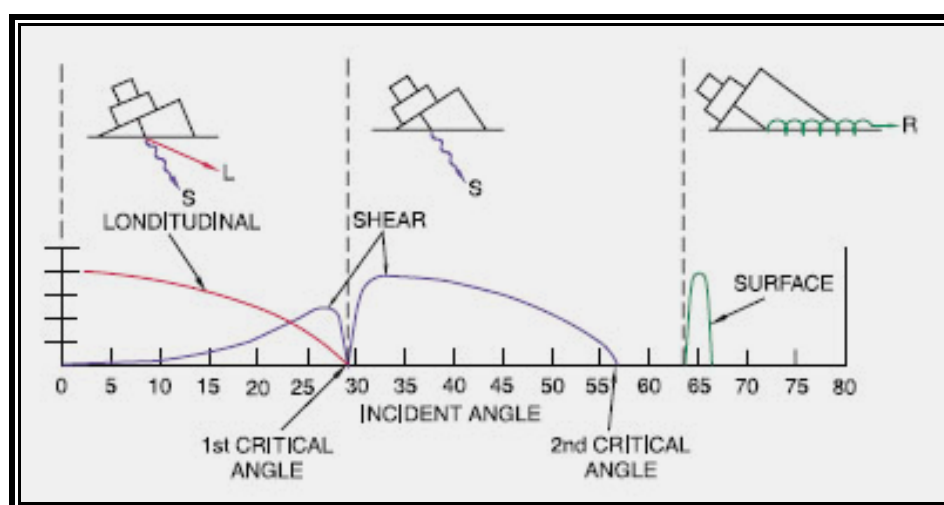
Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η πρόσπτωση ενός διαμήκους κύματος με ταχύτητα $V_{l(1)}$ στη διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών υπό γωνία α_1 ως προς την κάθετο στην επιφάνεια, καθώς και όλα τα είδη πιθανών κυμάτων, τα οποία ξεκινούν από το σημείο πρόσπτωσης. Ο νόμος του Snell περιγράφει την συμπεριφορά των κυμάτων στις διαχωριστικές επιφάνειες και εκφράζεται από τις σχέσεις :

$$\frac{\sin \alpha_1}{V_{l(1)}} = \frac{\sin \alpha'_1}{V_{l(1)}} = \frac{\sin \alpha'_t}{V_{t(1)}} \quad (3.8)$$

$$\frac{\sin \beta_1}{V_{l(2)}} = \frac{\sin \beta_t}{V_{t(2)}} \quad (3.9)$$

Στη σχέση (3.8) α_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης του αρχικού διαμήκους κύματος στο υλικό 1 και α'_1 είναι η μ κύματος στο υλικό 1. Τα κύματα αυτά έχουν ταχύτητες $V_{l(1)}$, $V_{t(1)}$ αντίστοιχα. Στη σχέση (3.9) β_1 είναι η γωνία του διαθλώμενου διαμήκους κύματος στο υλικό 2, β_t είναι η γωνία του διαθλώμενου εγκάρσιου στο υλικό 2 και $V_{l(2)}$, $V_{t(2)}$ είναι οι ταχύτητες τους. Στο Σχήμα 3.7 εμφανίζονται, επίσης, και τα επιφανειακά κύματα με ταχύτητα $V_{s(2)}$, που σχηματίζουν γωνία $\beta_s=90^\circ$ με την κάθετο στην επιφάνεια.

Έχοντας δεδομένα τα υλικά 1 και 2 και αντίστοιχα τις ηχητικές ταχύτητες, ορίζοντας την γωνία πρόσπτωσης α_1 , καθορίζεται ποιά είδη κυμάτων θα σχηματιστούν. Στο Σχήμα (3.8) φαίνεται η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης, του είδους των διαθλώμενων κυμάτων και του πλάτους των κυμάτων αυτών, όταν αυτά διαδίδονται σε μεταλλική πλάκα.



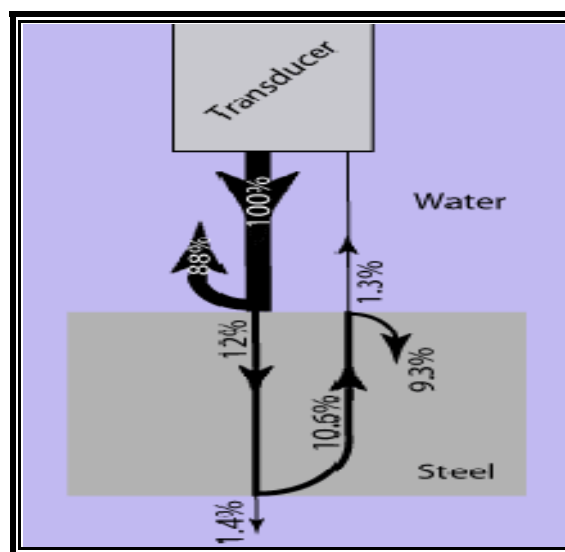
Σχήμα 3.8 : Γραφική παράσταση που περιγράφει τη σχέση γωνίας πρόσπτωσης και του είδους των παραγόμενων κυμάτων σε μεταλλική πλάκα.

Παρατηρείται ότι για γωνίες μικρότερες των 5° διαδίδονται μόνο διαμήκη κύματα με μέγιστο πλάτος. Από εκεί και πέρα, μέχρι την πρώτη κρίσιμη γωνία, συνυπάρχουν διαμήκη και εγκάρσια κύματα με μικρότερο πλάτος. Μετά την πρώτη κρίσιμη γωνία, διαδίδονται μόνο εγκάρσια κύματα, αρχικά με μέγιστο πλάτος που καθώς η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει μειώνεται μέχρι τη δεύτερη κρίσιμη γωνία, όπου μηδενίζεται το πλάτος τους. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από τη δεύτερη κρίσιμη, διαδίδονται μόνο επιφανειακά κύματα.

Κατά τον έλεγχο σύνθετων υλικών με τη χρήση κάθετης δέσμης υπερηχητικών κυμάτων, τα φαινόμενα της ανάκλασης, της διάθλασης και της μετατροπής των διαμήκων κυμάτων σε άλλα είδη κυμάτων συμβαίνουν στο εσωτερικό τους με τυχαίο τρόπο. Η πρόσπτωση στις διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες έχει σαν αποτέλεσμα τη διάθλαση και την ανάκλαση μέρους, ή ολόκληρης, της δέσμης προς τυχαίες διευθύνσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της ακουστικής πίεσης, που τελικά φτάνει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διασπορά (scattering), είναι αντικείμενο ανάλυσης της επόμενης παραγράφου, και στα σύνθετα υλικά είναι κύριος παράγοντας απόσβεσης των υπερηχητικών κυμάτων.

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. Όλα τα υλικά παρουσιάζουν την τάση να εξασθενούν την ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται η ακουστική πίεση, η οποία τελικά φτάνει στην υπερηχητική κεφαλή, κατά τον έλεγχο με εμβάπτιση ενός μεταλλικού δοκιμίου.



Σχήμα 3.9 : Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων.

Η εξασθένηση αυτή, είναι αποτέλεσμα της διασποράς (scattering) και της απορρόφησης (absorption) που περιγράφονται συνολικά με τον όρο απόσβεση (attenuation). Απορρόφηση είναι η άμεση μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των υπερηχητικών κυμάτων σε θερμότητα [7]. Κατά την ελαστική κίνηση των δομικών σωματιδίων του μέσου, κάτω από την επίδραση του υπερηχητικού κύματος, θερμαίνονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται πυκνώσεις και ψύχονται τα σημεία, όπου σχηματίζονται αραιώσεις [5]. 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 εμφανίζεται όταν η δέσμη των υπερήχων συναντά υπό γωνίες διάφορες διαχωριστικές επιφάνειες και ανακλάται ή διαθλάται ακανόνιστα ή μετατρέπεται σε άλλα είδη κυμάτων. 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, οι οποιοσδήποτε ατέλειες και βλάβες ανάλογα με το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης που χρησιμοποιείται. Το φαινόμενο της διασποράς γίνεται εντονότερο, όταν το μέγεθος της θεωρούμενης διαχωριστικής επιφάνειας γίνεται ίσο με το 10% του μήκους κύματος [5].

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. Τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά απόσβεσης [8]. Σε σχέση με τα μονοαξονικά υφάσματα, τα πλεγμένα υφάσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση. Αποτέλεσμα της απόσβεσης είναι η μείωση της ηχητικής πίεσης των υπερηχητικών κυμάτων από την αρχική τιμή P_0 σε κάποια τιμή P , όταν το κύμα διαπερνά το υλικό σε βάθος d [6]. Η σχέση που δίνει την πίεση P σε απόσταση d μέσα στο υλικό είναι :

$$P = P_0 \cdot e^{-ad} \quad (3.10)$$

Ο συντελεστής a καλείται συντελεστής απόσβεσης (attenuation coefficient) και εκφράζεται συνήθως σε dB/mm ή σε dB/m. Η συνολική απόσβεση σε μια απόσταση d του υλικού, προκύπτει από τη σχέση (3.10) εάν πάρουμε το φυσικό λογάριθμο.

$$a \cdot d = \ln \frac{P_0}{P} \text{ [Np]} \quad (3.11)$$

Εκφράζεται σε Nepers [Np] και ο συντελεστής απόσβεσης a σε [Np/mm]. Για πρακτικούς λόγους έχει καθιερωθεί σαν μονάδα απόσβεσης το decibel [dB] ή το [dB/m] το οποίο συνδέεται με το [Np] με τη σχέση $1\text{dB/m}=868.6 \text{ Np/cm}$.

Η μονάδα decibel είναι το 1/10 του Bel, που είναι ο δεκαδικός λογάριθμος δύο ομοειδών μεγεθών. Έτσι για δύο ομοειδή μεγέθη A_n, A_{n+1} ισχύει :

$$\Omega = \log \frac{A_0}{A_1} \text{ [Bels]} = 10 \log \frac{A_0}{A_1} \text{ [dB]} \quad (3.12)$$

Άρα για την απόσβεση των υπερήχων εντάσεως J_0, J ισχύει :

$$a \cdot d = 10 \log \frac{J_0}{J} \text{ [dB]} \quad (3.13)$$

Η ένταση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της ηχητικής πίεσης [$J=f(p^2)$] και η σχέση (3.13) γίνεται

$$a \cdot d = 10 \log \frac{J_0}{J} = 10 \log \frac{P_0^2}{P^2} = 20 \log \frac{P_0}{P} \text{ [dB]} \quad (3.14)$$

Τέλος, επειδή το ύψος των διαδοχικών παλμών H_n, H_{n+1} στην οθόνη του παλμογράφου, είναι ανάλογο προς τις πιέσεις του ήχου P_0, P η σχέση (3.14) γράφεται :

$$a \cdot d = 20 \log \frac{H_n}{H_{n+1}} \text{ [dB]} \quad (3.15)$$

Με τη χρήση της σχέσης (3.15) είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μεταβολή της απόσβεσης σε ένα δοκίμιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΕΦΑΛΕΣ

4.1 Εισαγωγή

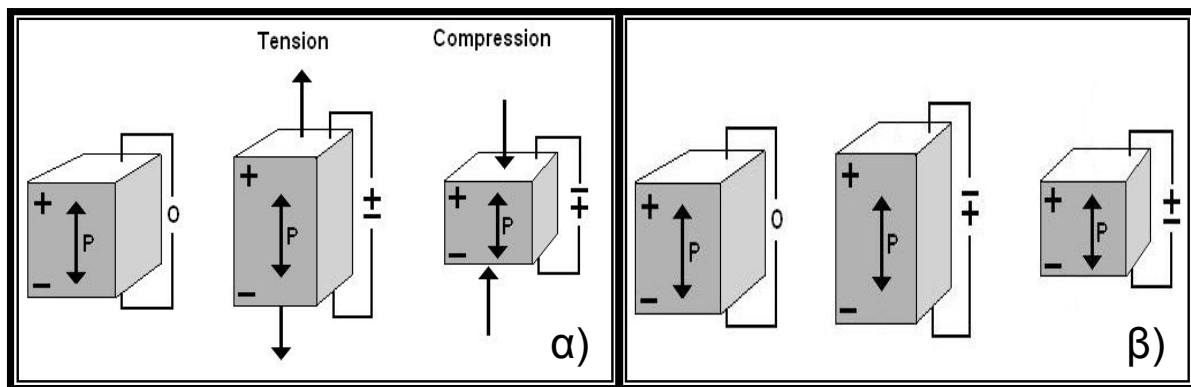
Οι κεφαλές υπερήχων (ultrasonic transducers) αποτελούν το αισθητήριο όργανο των συστημάτων υπερήχων που χρησιμοποιούνται στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών. Από το είδος, τα χαρακτηριστικά και, κατ'έπекταση, τις ιδιότητες μιας κεφαλής υπερήχων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία και η εγκυρότητα ενός ελέγχου.

Στο μη καταστροφικό έλεγχο των υλικών χρησιμοποιούνται αποκλειστικά πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, δηλαδή κεφαλές που για την παραγωγή των υπερήχων στηρίζονται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Δεν χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι παραγωγής υπερήχων πχ μαγνητοσυστολή, καθώς δεν μπορούν να παράξουν υπερήχους υψηλών συχνοτήτων. Παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται μόνο πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, εντούτοις υπάρχουν διάφοροι τύποι. Η κατηγοριοποίηση των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών είναι ένα θέμα 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.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο έλεγχος των δοκιμών διεξάγεται με αυτόματη πειραματική διάταξη υπερήχων, με την μέθοδο της παλμοηγούς, όπου τόσο οι κεφαλές όσο και τα δοκίμια βρίσκονται εμβαπτισμένα μέσα σε υγρό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό θα αναλυθεί η λειτουργία των εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών (immersion transducers), μονού κρυστάλλου (single element), καθέτου δέσμης (straight beam) με ή χωρίς εστίαση (focused non-focused). Ακόμη, θα γίνει αναφορά σε διάφορες παραμέτρους και κατασκευαστικά στοιχεία των κεφαλών, ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος που επηρεάζεται το αποτέλεσμα ενός ελέγχου από την επιλογή της κεφαλής. Η παραπάνω αναφορά θα κινείται στην κατεύθυνση του ελέγχου των σύνθετων υλικών, που παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά το μη καταστροφικό έλεγχο.

4.2 Αρχή παραγωγής υπερήχων. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο [6][7]

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια βασική ιδιότητα ορισμένων φυσικών ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν καταπονούνται εμφανίζουν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία στις απέναντι πλευρές τους. Για την κατανόηση του φαινομένου θεωρούμε τον κύβο από πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο του Σχήματος 4.1.



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

Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος καταπονείται διαδοχικά σε εφελκυσμό και θλίψη (εναλλάξ) παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι επιφάνειές του (Σχήμα 4.1 α). Έτσι όταν ένα ακουστικό κύμα, στην περίπτωση μας υπερηχητικό, φτάσει σ' ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο τον υποβάλλει σε κατάσταση εναλλασσόμενου εφελκυσμού και θλίψης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναπτύσσεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό δυναμικό, του οποίου 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 είναι αναστρέψιμο. Δηλαδή, εάν εφαρμόσουμε ένα ηλεκτρικό δυναμικό στις απέναντι πλευρές ενός πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου, ο κρύσταλλος θα παραμορφωθεί εφελκυστικά ή θλιπτικά ανάλογα με την πολικότητα του ηλεκτρικού δυναμικού (Σχήμα 4.1 β). Εάν το δυναμικό αυτό είναι εναλλασσόμενο, τότε ο κρύσταλλος θα εφελκύεται ή θα θλίβεται με την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης. Εάν 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 διαμήκων κυμάτων. Το ανάστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων.

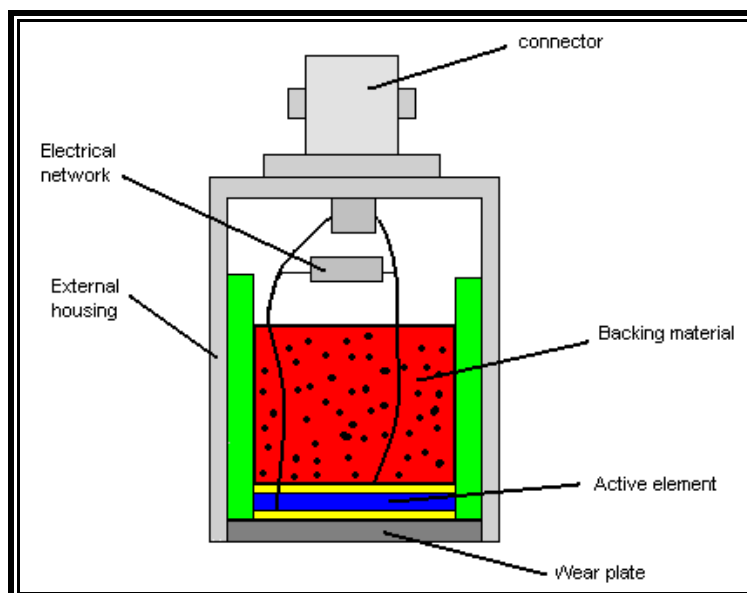
Χρησιμοποιώντας τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους να λειτουργούν είτε με τον ευθύ είτε με τον ανάστροφο τρόπο κατασκευάζονται οι πιεζοηλεκτρικές κεφαλές (transducers), οι οποίες είναι ίσως το πιο σημαντικό στοιχείο ενός συστήματος υπερήχων. Σήμερα για τη κατασκευή τους χρησιμοποιούνται τα πιεζοηλεκτρικά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

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

4.3 Γενική διάταξη εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών (immersion transducers)

Στην παράγραφο που ακολουθούν θα αναλυθεί η λειτουργία των εμβαπτιζόμενων κεφαλών (immersion transducers), μονού κρυστάλλου (single element), καθέτου δέσμης (straight beam) χωρίς εστίαση (focused non-focused). Ξεκινώντας, είναι σκόπιμο να αναλυθούν οι όροι του παραπάνω ορισμού. 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. Στη συνέχεια ο όρος «μονός κρύσταλλος» σημαίνει ότι οι κεφαλές αυτές διαθέτουν ένα μόνο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, που λειτουργεί και ως πομπός και ως δέκτης υπερηχητικών κυμάτων. Τέλος, η δέσμη των κεφαλών αυτών προσπίπτει κάθετα πάνω στο εξεταζόμενο αντικείμενο και δεν χρησιμοποιείται κανένα είδος εστίασης.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η δομή των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών καθέτου δέσμης, μονού κρυστάλλου, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων. Στις κεφαλές αυτές η γεννήτρια των υπερήχων είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, το οποίο είναι ένας λεπτός δίσκος από πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο.



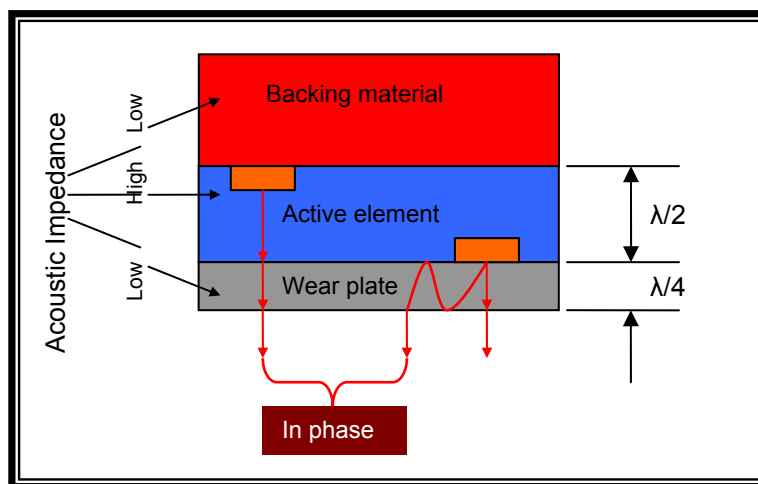
Σχήμα 4.2 : Δομή πιεζοηλεκτρικής κεφαλής.

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε μηχανικές ταλαντώσεις, οπότε έχουμε την παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων (transmit mode). Αντίστροφα έχει την ικανότητα να

μετατρέπει τις μηχανικές ταλαντώσεις, όταν δέχεται υπερηχητικά κύματα, σε ηλεκτρικά σήματα (receive mode). Το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (active element) καθορίζεται από την επιθυμητή συχνότητα της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής και από το επιθυμητό μήκος κύματος. Ένας δίσκος πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ταλαντούται και παράγει υπερήχους με μήκος κύματος διπλάσιο του πάχους του. Οπότε κατασκευάζονται με πάχος ίσο με το μισό του επιθυμητού μήκους κύματος. Επίσης, μπορεί να έχει κυκλικό ή ορθογωνικό σχήμα, οπότε ανάλογη θα είναι και η μορφή της παραγόμενης ηχητικής δέσμης.

Πίσω από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο υπάρχει το υλικό απόσβεσης (backing material). Αυτό κατασκευάζεται από ένα μείγμα μεταλλικών κόκκων σε ρητίνη. Ο ρόλος του υλικού απόσβεσης (Σχήμα 4.2) είναι να απορρόφα την ενέργεια του ηχητικού σήματος, η οποία περνά πίσω από τον κρύσταλλο προς το εσωτερικό της κεφαλής. Η ύπαρξη υλικού απόσβεσης με ακουστική αντίσταση (acoustic impedance) παρόμοια με αυτή του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση της ακουστικής ενέργειας, που παράγεται από την πίσω πλευρά του κρυστάλλου [9]. Μια κεφαλή παραγωγής υπερήχων με την παραπάνω διάταξη, θα έχει μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων (broadband transducer) και μεγαλύτερη ευαισθησία.

Καθώς μειώνεται η ακουστική αντίσταση του υλικού απόσβεσης σε σχέση με αυτή του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, λιγότερη ακουστική ενέργεια απορροφάται από το υλικό απόσβεσης και περισσότερη ακτινοβολείται προς το υπό εξέταση υλικό (narrow band transducer). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα της υπερηχητικής δέσμης, αλλά ταυτόχρονα την μείωση της ευαισθησίας της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής.



Σχήμα 4.3 : Διάταξη στοιχείων πιεζοηλεκτρικής κεφαλής.

Μπροστά από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο υπάρχει μια προστατευτική πλάκα (wear plate). Η πλάκα αυτή (Σχήμα 4.3) έχει διπλό ρόλο. Πρώτον, αναλαμβάνει να προστατέψει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο από φθορά με την επαφή του με το περιβάλλον. Δεύτερον, έχει ακουστική αντίσταση τέτοια, ώστε να διευκολύνει την διάδοση των υπερηχητικών κυμάτων στο μέσο που έρχεται σε επαφή. Έτσι στις

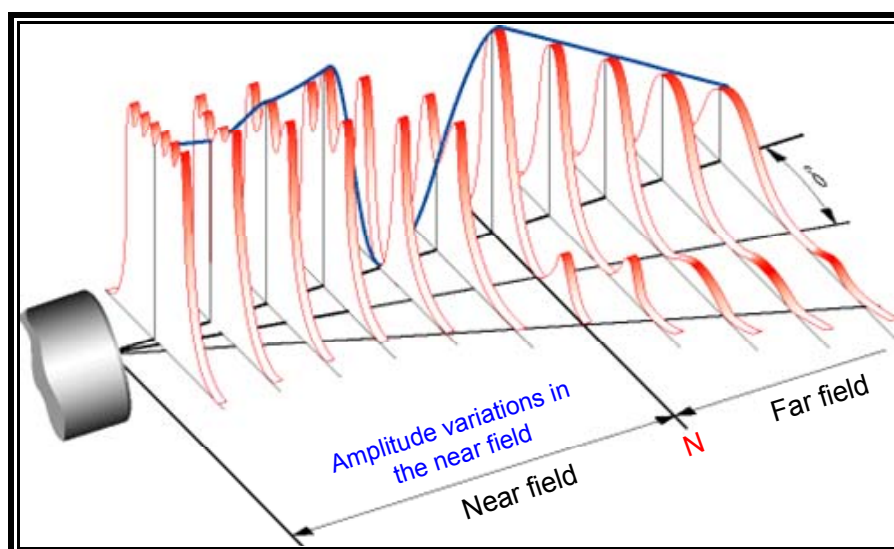
εμβαπτιζόμενες κεφαλές η προστατευτική πλάκα έχει ακουστική αντίσταση, της οποίας η τιμή βρίσκεται μεταξύ της ακουστικής αντίστασης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και του νερού

Το πάχος της προστατευτικής πλάκας είναι ίσο με το $1/4$ του παραγόμενου μήκους κύματος ($\lambda/4$), έτσι ώστε τα δευτερεύοντα ηχητικά κύματα που ανακλώνται στην προστατευτική πλάκα (Σχήμα 4.3) και εξέρχονται ξανά από αυτή, να είναι στην ίδια φάση με αυτά που εξέρχονται χωρίς να εγκλωβιστούν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προστίθενται τα πλάτη των κυμάτων που βρίσκονται στην ίδια φάση και περισσότερη ακουστική ενέργεια να εισέρχεται στο υπό εξέταση υλικό. Μέσα στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή υπάρχει ακόμα το ηλεκτρικό κύκλωμα που μεταφέρει τα ηλεκτρικά σήματα προς και από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

Τέλος, στην περίπτωση των εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών, όλη η παραπάνω διάταξη βρίσκεται τοποθετημένη μέσα σε κατάλληλο ανοξειδωτο μεταλλικό κέλυφος, το οποίο αποτρέπει την επαφή της με το νερό.

4.4 Το ηχητικό πεδίο των εμβαπτιζόμενων πιεζοηλεκτρικών κεφαλών μονού κρυστάλλου, καθέτου δέσμης

Το ηχητικό πεδίο μιας πιεζοηλεκτρικής κεφαλής παραγωγής διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων χωρίζεται σε δύο περιοχές. Η πρώτη ονομάζεται εγγύς πεδίο (near field) και η δεύτερη απώτερο πεδίο (far field). Το εγγύς πεδίο ξεκινά μπροστά από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή και μέσα στην περιοχή αυτή, το πλάτος των υπερηχητικών κυμάτων περνά από μια σειρά μεγίστων και ελαχίστων τιμών [10]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος δεν ταλαντώνεται ομοιόμορφα κάτω από την επίδραση της ηλεκτρικής τάσης. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από στοιχειώδεις κρυστάλλους, οι οποίοι ταλαντώνονται προς την ίδια κατεύθυνση, αλλά με μια μικρή διαφορά φάσης και εκπέμπουν σφαιρικά κύματα [5].



Σχήμα 4.4 : Γραφική παράσταση του εγγύς και του απώτερου πεδίου.

Η τελική ηχητική δέσμη αποτελείται από επίπεδα κύματα. Στην περιοχή της ηχητικής δέσμης κοντά στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, τα σφαιρικά κύματα, που προέρχονται από την περιφέρεια του κρυστάλλου, δημιουργούν παρεμβολές με αποτέλεσμα τις αυξομειώσεις στην ακουστική πίεση. Το εγγύς πεδίο τελειώνει στο σημείο που εμφανίζεται το τελευταίο μέγιστο και βρίσκεται σε απόσταση N ή Y^{0+} από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή (Σχήμα 4.4). Το μήκος N του εγγύς πεδίου είναι συνάρτηση της συχνότητας της κεφαλής, της ενεργού διαμέτρου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και της ταχύτητας του ήχου στο υλικό που διαδίδονται τα υπερηχητικά κύματα.

Το μήκος του εγγύς πεδίου δίνεται από τις εξισώσεις :

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \quad (4.1a) \quad \text{ή} \quad N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4.1\beta)$$

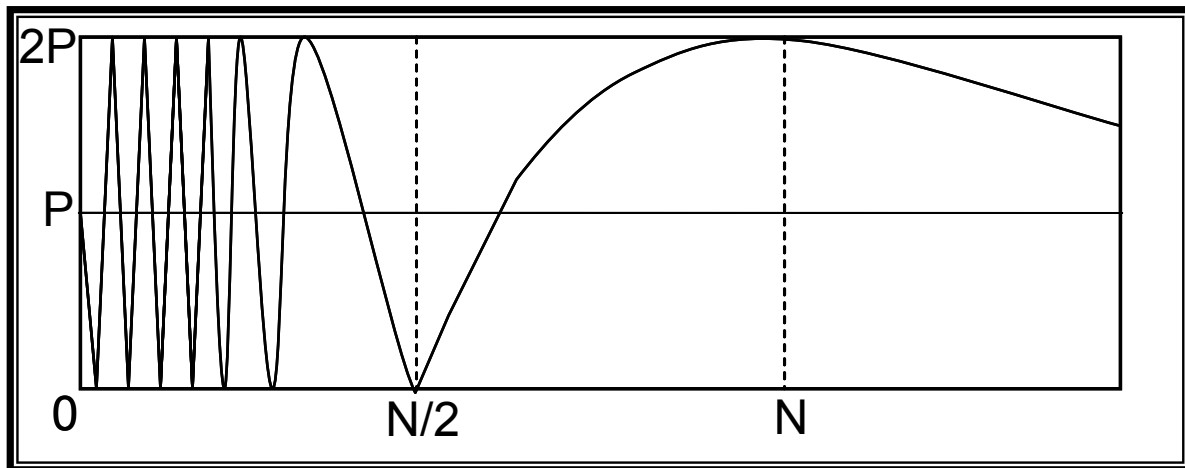
N = Μήκος εγγύς πεδίου
 D = Διάμετρος πιεζοηλεκτρικού στοιχείου
 f = Συχνότητα κεφαλής
 c = Ταχύτητα του ήχου στο υλικό
 λ = Μήκος κύματος

Η ενεργός διάμετρος D του κρυστάλλου συνδέεται με την πραγματική διάμετρο D_0 με τη σχέση

$$D = 0.97 D_0$$

Οι παραπάνω τύποι δίνουν το μήκος του εγγύς πεδίου, όταν η δέσμη των υπερήχων διαδίδεται σε ένα μέσο. Είναι ενδιαφέρον να γνωρίζουμε πως συμπεριφέρεται η ηχητική δέσμη στο εγγύς και στο απώτερο πεδίο, όταν περνά από τη διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών. Στον έλεγχο με υπερήχους με εμβάπτιση των υλικών, η δέσμη των υπερηχητικών κυμάτων περνά πρώτα μέσα από υγρό (συνήθως νερό) και στη συνέχεια εισέρχεται στο εξεταζόμενο υλικό [7]. Στην περίπτωση που έχουμε κάθετη πρόσπτωση της ηχητικής δέσμης στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω παραδοχή για τον προσδιορισμό του εγγύς πεδίου. Ανεξάρτητα αν η πάνω επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού βρίσκεται εντός ή εκτός του εγγύς πεδίου, το ηχητικό πεδίο μέσα στο υλικό μικραίνει ως προς το μήκος του, σύμφωνα με το λόγο των ακουστικών ταχυτήτων των δύο υλικών. Έτσι, στην περίπτωση νερού / χάλυβα, ο λόγος των ακουστικών ταχυτήτων είναι 1/4. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μήκος του εγγύς πεδίου, που βρίσκεται μέσα στο χάλυβα, να μικρύνει στο 1/4

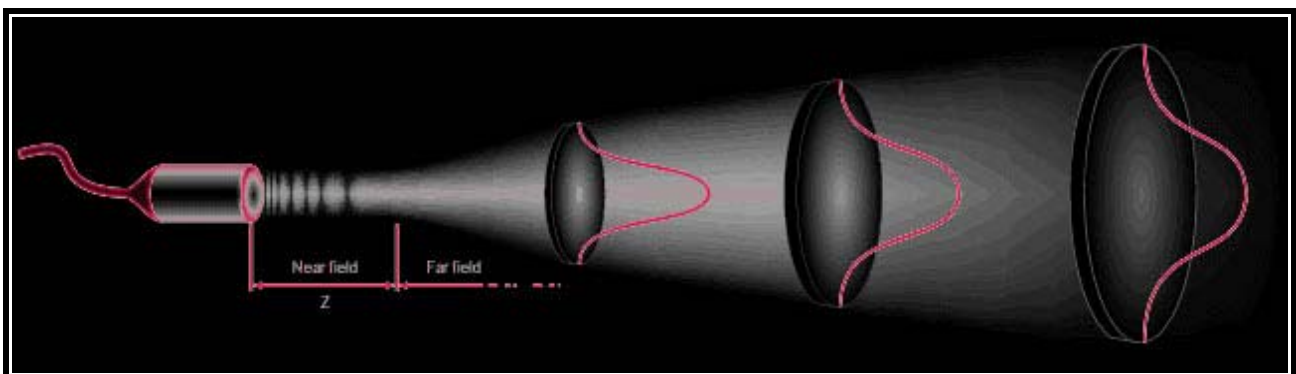
Όπως προαναφέρθηκε, μέσα στο εγγύς πεδίο μεταβάλλεται το πλάτος των υπερηχητικών κυμάτων και κατά συνέπεια παρουσιάζονται ανάλογες μεταβολές στην ακουστική πίεση, γεγονός που φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Έτσι η ακουστική πίεση κατά μήκος του ηχητικού άξονα της κεφαλής μεταβάλλεται μεταξύ του μηδενός και του διπλάσιου της μέσης τιμής. Από $0-N/2$ οι διακυμάνσεις είναι έντονες μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Στο διάστημα από $N/2-N$ η ακουστική πίεση αυξάνεται λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της στο τέλος του εγγύς πεδίου.



Σχήμα 4.5 : Μεταβολή της ακουστικής πίεσης στον ηχητικό άξονα της κεφαλής.

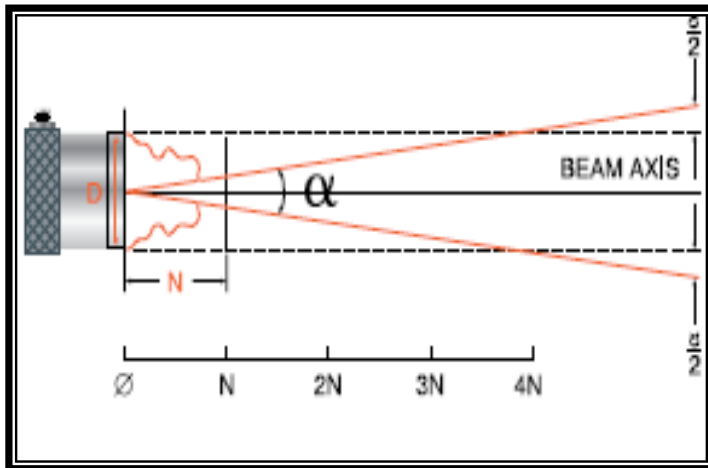
Από εκεί και πέρα, μετά το τέλος της απόστασης N μπαίνουμε στο απώτερο πεδίο όπου, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.5, η ακουστική πίεση μειώνεται βαθμιαία με την αύξηση της απόστασης. Η ακουστική πίεση είναι η πιο σημαντική ιδιότητα ενός υπερηχητικού κύματος, καθώς το τετράγωνό της δίνει το ποσό της ακουστικής ενέργειας του κύματος. Στον υπερηχητικό έλεγχο των υλικών είναι επιθυμητό να έχουμε τη μέγιστη ακουστική πίεση στα σημεία που ελέγχονται, ώστε από τις τυχόν ατέλειες-βλάβες να παίρνουμε όσο το δυνατόν ισχυρότερες ανακλάσεις. Επομένως, στον έλεγχο με εμπάττιση των δοκιμίων, η πιεζοηλεκτρική κεφαλή τοποθετείται σε τέτοια απόσταση από το δοκίμιο, που να αποφεύγονται οι έντονες μεταβολές της ακουστικής πίεσης μέσα στο εγγύς πεδίο και η περιοχή ελέγχου να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο τέλος του εγγύς πεδίου, που έχουμε την μέγιστη ακουστική πίεση. Η απόσταση N , το μήκος δηλαδή του εγγύς πεδίου, όπως προαναφέρθηκε, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της κεφαλής και παρέχεται ως δεδομένο από τον κατασκευαστή.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της ηχητικής δέσμης των πιεζοηλεκτρικών κεφαλών είναι η απόκλιση της δέσμης (*beam divergence*). Η απόκλιση της δέσμης παρατηρείται σε όλες τις μη εστιαζόμενες κεφαλές. Το ηχητικό πεδίο δεν παραμένει κυλινδρικό, αλλά αντίθετα αποκτά κωνικό σχήμα, όσο απομακρυνόμαστε από την κεφαλή (Σχήμα 4.6) [9].



Σχήμα 4.6 : Γραφική παράσταση του ηχητικού πεδίου επίπεδης πιεζοηλεκτρικής κεφαλής.

Η απόκλιση της δέσμης συμβαίνει διότι τα δονούμενα σωματίδια του μέσου, μέσα στο οποίο διαδίδεται το ηχητικό κύμα, δεν μεταδίδουν την ηχητική ενέργεια μόνο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, αλλά και με κάποια γωνία, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν είναι ευθυγραμμισμένα.



Σχήμα 4.7 : Απόκλιση της ηχητικής δέσμης.

$$\sin(\alpha/2) = \frac{0.514 \cdot c}{f \cdot D} \quad (4.2)$$

D = Διάμετρος πιεζοηλεκτρικού στοιχείου
f = Συχνότητα κεφαλής
c = Ταχύτητα του ήχου στο υλικό

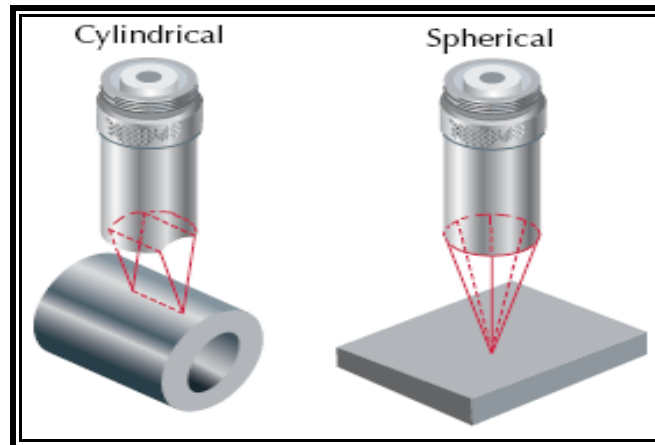
Η απόκλιση της δέσμης υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση (4.2) και, όπως φαίνεται, καθορίζεται από τη συχνότητα της κεφαλής, από τη διάμετρο του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και από την ταχύτητα του ήχου στο μέσο που διαδίδεται η δέσμη. Έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ακουστικής ενέργειας που ακτινοβολείται σε συγκεκριμένο σημείο, καθώς η δέσμη είναι λιγότερο συγκεντρωμένη, με συνέπεια τις επίσης μειωμένες ενέργειες ανακλάσεις, που δέχεται η κεφαλή.

Στις περισσότερες τυπικές εφαρμογές η απόκλιση της δέσμης είναι μεταξύ 3-10 μοιρών, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κεφαλή. Τέλος, η απόκλιση της δέσμης δεν επηρεάζει πρακτικά τον έλεγχο υλικών με μικρό πάχος. Εκεί που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι όταν εξετάζονται παχιά υλικά και η δέσμη πρέπει να διανύσει μεγάλη απόσταση μέσα στο υλικό, καθώς και στις περιπτώσεις που βρισκόμαστε κατά τον έλεγχο, κοντά σε παράλληλες πλευρές του δοκιμίου ως προς τη δέσμη των υπερήχων.

Σημαντικό επίσης χαρακτηριστικό της ηχητικής δέσμης είναι η διάμετρος της στο σημείο ελέγχου. Η ευαισθησία μιας κεφαλής επηρεάζεται από τη διάμετρο της ηχητικής δέσμης, καθώς όσο πιο μικρή είναι τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της ακουστικής ενέργειας που ανακλάται από μια ατέλεια. Έτσι, στις μη εστιαζόμενες, εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές είναι επιθυμητό ο έλεγχος να γίνεται τοποθετώντας το τέλος του εγγύς πεδίου όσο το δυνατόν πιο κοντά στην περιοχή εξέτασης, διότι το σημείο αυτό αποτελεί την φυσική εστίαση της κεφαλής και η δέσμη εκεί έχει τη μικρότερη διάμετρο.

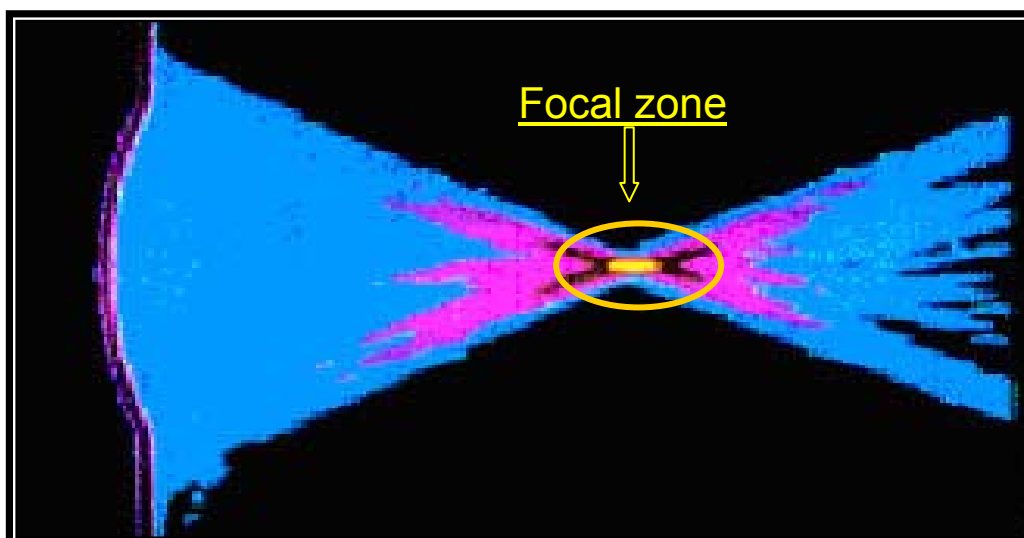
4.5 Εμβαπτιζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές με εστίαση (focused immersion transducers)

Οι εστιαζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές είναι διαθέσιμες σε δύο τύπους, στις σφαιρικά εστιαζόμενες (spherical) και στις κυλινδρικά εστιαζόμενες (cylindrical) (Σχήμα 4.8). Η εστίαση πετυχαίνεται με δύο τρόπους, είτε με την προσαρμογή ακουστικών φακών στις επίπεδες κεφαλές, είτε δημιουργώντας καμπυλότητα στο ίδιο το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο των κεφαλών [8].



Σχήμα 4.8 : Εστιαζόμενες πιεζοηλεκτρικές κεφαλές.

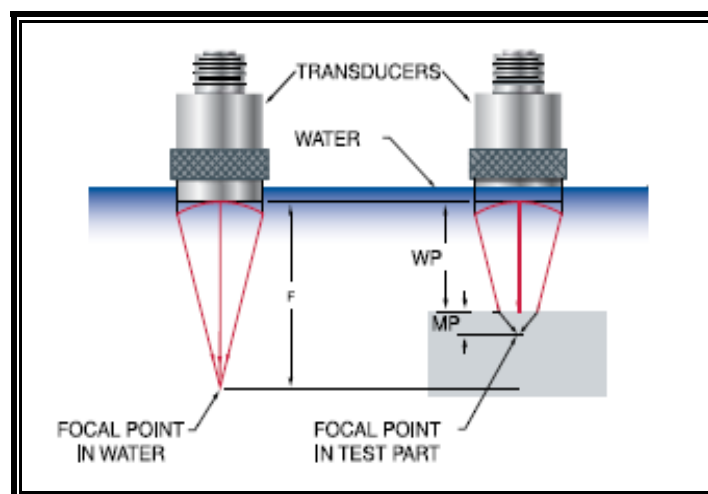
Σκοπός της εστίασης είναι η συγκέντρωση περισσότερης ακουστικής ενέργειας σε συγκεκριμένο σημείο, ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα της κεφαλής. Αυτό πετυχαίνεται με την αλλαγή της μορφής του ηχητικού πεδίου. Το ηχητικό πεδίο μιας εστιαζόμενης κεφαλής αποτελείται από δύο κωνικές περιοχές (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9 : Ηχητικό πεδίο εστιαζόμενης πιεζοηλεκτρικής κεφαλής.

Η πρώτη είναι συγκλίνουσα, ξεκινά από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή και καταλήγει στο τέλος του εγγύς πεδίου. Η δεύτερη κωνική περιοχή είναι αποκλίνουσα και ξεκινά από το τέλος του εγγύς πεδίου. Με την εστίαση το εγγύς πεδίο γίνεται μικρότερο σε μήκος και το σημείο εστίασης (focal point), που βρίσκεται στο τέλος του εγγύς πεδίου, έρχεται πιο κοντά στην κεφαλή. Το σημείο εστίασης βρίσκεται πάνω στον ηχητικό άξονα της κεφαλής και σ'αυτό έχουμε τη μέγιστη ακουστική πίεση της ηχητικής δέσμης [10]. Το σημείο εστίασης καθορίζεται από το είδος εστίασης της κεφαλής. Συνεπώς, έχουμε κεφαλές με εστίαση επίπεδης πλάκας (flat plate focus FPF), οι οποίες είναι σχεδιασμένες να έχουν την μέγιστη απόκριση σε ανακλάσεις από επίπεδη πλάκα, σε απόσταση ίση με το μήκος εστίασης, και κεφαλές με εστίαση σημειακού στόχου (point target focus PTF), οι οποίες είναι σχεδιασμένες να έχουν μέγιστη απόκριση από ανακλάσεις, που προέρχονται από μικρό σφαιρικό στόχο σε απόσταση ίση με το μήκος εστίασης (Σχήμα 4.11)[10].

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, το σημείο εστίασης (focal point) ορίζεται από τη σχεδίαση της κεφαλής, που με τη σειρά του καθορίζει το μήκος εστίασης (focal length). Έτσι το μήκος εστίασης είναι η απόσταση από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή μέχρι το σημείο του ηχητικού πεδίου, όπου εντοπίζονται τα σήματα με το μέγιστο πλάτος. Για τις μη εστιαζόμενες κεφαλές, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, αυτό συμβαίνει σε απόσταση ίση με το μήκος του εγγύς πεδίου. Στις εστιαζόμενες κεφαλές το μήκος εστίασης είναι μικρότερο από το μήκος του εγγύς πεδίου. Το μέγιστο μήκος εστίασης για κεφαλές με εστίαση επίπεδης πλάκας είναι ίσο με 0.6 του μήκους του εγγύς πεδίου, ενώ για κεφαλές με εστίαση σημειακού στόχου είναι 0.8 του μήκους του εγγύς πεδίου. Κεφαλές με εστίαση πέρα από τα παραπάνω όρια, εστιάζουν ασθενώς και δεν παρουσιάζουν κανένα πλεονέκτημα σε σχέση με τις κεφαλές χωρίς εστίαση. Οι κεφαλές δεν μπορούν να εστιάσουν σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτή του εγγύς πεδίου, όπως επίσης υπάρχουν και όρια ως προς το ελάχιστο μήκος εστίασης που επιβάλλονται από μηχανικούς λόγους.



Σχήμα 4.10 : Γραφική παράσταση του μήκους εστίασης.

Το μήκος εστίασης δίνεται από τον κατασκευαστή της κεφαλής για τη λειτουργία της στο νερό. Η τιμή του όμως εξαρτάται από το υλικό μέσα στο οποίο μετράται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα υλικά έχουν διαφορετικές ταχύτητες του ήχου, και μάλιστα μεγαλύτερες από αυτή του νερού. Για παράδειγμα, κατά τον έλεγχο με υπερήχους ενός μεταλλικού δοκιμίου με εμβάπτιση το μήκος εστίασης δεν είναι αυτό που προβλέπεται από τον κατασκευαστή (Σχήμα 4.10). Το νέο μήκος εστίασης προβλέπεται από την παρακάτω σχέση.

$$WP = F - MP \frac{C_{tm}}{C_w} \quad (4.3)$$

WP=πάχος στρώματος νερού (water path)

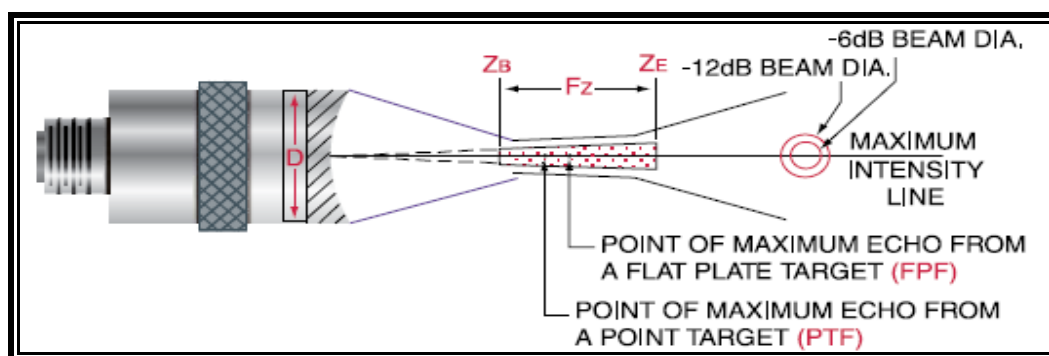
F=μήκος εστίασης στο νερό (focal length)

MP=πάχος εξεταζόμενου υλικού (material depth)

C_{tm}=ταχύτητα του ήχου στο υλικό (sound velocity in test material)

C_w=ταχύτητα του ήχου στο νερό (sound velocity in water)

Λόγω των διαφορετικών ταχυτήτων των δύο υλικών, η επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού (μετάλλου ή σύνθετου) σχηματίζει ένα δεύτερο ακουστικό φακό, που είναι πιο ισχυρός από αυτόν της κεφαλής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εστίαση της δέσμης και τη μετακίνηση του σημείου εστίασης πιο κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου, σε σχέση με τη θέση που προβλέπεται από τον κατασκευαστή για το νερό (Σχήμα 4.10). Από τη σχέση (4.3) φαίνεται ότι για να ελεγχθεί συγκεκριμένο σημείο του υλικού πρέπει να μεταβληθεί το **WP**, δηλαδή η απόσταση της κεφαλής από το δοκίμιο. Η βελτίωση της ανάλυσης και της διακριτικής ικανότητας επιφέρουν τη δυσμενή συνέπεια της μείωσης του βάθους που μπορεί η δέσμη να φτάσει μέσα στο υλικό, καθώς μειώνεται το μήκος εστίασης. Οπότε οι εστιαζόμενες κεφαλές αντιμετωπίζουν δυσκολία στην εξέταση δοκιμίων μεγάλου πάχους.



Σχήμα 4.11 : Γραφική παράσταση των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το ηχητικό πεδίο εστιαζόμενης κεφαλής.

Το μήκος εστίασης επηρεάζει μια άλλη παράμετρο του ηχητικού πεδίου των εστιαζόμενων κεφαλών, τη ζώνη εστίασης (focal zone). Η ζώνη εστίασης σχηματίζεται στην περιοχή που συναντώνται οι κορυφές των δύο κώνων του ηχητικού πεδίου (Σχήμα 4.11). Η αρχή και το τέλος της ορίζεται από τα σημεία Z_B και Z_E στο Σχήμα 4.10. Το Z_B εντοπίζεται πριν από το σημείο εστίασης και το Z_E μετά. Στα δύο αυτά σημεία παρουσιάζεται πτώση του πλάτους των σημάτων κατά -6dB. Το μήκος της ζώνης εστίασης δίνεται από τη παρακάτω σχέση (4.4), μέσα από την οποία φαίνεται η εξάρτηση που υπάρχει μεταξύ ζώνης εστίασης και μήκους εστίασης.

$$F_z = N \cdot S_F^2 \cdot \frac{2}{(1 + 0.5 \cdot S_F)} \quad (4.4) \text{ και } S_F = \frac{F}{N} \quad (4.5)$$

F_z =Ζώνη εστίασης (focal zone)

N =μήκος εγγύς πεδίου (near field)

S_F =κανονικοποιημένο μήκος εστίασης (normalized focal length)

F =μήκος εστίασης (focal length)

Παρατηρείται ότι, μείωση του μήκους εστίασης προκαλεί ταυτόχρονη μείωση του μήκους της ζώνης εστίασης, που έχει σαν αποτέλεσμα τη συγκέντρωση περισσότερης ακουστικής ενέργειας, πράγμα που βελτιώνει την ευαισθησία και τη διακριτική ικανότητα της κεφαλής. Τέλος, ένα χαρακτηριστικό, που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ευαισθησία, αλλά και την ικανότητα ανίχνευσης ατελειών, είναι η διάμετρος της δέσμης στο σημείο ελέγχου. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της δέσμης τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της ενέργειας που ανακλάται από μια ατέλεια. Επίσης, αυξάνεται η πιθανότητα ανίχνευσης ατελειών μικρότερου μεγέθους. Η διάμετρος της δέσμης στο σημείο Z_B όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 δίνεται από τη σχέση :

$$BD(-6dB) = 1.02 \frac{F \cdot C}{f \cdot D} \quad (4.6)$$

BD =διάμετρος δέσμης (beam diameter)

C =ταχύτητα του ήχου στο υλικό (material sound velocity)

f =συχνότητα της κεφαλής (frequency)

F =μήκος εστίασης (focal length)

D =διάμετρος πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (element diameter)

4.6 Επιλογή πιεζοηλεκτρικής κεφαλής για τον έλεγχο σύνθετων υλικών

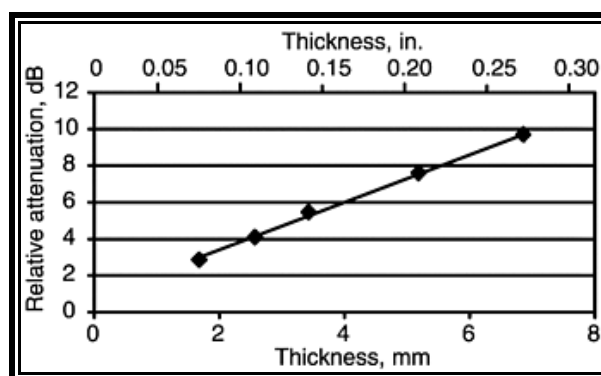
Η επιλογή της κεφαλής που παράγει τα υπερηχητικά κύματα είναι καθοριστική, πρωταρχικά για τη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων της πειραματικής διάταξης των υπερήχων και στη συνέχεια για τη συλλογή και την ποιότητα των δεδομένων από τον έλεγχο των εξεταζόμενων υλικών. Η επιλογή αυτή εξαρτάται από την αλληλεπίδραση της ηχητικής δέσμης της κεφαλής με την ακουστική συμπεριφορά των υλικών. Δηλαδή θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακουστικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου υλικού, ώστε να επιλεγεί η κεφαλή, με εκείνα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, που να διαμορφώνουν την κατάλληλη δέσμη υπερήχων για τον έλεγχο που πρόκειται να διεξαχθεί.

Αρχικά πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ δύο προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τον έλεγχο των υλικών με υπερήχους, δηλαδή του εντοπισμού μιας ατέλειας-βλάβης και του καθορισμού του μεγέθους και της θέσης της. Είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει κεφαλή που να αντιμετωπίζει το ίδιο καλά και τα δύο προβλήματα. Έτσι θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια κεφαλές. Κάποιες για τον εντοπισμό των ατελειών-βλαβών και άλλες για τον καθορισμό των διαστάσεων και της θέσης τους μέσα στο υλικό [7].

Στην αντίθετη περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, θα πρέπει να επιλεγεί μια κεφαλή που να μπορεί να συγκεράσει τις ιδιότητες της τόσο στον εντοπισμό όσο και στη διαστασιολόγηση. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι χαμηλότερης ποιότητας και αξιοπιστίας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να περιγραφούν, η ακουστική συμπεριφορά των πολύστρωτων σύνθετων υλικών κατά τον έλεγχο με υπερήχους, οι δυσκολίες που δημιουργούνται από τη συμπεριφορά αυτή και η αντιμετώπιση τους από την πλευρά της επιλογής της κατάλληλης κεφαλής.

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 (πχ. μέταλλα). 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.



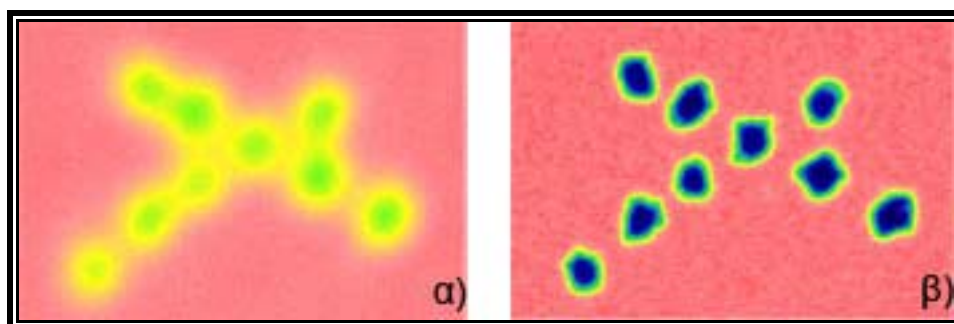
Σχήμα 4.12 : Απόσβεση υπερηχητικών κυμάτων από κεφαλή 5MHz σε δοκίμιο graphite/epoxy ως συνάρτηση του πάχους.

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. Έτσι το πάχος των πολύστρωτων σύνθετων υλικών είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής, καθώς η απόσβεση αυξάνεται με την αύξηση του πάχους (Σχήμα 4.12).

Άρα 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-βλάβη θα πρέπει να έχει μέγεθος μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται, ώστε να υπάρχει σεβαστή πιθανότητα να ανιχνευθεί. Διαφαίνεται ότι για την επιλογή της κεφαλής πρέπει να υπάρχει εκ προοιμίου γνώση του μεγέθους των ατελειών που πρόκειται να αναζητηθούν.

Επιπλέον, η συχνότητα της κεφαλής καθορίζει την ανάλυση και την ευαισθησία της. Ανάλυση είναι η ικανότητα της κεφαλής να μπορεί να ανιχνεύσει και να ξεχωρίσει ατέλειες που βρίσκονται ή μια κοντά στην άλλη, τόσο στο ίδιο επίπεδο, όσο και ως προς το πάχος του υλικού (Σχήμα 4.13).



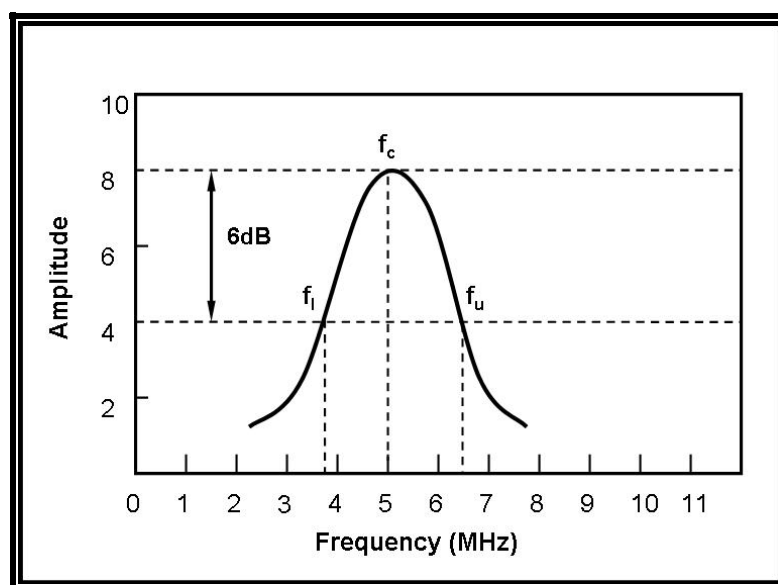
Σχήμα 4.13 : Απεικόνιση αντίθεσης (c-scan) ατελειών με κεφαλή **α)** 20MHz **β)** 50MHz.

Ευαισθησία είναι η ικανότητα της κεφαλής να ανιχνεύει μικρές σε μέγεθος ατέλειες. Οι δύο προαναφερθείσες ιδιότητες αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας όπως φαίνεται στο

παραπάνω Σχήμα 4.13. Η αύξηση της συχνότητας δεν επηρεάζει θετικά μόνο την απόδοση της κεφαλής, δημιουργεί και ανεπιθύμητες παρενέργειες.

Η σημαντικότερη παρενέργεια που εκδηλώνεται, είναι η μείωση της διεισδυτικής ικανότητας της υπερηχητικής δέσμης. Η μείωση αυτή παρατηρείται τόσο στις εστιαζόμενες όσο και στις μη εστιαζόμενες κεφαλές. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο λόγω της απόσβεσης που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά, εάν αναλογιστούμε την προαναφερθείσα ακουσική τους συμπεριφορά. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι, στα σύνθετα υλικά η επιλογή της συχνότητας της κεφαλής είναι συνάρτηση του πάχους του εξεταζόμενου υλικού. 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. Ενδεικτικά για πολύστρωτα σύνθετα υλικά με πάχος μικρότερο από 6.4mm μπορούν να χρησιμοποιηθούν συχνότητες από 10 έως 25MHz, ενώ για μεγαλύτερα πάχη κεφαλές με συχνότητες από 1-5MHz [8]. Η εκτίμηση αυτή είναι γενική, η τελική επιλογή εξαρτάται από την εμπειρία του χειριστή, από το υλικό που εξετάζεται και από τη μέθοδο κατασκευής του.

Το εύρος ή φάσμα συχνοτήτων (bandwidth) είναι επίσης ένα κατασκευαστικό στοιχείο που καθορίζει την απόδοση μιας κεφαλής. Κάθε πιεζοηλεκτρική κεφαλή έχει μια κεντρική συχνότητα, στην οποία τα υπερηχητικά κύματα παράγονται και λαμβάνονται πιο αποτελεσματικά. Με βάση αυτή τη συχνότητα, που δίδεται από τον κατασκευαστή και χαρακτηρίζει την κεφαλή ορίζεται το εύρος συχνοτήτων.



Σχήμα 4.14 : Γραφική παράσταση του εύρους συχνοτήτων κεφαλής με κεντρική συχνότητα 5MHz.

$$BW = \frac{f_u - f_l}{f_c} \times 100 \quad (4.7)$$

BW=εύρος ή φάσμα συχνοτήτων (bandwidth)

f_u=μεγαλύτερη συχνότητα με πτώση 6dB

f_l=μικρότερη συχνότητα με πτώση 6dB

f_c=κεντρική συχνότητα

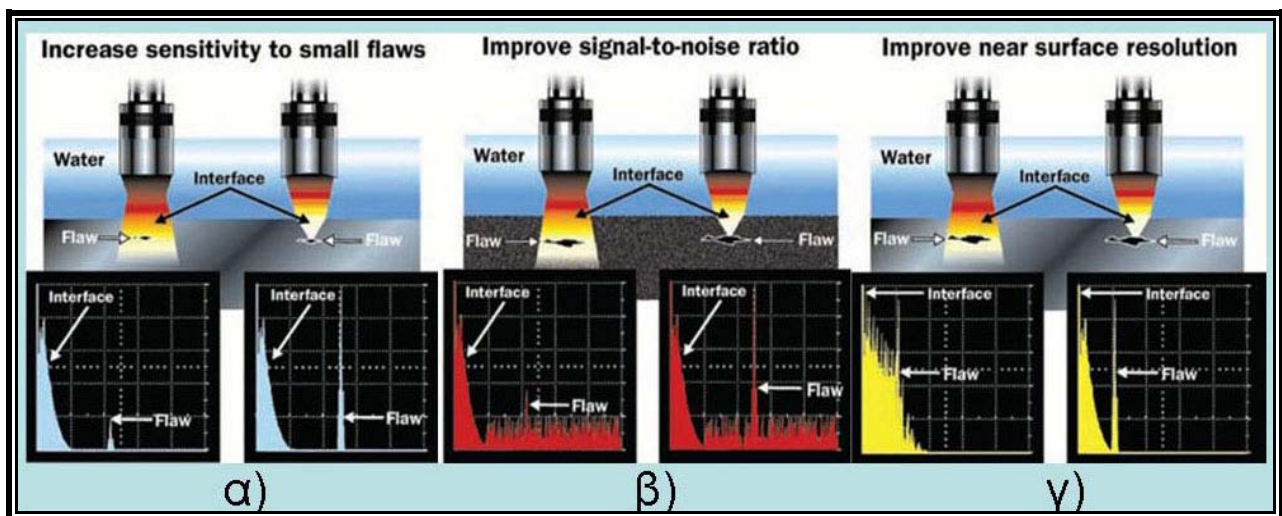
Έτσι το εύρος των συχνοτήτων μιας κεφαλής αποτελείται από όλες τις συχνότητες μεταξύ της υψηλότερης και της χαμηλότερης συχνότητας, των οποίων το πλάτος (amplitude) σημειώνει πτώση κατά 6dB σε σχέση με το πλάτος της κεντρικής συχνότητας (Σχήμα 4.14) και δίνεται από τη σχέση (4.7) [11]. Το φάσμα συχνοτήτων περιγράφει τις συχνότητες που είναι ικανή η κεφαλή να ανιχνεύσει από ανακλάσεις που προέρχονται από το εξεταζόμενο υλικό. Η διαφοροποίηση της συχνότητας των κυμάτων από την κεντρική συχνότητα της κεφαλής οφείλεται στο γεγονός, ότι καθώς τα υπερηχητικά κύματα διαδίδονται και ανακλώνται μέσα στα υλικά αλλάζει το μήκος κύματός τους και κατ'επέκταση η συχνότητα τους [9]. Το φάσμα συχνοτήτων εξαρτάται από το υλικό απόσβεσης που βρίσκεται πίσω από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια κεφαλή με ισχυρή απόσβεση θα έχει ευρύ φάσμα συχνοτήτων (broadband transducer) και θα παρουσιάζει υψηλότερη ανάλυση αλλά μικρότερη ευαισθησία και διεισδυτική ικανότητα. Αντίθετα μια κεφαλή με στενό φάσμα συχνοτήτων (narrowband transducer) θα παρουσιάζει καλή διεισδυτικότητα και ευαισθησία αλλά χαμηλή ανάλυση [5].

Έτσι εφόσον επιλεγεί η κεντρική συχνότητα της κεφαλής και λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του υλικού αλλά και μέχρι ποιο σημείο του, ως προς το πάχος, θα προχωρήσει ο έλεγχος επιλέγεται το εύρος συχνοτήτων. Εκεί που είναι σημαντική η ανάλυση, για παράδειγμα κατά τον εντοπισμό ατελειών κοντά στην επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού, η χρήση μιας κεφαλής με ευρύ φάσμα συχνοτήτων είναι αναγκαία. Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει η εξέταση σε όλο το πάχος του υλικού, τότε η υψηλή διεισδυτική ικανότητα είναι αναγκαία και επιλέγεται μια κεφαλή με στενό εύρος συχνοτήτων [5].

Η διάμετρος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι μια ακόμα παράμετρος που επηρεάζει τον έλεγχο των υλικών. Καθορίζει τη διάμετρο της ηχητικής δέσμης τόσο στις εστιαζόμενες όσο και στις μη εστιαζόμενες κεφαλές, την απόκλιση της ηχητικής δέσμης (σχέση (4.2)) και το μήκος του εγγύς πεδίου (σχέσεις (4.1 α) (4.2 β)). 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.

Τέλος, όταν η ευαισθησία και η ανάλυση είναι τα κύρια ζητούμενα του ελέγχου με υπερήχους, τότε η χρήση εστιαζόμενων κεφαλών ενδείκνυται. Με την επιλογή εστιαζόμενης κεφαλής αυξάνεται η πιθανότητα ανίχνευσης μικρών σε μέγεθος ατελειών (Σχήμα 4.15α), βελτιώνεται ο λόγος σημάτων-θορύβου (signal to noise ratio) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15β και επίσης βελτιώνεται η ανάλυση κοντά στην πάνω επιφάνεια των δοκιμίων, σε σχέση με τις μη εστιαζόμενες κεφαλές (Σχήμα 4.15 γ).



Σχήμα 4.15 : Πλεονεκτήματα εστιαζόμενων κεφαλών σε σχέση με τις μη εστιαζόμενες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΥΠΕΡΗΧΟΥΣ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

5.1 Εισαγωγή

Ο έγκαιρος εντοπισμός των ατελειών-βλαβών, πριν προξενήσουν καταστροφική αστοχία σε ένα σύνθετο υλικό, είναι ο σκοπός της εφαρμογής των μη καταστροφικών μεθόδων ελέγχου. Η μέθοδος των υπερήχων είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μη καταστροφική μέθοδος στα σύνθετα υλικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα ως μέθοδος, τόσο κατά τη λειτουργία μιας κατασκευής με τη χρήση φορητών συσκευών, όσο και σε περιβάλλον εργαστηρίου. Επίσης είναι μια αρκετά ευαίσθητη μέθοδος, που μπορεί να ανιχνεύσει και να εντοπίσει τους περισσότερους τύπους ατελειών-βλαβών οι οποίες παρουσιάζονται στα σύνθετα υλικά. Στη μέθοδο των υπερήχων οι ατέλειες, οι βλάβες, καθώς και ορισμένες ιδιότητες των σύνθετων υλικών εκφράζονται από μεταβολές στην ηχητική πίεση των υπερηχητικών κυμάτων. Οι μηχανικές αυτές μεταβολές μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν, να αναλυθούν και να παρουσιαστούν με τη μορφή διάφορων απεικονίσεων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μέθοδος των υπερήχων, οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου και θα αναλυθούν οι βασικές αρχές λειτουργίας, έχοντας ως βάση την πραγματική εξέταση σύνθετων υλικών.

5.2 Διατάξεις ελέγχου με υπερήχους

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν διάφορους τύπους ατελειών, οι οποίες δημιουργούνται τόσο κατά τη λειτουργία τους όσο και κατά την κατασκευή τους. Για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ασφαλής λειτουργία τους, είναι απαραίτητος ο έλεγχος τους με τη χρήση μη καταστροφικών μεθόδων. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου σύνθετων υλικών είναι αυτή των υπερήχων. Ευρέως, με τη μέθοδο των υπερήχων χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την εξέταση των σύνθετων υλικών, η τεχνική της διέλευσης (through transmission) και η τεχνική της παλμοηχούς (pulse echo).

Ο μη καταστροφικός έλεγχος με τη μέθοδο των υπερήχων διεξάγεται πριν την αστοχία, είτε σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας, παρακολουθώντας τη σύνθετη κατασκευή σε τακτά χρονικά διαστήματα με τη χρήση φορητών συσκευών (Σχήμα 5.1 β), είτε αποσυναρμολογώντας σε τακτά χρονικά διαστήματα το υλικό που πρόκειται να ελεγχθεί και μεταφέροντας αυτό, για έλεγχο σε εργαστηριακές εγκαταστάσεις, όπου ελέγχεται με τη χρήση σταθερών αυτοματοποιημένων διατάξεων εμβαπτιζόμενου ελέγχου.

Με τις φορητές συσκευές γίνεται χειροκίνητος σημειακός έλεγχος, με επαφή της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής της διάταξης πάνω στο εξεταζόμενο υλικό, αφού πρώτα η περιοχή ελέγχου έχει καλυφθεί

με ένα στρώμα μέσου σύζευξης (Σχήμα 5.1 α). Με το χειροκίνητο έλεγχο γίνονται συνήθως παχυμετρήσεις και ανίχνευση των ατελειών-βλαβών. Τα τελευταία χρόνια όμως γίνεται προσπάθεια για τη δημιουργία φορητών συσκευών που να μπορούν να εντοπίσουν και να διαστασιολογήσουν ατέλειες (Σχήμα 5.1 γ), περέχοντας εκτός από την απεικόνιση A-scan και άλλες απεικονίσεις όπως τις B-scan και C-scan.



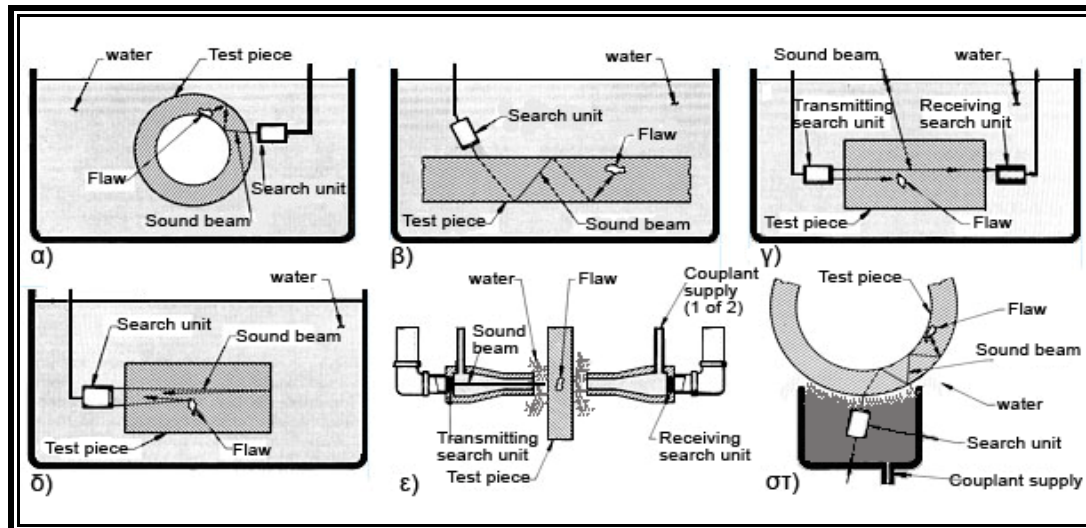
Σχήμα 5.1 : α) Χειροκίνητη εξέταση με φορητή συσκευή υπερήχων σε δοχείο πίεσης από σύνθετα υλικά β) φορητή συσκευή υπερήχων γ) φορητή συσκευή με δυνατότητες εντοπισμού και διαστασιολόγησης ατελειών.

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρουσιάζονται οι αυτοματοποιημένες διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου, καθώς αυτού του είδους η διάταξη χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

5.3 Αυτοματοποιημένες διατάξεις υπερήχων εμβαπτιζόμενου ελέγχου

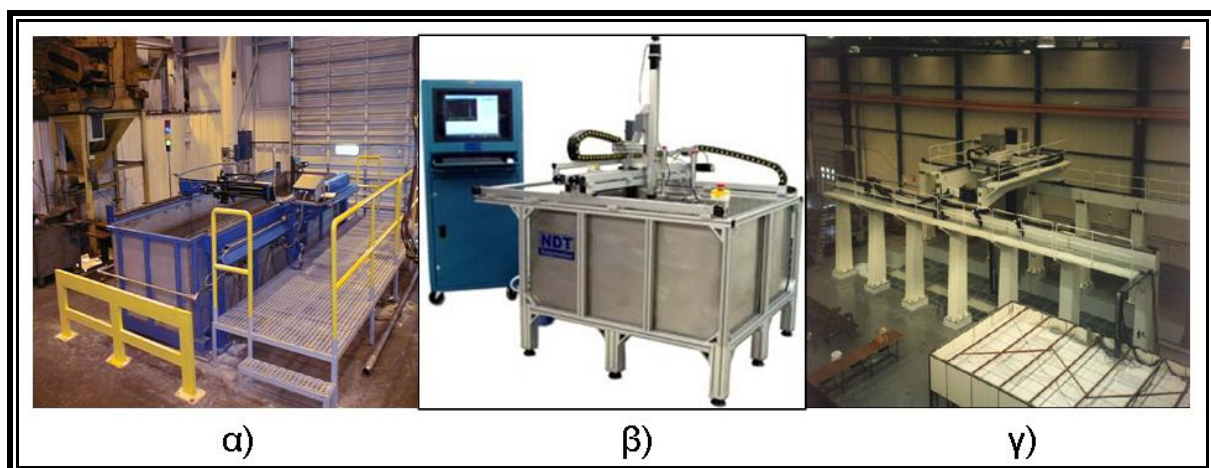
Στον εμβαπτιζόμενο έλεγχο τόσο το ελεγχόμενο υλικό όσο και η κεφαλή παραγωγής υπερήχων βρίσκονται βυθισμένα σε δεξαμενή. Η δεξαμενή περιέχει το μέσο σύζευξης που είναι κάποιο υγρό, συνήθως το νερό, το οποίο αναλαμβάνει να διαδώσει την υπερηχητική δέσμη από την κεφαλή στο εξεταζόμενο υλικό. Η υπερηχητική δέσμη κατευθύνεται στο εξεταζόμενο υλικό και προσπίπτει συνήθως κάθετα σ'αυτό (normal beam inspection). Τότε χρησιμοποιούνται διαμήκη υπερηχητικά κύματα. Υπάρχει όμως η δυνατότητα, η πρόσπτωση της υπερηχητικής δέσμης να γίνεται υπό γωνία και να χρησιμοποιηθούν γωνιακές τεχνικές ελέγχου (angle beam inspection). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται εγκάρσια κύματα ή συνδυασμός εγκαρσίων και διαμήκων κυμάτων ή ακόμα και κύματα του Lamb, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης που επιλέγεται. Στον έλεγχο με εμβάπτιση των εξεταζόμενων υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος της παλμοχούς (Σχήμα 5.2 α,β,δ) και της διέλευσης (Σχήμα 5.2 γ), ανάλογα με τη γεωμετρία του υλικού, με το είδος των ατελειών-βλαβών που αναζητούνται και με το είδος του υλικού που εξετάζεται.

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 (Σχήμα 5.3 β) χρησιμοποιούνται για την εξέταση αντίστοιχων σε μέγεθος τεμαχίων.



Σχήμα 5.2 : Γραφική παράσταση διάφορων τεχνικών εμβαπτιζόμενου ελέγχου. **α)** εξέταση με τη μέθοδο της παλμοχούς σωλήνων με γωνιακή δέσμη **β)** εξέταση με γωνιακή δέσμη με τη μέθοδο της παλμοχούς επίπεδων πιακών **γ)** εξέταση με τη μέθοδο της διέλευσης **δ)** εξέταση με τη μέθοδο της παλμοχούς με κάθετη δέσμη **ε)** squirter search unit **στ)** bubbler search unit

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 (Σχήμα 5.3 α) αποτελούνται από τα ίδια βασικά μέρη αλλά υπάρχουν και διατάξεις που δεν χρησιμοποιούν δεξαμενή.



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

Στις διατάξεις αυτές (Σχήμα 5.3 γ) δεν υπάρχει δεξαμένη για την εμβάπτιση των εξεταζόμενων υλικών, αλλά χρησιμοποιούνται ακροφύσια (squirters) (Σχήμα 5.2 ε) 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.

5.4 Βασικές μέθοδοι ελέγχου με υπερήχους

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι εξέτασης των υλικών με υπερήχους, που χρησιμοποιούνται στα αυτοματοποιημένα συστήματα εμβαπτιζόμενου ελέγχου. 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 υπερηχητικών κυμάτων [5]. 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.

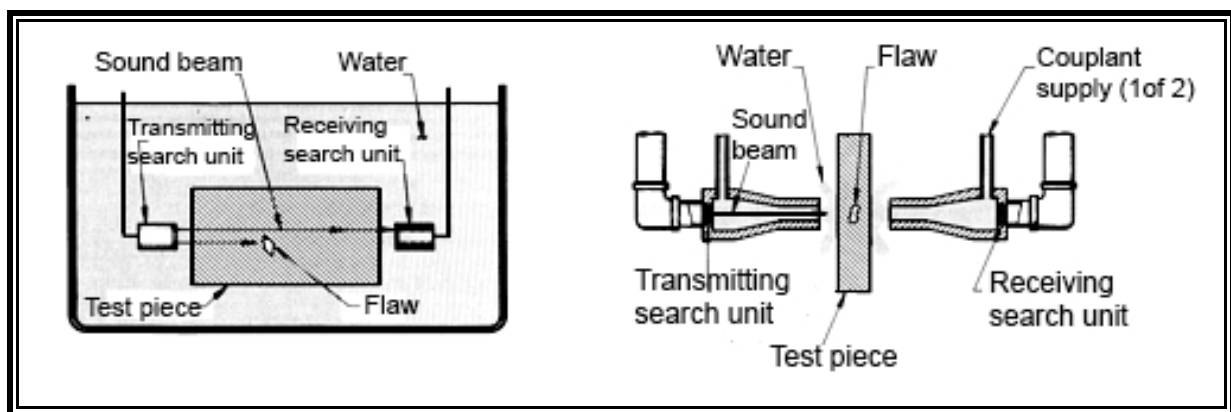
Η μέθοδος της παλμοηχούς είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στο μη καταστροφικό έλεγχο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι απαιτείται η πρόσβαση μόνο σε μια επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού. Στηρίζεται στην ανίχνευση ανακλάσεων της υπερηχητικής δέσμης, που προκαλούνται από ατέλειες-βλάβες και διεπιφάνειες μέσα στα ελεγχόμενα υλικά. Η μέθοδος της παλμοηχούς χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών-βλαβών και για την εκτέλεση παχυμετρήσεων.

Η μέθοδος της διέλευσης είναι λιγότερο χρησιμοποιούμενη σε σχέση με τη μέθοδο της παλμοηχούς. Αυτό οφείλεται στο ότι απαιτείται, για την εφαρμογή της μεθόδου, η γεωμετρία του εξεταζόμενου υλικού να παρέχει την πρόσβαση σε δύο απέναντι επιφάνειες. Με τη μέθοδο αυτή μετράται η ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, καθώς αυτά διαπερνούν το εξεταζόμενο υλικό και συγκρίνεται με την ένταση των κυμάτων που προκύπτει από την εξέταση ενός πρότυπου αναφοράς (reference standard). Με την μέθοδο της διέλευσης είναι δυνατή η ανίχνευση των ατελειών-βλαβών, αλλά είναι αδύνατος ο εντοπισμός τους μέσα στο πάχος του εξεταζόμενου υλικού [6].

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν οι προαναφερθείσες μέθοδοι, θα παρουσιαστούν οι διάφορες απεικονίσεις που προκύπτουν από την λήψη και επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και τα βασικά μέρη μιας τυπικής διάταξης εμβαπτιζόμενου ελέγχου με υπερήχους.

5.5 Η μέθοδος της διέλευσης (Through transmission)

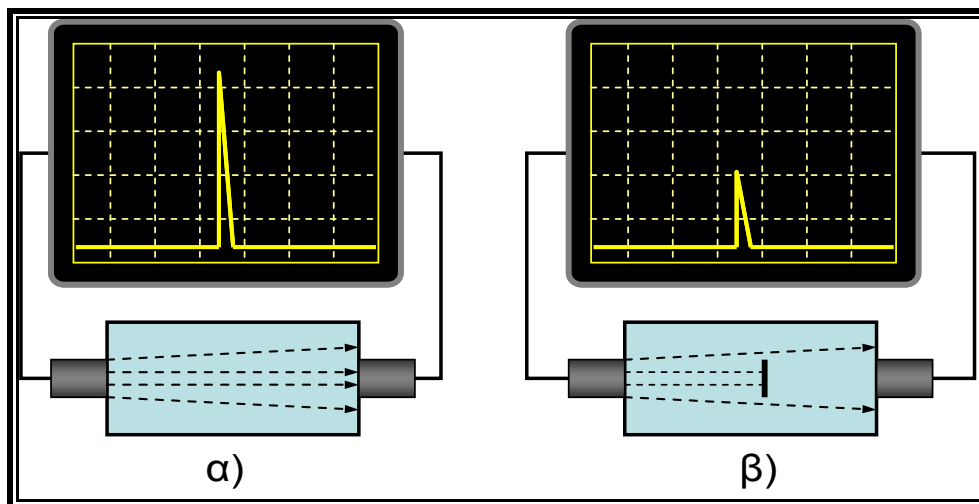
Η μέθοδος της διέλευσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ατελειών-βλαβών, για τον χαρακτηρισμό υλικών και για την παχυμέτρηση κατασκευών με μεγάλο πάχος και υψηλό συντελεστή απόσβεσης. Οι διατάξεις εμβαπτιζόμενου ελέγχου που λειτουργούν με τη συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιούν δύο πιεζοηλεκτρικές κεφαλές, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις απέναντι επιφάνειες του εξεταζόμενου υλικού και είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες μεταξύ τους (Σχήμα 5.4) [8]. Οι κεφαλές κινούνται ταυτόχρονα σαρώνοντας την εξεταζόμενη επιφάνεια. Η μια κεφαλή εκπέμπει τα υπερηχητικά κύματα (Transmitting search unit), ενώ η άλλη έχει παθητικό ρόλο και λειτουργεί ως δέκτης της δέσμης των υπερήχων (Receiving search unit), που διέρχεται μέσα από το εξεταζόμενο υλικό.



Σχήμα 5.4 : Διάταξη πιεζοηλεκτρικών κεφαλών στην μέθοδο της διέλευσης κατά τον εμβαπτιζόμενο έλεγχο.

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-βλαβών, η ύπαρξη διαχωριστικών επιφανειών και η ακουστική αντίσταση του υλικού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, όταν η υπερηχητική δέσμη συναντήσει μια ατέλεια ή μια επιφάνεια ανάκλασης, ένα μέρος της ανακλάται και έτσι η ένταση της, που φτάνει στην κεφαλή-δέκτη είναι μικρότερη από αυτή της αρχικά εκπεμπόμενης δέσμης. Έτσι οι ατέλειες-βλάβες 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 (reference standard) κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό και με την ίδια διαδικασία με το εξεταζόμενο. Όταν υπάρξει ατέλεια-βλάβη το ύψος του παλμού, που εμφανίζεται στην οθόνη είναι μικρότερο από το ύψος του παλμού από την εξέταση του προτύπου αναφοράς (Σχήμα 5.5 β).

Για να είναι αποτελεσματική η μέθοδος πρέπει οι ανιχνευόμενες ατέλειες να είναι μεγαλύτερου μεγέθους από το μήκος κύματος της υπερηχητικής δέσμης, γιατί διαφορετικά λόγω του φαινομένου της περιθλάσεως η δέσμη περνά κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της πίσω από τα εμπόδια [6].



Σχήμα 5.5 : Η μέθοδος της διέλευσης **α)** στο πρότυπο αναφοράς **β)** σε κατασκευή από το ίδιο υλικό που περιέχει ατέλεια.

Η μέθοδος της διέλευσης παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά δεν μπορεί να προσδιορίσει σε πιο σημείο ως προς το πάχος του εξεταζόμενου υλικού βρίσκεται η ατέλεια-βλάβη. Επίσης δεν έχει την δυνατότητα να ξεχωρίσει ατέλειες-βλάβες που παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά απόσβεσης. Έτσι για παράδειγμα, όταν εφαρμόζεται η μέθοδος για την εξέταση σύνθετων υλικών δεν μπορεί να ξεχωρίσει τις αποκολλήσεις από τα εγκλείσματα αέρα, καθώς παρουσιάζουν την ίδια απόσβεση [8].

Δύο ακόμα μειονεκτήματα παρουσιάζονται κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι πρώτον, η επίτευξη ιδανικής σύζευξη μεταξύ των κεφαλών και του εξεταζόμενου υλικού και δεύτερον η 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.

Τα δύο αυτά λειτουργικά προβλήματα σήμερα έχουν αντιμετωπιστεί με την χρήση αυτοματοποιημένων διατάξεων εμβαπτιζόμενου ελέγχου. Παρόλα αυτά η μέθοδος δεν είναι διαδεδομένη στη βιομηχανία σκαφών, καθώς η απαίτηση της μεθόδου για την ύπαρξη πρόσβασης σε δύο απέναντι επιφάνειες του εξεταζόμενου υλικού αποτελεί σοβαρό μειονέκτημα.

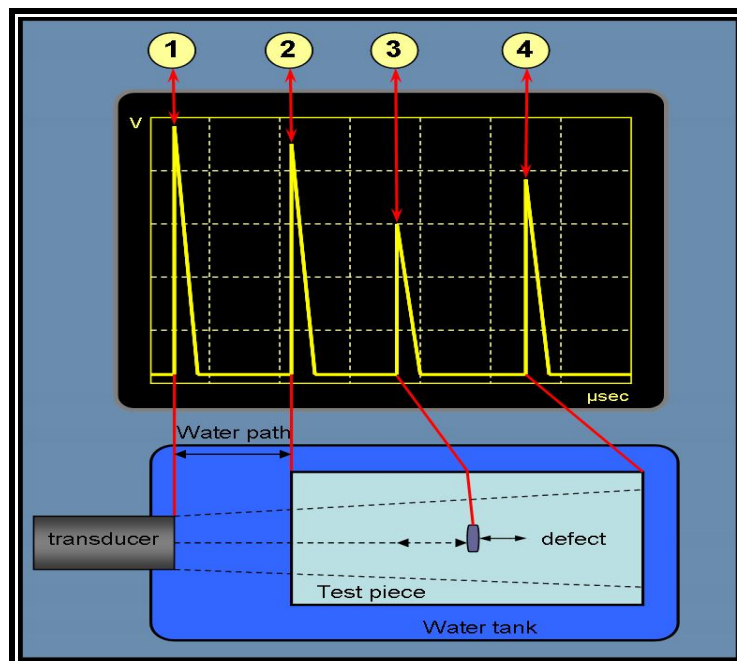
5.6 Η μέθοδος της παλμοχούς (pulse echo method)

Η μέθοδος της παλμοχούς είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος στον εμβαπτιζόμενο έλεγχο με υπερήχους. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό ατελειών-βλαβών για τον υπολογισμό των ελαστικών σταθερών (E,ν,G) υλικών και για παχυμετρήσεις.

Στη μέθοδο της παλμοχούς 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 ενέργειας τους ή μέρος της ανακλάται. Το ποσό της ανακλώμενης ενέργειας καταγράφεται καθώς και η χρονική καθυστέρηση μεταξύ του αρχικού παλμού και της λαμβανόμενης ανάκλασης. Πιο αναλυτικά, οι περισσότερες διατάξεις υπερήχων που λειτουργούν με τη μέθοδο της παλμοχούς αποτελούνται σε γενικές γραμμές από τις παρακάτω συσκευές :

- Ηλεκτρονικό κύκλωμα μέτρησης χρόνου (electronic clock).
- Ηλεκτρονική γεννήτρια παραγωγής σημάτων (ηλεκτρικών παλμών) εναλλασσόμενου δυναμικού (electronic signal generator or pulser).
- Πιεζοηλεκτρική κεφαλή (transducer, probe).
- Συσκευή εξομάλυνσης και ανόρθωσης σημάτων (echo-signal amplifier).
- Συσκευή απεικόνισης (display device).

Μια διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου με τη μέθοδο της παλμοχούς λειτουργεί σύμφωνα με τα παρακάτω και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 : Γραφική παράσταση της αρχής λειτουργίας της μεθόδου της παλμοχούς.

Σε δεδομένα χρονικά διαστήματα το ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης χρόνου ενεργοποιεί τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικών παλμών, η οποία μέσω καλωδίου τροφοδοτεί με υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενη τάση την πιεζοηλεκτρική κεφαλή. Ταυτόχρονα η ίδια τάση ανορθώνεται και ενισχύεται κατάλληλα και οδηγείται στο οριζόντιο ζεύγος πλακών της συσκευής απεικόνισης

(οθόνη). Έτσι η δέσμη των ηλεκτρονίων της οθόνης δέχεται την κατακόρυφη απόκλιση και εμφανίζεται ο παλμός **1** (Σχήμα 5.6), ο οποίος ονομάζεται αρχικός παλμός (initial pulse).

Στη συνέχεια η πιεζοηλεκτρική κεφαλή δεχόμενη τους ηλεκτρικούς παλμούς παράγει υπερηχητικά κύματα, τα οποία διαδίδονται στο μέσο σύζευξης μέχρι να φτάσουν στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου (test piece). Η απόσταση από την κεφαλή παραγωγής υπερήχων μέχρι την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου, στον εμβαπτιζόμενο έλεγχο καταλαμβάνεται από το μέσο σύζευξης και στην αγγλική ορολογία ονομάζεται <<water path>> (Σχήμα 5.6). Φτάνοντας τα υπερηχητικά κύματα στην πάνω 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. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο της κεφαλής μετατρέπει την ενέργεια του ανακλώμενου υπερηχητικού κύματος σε ηλεκτρικό δυναμικό, το οποίο περνώντας από τη συσκευή εξομάλυνσης και ανόρθωσης, οδηγείται όπως και προηγουμένως στη συσκευή απεικόνισης και εμφανίζεται ο παλμός **2** (Σχήμα 5.6). Ο παλμός **2** της πάνω επιφάνειας εμφανίζεται με χρονική καθυστέρηση (delay), η οποία εκφράζεται από την απόσταση στην οθόνη, μεταξύ του αρχικού παλμού **1** και του παλμού της πάνω επιφάνειας **2**. Ο χρόνος αυτός είναι ίσος με το χρόνο που χρειάζονται τα υπερηχητικά κύματα για να καλύψουν δύο φορές την απόσταση του μέσου σύζευξης μεταξύ κεφαλής και δοκιμίου.

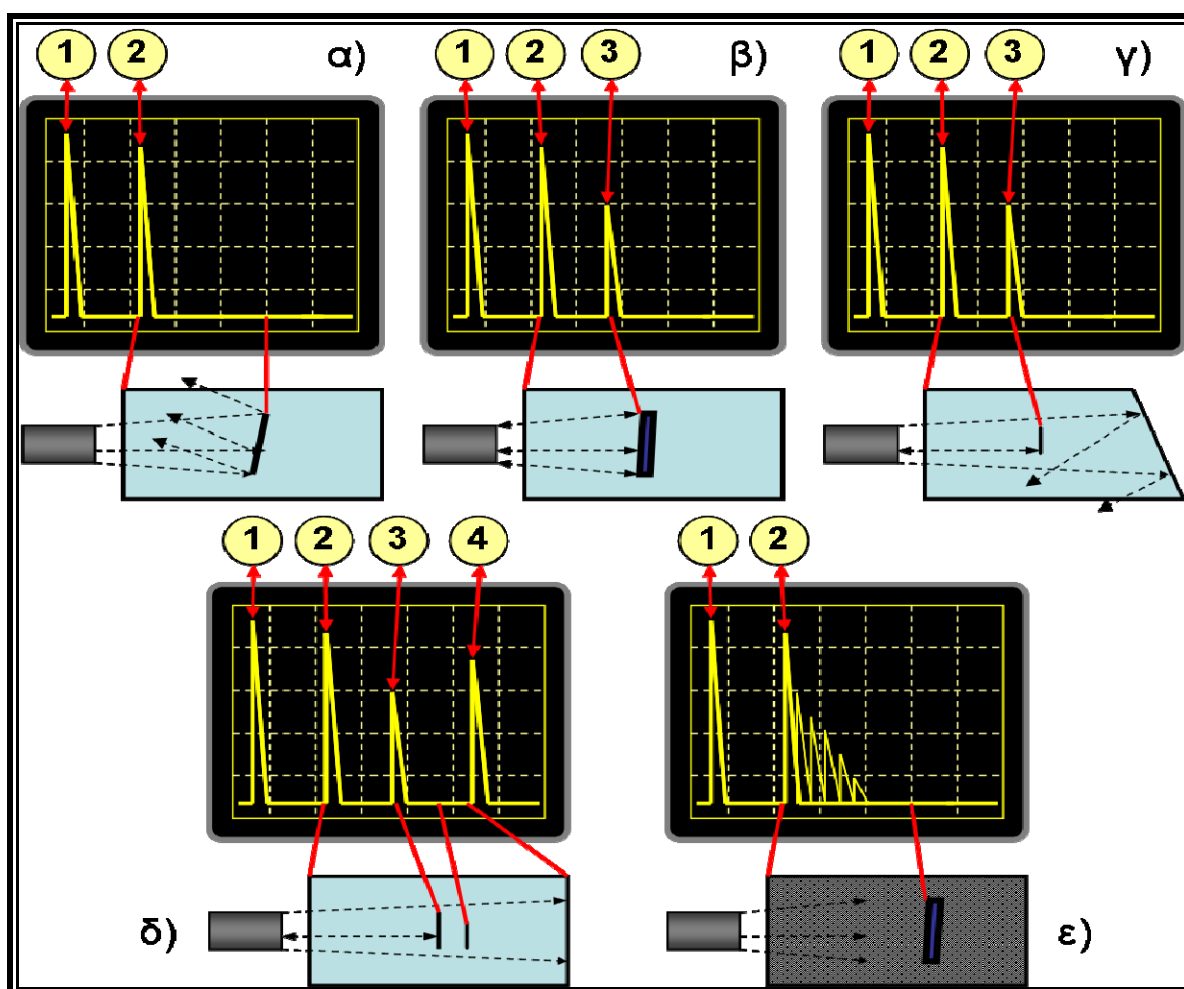
Το μέρος της υπερηχητικής δέσμης που εισέρχεται μέσα στο εξεταζόμενο υλικό διαδίδεται με ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από το υλικό. Στην πορεία της η δέσμη ενδέχεται να συναντήσει κάποια ατέλεια-ανακλαστήρα, η οποία να είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης. Τότε ένα ποσό της ενέργειας της εισερχόμενης 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 τους παλμούς **1** και **2** εμφανίζεται στην οθόνη ο παλμός **3** (Σχήμα 5.6) ο οποίος αντιστοιχεί στην ανάκλαση που δημιουργεί η ατέλεια. Παρατηρείται ότι το ύψος του παλμού **3** (amplitude) είναι μικρότερο από το ύψος των προηγούμενων παλμών. 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 η υπερηχητική δέσμη 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 **4** (Σχήμα 5.6) της πίσω επιφάνειας που στην αγγλική ορολογία ονομάζεται <<back wall echo>>. 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 συνεισφορά της εμφάνισης του κατά τον έλεγχο με υπερήχους θα αναλυθεί σε ξεχωριστή παράγραφο.

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.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν ορισμένες περιπτώσεις απεικονίσεων κατά την ανίχνευση ατελειών με τη μέθοδο της παλμοχούς που η εμφάνιση τους, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμό δημιουργούν τις προαναφερθείσες δυσκολίες, ιδιαίτερα στον έλεγχο των σύνθετων υλικών. Στο παρακάτω Σχήμα 5.7 φαίνονται πέντε απεικονίσεις οι οποίες όταν εμφανίζονται προκαλούν αβεβαιότητα κατά την ανίχνευση ατελειών.



Σχήμα 5.7 : Γραφική παράσταση διάφορων απεικονίσεων με τη μέθοδο της παλμοχούς. **α)** Ατέλεια που δεν είναι κάθετη ως προς τον ηχητικό άξονα της κεφαλής. **β)** Ατέλεια συγκρίσιμη με τη διάμετρο της υπερηχητικής δέσμης, απώλεια της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας. **γ)** Η πίσω επιφάνεια δεν είναι κάθετη στον ηχητικό άξονα της δέσμης, απώλεια της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας. **δ)** Αδυναμία ανίχνευσης ατέλειας λόγω της ύπαρξης μεγαλύτερης που την υπερκαλύπτει. **ε)** Ισχυρή απόσβεση της υπερηχητικής δέσμης, παρουσία θορύβου δεν υπάρχουν ανακλάσεις της ατέλειας και της πίσω επιφάνειας.

Αρχικά στο Σχήμα 5.7α) έχουμε την περίπτωση στην οποία ο προσανατολισμός της ατέλειας είναι τέτοιος ώστε να ανακλά την υπερηχητική δέσμη εκτός του ηχητικού άξονα της κεφαλής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται παλμός στην οθόνη που να υποδηλώνει την ύπαρξη της ατέλειας. Επίσης όταν το μέγεθος της ατέλειας είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο της ηχητικής δέσμης, τότε δεν εμφανίζεται ούτε η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας. Στο Σχήμα 5.7β) παρουσιάζεται μια όμοια περίπτωση μόνο που τώρα η ατέλεια είναι κάθετη στον ηχητικό άξονα της δέσμης και είναι αρκετά μεγάλου μεγέθους ώστε να ανακλά εξολοκλήρου την υπερηχητική δέσμη. Η διάταξη αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρής ανάκλασης με παλμό ανάλογου ύψους **3**, αλλά και ταυτόχρονα την εξαφάνιση του παλμού της πίσω επιφάνειας.

Μια όμοια απεικόνιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7γ) όπου εμφανίζονται ο αρχικός παλμός **1**, ο παλμός της πάνω επιφάνειας **2** και ο παλμός από την ατέλεια **3**. Η ατέλεια στην περίπτωση αυτή είναι μικρού μεγέθους, προσανατολίζεται κάθετα στην ηχητική δέσμη και αφήνει μεγάλο μέρος της να φτάσει στην πίσω επιφάνεια του δοκιμίου. Παρά ταύτα λόγω της έλλειψης παραλληλίας της πάνω και της πίσω επιφάνειας η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας δεν φτάνει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή και έτσι δεν εμφανίζεται ο παλμός της.

Στην περίπτωση του Σχήματος 5.7δ) υπάρχουν δύο ατέλειες που η μια υπερκαλύπτει την άλλη και εμποδίζει την ανίχνευση της. Το φαινόμενο αυτό στην αγγλική ορολογία ονομάζεται *masking* [7]. Στο ίδιο φαινόμενο μπορεί να αναχθεί και η περίπτωση β) του Σχήματος 5.7 όπου το μέγεθος της ατέλειας εμποδίζει την υπερηχητική δέσμη να φτάσει στην πίσω επιφάνεια. Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται πολύ συχνά κατά τον έλεγχο των σύνθετων υλικών ιδιαίτερα σε υλικά που αποτελούνται από στρώσεις μεγάλου βάρους. Οι ισχυρές ανακλάσεις των στρώσεων αυτών δεν επιτρέπει την ανίχνευση ατελειών, οι οποίες βρίσκονται στις επόμενες στρώσεις.

Τέλος στο Σχήμα 5.7ε) η υπερηχητική δέσμη διαδίδεται σ' ένα υλικό που παρουσιάζει υψηλή απόσβεση. Τέτοια ηχητική συμπεριφορά παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά, γεγονός που απορρέει από την ετερογενή δομή τους. Στην περίπτωση αυτή λόγω την διασποράς και της απορρόφησης η ηχητική δέσμη δεν φτάνει να ανιχνεύσει την ατέλεια όπως επίσης δεν φτάνει στην πίσω επιφάνεια. Ειδικά στα σύνθετα υλικά χαρακτηριστικό της διασποράς είναι οι κοντινές ανακλάσεις των οποίων το πλάτος (*amplitude*) μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μέσα στο υλικό (Σχήμα 5.7ε). Οι κοντινές αυτές ανακλάσεις ονομάζονται «θόρυβος» ή «γρασίδι» (*grass*) [7]. Μέσα στους παλμούς αυτούς ενδεχομένως να βρίσκεται και παλμός που προέρχεται από την ανάκλαση κάποιας ατέλειας. Σε αυτό το ενδεχόμενο επειδή είναι δύσκολο να διαχωριστεί από τον υπόλοιπο θόρυβο δεν μπορούν να βγουν συμπεράσματα για την ύπαρξη ατέλειας.

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.

5.7 Μέθοδοι απεικόνισης δεδομένων στα αυτοματοποιημένα συστήματα υπερήχων με τη μέθοδο της παλμοχούς

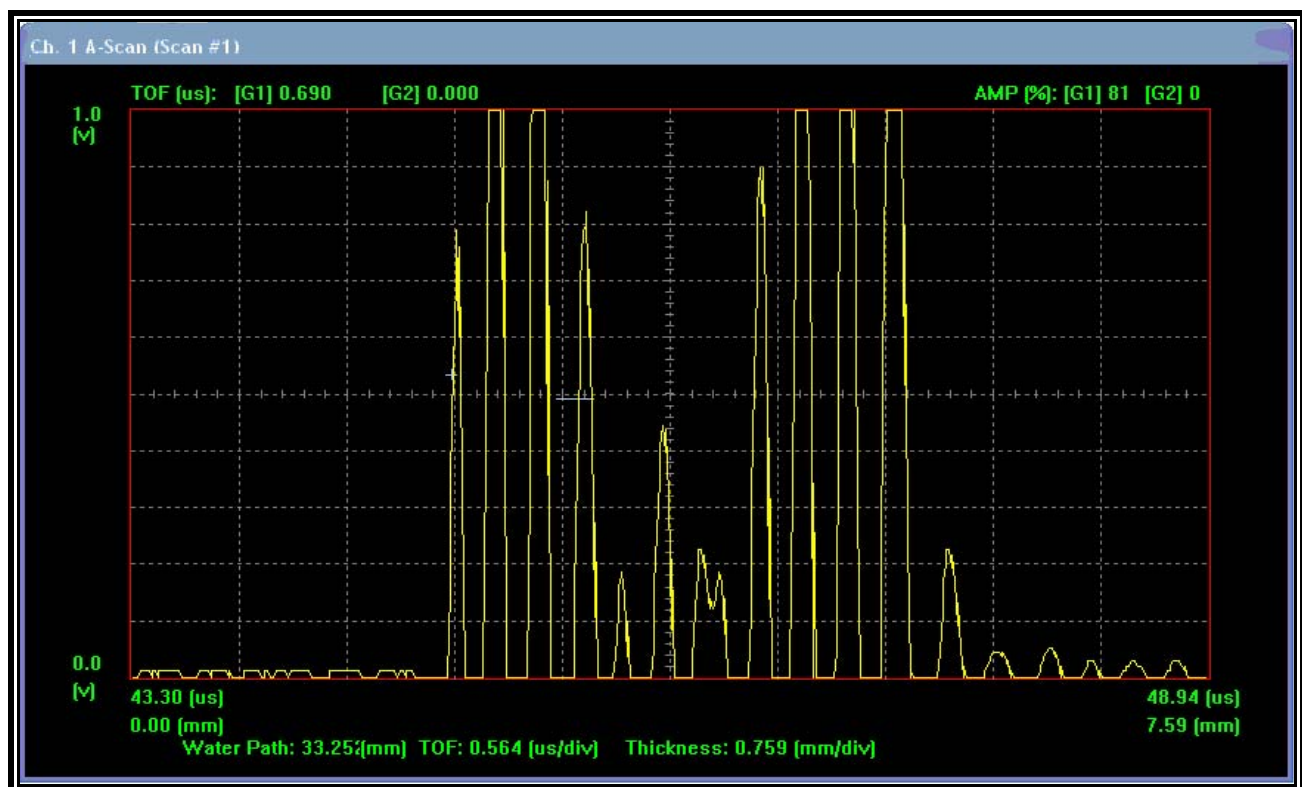
Στα αυτοματοποιημένα συστήματα εμβαπτιζόμενου ελέγχου με υπερήχους υπάρχουν τρεις μορφές απεικόνισης δεδομένων. Οι μορφές αυτές είναι :

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

Η διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου ULTRAPAC σε συνδυασμό με το λειτουργικό σύστημα ULTRAWIN, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του ελέγχου των δοκιμίων, παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης των δεδομένων και στις τρεις μορφές. Η ανάλυση των παραπάνω απεικονίσεων, που θα ακολουθήσει, θα στηριχτεί πάνω σε πραγματικά δεδομένα τα οποία ελήφθησαν κατά την εξέταση των δοκιμίων.

5.7.1 Η απεικόνιση εύρους (Amplitude-scan) A-scan

Η απεικόνιση εύρους αποτελεί την παρουσίαση του πλάτους των σημάτων, που λαμβάνονται από την πιεζοηλεκτρική σε συνάρτηση με το χρόνο διάδοσης τους και προέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου.



Σχήμα 5.8 : Απεικόνιση A-scan από δοκίμιο Carbon-epoxy κατασκευασμένο με τη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (vacuum infusion).

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ένα τυπικό A-scan από το δοκίμιο Carbon-epoxy. Ο οριζόντιος άξονας είναι ο άξονας του χρόνου και μετράται σε msec. Ο κατακόρυφος άξονας μετρά το πλάτος (amplitude) των σημάτων-παλμών και είναι βαθμονομημένος σε volt. Τόσο ο οριζόντιος άξονας, όσο και ο κατακόρυφος είναι χωρισμένοι σε δέκα υποδιαστήματα (divisions).

Όταν ένας παλμός εμφανίζεται στην οθόνη του A-scan καταγράφεται το πλάτος του, σε volt και ο χρόνος στον οποίο εμφανίζεται μετά την εκπομπή του αρχικού παλμού, σε msec. Ο χρόνος αυτός στην αγγλική ορολογία ονομάζεται time of flight (TOF). Στην οθόνη του A-scan εμφανίζονται και άλλες πληροφορίες εκτός από το TOF. Στο πάνω μέρος του παραθύρου (Σχήμα 5.8) αναγράφεται το TOF που μετράται σε κάθε gate [G1] και [G2], καθώς και το πλάτος των παλμών (AMP) που κόβουν κάθε gate [G1] και [G2], μετρημένοι επί τοις εκατό του ύψους της οθόνης (% FSH). Στο κάτω μέρος του παραθύρου αναγράφεται το Water Path το TOF σε κάθε υποδιάστημα και το πάχος κάθε υποδιαστήματος [12].

Η απεικόνιση A-scan μπορεί να μετακινηθεί ως προς τον άξονα των χρόνων και έτσι ο χειριστής να παρακολουθεί συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στο παράδειγμα του Σχήματος 5.8 παρακολουθείται το χρονικό διάστημα από 43.30 έως 48.94 msec. Μέσα στο χρονικό αυτό διάστημα εμφανίζεται το πρώτο σετ ανακλάσεων από το δοκίμιο. Γενικά κατά την εξέταση υλικών εμφανίζονται και άλλα σετ ανακλάσεων μετά το πρώτο, καθώς η δέσμη των υπερήχων υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις στο εσωτερικών των υλικών και σε κάθε ανάκλαση μόνο ένα μικρό ποσό της ακουστικής ενέργειας επιστρέφει στην πιεζοηλεκτρική κεφαλή. Τα διαδοχικά σετ ανακλάσεων εμφανίζονται με σταθερή διαφορά χρόνου και όσο αυξάνει ο αριθμός τους μειώνεται το πλάτος τους, λόγω της απόσβεσης των κυμάτων μέσα στο υλικό. Στα σύνθετα υλικά εμφανίζονται, το πολύ, δύο σετ ανακλάσεων, λόγω της υψηλής απόσβεσης που παρουσιάζουν και από τα οποία, μόνο από το πρώτο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα. Το χρονικό διάστημα από 0 έως 43.30 msec αποτελεί την καθυστέρηση (delay) μεταξύ του αρχικού παλμού και της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου. Είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε η δέσμη των υπερήχων να διανύσει δύο φορές την απόσταση μεταξύ της κεφαλής και της πάνω επιφάνειας του δοκιμίου και να επιστρέψει στην κεφαλή για να εμφανιστεί ο παλμός της πάνω επιφάνειας.

Από εκεί και πέρα, το εύρος των υποδιαστημάτων στον άξονα του χρόνου μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί, ανάλογα με τις ανάγκες του ελέγχου. Έτσι στο A-scan του Σχήματος 5.8 το εύρος των υποδιαστημάτων έχει οριστεί σε 0.759 mm/div.

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 αδύνατον να γίνει οποιαδήποτε αξιολόγηση του A-scan για τον προσδιορισμό ατελειών.

Στα σύνθετα υλικά, όταν χρησιμοποιούνται φορητές συσκευές που διαθέτουν μόνο την απεικόνιση A-scan μπορεί να γίνει μόνο παχυμέτρηση και προσδιορισμός της ταχύτητας 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.

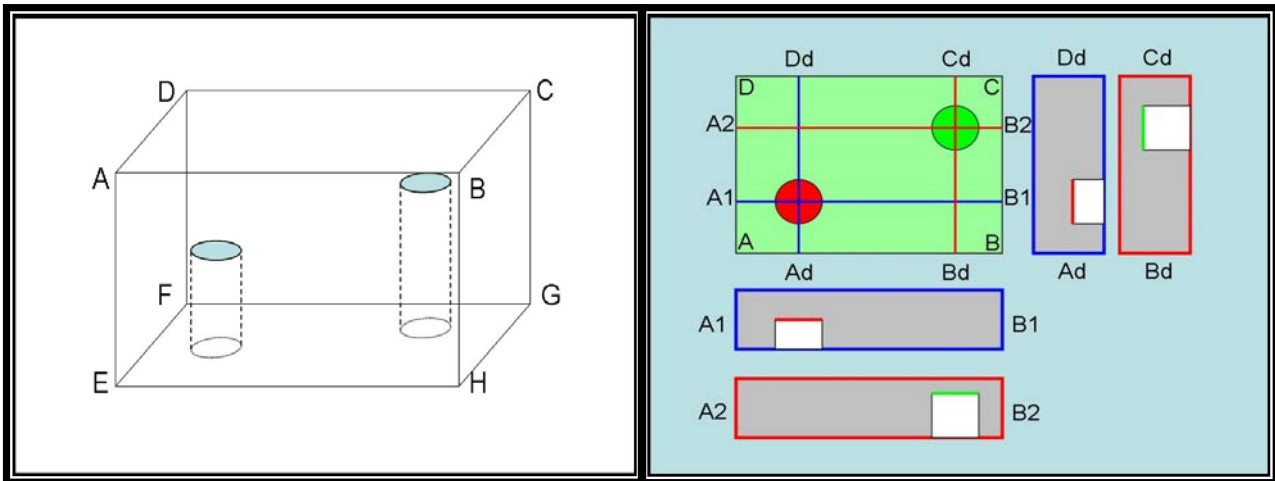
5.7.2 Η απεικόνιση αντίθεσης (Contrast-scan) C-scan

Η απεικόνιση αντίθεσης C-scan είναι μια διδιάστατη απεικόνιση της κατανομής μιας παραμέτρου (time of flight ή amplitude), η οποία προβάλλεται στην πάνω επιφάνεια του ελεγχόμενου υλικού και ουσιαστικά αποτελεί την χαρτογράφηση της περιοχής ενδιαφέροντος. Ως περιοχή ενδιαφέροντος ορίζεται το τμήμα του εξεταζόμενου υλικού από το οποίο συλλέγονται δεδομένα, μέσω της τοποθέτησης του gate στο A-scan. Στην περίπτωση των δοκιμών της διπλωματικής, που είναι ορθογωνικές πλάκες δεδομένου πάχους και έχοντας επιλέξει την εξέταση ολόκληρων των δοκιμών, η περιοχή ενδιαφέροντος, κάθε φορά είναι ένα ορθογωνικό χωρίο ιδίων διαστάσεων με αυτές των δοκιμών, αλλά που μπορεί να κινείται μέσα στο πάχος του δοκιμίου και το ίδιο να έχει πάχος που καθορίζεται από την ρύθμιση του gate.

Πιο αναλυτικά, το C-scan καταγράφει τις ανακλάσεις που προέρχονται από το εσωτερικό του υλικού ως συνάρτηση της θέσης τους, τόσο ως προς την επιφάνεια σάρωσης όσο και ως προς το πάχος του υλικού. Έτσι παρουσιάζεται μια επίπεδη απεικόνιση της στρώσης του δοκιμίου, η οποία είναι παράλληλη με την επιφάνεια σάρωσης. Στην επίπεδη αυτή απεικόνιση καταγράφεται το amplitude ή το time of flight των ανακλάσεων που λαμβάνει το gate όπως έχει οριστεί στο A-scan. Οι ανακλάσεις καταγράφονται με διαφορετικά χρώματα. Έτσι στην περίπτωση που στο C-scan έχουμε αναπαράσταση του amplitude οι διαφορετικοί χρωματισμοί υποδηλώνουν διαφορές στην ένταση του λαμβανόμενου σήματος και αναλόγως στην περίπτωση που έχουμε αναπαράσταση του time of flight υποδηλώνουν διαφορές στο βάθος από όπου προέρχεται η εκάστοτε ανάκλαση.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στο Σχήμα 5.9, η ατέλεια κόκκινου χρώματος βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος, ως προς την επιφάνεια σάρωσης (ABCD) οπότε η κόκκινη απόχρωση στην περίπτωση του time of flight δηλώνει περισσότερο χρόνο για να επιστρέψουν οι υπέρηχοι στην κεφαλή και κατά συνέπεια μικρότερο amplitude. Ακριβώς τα αντίθετα συμβαίνουν με την ατέλεια πράσινου χρώματος.

Τέλος γίνεται εμφανές ότι το C-scan αποτελεί την οπτικοποίηση της καταγραφής των προαναφερθέντων παραμέτρων και πάνω σε αυτή την απεικόνιση θα βασιστεί ο έλεγχος των δοκιμών και η εξαγωγή των οποιονδήποτε συμπερασμάτων.



Σχήμα 5.9 : Απεικονήσεις C-scan και B-scan υλικού που περιέχει δύο ατέλειες στο εσωτερικό του.

5.7.3 Απεικόνιση Λαμπρότητας (Brightness-scan) B-scan

Η απεικόνιση λαμπρότητας είναι μια διδιάστατη απεικόνιση της τομής του εξεταζόμενου δοκιμίου. Στον κάθετο άξονα παρουσιάζεται η κατανομή του TOF ή του Amplitude και στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται η θέση της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής. Από την απεικόνιση μπορεί να προσδιοριστεί η θέση ως προς το πάχος του εκάστοτε ανακλαστήρα και οι γραμμικές του διαστάσεις κατά την διεύθυνση της κίνησης της κεφαλής (Σχήμα 5.9). Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία της συγκεκριμένης απεικόνισης είναι περιορισμένη, καθώς ο ανακλαστήρας μπορεί να <<κρυφτεί>> πλήρως ή μερικώς εάν υπάρχει μεγαλύτερος στα υπερκείμενα στρώματα του υλικού στην ίδια περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία ξεκινά με την κατασκευή των δοκιμίων στα οποία θα γίνει υπερηχητικός έλεγχος. Σκοπός της κατασκευής είναι τα συγκεκριμένα δοκίμια να αποτελέσουν τα πρότυπα αναφοράς (reference standards) που θα χρησιμοποιούνταν κατά τον έλεγχο με υπερήχους μιας μεγαλύτερης κατασκευής, όπως η γάστρα ή άλλα μέρη ενός σκάφους, η οποία θα είχε κατασκευαστεί από τα ίδια υλικά και με την ίδια μέθοδο με αυτή των δοκιμίων. Έτσι κατασκευάζονται τέσσερις πολύστρωτες πλάκες. Οι δύο πλάκες αποτελούνται από πολυεστερική ρητίνη και ύφασμα γυαλιού (glass-polyester). Από αυτές η μια θα κατασκευαστεί με τη μέθοδο της μορφοποίησης με επαφή και επίστρωση με το χέρι (hand lay-up) και η άλλη με τη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (vacuum infusion).

Οι άλλες δύο πλάκες αποτελούνται από εποξική ρητίνη και μονοαξονικό ύφασμα ανθρακονημάτων (carbon-epoxy). Κατασκευάζονται και αυτές με την ίδια φιλοσοφία, δηλαδή η μια με τη μέθοδο της μορφοποίησης με επαφή και η άλλη με τη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού. Τα υλικά αυτά και οι μέθοδοι κατασκευής επιλέχθηκαν διότι χρησιμοποιούνται ευρέως στην ναυπήγηση σκαφών από σύνθετα υλικά.

6.2 Περιγραφή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

Για την κατασκευή των δοκιμίων glass-polyester χρησιμοποιήθηκε η πολυεστερική ρητίνη norso-dyne g 703 της εταιρίας GRAY VALLEY. Η πολυεστερική αυτή ρητίνη είναι λεπτόρευστη, με ρευστότητα στους 25°C 3.2 dPa.s και έχει πυκνότητα 1.17 g/cm³. Παρουσιάζει ογκομετρική συρρίκνωση 7.5%. Για τη σκλήρυνση της χρησιμοποιείται καταλυτικό σύστημα 1.2% MEKP 50 0.15% cobalt 0.6%. Για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν 14 στρώσεις από ύφασμα γυαλιού Woven roving 400 με βάρος 400 g/m² και πλέξη τύπου plain weave.

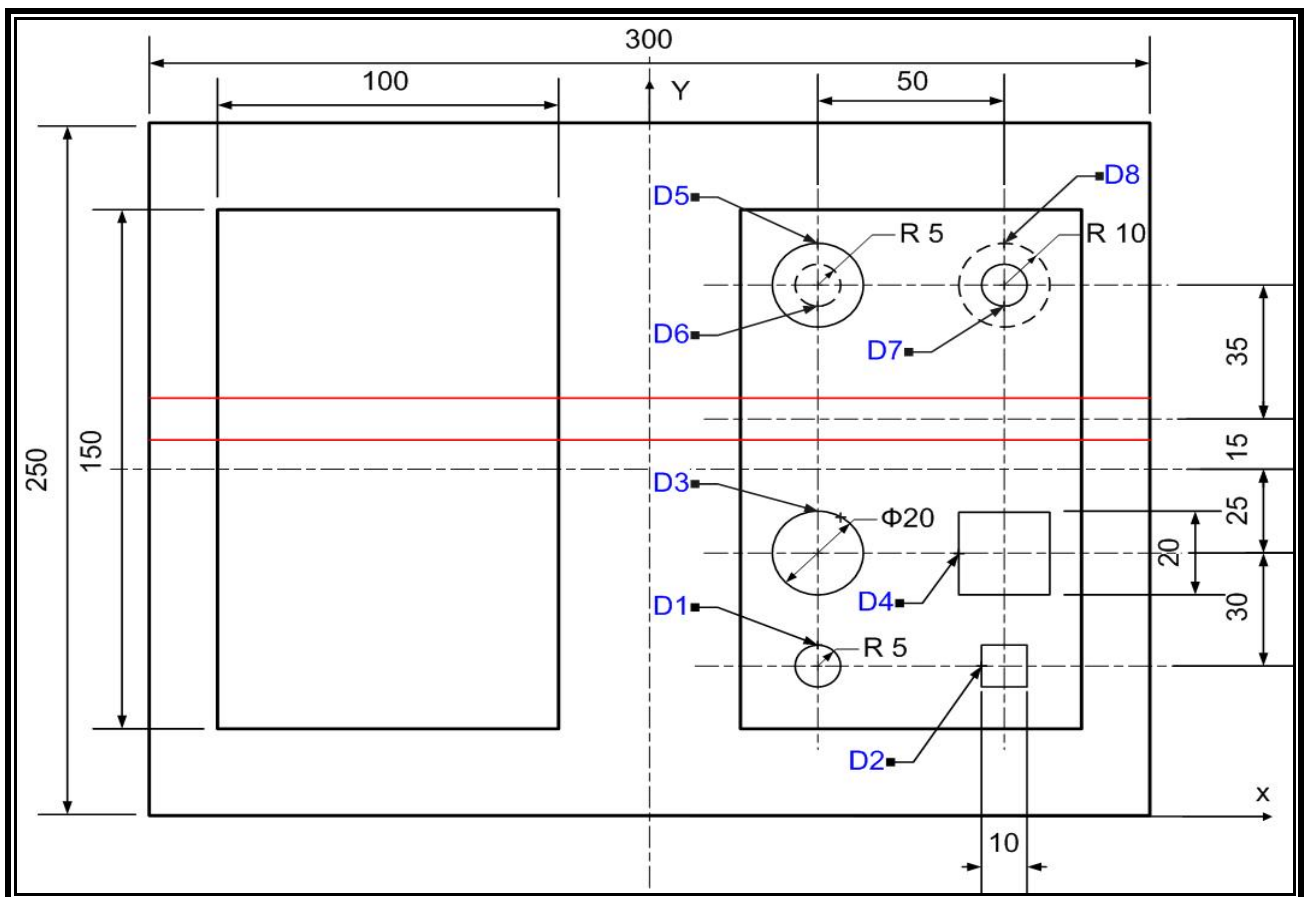
Τα δοκίμια carbon-epoxy κατασκευάστηκαν από την εποξική ρητίνη D.E.R 358 της εταιρίας DOW PLASTICS. Η ρητίνη αυτή έχει ρευστότητα 600-750 mPa.s στους 25°C και πυκνότητα 1.14 g/cm³. Για την σκλήρυνση της χρησιμοποιήθηκε ο σκληρυντής EPAMINE PA43. Για την ενίσχυση χρησιμοποιήθηκαν 14 στρώσεις από μονοαξονικό ύφασμα ανθρακονημάτων βάρους 280g/m².

Για τις τεχνητές ατέλειες αρχικά χρησιμοποιήθηκε ύφασμα από Teflon, που όπως φάνηκε από τον υπερηχητικό έλεγχο δεν έδινε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αφού οι ατέλειες διαβρέχονταν από τη ρητίνη. Έτσι χρησιμοποιήθηκε λεπτό film πολυαμιδίου, υψηλής θερμικής αντοχής (urilex) με πάχος 12,7 μm. Τα data sheets των παραπάνω υλικών παρατίθενται στο παράρτημα.

6.3 Γεωμετρία δοκιμίων

Στο συγκεκριμένο εδάφιο γίνεται περιγραφή της διάταξης των στρώσεων και των τεχνητών ατελειών. Παράλληλα αναφέρονται οι λόγοι που οδήγησαν στην κατασκευή της συγκεκριμένης διάταξης. Όλες οι πλάκες κατασκευάζονται εφαρμόζοντας την ίδια μεθοδολογία όσο αφορά στη διάταξη των ατελειών και των στρώσεων. Η γενική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1 που ακολουθεί.

Αρχικά οι στρώσεις σε όλες τις πολύστρωτες πλάκες έχουν διαστάσεις 300x250 mm. Στις πλάκες glass-polyester οι στρώσεις του υφάσματος γυαλιού στοιβάζονται όλες με τη διεύθυνση warp να είναι παράλληλη με το γεωμετρικό άξονα y του πολύστρωτου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύψει μετά την κατασκευή ένα πολύστρωτο που χαρακτηρίζεται από τον συμβολισμό $[90^\circ]_{14}$. Στο Σχήμα 6.1 φαίνονται οι γεωμετρικοί άξονες του πολύστρωτου. Αντιστοίχως στις πλάκες carbon-epoxy οι στρώσεις του μονοαξονικού υφάσματος στοιβάζονται με τη διεύθυνση warp παράλληλη με το γεωμετρικό άξονα x του πολύστρωτου και το οποίο περιγράφεται με το συμβολισμό $[0^\circ]_{14}$.



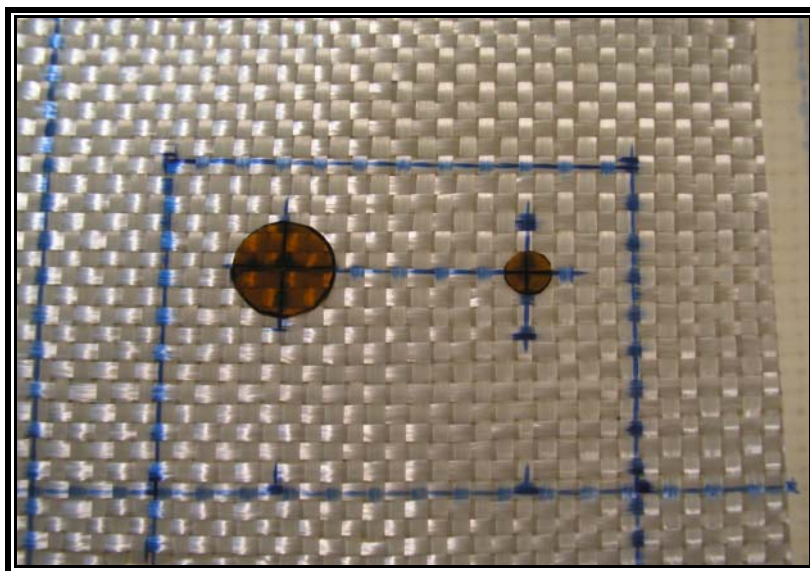
Σχήμα 6.1 : Κατασκευαστικό σχέδιο πολύστρωτων πλακών carbon-epoxy και glass-polyester.

Για την περαιτέρω περιγραφή της διάταξης είναι απαραίτητο να αναφερθεί το σύστημα αρίθμησης των στρώσεων. Η αρίθμηση των στρώσεων ξεκινά από την πρώτη, που τοποθετείται στο καλούπι και τελειώνει με τη δέκατη τέταρτη στρώση, που τοποθετείται τελευταία στη στοίβα. Έτσι ξεκινώντας την περιγραφή, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.1 από κάθε πολύστρωτη πλάκα διαστάσεων

300x250mm θα προκύψουν δύο δοκίμια διαστάσεων 150x100mm. Το ένα από αυτά θα περιέχει τις τεχνητές ατέλειες, ενώ το άλλο δεν θα περιέχει ατέλειες παρά μόνο την κατασκευαστική ατέλεια της πτύχωσης στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

Οι τεχνητές ατέλειες αρχικά κατασκευάστηκαν από Teflon ύφασμα. Η επιλογή αυτή δεν έδωσε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς οι τεχνητές ατέλειες διαβρέχονταν από τη ρητίνη και δεν ανιχνεύονταν κατά τον έλεγχο των δοκιμών. Στη συνέχεια οι ατέλειες κατασκευάστηκαν από λεπτό φύλλο πολυαμιδίου UPILEX. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 είναι τετράγωνες και κυκλικές. Οι δύο μορφές επιλέχθηκαν για να διαπιστωθεί η διακριτική ικανότητα της μεθόδου στον προσδιορισμό των γεωμετρικών ορίων των ατελειών. Επίσης αποφασίστηκε η τοποθέτηση ατελειών διαφορετικού μεγέθους μέσα στα δοκίμια με σκοπό να διερευνηθεί η διακριτική ικανότητα της διάταξης ως προς το μέγεθος των ατελειών. Τέλος οι τεχνητές ατέλειες θα τοποθετηθούν σε διαφορετικές στρώσεις ως προς το πάχος των δοκιμών.

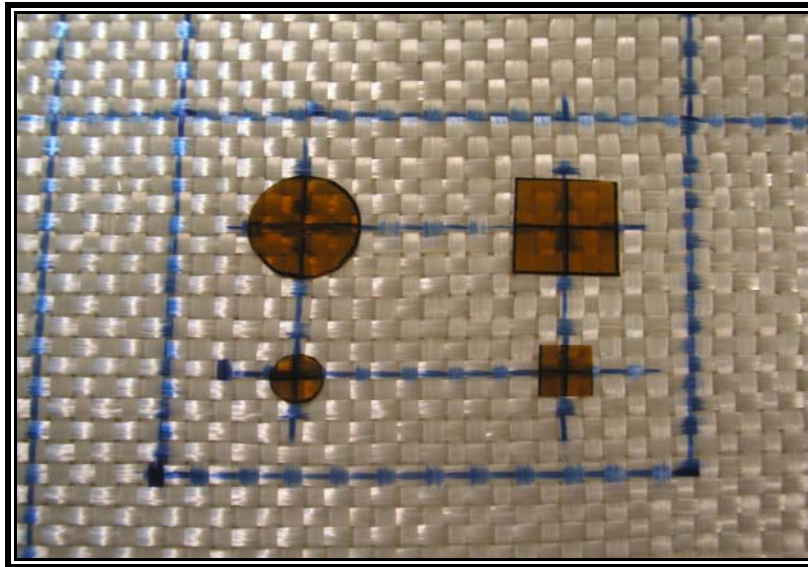
Στο δοκίμιο με τις τεχνητές ατέλειες, το οποίο θα αποτελέσει και το πρότυπο αναφοράς, τοποθετούνται πρώτα οι ατέλειες D5 και D7 στο πάνω μέρος του δοκιμίου, μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης. Η μια έχει διάμετρο 10mm και η άλλη 20 mm και τα κέντρα τους απέχουν 50mm. Στις ατέλειες χαράζονται αξονικές γραμμές όπως και στην 3^η στρώση (Σχήμα 6.2) ώστε να υπάρξει ακρίβεια κατά την τοποθέτηση.



Σχήμα 6.2 : Κυκλικές ατέλειες μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης.

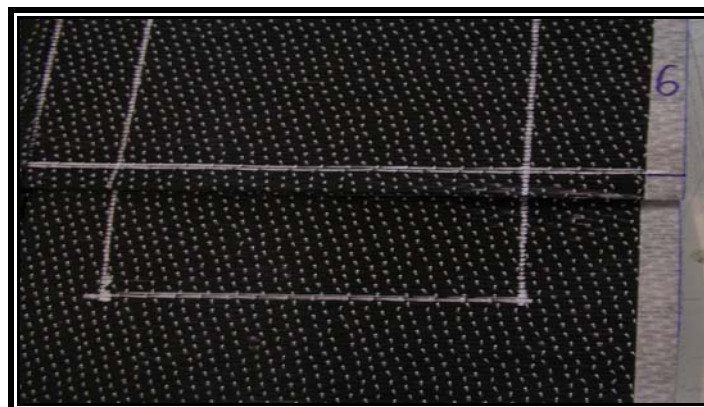
Ακολούθως τοποθετούνται οι ατέλειες D1,D2,D3,D4, οι οποίες είναι δύο κυκλικές και δύο τετράγωνες, μεταξύ 4^{ης} και 5^{ης} στρώσης, έχοντας τη διάταξη και τις διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 6.1. Οι αποστάσεις μεταξύ των ατελειών επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε η μια ατέλεια να μην επηρεάζει την ύπαρξη άλλης ατελειας που βρίσκεται στην ίδια στρώση. Επίσης η θέση των ατελειών είναι τέτοια ώστε να μη βρίσκονται κοντά στα άκρα του δοκιμίου, πράγμα που θα

δημιουργούσε προβλήματα κατά τον έλεγχο με τους υπερήχους. Η χάραξη αξονικών γραμμών γίνεται με τον ίδιο τρόπο στην 5^η στρώση και στις ατέλειες για την ακριβή τοποθέτησή τους (Σχήμα 6.3). Σκοπός της παραπάνω διάταξης είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα εντοπισμού και διάκρισής τους, τόσο ως προς το σχήμα, όσο και ως προς το μέγεθός τους κατά τον υπερηχητικό έλεγχο.



Σχήμα 6.3 : Ατέλειες D1,D2,D3,D4 μεταξύ 4^{ης} και 5^{ης} στρώσης.

Κατά τον σχεδιασμό των δοκιμίων αποφασίστηκε να εισαχθεί μια κατασκευαστική ατέλεια, η οποία συναντάται σε πραγματικές συνθήκες. Στην 6^η στρώση, στα δοκίμια carbon-epoxy, δημιουργήθηκε μια πύκωση. Η στρώση διπλώθηκε στην ίδια διεύθυνση με τη διεύθυνση των ινών ώστε να δημιουργηθεί μια πτυχή (Σχήμα 6.4). Η πτυχή παριστάνεται στο Σχήμα 6.1 από τις δύο γραμμές κόκκινου χρώματος, και διατρέχει όλο το μήκος της πλάκας.



Σχήμα 6.4 : Πύκωση στην 6^η στρώση στα δοκίμια carbon-epoxy.

Έγινε προσπάθεια η πτυχή αυτή να έχει πλάτος περίπου 1-1.5 cm. Στα δοκίμια glass-polyester, επειδή το woven roving ύφασμα δεν είναι δυνατόν να διπλωθεί, αλλά και επειδή μια τέτοια ατέλεια δεν συναντάται στην πραγματικότητα ακολουθήθηκε μια λίγο διαφορετική τακτική. Η 6^η στρώση

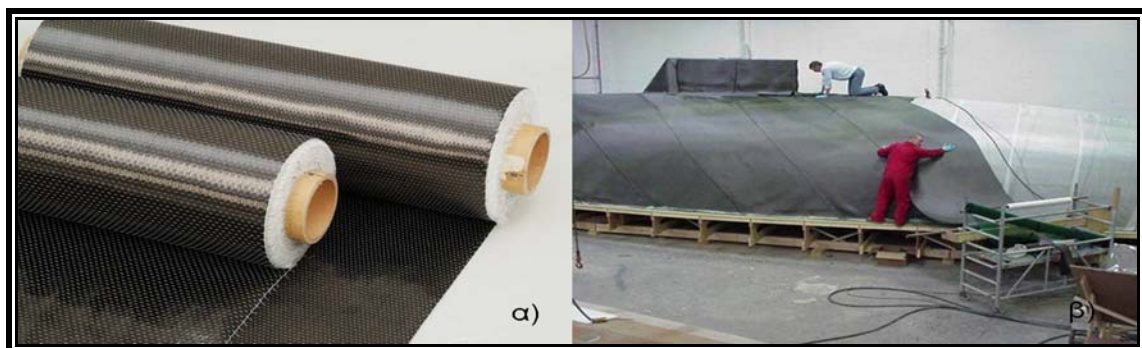
κόπηκε στο σημείο που θα γινόταν η πτύχωση και τα δύο κομμάτια της τοποθετήθηκαν έτσι, ώστε το ένα να υπερκαλύπτει το άλλο κατά 1.5 cm.

Τέλος μεταξύ 7^{ης} και 8^{ης} στρώσης τοποθετούνται δύο κυκλικές ατέλειες D6 και D8 στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Στο Σχήμα 6.1 παριστάνονται με τη διακεκομμένη γραμμή. Τώρα όμως τοποθετούνται με την αντίστροφη διάταξη από αυτή που είχαν οι ατέλειες D5 και D7 μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης. Εκεί δηλαδή που βρισκόταν η κυκλική ατέλεια των 10 mm στην 3^η στρώση τώρα τοποθετείται κυκλική ατέλεια 20 mm στην 7^η, ενώ εκεί που είχε τοποθετηθεί η κυκλική ατέλεια των 20 mm στην 3^η στρώση τώρα τοποθετείται η ατέλεια των 10 mm στην 7^η. Ο λόγος που έγινε αυτή η τοποθέτηση των ατελειών στην 3^η και στην 7^η στρώση, είναι για να φανεί κατά τον υπερηχητικό έλεγχο κατά πόσο επηρεάζει η ύπαρξη ατελειών σε υπερκείμενες στρώσεις την ανίχνευση άλλων που βρίσκονται κάτω από αυτές. Επίσης οι ατέλειες τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές στρώσεις ως προς το πάχος των δοκιμίων για να φανεί πως επηρεάζει ο παράγοντας της απόσβεσης, που είναι υψηλός στα σύνθετα και αυξάνεται με το πάχος, την ανίχνευση των ατελειών.

6.4 Παρασκευή των ενισχυτικών στρώσεων για τα δοκίμια CFRP και GFRP

Η παρασκευή των ενισχυτικών στρώσεων είναι μια διαδικασία που είναι κοινή, ανεξαρτήτως της μεθόδου κατασκευής. Για το λόγο αυτό περιγράφεται πριν τις μεθόδους κατασκευής. Αποτελεί σημαντικό και χρονοβόρο τμήμα της κατασκευαστικής διαδικασίας. Το στάδιο αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών στρώσεων αλλά και ολόκληρης της κατασκευής καθώς ένας μεγάλος αριθμός ατελειών εισάγεται στις πολύστρωτες κατασκευές κατά την επεξεργασία των στρώσεων.

Αρχικά τα ενισχυτικά υφάσματα παραλαμβάνονται με τη μορφή ρολών (Σχήμα 6.5α). Στην περίπτωση που απαιτείται η κάλυψη μεγάλων επιφανειών τα υφάσματα χρησιμοποιούνται κατευθύν από το ρολό (Σχήμα 6.5β).



Σχήμα 6.5 : α) Ρολά ενισχυτικών υφασμάτων β) Τοποθέτηση υφασμάτων σε γάστρα.

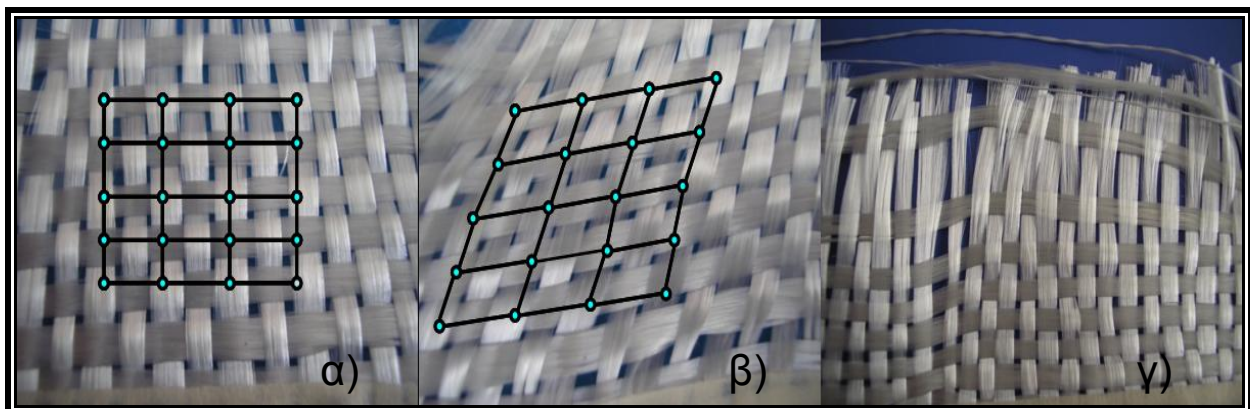
Εάν το σχήμα και η γεωμετρία του καλουπιού είναι διαφορετική τότε οι ενισχυτικές στρώσεις πρέπει να κοπούν ώστε να αποκτήσουν το κατάλληλο σχήμα. Έτσι στην περίπτωση των δοκιμίων οι στρώσεις θα είναι παραλληλόγραμμα διαστάσεων 25x30cm. Αρχικά το ρολό του υφάσματος

απλώνεται σε τραπέζι μεγάλων διαστάσεων και με μαρκαδόρο σημαδεύονται οι διαστάσεις των στρώσεων πάνω στο ύφασμα. Σχηματίζονται παραλληλόγραμμα διαστάσεων 25X30 cm (Σχήμα 6.6).



Σχήμα 6.6 : Χάραξη του σχήματος και των διαστάσεων των στρώσεων.

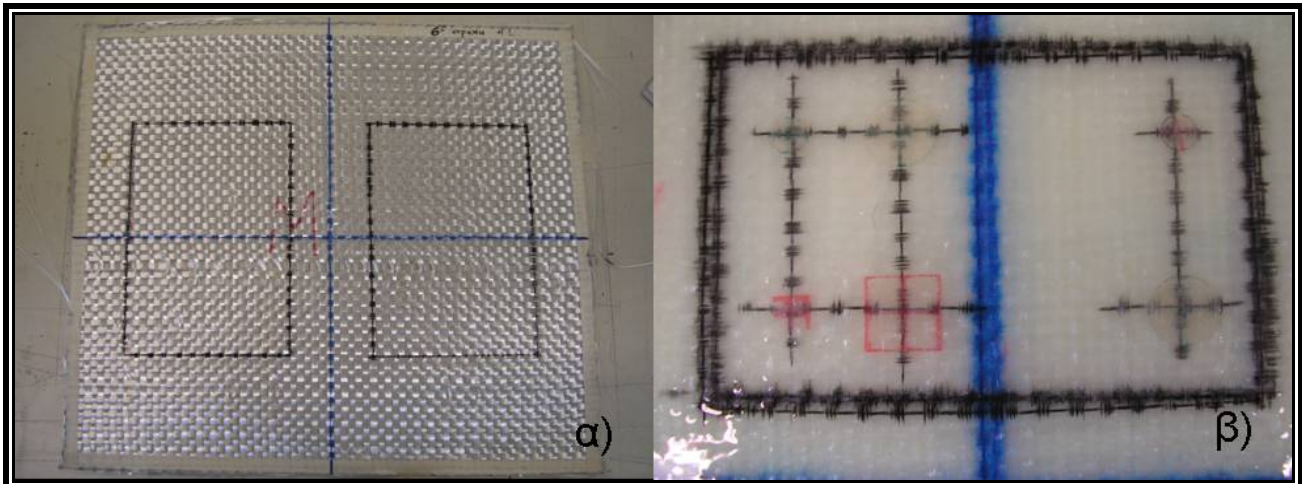
Πάνω στις γραμμές που σχεδιάζονται και αποτελούν τα γεωμετρικά άκρα των στρώσεων κολλιέται χαρτοταινία όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.6. Ο ρόλος της χαρτοταινίας είναι διπλός. Πρώτον με τη χαρτοταινία ενισχύονται τα άκρα των στρώσεων και δεν χαλάει η γεωμετρία τους καθώς οι στρώσεις δεν παραμορφώνονται διαμηθικά και δεύτερον εμποδίζεται το ξέφτισμα των ινών και η αλλοίωση της πλέξης μετά το κόψιμο των στρώσεων, από το ρολό του υφάσματος (Σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7 : α) και β) Διαμηθική παραμόρφωση της πλέξης γ) Ξέφτισμα των ινών.

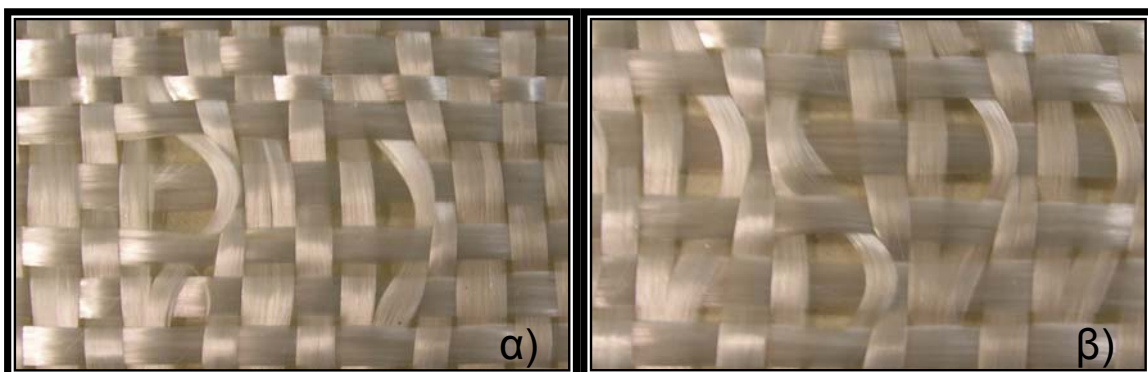
Στη συνέχεια, σε κάθε στρώση σχεδιάζονται αξονικές γραμμές ώστε κατά την τοποθέτησή τους στο καλούπι, όπου έχουν και εκεί σχεδιαστεί αξονικές, να μπορούν να τοποθετηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια η μια πάνω στην άλλη. Επίσης στην πρώτη και στην τελευταία στρώση σχεδιάζεται το περίγραμμα των δοκιμών, το οποίο είναι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο διαστάσεων 10X15 cm, ώστε μετά την κατασκευή του πολύστρωτου να είναι ορατά τα όρια των δοκιμών και να κοπούν με ακρίβεια. Στις στρώσεις που θα τοποθετηθούν οι τεχνητές ατέλειες σχεδιάζεται ακριβώς η θέση

τους, γεγονός που θα βοηθήσει την τοποθέτηση των ατελειών κατά την κατασκευή. Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει μια στρώση υαλοϋφάσματος στην οποία έχουν σχεδιαστεί οι αξονικές και το περίγραμμα των δοκιμών καθώς και το τελικό αποτέλεσμα μετά την κατασκευή μιας πλάκας glass-polyester με τη μέθοδο hand layup όπου διακρίνονται και οι αξονικές για την τοποθέτηση των ατελειών.



Σχήμα 6.8 : α) Στρώση υαλοϋφάσματος μετά την επεξεργασία β) δοκίμιο glass-polyester κατασκευασμένο με τη μέθοδο hand layup.

Στη συνέχεια μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω ενεργειών, οι στρώσεις αριθμούνται με αύξουσα αρίθμηση από το 1 έως το 14 με πρώτη τη στρώση που θα τοποθετηθεί πρώτη στο καλούπι. Η αρίθμηση και η κατηγοριοποίηση των στρώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία σε μεγάλες και πολύπλοκης γεωμετρίας κατασκευές. Τέλος οι στρώσεις κόβονται από το ρολό με τη χρήση απλού ψαλιδιού, περιστροφικού κόφτη ή ηλεκτροκίνητου ψαλιδιού.



Σχήμα 6.9 : α) τράβηγμα νήματος από επαφή με ψαλίδι β) διαταραχή της πλέξης από άσαλη μεταχείριση της στρώσης.

Όλες οι παραπάνω κατεργασίες πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη προσοχή διότι οποιαδήποτε επαφή αιχμηρού εργαλείου ή ακόμα και ο απρόσεκτος χειρισμός των υφασμάτων (μεταφορά, αποθήκευση, κοπή) προκαλεί διαταραχή της πλέξης (Σχήμα 6.9) με αποτέλεσμα να εισάγονται στο

παραγόμενο πολύστρωτο κατασκευαστικές ατέλειες. Τέλος μετά την παρασκευή τους οι στρώσεις πρέπει να αποθηκεύονται μακριά από παράγοντες (σκόνη, ρητίνες, εργαλεία) που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των στρώσεων.

6.5 Μορφοποίηση με έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού (Vacuum infusion)

Η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού θεωρείται ότι έχει αναπτυχθεί πρόσφατα καθώς οι πρώτες προσπάθειες εντοπίζονται στη δεκαετία του 1940. Ως μέθοδος κατασκευής εξελίχθηκε στις δεκαετίες του 1970 και 1980 με επιτυχής εφαρμογές στη βιομηχανία σκαφών . Ακόμα και σήμερα οι πιο επιτυχημένες εφαρμογές της μεθόδου επιδεικνύονται κατά την κατασκευή σκαφών αναψυχής από πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος εφαρμόζεται στην εξ'ολοκλήρου κατασκευή πολεμικών πλοίων ή τμημάτων τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η χρήση της μεθόδου στην κατασκευή τμημάτων της κορβέτας κλάσης Visby και η κατασκευή άλλων μη ανιχνεύσιμων σκαφών από radar (stealth) όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10. Η μέθοδος έχει υιοθετηθεί επίσης στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών.

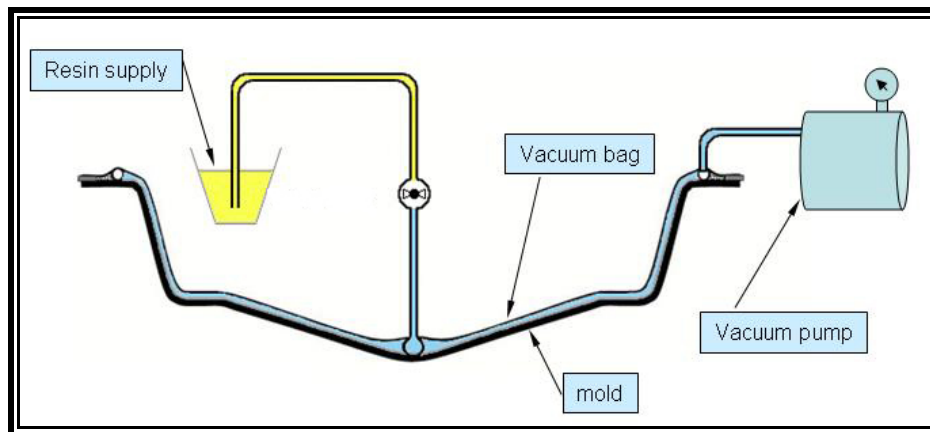


Σχήμα 6.10 : α) κορβέτα κλάσης Visby β) sea shadow.

Η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού είναι μια παραλλαγή της έγχυσης ρητίνης με πίεση σε κλειστό διαίρετο καλούπι (resin transfer moulding, RTM) και εξελίχθηκε ως εναλλακτική πρόταση στις μεθόδους στις μεθόδους έγχυσης ρητίνης και επίστρωση με το χέρι (hand lay-up) και με ψεκασμό (spray-up) [2]. Η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού εφαρμόζεται στην κατασκευή μικρού αλλά και μεγάλου μεγέθους τεμαχίων, για μεσαίας δυναμικότητας παραγωγή (μέχρι 1000 τεμάχια το χρόνο), τόσο σε κατασκευές χαμηλών αλλά και υψηλών απαιτήσεων.

Η διαδικασία της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού (vacuum infusion process) είναι μια τεχνική που στηρίζεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ της διάταξης που χρησιμοποιείται και του περιβάλλοντος. Η διαφορά αυτή πίεσης χρησιμοποιείται για να ασκηθεί μηχανική πίεση στο πολύστρωτο σε όλη τη διάρκεια της κατασκευής του, αλλά και για να γίνει η αναρρόφηση της ρητίνης.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου στηρίζεται στη δημιουργία μιας αεροστεγούς περιοχής μεταξύ του περιβάλλοντος και του κλειστού συστήματος της διάταξης (Σχήμα 6.11). Όταν το καλούπι (mold) σφραγίζεται με τη σακούλα κενού (vacuum bag) η πίεση του αέρα, εντός της διάταξης και στο περιβάλλον, είναι ίση με μια ατμόσφαιρα (14.7 PSI). Καθώς ο αέρας αφαιρείται από τη σφραγισμένη διάταξη με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού (vacuum pump), η πίεση εντός της σακούλας μειώνεται, ενώ η εξωτερική πίεση του περιβάλλοντος παραμένει σταθερή.



Σχήμα 6.11 : Γενική διάταξη της μεθόδου έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού.

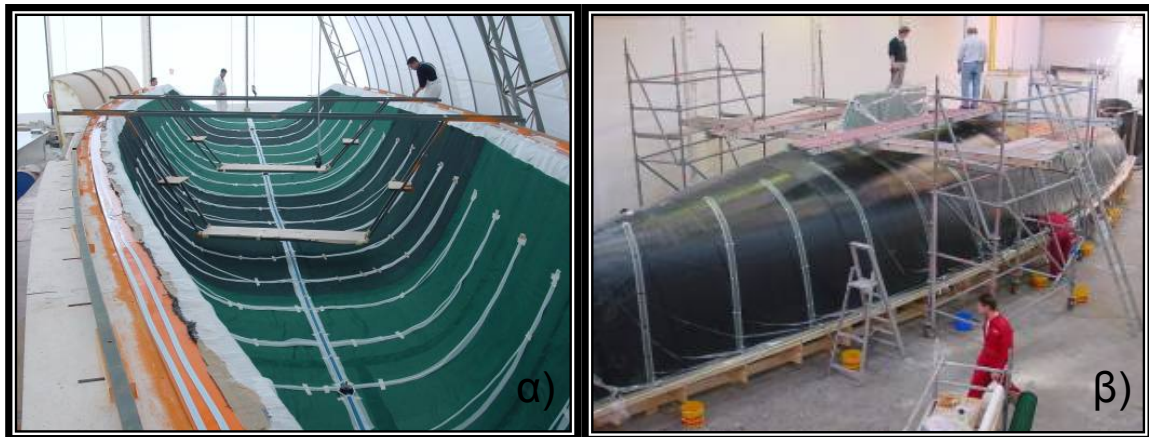
Έτσι αναπτύσσεται μια διαφορά πίεσης μεταξύ του κλειστού συστήματος και του περιβάλλοντος. Αυτή τη διαφορά πίεσης, της οποίας η μέγιστη τιμή είναι ίση με 1 atm (14.7 PSI), εκμεταλλεύεται η μέθοδος, πρώτον για να ασκήσει πίεση στο πολύστρωτο και να συμπιέσει τις στρώσεις εμποδίζοντας οποιαδήποτε παραμόρφωση τους κατά τη σκλήρυνση της ρητίνης και δεύτερον για να βελτιστοποιήσει την αναλογία ινών-ρητίνης. Επιπρόσθετα, κατά την αφαίρεση του αέρα από την διάταξη αφαιρείται ο αέρας που έχει εγκλωβιστεί μεταξύ των στρώσεων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία προϊόντων με μειωμένο αριθμό εγκλεισμάτων αέρα (φουσαλίδες). Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.5.1 Περιγραφή εξοπλισμού και υλικών στη μέθοδο έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού

Η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού απαιτεί τη χρήση υλικών που δεν απαντώνται σε άλλες μεθόδους μορφοποίησης σύνθετων υλικών. Τα υλικά αυτά μπορούν να χωριστούν σε αναλώσιμα και μη αναλώσιμα. Αναλώσιμα είναι αυτά που μετά την κατασκευή δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, ενώ μη αναλώσιμα είναι αυτά που δεν επηρεάζονται από την στερεοποίηση της ρητίνης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε νέα κατασκευή. Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο ξεκινώντας από τα μη αναλώσιμα.

ΜΗ ΑΝΑΛΩΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ

1) Καλούπι (mold) : Στην κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά το καλούπι μπορεί να είναι το αρσενικό ή το θηλυκό ανάλογα το σχεδιασμό. Κατασκευάζεται συνήθως από ξύλο ή μέταλλο. Έτσι εάν για την κατασκευή, για παράδειγμα της γάστρας, χρησιμοποιηθεί θηλυκό καλούπι η επίστρωση των ενισχυτικών υφασμάτων γίνεται στο εσωτερικό του, ενώ εάν χρησιμοποιηθεί αρσενικό η επίστρωση γίνεται εξωτερικά (Σχήμα 6.12).

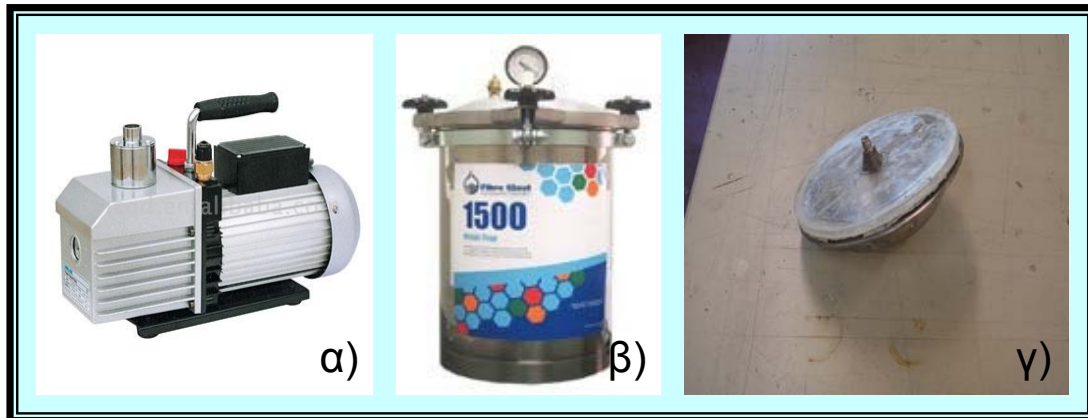


Σχήμα 6.12 : Κατασκευή γάστρας α) σε θηλυκό καλούπι β) σε αρσενικό καλούπι.

Στην περίπτωση της κατασκευής των δοκιμίων χρησιμοποιείται επίπεδη πλάκα από Plexiglas ικανού πάχους να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις της κατασκευής.

2) Αντλία κενού (vacuum pump) : Η αντλία κενού είναι απαραίτητη για την αναρρόφηση του αέρα και τη δημιουργία κενού μεταξύ του καλουπιού και του σάκου κενού (Σχήμα 6.13). Η αντλία θα πρέπει να έχει ικανότητα για απόλυτη πίεση μικρότερη από 10 KPa (100mbar) χωρίς μεγάλες διαφοροποιήσεις. Η ικανότητα αναρρόφησης εξαρτάται από το μέγεθος της κατασκευής. Μια αντλία με μεγαλύτερη ικανότητα αναρρόφησης μικραίνει το διάστημα που απαιτείται για την εκκένωση του καλουπιού πριν την έγχυση. Ικανότητα αναρρόφησης της τάξεως των 10 m³/h είναι αποδεκτή για τις περισσότερες εφαρμογές.

3) Παγίδα συγκέντρωσης ρητίνης (resin trap) : Οι παγίδες συγκέντρωσης ρητίνης τοποθετούνται στη γραμμή αναρρόφησης πριν την αντλία κενού. Έχουν διάφορα μεγέθη και ορισμένες μάλιστα έχουν τη δυνατότητα να κρατούν εφεδρικό κενό (Σχήμα 6.13). Ο λόγος παρεμβολής είναι η κατακράτηση οποιασδήποτε ποσότητας ρητίνης περάσει από το εμποτιζόμενο τεμάχιο και κατευθυνθεί προς την αντλία μέσα από τη γραμμή αναρρόφησης. Το γεγονός αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή της αντλίας κενού.



Σχήμα 6.13 : α) Αντλία κενού β) παγίδα ρητίνης με εφεδρικό κενό γ) παγίδα ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των δοκιμών.

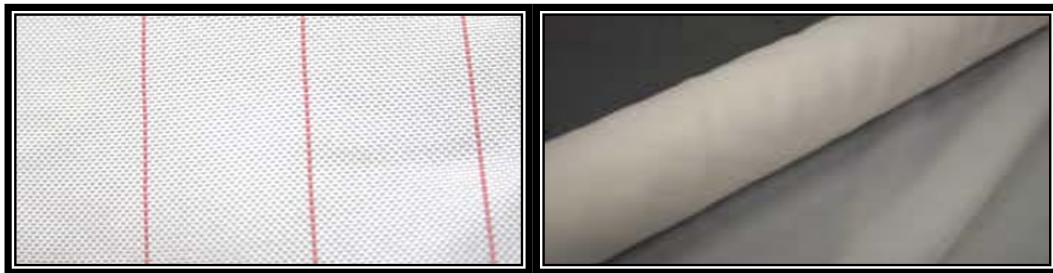
4) Άλλα δευτερεύοντα δοχεία και εργαλεία : Τα δοχεία και τα εργαλεία αυτά έρχονται σε επαφή με τη ρητίνη αλλά μετά τη χρήση μπορούν να καθαριστούν και να χρησιμοποιηθούν σε νέα εφαρμογή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι κουβάδες, τα δοχεία ανάμειξης, τα πινέλα, οι σπάτουλες κ.α.

ΑΝΑΛΩΣΙΜΑ ΥΛΙΚΑ

1) Ενισχυτικά υφάσματα και ρητίνες : Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορων ειδών υφάσματα (carbon, glass, Kevlar) με διάφορα επιφανειακά βάρη. Τα υφάσματα για την κατασκευή των δοκιμών περιγράφονται στην παράγραφο 6.2. Η ρητίνη αναρροφάται σε υγρή μορφή από τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τη διάταξη και εμποτίζει τα ενισχυτικά υφάσματα. Πριν την αναρρόφηση της η ρητίνη έχει αναμειχθεί, ανάλογα με το είδος της με καταλύτη, επιταχυντή ή αναχαιτιστή. Οι ουσίες αυτές συμβάλλουν στην έναρξη του πολυμερισμού και στον καθορισμό του χρόνου σκλήρυνσης (gel time) της ρητίνης. Σημαντική ιδιότητα είναι η ρευστότητα της ρητίνης. Συνήθως στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ρητίνες υψηλής ρευστότητας με τις οποίες διαβρέχονται πιο εύκολα τα υφάσματα. Οι ρητίνες που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται επίσης στην παράγραφο 6.2.

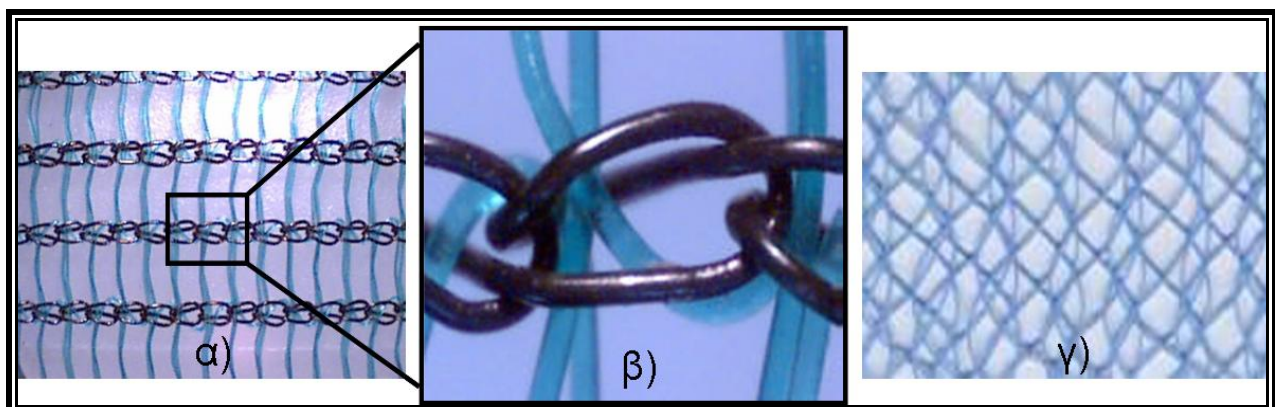
2) Peel ply : Είναι ένα αποκολλητικό ύφασμα με πολύ μικρό επιφανειακό βάρος ($5g/m^2$) που τοποθετείται πάνω από τις ενισχυτικές στρώσεις . Υπάρχουν διάφορα είδη αποκολλητικών υφασμάτων όπως Nylon και πολυεστερικά, τα οποία είναι κατάλληλα για χρήση με συγκεκριμένες ρητίνες. Ο κυριότερος λόγος που χρησιμοποιείται το εν λόγω ύφασμα είναι για να μπορέσει να αποκολληθεί το παραγόμενο πολύστρωτο από τα υπόλοιπα υλικά που τοποθετούνται πάνω στις ενισχυτικές στρώσεις κατά την κατασκευή της διάταξης. Το ύφασμα αυτό έχει την ιδιότητα να διαβρέχεται από τη ρητίνη αλλά και να αφήνει τον αέρα να περνά μέσα από αυτό. Επειδή είναι το πρώτο από τα υφάσματα που τοποθετούνται πάνω στις ενισχυτικές στρώσεις δίνει την τελική υφή της μιας επιφάνειας του πολύστρωτου ανάλογα με το είδος του καλουπιού που χρησιμοποιείται.

Τέλος εμποδίζει οποιοδήποτε τσαλάκωμα του σάκου κενού να αποτυπωθεί στην επιφάνεια του πολύστρωτου. Μετά τον εμποτισμό του με ρητίνη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά.



Σχήμα 6.14 : Αποκολλητικό ύφασμα (peel ply).

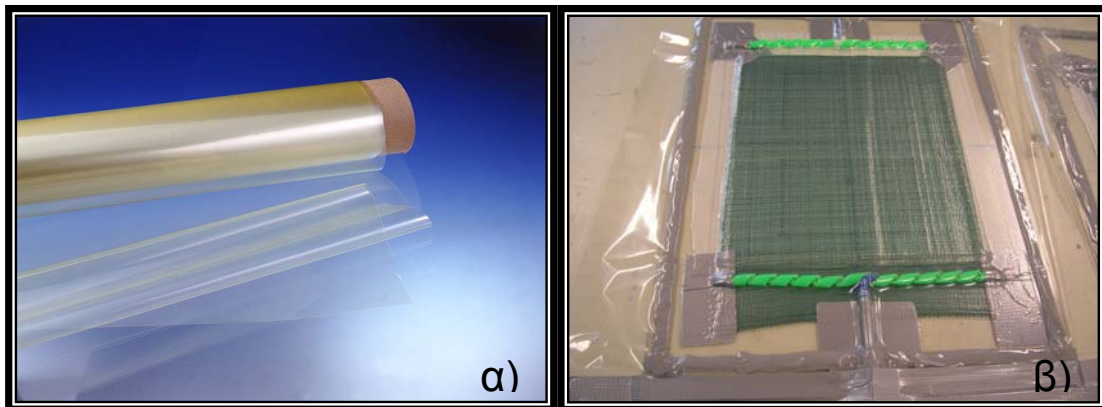
3) Infusion mesh : Είναι ένα ύφασμα το οποίο τοποθετείται πάνω από το peel ply για να διευκολύνει την κίνηση της ρητίνης. Η πλέξη του (Σχήμα 6.15α,β) είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί μικρά κανάλια κίνησης της ρητίνης διευκολύνοντας τον εμποτισμό του πολύστρωτου, καθώς δεν συμπιέζεται κατά την εφαρμογή του κενού από την ελαστική μεμβράνη. Εκτός από τη ρητίνη διευκολύνεται και ο αέρας κατά την έξοδο του από το πολύστρωτο. Το infusion mesh τοποθετείται πάνω από το peel ply με αποτέλεσμα το μέτωπο της ρητίνης να κινείται πιο γρήγορα στις στρώσεις που είναι κοντά σ'αυτο, σε σχέση με τις στρώσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του πολύστρωτου ή στο κάτω μέρος που εφάπτεται με το καλούπι. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο όσο αυξάνονται οι στρώσεις του πολύστρωτου και κατ'επέκταση το πάχος του. Έτσι σε πολύστρωτα με μεγάλο πάχος, ανάλογο ύφασμα (Σχήμα 6.15γ) τοποθετείται στο εσωτερικό τους για να διευκολύνει την κίνηση της ρητίνης, μόνο που στην περίπτωση αυτή το ύφασμα παραμένει στο εσωτερικό του πολύστρωτου μετά τη στερεοποίηση της ρητίνης.



Σχήμα 6.15 : α) Πλέξη του infusion mesh β) μεγέθυνση της πλέξης γ) infusion mesh που τοποθετείται στο εσωτερικό του πολύστρωτου.

4) Ελαστική μεμβράνη (Vacuum bag) : Η ελαστική μεμβράνη που τοποθετείται πάνω από όλα τα προηγούμενα υφάσματα ονομάζεται σάκος κενού (Vacuum bag) και αντικαθιστά το

δεύτερο καλούπι για να κλείσει η διάταξη. Υπάρχουν μεμβράνες από πολυαιθυλένιο ή Nylon που αντέχουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες οι οποίες είναι μονές ή και διπλές για μεγαλύτερη αντοχή σε εκδορές και τρυπήματα. Η ελαστική μεμβράνη έχει πάντα μεγαλύτερες διαστάσεις από τα ενισχυτικά υφάσματα και πολλές φορές και από το ίδιο το καλούπι, ώστε να υπάρχει η απαραίτητη χάρη για να μπορεί η μεμβράνη να αποκτήσει τη μορφή του καλουπιού σε σημεία με πολύπλοκη γεωμετρία. Για τα σημεία αυτά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ελαστικότητα της μεμβράνης. Ο σάκος κενού είναι αναλώσιμο υλικό και αχρηστεύεται μετά την εφαρμογή.

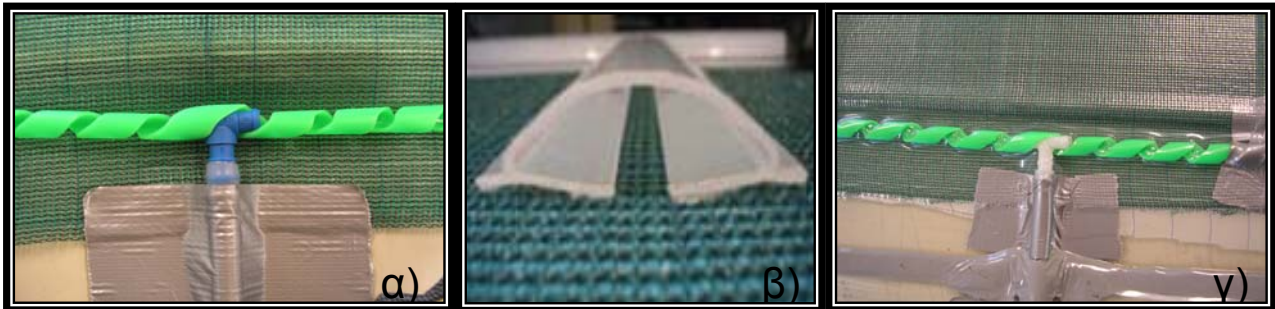


Σχήμα 6.16 : α) Σάκος κενού (vacuum bag) β) εφαρμογή του σάκου κενού στη κατασκευή των δοκιμών.

5) Μονωτική ταινία (Tacky tape) : Η ταινία αυτή χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η στεγανοποίηση μεταξύ του σάκου κενού και του καλουπιού. Κολλιέται περιμετρικά των υφασμάτων πάνω στο καλούπι και επάνω της κολλιέται ο σάκος κενού. Οι ταινίες αυτές έχουν μεγάλο πάχος και υψηλή κολλητική ικανότητα. Είναι σχεδιασμένες να μπορούν να συμπιέζονται και να μην αλλάζουν σχήμα όταν εφαρμοστεί το κενό στη διάταξη και τεντώσει ο σάκος κενού.

6) Γραμμές αναρρόφησης αέρα-ρητίνης (resin inlet-outlet port) : Οι γραμμές αναρρόφησης κατασκευάζονται με τη ίδια μεθοδολογία είτε πρόκειται να εγκατασταθούν σε κατασκευές μεγάλων διαστάσεων, όπως είναι οι γάστρες και τα καταστρώματα, είτε σε μικρότερες όπως τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν. Αποτελούνται από πλαστικό σπιράλ (Σχήμα 6.17α) στο οποίο η ρητίνη κινείται στο εσωτερικό του, όπως σε ένα απλό σωλήνα, αλλά μπορεί να εξέρχεται από αυτό μέσα από τις εγκοπές κινούμενη κάθετα προς τον άξονα του σπιραλ. Στο εμπόριο υπάρχουν και άλλες διατάξεις όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.17β. Στο σπιράλ προσαρμόζεται συνδετικό τύπου T, που μπορεί να είναι πλαστικό ή μεταλλικό (Σχήμα 6.17γ). Στην άλλη άκρη του συνδετικού T συνδέεται εύκαμπτος πλαστικός σωλήνας, που στην περίπτωση της εισαγωγής ρητίνης καταλήγει στο δοχείο με τη ρητίνη, ενώ στην περίπτωση της αναρρόφησης αέρα συνδέεται με την παγίδα ρητίνης και στη συνέχεια με την αντλία κενού. Όταν χρησιμοποιείται το πλαστικό σπιράλ πρέπει να τυλίγεται με ένα κομμάτι peel ply έτσι ώστε μετά την εφαρμογή του κενού να αποτρέπεται ο σάκος κενού να φράξει τις εγκοπές και να εμποδίζει την κίνηση της

ρητίνης όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17γ. Το μήκος, το πλήθος και η διάμετρος των γραμμών αναρρόφησης εξαρτάται από τη στρατηγική έγχυσης και από το μέγεθος της κατασκευής.



Σχήμα 6.17 : α) Γραμμή αναρρόφησης με τη χρήση σπιδράλ β) αλλού τύπου γραμμή αναρρόφησης γ) γραμμή αναρρόφησης χωρίς την επικάλυψη με peel ply.

6.5.2 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού

Μετά την περιγραφή όλων των υλικών που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού θα περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η διαδικασία κατασκευής αποτελείται από όλα εκείνα τα βήματα που θα απαιτούνταν για την κατασκευή μιας γάστρας ή ενός καταστρώματος, αλλά στην πιο απλοποιημένη τους μορφή, καθώς η ορθογωνική γεωμετρία και το μέγεθος των πλακών που θα κατασκευαστούν έχει μικρότερες απαιτήσεις από άποψη σχεδιασμού της στρατηγικής έγχυσης σε σχέση με τη γεωμετρία μιας γάστρας. Τα προβλήματα όμως που μπορούν να εμφανιστούν είναι της ίδιας φύσεως, αλλά μικρότερης έκτασης λόγω του μεγέθους της κατασκευής.

Η διαδικασία της έγχυσης υπό συνθήκες κενού για την κατασκευή των δοκιμίων αποτελείται από τα παρακάτω βήματα :

ΒΗΜΑ 1^ο : ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Η διαδικασία παρασκευής των ενισχυτικών στρώσεων λόγω του γεγονότος ότι είναι κοινή και στις δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 6.4.

ΒΗΜΑ 2^ο : ΖΥΓΙΣΜΑ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Μετά την παρασκευή τους, οι ενισχυτικές στρώσεις ζυγίζονται σε ζυγαριά ακριβείας. Έτσι γνωρίζοντας το συνολικό βάρος των στρώσεων και θέτοντας έναν τυπικό αριθμό για την περιεκτικότητα του πολύστρωτου σε ενισχυτικές ίνες, μπορούμε να εκτιμήσουμε την ποσότητα της ρητίνης που είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί για να έχουμε πλήρη εμποτισμό του πολύστρωτου.

ΒΗΜΑ 3^ο : ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ.

Με τον όρο προετοιμασία εννοούμε όλες τις απαραίτητες ενέργειες, ώστε η επιφάνεια του καλουπιού, που θα έρθει σε επαφή με το πολυστρωτο να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες. Αρχικά το καλούπι καθαρίζεται από σκόνες και τις διάφορες επικαθίσεις με κάποιο υγρό που δεν αφήνει κατάλοιπα μετά την εφαρμογή του (πχ ασετόν). Επίσης ο χώρος στον οποίο είναι τοποθετημένο το καλούπι πρέπει να είναι σε κατάσταση καθαρού δωματίου (clean room conditions). Η κατάσταση αυτή μπορεί να μην είναι εφικτή στο περιβάλλον εργασίας οι συνθήκες όμως θα πρέπει να προσεγγίζουν την κατάσταση αυτή. Έτσι δεν θα πρέπει να υπάρχει σκόνη και κατάλοιπα που να εντοπίζονται οπτικά και να υπάρχει πιθανότητα να μεταφερθούν στην κατασκευή [13].

Εάν το καλούπι έχει χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενη εφαρμογή και υπάρχουν κολλημένα κατάλοιπα ρητίνης αφαιρούνται με τη χρήση πλαστικής σπάτουλας, ώστε να μην προκληθεί φθορά στην επιφάνεια του καλουπιού. Η επιφανειακή τραχύτητα του καλουπιού πρέπει να είναι μεταξύ 0.8 και 0.4 μm [13]. Στην περίπτωση που το καλούπι φέρει επιφανειακές εκδορές πρέπει να επισκευαστούν ανάλογα με τη σοβαρότητα τους.

Στη συνέχεια το καλούπι αλείφεται με αποκολλητική ουσία (release wax) μόνο στην περιοχή που θα έρθει σε επαφή με τη ρητίνη και όχι στα σημεία που θα κολληθεί η στεγανοποιητική ταινία. Ακολούθως το καλούπι αφήνεται να στεγνώσει για 10-15 λεπτά και γυαλίζεται με πανί για να απομακρυνθεί η περίσσεια αποκολλητικής ουσίας. Μετά από όλα αυτά, σχεδιάζονται πάνω στο καλούπι αξονικές γραμμές και οι κύριες διευθύνσεις των στρώσεων, οι οποίες θα βοηθήσουν στην τοποθέτηση των ενισχυτικών υφασμάτων.

ΒΗΜΑ 4^ο : ΚΟΠΗ PEEL PLY ΚΑΙ INFUSION MESH

Το peel ply είναι το πρώτο ύφασμα που θα τοποθετηθεί πάνω από τις ενισχυτικές στρώσεις, ώστε μετά το πέρας της διαδικασίας το πολυστρωτο να αποκολληθεί από τη διάταξη. Οι διαστάσεις του είναι μεγαλύτερες από αυτές των στρώσεων κατά 5 cm περίπου. Το infusion mesh κόβεται σε διαστάσεις μεγαλύτερες από αυτές των υφασμάτων κατά 1-2 cm ως προς το πλάτος και κατά 5 cm ως προς το μήκος. Το μήκος του infusion mesh είναι μεγαλύτερο, ώστε πάνω στην περίσσεια να τοποθετηθεί η εισαγωγή της ρητίνης.

ΒΗΜΑ 5^ο : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

Τα ενισχυτικά υφάσματα μεταφέρονται από το χώρο αποθήκευσης στο χώρο εργασίας και ξεκινά η τοποθέτησή τους στο καλούπι. Οι στρώσεις στοιβάζονται στο καλούπι σύμφωνα με το σύστημα αρίθμησης τους. Η τοποθέτησή τους γίνεται ώστε οι αξονικές που έχουν σχεδιαστεί στο καλούπι να αποτελούν προέκταση των αξονικών που έχουν σχεδιαστεί στις στρώσεις. Επίσης οι κύριες διευθύνσεις των στρώσεων θα πρέπει να συμπίπτουν με αυτές που έχουν προσημειωθεί στο καλούπι. Στο σημείο αυτό τοποθετούνται και οι τεχνητές ατέλειες στις στρώσεις και στις θέσεις που

έχουν προκαθοριστεί, με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην μετακινηθούν κατά την τοποθέτηση της επόμενης στρώσης.

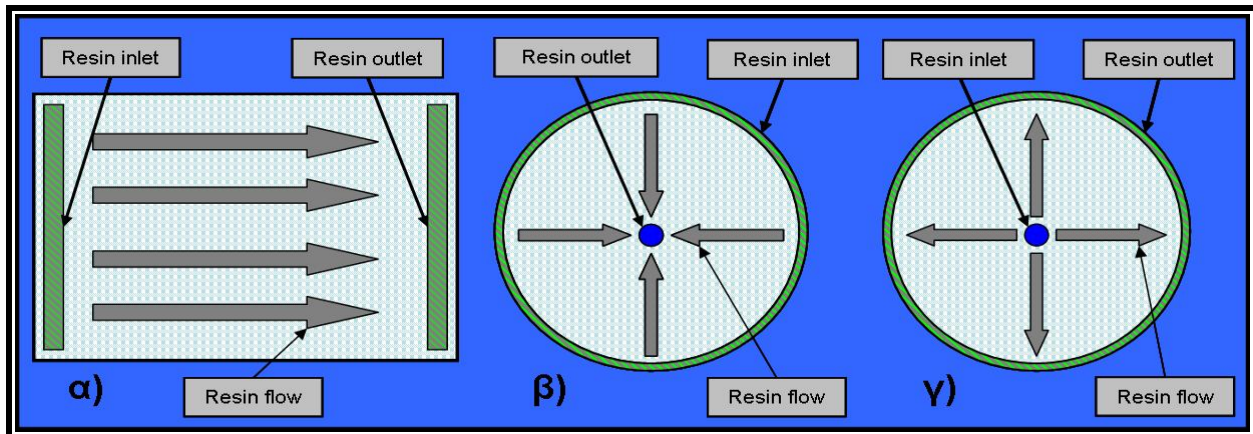
Μετά την στοίβαση των ενισχυτικών στρώσεων και την τοποθέτηση των τεχνητών ατελειών τοποθετείται το peel ply. Το κομμάτι του peel ply απλώνεται πάνω από τις στρώσεις χωρίς να έχει τσακίσματα ή πτυχές, διότι θα μεταφερθούν στην επιφάνεια του πολύστρωτου μετά την στερεοποίηση της ρητίνης ενώ κατά τη διάρκεια του εμποτισμού ενδέχεται να δημιουργήσουν κανάλια ροής. Πάνω από το peel ply τοποθετείται το infusion mesh και έτσι ολοκληρώνεται η τοποθέτηση των υφασμάτων. Τέλος η όλη διάταξη σταθεροποιείται με τη χρήση ταινίας (flash tape) για να αποφευχθεί οποιαδήποτε μετακίνηση της στοίβας των υφασμάτων στην εξέλιξη της διαδικασίας. Σε κατασκευές μεγάλου μεγέθους με πολύπλοκη γεωμετρία η σταθεροποίηση των υφασμάτων είναι μια δύσκολη διαδικασία. Πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα ενισχυτικά υφάσματα θα παραμείνουν στην προεπιλεγμένη θέση τους και ότι θα προσαρμοστούν στην γεωμετρία του καλουπιού.

Αρχικά αυτό εξαρτάται από το είδος του υφάσματος και τις ιδιότητες του. Δύο είναι οι ιδιότητες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των υφασμάτων κατά την τοποθέτησή τους. Η πρώτη είναι η ικανότητα του υφάσματος να παίρνει το σχήμα καμπύλων επιφανειών, χωρίς να δημιουργούνται πτυχώσεις και στην αγγλική ορολογία ονομάζεται Drapability και η δεύτερη είναι η ικανότητα να διατηρεί το σχήμα που του έχει δοθεί και ονομάζεται Shape Stability [2]. Από εκεί και πέρα η σταθεροποίηση των υφασμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση άλλων μέσων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σφικτήρες οι οποίοι αφαιρούνται πριν ή μετά την έγχυση. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνιμα μηχανικά μέσα, όπως τα συρραπτικά και οι ταινίες αλλά και διάφορες κολλητικές ουσίες. Η χρήση μόνιμων μηχανικών μέσων δεν ενδείκνυται καθώς τα μέσα αυτά παραμένουν στο εσωτερικό της κατασκευής και θεωρούνται ως ξένα εγκλείσματα από τα οποία μπορεί να ξεκινήσει αστοχία του υλικού. Η χρήση κολλητικών ουσιών πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα, πως επηρεάζονται μακροπρόθεσμα οι ιδιότητες της πολύστρωτης κατασκευής [2].

ΒΗΜΑ 4^ο : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ ΑΕΡΑ

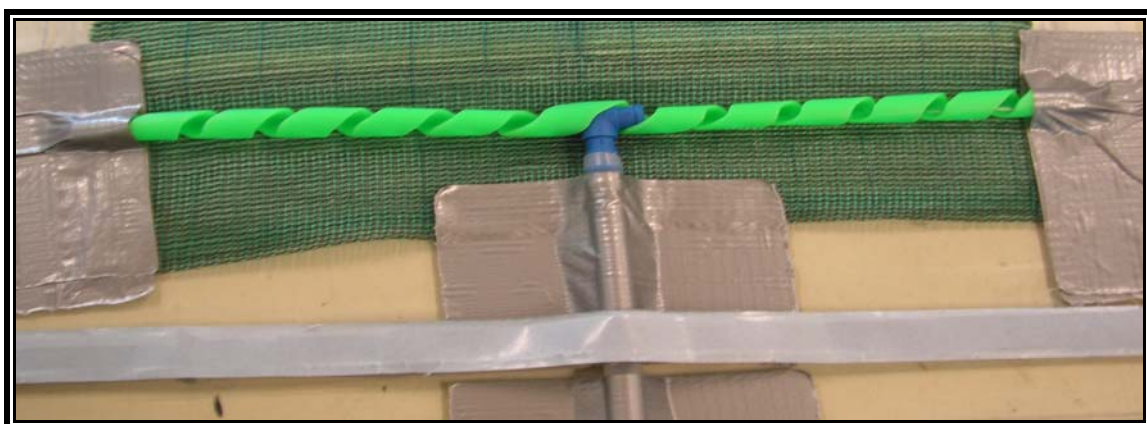
Η θέση πάνω στην πλάκα στην οποία τοποθετούνται οι γραμμές τροφοδοσίας ρητίνης και αναρρόφησης αέρα εξαρτάται από τη στρατηγική έγχυσης που έχει επιλεγεί. Η στρατηγική έγχυσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η γεωμετρία και το μέγεθος του καλουπιού. Καθορίζει την θέση στην οποία θα τοποθετηθούν οι γραμμές τροφοδοσίας και αναρρόφησης αλλά και τον αριθμό τους. Οι στρατηγικές έγχυσης διακρίνονται σε τρία βασικά είδη και οποιαδήποτε άλλη διάταξη μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί συνδυασμό των τριών αυτών [2]. Οι στρατηγικές αυτές είναι οι παρακάτω και απεικονίζονται στο Σχήμα 6.18 :

- α) Έγχυση ακμής επίπεδης πλάκας.
- β) Περιφερειακή έγχυση κυκλικής πλάκας.
- γ) Σημειακή έγχυση κυκλικής πλάκας.



Σχήμα 6.18 : Στρατηγικές έγχυσης α) έγχυση ακμής επίπεδης πλάκας β) περιφερειακή έγχυση κυκλικής πλάκας γ) σημειακή έγχυση κυκλικής πλάκας.

Από τις παραπάνω στρατηγικές έγχυσης επιλέχθηκε η έγχυση ακμής επίπεδης πλάκας. Έτσι η γραμμή τροφοδοσίας ρητίνης (resin inlet) και η γραμμή αναρρόφησης (outlet port, resin outlet) θα τοποθετηθούν στις δύο απέναντι ακμές των πλακών και η ρητίνη θα διατρέξει κατά μήκος το πολύστρωτο. Ξεκινώντας την κατασκευή τους, κόβεται σπιράλ ίσο με 25 cm όσο το πλάτος της πλάκας και στο κέντρο του τοποθετείται το συνδετικό σωληνάκι τύπου T (Σχήμα 6.19). Στη συνέχεια η εισαγωγή της ρητίνης τοποθετείται στο καλούπι πάνω από το infusion mesh. Η εισαγωγή ρητίνης με το σωληνάκι τύπου T συνδέεται με σωλήνα αναρρόφηση που τελικά οδηγεί στο δοχείο με την ρητίνη. Η γραμμή τροφοδοσίας ρητίνης σταθεροποιείται πάνω στο καλούπι με τη χρήση ταινία.

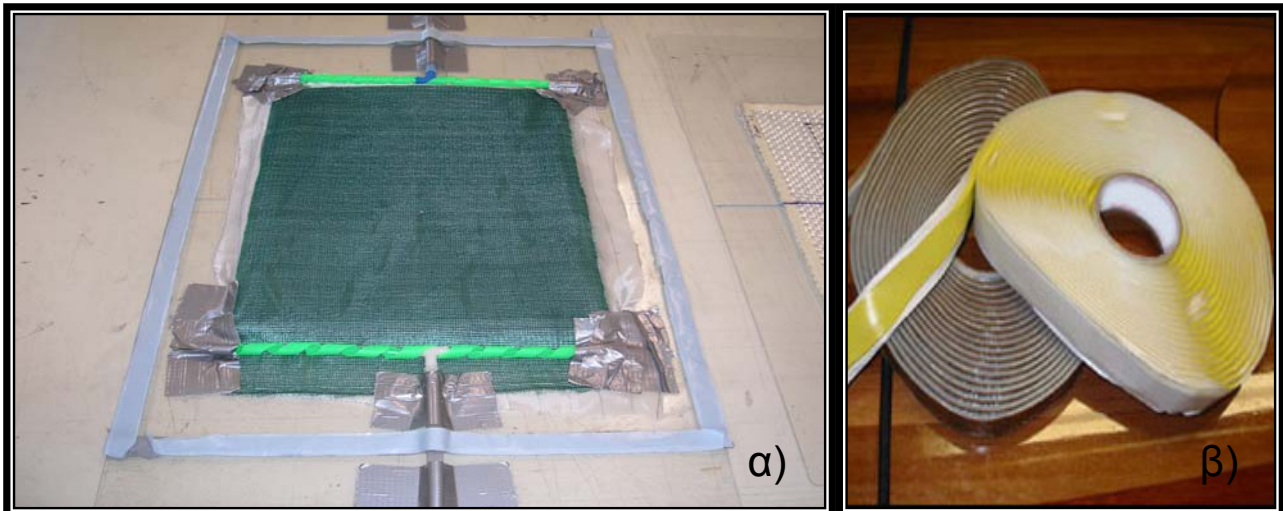


Σχήμα 6.19 : Διάταξη τροφοδοσίας ρητίνης-αναρρόφησης αέρα.

Η διαδικασία που προαναφέρθηκε ακολουθείται για την κατασκευή της αναρρόφησης αέρα και για την εγκατάσταση της στο καλούπι.

ΒΗΜΑ 5^ο : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΙΝΙΑΣ ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η στεγανοποιητική ταινία τοποθετείται περιμετρικά των ενισχυτικών υφασμάτων ώστε να απέχει 5 έως 10 cm από το πολύστρωτο (Σχήμα 6.20). Το καλούπι, στα σημεία που θα κολληθεί η ταινία, θα πρέπει να είναι καθαρό, να μην υπάρχουν υπολείμματα ρητίνης από προηγούμενη εφαρμογή, ούτε ξεφτισμένες ίνες από τις ενισχυτικές στρώσεις. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, στα σημεία αυτά το καλούπι δεν πρέπει να έχει αλειφθεί με αποκολλητική ουσία.



Σχήμα 6.20 : α) Τοποθέτηση στεγανοποιητικής ταινίας στη διάταξη β) στεγανοποιητική ταινία.

Η στεγανοποιητική ταινία είναι διπλής όψης, έχει μαστιχοειδή υφή και υψηλή κολλητική ικανότητα. Η μια της πλευρά κολλιέται στο καλούπι ενώ η άλλη παραμένει καλυμμένη με το αντικολλητικό χαρτί. Στην περίμετρο του καλουπιού κολλιέται μια στρώση ταινίας, η οποία διακόπτεται αναγκαστικά σε δύο σημεία. Στα σημεία αυτά έρχεται σε επαφή η ταινία με σωληνάκια τροφοδοσίας και αναρρόφησης. Εκεί χρησιμοποιούνται δύο στρώσεις ταινίας. Η πρώτη στρώση περνά κάτω από το σωληνάκι και η δεύτερη στρώση περνά από πάνω. Τα δύο κομμάτια ταινίας πιέζονται δυνατά με το δάκτυλο ώστε να ενοποιηθούν και να δημιουργηθεί γύρω από το σωληνάκι ένας δακτύλιος από ταινία, που θα αποτρέψει οποιαδήποτε διαρροή. Στη συνέχεια πιέζεται προσεκτικά η ταινία που έχει κολληθεί στο καλούπι για να απομακρυνθούν φυσαλίδες μεταξύ ταινίας και καλουπιού αλλά και για να εξασφαλιστεί η απαραίτητη στεγανοποίηση. Τέλος απομακρύνεται το αντικολλητικό χαρτί.

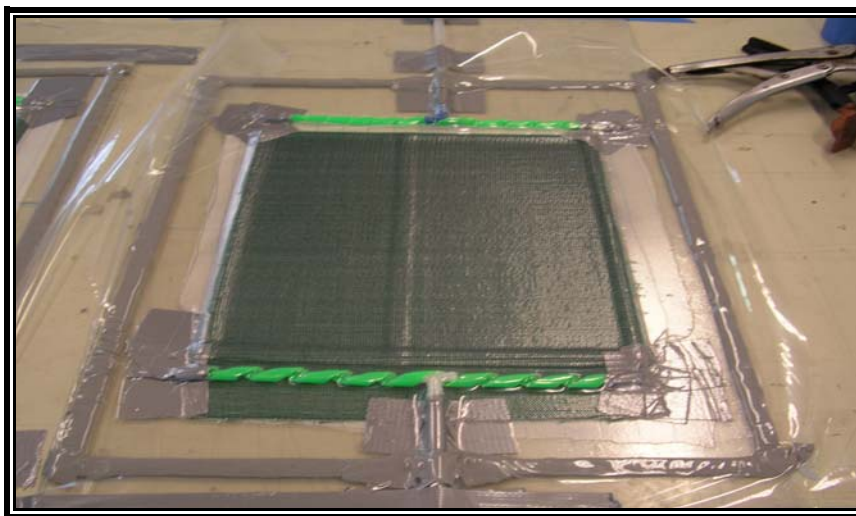
ΒΗΜΑ 6^ο : ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΣΑΚΟΥ ΚΕΝΟΥ

Ο σάκος κενού έχει κοπεί σε διαστάσεις λίγο μεγαλύτερες από αυτές του καλουπιού. Αυτό γίνεται για να υπάρχει επαρκής μεμβράνη να καλύψει τις αλλαγές στη γεωμετρία του καλουπιού. Για να καλυφθούν οι αλλαγές στη γεωμετρία δεν μπορεί κανείς να στηριχτεί στην ελαστικότητα της μεμβράνης γιατί τότε στα σημεία αλλαγής του πάχους ή στα όρια της πλάκας η μεμβράνη με την εφαρμογή του κενού θα γεφυρώσει, με αποτέλεσμα την δημιουργία καναλιών ροής και την εμφάνιση

του φαινομένου race tracking. Στην αντίθετη περίπτωση που η μεμβράνη είναι πολύ μεγαλύτερη τότε τσακίζει σε πολλά σημεία. Οι τσακίσεις αυτές επεκτείνονται μέχρι τα άκρα της μεμβράνης, πάνω στην ταινία στεγανοποίηση απαιτώντας ιδιαίτερη προσοχή διότι αποτελούν σημεία πιθανής διαρροής. Για να στεγανοποιηθεί η διάταξη η μεμβράνη πιέζεται σε όλα τα σημεία πάνω στην στεγανοποιητική ταινία.

ΒΗΜΑ 7^ο : ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΓΑΝΟΤΗΤΑΣ [2]

Όταν το καλούπι κλείσει με τον σάκο κενού, η διάταξη συνδέεται με την αντλία κενού μέσω της γραμμής αναρρόφησης αέρα ενώ η γραμμή αναρρόφησης ρητίνης σφραγίζεται. Η αντλία αφαιρεί τον αέρα από τη διάταξη (Σχήμα 6.21). Τότε υπάρχουν δύο τρόποι να διαπιστωθεί αν υπάρχουν διαρροές. Ο πρώτος τρόπος στηρίζεται στην επίτευξη της επιθυμητής πίεσης. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπάρχουν διαρροές στη διάταξη αλλά με την υποστήριξη της αντλίας κενού ο ρυθμός διαρροής να καλύπτεται. Τότε εάν πετυχαίνεται η επιθυμητή πίεση η στεγανότητα κρίνεται ικανοποιητική. Ο τρόπος αυτός κρίνεται ανεπαρκής.



Σχήμα 6.21 : Δοκιμή στεγανότητας κατά την κατασκευή των δοκιμών.

Ο δεύτερος τρόπος στηρίζεται στη μέτρηση του ρυθμού διαρροής για παράδειγμα x mbar το λεπτό. Έτσι όταν απομακρυνθεί ο αέρας από τη διάταξη και ο σάκος κενού συμπιέσει τα ενισχυτικά υφάσματα η αντλία τίθεται εκτός λειτουργίας, όταν το μανόμετρο δείξει πίεση στην διάταξη κοντά στην ατμοσφαιρική (990 mbar). Από αυτή τη στιγμή αρχίζει να μετράται ο ρυθμός διαρροής. Στην περίπτωση μεγάλων πολύστρωτων κατασκευών, όπως είναι η γάστρα ενός σκάφους, ένας ρυθμός διαρροής της τάξεως των 5 mbar είναι αποδεκτός, αν και σε πολλές περιπτώσεις αποδεκτοί είναι και ρυθμοί της τάξεως των 10 ή και 15 mbar/λεπτό.

Η μέθοδος της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού είναι πολύ ευαίσθητη στις διαρροές, καθώς εισρέει αέρας από τα σημεία διαρροής στο πολύστρωτο με αποτέλεσμα τη δημιουργία φυσαλίδων

στο πολύστρωτο, πράγμα που μπορεί να αποβεί καταστροφικό. Για το λόγο αυτό κατά, τη διάρκεια της δοκιμής στεγανότητας γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν τα σημεία διαρροής. Ο εντοπισμός τους γίνεται οπτικά αλλά και με τη βοήθεια υπερηχητικών οργάνων (leak detectors). Όταν εντοπιστεί κάποιο σημείο διαρροής σφραγίζεται με στεγανοποιητική ταινία. Η παραπάνω διαδικασία είναι χρονοβόρα και για τον έλεγχο μεγάλων πολύστρωτων κατασκευών μπορεί να πάρει από μερικές ώρες έως και μια μέρα.

Στην διάταξη που κατασκευάστηκε για τον εμποτισμό των δοκιμών πραγματοποιήθηκε η παραπάνω δοκιμή. Η διάταξη έμεινε 24 ώρες κάτω από ατμοσφαιρική πίεση (950 mbar) και δεν εμφανίστηκε διαρροή. Αυτό οφείλεται στο μικρό μέγεθος και στην απλή γεωμετρία της κατασκευής.

Τέλος κατά τη διάρκεια της δοκιμής παρατηρήθηκε ότι ο σάκος κενού πιέζεται στα ανοίγματα του σπιδάλ και κλείνει τα κανάλια κίνησης της ρητίνης προς το πολύστρωτο (Σχήμα 6.22). Αρχικά κατά την κατασκευή των γραμμών αναρρόφησης και τροφοδοσίας, θα έπρεπε να καλυφθούν με reel ply ώστε να μην παρουσιαστεί το παραπάνω φαινόμενο. Η συγκεκριμένη διορθωτική ενέργεια δεν έγινε στην διάταξη [2]. Η παράλειψη αυτή δεν είχε κάποια δυσμενή συνέπεια για το πολύστρωτο. Ενδεχομένως να επιμήκυνε τον χρόνο εμποτισμού. Σε μια μεγαλύτερη κατασκευή θα υπήρχαν συνέπειες.



Σχήμα 6.22 : Ο σάκος κενού κλείνει τα ελικοειδή ανοίγματα στο σπιδάλ κατά τη δοκιμή στεγανότητας.

ΒΗΜΑ 8^ο : ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΡΗΤΙΝΗΣ

Μετά το τέλος της δοκιμής στεγανότητας και εφόσον θεωρείται επιτυχής η διαδικασία προχωρά στην ανάμειξη της ρητίνης με τον καταλύτη ή τον επιταχυντή ανάλογα με το είδος της. Αρχικά η ρητίνη θα πρέπει να βρίσκεται στο χώρο όπου θα πραγματοποιηθεί η έγχυση 24 ώρες πριν, έτσι ώστε να αποκτήσει τη θερμοκρασία του χώρου [2]. Η ποσότητα της ρητίνης που θα χρειαστεί, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, υπολογίζεται με βάση το βάρος των ενισχυτικών στρώσεων και την περιεκτικότητα σε ίνες που θέλουμε να αποκτήσει το παραγόμενο πολύστρωτο. Με δεδομένη την ποσότητα της ρητίνης υπολογίζουμε την ποσότητα του σκληρυντή, στην περίπτωση της εποξικής ρητίνης και στην περίπτωση της πολυεστερικής ρητίνης τις ποσότητες του επιταχυντή και του

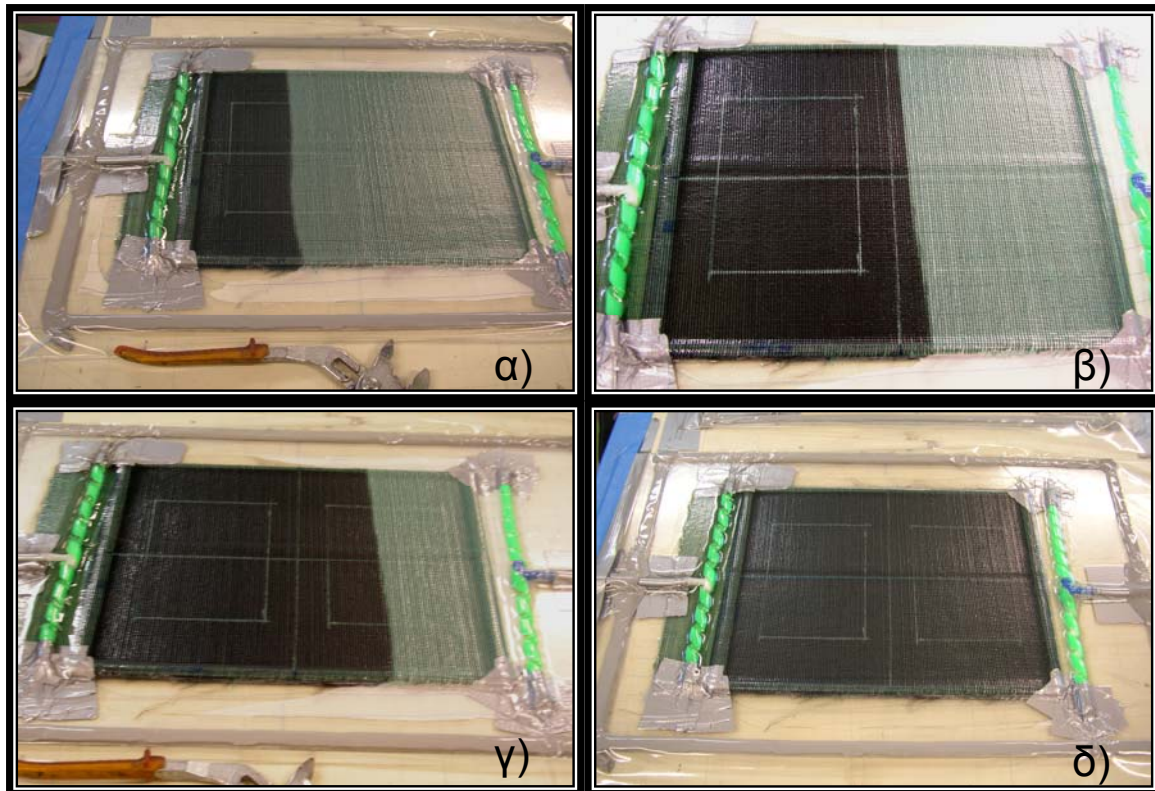
καταλύτη. Οι ποσότητες αυτές αποτελούν ποσοστό της ποσότητας ρητίνης που θα χρησιμοποιηθεί και καθορίζουν τον χρόνο στερεοποίησης της (gel time). Καθορίζοντας τις ποσότητες αυτές δίνουμε στην ρητίνη χρόνο στερεοποίησης τέτοιο ώστε να ολοκληρωθεί ο εμποτισμός των υφασμάτων και στην συνέχεια να ξεκινήσει η στερεοποίηση της. Οι ποσότητες αυτές προστίθενται στο δοχείο της ρητίνης και το μείγμα ανακατεύεται με προσοχή ώστε να δημιουργηθούν όσο το δυνατόν λιγότερες φυσαλίδες. Από τη στιγμή αυτή και μετά ο χρόνος στερεοποίησης της ρητίνης έχει αρχίσει να μετρά αντίστροφα

ΒΗΜΑ 9^ο : ΕΓΧΥΣΗ ΡΗΤΙΝΗΣ

Η διάταξη βρίσκεται ήδη από την δοκιμή στεγανότητας συμπιεσμένη με τις γραμμές εισαγωγής και αναρρόφησης κλειστές. Η αντλία κενού τίθεται σε λειτουργία και η γραμμή εισαγωγής της ρητίνης τοποθετείται στο δοχείο με την ρητίνη. Μετά την τοποθέτηση της μέσα στο δοχείο απασφαλίζεται ώστε να μην εισαχθεί αέρας στη διάταξη. Η ρητίνη αρχίζει να ρέει μέσα στο καλούπι εμποτίζοντας τα ενισχυτικά υφάσματα. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η ρητίνη δεν αναρροφάται από την αντλία κενού αλλά από την διαφορά πίεσης που η αντλία δημιουργεί μεταξύ της διάταξης και του περιβάλλοντος. Ο κενός χώρος που δημιουργείται στο πολύστρωτο από την απομάκρυνση του αέρα έχει σαν αποτέλεσμα να ασκείται πίεση στο πολύστρωτο. Η πίεση αυτή αναγκάζει την ρητίνη να γεμίσει τα κενά και τελικά να εξισωθεί η εξωτερική πίεση με την εσωτερική πίεση της διάταξης. Έτσι θεωρητικά η αντλία, εφόσον έχει επιτευχθεί το κενό, μπορεί να αφαιρεθεί από τη διάταξη (αν και δεν συνιστάται).

Η ρύθμιση της πίεσης της αντλίας έχει άμεση σχέση με τον χρόνο που έχει καθοριστεί για τη στερεοποίηση της ρητίνης. Στην περίπτωση των δοκιμών που κατασκευάστηκαν ο χρόνος αυτός είχε καθοριστεί στα 20 λεπτά. Μέσα στο χρονικό αυτό διάστημα η ρητίνη πρέπει να εμποτίσει ολόκληρο το πολύστρωτο. Η πίεση αρχικά ρυθμίστηκε στα 0.6 bar ώστε η ρητίνη να μην κινηθεί πολύ γρήγορα και αφήσει περιοχές του πολύστρωτου που δεν έχουν εμποτιστεί. Όταν το μέτωπο της ρητίνης φτάσει στη γραμμή αναρρόφησης, η πίεση ρυθμίζεται στα 0.8 bar ώστε να απομακρυνθεί η περίσσεια ρητίνης από το πολύστρωτο.

Κατά τη διάρκεια του εμποτισμού πρέπει να παρακολουθείται η στάθμη της ρητίνης μέσα στο δοχείο καθώς και η θέση του σωλήνα τροφοδοσίας μέσα σ'αυτό. Εάν ο σωλήνας κολλήσει στον πάτο του δοχείου η ροή της ρητίνης θα σταματήσει, ενώ αν βγει εκτός ρητίνης, καθώς κατεβαίνει η στάθμη της, ποσότητα αέρα θα εισαχθεί στο πολύστρωτο. Η κίνηση της ρητίνης παρακολουθείται από το μέτωπο διαβροχής ταυτόχρονα με το χρόνο από την ανάμειξη της ρητίνης (Σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.23 : Κίνηση της ρητίνης κατά τον εμποτισμό της πλάκας CFRP **α)** στα 5 λεπτά **β)** στα 10 λεπτά **γ)** στα 15 λεπτά **δ)** στα 20 λεπτά μετά την έναρξη της έγχυσης.

Όταν η ρητίνη καλύψει όλη την πολύστρωτη πλάκα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.23δ δεν σημαίνει ότι το πολύστρωτο έχει εμποτιστεί πλήρως και ότι η διαδικασία της έγχυσης έχει ολοκληρωθεί. Η περιεκτικότητα του σε ίνες, το πάχος του και η περιεκτικότητά του σε φυσαλίδες καθορίζονται από τον τρόπο που τερματίζεται η αναρρόφηση της ρητίνης [2]. Υπάρχουν τέσσερις δυνατοί τρόποι για να τερματιστεί η αναρρόφηση.

- Κλείσιμο της γραμμής παροχής ρητίνης (close resin inlet).
- Κλείσιμο της γραμμής αναρρόφησης αέρα (close outlet port).
- Κλείσιμο ταυτόχρονα της παροχής ρητίνης και της αναρρόφησης αέρα.
- Αύξηση της πίεσης στην αναρρόφηση και κλείσιμο της παροχής ρητίνης.

Στο καλούπι κατά την χρονική στιγμή που μόλις έχει πλήρως εμποτιστεί δεν ασκείται σχεδόν καμία πίεση στα ενισχυτικά υφάσματα στην περιοχή κοντά στην παροχή της ρητίνης. Αυτό σημαίνει ότι το πολύστρωτο έχει μεγαλύτερο πάχος κοντά στην περιοχή αυτή σε σχέση με το πάχος του στην περιοχή της αναρρόφησης αέρα. Εάν την χρονική αυτή στιγμή κλείσει πρώτη η παροχή ρητίνης, η πίεση σε ολόκληρο το πολύστρωτο θα μειωθεί ώστε να φτάσει την πίεση της αντλίας. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, η περίσσεια ρητίνης να ρέει προς την αναρρόφηση αέρα, πράγμα που οδηγεί στην μείωση του πάχους του πολύστρωτου. Έτσι προκύπτει μια πολύστρωτη κατασκευή με υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες. Οι φυσαλίδες του αέρα που υπάρχουν μέσα στο πολύστρωτο θα αυξήσουν το μέγεθος τους. Το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα στην περιοχή κοντά στην παροχή της

ρητίνης όπου η πτώση της πίεσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πτώση στη περιοχή της αναρρόφησης αέρα. Επιπρόσθετα υπάρχει κίνδυνος απαέρωσης της ρητίνης. Αυτό σημαίνει ότι ο αέρας που είναι διαλυμένος μέσα στη ρητίνη θα σχηματίσει φυσαλίδες, καθώς η ποσότητα του αέρα που μπορεί να διαλυθεί στην ρητίνη είναι μικρότερη σε χαμηλές πιέσεις [2].

Στην περίπτωση που η αναρρόφηση αέρα κλείσει πρώτη, η πίεση στη διάταξη θα αυξηθεί στην ατμοσφαιρική. Η κατάσταση αυτή θα οδηγήσει τις φυσαλίδες να μειώσουν το μέγεθος τους, αλλά το πάχος του πολυστρωτού θα αυξηθεί με αποτέλεσμα τη μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες, καθώς η περίσσεια ρητίνης θα παραμείνει στο πολυστρωτό. Επίσης σε κάθετες επιφάνειες, η βαρύτητα θα αναγκάσει τη ρητίνη να τρέξει με αποτέλεσμα το πολυστρωτό να έχει μεταβλητό πάχος.

Κλείνοντας ταυτόχρονα την παροχή ρητίνης και την αναρρόφηση αέρα έχουμε εξισορρόπηση της πίεσης, κάπου μεταξύ της ατμοσφαιρικής που επικρατεί στην περιοχή της παροχής και της πίεση που επικρατεί στην περιοχή της αναρρόφησης. Η πρακτική αυτή κρίνεται κατάλληλη για να τερματιστεί η έγχυση. Εάν όμως, υπάρχει κάποια διαρροή που δεν έχει εντοπιστεί, τερματίζοντας την έγχυση με τον τρόπο αυτό το πολυστρωτό θα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε φυσαλίδες [2].

Τέλος, η αύξηση της πίεσης στην αναρρόφηση και το κλείσιμο της παροχής ρητίνης αποτελεί την πιο επιθυμητή πρακτική. Τερματίζοντας την έγχυση με τον τρόπο αυτό θα έχουμε και πάλι εξισορρόπηση των πιέσεων με τα ευεργετικά αποτελέσματα για το πολυστρωτό που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση, αλλά εάν υπάρξει διαρροή η αντλία θα απομακρύνει τον εισερχόμενο αέρα [2].

ΒΗΜΑ 10^ο : ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ ΚΑΙ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

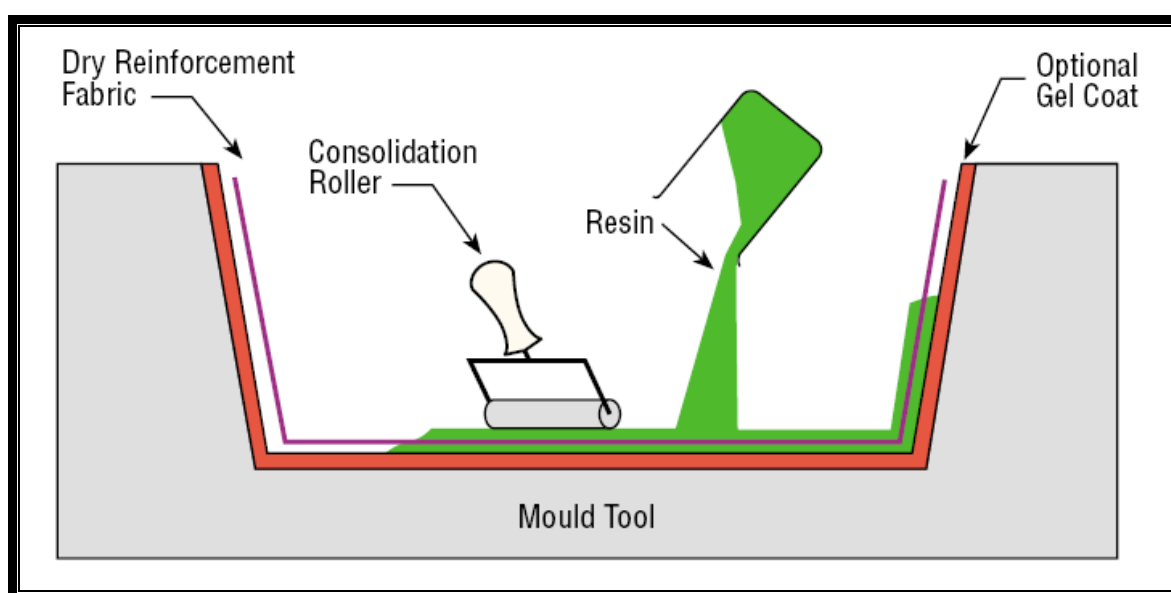
Μετά το τέλος της έγχυσης, η διάταξη αφήνεται ως έχει για 24 ώρες για να στερεοποιηθεί πλήρως η ρητίνη. Στη συνέχεια αφαιρούνται όλα τα αναλώσιμα υλικά και το πολυστρωτό αφαιρείται από το καλούπι με τη χρήση πλαστικής σπάτουλας.

6.6 Μορφοποίηση ρητίνης με απλή επαφή και επίστρωση με το χέρι (hand lay up)

Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή σκαφών όλων των διαστάσεων. Η μορφοποίηση γίνεται σε ανοικτό καλούπι, όπου η ρητίνη στερεοποιείται εν ψυχρώ με τις ενισχυτικές ίνες. Η μορφοποίηση με απλή επαφή μπορεί να γίνει, είτε με επίστρωση με το χέρι (hand lay-up), είτε με επίστρωση με ψεκασμό (spray-up). Η μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό δεν θα μας απασχολήσει. Αναλυτικά θα περιγραφεί η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι.

Αρχικά προετοιμάζεται το καλούπι, το οποίο μπορεί να είναι από ξύλο, από χάλυβα ή αλουμίνιο και έχει τη μορφή που επιθυμείται να αποκτήσει το πολυστρωτό. Για την κατασκευή των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε πλάκα από Plexiglas, στην οποία όπως και στην μέθοδο

της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού, πάνω της σχεδιάστηκαν αξονικές γραμμές για την ακριβή τοποθέτηση των στρώσεων και σημειώθηκαν σε κάθε περίπτωση οι κύριες διευθύνσεις των στρώσεων. Στη συνέχεια το καλούπι αλείφεται με αποκολλητικό μέσο για να ξεκολλήσει το πολύστρωτο μετά το τέλος της διαδικασίας. Προαιρετικά το καλούπι μπορεί να επιστρωθεί με ρητίνη καλής ποιότητας (gel coat) με ψεκασμό ή με πινέλο, όπως άλλωστε μπορεί να γίνει και στην μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού. Σκοπός του gel coat είναι να προστατεύει τις επακόλουθες στρώσεις ινών-ρητίνης από την επαφή τους με το περιβάλλον (π.χ θαλάσσιο) και να προσδώσει ευχάριστη όψη στο πολύστρωτο, αφού μπορεί να έχει και συγκεκριμένο χρώμα (Σχήμα 6.24).

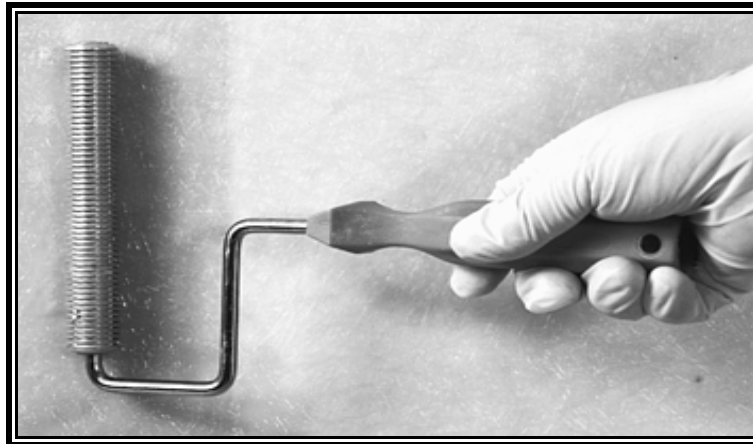


Σχήμα 6.24: Γραφική παράσταση της μορφοποίησης με επαφή και επίστρωση με το χέρι.

Η κατασκευή του πολύστρωτου ξεκινά με την ρητίνη σε υγρή μορφή να εναποτίθεται ελεύθερα πάνω στο καλούπι χρησιμοποιώντας πινέλο ή ειδικές εύκαμπτες σπάτουλες από πλαστικό (squeegees). Πάνω στο πρώτο στρώμα ρητίνης τοποθετείται η πρώτη στρώση, η οποία διαβρέχεται από τη ρητίνη με τη βοήθεια ειδικού ρολού (Σχήμα 6.25). Η στρώση πιέζεται με το ρολό παράλληλα και κάθετα προς τη διεύθυνση των ινών. Με τον τρόπο αυτό αναγκάζεται η ρητίνη να εμποτίσει την στρώση και ταυτόχρονα απομακρύνονται οι φυσαλίδες και η περίσσεια ρητίνης. Επίσης η κεφαλή του ρολού είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να διαχωρίζει τα νήματα καθώς πιέζεται πάνω στην στρώση, επιτρέποντας στην ρητίνη να εμποτίσει τις ίνες και το πολύστρωτο να αποκτήσει τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες [2]. Η κίνηση του ρολού πάνω στη στρώση πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, διότι ασκώντας υπερβολική πίεση και κυλώντας αυτό απότομα διαταράσσεται η πλέξη των ενισχυτικών υφασμάτων.

Στη συνέχεια νέα ποσότητα ρητίνης ρίχνεται πάνω στην πρώτη στρώση, κατανέμεται με τη σπάτουλα και τοποθετείται η δεύτερη στρώση. Η νέα στρώση εμποτίζεται και αυτή με το ρολό και η

διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις στρώσεις του πολύστρωτου. Το πολύστρωτο είναι έτοιμο και αφήνεται για να πολυμεριστεί η ρητίνη.



Σχήμα 6.25 : Εμποτισμός στρώσης CSM με τη χρήση ρολού (consolidation roller).

Η μέθοδος μορφοποίησης με επαφή και επίστρωση με το χέρι είναι μια ευέλικτη διαδικασία. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες ρητίνες εποξικές, πολυεστερικές, βινυλεστερικές και οποιαδήποτε υφάσματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορεί να ικανοποιήσει μεγάλο εύρος απαιτήσεων. Παράλληλα είναι μια διαδικασία που μπορεί να εφαρμοστεί από τεχνίτες χωρίς εξειδικευμένες γνώσεις και απαιτεί μικρή επένδυση σε εξοπλισμό σε σχέση με άλλες μεθόδους. Παρόλα αυτά στη συγκεκριμένη μέθοδο, η ποιότητα των πολύστρωτων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Ένας από τους σημαντικότερους είναι η θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο που πραγματοποιείται η μορφοποίηση. Η θερμοκρασία που επικρατεί καθορίζει την ρευστότητα της ρητίνης αλλά και το χρόνο πολυμερισμού της (gel time).

Η ρευστότητα της ρητίνης καθορίζεται γενικά, από τους κατασκευαστές, να έχει συγκεκριμένη τιμή μεταξύ 18 και 25 °C (65 και 77 °F). Η τιμή αυτή αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις, κριτήριο επιλογής μιας ρητίνης για δεδομένη εφαρμογή. Όταν ο χώρος εργασίας δεν είναι ελεγχόμενος από άποψη θερμοκρασίας η ρευστότητα της ρητίνης θα αλλάξει. Έτσι σε χαμηλότερες θερμοκρασίες η ρευστότητα της ρητίνης θα αυξηθεί, κάνοντας των εμποτισμό των ενισχυτικών υφασμάτων δυσκολότερο. Αντίθετα η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την τιμή της ρευστότητας με αποτέλεσμα να διαβρέχει τα υφάσματα ευκολότερα. Αυτό, αρχικά προκαλεί το «στέγνωμα» των κάθετων τμημάτων μιας κατασκευής, καθώς η ρητίνη ρέει λόγω βαρύτητας. Επίσης η ευκολία διαβροχής οδηγεί το προσωπικό να χρησιμοποιεί λιγότερο τα μεταλλικά ρολά με αποτέλεσμα τα νήματα να μην διαχωρίζονται και οι ίνες να μην εμποτίζονται επαρκώς, κατάσταση που συνεπάγεται σε πολύστρωτο με μειωμένες μηχανικές ιδιότητες [2].

Ο χρόνος πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης επηρεάζεται επίσης από την θερμοκρασία. Η μείωση της θερμοκρασίας επιβραδύνει τον πολυμερισμό και την σκλήρυνση γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα της κατασκευής. Ο βαθμός πολυμερισμού και σκλήρυνσης της ρητίνης όταν η

κατασκευή αφαιρείται από το καλούπι έχει μεγάλη σημασία για τις ιδιότητες της πολύστρωτης κατασκευής. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν την διαδικασία πολυμερισμού προκαλώντας, σε πολλές περιπτώσεις, την στερεοποίηση της ρητίνης πριν τον πλήρη εμποτισμό του πολύστρωτου, με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Ο γρήγορος πολυμερισμός της ρητίνης, διαδικασία που είναι ισχυρά εξώθερμη, μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία εσωτερικών τάσεων, τη ρωγμάτωση της ρητίνης, ακόμα και τον αποχωρισμό των στρώσεων.

Γίνεται αντιληπτό ότι στη μέθοδο της μορφοποίηση με επαφή και επίστρωση με το χέρι εισάγεται μεγάλος αριθμός ατελειών στο κατασκευαζόμενο πολύστρωτο. Συνηθέστερες είναι οι φυσαλίδες, η κακή διαβροχή των στρώσεων και η δημιουργία περιοχών με περίσσεια ρητίνης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει ανομοιομορφία στην ποιότητα των τεμαχίων που κατασκευάζονται αλλά και στα διάφορα μέρη του ίδιου τεμαχίου.

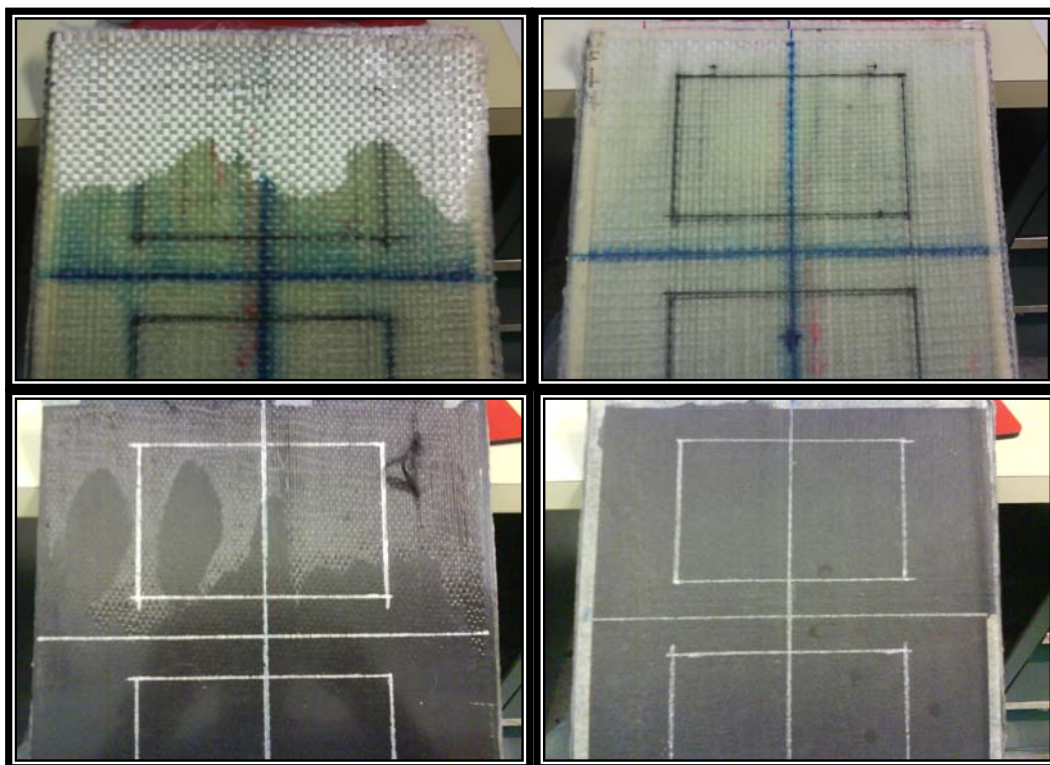
6.7 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την κατασκευή των δοκιμίων

Κατά την κατασκευή των δοκιμίων παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα και στις δύο μεθόδους με αποτέλεσμα η πρώτη σειρά δοκιμίων να θεωρηθεί ακατάλληλη για να εξεταστεί με τους υπερήχους. Τα προβλήματα αυτά είχαν δυσμενείς συνέπειες στην ποιότητα των δοκιμίων, τα οποία θα χρησιμοποιούνταν ως πρότυπα αναφοράς στον έλεγχο με υπερήχους.

Ξεκινώντας την ανάλυση, αναφέρεται ότι παρουσιάστηκαν προβλήματα κατασκευαστικής φύσεως κατά κύριο λόγο. Έτσι στα δοκίμια CFRP και GFRP που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο Vacuum Infusion παρατηρήθηκε το φαινόμενο της μερικής διαβροχής των ενισχυτικών υφασμάτων ή αλλιώς ο σχηματισμός στεγνών περιοχών (dry spot formation). Στην περίπτωση των δοκιμίων παρατηρήθηκε το φαινόμενο lead lag το οποίο εμφανίζεται στην μέθοδο vacuum Infusion. Η διαφορά στην διαπερατότητα μεταξύ του infusion mesh και των στρώσεων που βρίσκονται κάτω από αυτό, εισάγει μια καθυστέρηση μεταξύ της κίνησης της ρητίνης στις πάνω στρώσεις που βρίσκονται κοντά στο infusion mesh και στις στρώσεις που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος στο υλικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μέτωπο διαβροχής της ρητίνης να κινείται ταχύτερα στις στρώσεις κοντά στο infusion mesh και με μικρότερη ταχύτητα στις στρώσεις κοντά στο καλούπι. Το lead lag μπορεί να εκφραστεί σε μονάδες χρόνου ή απόστασης. Έτσι μπορεί να φτάσει από 60mm έως 200mm ανάλογα με την διαφορά της διαπερατότητας.

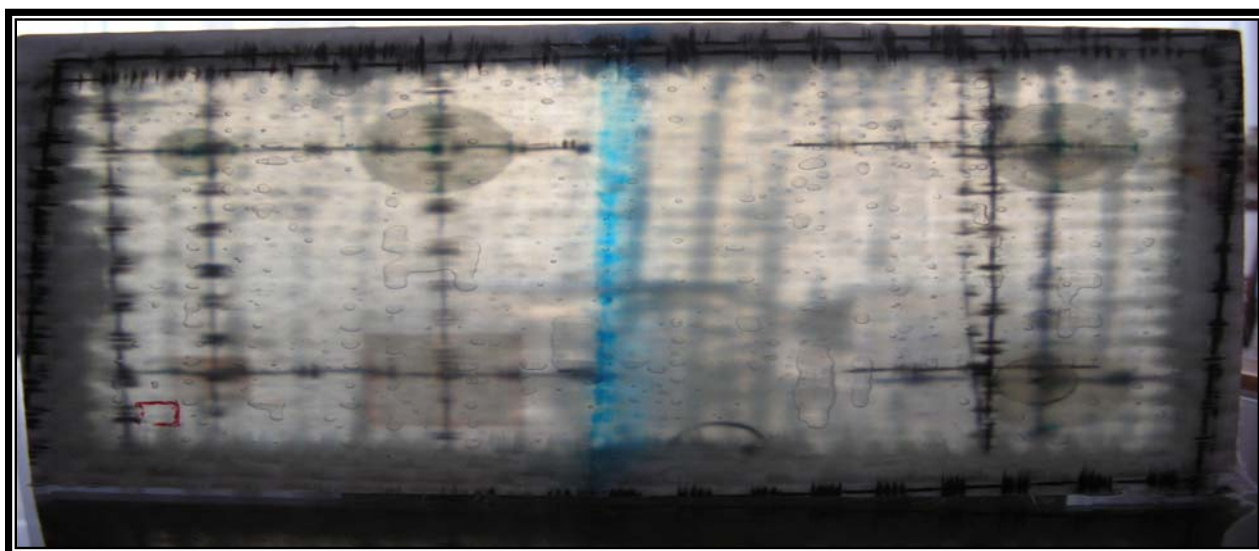
Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και στις δύο προσπάθειες κατασκευής. Στην πρώτη προσπάθεια ήταν έντονο με αποτέλεσμα να καταστραφούν τα δοκίμια (Σχήμα 6.26) ενώ στην δεύτερη περιορίστηκε χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη ποσότητα ρητίνης παρασκευασμένη να έχει μεγαλύτερο gel time.

Στη συνέχεια εμφανίστηκαν κατασκευαστικά προβλήματα και στη μέθοδο hand layup τα οποία προέρχονταν από διάφορες αιτίες. Πιο αναλυτικά στα δοκίμια GFRP στο πρώτο set δοκιμών δεν έγινε σωστά η παρασκευή της ρητίνης με αποτέλεσμα να μην σκληρύνει η ρητίνη.



Σχήμα 6.26 : Φαινόμενο lead lag στα δοκίμια GFRP (πάνω) και στα CFRP (κάτω).

Στα δοκίμια τότε σηκώθηκαν οι στρώσεις και ξαναπεράστηκαν με ρητίνη εκ νέου. Η κίνηση αυτή δεν έφτιαξε την κατάσταση, το μόνο που έκανε ήταν να εισάγει μεγαλύτερο αριθμό φυσαλίδων στο πολύστρωτο (Σχήμα 6.27).



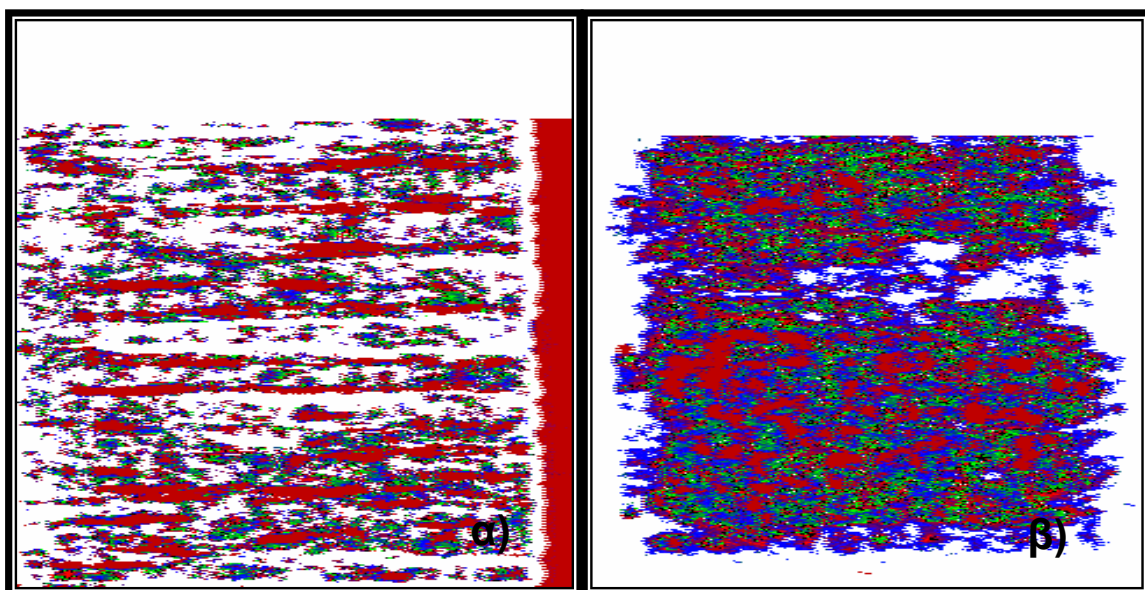
Σχήμα 6.27 : Κατεστραμμένο δοκίμιο GFRP.

Τέλος στα δοκίμια CFRP με την μέθοδο hand layup, μετά την σκλήρυνση της ρητίνης, η πάνω επιφάνεια των δοκιμίων εμφάνισε κυματοειδή μορφή παράλληλα στην διεύθυνση των ίνων των στρώσεων (Σχήμα 6.28) προφανώς λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε ρητίνη και ανάπτυξης θερμικών τάσεων.



Σχήμα 6.28 : Δοκίμιο CFRP hand layup εμφάνιση κυματοειδούς επιφάνειας.

Τα παραπάνω κατασκευαστικά σφάλματα που εμφανίστηκαν κατέστησαν τα δοκίμια ακατάλληλα για να εξεταστούν με την μέθοδο των υπερήχων. Για να γίνει αυτό αντιληπτό τα παραπάνω δοκίμια σαρώθηκαν στην διάταξη ULTRAPAC και στο Σχήμα 6.29 φαίνονται τα αποτελέσματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 6.29 : α) C-scan δοκιμίου CFRP hand layup β) C-scan δοκιμίου GFRP hand layup

Στο Σχήμα 6.29 α) φαίνεται ότι λόγω της κυματοειδούς επιφάνειας η δέσμη των υπερήχων δεν επιστρέφει στην κεφαλή λόγω ανάκλασης και διασποράς προς άλλες κατευθύνσεις και έτσι έχουμε έλλειψη δεδομένων (no data) στα σημεία της επιφάνειας με καμπυλότητα. Τα σημεία αυτά είναι οι άσπρες γραμμές που εναλλάσσονται με τις κόκκινες οι οποίες αντιστοιχούν στα τμήματα της επιφάνειας που είναι παράλληλα στην κεφαλή και επιτρέπουν την επιστροφή της δέσμης.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.29 β) στο δοκίμιο GFRP τα όρια του δοκιμίου δεν είναι ορατά λόγω των μη εμποτισμένων στρώσεων και η συσσώρευση μεγάλου αριθμού φυσαλίδων που παριστάνονται από τα κόκκινα στίγματα δεν επιτρέπουν την διάκριση οποιασδήποτε άλλης ατέλειας καθώς ο αέρας που είναι εγκλωβισμένος δεν επιτρέπει την παραπέρα διάδοση των υπερήχων στο εσωτερικό του υλικού.

Για τους λόγους αυτούς κατέστη αναγκαίο να κατασκευαστούν εκ νέου δοκίμια, έχοντας λάβει τα απαραίτητα μέτρα, για να αποφευχθεί η εμφάνιση ανάλογων κατασκευαστικών σφαλμάτων που θα εμποδίσουν τον αξιόπιστο έλεγχο των δοκιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ULTRAPAC II

7.1 Διάταξη εμβάπτιζόμενου ελέγχου ULTRAPAC II

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δοκιμών ονομάζεται ULTRAPAC II και προέρχεται από την εταιρία ENVIROACOUSTICS ABEE. Η συσκευή βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα υπερήχων, υψηλής ευκρίνειας, που παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των υλικών με τις δύο βασικές μεθόδους εξέτασης, την pulse echo και την through transmission. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται σε πραγματικό χρόνο από υπολογιστική μονάδα (H/Y) με τις απεικονίσεις A-scan, B-scan, C-scan καθώς επίσης και με την απεικόνιση D-scan (τρισδιάστατη). Η διάταξη ULTRAPAC II αποτελείται από τα παρακάτω μέρη :

- Δεξαμενή εμβάπτισης με προσαρμοσμένο φορείο για την κίνηση της πιεζοηλεκτρικής κεφαλής στο χώρο ελέγχου. Η δεξαμενή αποτελείται από Plexiglas το οποίο ενισχύεται από σκελετό αλουμινίου υψηλής αντοχής, υλικά που δεν διαβρώνονται καθώς η δεξαμενή γεμίζεται συνήθως με νερό. Πάνω στη δεξαμενή είναι προσαρτημένο το φορείο για την κίνηση της κεφαλής (Σχήμα 7.1). Το φορείο αποτελείται από δύο βραχίονες για την κίνηση στον άξονα X, πάνω στους οποίους είναι προσαρτημένοι οι βραχίονες που επιτρέπουν την κίνηση της κεφαλής στον άξονα Y. Στο σύστημα αυτό είναι προσαρτημένος ο άξονας Z όπου και τοποθετείται η κεφαλή. Η κίνηση των αξόνων γίνεται με τη βοήθεια ηλεκτροκίνητων μοτέρ, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητης μετακίνησης. Πάνω στην δεξαμενή υπάρχουν δύο διακόπτες έκτακτης ανάγκης. Τέλος όλη η κατασκευή έχει σαν στόχο τη μείωση των δονήσεων και την μείωση της τριβής μεταξύ των κινούμενων αξόνων.



Σχήμα 7.1 : Δεξαμενή εμβάπτισης και το φορείο κίνησης της κεφαλής της διάταξης ULTRAPAC II.

- Υπολογιστική μονάδα (συμβατή με IBM) που περιλαμβάνει την κάρτα διέγερσης και αναλογικής-ψηφιακής μετατροπής σημάτων AD-IPR-1210 και την 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 τους και άλλα χαρακτηριστικά. 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 την χρήση φίλτρων (high pass-low pass).

Η κάρτα PAC-SMC4 ελέγχει την κίνηση των αξόνων x-y-z μέσω των σερβοκινητήρων, οι οποίοι επιτρέπουν στους άξονες x-y να κινούνται με ταχύτητα, που μπορεί να φτάσει 20 in (500mm/sec) και με βήμα 0.00275 in (0.07mm) και στον άξονα z να κινείται με μέγιστη ταχύτητα 25mm/sec και με βήμα 0.001 in (0.025mm). Βέβαια οι ταχύτητες αυτές περιορίζονται από την ανάλυση που επιθυμείται, από την κεφαλή που χρησιμοποιείται και από άλλου παράγοντες.

- Λογισμικό ελέγχου, καταγραφής και απεικόνισης ULTRAWIN. Είναι ένα λογισμικό συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων, γραφικής απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο καθώς και επεξεργασίας εικόνας. Λειτουργεί σε περιβάλλον Windows Xp και επιτρέπει τον έλεγχο και την ρύθμιση των παραμέτρων των καρτών AD-IPR-1210 και PAC-SMC4.

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα αναλυθούν όλες εκείνες οι λειτουργίες του συστήματος για τη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων έτσι ώστε ο έλεγχος των δοκιμών να είναι αξιόπιστος.

7.2 Προετοιμασία δεξαμενής

Αρχικά η δεξαμενή καθαρίζεται ώστε να απομακρυνθούν σκόνες και άλλες επικαθίσεις που μπορεί να μολύνουν το μέσο σύζευξης. Στη συνέχεια, η δεξαμενή γεμίζεται με το μέσο σύζευξης, το οποίο στον εμβαπτιζόμενο έλεγχο είναι κάποιο υγρό, όπως νερό, λάδι ή γλυκερίνη. Στην περίπτωση μας η δεξαμενή γεμίζεται μέχρι τη μέση με αποσταγμένο νερό. Η ποσότητα αυτή είναι ικανή ώστε να καλυφθούν από το μέσο σύζευξης η στήριξη των δοκιμών, τα δοκίμια και να έχουμε το απαιτούμενο water path, που επιβάλλεται από τις προδιαγραφές της χρησιμοποιούμενης κεφαλής (near field). Ως μέσο σύζευξης επιλέχθηκε το αποσταγμένο νερό διότι η δεξαμενή θα παραμείνει γεμάτη για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση του απλού νερού αρχίζουν να σχηματίζονται επικαθίσεις αλάτων στην δεξαμενή και στις πιεζοηλεκτρικές κεφαλές. Οι επικαθίσεις αυτές μειώνουν την ευαισθησία των κεφαλών και όταν αρχίσουν να αιωρούνται μέσα στην δεξαμενή δημιουργούν

προβλήματα κατά τον έλεγχο. Τέλος για να παραμείνει το μέσο σύζευξης καθαρό η δεξαμενή μετά το τέλος κάθε πειράματος πρέπει να σκεπάζεται.

7.3 Το μέσο σύζευξης

Ο αέρας είναι κακός αγωγός των ηχητικών κυμάτων όταν η συχνότητα τους είναι της τάξεως των MHz. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη διαφορά μεταξύ της ακουστικής αντίστασης του αέρα και των περισσότερων στερεών, με αποτέλεσμα η ύπαρξη ενός πολύ λεπτού στρώματος αέρα να κάνει ανέφικτη τη διάδοση των κυμάτων υπερήχων από την πιεζοηλεκτρική κεφαλή στο εξεταζόμενο υλικό [5]. Για να είναι η διάδοση επιτυχής είναι απαραίτητη η εξάλειψη του αέρα μεταξύ κεφαλής και εξεταζόμενου υλικού και η αντικατάστασή του με ένα άλλο μέσο σύζευξης.

Το μέσο σύζευξης χρησιμοποιείται τόσο στον χειροκίνητο έλεγχο όσο και στον εμβαπτιζόμενο. Στον χειροκίνητο έλεγχο (contact inspection) χρησιμοποιούνται παχύρρευστα υγρά όπως λάδια, γράσα πετρελαίου ή σιλικόνης, γλυκερίνη και άλλα προϊόντα. Το μέσο σύζευξης απλώνεται στην περιοχή που θα εξεταστεί, ώστε να σχηματιστεί ένα στρώμα μεταξύ της κεφαλής και της επιφάνειας του εξεταζόμενου υλικού. Το στρώμα αυτό πρέπει να έχει συγκεκριμένο πάχος, για να μπορεί η κεφαλή να είναι συνεχώς σε επαφή με την επιφάνεια. Έλλειψη μέσου σύζευξης θα έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της επιφάνειας της κεφαλής, που έρχεται σε επαφή με το εξεταζόμενο υλικό. Αντίθετα περίσσεια μέσου σύζευξης θα επιφέρει μείωση της ηχητικής ενέργειας που διαδίδεται στο υλικό [14]. Οι προαναφερθείσες μεταβολές στο πάχος του στρώματος του μέσου σύζευξης έχουν ανάλογες μεταβολές στην ευαισθησία του ελέγχου. Τέλος το μέσο σύζευξης επιλέγεται ώστε να είναι κατάλληλο για την τραχύτητα της επιφάνειας που ελέγχεται [14].

Στην περίπτωση του εμβαπτιζόμενου ελέγχου ως μέσο σύζευξης χρησιμοποιείται κάποιο υγρό, όπως το νερό, το λάδι ή η γλυκερίνη. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται το νερό, που είναι πιο φθινό σαν μέσο και αφαιρείται εύκολα από τις εξεταζόμενες επιφάνειες. Κατά την επιλογή του μέσου σύζευξης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω [5]:

- Η τραχύτητα της ελεγχόμενης επιφάνειας.
- Η πιθανότητα χημικής αντίδρασης μεταξύ του μέσου σύζευξης και της επιφάνειας.
- Το πόσο εύκολα ή δύσκολα απομακρύνεται το μέσο σύζευξης από την επιφάνεια.

Το νερό είναι κατάλληλο για σχετικά λείες επιφάνειες, όμως υπάρχει δυνατότητα να διαλυθούν διάφορα πρόσθετα, που βοηθούν στη διαβροχή των εξεταζόμενων επιφανειών (wetting agents). Επίσης μπορούν να διαλυθούν και άλλα πρόσθετα, όπως ουσίες που εμποδίζουν την διάβρωση (corrosion inhibitors), ουσίες που εμποδίζουν το σχηματισμό φυσαλίδων και μυκήτων μέσα στη δεξαμενή [5].

Πριν την εισαγωγή των εξεταζόμενων υλικών στη δεξαμενή πρέπει να απομακρύνονται οι φυσαλίδες και γενικά οποιαδήποτε ξένα σωματίδια υπάρχουν στο μέσο σύζευξης που μπορούν να

προκαλέσουν παρεμβολές κατά την εξέταση. Στην περίπτωση που υπάρχουν πρόσθετες ουσίες μέσα στο μέσο σύζευξης (πχ αναστολείς), η συγκέντρωση του διαλύματος πρέπει να μετράται κάθε 90 μέρες [15]. Επίσης, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι το μέσο σύζευξης και τα τυχόν πρόσθετα δεν θα προσβάλλουν με κανένα τρόπο τις επιφάνειες του εξεταζόμενου υλικού.

Τέλος όταν χρησιμοποιείται το νερό ως μέσο σύζευξης θα πρέπει να μετράται η θερμοκρασία του μέσα στη δεξαμενή, πριν από κάθε έλεγχο. Αυτό είναι απαραίτητο διότι η ταχύτητα των κυμάτων των υπερήχων αλλάζει με την αύξηση της θερμοκρασίας και μάλιστα με ρυθμό $\Delta v/\Delta T=2.5 \text{ m/s } ^\circ\text{C}$ [16].

7.4 Τοποθέτηση δοκιμών στη δεξαμενή

Τα δοκίμια τοποθετούνται στο κέντρο της δεξαμενής ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος της πρόσκρουσης του στηρίγματος της κεφαλής με τα τοιχώματα της δεξαμενής από απρόσεκτο χειρισμό κατά τη ρύθμιση της διάταξης. Η στήριξη των δοκιμών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Τα δοκίμια πρέπει να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνεια σάρωσης και η πίσω επιφάνεια, εφόσον μιλάμε για επίπεδες πλάκες, να είναι παράλληλες προς το πυθμένα της δεξαμενής και κάθετες στον ηχητικό άξονα της κεφαλής υπερήχων.

Ένας τρόπος στήριξης είναι η απλή τοποθέτηση των δοκιμών στο πυθμένα της δεξαμενής. Η τακτική αυτή δεν ακολουθήθηκε για δύο λόγους. Πρώτον τα δοκίμια εκ κατασκευής δεν έχουν ομοιόμορφο πάχος, με αποτέλεσμα οι έδρες τους να μην είναι παράλληλες και δεύτερον και σημαντικότερο, κατά τον έλεγχο των δοκιμών η ανάκλαση του πυθμένα της δεξαμενής βρίσκεται πολύ κοντά στην ανάκλαση της πίσω επιφάνειας στο A-scan των δοκιμών, δημιουργώντας δυσκολία στον διαχωρισμό τους. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν τέσσερις κυλινδρικές βάσεις από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 40 mm και ύψους 30 mm πάνω στις οποίες θα στηριχτούν τα δοκίμια. Η κατασκευή αυτή δεν έλυσε το πρόβλημα της παραλληλίας των επιφανειών των δοκιμών με τον πυθμένα της δεξαμενής, μετακίνησε την ανάκλαση του πυθμένα χρονικά, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται κοντά στις ανακλάσεις από τις πίσω επιφάνειες των δοκιμών.

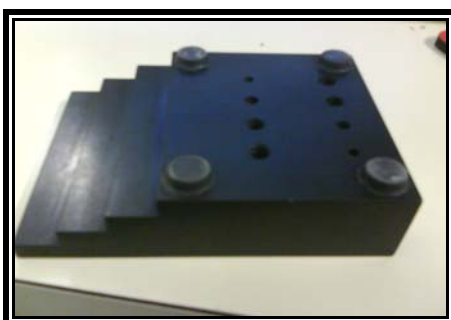
Τέλος, για τον καλύτερο έλεγχο τους, τα δοκίμια, τοποθετούνται πάνω στις κυλινδρικές βάσεις έτσι ώστε η λεία τους πλευρά, που προκύπτει από την επαφή τους με το καλούπι κατά την κατασκευή, να είναι η πρώτη που θα συναντήσει η δέσμη των υπερήχων. Αυτό γίνεται για να μην υπάρχουν φαινόμενα διασποράς της υπερηχητικής δέσμης, λόγω της τραχύτητας και της κυματοειδούς επιφάνειας των δοκιμών. Με τον τρόπο αυτό εκμεταλλευόμαστε κατά το καλύτερο δυνατόν, την διεισδυτική ικανότητα της κεφαλής. Σε αντίθετη περίπτωση το φαινόμενο της διασποράς προκαλεί την παράγωγη θορύβου με ταυτόχρονη μείωση της διεισδυτικής ικανότητας δημιουργώντας προβλήματα κατά τον έλεγχο.

7.5 Ρύθμιση των αρχικών παραμέτρων της διάταξης ULTRAPAC

Μετά την τοποθέτηση και στήριξη των δοκιμίων στη δεξαμενή, για να γίνει η σάρωση από τη διάταξη είναι απαραίτητο να οριστούν διάφορες παράμετροι στο λογισμικό ULTRAWIN 2.84. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Στα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο λογισμικό και αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και στις παραμέτρους που πρέπει να ρυθμιστούν και επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα από τη διάταξη. Οι διάφορες ρυθμίσεις παρουσιάζονται με την σειρά που πρέπει να εκτελεστούν, ώστε να πραγματοποιηθεί αξιόπιστη μέτρηση σε κάθε περίπτωση.

7.5.1 Βαθμονόμηση της συσκευής ULTRAPAC

Για να είναι αξιοποιήσιμες οι πληροφορίες που παίρνουμε από μια υπερηχητική συσκευή, κατά τον έλεγχο των υλικών πρέπει προηγουμένως η συσκευή να έχει βαθμονομηθεί έχοντας ως βάση ένα πρότυπο αναφοράς (reference standard). Όπως κάθε άλλη διαδικασία διασφάλισης ποιότητας, ο έλεγχος με υπερήχους συγκρίνει το γνωστό με το άγνωστο. Για παράδειγμα οι διαστάσεις ενός αντικειμένου καθορίζονται συγκρινόμενες με τις διαστάσεις ενός βαθμονομημένου οργάνου (παχύμετρο, μικρόμετρο). Αναλόγως και στον έλεγχο με υπερήχους οι άγνωστες ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά ενός υλικού συγκρίνονται με τα γνωστά και βαθμονομημένα χαρακτηριστικά ενός προτύπου αναφοράς [8]. Τα πρότυπα αναφοράς είναι συνήθως κατασκευασμένα από αλουμίνιο, χάλυβα, χαλκό ή τιτάνιο, ανάλογα με την εφαρμογή και μπορεί να έχουν υποστεί μηχανουργικές κατεργασίες με μικρές ανοχές. Φέρουν συνήθως τυφλές οπές με ίσιο πυθμένα σε διάφορες διαστάσεις. Η συσκευή ULTRAPAC II συνοδεύεται από πρότυπο βαθμονόμησης, τύπου σκάλας κατασκευασμένο από αλουμίνιο, με τυφλές οπές (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2 : Πρότυπο βαθμονόμησης συσκευής ULTRAPAC II, τύπου σκάλας.

Η σωστή επιλογή προτύπου αναφοράς αποτελεί το κλειδί για τον επιτυχημένο έλεγχο και επιτρέπει την χρήση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενός ελέγχου. Εάν κατά τον έλεγχο δεν χρησιμοποιηθούν πρότυπα αναφοράς ή χρησιμοποιηθούν ακατάλληλα πρότυπα, τα αποτελέσματα

είναι λανθασμένα και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή οποιοδήποτε συμπεράσματος για την κατάσταση του εξεταζόμενου υλικού.

Με τον όρο βαθμονόμηση (calibration) της διάταξης εννοούμε την αντιστοίχιση συγκεκριμένου πλάτους της οθόνης A-scan σε ένα καθορισμένο πάχος του υλικού που πρόκειται να εξεταστεί. Δηλαδή, όταν η κάθε υποδιαίρεση (division) της οθόνης του A-scan μετρά 10 mm να είναι σίγουρο ότι η κάθε υποδιαίρεση αντιστοιχεί σε 10 mm πάχους υλικού. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να βαθμονομηθεί η βάση χρόνου στην οθόνη του A-scan (οριζόντιος άξονας) ώστε να μετράται η πραγματική και όχι πλασματική απόσταση, που έχει διανύσει η δέσμη των υπερήχων. Η απόσταση αυτή μετράται από τη διάταξη σε μονάδες πάχους υλικού ή σε μονάδες χρόνου (μsec). Αντικειμενικός σκοπός της βαθμονόμησης της βάσης χρόνου είναι ο προσδιορισμός της άγνωστης ταχύτητας του ήχου για το εξεταζόμενο σύνθετο υλικό.

Αρχικά επιλέγεται το πρότυπο αναφοράς, που στην περίπτωση μας είναι τα δοκίμια χωρίς ατέλειες, που προκύπτουν από τις πλάκες που κατασκευάστηκαν. Θεωρητικά δεν περιέχουν ατέλειες και είναι κατασκευασμένα από τα ίδια υλικά και με την ίδια μέθοδο με τα δοκίμια που περιέχουν τις τεχνητές ατέλειες. Χρησιμοποιώντας τα πρότυπα αυτά θα προσδιοριστεί η άγνωστη ταχύτητα σε κάθε ζεύγος δοκιμίων. Η ταχύτητα των κυμάτων υπερήχων είναι άγνωστη στα σύνθετα υλικά καθώς εξαρτάται από το είδος της ενίσχυσης, από την αλληλουχία των στρώσεων, από το είδος της ρητίνης και από την μέθοδο κατασκευής.

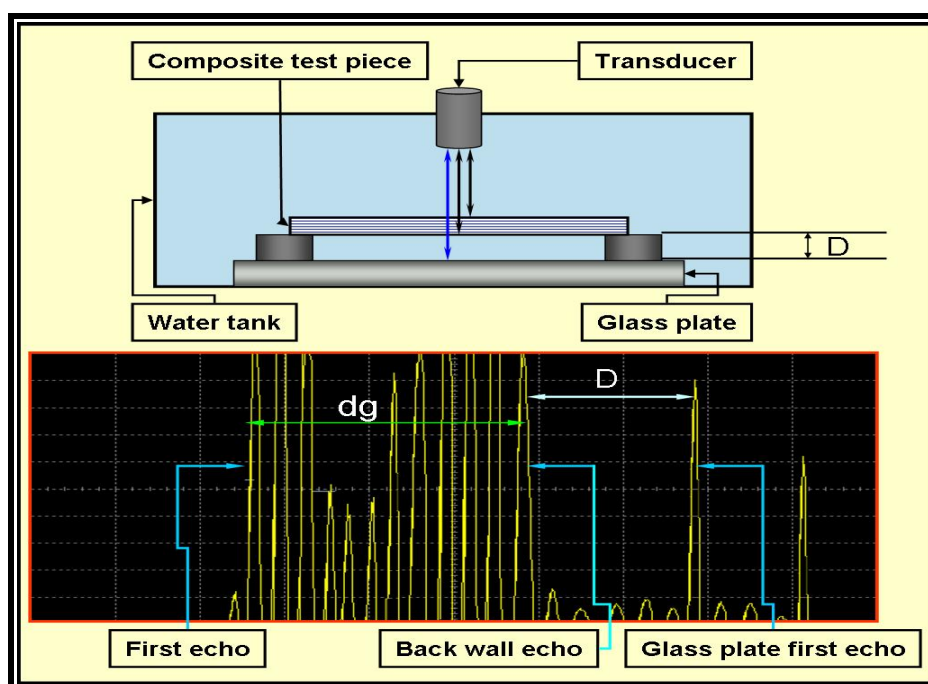
7.5.2 Προσδιορισμός της ταχύτητας των κυμάτων υπερήχων στα δοκίμια

Ξεκινώντας τη βαθμονόμηση της συσκευής, το πρότυπο τύπου σκάλας, από αλουμίνιο, που συνοδεύει τη διάταξη τοποθετείται στον πυθμένα της δεξαμενής. Φέρνουμε την κεφαλή πάνω από τα διάφορα σκαλοπάτια του προτύπου και αντιστοιχίζουμε τις γνωστές διαστάσεις του προτύπου με τις υποδιαίρεσεις της οθόνης του A-scan δεδομένου ότι έχουμε εισάγει στο λογισμικό ULTRAWIN την γνωστή ταχύτητα του αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό έχει βαθμονομηθεί η διάταξη για την εξέταση υλικών από αλουμίνιο.

Στη συνέχεια το πρότυπο από αλουμίνιο βγαίνει από τη δεξαμενή και ακολούθως τοποθετείται στον πυθμένα της δεξαμενής μια πλάκα από γυαλί διαστάσεων 30x30 mm και πάχους 20 mm. Η σκοπιμότητα της χρήσης της πλάκας γυαλιού θα αναλυθεί στη συνέχεια. Πάνω στην πλάκα από γυαλί μπαίνουν οι ανοξείδωτες βάσεις, γνωστών διαστάσεων, και πάνω σε αυτές στηρίζεται το πρότυπο του σύνθετου υλικού. Προηγουμένως έχει μετρηθεί το πάχος του με μηχανικά μέσα (παχύμετρα μικρόμετρα) και έχει καταγραφεί, έστω dx.

Μετά τη δημιουργία της παραπάνω διάταξης φέρνουμε την κεφαλή υπερήχων πάνω από το πρότυπο και στην οθόνη του A-scan παίρνουμε τις ανακλάσεις του. Η όλη διάταξη και οι ανακλάσεις φαίνονται στο Σχήμα 7.3.

Στο σημείο αυτό τα σύνθετα υλικά δημιουργούν μια μεγάλη δυσκολία. Λόγω της ετερογενούς φύσης τους και της μεγάλης απόσβεσης που παρουσιάζουν δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί ο παλμός της πίσω επιφάνειας στο πρώτο σετ ανακλάσεων. Αυτό συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις εξέτασης σύνθετων υλικών και ιδιαίτερα σε υλικά με μεγάλο πάχος. Εκεί η απόσβεση, η οποία αυξάνεται με την αύξηση του πάχους, προκαλεί μείωση του πλάτους (amplitude) του παλμού της πίσω επιφάνειας, με αποτέλεσμα ο παλμός της πίσω επιφάνειας να βρίσκεται στα επίπεδα του θορύβου ή να μην εμφανίζεται καθόλου. Τότε αναγκαστικά ενισχύουμε όλο το σετ των ανακλάσεων μέσα από την επιλογή Gain. Οι παλμοί αυξάνουν το πλάτος τους αλλά και πάλι είναι δύσκολο να διακρίνουμε τον παλμό της πίσω επιφάνειας.



Σχήμα 7.3 : Γραφική παράσταση του υπολογισμού της άγνωστης ταχύτητας C_x των δοκιμίων.

Στο σημείο αυτό μας βοηθά η ύπαρξη της πλάκας γυαλιού, η οποία δημιουργεί μια ισχυρή ανάκλαση (Glass plate first echo), λόγω της μεγάλης ακουστικής αντίστασης του γυαλιού, μετά το σετ των ανακλάσεων από το σύνθετο υλικό (Σχήμα 7.3).

Η ανάκλαση αυτή βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση D από την ανάκλαση της πίσω επιφάνειας. Η απόσταση αυτή στο μέσο σύζευξης είναι ίση με το ύψος των κυλινδρικών βάσεων μετρημένη σε μsec . Έτσι ξεκινώντας ανάποδα από την γνωστή ανάκλαση του γυαλιού μπορούμε να προσδιορίσουμε ποιος είναι ο παλμός της πίσω επιφάνειας. 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 πάνω επιφάνειας και της πίσω επιφάνειας και έστω ότι είναι d_g . Το πάχος αυτό είναι πλασματικό καθώς η μέτρηση γίνεται με την ταχύτητα του ήχου αλουμινίου. Αυτό που μπορεί να υπολογιστεί γνωρίζοντας το πάχος d_g και την ταχύτητα του ήχου

στο αλουμίνιο $C_{αλ}$ είναι ο χρόνος διέλευσης των υπερήχων μέσα από το δοκίμιο σύμφωνα με τη σχέση 7.1 :

$$t = \frac{2d_g}{C_{αλ}} \quad (7.1)$$

Ακριβώς τον ίδιο χρόνο που υπολογίστηκε από την παραπάνω σχέση θα χρειαστούν τα κύματα υπερήχων για να διατρέξουν το δοκίμιο με την πραγματική αλλά άγνωστη ταχύτητα C_x . Εφαρμόζοντας την ίδια σχέση για το μηχανικά μετρημένο πάχος του δοκιμίου d_x και για την άγνωστη ταχύτητα προκύπτει η σχέση 7.2.

$$t = \frac{2d_x}{C_x} \quad (7.2)$$

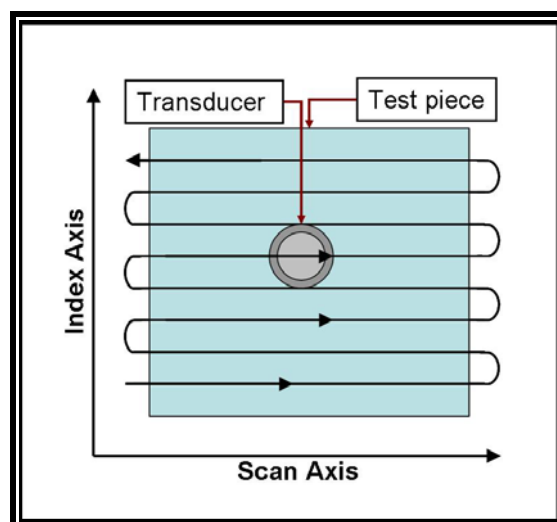
Ο συντελεστής 2 χρειάζεται καθώς τα κύματα υπερήχων διατρέχουν το πάχος του δοκιμίου δύο φορές. Έτσι εξισώνοντας τις σχέσεις 7.1 και 7.2 υπολογίζεται η άγνωστη ταχύτητα C_x του δοκιμίου. Η γνωστή τώρα πια, ταχύτητα C_x εισάγεται στο λογισμικό ultrawin ως δεδομένο (input data). Με τον τρόπο αυτό βαθμονομείται η βάση χρόνου της απεικόνισης A-scan και μετρά το πραγματικό πάχος του σύνθετου δοκιμίου. Η διαδικασία που περιγράφηκε είναι πολύ σημαντική διότι, ο προσδιορισμός της θέσης των ατελειών-βλαβών και ο υπολογισμός του πάχους των υλικών, στηρίζεται εξαρτάται αποκλειστικά στην ταχύτητα C_x .

Η βαθμονόμηση της βάσης χρόνου είναι μια διαδικασία που επαναλαμβάνεται πριν από κάθε έλεγχο και για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

7.5.3 Ορισμός της επιφάνειας σάρωσης (Scanner set up) [12]

Τα δοκίμια με τις τεχνητές ατέλειες τοποθετούνται στην δεξαμενή πάνω στη διάταξη με την πλάκα γυαλιού και τις κυλινδρικές βάσεις που έχει δημιουργηθεί στον πυθμένα της δεξαμενής. Στο σημείο αυτό 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 ολόκληρη η επιφάνεια των δοκιμίων με διαστάσεις 150 x 100 mm. Υπάρχει βέβαια, η δυνατότητα να οριστεί και μικρότερο τμήμα της επιφάνειας.

Ο ορισμός της επιφάνειας σάρωσης είναι μια σημαντική διαδικασία καθώς οι παράμετροι A (amplitude) και TOF, που λαμβάνονται από κάποιο σημείο του υλικού αντιστοιχίζονται με συγκεκριμένες συντεταγμένες της επιφάνειας σάρωσης στην απεικόνιση C-scan. Για να γίνουν ευκολότερα κατανοητές οι ρυθμίσεις κρίνεται σκόπιμο να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η σάρωση από τη διάταξη ULTRAPAC II. Η κίνηση της κεφαλής κατά τη σάρωση, αποτελείται από δύο ανεξάρτητες κινήσεις (Σχήμα 7.4).



Σχήμα 7.4 : Τρόπος σάρωσης συσκευής ULTRAPAC II.

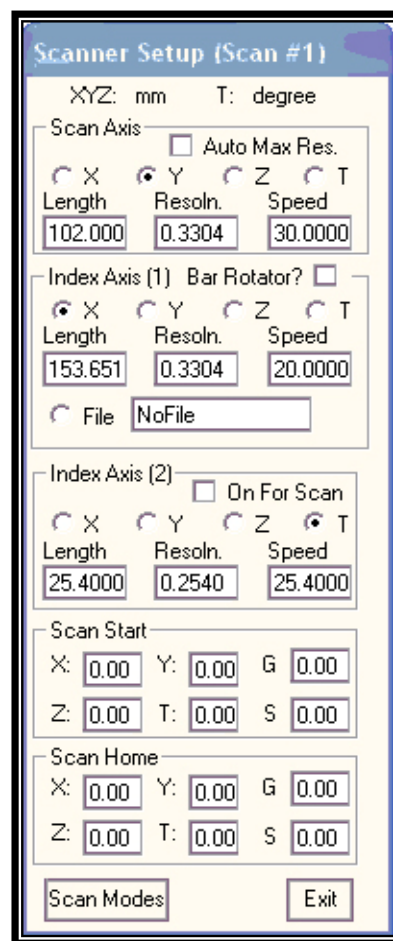
Μια κίνηση κατά τον Scan Axis, ο οποίος ταυτίζεται με την μία διάσταση της επιφάνειας του δοκιμίου (μήκος ή πλάτος) και μια κίνηση κατά τον Index Axis ο οποίος ταυτίζεται με την άλλη διάταξη του δοκιμίου. Κατά την κίνηση στον Scan Axis η κεφαλή σχηματίζει τη γραμμή σάρωσης. Η γραμμή σάρωσης έχει μήκος ίσο με το πλάτος ή το μήκος του δοκιμίου, ανάλογα με το ποια διάσταση έχουμε αντιστοιχίσει με τον Scan Axis. Κατά την κίνηση στον Index Axis, η κεφαλή μετακινείται κατά ένα προκαθορισμένο βήμα κάθε φορά που ολοκληρώνεται η σάρωση στον Scan Axis.

Η ρύθμιση ξεκινά από το παράθυρο διαλόγου Scanner set up που φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Αρχικά επιλέγεται ο Scan Axis που μπορεί να είναι οποιοσδήποτε από τους άξονες x-y-z. Οι άξονες x-y βρίσκονται σε επίπεδο παράλληλο με τον πυθμένα της δεξαμενής που ταυτίζεται με την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Στο άξονα z βρίσκεται η κεφαλή και είναι κάθετος στο επίπεδο x-y. Η επιλογή του περιστρεφόμενου άξονα T δεν θα μας απασχολήσει. 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. Στο σημείο αυτό δεν παίζει κάποιο ρόλο σε ποιόν από τους δύο άξονες θα δοθεί το μήκος ή το πλάτος του δοκιμίου. Στην περίπτωση των δοκιμίων δίνεται στον Scan Axis το πλάτος 100 mm και στον Index Axis το μήκος 150 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). Συνιστάται να επιλέγεται η επιλογή Auto Max Res, έτσι ώστε η διάταξη να καθορίσει τη μέγιστη ανάλυση. Η ταχύτητα των δύο αξόνων (Speed) μπορεί να λάβει την ανώτερη τιμή των 500 mm/sec.

Η ανώτερη ταχύτητα, σε πολλές περιπτώσεις, επιβάλλεται από την διάταξη καθώς εξαρτάται από το μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου, από την συχνότητα δειγματοληψίας, από την κεφαλή που χρησιμοποιείται και από την τιμή της ανάλυσης με την οποία θέλουμε να γίνει ο έλεγχος. Για να είναι επιτυχημένη η σάρωση και κατ'επέκταση ο έλεγχος, η ταχύτητα δεν θα πρέπει να ορίζεται σε υψηλές τιμές. Γιατί τότε σχηματίζονται στην απεικόνιση C-scan άσπρες περιοχές (no data areas) που δηλώνουν αδυναμία πρόσληψης δεδομένων.

Η επιλογή Index Axis (2) δεν θα μας απασχολήσει καθώς χρησιμοποιείται σε άλλο είδος ελέγχου. Μέσω των επιλογών Scan Start και Scan Home ορίζεται το σημείο από το οποίο θα ξεκινήσει η σάρωση και το σημείο στο οποίο θα επιστρέψει η κεφαλή μετά το τέλος της σάρωσης. Στην περίπτωση μας τα σημεία αυτά συμπίπτουν με το σημείο αναφοράς. Το σημείο αναφοράς ορίζεται σε άλλο παράθυρο διαλόγου που θα αναφερθεί στη συνέχεια. Τέλος, στο κάτω μέρος του παραθύρου Scanner set up, από την επιλογή Scan Modes μπορεί να επιλεγεί ο τρόπος που θα λαμβάνονται τα δεδομένα. Τα δεδομένα μπορεί να λαμβάνονται σημείο ανά σημείο (point by point) ή γραμμή ανά



Σχήμα 7.5 : Scanner setup.

γραμμή (line by line). Επίσης τα δεδομένα μπορεί να λαμβάνονται κατά την κίνηση της κεφαλής από την αρχή προς το τέλος του Scan Axis ή και κατά την επαναφορά του (unidirectional-bidirectional scanning).

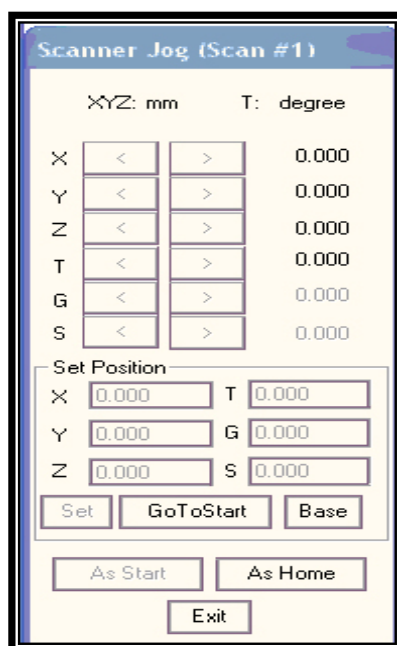
7.5.4 Ορισμός σημείου αναφοράς και έναρξης της σάρωσης (Scanner Jog) [12]

Μέσω του παράθυρου διαλόγου Scanner Jog (Σχήμα 6.6) καθορίζεται το σημείο αναφοράς της σάρωσης. Το σημείο αναφοράς είναι η αρχή του τρισσορθογώνιου συστήματος αξόνων x-y-z και γενικά 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.

Για να συμβεί αυτό η κεφαλή τοποθετείται πάνω από μια γωνία του δοκιμίου και σε απόσταση από το δοκίμιο ως προς τον άξονα z, ίση με το Near field (N). Η απόσταση αυτή υπαγορεύεται κάθε φορά από τη χρησιμοποιούμενη κεφαλή. Τότε στο παράθυρο διαλόγου Scanner Jog βλέπουμε τις αποστάσεις x-y-z σύμφωνα με το προηγούμενο σημείο αναφοράς. Τότε κλικάρωντας την επιλογή

Set οι αποστάσεις αυτές μηδενίζονται και το σημείο του χώρου στο οποίο έχουμε τοποθετήσει την κεφαλή αποκτά όρισμα (0,0,0). Με τον τρόπο αυτό ορίζεται το σημείο αναφοράς.

Το σημείο αναφοράς γενικά μπορεί να είναι διαφορετικό από το σημείο έναρξης της σάρωσης. Στην περίπτωση μας, όπου θα σαρωθεί ολόκληρη η επιφάνεια του δοκιμίου το σημείο έναρξης της σάρωσης ταυτίζεται με το σημείο αναφοράς. Αυτό γίνεται με τις επιλογές As Start και As Home.

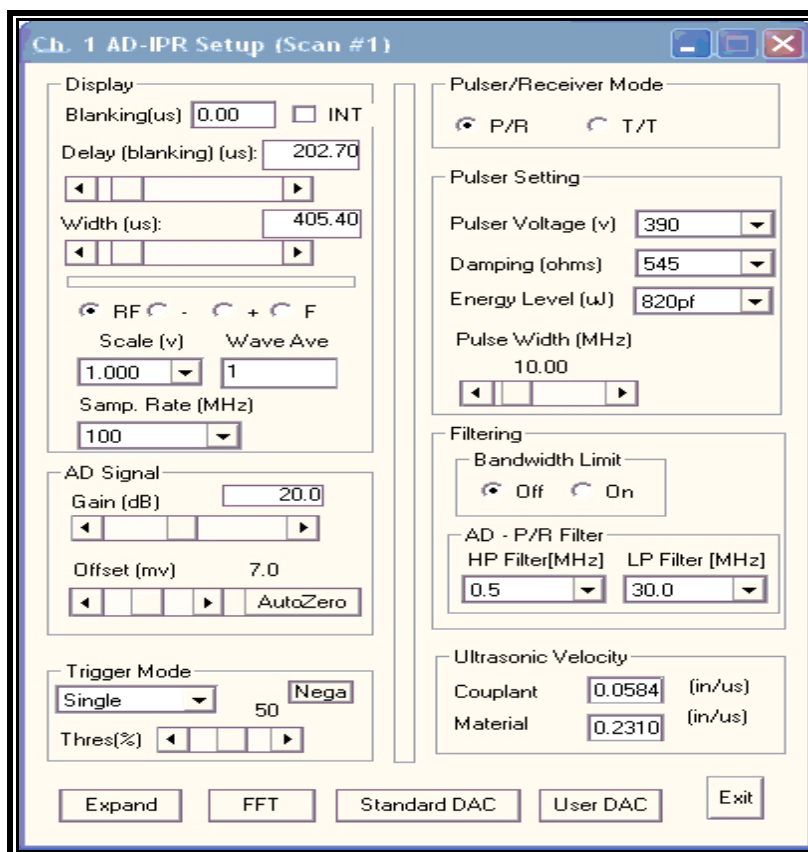


Σχήμα 7.6 : Scanner Jog.

7.5.5 Ρύθμιση των παραμέτρων στο παράθυρο διαλόγου AD-IPR Setup [12]

Στο παράθυρο διαλόγου AD-IPR Setup του Σχήματος 7.7 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 ρυθμίσεις θα παρουσιαστούν όχι με τη σειρά που φαίνονται στο Σχήμα 7.7 αλλά με τη σειρά που γίνονται κατά τον έλεγχο των σύνθετων υλικών, ώστε να πάρουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα στην οθόνη του υπολογιστή είναι ανοιχτό και το A-scan του δοκιμίου, με αποτέλεσμα ο χρήστης να παρακολουθεί τις αλλαγές που επιφέρουν οι ρυθμίσεις του, στα λαμβανόμενα σήματα. Οι παρακάτω ρυθμίσεις επηρεάζουν τα λαμβανόμενα σήματα και κατ'επέκταση τα αποτελέσματα του ελέγχου.

Το πρώτο πράγμα που ορίζεται είναι η επιλογή Pulser/Receiver Mode. Με την επιλογή αυτή καθορίζεται η μέθοδος ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν δύο επιλογές, αυτή της μεθόδου της παλμοχούς P/R και της μεθόδου της διέλευσης T/T. Στη δική μας περίπτωση, ο έλεγχος θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο της παλμοχούς και επιλέγεται η πρώτη επιλογή P/R.

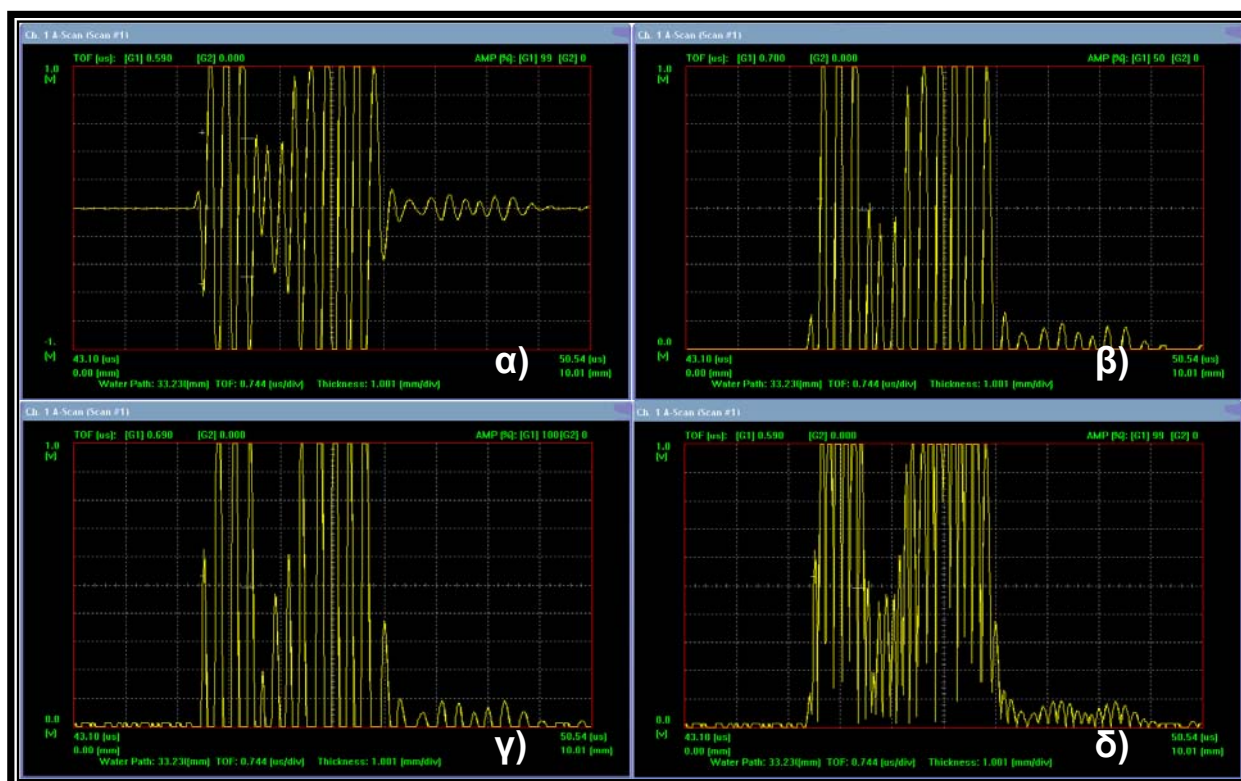


Σχήμα 7.7 : Παράθυρο διαλόγου AD-IPR Setup.

Στη συνέχεια καθορίζεται η απεικόνιση A-scan από το Display (Σχήμα 7.7). Με τις επιλογές Delay και Width ο χρήστης ορίζει το χρονικό παράθυρο που θα παρακολουθεί. Πιο αναλυτικά με την εντολή Delay μετακινούμε την απεικόνιση του A-scan ώστε να παρατηρούμε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια της πορείας των υπερηχητικών κυμάτων. Στην προκείμενη περίπτωση των σύνθετων υλικών, παρακολουθούμε το πρώτο set ανακλάσεων μετά τον αρχικό παλμό, διότι λόγω της μεγάλης απόσβεσης που παρουσιάζουν δεν εμφανίζεται συνήθως δεύτερο set που να μπορεί να αξιοποιηθεί. Με την επιλογή Width καθορίζουμε το μέγεθος των υποδιαστημάτων του A-scan. Η επιλογή αυτή ρυθμίζεται ώστε όλες οι ανακλάσεις να είναι ευδιάκριτες. Ειδικότερα στα σύνθετα υλικά είναι πολύ χρήσιμο κατά τον έλεγχο τα υποδιαστήματα να έχουν πλάτος όσο το πάχος της θεωρητικής στρώσης του υλικού.

Ακολουθώς ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μέσω των επιλογών (RF) (-), (+), (F) τον τρόπο απεικόνισης των ανακλάσεων, ο οποίος καθορίζεται από τις ανάγκες του ελέγχου. 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 απεικονήσεις φαίνονται στο Σχήμα 7.8. 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. Με τον τρόπο αυτό κάθε ανάκλαση που καταγράφεται προέρχεται από συγκεκριμένο πάχος του υλικού και η διάταξη μετρά το πραγματικό Water Path.



Σχήμα 7.8 : α) Πλήρης κυματομορφή β) μόνο τα θετικά της ανορθωμένης γ) 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 7.7) αυξάνουμε το Gain και ενισχύουμε την ένταση ολόκληρου του τραίνου των ανακλάσεων με καθορισμένο αριθμό dB. Η ενίσχυση πρέπει να είναι τόση ώστε οι παλμοί των πρώτων ανακλάσεων να μην φτάνουν στο 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 στο τραίνο η ενίσχυση που επιλέχθηκε. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ο θόρυβος και οι ανακλάσεις φαντάσματα 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.

Με την επιλογή Gain εφαρμόζεται σταθερό ποσό ενίσχυσης σε όλες τις ανακλάσεις, γεγονός που δεν βοηθά πολύ στον έλεγχο των σύνθετων υλικών, καθώς η απόσβεση αυξάνεται με το πάχος του υλικού. Για τον λόγο αυτό υπάρχει η επιλογή της καμπύλης DAC που θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

Τέλος στο παράθυρο διαλόγου AD-IPR μέσα από την επιλογή pulser setting ρυθμίζονται οι ηλεκτρικοί παλμοί που διεγείρουν τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο της κεφαλής για να παραχθούν τα κύματα των υπερήχων.

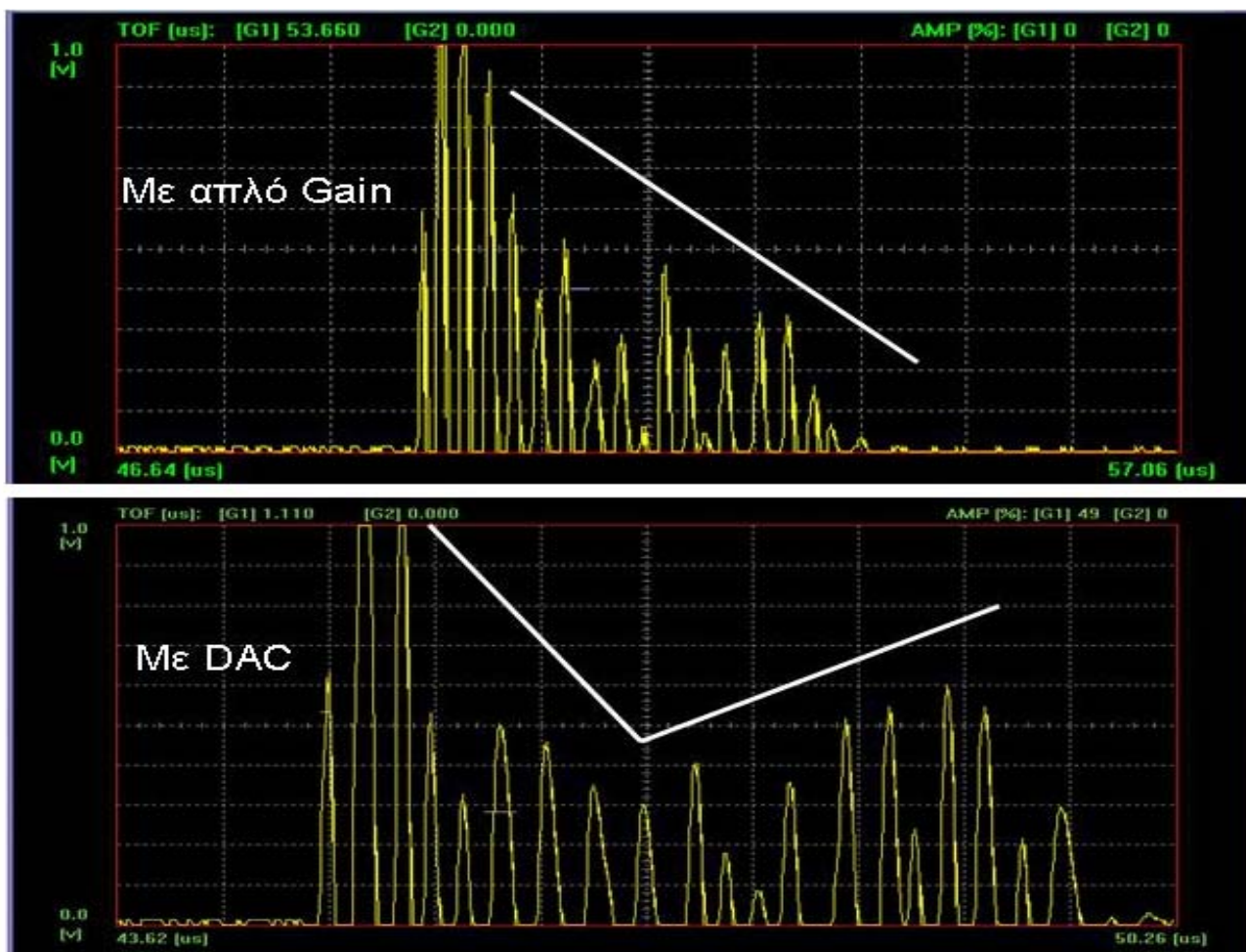
7.5.6 Καμπύλη DAC (Distance-amplitude correction curve) [12]

Η χρήση της καμπύλης DAC αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο αποκατάστασης της απόσβεσης των σημάτων, που λαμβάνει χώρα κατά την διάδοση των κυμάτων υπερήχων μέσα στα υλικά. Η απόσβεση που παρουσιάζεται στα σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα υψηλή, σε σημείο που δύσκολα διακρίνεται η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας. Όπως έχει λεχθεί και προγενέστερα, η απόσβεση είναι αποτέλεσμα της διασποράς, της απορρόφησης, της απόκλισης της ηχητικής δέσμης.

Η καμπύλη DAC όταν εφαρμόζεται στα λαμβανόμενα σήματα αναλαμβάνει να τα ενισχύσει αυξάνοντας το πλάτος τους κατά συγκεκριμένο αριθμό dB. Η τιμή αυτή καθορίζεται από τον χρήστη αλλά και από την θέση των σημάτων σε σχέση με τον χρόνο που εμφανίζονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η απώλεια πλάτους των σημάτων, αλλά ταυτόχρονα να διατηρούνται οι πληροφορίες που παρέχει κάθε σήμα, που με την απλή ενίσχυση μπορούν να χαθούν όταν γίνει αρκετά υψηλή.

Η εφαρμογή της DAC είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν εξετάζονται υλικά με μεγάλο πάχος ή υψηλής απόσβεσης και ο χαρακτηρισμός των ατελειών στηρίζεται στο πλάτος των λαμβανόμενων σημάτων. Το λογισμικό ULTRAWIN προσφέρει δύο επιλογές για την χρήση της DAC. Η μια είναι η user defined και η standard DAC. Με την user defined ο χειριστής της διάταξης μπορεί να ενισχύσει ολόκληρο το τραίνο των ανακλάσεων αλλά και μεμονωμένα χρονικά σημεία των ανακλάσεων αυξάνοντας το πλάτος κατά τον αριθμό dB που επιθυμεί. Στον έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια εφαρμόστηκε η standard DAC. Με την χρήση της standard DAC εφαρμόζεται γραμμική ενίσχυση της μορφής $y=ax+b$ μεταξύ δύο σημείων, τα οποία καθορίζονται από τον χειριστή.

Στα σύνθετα υλικά που μελετήσαμε η απόσβεση ήταν μεγάλη με αποτέλεσμα να παρατηρείται η μείωση του πλάτους των σημάτων, η οποία οδηγούσε σε αδυναμία ανίχνευσης της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας. Με την απλή ενίσχυση των σημάτων με έναν ορισμένο αριθμό dB τέτοιο ώστε να φανεί η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας, παρατηρήθηκε το φαινόμενο, οι ανακλάσεις των πρώτων στρώσεων να περνούν το 100%FSH και έτσι δεν ήταν δυνατό να καταγραφούν διακυμάνσεις στο amplitude των σημάτων. Στο σημείο αυτό βοήθησε η standard DAC. Μας έδωσε την δυνατότητα να αφήσουμε τις πρώτες ανακλάσεις χωρίς ενίσχυση και να εφαρμόσουμε την επιθυμητή ενίσχυση από το μέσο των ανακλάσεων και μετά. Στο Σχήμα 7.9 παρατίθενται δύο A-scan. Το πρώτο με απλή ενίσχυση και το δεύτερο με την ενίσχυση της καμπύλης DAC. Σκοπός του Σχήματος 7.9 είναι να γίνει εμφανής η διαφορά μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων.



Σχήμα 7.9 : A-scan με απλή ενίσχυση και με την χρήση της καμπύλης DAC

7.5.7 Ορισμός των Gates [12]

Κατά τον έλεγχο των πολύστρωτων σύνθετων υλικών, στην απεικόνιση A-scan εμφανίζονται πολλά σήματα (παλμοί) τα οποία είναι ανακλάσεις από τις διάφορες στρώσεις του υλικού ή ατέλειες-βλάβες. Για να μπορέσουμε να παρακολουθήσουμε συγκεκριμένες ανακλάσεις, δηλαδή συγκεκριμένο πάχος του υλικού υπάρχει η διαδικασία ορισμού των Gates. Το Gate είναι ένα χρονικό παράθυρο που ορίζεται από τον χρήστη της διάταξης Ultracac, ώστε να παρακολουθεί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στη βάση χρόνου και να καταγράφει τα σήματα (παλμούς) που ενδέχεται να παρουσιαστούν στο διάστημα αυτό.

Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι ο ορισμός τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για να ληφθούν ορθά αποτελέσματα. Στη διάταξη υπερήχων που χρησιμοποιείται ULTRAPAC II υπάρχει η δυνατότητα χρήσης δύο gate, το **Gate 1** και το **Gate 2**. Αρχικά στο παράθυρο διαλόγου των gates που φαίνεται στο Σχήμα 1 υπάρχει η επιλογή να χρησιμοποιηθεί το ένα ή και τα δύο gates. Αρκεί να επιλεγεί το **Gate 1** ή το **Gate 2** μαρκάροντας την επιλογή On σε κάθε περίπτωση .

Στη συνέχεια 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 πάνω επιφάνειας του εκάστοτε δοκιμίου που βρίσκεται υπό εξέταση. Η επιλογή αυτή είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση που στο υπό εξέταση δοκίμιο η πάνω επιφάνεια δεν είναι κάθετη στη δέσμη των υπερήχων. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες, μερικές από τις οποίες είναι η κακή στήριξη του δοκιμίου στον πυθμένα της δεξαμενής, οι μεταβολές στο πάχος του δοκιμίου, το δοκίμιο να είναι κυρτό ή κοίλο. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση όλων των σημάτων που λαμβάνονται από το δοκίμιο στον άξονα των χρόνων στο A-scan .

Όταν η πάνω επιφάνεια του δοκιμίου είναι πιο κοντά στην κεφαλή τα σήματα μετακινούνται προς τα αριστερά στον άξονα των χρόνων, διότι μικραίνει η απόσταση μεταξύ της κεφαλής και της πάνω επιφάνειας και κατ' επέκταση ο χρόνος μεταξύ αρχικού παλμού και πρώτης ηχούς. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η πάνω επιφάνεια του δοκιμίου απομακρύνεται από την κεφαλή . Τα σήματα μετακινούνται προς τα δεξιά στον άξονα των χρόνων, μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ του δοκιμίου και της κεφαλής και αυξάνεται ο χρόνος μεταξύ αρχικού παλμού και πρώτης ηχούς.

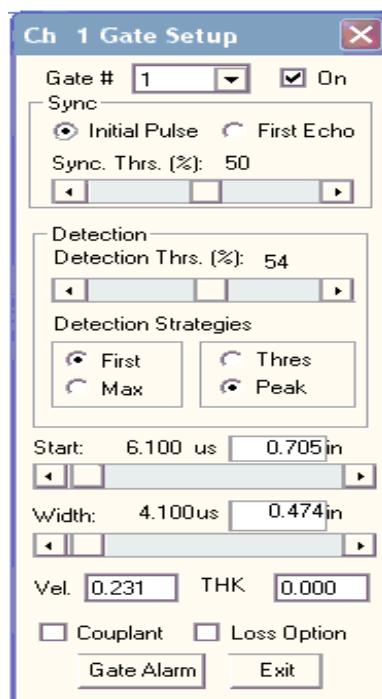
Στην περίπτωση που ο χειριστής παρατηρεί μετακίνηση των σημάτων πρέπει τα gates να συγχρονίζονται με την πρώτη ηχώ (**First Echo**). Με αυτό τον τρόπο τα gates θα μετακινούνται και αυτά σε σχέση με την πρώτη ηχώ και θα παρακολουθούν συνεχώς τη δεδομένη περιοχή του υλικού. Πράγμα που δεν συμβαίνει αν τα gates συγχρονίζονται με τον αρχικό παλμό (**Initial Pulse**). Στην περίπτωση αυτή τα gates είναι ακίνητα και παρακολουθούν μια συγκεκριμένη περιοχή στον άξονα των χρόνων, που όμως μπορεί μέσα σε αυτή, τα σήματα που καταγράφονται να μην αντιστοιχούν στο τμήμα του όγκου του υλικού που έχουμε αποφασίσει να μελετήσουμε, αφού τα σήματα κινούνται αριστερά και δεξιά στον άξονα των χρόνων .

Εάν επιλέξουμε τα gates να συγχρονίζονται με την πρώτη ηχώ σημαντική είναι η ρύθμιση **Sync Thres**. Εκφράζεται σε εκατοστιαίο ποσοστό (%) σε σχέση με το ύψος του παραθύρου του A-scan. Καθορίζει από πιο ποσοστό και πάνω μια κορυφή θεωρείται αξιόπιστη να ληφθεί σαν πρώτη ηχώ και να ενεργοποιήσει το gate που θα συγχρονιστεί με αυτή την κορυφή. Προσοχή χρειάζεται διότι 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 φαντάσματα με μικρότερο amplitude μπροστά από την πραγματική πρώτη ηχώ.

Στη συνέχεια στο παράθυρο διαλόγου των gates συναντάται η επιλογή **Detection thrs**. Η επιλογή αυτή εκφράζεται σε % ποσοστό του ύψους του παραθύρου του A-scan και καθορίζει σε πιο 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 τα τέμνει σίγουρα. Προσοχή χρειάζεται στον καθορισμό του detection thr για κορυφές με μικρό amplitude ,για παράδειγμα η κορυφή της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου (**back wall echo**). Αν το gate οριστεί

πολύ χαμηλά περίπου στο 10% της οθόνης τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να καταγράψει θόρυβο.

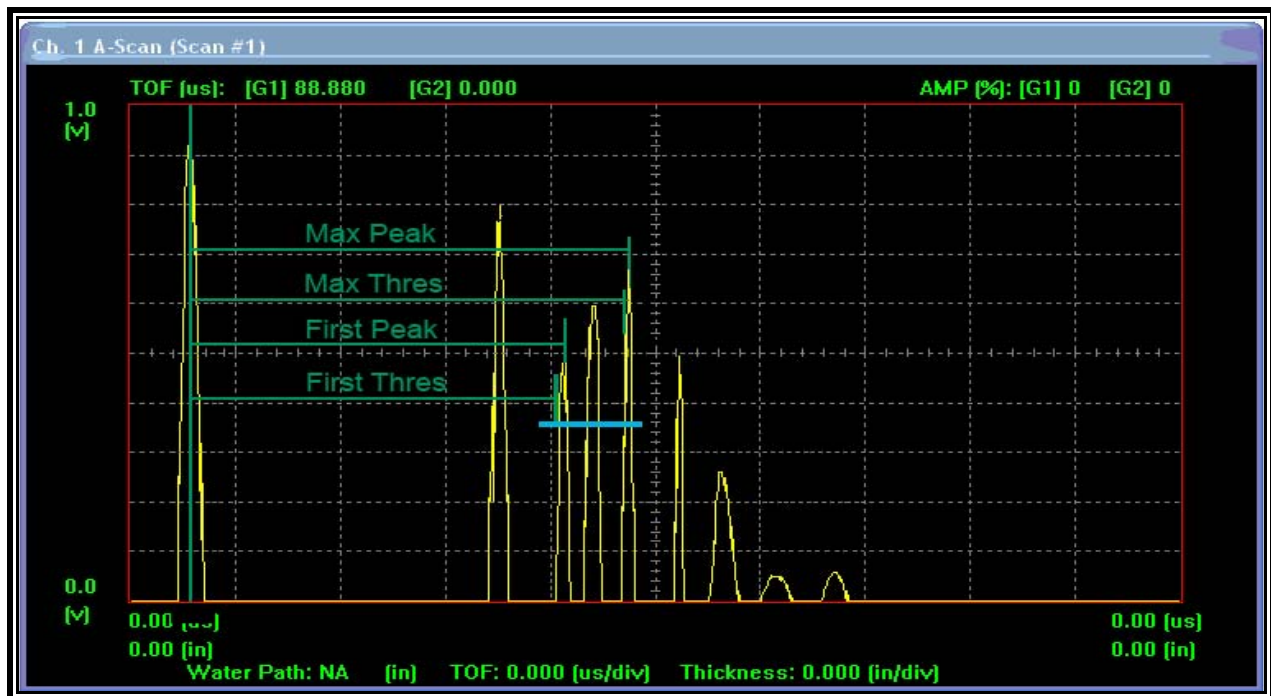
Ακολουθως ορίζεται η θέση του Gate ως προς τον άξονα του χρόνου, με την επιλογή **Start**, καθορίζοντας την απόσταση ή τον χρόνο από τον αρχικό παλμό. Με την επιλογή **Width** ορίζεται το εύρος-πλάτος του Gate ποσό μεγάλο θα είναι και έτσι εμμέσως ορίζεται και το τέλος του Gate. Με τις δύο τελευταίες επιλογές μπορούμε να καταγράψουμε σήματα από συγκεκριμένο πάχος του υλικού.



Σχήμα 7.10 : Gate setup.

Έτσι με ένα Gate μικρού πλάτους μπορούμε να καταγράψουμε σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό μια μόνο στρώση ή με ένα 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 θα καταγράφει τα σήματα που το κόβουν. Στο λογισμικό ULTRAWIN δίνονται τέσσερις επιλογές ή αλλιώς στρατηγικές ανίχνευσης (detection strategies). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10 υπάρχουν δύο ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις επιλογές **First** και **Max** και η δεύτερη ομάδα τις επιλογές **Thres** και **Peak**. Οι τέσσερις αυτές επιλογές δεν μπορούν να ενεργοποιηθούν μόνες τους, αλλά πάντα μία από την μια ομάδα και μια από την άλλη. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν τέσσερις στρατηγικές καταγραφής σημάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.11 και αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 7.11 : Γραφική αναπαράσταση των τεσσάρων στρατηγικών ανίχνευσης.

Οι προαναφερθέντες στρατηγικές είναι :

- I. First Peak : Το Gate καταγράφει την πρώτη κορυφή που το κόβει και το TOF υπολογίζεται μέχρι το σημείο της κορυφής.
- II. 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.
- III. 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.
- IV. 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 7.10) ορίζεται η ταχύτητα του εξεταζόμενου υλικού (Vel) και το πάχος του υλικού που έχει μετρηθεί με μηχανικά μέσα. Οι επιλογές Couplant και Loss επηρεάζουν την μέτρηση του TOF και χρησιμοποιούνται όταν ελέγχονται διαβρωμένες επιφάνειες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

8.1 Εισαγωγή-Τεχνικές εξέτασης-Παρουσίαση δεδομένων

Γενικά όλα τα δοκίμια θα εξεταστούν με την χρήση δύο τεχνικών εξέτασης. Η πρώτη ονομάζεται τεχνική του σχετικού βάθους. Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής, τα Gates προσαρμόζονται ώστε να ελέγχεται σε κάθε περίπτωση η διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων. Έτσι για παράδειγμα στην προσπάθεια μας να εντοπίσουμε τις ατέλειες μεταξύ 3-4 στρώσης ορίζουμε το Gate να ξεκινά από το μέσο της τρίτης στρώσης και να έχει εύρος όσο η θεωρητική στρώση. Με τον τρόπο αυτό επικεντρώνεται ο έλεγχος σε συγκεκριμένο όγκο του υλικού και αποκλείεται η καταγραφή ανακλάσεων που προέρχονται από άλλα τμήματα του υλικού.

Η δεύτερη τεχνική εξέτασης έχει ως στόχο την παρακολούθηση της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου. Με την τεχνική αυτή καταγράφεται η απώλεια της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας, η οποία προκαλείται όταν στο εσωτερικό του εξεταζόμενου υπάρχουν σοβαρές ατέλειες. Οι ατέλειες αυτές είτε αποσβένουν την δέσμη υπερήχων είτε δεν της επιτρέπουν να φτάσει στην πίσω επιφάνεια με αποτέλεσμα την εμφάνιση σημείων no data. Η τεχνική της εξέτασης της πίσω επιφάνειας μας βοηθά να ανιχνεύσουμε την ύπαρξη σοβαρών ατελειών στο υλικό αλλά δεν μας παρέχει πληροφορίες για την θέση τους μέσα στο υλικό. Κατά συνέπεια εάν μας ενδιαφέρει όχι μόνο ο εντοπισμός των ατελειών αλλά και ο προσδιορισμός της θέσης τους ως προς το πάχος του υλικού θα πρέπει να καταφύγουμε στην τεχνική του σχετικού βάθους.

Τέλος υπάρχει ακόμα μια τεχνική ή οποία δεν χρησιμοποιήθηκε καθώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πολύστρωτα υλικά καθώς οδηγεί σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Κατά την τεχνική αυτή παρακολουθείται το σύνολο του όγκου του υλικού, θέτοντας το Gate να καταγράφει τις ανακλάσεις από το εσωτερικό αφήνοντας εκτός τις ανακλάσεις της πάνω και της πίσω επιφάνειας. Λόγω της μεγάλης απόσβεσης που παρουσιάζουν τα σύνθετα, με το τρόπο αυτό καταγράφονται μόνο οι ανακλάσεις των πρώτων στρώσεων και αγνοούνται οι ανακλάσεις με μικρότερο amplitude οι οποίες προέρχονται από τις επόμενες στρώσεις.

Μέσα στην συγκεκριμένη παράγραφο θα συμπεριληφθεί η εξέταση των δοκιμίων με διαφορετικές κεφαλές παραγωγής υπερήχων 5MHz και 15MHz focused, στην προσπάθεια μας για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων με περισσότερη ευκρίνεια. Σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η κεφαλή των 5MHz για να εκμεταλλευτούμε την διεισδυτικότητα της. Μόνο στα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο vacuum infusion και έχουν μικρό πάχος χρησιμοποιήθηκε η κεφαλή των 15MHz για καλύτερα αποτελέσματα, καθώς στα αλλά δοκίμια με την μέθοδο hand layup η απόσβεση ήταν τόσο μεγάλη με την κεφαλή των 15MHz που ο έλεγχος δεν έδινε αποτελέσματα.

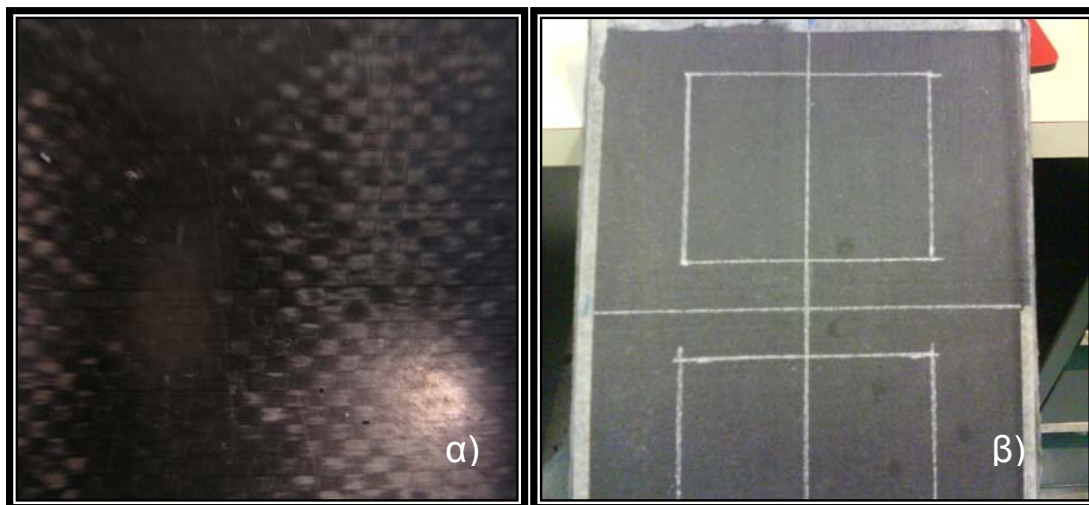
Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την εξέταση των δοκιμίων θα παρουσιαστούν με την παράθεση των C-scan απεικονίσεων. Πριν από κάθε απεικόνιση θα παρατίθενται οι ρυθμίσεις (set-up) της διάταξης ULTRAPAC που πραγματοποιήθηκαν για την λήψη των δεδομένων. Οι C-scan

απεικονίσεις θα αφορούν τα τμήματα του υλικού στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι τεχνητές ατέλειες για κάθε στρατηγική ανίχνευσης, με σκοπό την αποτύπωση των ατελειών με την μεγαλύτερη ευκρίνεια και αξιοπιστία. Ταυτόχρονα θα γίνεται και ο σχολιασμός των απεικονίσεων

8.2 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I)

8.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις

Τα δοκίμια Carbon Epoxy που είναι κατασκευασμένα με την μέθοδο Vacuum Infusion είναι τα δοκίμια με το μικρότερο πάχος. Το πάχος τους, αρχικά μετρήθηκε με μηχανικά μέσα. Χρησιμοποιήθηκε διακριβομένο παχύμετρο και μικρόμετρο. Μετρήσεις ελήφθησαν από διαφορετικά σημεία των δοκιμίων. Με τον τρόπο αυτό προέκυψε το μέσο πάχος να είναι 3mm εκτός από την περιοχή πάνω στην πτύχωση, όπου προέκυψε 3.28 mm. Στα προαναφερθέντα δοκίμια η μια πλευρά, που κατά την κατασκευή είναι σε επαφή με το καλούπι είναι εντελώς λεία (Σχήμα 8.1α), ενώ η άλλη, η οποία έχει έρθει σε επαφή με το peel ply είναι τραχιά καθώς πάνω της έχει αποτυπωθεί η ύφανση του αποκολλητικού υφάσματος peel ply (Σχήμα 8.1β)



Σχήμα 8.1: α) Λεία όψη δοκιμίου β) Τραχιά όψη.

Το γεγονός της τραχύτητας, αναφέρεται διότι, η ύπαρξη της επιβάλλει στην εξέταση των δοκιμίων να γίνει τοποθετώντας την λεία πλευρά ώστε να είναι αυτή που θα έρθει πρώτη σε επαφή με την δέσμη των υπερήχων. Με τον τρόπο αυτό θα έχουμε λιγότερες ανακλάσεις λόγω διασποράς από την τραχύτητα της επιφάνειας και θα εκμεταλλευτούμε πλήρως την διεισδυτική ικανότητα της δέσμης.

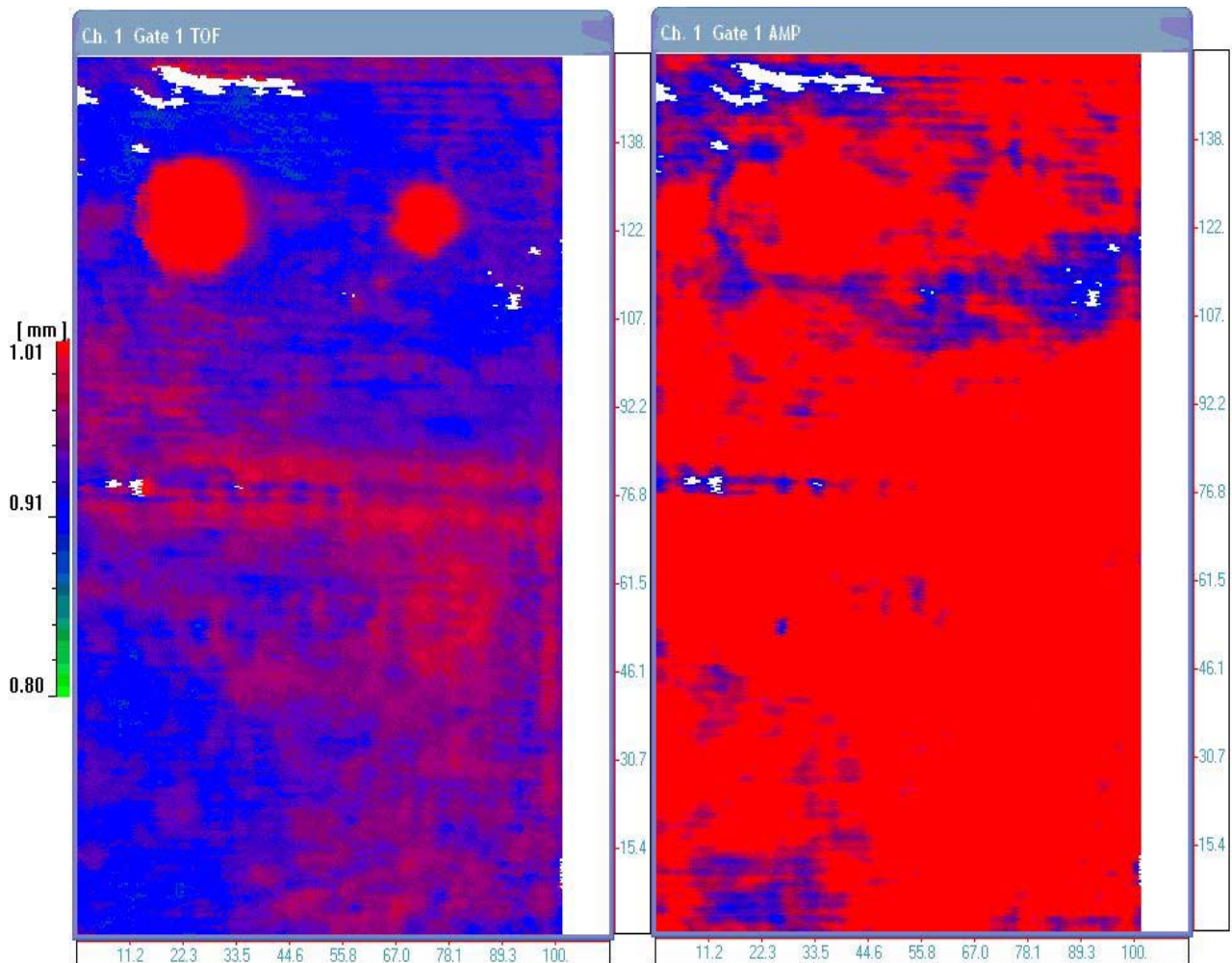
Επίσης στο δοκίμιο δεν παρουσιάζονται στρεβλώσεις με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πρόβλημα κατά την τοποθέτηση του πάνω στις βάσεις στήριξης μέσα στην δεξαμενή. Τέλος πάνω στην λεία επιφάνεια του παρατηρούνται μικρές οπές από την ύπαρξη αέρα μεταξύ του πολύστρωτου και του καλουπιού κατά την κατασκευή.

8.3 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 3ⁿ-4ⁿ στρώση

8.3.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK

Πίνακας 8.1 : CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST PEAK

Setup Test Information					
Customer					
Test Item	CFRP#V-I				
Test Date					
Inspector					
Project Number					
Scan Segment number					
Scan Segment Description					
Scan Segment Orientation					
Total Number of Points	574740				
Source File Name	CFRP#V-I 3-4TH LAYER FIRST PEAK.dat				
Material velocity	2,691482677				
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR				
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec		
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec		
Sampling Rate	100 MHz		MHz		
Wave Average	0		4		
Scale	1		1		
Display Mode	Positive Rectified		RF		
Trigger Source	Internal Single		Threshold		
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R		
Pulser voltage	380		390		
Damping	2000 ohms		545 ohms		
Filter					
Attenuation					
Gain	17.7 dB		-18 dB		
Energy level	820 pf		820 pf		
Filtering mode	Filter		Wide Band		
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz		
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz		
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2	
Gate Status	On	Off	On	Off	
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse	
Synchronization Threshold	57%	50%	50%	60%	
Detection Mode	First, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak	
Detection Threshold	44%	42%	50%	60%	
Gate Start	.5947955 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec	
Gate Width	.1561338 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec	
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634	
Scanner Settings					
Scan Axis	Y				
Scanning Axis Length	102				
Scanning Axis Resolution	0,330433547				
Scanning Axis Speed	30				
Index Axis	X				
Index Axis Length	153,6515961				
Index Axis Resolution	0,330433547				
Index Axis Speed	20				



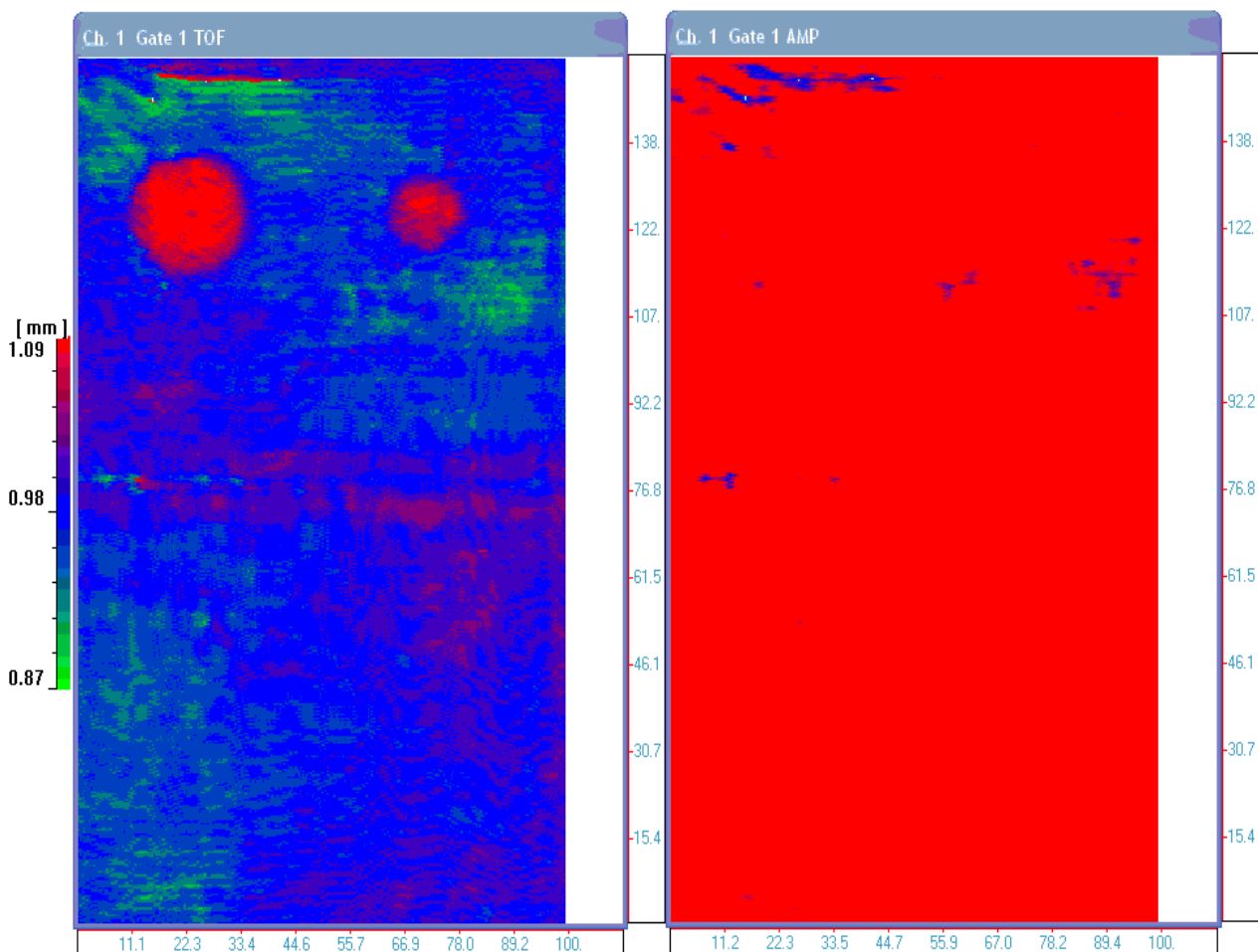
Σχήμα 8.1 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST PEAK

Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται η απεικόνιση των ατελειών D5 και D7 για την οποία χρησιμοποιήθηκε η στρατηγική First Peak. Σκοπός της στρατηγικής αυτής είναι να καταγράψει τις πρώτες ανακλάσεις που κόβουν το Gate, το οποίο έχει οριστεί να παρακολουθεί το τμήμα του υλικού μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης από 0.80-1.01 mm και να καταγράφει όλες τις κορυφές που ξεπερνούν το 44% FSH.

Οι τεχνητές ατέλειες ανιχνεύονται με επιτυχία στο συγκεκριμένο βάθος του υλικού και όπως φαίνεται βρίσκονται κοντά στο 1mm γεγονός που προσδιορίζεται από την κόκκινη απόχρωση που έχουν οι ατέλειες στην απεικόνιση του TOF. Οι ανακλάσεις που έρχονται από την περιοχή των ατελειών έχουν υψηλό amplitude όπως φαίνεται στην απεικόνιση AMP γεγονός που δηλώνει ότι οι τεχνητές ατέλειες που τοποθετήθηκαν δεν προκαλούν τέλεια απόσβεση της δέσμης των υπερήχων.

Στο AMP scan δεξιά στο Σχήμα 8.1 παρατηρούμε να εμφανίζονται περιοχές, με την μπλε απόχρωση, με μειωμένο amplitude κατά 50%. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται σε βάθος περίπου 0.91mm από την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου. Μια ερμηνεία που είναι η επικρατέστερη, είναι ότι στις περιοχές αυτές έχουμε αλλαγή της αναλογίας ινών-ρητίνης (resin to fiber ratio) γεγονός που επιφέρει μείωση του amplitude των ανακλάσεων λόγω αύξησης της απόσβεσης των κυμάτων

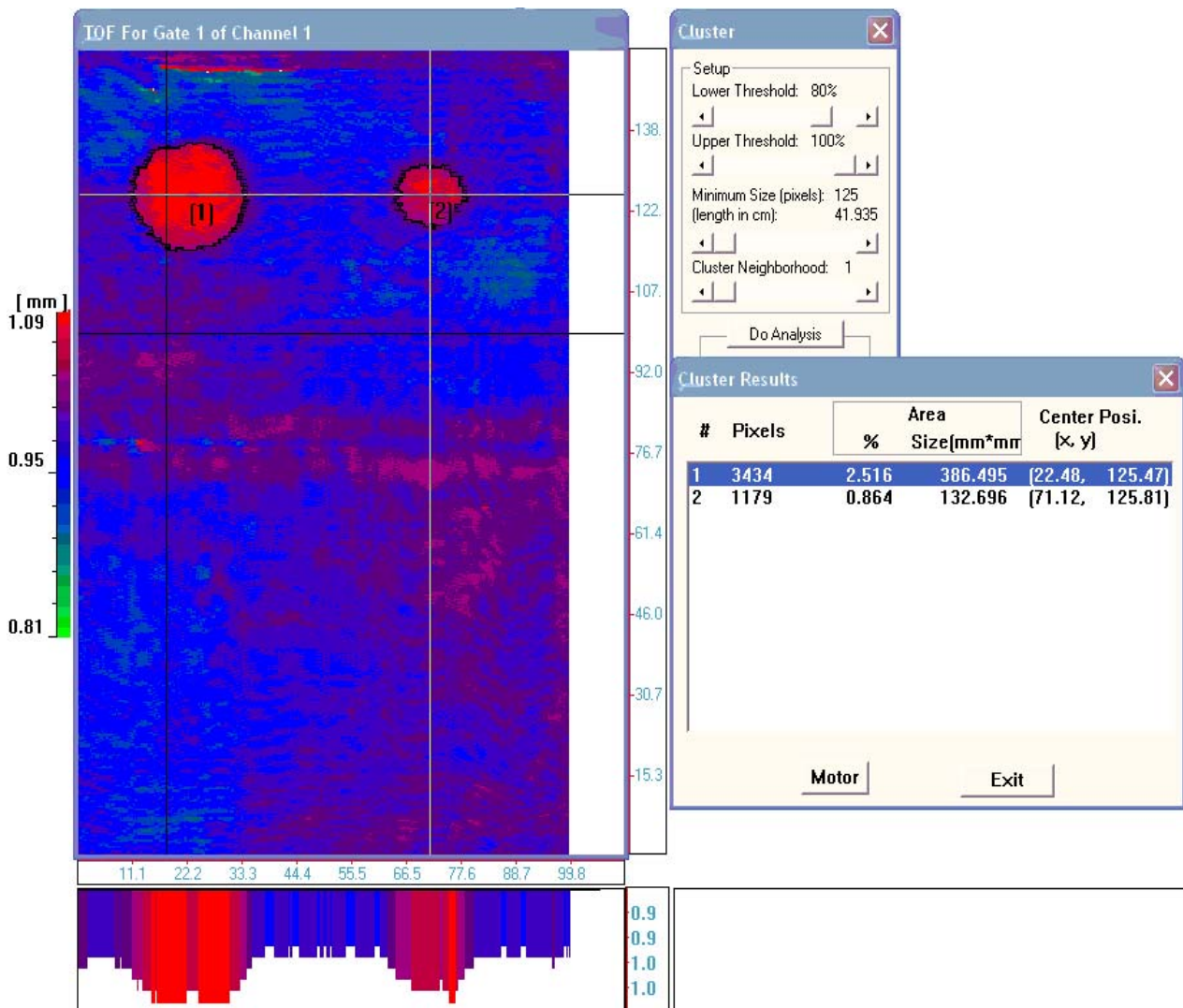
υπερήχων [8]. Επιπροσθέτως στο κέντρο των προαναφερθέντων περιοχών, ιδιαίτερα στο πάνω μέρος του δοκιμίου εμφανίζονται άσπρες περιοχές (no data) δηλαδή σημεία που η απόσβεση είναι πολύ μεγάλη ή τόση ώστε οι ανακλάσεις στην συγκεκριμένη περιοχή να έχουν amplitude μικρότερο από 44% FSH και δεν καταγράφονται από το Gate. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για περιοχές που δεν έχουν εμποτιστεί ικανοποιητικά από ρητίνη κατά την κατασκευή των δοκιμίων. Για τις περιοχές αυτές παρατίθεται και δεύτερο C-scan με την ίδια στρατηγική ανίχνευσης αλλά με το Gate να καταγράφει τις κορυφές πάνω από 39%FSH. Ο λόγος που κρίνεται αναγκαία η παράθεση του εν λόγω C-scan είναι για να αποκλειστεί η περίπτωση στις περιοχές αυτές να υπάρχει αέρας. Εάν υπάρχει αέρας ανεξαρτήτως ρύθμισης του Gate δεν θα πάρουμε καμία ανάκλαση καθώς στον αέρα τα κύματα υπερήχων αποσβένονται πλήρως. Γεγονός που δεν συμβαίνει όπως παρατηρεί κανείς στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST PEAK με Gate στο 39%FSH

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η επιλογή cluster analysis του λογισμικού ULTRAWIN για να εκτιμηθεί το μέγεθος των ατελειών D5 και D7 που ανιχνεύτηκαν. Οι διαστάσεις που καταγράφονται στο Σχήμα 8.3 είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές καθώς το εμβαδόν των ατελειών παρουσιάζει απόκλιση από 23-68% σε σχέση με το πραγματικό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι στρώσεις

καμπυλώνουν λόγω της ύπαρξης των ατελειών στα όρια της ατέλειας δημιουργώντας γύρω από την ατέλεια μια περιοχή με αυξημένο πάχος. Παρά ταύτα η θέση του κέντρου βάρους των ατελειών υπολογίζεται ικανοποιητικά, γεγονός που δείχνει ότι οι ατέλειες δεν μετακινήθηκαν από την προκαθορισμένη θέση τους κατά την κατασκευαστική διαδικασία.

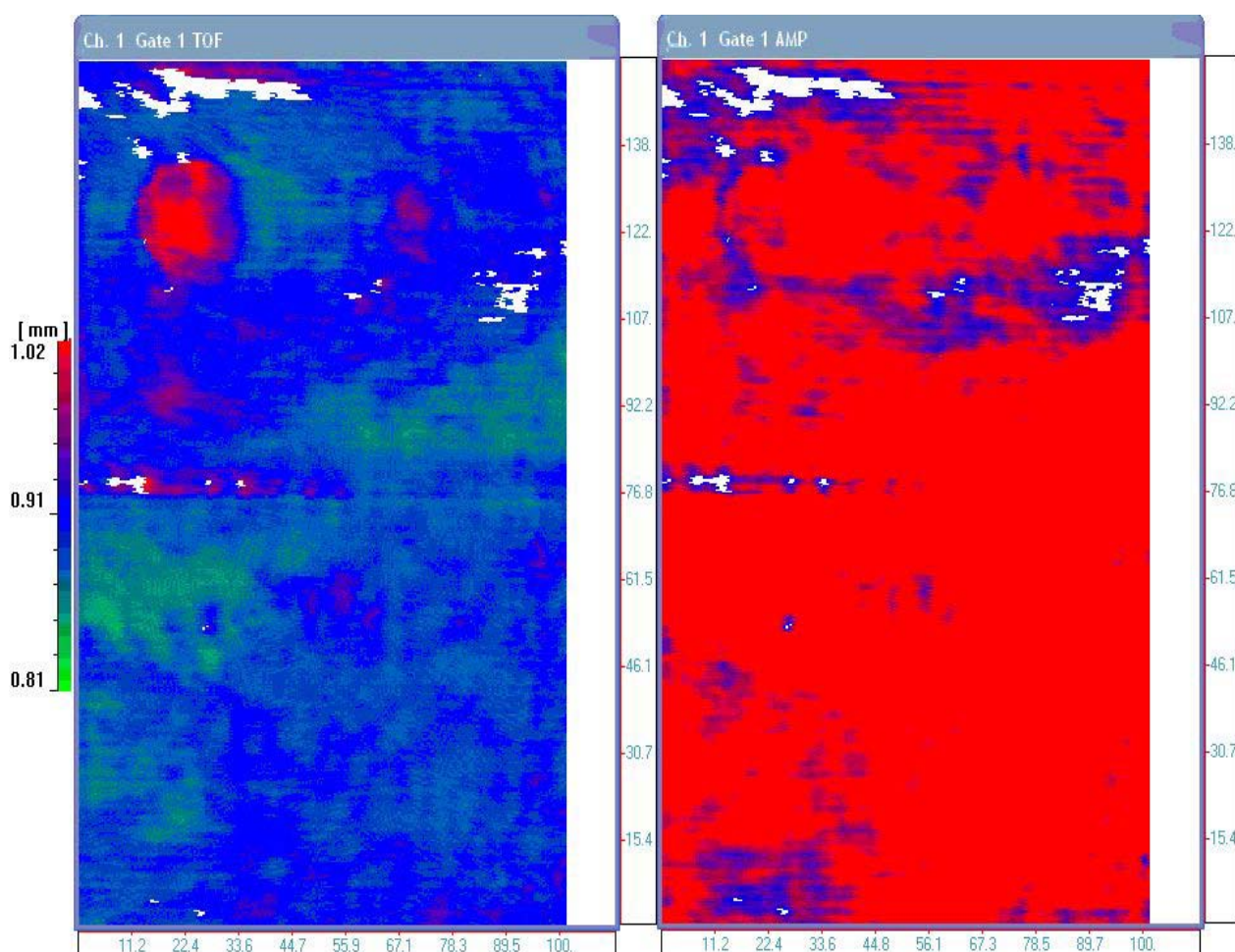


Σχήμα 8.3 : C-scan TOF CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST PEAK CLUSTER ANALYSIS

Στη συνέχεια συνεχίζεται ο έλεγχος στο ίδιο τμήμα του όγκου του υλικού χρησιμοποιώντας και τις άλλες στρατηγικές ανίχνευσης.

8.3.2 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK**Πίνακας 8.2 : CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX PEAK**

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 3-4THLAYER MAXPEAK.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	41%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	50%	42%	50%	60%
Gate Start	.6 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.1561338 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



Σχήμα 8.4 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX PEAK.

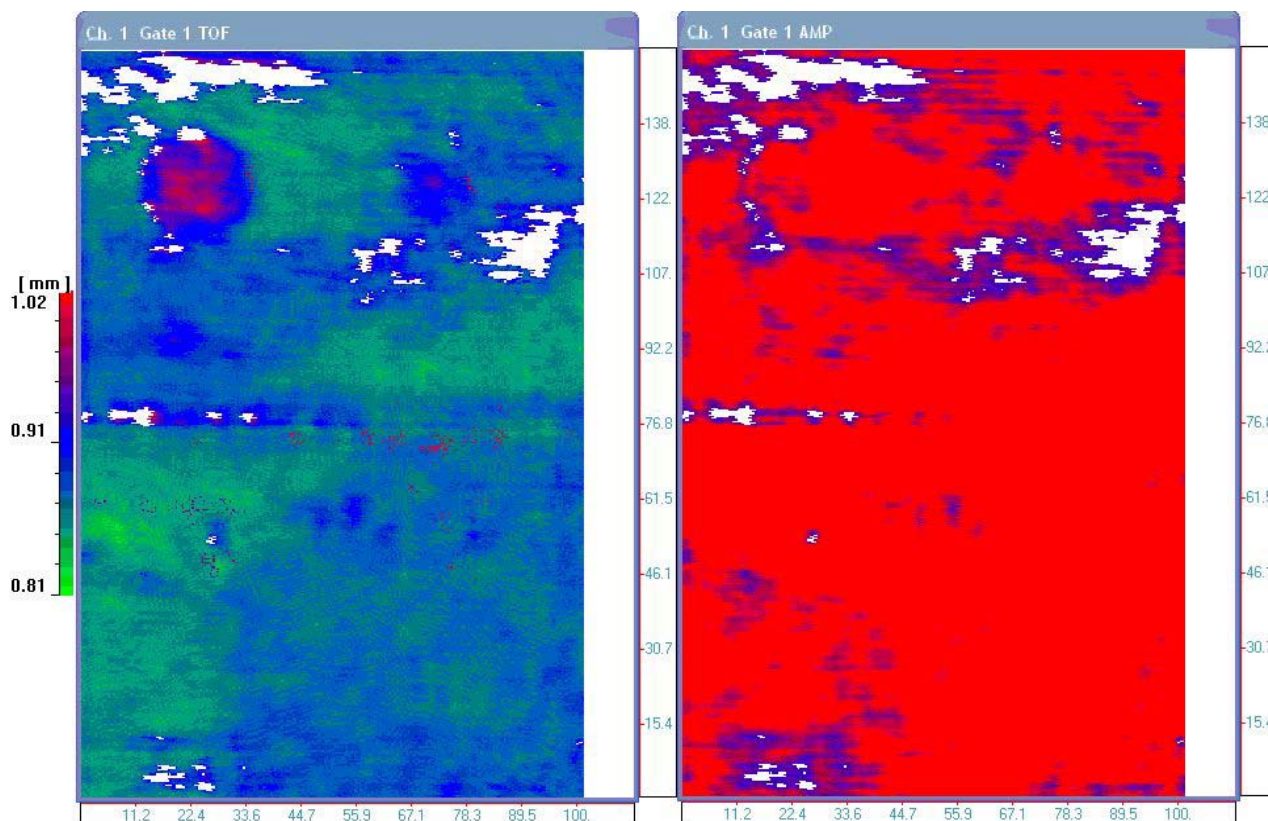
Με την στρατηγική Max-Peak θέλουμε να καταγράψουμε τις ισχυρότερες ανακλάσεις που προέρχονται στον συγκεκριμένο όγκο του υλικού θέτοντας το detection threshold του Gate στο 50%FSH. Στο C-scan του Σχήματος 8.4 λαμβάνουμε ακριβώς τα ίδια δεδομένα μόνο που τώρα τα όρια των ατελειών δεν διακρίνονται διότι παρουσιάζουν μικρότερο amplitude από 50%FSH και το Gate καταγράφει προηγούμενες κορυφές με μεγαλύτερο πλάτος.

8.3.3 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ MAX-THRES ΚΑΙ FIRST-THRES**Πίνακας 8.3 : CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST THRESH**

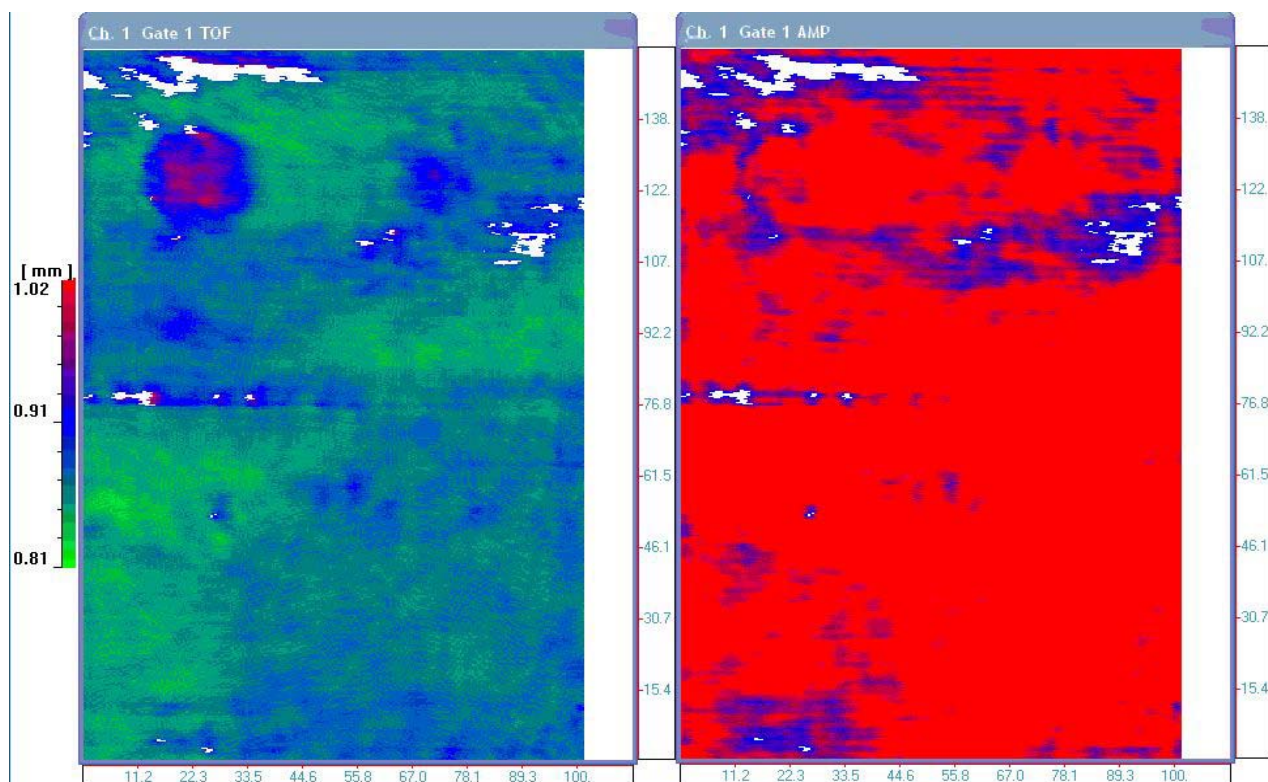
Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 3-4TH LAYER FIRST THRESHOLD.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	39%	50%	50%	60%
Detection Mode	First, Threshold	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	60%	42%	50%	60%
Gate Start	.6 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.1561338 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			

Πίνακας 8.4 : CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX-THRES

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 3-4TH LAYER MAX THRESHOLD.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	41%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Threshold	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	50%	42%	50%	60%
Gate Start	.6 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.1561338 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



Σχήμα 8.5 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER FIRST THRESH.



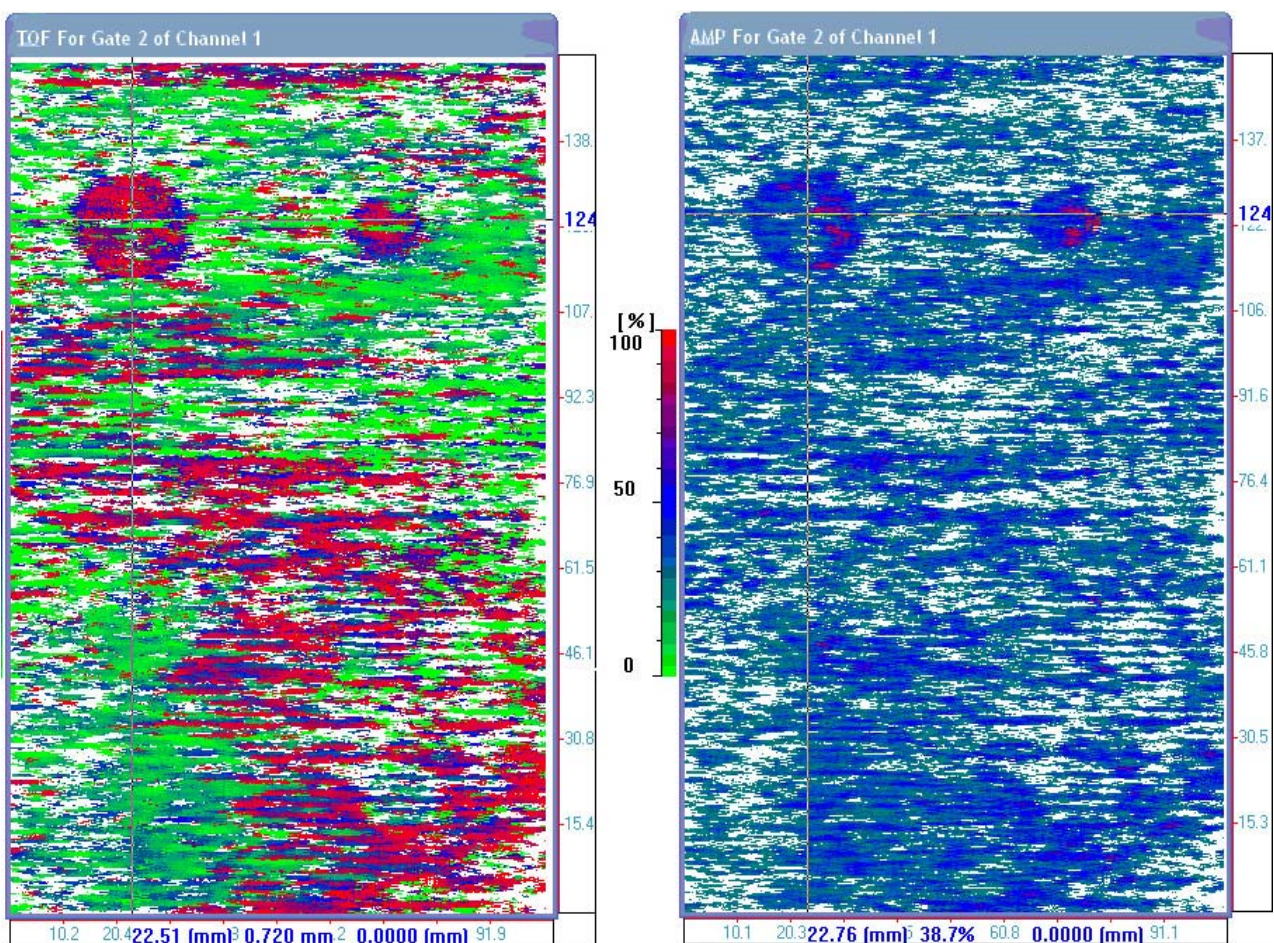
Σχήμα 8.6 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX THRESH.

Με τις στρατηγικές Max-Threshold και First-Threshold έγινε προσπάθεια ώστε να καταγραφούν οι πρώτες και οι μέγιστες κορυφές πάνω από το threshold που καθορίστηκε από το Gate. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν τα προηγούμενα ευρήματα μόνο που τα όρια των ατελειών και στις δύο περιπτώσεις εξακολουθούν να μην είναι ευδιάκριτα.

Συμπερασματικά οι τεχνητές ατέλειες μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης ανιχνεύτηκαν με επιτυχία. Η καλύτερη απεικόνιση προέκυψε με την στρατηγική First-Peak. Επίσης ικανοποιητικά προσδιορίστηκε το σχήμα τους και η θέση τους ως προς το επίπεδο σάρωσης. Μετά τα αλληπάλληλα C-scan κατορθώθηκε να περιοριστεί το εύρος του Gate στα 210μm και μέσα σε αυτό το εύρος να περιλαμβάνονται οι ατέλειες με πάχος 127μm. Γεγονός που θεωρείται πολύ καλή προσέγγιση της θέσης των ατελειών ως προς το πάχος του δοκιμίου.

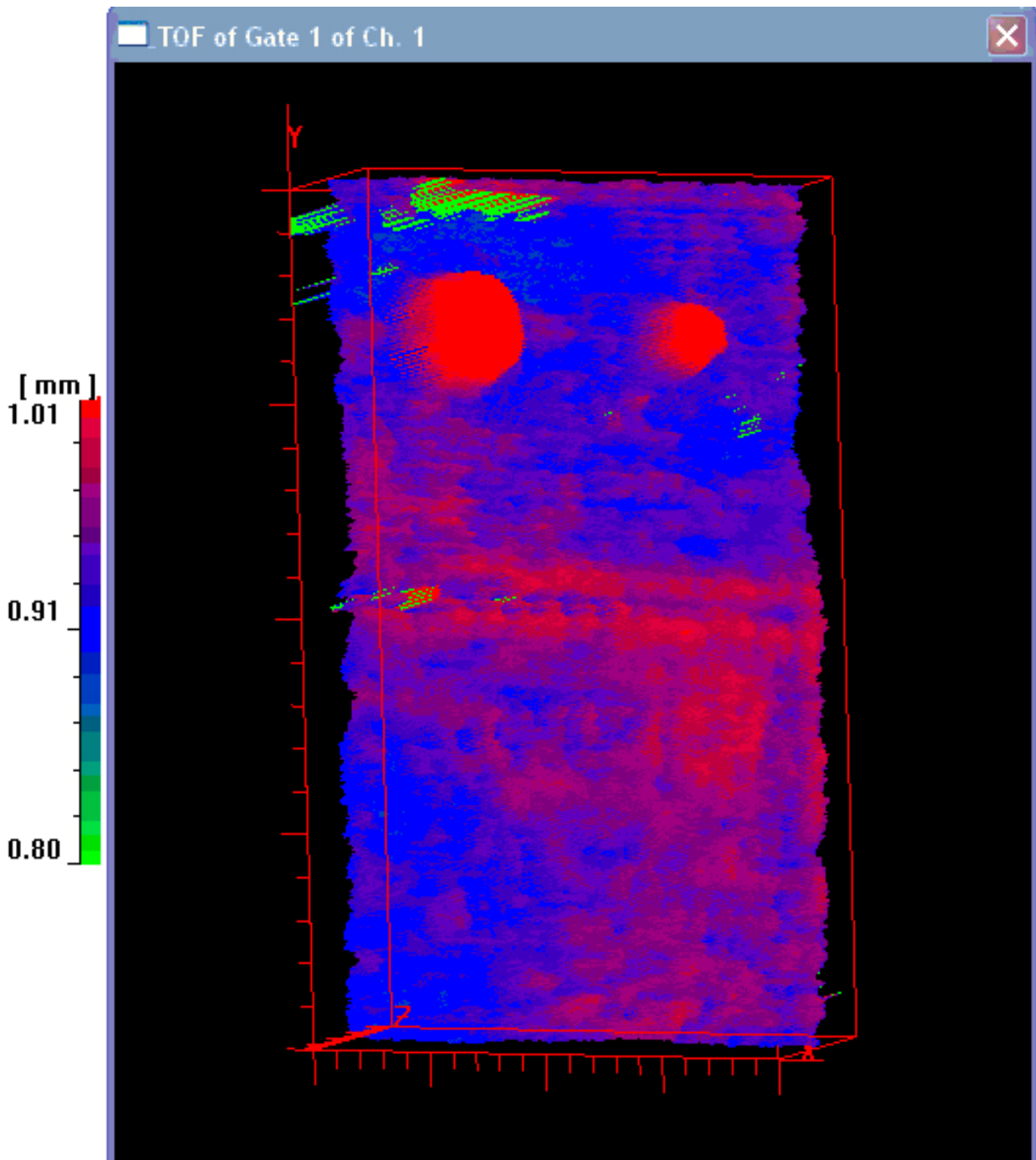
Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί C-scan της 3^{ης}-4^{ης} στρώσης που προέκυψε από την χρήση κεφαλής 15MHz focused με σκοπό να ληφθούν αποτελέσματα με μεγαλύτερη ευκρίνεια.

8.3.4 ΚΕΦΑΛΗ 15MHZ FOCUSED ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK



Σχήμα 8.7 :15MHz C-scan TOF-AMP CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX PEAK.

Με την χρήση της κεφαλής των 15 MHz focused βελτιώνεται η ευκρίνεια των C-scan και αυτό μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο Σχήμα 8.7. Οι ατέλειες ανιχνεύονται, όπως και με την κεφαλή των 5MHz μόνο που τώρα τα όρια τους διακρίνονται καλύτερα. Το επιπλέον στοιχείο που μπορεί να παρατηρήσει κανείς με την χρήση της συγκεκριμένης κεφαλής είναι ο προσανατολισμός των ινών των στρώσεων του πολύστρωτου. Τέλος στο Σχήμα 8.8 παρατίθεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των ατελειών D5 και D7 στην απεικόνιση TOF για καλύτερη εποπτεία του αναγνώστη.



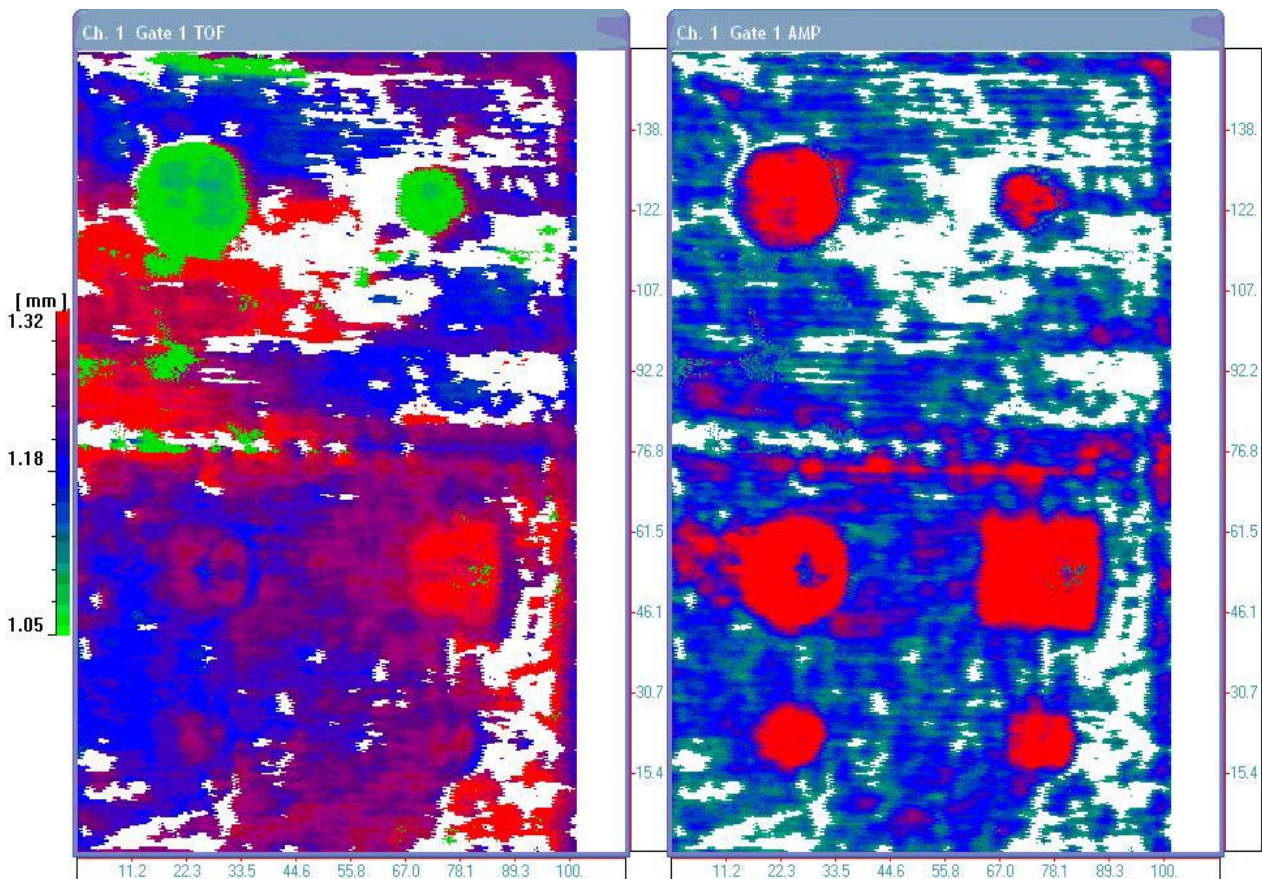
Σχήμα 8.8 :5MHz C-scan 3D TOF CFRP V-I 3-4TH LAYER MAX PEAK.

8.4 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 4^η -5^η στρώση

8.4.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK

Πίνακας 8.6 : CFRP V-I 4-5TH LAYER FIRST PEAK

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 4-5TH LAYER FIRSTPEAK.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	17%	50%	50%	60%
Detection Mode	First, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	19%	42%	50%	60%
Gate Start	.78 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



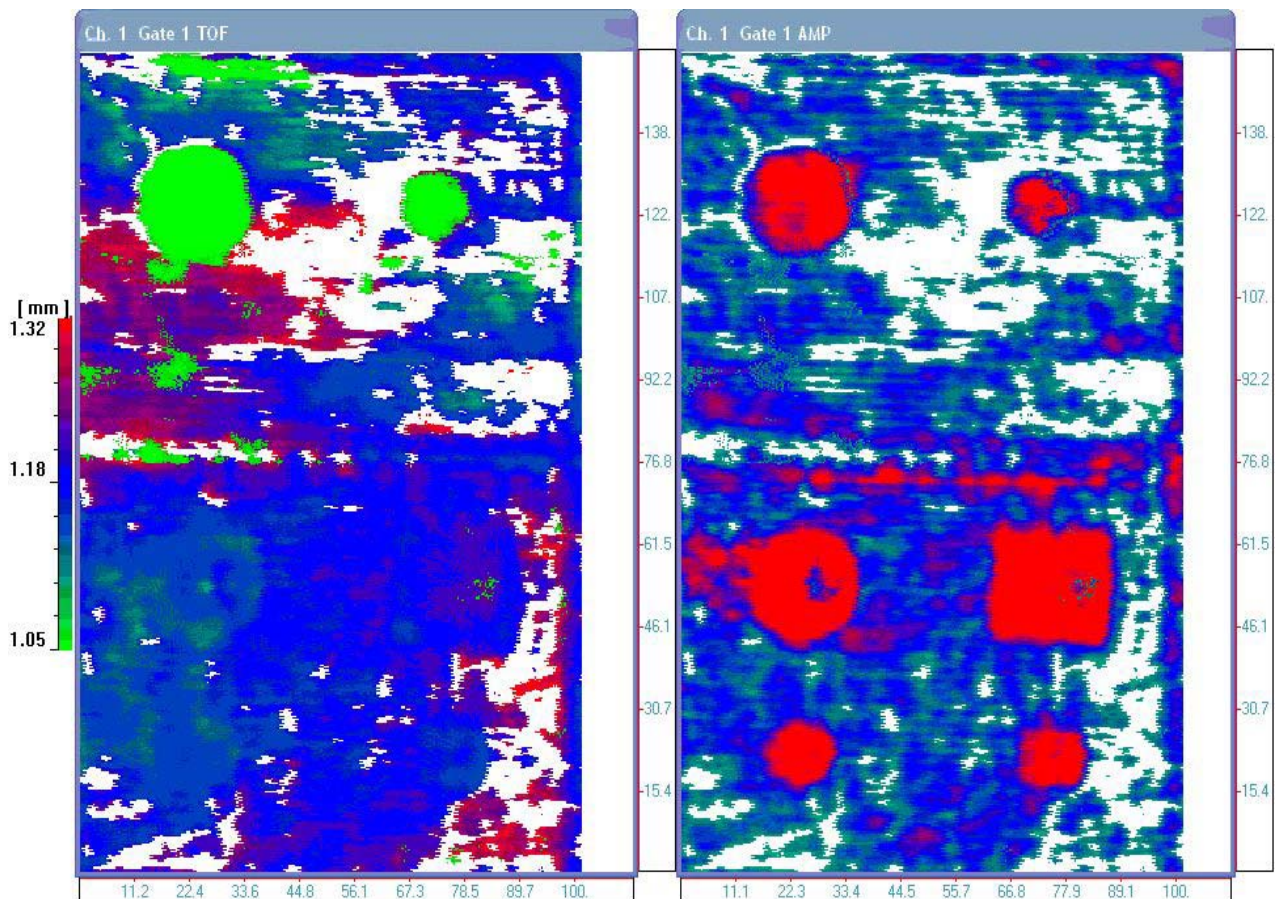
Σχήμα 8.9 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER FIRST PEAK.

Μετά την ανίχνευση και των εντοπισμό των ατελειών D5 και D7 η εξέταση προχωρά στις ατέλειες D1, D2, D3 και D4 που έχουν τοποθετηθεί μεταξύ της 4^{ης} και 5^{ης} στρώσης. Αρχικά χρησιμοποιείται η στρατηγική First Peak με το Gate να προσαρμόζεται σε βάθος από 1.05mm έως 1.32mm. Το detection threshold αναγκαστικά, λόγω απόσβεσης, πέφτει στο 19%FSH. Λόγω της μεγάλης απόσβεσης, στο C-scan του Σχήματος 8.9 εμφανίζονται οι λευκές περιοχές οι οποίες δεν αποτελούν ατέλειες απλά είναι αποτέλεσμα της επιλογής μας να μην τοποθετήσουμε το Gate χαμηλότερα για να μην καταγράψουμε θόρυβο.

Όπως παρατηρείται οι ατέλειες D5 και D7 εξακολουθούν να καταγράφονται και στο TOF εμφανίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα γεγονός που τεκμηριώνει ότι βρίσκονται στο 1mm, πράγμα που είχε διαπιστωθεί προηγουμένως. Οι ατέλειες D1, D2, D3 και D4 με την συγκεκριμένη στρατηγική δεν μπορούν να εντοπιστούν στην απεικόνιση TOF διότι μπλέκονται με τις επίσης ισχυρές ανακλάσεις που προέρχονται από τις στρώσεις από το ίδιο βάθος. Εμφανίζονται όμως με πολύ ικανοποιητικό τρόπο στο AMP scan γεγονός που μας επιβεβαιώνει την ανίχνευση τους. Το σχήμα τους προσδιορίζεται και τα όρια τους είναι ευδιάκριτα. Έτσι η εξέταση συνεχίζεται με την χρήση των άλλων στρατηγικών ανίχνευσης για να προσδιοριστεί και η θέση τους ως προς το πάχος του εξεταζόμενου πολύστρωτου.

8.4.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-THRESH**Πίνακας 8.7 : CFRP V-I 4-5TH LAYER FIRST THRESH**

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 4-5TH LAYER FIRST THRESHOLD.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	17%	50%	50%	60%
Detection Mode	First, Threshold	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	19%	42%	50%	60%
Gate Start	.78 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



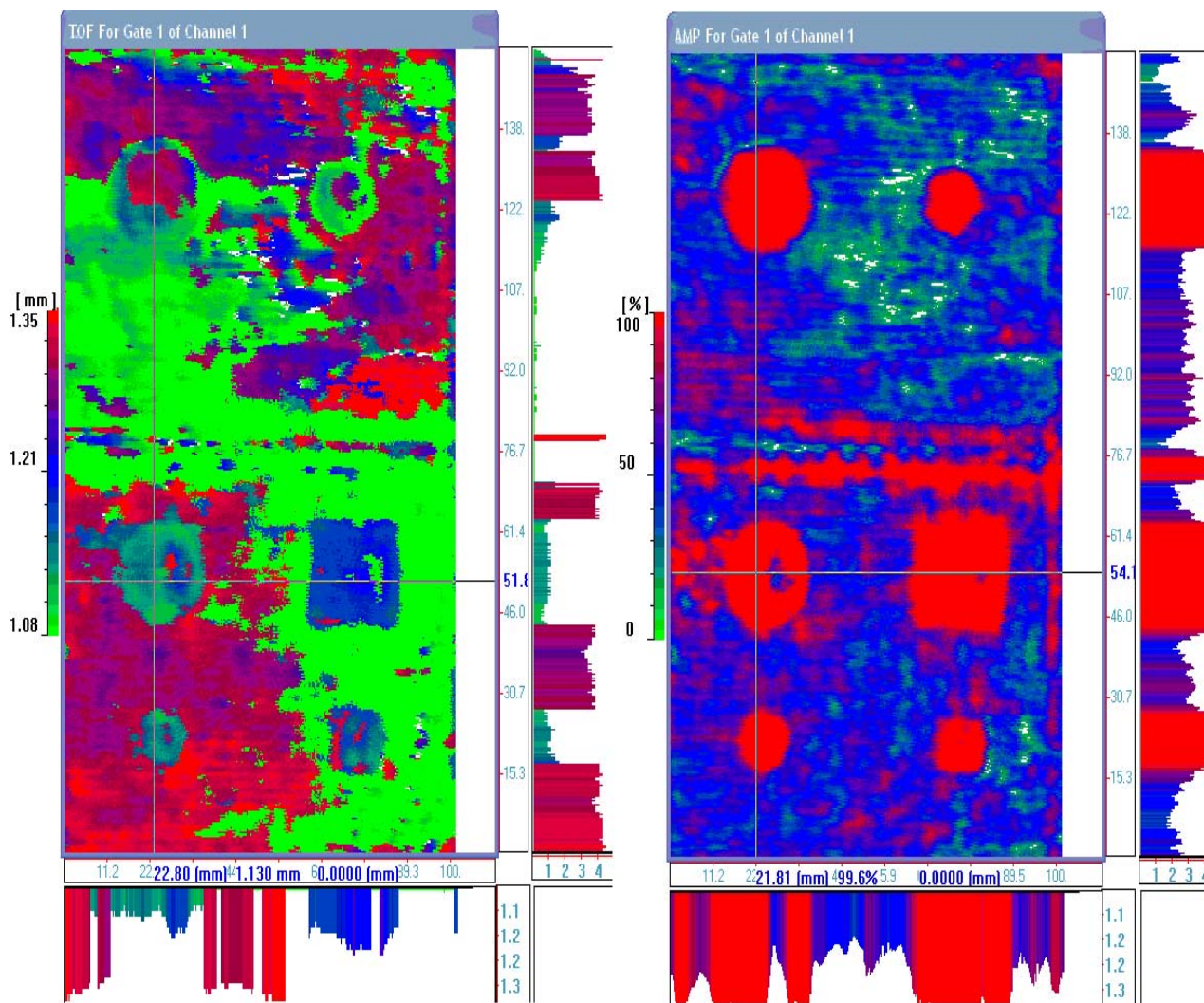
Σχήμα 8.10 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER FIRST THRESH.

Με την στρατηγική First Thresh καταγράφονται οι πρώτες κορυφές που κόβουν το Gate και ο χρόνος δηλαδή η απόσταση των κορυφών καταγράφεται μέχρι την πρώτη τους πλευρά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καταγραφεί η στρώση που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τις ατέλειες καθώς αν συγκρίνει ο αναγνώστης το προηγούμενο C-scan με το C-scan το Σχήματος 8.10, στην περιοχή των ατελειών D1, D2, D3 και D4 χάνεται η μώβ απόχρωση που προέρχεται από βάθος 1.18 έως 1.32mm και καταγράφονται οι κορυφές από βάθος 1.18mm (μπλε χρώμα). Οι ανακλάσεις που προέρχονται από την στρώση πάνω από την θέση των ατελειών εξακολουθούν να είναι ισχυρές λόγω της ύπαρξης των ατελειών ακριβώς από κάτω.

8.4.3 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Πίνακας 8.8 : CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX PEAK.

Setup Test Information					
Customer					
Test Item	CFRP#V-I				
Test Date					
Inspector					
Project Number					
Scan Segment number					
Scan Segment Description					
Scan Segment Orientation					
Total Number of Points	574740				
Source File Name	CFRP#V-I 4-5TH LAYER MAX PEAK.dat				
Material velocity	2,691482677				
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR				
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec		
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec		
Sampling Rate	100 MHz		MHz		
Wave Average	0		4		
Scale	1		1		
Display Mode	Positive Rectified		RF		
Trigger Source	Internal Single		Threshold		
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R		
Pulser voltage	380		390		
Damping	2000 ohms		545 ohms		
Filter					
Attenuation					
Gain	17.7 dB		-18 dB		
Energy level	820 pf		820 pf		
Filtering mode	Filter		Wide Band		
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz		
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz		
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2	
Gate Status	On	Off	On	Off	
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse	
Synchronization Threshold	51%	50%	50%	60%	
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak	
Detection Threshold	15%	42%	50%	60%	
Gate Start	.78 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec	
Gate Width	.1561338 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec	
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634	
Scanner Settings					
Scan Axis	Y				
Scanning Axis Length	102				
Scanning Axis Resolution	0,330433547				
Scanning Axis Speed	30				
Index Axis	X				
Index Axis Length	153,6515961				
Index Axis Resolution	0,330433547				
Index Axis Speed	20				

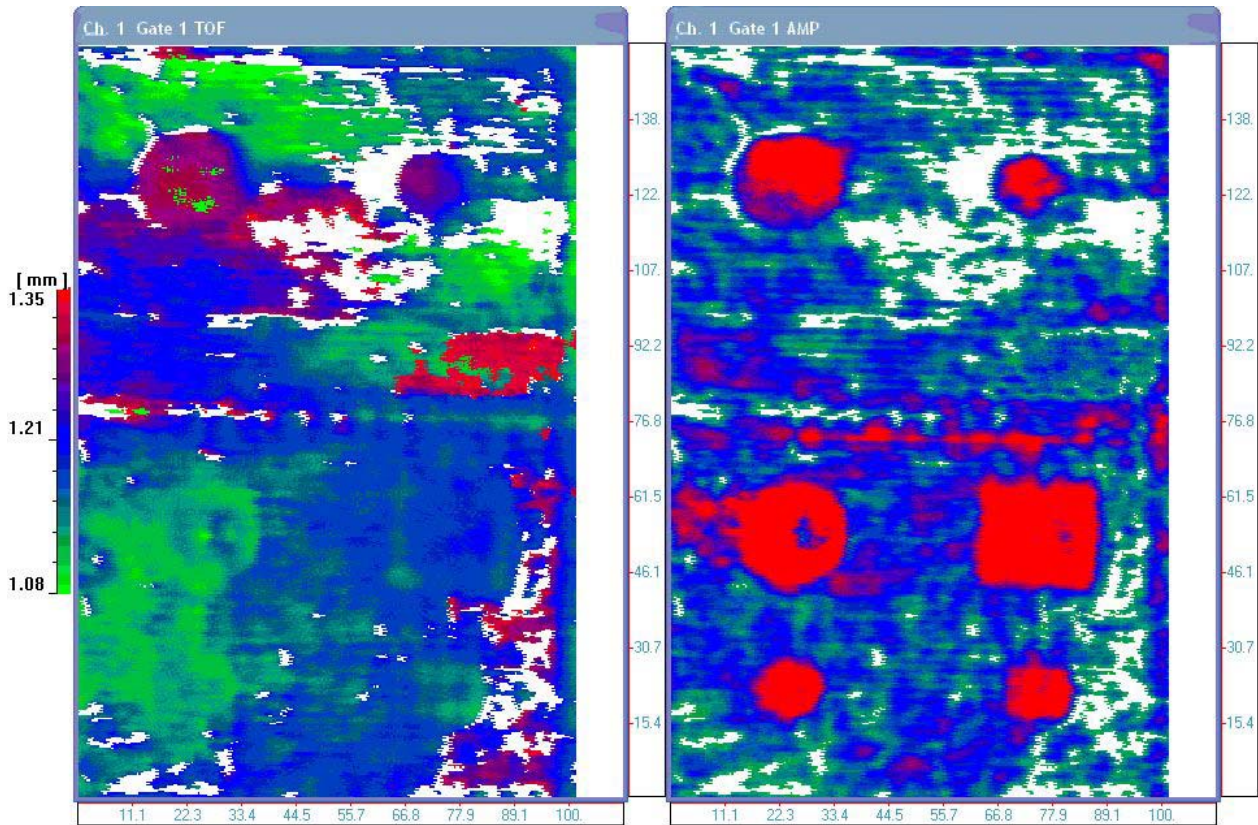


Σχήμα 8.11 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX PEAK.

Στην προσπάθεια μας να εντοπίσουμε τις ατέλειες μετατοπίζουμε το κέντρο του Gate στο 1.21mm προσαρμόζουμε το detection threshold στο 15%FSH έτσι ώστε να μην καταγράψουμε λευκές περιοχές και χρησιμοποιούμε την στρατηγική Max-Peak με σκοπό να καταγράψουμε μόνο τις μέγιστες κορυφές. Τα αποτελέσματα της προσπάθεια φαίνονται στο Σχήμα 8.11. Το σχήμα των ατελειών φαίνεται τώρα και στο TOF Scan και η θέση τους εντοπίζεται σε βάθος περίπου 1.20mm. Στο συγκεκριμένο C-scan παρουσιάζονται ταυτόχρονα και τα b και b' scans που παρέχουν την κατανομή των παραμέτρων TOF και AMP στην τομή του υλικού στη θέση που βρίσκεται το σταυρόνημα. Τέλος αυτό που επίσης φαίνεται από το παραπάνω C-scan είναι ότι οι στρώσεις δεν είναι επίπεδες, καθώς στο εύρος του Gate από 1.08 έως 1.35mm καταγράψουμε δύο στρώσεις. Η πρώτη με πράσινο χρώμα από πάχος 1.08mm και η δεύτερη με κόκκινο και μοβ χρώμα από πάχος κοντά στο 1.30mm.

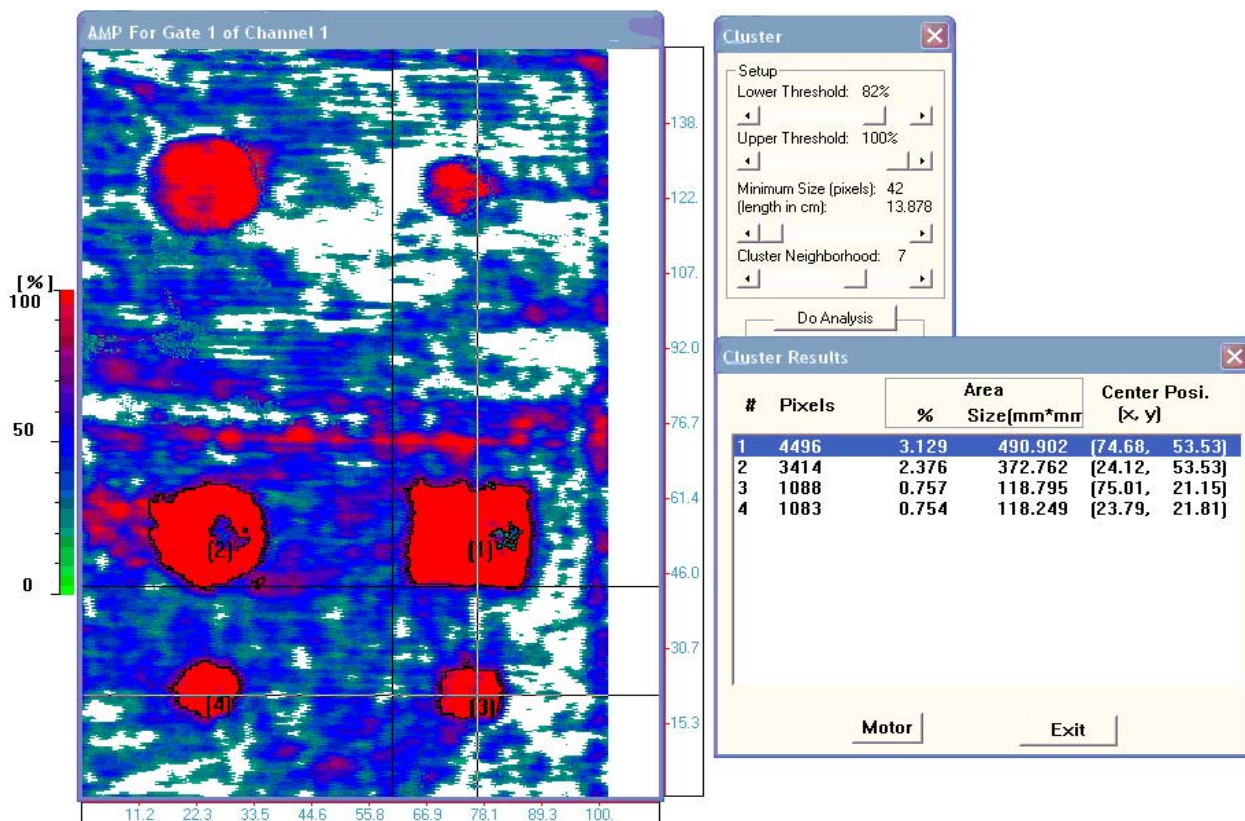
Η στρατηγική Max-Peak έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα καθώς με την στρατηγική Max-Threshold η οποία δίνεται στο Σχήμα 8.12 δεν προέκυψαν αποτελέσματα καλύτερα.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εξέτασης του υλικού στην 4^η και 5^η στρώση ολοκληρώνεται όπως και προηγουμένως με την παράθεση των αποτελεσμάτων της cluster analysis και της 3D απεικόνισης (Σχήμα 8.14). Όπως και προηγουμένα, τα αποτελέσματα της cluster analysis υπερεκτιμούν το μέγεθος των ατελειών καθώς μέσα στην ομαδοποίηση συμπεριλαμβάνονται και σήματα από τα όρια των ατελειών με παραπλήσιο amplitude (Σχήμα 8.13).

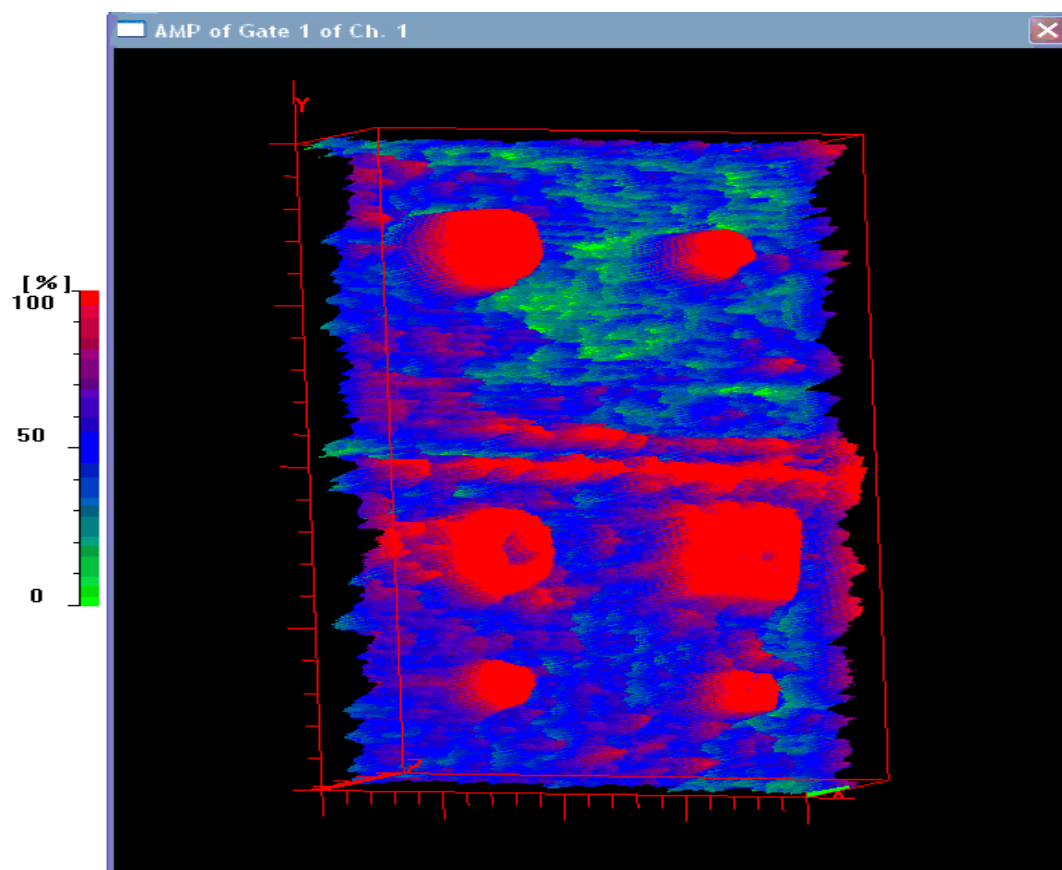


Σχήμα 8.12 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX THRESH.

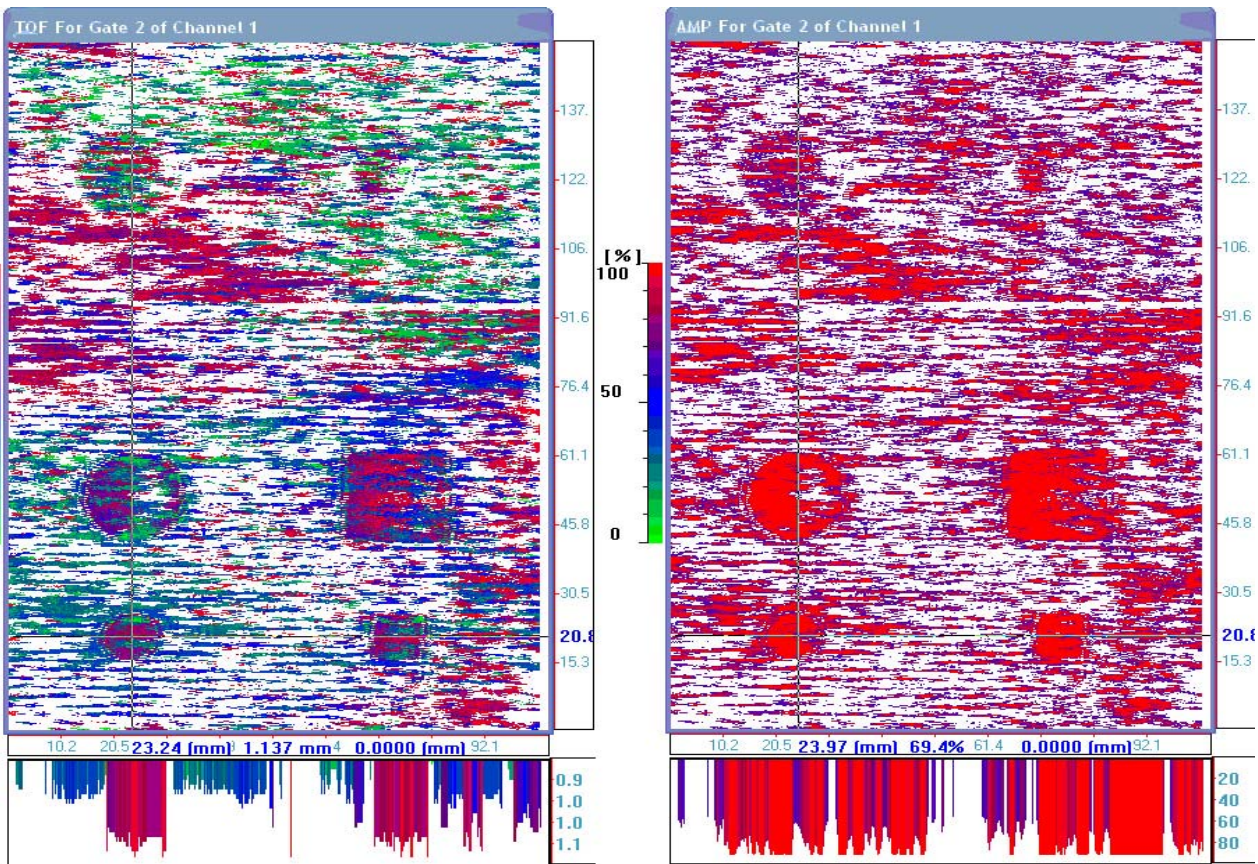
Τέλος παρουσιάζονται στα Σχήματα 8.15 και 8.16 τα C-scan την κεφαλή των 15MHz focused, με τις στρατηγικές Max-Peak και Max-Threshold, όπου τα όρια των ατελειών D1, D2, D3 και D4 διαγράφονται με μεγαλύτερη ευκρίνεια.



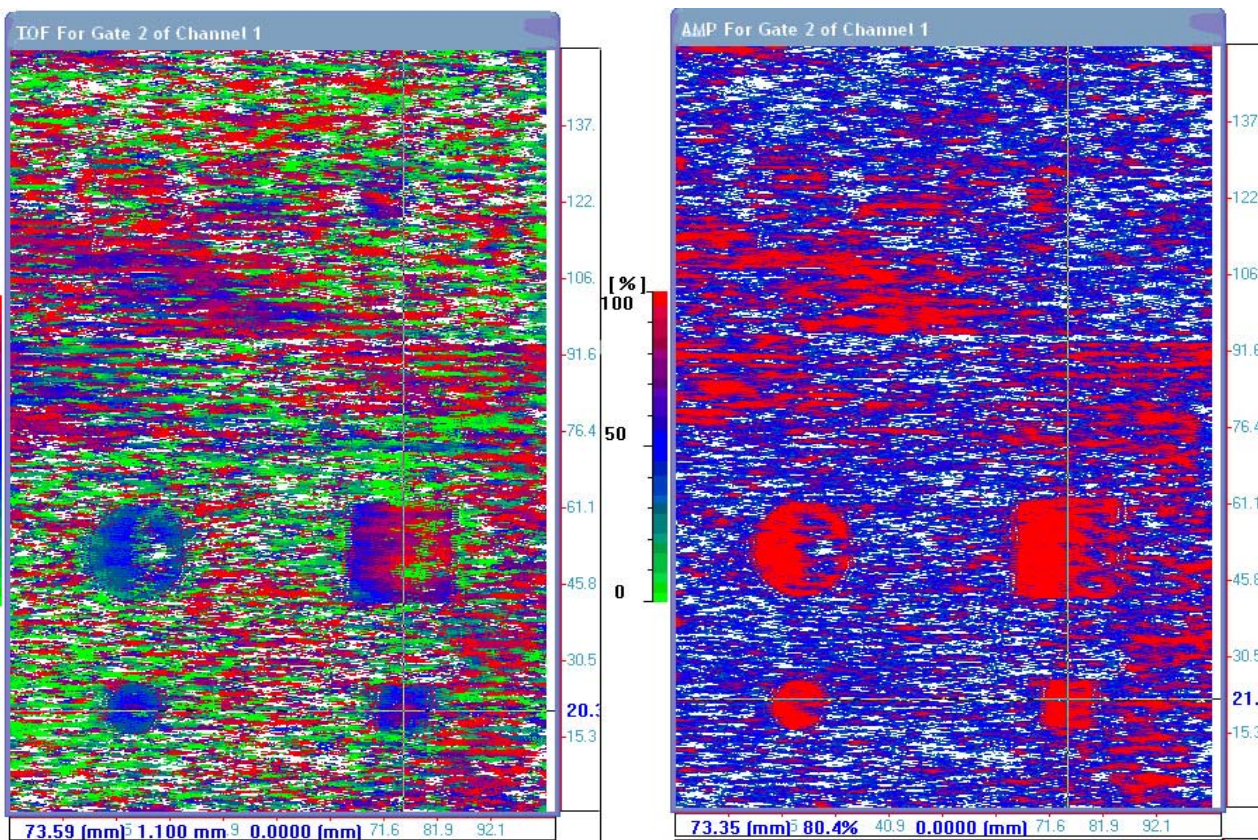
Σχήμα 8.13 : C-scan AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER CLUSTER ANALYSIS



Σχήμα 8.14 :5MHz C-scan 3D TOF CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX PEAK.



Σχήμα 8.15 :15MHz C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX THRESH.



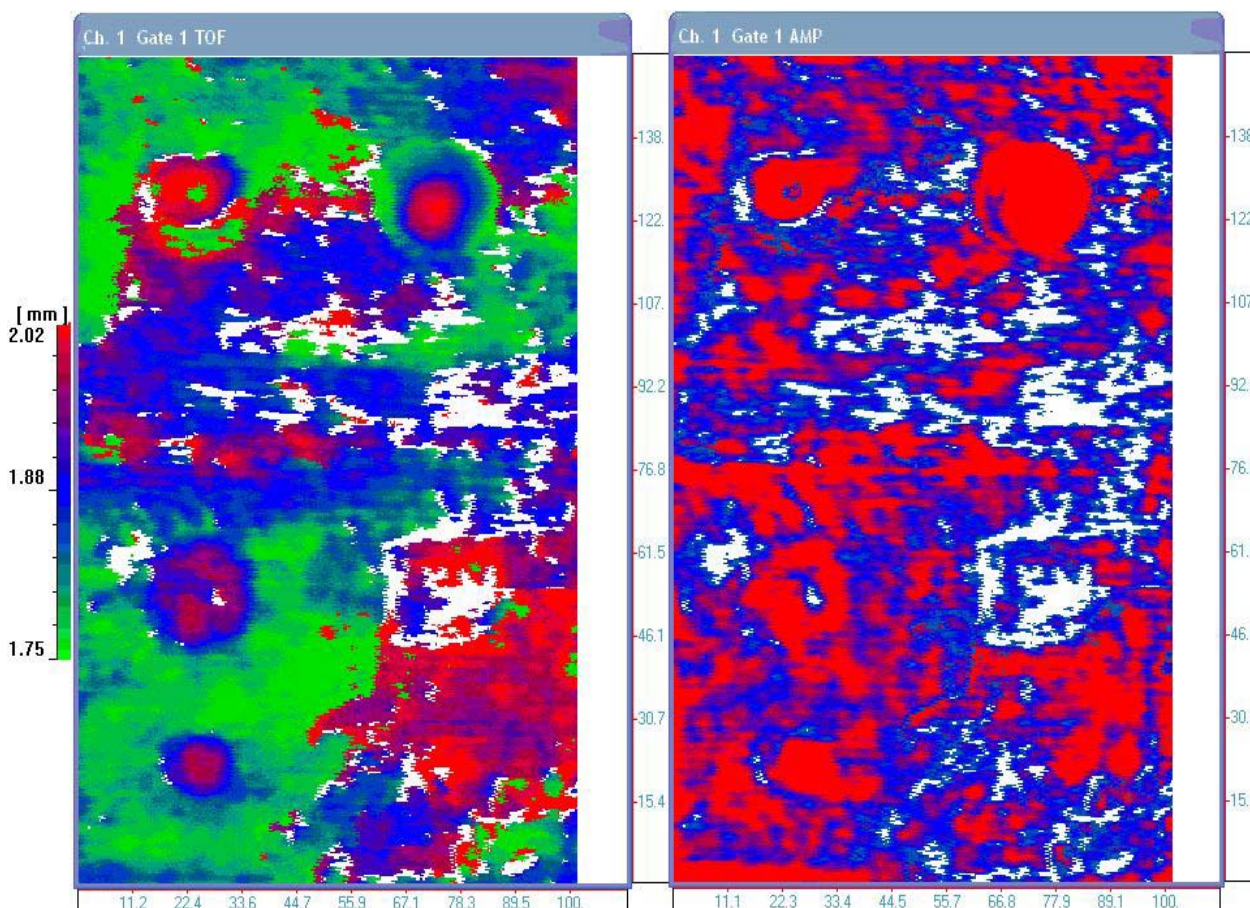
Σχήμα 8.16 :15MHz C-scan TOF-AMP CFRP V-I 4-5TH LAYER MAX PEAK.

8.5 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) 7^η -8^η στρώση

8.5.1 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK

Πίνακας 8.9 : CFRP V-I 7-8TH LAYER FIRST-PEAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I 7-8THLAYERS FIRST PEAK.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	23%	50%	50%	60%
Detection Mode	First, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	30%	42%	50%	60%
Gate Start	1.3 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,33039999			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,33039999			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



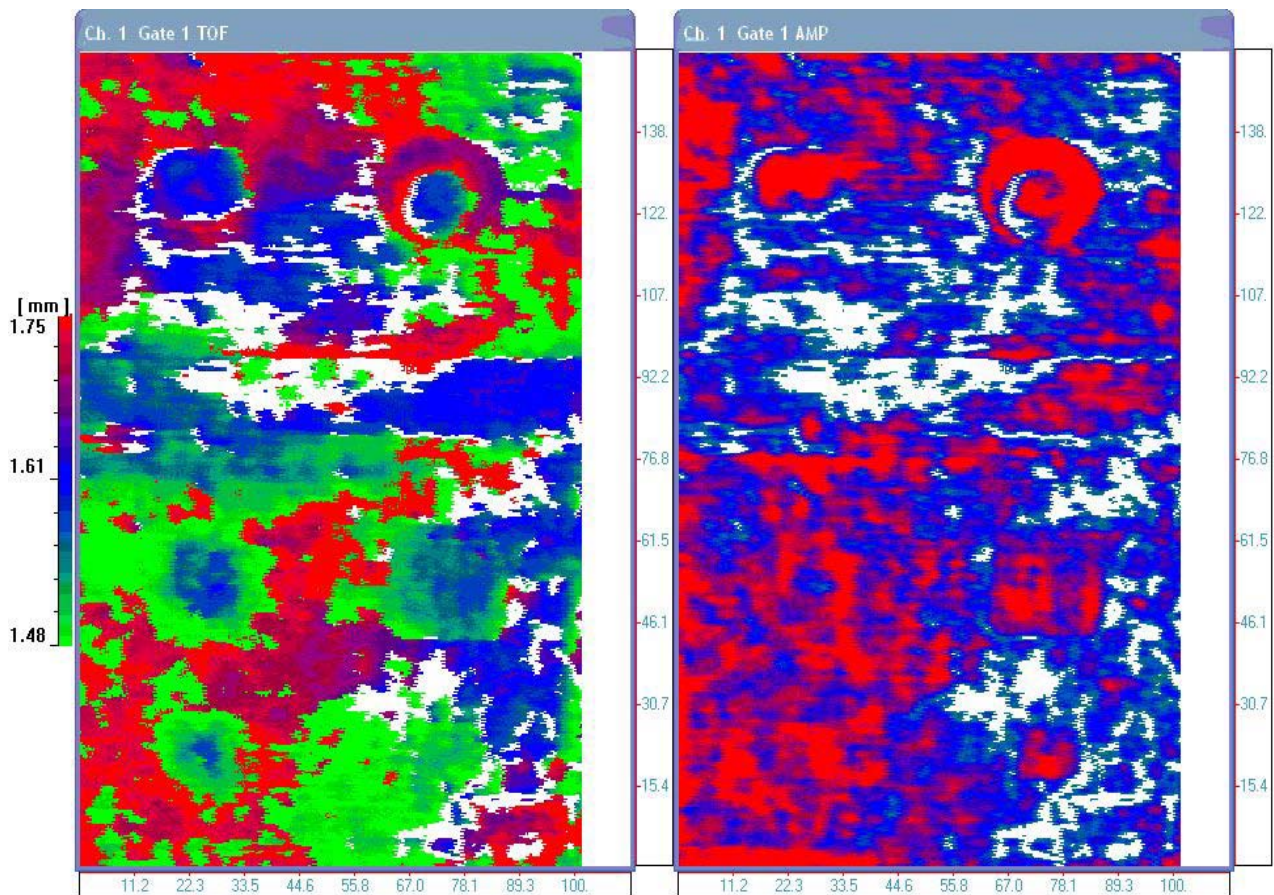
Σχήμα 8.17 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 7-8TH LAYER FIRST-PEAK.

Ο έλεγχος επικεντρώνεται στην ανίχνευση των ατελειών D6 και D8 οι οποίες έχουν τοποθετηθεί μεταξύ της 7^{ης} και 8^{ης} στρώσης. Ξεκινάμε με την στρατηγική First-Peak και θέτουμε το Gate στο 30%FSH. Παρατηρείται καταρχάς ότι η απόσβεση των κυμάτων υπερήχων έχει αυξηθεί καθώς έχει αυξηθεί το βάθος μέσα στο υλικό στο οποίο πραγματοποιείται η ανίχνευση των ατελειών. Οι ατέλειες ανιχνεύονται ικανοποιητικά ξεκινώντας από το AMP scan (Σχήμα 8.17).

Τα όρια της ατέλειας D8 ανιχνεύονται περίπου στο 1.75mm και το κέντρο της ατέλειας ανιχνεύεται κοντά στα 2.02mm. Αυτό υποδηλώνεται από την προοδευτική αλλαγή των αποχρώσεων από την περιφέρεια της ατέλειας προς το κέντρο (πράσινο-μπλέ-κόκκινο). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επίδραση που έχει η τοποθέτηση της ατέλειας D7 σε προηγούμενες στρώσεις και ακριβώς κάτω από την ατέλεια D8. Η ύπαρξη της ατέλειας D7 έχει σαν αποτέλεσμα την καμπύλωση των υπερκείμενων στρώσεων. Η καμπύλωση αυτή μεταφέρεται μέχρι την 7^η-8^η στρώση, με αποτέλεσμα να μετατοπίζει το κέντρο της ατέλειας σε πάχος κοντά στα 2.02mm. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στην ατέλεια D6, μόνο που λόγω του μικρότερου μεγέθους της σε σχέση με την ατέλεια D5 συμπαρασύρεται ολόκληρη σε βάθος κοντά στα 2.02mm. Τέλος τα όρια των ατελειών ανιχνεύονται ικανοποιητικά δεδομένης της απόσβεσης και της υπερκάλυψης των ανακλάσεων από τις υπερκείμενες ατέλειες και στρώσεις. Για την λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί κεφαλή με λιγότερα MHz.

8.5.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK**Πίνακας 8.9 : CFRP V-I 7-8TH LAYER MAX-PEAK.**

Setup Test Information					
Customer					
Test Item	CFRP#V-I				
Test Date					
Inspector					
Project Number					
Scan Segment number					
Scan Segment Description					
Scan Segment Orientation					
Total Number of Points	574740				
Source File Name	CFRP#V-I 7-8TH LAYERS MAX PEAK.dat				
Material velocity	2,691482677				
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR				
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec		
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec		
Sampling Rate	100 MHz		MHz		
Wave Average	0		4		
Scale	1		1		
Display Mode	Positive Rectified		RF		
Trigger Source	Internal Single		Threshold		
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R		
Pulser voltage	380		390		
Damping	2000 ohms		545 ohms		
Filter					
Attenuation					
Gain	17.7 dB		-18 dB		
Energy level	820 pf		820 pf		
Filtering mode	Filter		Wide Band		
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz		
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz		
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2	
Gate Status	On	Off	On	Off	
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse	
Synchronization Threshold	54%	50%	50%	60%	
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak	
Detection Threshold	26%	42%	50%	60%	
Gate Start	1.1 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec	
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec	
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634	
Scanner Settings					
Scan Axis	Y				
Scanning Axis Length	102				
Scanning Axis Resolution	0,33039999				
Scanning Axis Speed	30				
Index Axis	X				
Index Axis Length	153,6515961				
Index Axis Resolution	0,33039999				
Index Axis Speed	20				
Start Position	0				



Σχήμα 8.18 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I 7-8TH LAYER MAX-PEAK.

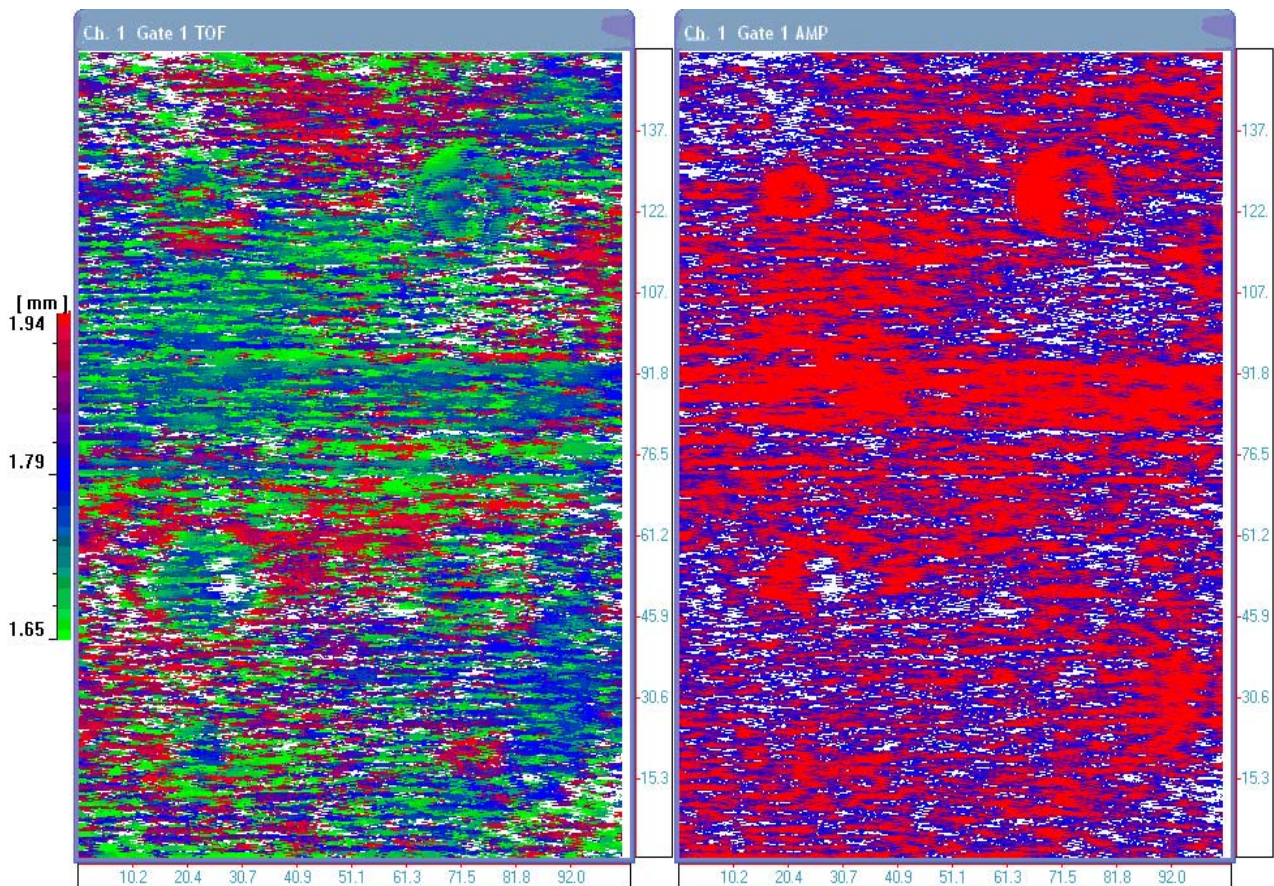
Στην προσπάθεια μας να πιστοποιήσουμε τα ευρήματα της στρατηγικής First-Peak μετακινούμε το Gate να καταγράφει ανακλάσεις από 1.48 έως 1.75mm, στο σημείο δηλαδή που ανιχνεύθηκαν τα όρια της ατέλειας D8. Το C-scan του Σχήματος 8.18 επιβεβαιώνει τα ευρήματα καθώς πάλι τα όρια της ατέλειας D8 εντοπίζονται κοντά στο 1.75mm. Στο εσωτερικό της ατέλειας D8 τώρα καταγράφεται στρώση με μπλε απόχρωση σε πάχος 1.61mm περίπου και η ατέλεια D6 δεν καταγράφεται, πράγμα που είναι αναμενόμενο καθώς βρίσκεται βαθύτερα μέσα στο υλικό.

Οι δύο επόμενες στρατηγικές δεν φανέρωσαν κάποια νέα ευρήματα και για το λόγο αυτό δεν παρατίθενται. Στην συγκεκριμένη στρώση έγινε cluster analysis η οποία όμως δεν έδωσε αποτελέσματα διότι λόγω απόσβεσης, που όπως έχει αναφερθεί είναι αυξημένη λόγω της αύξησης του πάχους, ομαδοποιούνται ανακλάσεις με ίδιο amplitude που προέρχονται και από τις γειτονικές στρώσεις και δεν μπορούν να προσεγγιστούν οι διαστάσεις των ατελειών D6 και D8. Στη συνέχεια παρατίθεται C-scan με την κεφαλή των 15MHz και με την στρατηγική Max-Peak (Σχήμα 8.19) όπου παρατηρούμε ότι η κεφαλή δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει τις ατέλειες καθώς κρύβονται από ισχυρότερες ανακλάσεις που προέρχονται από τις στρώσεις. Παρά ταύτα αρχίζει να φαίνεται, για πρώτη φορά, η παρουσία της τεχνητής πτύχωσης που είχε εισαχθεί στην 6^η στρώση.

8.5.3 ΚΕΦΑΛΗ 15MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Πίνακας 8.10 : CFRP V-I 7-8TH LAYER MAX-PEAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I 15MHZ			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	2108352			
Source File Name	CFRP#V-I 15MHZ 7-8TH MAX PEAK.dat			
Material velocity	2,883488449			
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
Delay	51.88 micro sec		0 micro sec	
Width	6.94 micro sec		6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		100 MHz	
Wave Average	1		1	
Scale	1		1	
Display Mode	Full		RF	
Trigger Source	Internal Single		Internal Single	
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	390		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	20 dB		0 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Wide Band		Wide Band	
Low Pass Filter	30 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	4 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	On	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	30%	27%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Peak	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	42%	40%	50%	60%
Gate Start	1.145833 micro sec	1.145833 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,881588	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	101			
Scanning Axis Resolution	0,242088601			
Scanning Axis Speed	50			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153			
Index Axis Resolution	0,242088601			
Index Axis Speed	25,39999962			
Start Position	0			



Σχήμα 8.19 :15MHz C-scan TOF-AMP CFRP V-I 7-8TH LAYER MAX PEAK.

8.6 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Vacuum Infusion (CFRP-V.I) BACKWALL

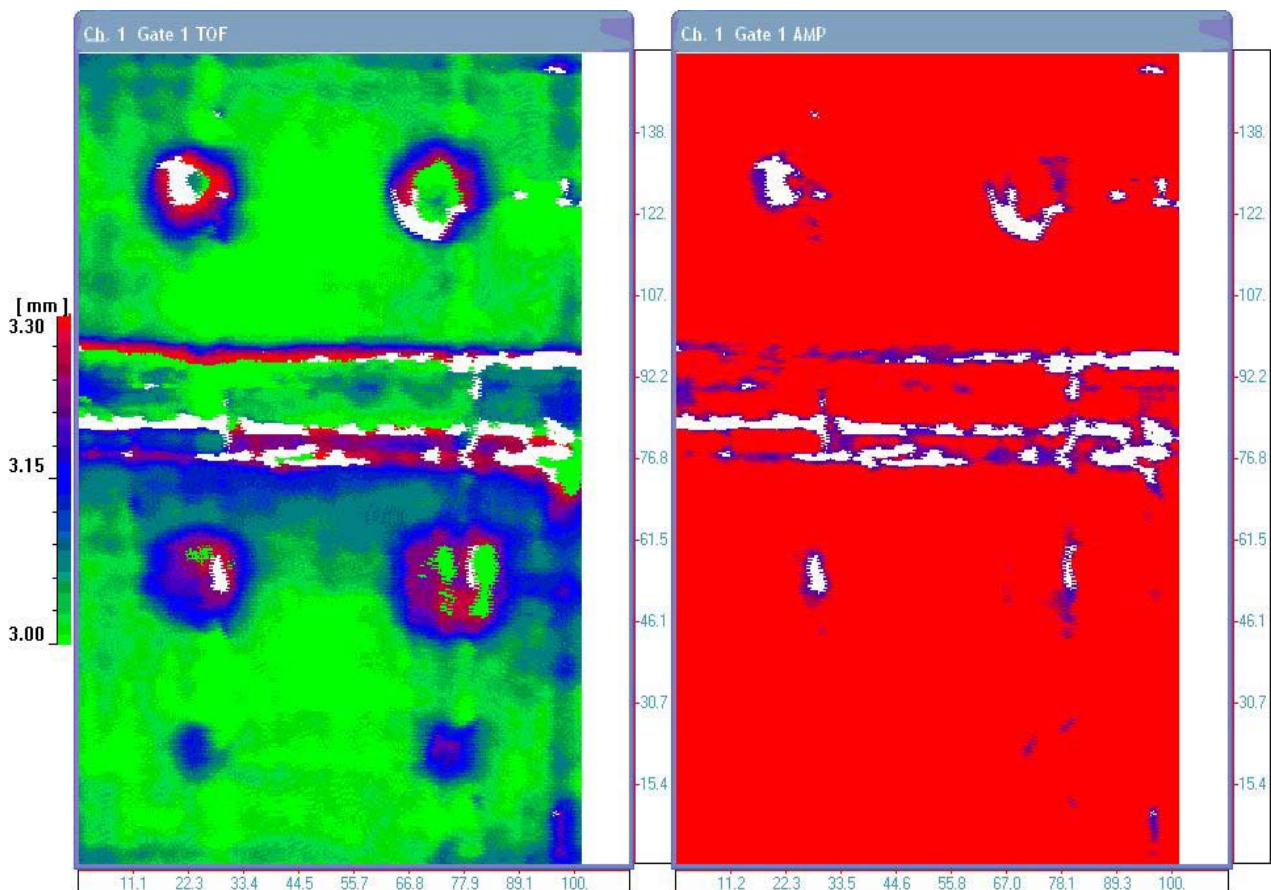
8.6.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Στο σημείο για να ανιχνευτούν οι ατέλειες θα χρησιμοποιηθεί η τεχνική της παρακολούθησης της πίσω επιφάνειας (Backwall echo). Με την τεχνική αυτή θα προσπαθήσουμε να καταγράψουμε τις υπάρχουσες ατέλειες στο σύνολο τους και σαν πρόσθετη εργασία θα προσπαθήσουμε να παχυμετρήσουμε τα δοκίμια. Η παχυμέτρηση θα είναι αυτή που θα επιβεβαιώσει στο σύνολό της την συγκεκριμένη προσπάθεια, καθώς εάν κατά την μέτρηση του πάχους προκύψουν διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που μετρήθηκαν μηχανικά, τότε ο όλος έλεγχος είναι εσφαλμένος διότι σημαίνει ότι έχουμε εισάγει λάθος τιμή της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων υπερήχων στο εξεταζόμενο υλικό.

Με την καταγραφή της πίσω επιφάνειας των δοκιμίων περιμένουμε να καταγραφούν όλες οι ατέλειες στο σύνολο τους. Αυτό που όμως δεν αναμένεται είναι να φανούν οι ατέλειες με την μορφή απώλειας της ηχούς της πίσω επιφάνειας διότι όπως φάνηκε από το έλεγχο που προηγήθηκε οι ατέλειες που τοποθετήθηκαν μέσα στα δοκίμια δεν είναι ισχυροί ανακλαστήρες ικανοί να εμποδίσουν την δέσμη υπερήχων να φτάσει στην πίσω επιφάνεια.

Πίνακας 8.11 : CFRP V-I BACKWALL MAX-PEAK.

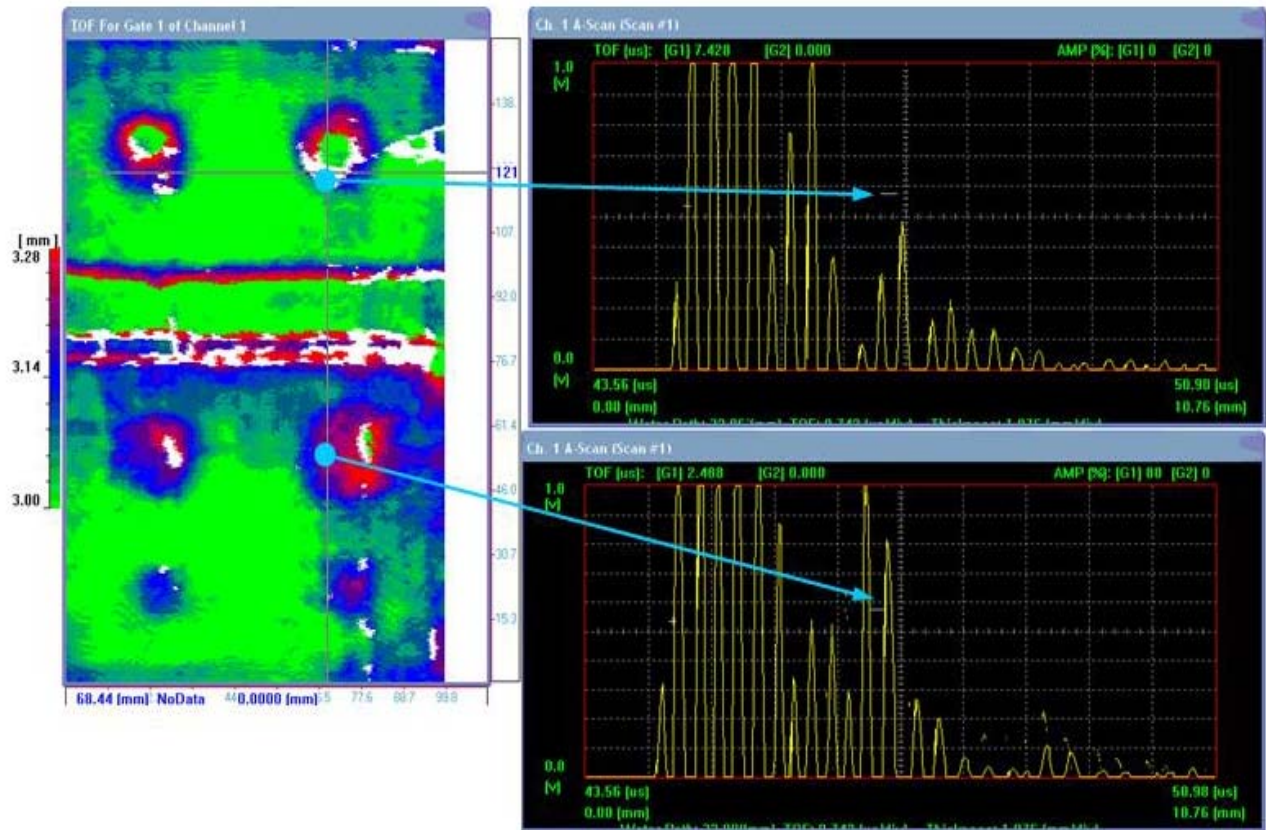
Setup Test Information				
Customer				
Test Item	CFRP#V-I			
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	574740			
Source File Name	CFRP#V-I BACKWALL MAX PEAK.dat			
Material velocity	2,691482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec	
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Positive Rectified		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	17.7 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	45%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	60%	42%	50%	60%
Gate Start	2.230483 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2230483 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	102			
Scanning Axis Resolution	0,330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153,6515961			
Index Axis Resolution	0,330433547			
Index Axis Speed	20			



Σχήμα 8.20 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I BACKWALL MAX-PEAK.

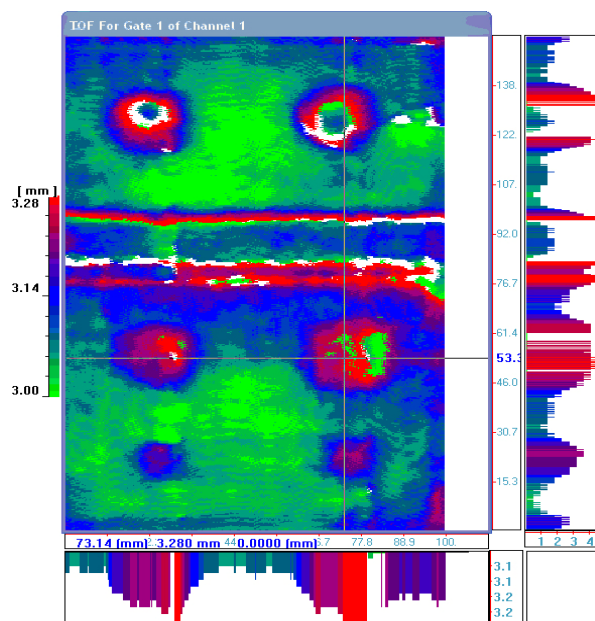
Στο C-scan του Σχήματος 8.20 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εξέταση με την χρήση της στρατηγικής Max-Peak ρυθμίζοντας το detection threshold στο 60%FSH. Φαίνεται ότι το πάχος του δοκιμίου ορθώς μετρήθηκε μηχανικά 3.00mm, καθώς η παχυμέτρηση φανερώνει το μεγαλύτερο μέρος του δοκιμίου με πράσινη απόχρωση. Το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται στα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί οι ατέλειες D1, D2, D3 και D4 κοντά στα 3.20mm και στα σημεία που έχουν τοποθετηθεί οι επικαλυπτόμενες ατέλειες D5, D7 και D6, D8 το πάχος ξεπερνά τα 3.30mm.

Στο παραπάνω C-scan φαίνονται καθαρά τα όρια της πτύχωσης τα οποία είναι και τα μόνα που εμφανίζονται με την απώλεια της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας. Στις επικαλυπτόμενες ατέλειες εμφανίζονται περιοχές no data γεγονός που μπορεί να παραπλανήσει όσο αφορά την σοβαρότητα της υπάρχουσας ατέλειας. Για τον λόγο αυτό παρατίθεται το ίδιο TOF C-scan στο Σχήμα 8.21 με την προσθήκη των A-scan σε δύο σημεία πάνω στο σταυρόνημα. Το ένα σημείο είναι σημείο no data και το άλλο βρίσκεται πάνω στην ατέλεια D4. Διαπιστώνει κανείς ότι στο σημείο no data, η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας έχει απλά μικρότερο amplitude από το detection threshold του Gate σε αντίθεση με το σημείο πάνω στην ατέλεια D4 όπου η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας κόβει το Gate.



Σχήμα 8.21 : C-scan TOF CFRP V-I BACKWALL MAX-PEAK.

Στη συνέχεια παρατίθεται C-scan (Σχήμα 8.22) με την προσθήκη των b και b' scan για να παρατηρήσει ο αναγνώστης την κατανομή της παραμέτρου TOF κατά μήκος του σταυρονήματος στις δύο διαστάσεις του δοκιμίου πάνω από τις ατέλειες.

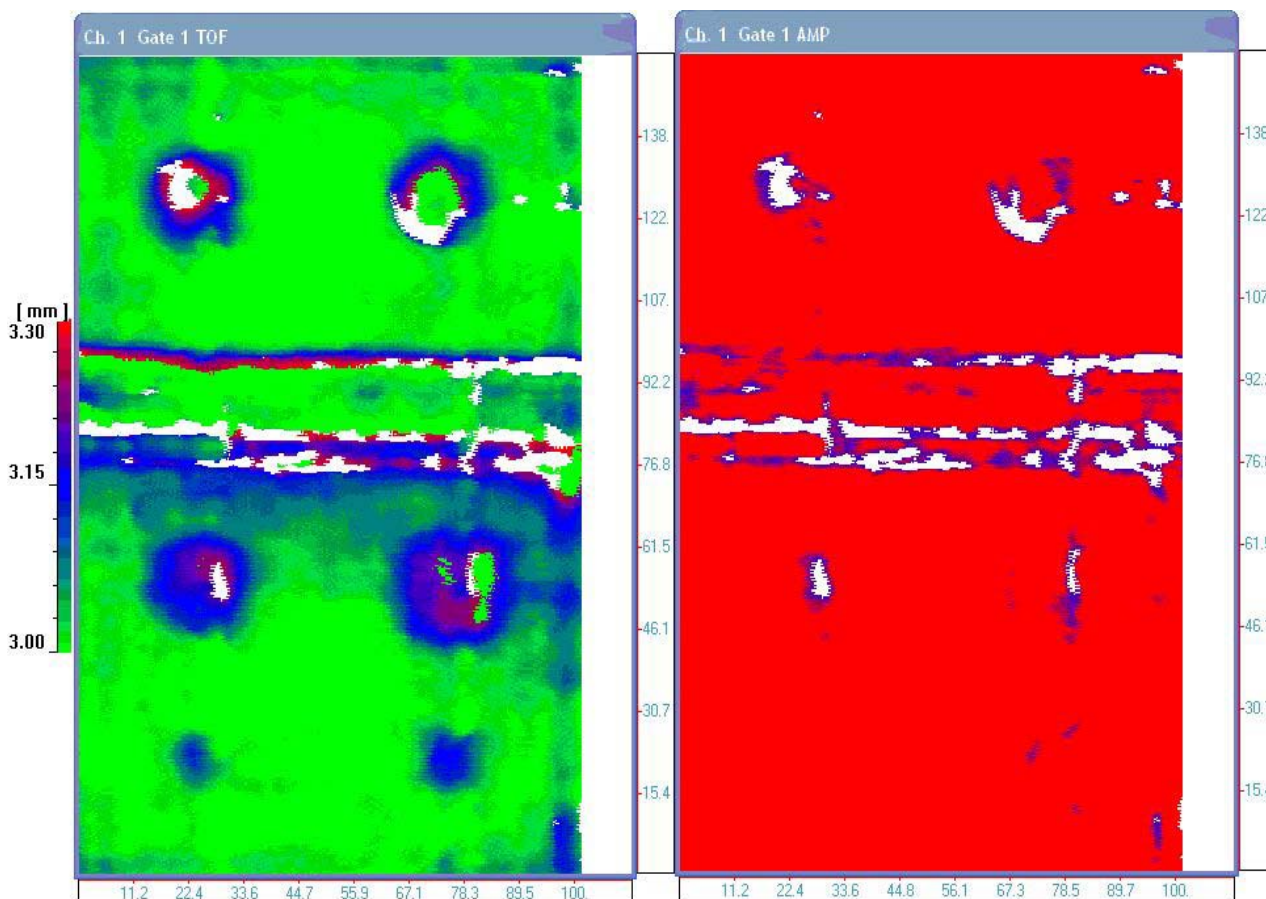


Σχήμα 8.22 : C-scan TOF CFRP V-I BACKWALL MAX-PEAK κατανομή TOF.

8.6.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-THRESH

Πίνακας 8.12 : CFRP V-I BACKWALL MAX-THRESH.

Setup Test Information					
Customer					
Test Item	CFRP#V-I				
Test Date					
Inspector					
Project Number					
Scan Segment number					
Scan Segment Description					
Scan Segment Orientation					
Total Number of Points	574740				
Source File Name	CFRP#V-I BACKWALL MAX THRESHOLD.dat				
Material velocity	2,691482677				
Ultrasonic Parameters		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR				
Analog / Digital Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	42.74 micro sec		0 micro sec		
Width	7.5 micro sec		.6 micro sec		
Sampling Rate	100 MHz		MHz		
Wave Average	0		4		
Scale	1		1		
Display Mode	Positive Rectified		RF		
Trigger Source	Internal Single		Threshold		
Pulser / Receiver Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R		
Pulser voltage	380		390		
Damping	2000 ohms		545 ohms		
Filter					
Attenuation					
Gain	17.7 dB		-18 dB		
Energy level	820 pf		820 pf		
Filtering mode	Filter		Wide Band		
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz		
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz		
Gate Settings		Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2	
Gate Status	On	Off	On	Off	
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse	
Synchronization Threshold	58%	50%	50%	60%	
Detection Mode	Maximum, Threshold	First, Threshold	First, Peak	First, Peak	
Detection Threshold	60%	42%	50%	60%	
Gate Start	2.230483 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec	
Gate Width	.2230483 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec	
Gate Velocity	2,691483	2,701488	5,870634	5,870634	
Scanner Settings					
Scan Axis	Y				
Scanning Axis Length	102				
Scanning Axis Resolution	0,330433547				
Scanning Axis Speed	30				
Index Axis	X				
Index Axis Length	153,6515961				
Index Axis Resolution	0,330433547				
Index Axis Speed	20				
Start Position	0				



Σχήμα 8.23 : C-scan TOF-AMP CFRP V-I BACKWALL MAX-THRESH.

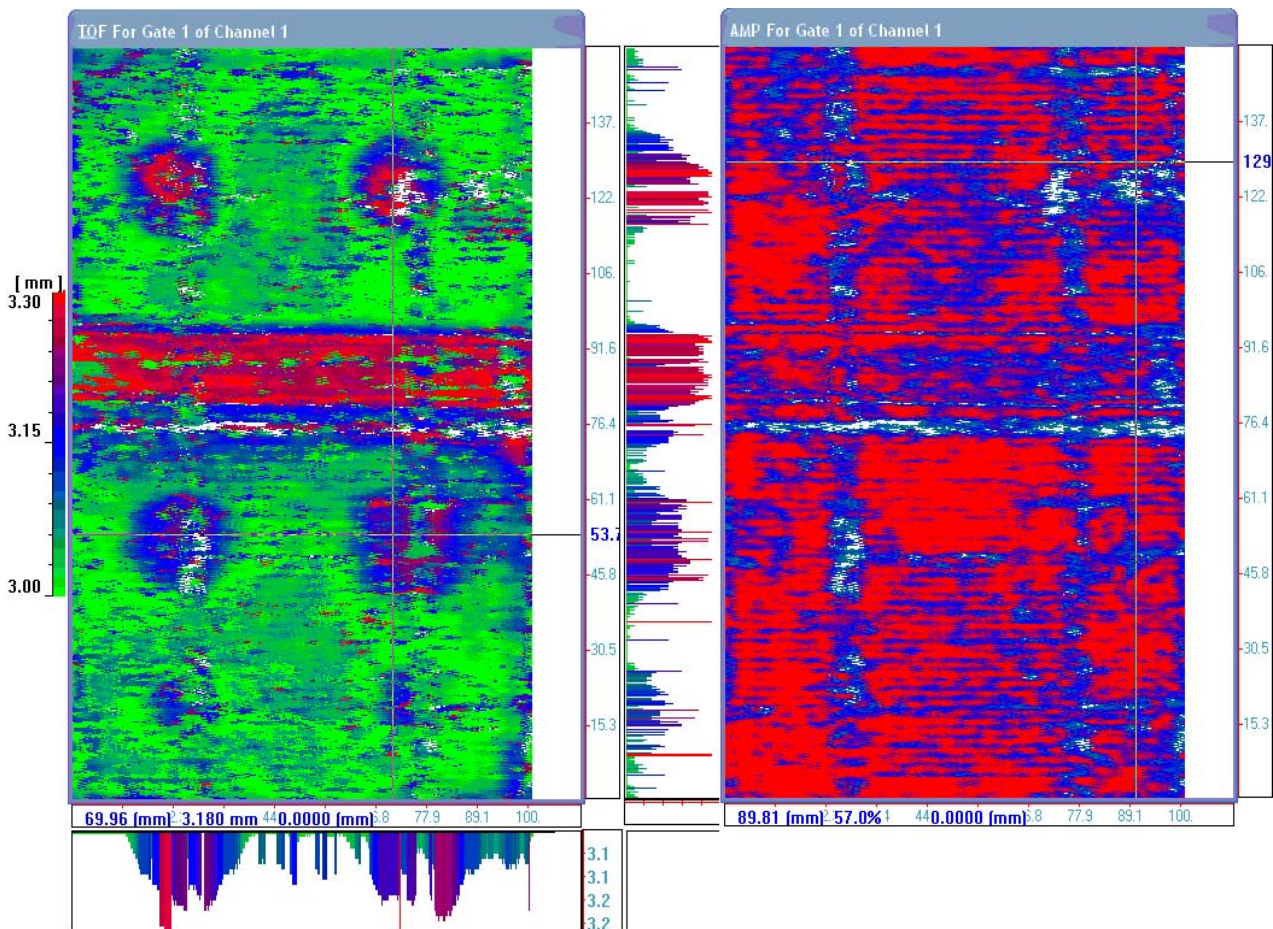
Στο Σχήμα 8.23 παρουσιάζεται το C-scan με την χρήση της στρατηγικής Max-Threshold με σκοπό να καταγράψουμε το TOF στην πρώτη πλευρά της κορυφής της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας για να έχουμε μια παχυμέτρηση με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι στρατηγικές ανίχνευσης First-Peak και First-Threshold δεν παρατίθενται διότι διαπιστώθηκε ότι κατέγραφαν ανακλάσεις πριν από την backwall echo και οδηγούσαν σε εσφαλμένα C-scan με βάση τον έλεγχο που είχε αποφασιστεί να γίνει, δηλαδή να καταγραφεί η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας μόνο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της καταγραφής της ανάκλασης της πίσω επιφάνειας με την χρήση της κεφαλής 15MHz focused (Σχήμα 8.24). Τα ασφαλέστερα αποτελέσματα προέκυψαν και πάλι με την στρατηγική Max-Peak, για τον λόγο που εξηγήθηκε παραπάνω. Η καταγραφή έγινε με χαμηλότερο detection threshold στο 25%FSH, διότι η απόσβεση είναι μεγαλύτερη με την εστιαζόμενη κεφαλή. Η ανάγνωση του παρακάτω C-scan οδηγεί στα παρακάτω συμπεράσματα.

Τα γεωμετρικά όρια της πτύχωσης παρουσιάζονται με μεγάλη ευκρίνεια και το πλάτος που καταγράφεται δεν διαφέρει σημαντικά από το πλάτος της πτύχωσης που δημιουργήθηκε στην 6^η στρώση κατά την κατασκευή. Παρατηρείται ότι το μέγιστο πάχος πάνω στην πτύχωση κατά κύριο λόγο δεν ξεπερνά τα 3.30mm.

Επιπρόσθετα καταγράφεται με αρκετή ακρίβεια ο προσανατολισμός των ινών της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό καταγράφεται και ένα παράδοξο που δεν είχε σχεδιαστεί ώστε να καταγραφεί. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει στο AMP scan δύο γραμμές με μειωμένο amplitude που διατρέχουν το μήκος του δοκιμίου. Η επικρατέστερη εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι η εξής. Κατά την παρασκευή των στρώσεων στην 3^η, 4^η και 7^η στρώση σχεδιάστηκαν πάνω στις στρώσεις αξονικές γραμμές με την χρήση ασημί χρώματος μαρκαδόρου για να γίνει η τοποθέτηση των ατελειών με ακρίβεια. Προφανώς ο μαρκαδόρος περιείχε κάποια ρινίσματα που προκάλεσαν την διασπορά της εστιαζόμενης δέσμης



Σχήμα 8.24 :15MHz C-scan TOF-AMP CFRP V-I BACKWALL MAX PEAK.

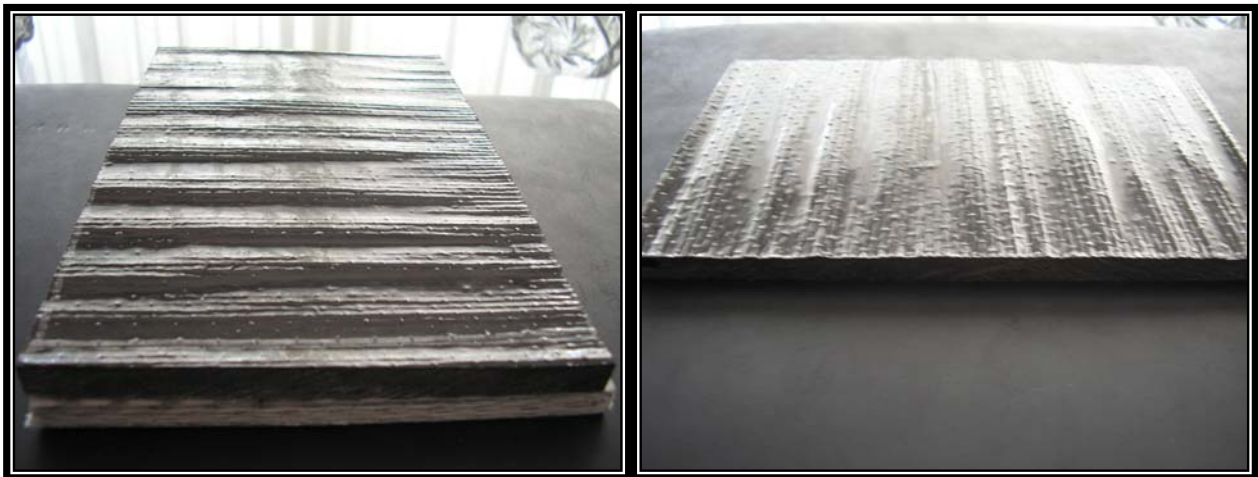
Στη συνέχεια η εξέταση θα προχωρήσει στο δοκίμιο CFRP H-L με σκοπό με τα C-scan που θα παρουσιαστούν γίνουν αντιληπτές οι επιπλέον ατέλειες που εισάγονται λόγω της φθηνότερης και λιγότερο προστατευμένης διαδικασίας κατασκευής (hand layup). Επίσης θα γίνει αντιληπτός ο λόγος που τα C-scan αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή οποιονδήποτε συμπερασμάτων.

8.7 ΔΟΚΙΜΙΟ CARBON EPOXY Hand layup (CFRP-H.L)

8.7.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις

Το δοκίμιο Carbon Epoxy που κατασκευάστηκε με την μέθοδο hand layup παρουσίασε πολλές ατέλειες, οι οποίες παρουσιάστηκαν μετά το πέρας της κατασκευαστικής διαδικασίας. Οι ατέλειες αυτές περιγράφονται παρακάτω και η παρουσία τους δεν επέτρεψε τον έλεγχο του δοκιμίου και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Παρ' όλα αυτά το δοκίμιο σκαναρίστηκε με την διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου με μόνο σκοπό την παρουσίαση των αιτίων που δεν επέτρεψαν τον έλεγχο.

Μετά το τέλος την κατασκευαστικής διαδικασίας η πλάκα έμεινε σε προστατευμένο χώρο για 24 ώρες για να επιτευχθεί η σκλήρυνση της ρητίνης. Η επιφάνεια του δοκιμίου μετά το πέρας της παραπάνω διάρκειας παρουσίασε κυματοειδή μορφή, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 8.25.

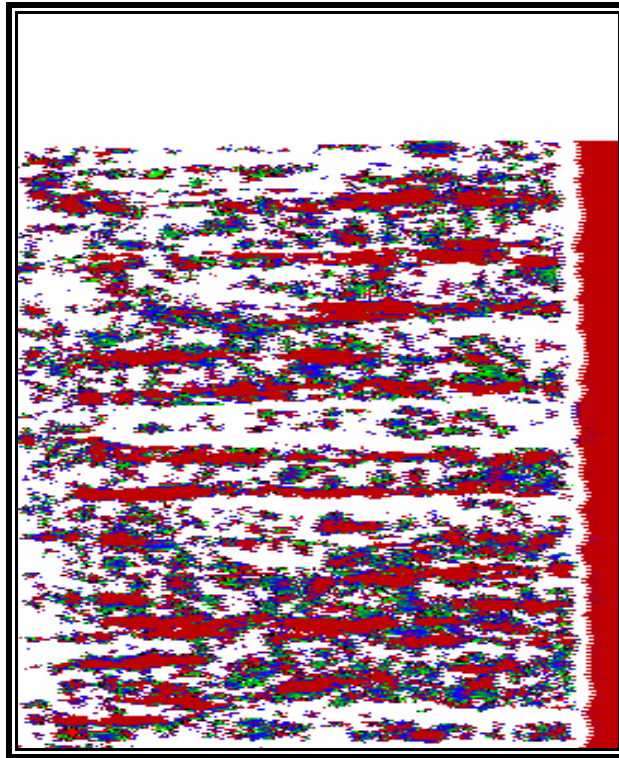


Σχήμα 8.25 : Κυματοειδής επιφάνεια του δοκιμίου CFRP H-L

Η δημιουργία αυτής της κατασκευαστικής ατέλειας αποτέλεσε τον σημαντικότερο παράγοντα για να μην είναι εφικτός ο μη καταστροφικός έλεγχος, για μια σειρά από λόγους. Αρχικά όπως γίνεται αντιληπτό το δοκίμιο δεν έχει σταθερό πάχος. Με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων υπερήχων. Ο παράγοντας αυτός καθιστά τον έλεγχο ανέφικτο.

Εάν κάποιος, λανθασμένα βέβαια, ξεπερνούσε το πρώτο εμπόδιο, θα προσέκρουε πάνω στην αδυναμία στήριξης του εν λόγω δοκιμίου. Το δοκίμιο είναι αδύνατον να στηριχθεί πάνω στις βάσεις στήριξης με την κυματοειδή επιφάνεια, με τέτοιο τρόπο ώστε η πάνω επιφάνεια του δοκιμίου να είναι κάθετη στη δέσμη των υπερήχων. Στην περίπτωση που αυτό ήταν εφικτό με την χρήση ενδεχομένως διαφορετικών βάσεων στήριξης, τότε η πίσω επιφάνεια του δοκιμίου σε ενδεχόμενο έλεγχο θα είχε την τάση να αυξήσει την απόσβεση της δέσμης λόγω διασποράς με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας.

Στην αντίθετη περίπτωση που το δοκίμιο στηριχθεί πάνω στις βάσεις με την λεία επιφάνεια και κάποιος προχωρήσει στον έλεγχο του δοκιμίου θα λάβει το αποτέλεσμα του Σχήματος 8.26.



Σχήμα 8.26 : C-scan κυματοειδούς επιφάνειας του δοκιμίου CFRP H-L

Η κυματοειδής επιφάνεια έρχεται πρώτη σε επαφή με την δέσμη των υπερήχων και στα σημεία όπου δεν έχουμε κάθετη πρόσπτωση, δεν επιστρέφει στην κεφαλή, με αποτέλεσμα την δημιουργία no data περιοχών.

Για τους παραπάνω λόγους το δοκίμιο CFRP H-L δεν εξετάστηκε, καθώς τα αποτελέσματα θα ήταν εκ προοιμίου λανθασμένα. Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η μέθοδος κατασκευής παίζει καθοριστικό ρόλο στην εισαγωγή ή όχι κατασκευαστικών ατελειών.

8.8 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I)

8.8.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις.

Το δοκίμιο GFRP V-I είναι κατασκευασμένο με την μέθοδο έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού. Έτσι οι εξωτερικές του επιφάνειες παρουσιάζουν τα ίδια χαρακτηριστικά με το δοκίμιο CFRP V-I. Η επιφάνεια του δοκιμίου που ήταν σε επαφή με το καλούπι είναι λεία. Αντιθέτως στην επιφάνεια που ήταν σε επαφή με το reel ply έχει και πάλι αποτυπωθεί η πλέξη, δίνοντας στην επιφάνεια τραχύτητα. Κατά τα άλλα το δοκίμιο δεν παρουσίασε καμία άλλη κατασκευαστική ατέλεια, η οποία να παρατηρηθεί κατά την αρχική οπτική επιθεώρηση.

Το πάχος του δοκιμίου μετρήθηκε και πάλι με διακριβομένα μηχανικά μέσα και προέκυψε 5.45mm. Το αυξημένο πάχος μαζί με την χρήση του υφάσματος WOVEN ROVING 400 σε συνδυασμό με την διάθεση από την πλευρά του εργαστηρίου μόνο της κεφαλής των 5MHz δημιουργούσε εξαρχής τις συνθήκες ώστε ο έλεγχος να μην είναι δυνατόν να δώσει τα αποτελέσματα που θα μπορούσαν

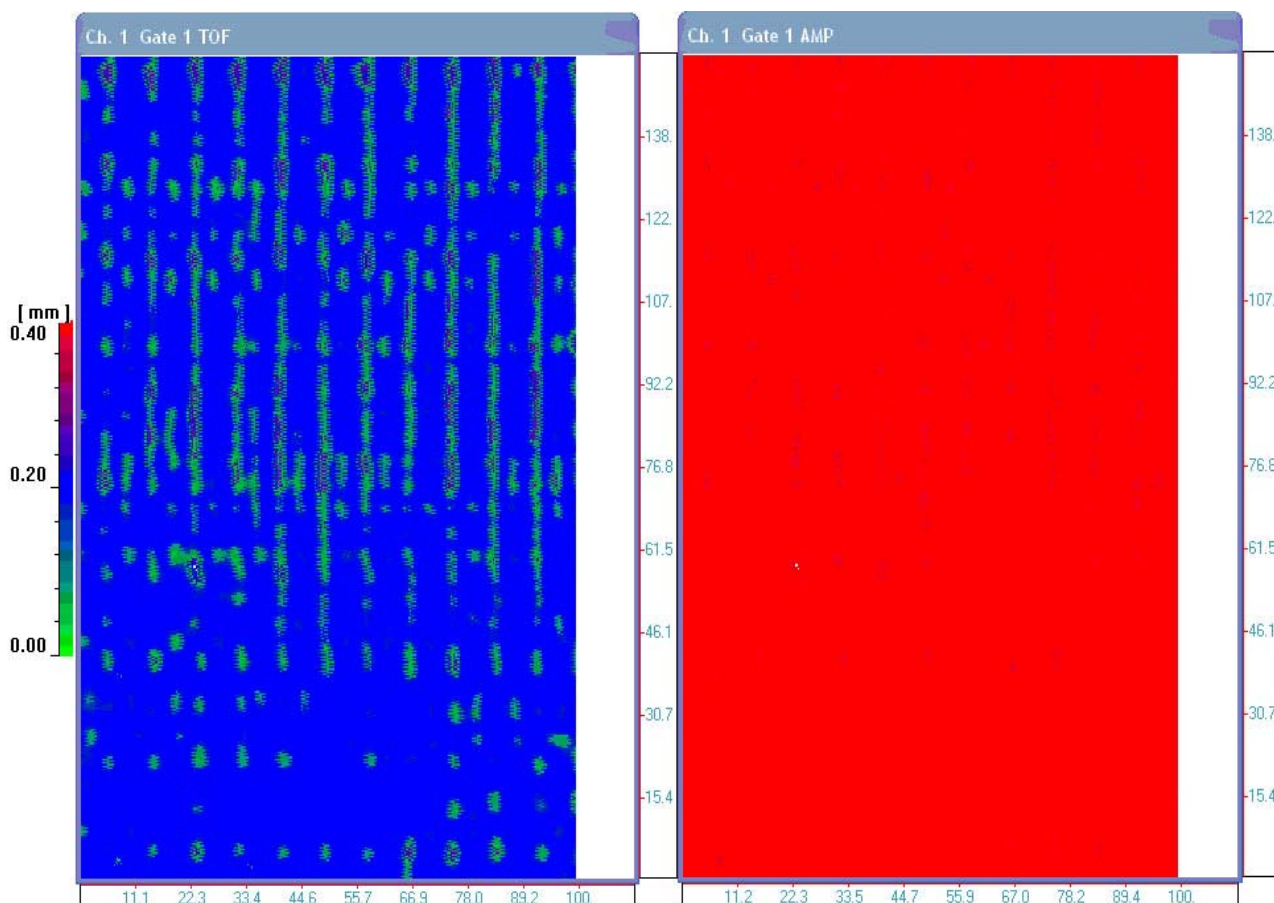
να εξαχθούν υπό διαφορετικές συνθήκες. Ήταν αναμενόμενο ότι λόγω της μεγάλης απόσβεσης που θα παρουσιαζόταν η χρήση μιας κεφαλής με μικρότερη συχνότητα λειτουργίας να είναι επιβεβλημένη.

8.9 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacumm Infusion (GFRP-V.I) FIRST LAYER

8.9.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ FIRST-PEAK

Πίνακας 8.13 : GFRP V-I FIRST LAYER FIRST-REAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item				
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	563580			
Source File Name	GFRP V-I 5MHZ 1ST LAYER FIRST PEAK.dat			
Material velocity	2.791482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	43.3 micro sec		0 micro sec	
Width	8.12 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Full		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	20.3 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	53%	50%	50%	60%
Detection Mode	First, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	91%	42%	50%	60%
Gate Start	0 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.3 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2.691483	2.701488	5.870634	5.870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	100			
Scanning Axis Resolution	0.330433577			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153.6516113			
Index Axis Resolution	0.330433577			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



Σχήμα 8.27 :5MHz C-scan TOF-AMP GFRP V-I 1ST LAYER FIRST-PEAK.

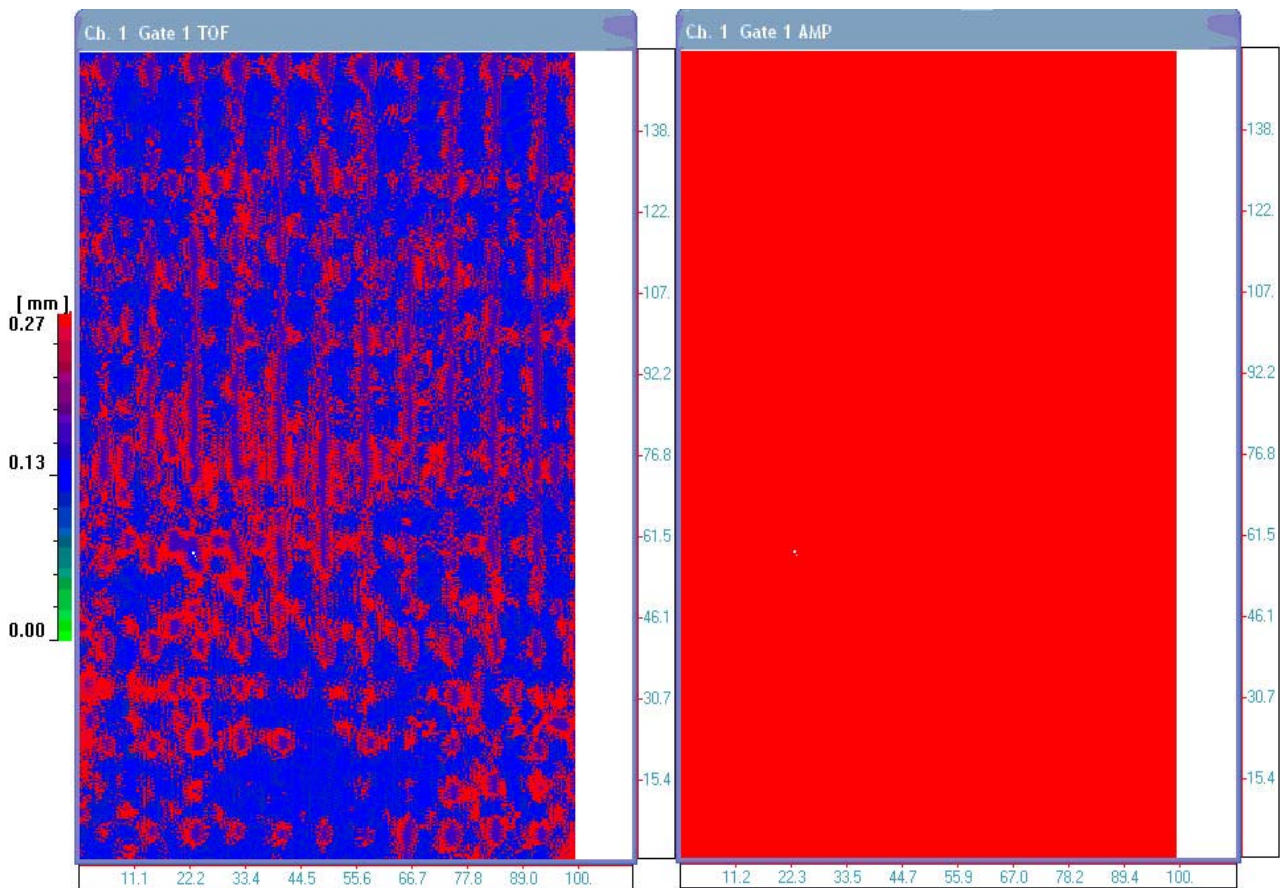
Ο έλεγχος του δοκιμίου ξεκινά με την εξέταση την πρώτης στρώσης. Ο λόγος που παρουσιάζεται η πρώτη στρώση είναι για να φανεί στην συνέχεια πως επηρεάζει η ενίσχυση από ίνες γυαλιού τον έλεγχο με υπερήχους. Το γυαλί όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα παρουσιάζει υψηλή ακουστική αντίσταση και θεωρείται ένας καλός ανακλαστήρας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε και η πλάκα γυαλιού κάτω από το δοκίμια. Οι ίνες γυαλιού, ως ενίσχυση, αναμένεται να παρουσιάζουν μια ανάλογη συμπεριφορά, η οποία θα δημιουργήσει προβλήματα στην ανίχνευση των ατελειών, καθώς λόγω του ότι θα παράγει ισχυρότερες ανακλάσεις θα κρύβει τις ατέλειες που βρίσκονται κάτω από τις στρώσεις.

Έτσι ξεκινώντας το σχολιασμό του Σχήματος 8.27 που δίνει την απεικόνιση του TOF και του AMP της πρώτης στρώσης με την στρατηγική FIRST-PEAK βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα. Το AMP scan ήταν αναμενόμενο να μην δώσει καμία πληροφορία καθώς εξετάζουμε την πρώτη στρώση και η ανάκλαση της έχει υψηλό amplitude. Έτσι δικαιολογείται το απολύτως κόκκινο χρώμα του AMP scan. Στον αντίποδα το TOF scan μας παρουσιάζει την χαρτογράφηση της πάνω επιφάνειας όπου παρατηρείται ότι η ενίσχυση δεν βρίσκεται όλη μέσα στην ρητίνη καθώς οι πράσινες κηλίδες και οι κάθετες γραμμές με πράσινο χρώμα βρίσκονται σε μηδενικό πάχος. Επίσης παρουσιάζεται η κατανομή ινών ρητίνης που όπως παρατηρείται αλλάζει στο κάτω μέρος του δοκιμίου.

8.9.2 ΚΕΦΑΛΗ 5ΜΗΖ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Πίνακας 8.14 : GFRP V-I FIRST LAYER MAX-REAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item				
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	563580			
Source File Name	GFRP V-I 5MHZ 1ST LAYER MAX PEAK.dat			
Material velocity	2.791482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	43.3 micro sec		0 micro sec	
Width	8.12 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	Full		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	20.3 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Filter		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	2 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	53%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	91%	42%	50%	60%
Gate Start	0 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2.691483	2.701488	5.870634	5.870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	100			
Scanning Axis Resolution	0.330433577			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153.6516113			
Index Axis Resolution	0.330433577			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



Σχήμα 8.28 :5MHz C-scan TOF-AMP GFRP V-I 1ST LAYER MAX-PEAK.

Στη συνέχεια με μικρότερο Gate προσπαθούμε να καταγράψουμε την ενίσχυση της πρώτης στρώσης με την στρατηγική MAX-PEAK. Θέλουμε να καταγράψουμε την κατανομή των ισχυρότερων ανακλάσεων στην επιφάνεια του δοκιμίου (Σχήμα 8.28). Με τον τρόπο αυτό καταγράφονται οι μέγιστες ανακλάσεις και φαίνεται ο προσανατολισμός των ινών. Στο σημείο αυτό παρατηρείται ότι οι κόμπι που δημιουργούνται από την πλέξη του υφάσματος (κατω μέρος του δοκιμίου) είναι ισχυροί ανακλαστήρες που στην συνέχεια θα κρύψουν τις ατέλειες.

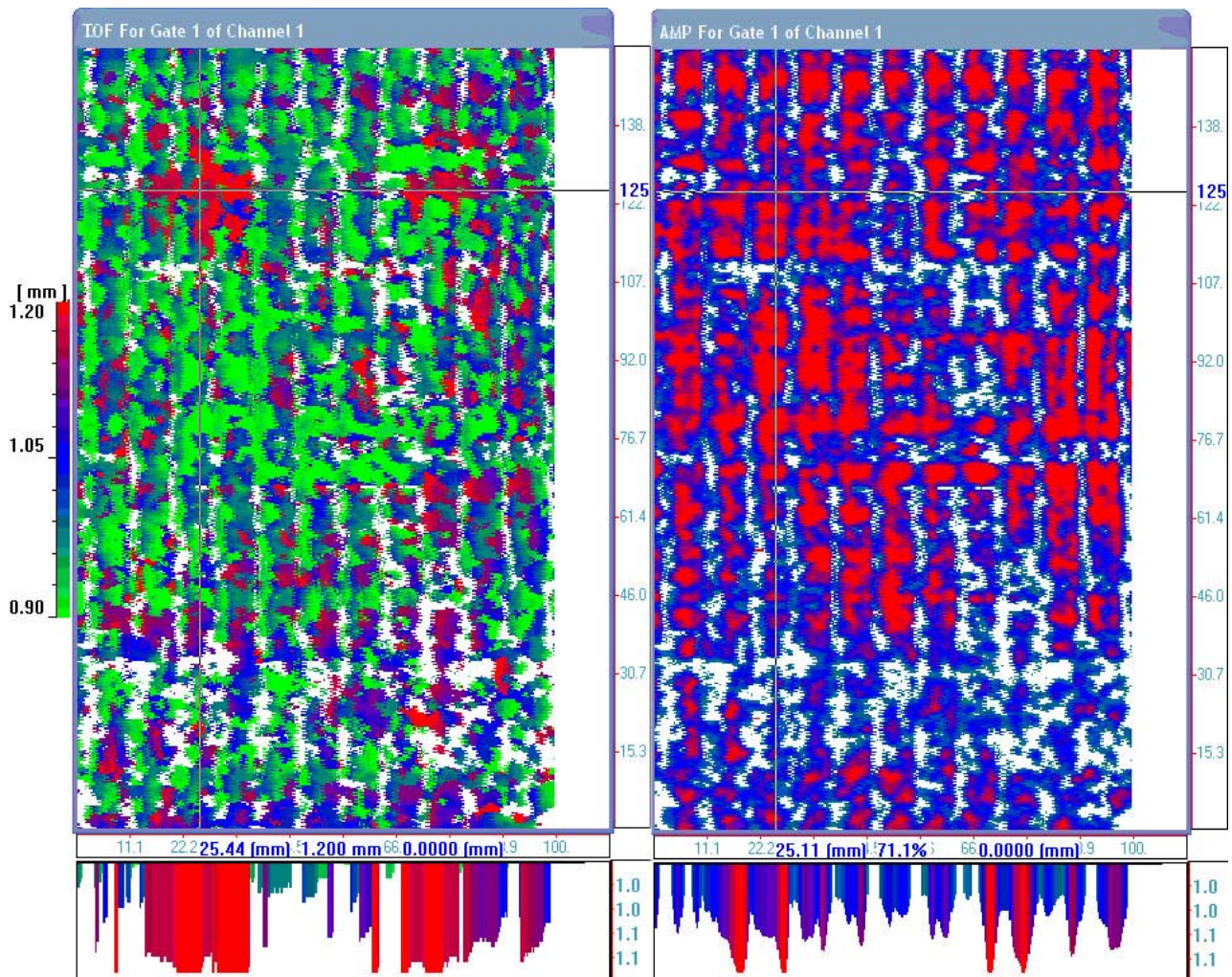
8.10 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacumm Infusion (GFRP-V.I) 3-4th LAYER

8.10.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Η εξέταση συνεχίζεται με την προσπάθεια εντοπισμού των ατελειών μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης. Καμία από τις στρατηγικές που χρησιμοποιήθηκαν δεν μπόρεσε να εντοπίσει την θέση των ατελειών παρά το γεγονός ότι όπως φαίνεται στον πίνακα 8.14 το detection threshold του Gate έχει πέσει στο 26% FSH από την εξέταση μόλις της 3^{ης} στρώσης. Με την στρατηγική Max-Peak που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.29 λαμβάνουμε κάποιες ενδείξεις για την ύπαρξη των ατελειών μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης, οι οποίες εξαγονται μόνο γνωρίζοντας εκ προοιμίου την θέση των ατελειών κατά την κατασκευαστική διαδικασία. Παρουσιάζονται κόκκινες περιοχές στο πάνω μέρος του δοκιμίου οι οποίες διακόπτονται από ανακλάσεις διάφορων χρωματισμών από την ενίσχυση.

Πίνακας 8.15 : GFRP V-I FIRST 3-4th MAX-REAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item				
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	563580			
Source File Name	GFRP V-I 5MHZ 3-4 LAYER MAX PEAK.dat			
Material velocity	2.791482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	45.9 micro sec		0 micro sec	
Width	5.76 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	RF		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	20.3 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Wide Band		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	0.5 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	92%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	26%	42%	50%	60%
Gate Start	.6691449 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.2230483 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2.691483	2.701488	5.870634	5.870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	100			
Scanning Axis Resolution	0.330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153.6515961			
Index Axis Resolution	0.330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			



Σχήμα 8.29 :5MHz C-scan TOF-AMP GFRP V-I 3-4th LAYER MAX-PEAK.

Με τα παραπάνω ευρήματα δεν μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι οι ατέλειες μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} στρώσης έχουν εντοπιστεί. Στο σημείο αυτό αρχίζει να γίνεται απαιτητή η ύπαρξη κεφαλής με μικρότερη συχνότητα λειτουργίας. Αναμένουμε λόγω της προαναφερθείσας αδυναμίας να λάβουμε της ίδιας μορφής αποτελέσματα και στην συνέχεια της προσπάθειάς μας για τον εντοπισμό και των άλλων ατελειών.

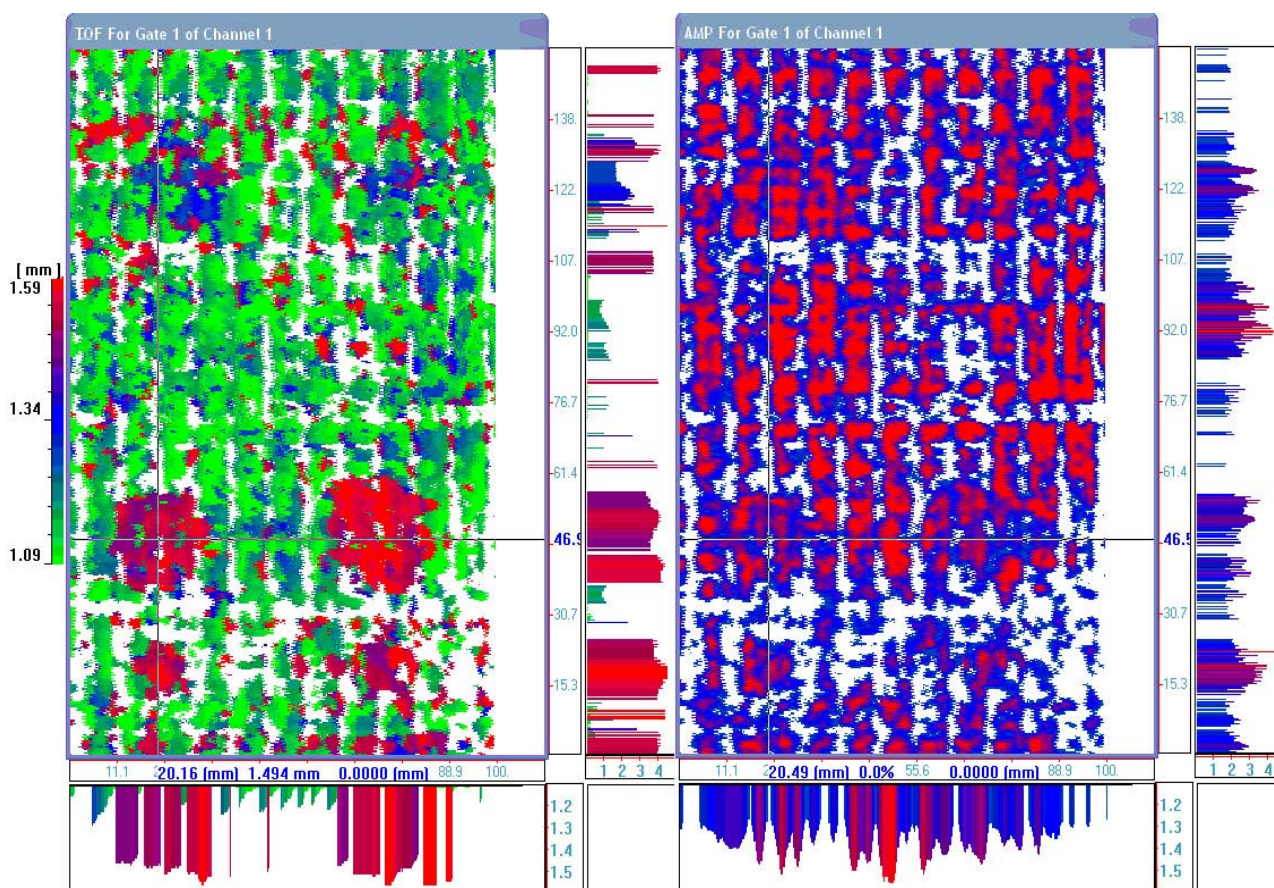
8.11 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Vacuum Infusion (GFRP-V.I) 4-5th LAYER

8.11.1 ΚΕΦΑΛΗ 5MHZ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ MAX-PEAK

Και πάλι μονό η στρατηγική Max-Peak έδωσε κάποια αποτελέσματα τα οποία όπως και προηγουμένως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στο κάτω μέρος του δοκιμίου εμφανίζονται έντονα κόκκινες περιοχές στο TOF scan (Σχήμα 8.30) οι οποίες σε συνάρτηση με το AMP scan φαίνεται να αναπαριστούν σήματα που προέρχονται από το ίδιο πάχος του υλικού των οποίων το amplitude να είναι παρεμφερές με το amplitude των σημάτων που προέρχονται από τις στρώσεις.

Πίνακας 8.16 : GFRP V-I FIRST 4-5th MAX-REAK.

Setup Test Information				
Customer				
Test Item				
Test Date				
Inspector				
Project Number				
Scan Segment number				
Scan Segment Description				
Scan Segment Orientation				
Total Number of Points	563580			
Source File Name	GFRP V-I 5MHZ 4-5 LAYER MAX PEAK.dat			
Material velocity	2.791482677			
Ultrasonic Parameters	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser Type	AD-IPR			
Analog / Digital Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Delay	45.9 micro sec		0 micro sec	
Width	5.76 micro sec		.6 micro sec	
Sampling Rate	100 MHz		MHz	
Wave Average	0		4	
Scale	1		1	
Display Mode	RF		RF	
Trigger Source	Internal Single		Threshold	
Pulser / Receiver Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
Pulser / Receiver Mode	P/R		P/R	
Pulser voltage	380		390	
Damping	2000 ohms		545 ohms	
Filter				
Attenuation				
Gain	20.3 dB		-18 dB	
Energy level	820 pf		820 pf	
Filtering mode	Wide Band		Wide Band	
Low Pass Filter	7.5 MHz		2 MHz	
High Pass Filter	0.5 MHz		0.5 MHz	
Gate Settings	Channel 1: On		Channel 2: Off	
	Gate 1	Gate 2	Gate 1	Gate 2
Gate Status	On	Off	On	Off
Synchronization Mode	First Echo	First Echo	Initial Pulse	Initial Pulse
Synchronization Threshold	46%	50%	50%	60%
Detection Mode	Maximum, Peak	First, Threshold	First, Peak	First, Peak
Detection Threshold	35%	42%	50%	60%
Gate Start	.8104089 micro sec	1.9 micro sec	5 micro sec	7 micro sec
Gate Width	.3717472 micro sec	.2 micro sec	5 micro sec	5 micro sec
Gate Velocity	2.691483	2.701488	5.870634	5.870634
Scanner Settings				
Scan Axis	Y			
Scanning Axis Length	100			
Scanning Axis Resolution	0.330433547			
Scanning Axis Speed	30			
Index Axis	X			
Index Axis Length	153.6515961			
Index Axis Resolution	0.330433547			
Index Axis Speed	20			
Start Position	0			

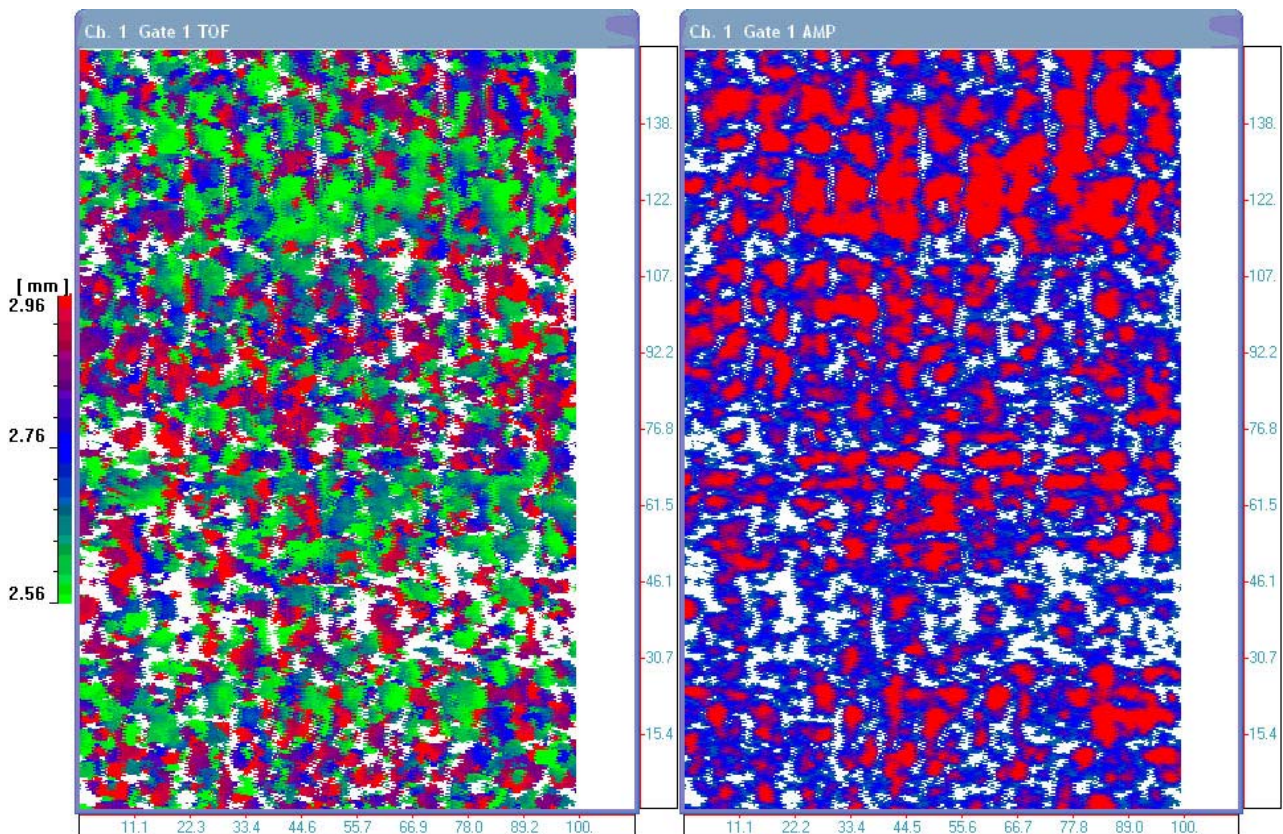


Σχήμα 8.30 :5MHz C-scan TOF-AMP GFRP V-I 4-5th LAYER MAX-PEAK.

Λαμβάνουμε κάποια ένδειξη για την ύπαρξη των ατελειών αλλά δεν είναι δυνατόν να βγεί κάποιο συμπέρασμα για το σχήμα και το μέγεθος των ατελειών.

Ο έλεγχος από το σημείο αυτό και κάτω δεν έδωσε κάποια ευρήματα. Οι ατέλειες που είχαν τοποθετηθεί μεταξύ 7^{ης} και 8^{ης} στρώσης δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστούν με κανέναν συνδυασμό ρυθμίσεων, παρά το γεγονός ότι οι ανακλάσεις που είχαν καταγραφεί από το δοκίμιο είχαν ενισχυθεί και με την χρήση της καμπύλης DAC. Για να γίνουν εμφανή τα παραπάνω παρατίθεται το C-scan με την στρατηγική Max-Peak για την 7^η και 8^η στρώση (Σχήμα 8.31) όπου παρατηρείται η εναλλαγή ανακλάσεων από τις στρώσεις, οι οποίες κρύβουν τις ατέλειες. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι για να ληφθεί το παρακάτω C-scan το detection threshold του Gate ρυθμίστηκε στο 20%FSH γεγονός που όπως έχει αναφερθεί πρέπει να αποφεύγεται διότι οδηγεί στην καταγραφή θορύβου και δευτερευόντων ανακλάσεων (reverberations), οι οποίες εγκλωβίζονται μεταξύ των στρώσεων και αφού ενισχυθούν λόγω του φαινομένου της συμβολής καταγράφονται με την μορφή κορυφών 'φαντασμάτων' μέσα στο τραίνο των ανακλάσεων.

Τέλος η εξέταση του δοκιμίου με την κεφαλή των 15 MHz focused δεν έδωσε αποτελέσματα καθώς λόγω της μεγάλης απόσβεσης δεν έγινε δυνατόν να προσδιοριστεί η ανάκλαση της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου.



Σχήμα 8.31 :5MHz C-scan TOF-AMP GFRP V-I 7-8th LAYER MAX-PEAK.

8.12 ΔΟΚΙΜΙΟ GLASS POLYESTER Hand layup (GFRP-H.L)

8.12.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά-Παρατηρήσεις

Για το δοκίμιο GFRP-H.L η πορεία της εξέτασης λίγο ως πολύ προδιαγράφηκε με την μέτρηση του πάχους του δοκιμίου. Το πάχος του μετρήθηκε και πάλι μηχανικά και προέκυψε 7.49mm γεγονός που ήταν βέβαιο ότι θα οδηγούσε σε αδυναμία ελέγχου λόγω της μεγάλης απόσβεσης με την υπάρχουσα κεφαλή των 5MHz. Πράγματι δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η θέση της πίσω επιφάνειας του δοκιμίου και έτσι ο έλεγχος δεν προχώρησε. Ο έλεγχος θα μπορούσε να συνεχιστεί με την χρήση κεφαλών 2.5 ή 3MHz εφόσον ήταν διαθέσιμες.

8.13 Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό θα γίνει ανακεφαλαίωση της συνολικής προσπάθειας και θα παρατεθούν οι στόχοι που επιτεύχθηκαν. Ταυτοχρόνως θα γίνει μια σύντομη αναφορά των αιτιών που οδήγησαν στην αδυναμία διεξαγωγής ελέγχου κυρίως των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο Hand layup.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παρουσίαση της διαδικασίας που πρέπει να ακολουθείται κατά την εξέταση σύνθετων υλικών για ναυπηγικές εφαρμογές με την χρήση υπερήχων για την ανίχνευση βλαβών. Αρχικά, τα παραπάνω υλικά χαρακτηρίζονται από αυξημένο πάχος που σε συνάρτηση με την ετερογενή τους δομή παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό απόσβεσης της υπερηχητικής δέσμης. Η ετερογενής δομή δημιουργεί ένα ακόμα μεγάλο πρόβλημα κατά τον έλεγχο με υπερήχους. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων υπερήχων αλλάζει για κάθε σύνθετο υλικό ακόμα και αν έχει κατασκευαστεί από τα ίδια ακριβώς υλικά και με την ίδια μέθοδο αν αλλάξει μόνο η διεύθυνση των ινών των στρώσεων. Η διαφορετική αναλογία ινών-ρητίνης αλλάζει επίσης την ταχύτητα διάδοσης. Για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν γενικά πρότυπα αναφοράς για τη βαθμονόμηση των διατάξεων όπως για το αλουμίνιο ή τον χάλυβα. Για κάθε κατασκευή από σύνθετα υλικά θα πρέπει να δημιουργείται το πρότυπο αναφοράς το οποίο θα πρέπει να κατασκευάζεται από τα ίδια υλικά, με την ίδια μέθοδο, εάν είναι δυνατόν από την ίδια ομάδα που κατασκευάζει την κατασκευή και επίσης εάν είναι δυνατόν κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Στο πρότυπο αυτό θα πρέπει να εισάγονται τεχνητές ατέλειες κατάλληλου είδους και μεγέθους σύμφωνα με το είδος και το μέγεθος που θεωρείται κρίσιμο για την ναυπηγική κατασκευή. Στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε η δημιουργία προτύπων με τοποθέτηση στο εσωτερικό των υλικών, υλικού διαφορετικής ακουστικής αντίστασης, με σκοπό την προσομοίωση των αποκολλήσεων στρώσεων. Οι ατέλειες τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές στρώσεις ως προς το πάχος του υλικού με σκοπό να διερευνηθεί η ικανότητα ανίχνευσης της κάθε κεφαλής. Σκοπός του εγχειρήματος αυτού ήταν να αναδειχθεί ο ρόλος του χειριστή στην επιλογή της κατάλληλης κεφαλής για τις ανάγκες κάθε ελέγχου. Επίσης δημιουργήθηκε και επικάλυψη ατελειών για να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατός ο εντοπισμός ως προς το πάχος του υλικού.

Μια διαφορετική προσέγγιση θα ήταν η δημιουργία προτύπων στα όρια των οποίων θα είχαν εμφυτευθεί μεταλλικές σφήνες κατά την κατασκευή. Οι σφήνες αυτές θα αφαιρούνταν μετά την κατασκευή και έτσι θα προέκυπτε η δημιουργία κενού μεταξύ των στρώσεων που θα προσομοίωνε την αποκόλληση των στρώσεων και την ύπαρξη αέρα (φυσαλίδων).

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν η έγχυση ρητίνης υπό συνθήκες κενού και η επίστρωση με το χέρι. Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά κόρον κατά την κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά. Με τη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης υπό συνθήκες κενού, ήταν αναμενόμενο να προκύψουν δοκίμια με μικρότερο πάχος, με καλύτερη αναλογία ινών-ρητίνης

και με λιγότερες κατασκευαστικές ατέλειες σε σχέση με την μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι, γεγονός που επιβεβαιώθηκε και στην πράξη.

Στη συνέχεια άρχισε η εξέταση των δοκιμίων στην διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου ULTRAPAC με την χρήση του λογισμικού ULTRAWIN. Επιλέχθηκε να ξεκινήσει ο έλεγχος με το δοκίμιο CFRP V-I που λόγω του μικρότερου πάχους αναμέναμε να δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα. Στο δοκίμιο αυτό προσδιορίστηκε με ικανοποιητική ακρίβεια η θέση και το σχήμα όλων των ατελειών και υπερεκτιμήθηκε το μέγεθος των ατελειών. Από πολύ νωρίς, η απόσβεση των κυμάτων, ακόμα και στο δοκίμιο με το μικρότερο πάχος, μας ανάγκασε να καταφύγουμε στην χρήση της καμπύλης DAC.

Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν από το συγκεκριμένο δοκίμιο ήταν ικανά να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπο αναφοράς για την εξέταση μιας υποθετικής ναυπηγικής κατασκευής μεγαλύτερων διαστάσεων, κατασκευασμένης με τα ίδια υλικά, με τον ίδιο τρόπο κατασκευής, για την ανίχνευση των ατελειών που είχαν προσομοιωθεί στο δοκίμιο.

Στην αναζήτηση καλύτερων αποτελεσμάτων απευθυνθήκαμε και στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία στο τμήμα σύνθετων υλικών όπου υπήρχε η ίδια διάταξη εμβαπτιζόμενου ελέγχου αλλά με εστιαζόμενη κεφαλή 15MHz. Η προσπάθεια αυτή έφερε αποτελέσματα μόνο στο παραπάνω δοκίμιο καθώς με την αυξημένη ανάλυση καταγράφησαν καλύτερα οι ατέλειες, αλλά η μικρότερη διεισδυτικότητα της, την κατέστησε πρακτικά άχρηστη για τα υπόλοιπα δοκίμια.

Ο έλεγχος συνεχίστηκε στο δοκίμιο GFRP V-I. Η αύξηση του πάχους σε συνδυασμό με την διάθεση μόνο της κεφαλής των 5MHz οδήγησε στον μερικό εντοπισμό των ατελειών. Δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστεί το σχήμα τους και δεν μπορέσαμε να τις διαστασιοποιήσουμε. Εάν κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων υπήρχαν κεφαλές μικρότερης συχνότητας τα αποτελέσματα θα ήταν σαφώς καλύτερα. Η έλλειψη κεφαλών επηρέασε και τον έλεγχο του δοκιμίου GFRP H-L. Το δοκίμιο αυτό είχε το μεγαλύτερο πάχος και με την κεφαλή των 5MHz δεν μπορέσαμε να προσδιορίσουμε την ανάκλαση της πίσω επιφάνειας. Με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να προσδιορίσουμε την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων. Ο έλεγχος του συγκεκριμένου δοκιμίου δεν πραγματοποιήθηκε.

Τέλος στο δοκίμιο CFRP H-L παρουσιάστηκε κατασκευαστική ατέλεια μετά το τέλος της κατασκευαστικής διαδικασίας. Δημιουργήθηκε κυματοειδής επιφάνεια στην επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία είχε σαν αποτέλεσμα την διασπορά της ηχητικής δέσμης, με αποτέλεσμα την αδυναμία καταγραφής σημάτων.

Από την παραπάνω διπλωματική εργασία προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Ο έλεγχος σκαφών από σύνθετα υλικά μπορεί να γίνει αξιόπιστα με την χρήση υπερήχων με την προϋπόθεση ότι υπάρχει το κατάλληλο πρότυπο αναφοράς. Ιδιαίτερα τώρα που οι φορητές συσκευές παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής C-scan απεικονίσεων. Ο εξοπλισμός και ο ρόλος του χειριστή της διάταξης παίζουν καθοριστικό παράγοντα στην αξιοπιστία του ελέγχου. Με την χρήση των υπερήχων μπορούν να εντοπιστούν σχεδόν όλες οι ατέλειες που παρουσιάζονται στα σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία κατά τον έλεγχο τους λόγω της μεγάλης απόσβεσης που παρουσιάζουν.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- [1] ASTROM ,BT(1997) Manufacturing of Polymer Composite Materials.
Chapman and Hall London UK.
- [2] ASM HANDBOOK VOL 21 COMPOSITES
- [3] www.yachtsurvey.com/bad_news_for_Bertram.htm
- [4] www.asnt.org/ndt/primer1.htm
- [5] ASM HANDBOOK VOL 17 Nondestructive Evaluation and Quality Control.
- [6] Ιωάννης .N Πρασιανάκης Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ Μη καταστροφικός έλεγχος των υλικών. Η μέθοδος των υπερήχων. Γ Έκδοση Αθήνα 1993.
- [7] Ultrasonic Testing of Materials 4th Fully Revised Edition j.Krautkramer H.krautkramer.
- [8] ASNT Nondestructive Testing Handbook Second Edition Volume 7 Ultrasonic Testing.
- [9] www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_index.htm
- [10] OLYMPUS PANAMETRICS Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing.
- [11] ASTM Designation: E 1065–99 (Reapproved 2003) Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units.
- [12] ULTRAWIN™ Software USER'S MANUAL Rev 2.58 October, 2002
Part #: 1600 – 1016Associated with: ULTRAWIN□□Software for Windows
Part #: 1600-7003Rev. 2.58 or Higher
Copyright© 2002 NDT Automation, A Division of MISTRAS Holdings Corp.
Princeton, New Jersey, USA Copyright© 2002 NDT Automation, A Division of MISTRAS Holdings Corp.Princeton, New Jersey, USA.
- [13] ASTM Designation: D 5687/D 5687M – 95 (Reapproved 2002) Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation.
- [14] ASTM Designation: E 1901–97 (Reapproved 2003) Standard Guide for Detection and Evaluation of Discontinuities by Contact Pulse-Echo Straight-Beam Ultrasonic Methods.
- [15] ASTM Designation: E 1001–99a Standard Practice for Detection and Evaluation of Discontinuities by the Immersed Pulse-Echo Ultrasonic Method Using Longitudinal Waves.
- [16] ASTM Designation: E 494–95 (Reapproved 2001) Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ