



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
ΣΦΑΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΦΙΑΛΗΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΠΟ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ



ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Γ. ΑΡΦΑΡΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ
ΣΦΑΙΡΟΕΙΔΟΥΣ ΦΙΑΛΗΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΠΟ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ***

ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Γ. ΑΡΦΑΡΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 20/10/2015

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Ε.Χριστοφόρου

Α.Τσετσέκου

Ε.Μητσούλης

Καθηγητής, Ε.Μ.Π

Αν. Καθηγήτρια, Ε.Μ.Π

Καθηγητής, Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου τόσο για την ανάθεση του εν λόγω θέματος όσο και για την άριστη επιστημονική και ηθική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας καθώς και για το κίνητρο το οποίο απέκτησα προκειμένου να ασχοληθώ με τη μελέτη και εφαρμογή των σύνθετων υλικών. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω του καθηγητές κύριο Ε. Μητσούλη και κυρία Α.Τσετσέκου οι οποίοι μέσα από τα μαθήματα που διδάσκουν στον τομέα των υλικών βοήθησαν στην πλήρωση των γνώσεών μου για το θέμα που είχα να αντιμετωπίσω.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό και ιδιαίτερα το τεχνικό τμήμα του τομέα των σύνθετων και προηγμένων υλικών της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας (Ε.Α.Β) για την άριστη συνεργασία και βοήθεια καθώς το δοχείο αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα κατασκευάστηκε στην συγκεκριμένη εταιρεία. Στο πλαίσιο των εταιρειών ευχαριστώ θερμά την εταιρεία Formula total fire protection στην οποία εκπονήθηκαν τα τεστ θραύσης της δεξαμενής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Αναστάσιο Ψαρρό για την συνεισφορά του στη κατασκευή του δοχείου, τον μεταπτυχιακό φοιτητή Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο για τη βοήθειά του στις διορθώσεις της διπλωματικής εργασίας και τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την πολύπλευρη και αμέριστη συμπαράστασή τους και συνεισφορά τους στην μέχρι τώρα πορεία μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται η κατασκευή δοχείου πίεσης σφαιρικής συμμετρίας από ανθρακόνημα και μελετάται το όριο θραύσης αυτού καθώς και η μέγιστη τιμή πίεσης κάτω από την οποία μπορεί να λειτουργήσει. Επιλέχθηκε η υδραυλική δοκιμή πίεσης για μεγαλύτερη ασφάλεια, απ' όπου και αντλήθηκαν τα αποτελέσματα για τις παραπάνω ιδιότητες.

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια εκτενής περιγραφή της θεωρίας των σύνθετων υλικών, του τρόπου κατασκευής τους, προσδιορίζονται οι έννοιες της μήτρας και αναλύονται οι μορφές τους, οι μέθοδοι κατασκευής τους και τέλος οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών.

Στη συνέχεια της διπλωματικής γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών των δοχείων πίεσης όπως το σχήμα τους και καταγράφονται η ασφάλεια που πρέπει να λαμβάνεται καθώς επίσης και το πεδίο εφαρμογής τους.

Στο πρακτικό μέρος, περιγράφονται η διαδικασία και τα στάδια κατασκευής του δοχείου που περιλαμβάνουν κατά σειρά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του καλουπιού, τη μορφοποίηση του σύνθετου υλικού και τέλος την ολοκληρωμένη μορφή του.

Στο τελευταίο μέρος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα από την υδραυλική δοκιμή πίεσης. Περιγράφεται ακόμη η θεωρία της συγκεκριμένης δοκιμής καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

ABSTRACT

This thesis focuses on the construction of a spherical symmetry pressure vessel made of carbon fibers and it aims on the estimation of the tensile strength and the amount of the pressure threshold till which the vessel is functional. For safety reasons, in order to come to conclusions, it was chosen the hydraulic pressure test.

The first part is dedicated on the theory of the composite materials, the way of their construction and especially on the analysis of the various matrix types, their molding and their mechanical properties.

In the second part, the characteristics of the pressure vessels are being analyzed and furthermore, the application field as well as the safety measures are being explained.

The experimental part focuses on the description of the manufacturing procedure of the vessel and more specifically on the mold's 3D design and its construction and the composite material's molding techniques concluding to its final shape.

The last part of this thesis presents the results and the conclusions of the hydraulic pressure test and the theory of this test. In the end future directions are proposed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	vii
ΚΑΡΤΕΛΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	ix
ΚΑΡΤΕΛΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
1 Σύνθετα Υλικά.....	1
1.1 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών	1
1.2 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά.....	2
1.3 Πλεονεκτήματα Σύνθετων υλικών	3
1.4 Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	4
1.5 Εφαρμογές σύνθετων υλικών	4
1.6 Ορισμός (Agarwal-1990).....	10
1.7 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών.....	11
1.7.1 Μήτρα (Matrix).....	11
1.7.2 Μεταλλικές Μήτρες.....	15
1.7.3 Κεραμικές Μήτρες.....	16
1.8 Μέσα Ενίσχυσης	16
1.8.1 Ενίσχυση με Τεμαχίδια	17
1.8.2 Ενίσχυση με Δομή Πολυστρώματος.....	17
1.8.3 Ενίσχυση με Ίνες.....	17
1.9 Μορφή Ινών	19
1.9.1 Ταινίες μίας Διεύθυνσης.....	20
1.10 Τύποι Ινών	24
1.10.1 Ίνες Άνθρακα (Carbon Fibers)	24
1.10.2 Ίνες Γυαλιού(Glass Fibers).....	28
1.10.3 Ίνες Πολυαραμιδίου (Kevlar)	32
1.11 Σύνθετα Στρωματοειδή (Honeycombs).....	33
1.12 Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών.....	34
1.12.1 Αυτόκλειστη Χύτευση (Autoclave Moulding)	35
1.12.2 Χύτευση με Συμπίεση (Compression Moulding).....	36
1.12.3 Μορφοποίηση με Περιέλιξη Νημάτων	37

1.12.4	Χύτευση με Σάκο Πίεσης (Pressure Bag Moulding).....	37
1.12.5	Εμποτισμός με το Χέρι (Hand lay-up)	37
1.12.6	Μορφοποίηση με Εμβάπτιση/ Τραβηχτή διέλαση (Pultrusion).....	38
1.12.7	Χύτευση με Έγχυση Αντιδράσεως (RIM-Reaction Injection Moulding) .	39
1.12.8	Χύτευση με Μεταφορά Ρητίνης (RTM- Resin Transfer Moulding)	40
1.12.9	Μορφοποίηση με Spray.....	40
1.12.10	Μορφοποίηση με Σακούλα Κενού (Vacuum Bag Moulding).....	41
1.12.11	Μορφοποίηση με Έγχυση Κενού (Vacuum Infusion)	42
1.13	Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετων υλικών.....	43
2	Δοχεία Πίεσης	47
2.1	Εισαγωγή	47
2.2	Χαρακτηριστικά Δοχείων πίεσης.....	47
2.2.1	Σχήμα δοχείων.....	47
2.2.2	Δομικά Υλικά.....	48
2.2.3	Σφαιρικό Δοχείο Πίεσης	49
2.2.4	Ασφάλεια	49
2.2.5	Χρήσεις	49
3	Σχεδιασμός και Κατασκευή Δεξαμενής Αποθήκευσης Πεπιεσμένου	
Αέρα.....		51
3.1	Εισαγωγή	51
3.2	CAD-Solidworks	51
3.3	Ιδιότητες Χρησιμοποιούμενου Υλικού.....	54
3.4	Διαδικασία Κατασκευής	57
3.4.1	Προετοιμασία και Κατασκευή καλουπιού.....	57
3.4.2	Διαδικασία lay-up (Στρώσιμο Σύνθετου υλικού)	60
3.4.3	Μορφοποίηση Σύνθετου Υλικού (Autoclave)	64
3.4.4	Διαδικασία Bonding.....	69
3.5	Χαρακτηριστικά Κατασκευής.....	74
4	Διαδικασία Υδραυλικής Δοκιμής της Κατασκευής	75
4.1	Εισαγωγή	75
4.2	Αποτελέσματα Υδραυλικής Δοκιμής.....	75
5	Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα.....	77
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79

ΚΑΡΤΕΛΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Εφαρμογή σύνθετων υλικών σε πολιτικό αεροσκάφος	5
Σχήμα 2: Εφαρμογή σύνθετου υλικού σε καμπίνα αγωνιστικού αυτοκινήτου	6
Σχήμα 3: Εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας από σύνθετα υλικά	6
Σχήμα 4: Εφαρμογή σύνθετου υλικού στην ναυπηγική	7
Σχήμα 5: Σύνθετα υλικά σε ηλεκτρονικές εφαρμογές	7
Σχήμα 6: Δοχείο πίεσης από σύνθετο υλικό	8
Σχήμα 7: Τεχνητό μέλος από σύνθετο υλικό	9
Σχήμα 8: Κατηγορίες σύνθετων υλικών	10
Σχήμα 9: Ταξινόμηση σύνθετων υλικών	11
Σχήμα 11: Τύποι σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες	19
Σχήμα 12: Κατασκευή σχεδόν σύνθετου Ισότροπου	21
Σχήμα 13: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υφάσματος	22
Σχήμα 14: Ίνες άνθρακα	24
Σχήμα 15: Εξαγωνική Γραφιτική Δομή	25
Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ενισχυτικών ινών άνθρακα σε τρία στάδια	26
Σχήμα 17: Ίνες Γυαλιού	28
Σχήμα 18: Δομή άμορφου γυαλιού	29
Σχήμα 19: Διαδικασία παραγωγής υαλονημάτων	31
Σχήμα 20: Ίνες Αραμιδίου	32
Σχήμα 21: Honeycomb	33
Σχήμα 22: Αυτόκλειστος Φούρνος (Autoclave)	36
Σχήμα 23: Διαδικασία Χύτευσης υπό συμπίεση	37
Σχήμα 24: Hand lay-up	38
Σχήμα 25: Pultrition	39
Σχήμα 26: Μορφοποίηση με έγχυση αντιδράσεως	39
Σχήμα 27: Μορφοποίηση με μεταφορά ρητίνης	40
Σχήμα 28: Μορφοποίηση με Spray	41
Σχήμα 29: Vacuum bag	42
Σχήμα 30: Vacuum infusion	43
Σχήμα 31: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σύνθετου υλικού	46
Σχήμα 32: Διάφορα σχήματα δοχείων πίεσης	48
Σχήμα 33: Επιλογή επιπέδου σχεδίασης	52

Σχήμα 34: Σφαίρα χωρίς σχεδιασμό χείλους.....	52
Σχήμα 35: Τελικό σχέδιο κατασκευής.....	53
Σχήμα 36: Τομή και εσωτερικό κατασκευής.....	54
Σχήμα 37: Τύποι θερμικών κύκλων ανάλογα το χρησιμοποιούμενο υλικό	56
Σχήμα 38: Καλούπι κατασκευής.....	58
Σχήμα 39: Αποκολλητικό και καλούπι μετά τη διαδικασία αφαίρεσης του χρώματος.....	59
Σχήμα 40: Ύφασμα κομμένο στις επιθυμητές διαστάσεις	60
Σχήμα 41: Έναρξη διαδικασίας lay-up/ 1η στρώση	62
Σχήμα 42: Χαλύβδινι βάση βαλβίδας	63
Σχήμα 43: Ολοκληρωμένη φάση διαδικασίας lay-up.....	63
Σχήμα 44: Autoclave εταιρείας E.A.B.....	64
Σχήμα 45: Σακούλα vacuum.....	64
Σχήμα 46: Peel ply	65
Σχήμα 47: Release film.....	66
Σχήμα 48: Breather	67
Σχήμα 49: Θερμικός Κύκλος autoclave	68
Σχήμα 50: Curing time/pressure	68
Σχήμα 51: Εσωτερική επιφάνεια κατασκευής (αριστερά), εξωτερική επιφάνεια κατασκευής (δεξιά)	69
Σχήμα 52: Σημεία αναφοράς για την έναρξη της διαδικασίας bonding	70
Σχήμα 53: Εφαρμογή κόλλας στην επιφάνεια του χείλους της κατασκευής.....	71
Σχήμα 54: Επιβολή βάρους για στερεοποίηση της κόλλας πριν την εισαγωγή στον φούρνο	72
Σχήμα 55: Τελική μορφή κατασκευής.....	73
Σχήμα 56: Δοχείο πίεσης συνδεδεμένο με την παροχή αέρα για την επιβολή πίεσης.....	76
Σχήμα 57: Ένδειξη αστοχίας και εμφάνισης πόρου στην κατασκευή.....	77

ΚΑΡΤΕΛΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εφαρμογές σύνθετων υλικών.....	9
Πίνακας 2: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.....	30
Πίνακας 3: Ιδιότητες υλικού μήτρας	55
Πίνακας 4: Πλάνο διαδικασίας επίστρωσης καλουπιού (stacking sequence table).....	61
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Κατασκευής.....	74

1 Σύνθετα Υλικά

1.1 Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών

Ο άνθρωπος άρχισε να χρησιμοποιεί τα σύνθετα υλικά από την αρχαιότητα καθώς έμαθε να ενισχύει τις ιδιότητες των υλικών που έβρισκε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκκαλα) με πρόσθετα συστατικά.

Συγκεκριμένα:

- Το 5000 π.Χ. στην Αίγυπτο, προκειμένου να μειωθούν οι τάσεις συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού, χρησιμοποιούνταν η τεχνική ενίσχυσης των τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο ως προς τη στρέβλωση που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.
- Το 1000 π.Χ. στη Μεσοποταμία για να μειωθεί η επιφανειακή φθορά των πλακιδίων και των πλακών εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος, ενώ αργότερα για την ενίσχυση του οδοστρώματος χρησιμοποιήθηκαν τρίμματα κεραμιδιών.
- Το 1832, πρώτος ο Γάλλος Henri Braconnot, παρασκεύασε νιτρική κυτταρίνη.
- Το 1838, ο Γάλλος χημικός Henri Victor Regnault, παρατήρησε το σχηματισμό στερεής ουσίας από βινυλοχλωρίδιο, μετά από έκθεσή του στο φως.
- Το 1839, ο Charles Goodyear, και μετά από εισήγηση του Άγγλου ερευνητή Thomas Hancock, καθιέρωσε τον βουλκανισμό, διαδικασία στην οποία προστίθεται στο καουτσούκ, θείο, και έτσι το ελαστικό έχει καλύτερες ιδιότητες.
- Το 1870, μετά από συνδυασμένη έρευνα των John Wesley και Isaiah S. Hyatt, παρασκευάστηκε το πρώτο πλαστικό: Η συνθετική κυτταρίνη (celluloid). Η

σύνθεσή της στηρίχθηκε στην πλαστικοποίηση της νιτρικής κυτταρίνης με καμφορά.

- Το 1920 συντέθηκε η πρώτη θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Το σύνθετο αυτό υλικό είναι βασισμένο σε μήτρα πλαστικού και αφορά μίγμα ινών ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη γνωστό και ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Hendrik Baekeland.
- Το 1960 υπήρξε ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου λόγω της έντονης τάσης της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των διαστημοπλοίων.
- Το 1964 άρχισαν να διατίθενται στην αγορά ίνες άνθρακα (carbon fibers) οι οποίες τελευταία χρησιμοποιούνται ως ενισχύσεις ευρύτατα σε αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.
- Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Η ειδική αντοχή (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια, π.χ. η ειδική αντοχή και η ειδική δυσκαμψία των ινών γυαλιού, άνθρακα, αραμιδίου και βορίου έχουν φθάσει στο 10-14πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο).

Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης [1].

1.2 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Η ανάγκη για κατασκευές ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Αυτή η ανάπτυξη επέφερε εξοικονόμηση ενέργειας καθώς αυξήθηκε η αντοχή με ταυτόχρονη μείωση του βάρους. Έτσι, το χαρακτηριστικό μέγεθος των νέων υλικών είναι οι υψηλές τιμές του λόγου αντοχή/βάρος, σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά. Τα νέα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε ένα πλήθος

κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, τα τεχνικά έργα, καθώς επίσης και οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

1.3 Πλεονεκτήματα Σύνθετων υλικών

1. Αντίσταση στη διάβρωση: Τα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα μεταλλικά εμφανίζουν εξαιρετική αντίσταση στην ηλεκτροχημική διάβρωση.
2. Βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες: Τα σύνθετα υλικά κυρίως λόγω των ινών εμφανίζουν μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία.
3. Μεγάλη διάρκεια ζωής: Τα σύνθετα υλικά που έχουν ως μέσο ενίσχυσης ίνες παρουσιάζουν μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγχοπών κι εμποδίζουν τη διάδοση ρωγμών. Σε σύγκριση με τα μέταλλα τα συγκεκριμένα σύνθετα έχουν πολύ υψηλές τιμές στην ανά μονάδα βάρους διάρκεια ζωής σε κόπωση.
4. Μείωση των μερών μίας κατασκευής: Μία κατασκευή που αποτελείται από σύνθετο υλικό απαιτεί ελάχιστο αριθμό τμημάτων λόγω του ότι πρέπει να υπάρχει μεγάλη αξιοπιστία στην κατασκευή (αεροδιαστημικές εφαρμογές). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής της επισκευής και της κατεργασίας.
5. Μείωση των ταλαντώσεων: Οι μηχανικές ταλαντώσεις αποσβένονται λόγω του ότι τα σύνθετα υλικά (τύπου sandwich-honeycomb κυρίως) απορροφούν μεγάλα ποσά ενέργειας.
6. Μείωση βάρους κατασκευής: Έχει παρατηρηθεί ότι σε πολλές εφαρμογές των σύνθετων υλικών μειώνεται το βάρος της κατασκευής κατά 40-80%.
7. Μεγάλη αντοχή στη κρούση: Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε κρουστικά φορτία υψηλής ενέργειας περιορίζοντας έτσι την

καταστροφή της κατασκευής αλλά και διατηρώντας την σε λειτουργικό επίπεδο [2,3].

1.4 Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

1. Ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος: Οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών μειώνονται λόγω βιολογικών παραγόντων, γήρανσης από την απορρόφηση νερού και μηχανικής καταστροφής που οφείλεται στην στατική φόρτιση από την υδροστατική φόρτιση. Τα παραπάνω τέλος δύναται να επηρεάσουν τη ρητίνη με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται η διεπιφάνεια μήτρας και ινών.
2. Ερπυσμός Μήτρας: Ο ερπυσμός της μήτρας είναι σύνηθες φαινόμενο κάτω από συνθήκες υψηλής και συνεχούς φόρτισης.

Τα μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλύτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής [2,3].

1.5 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

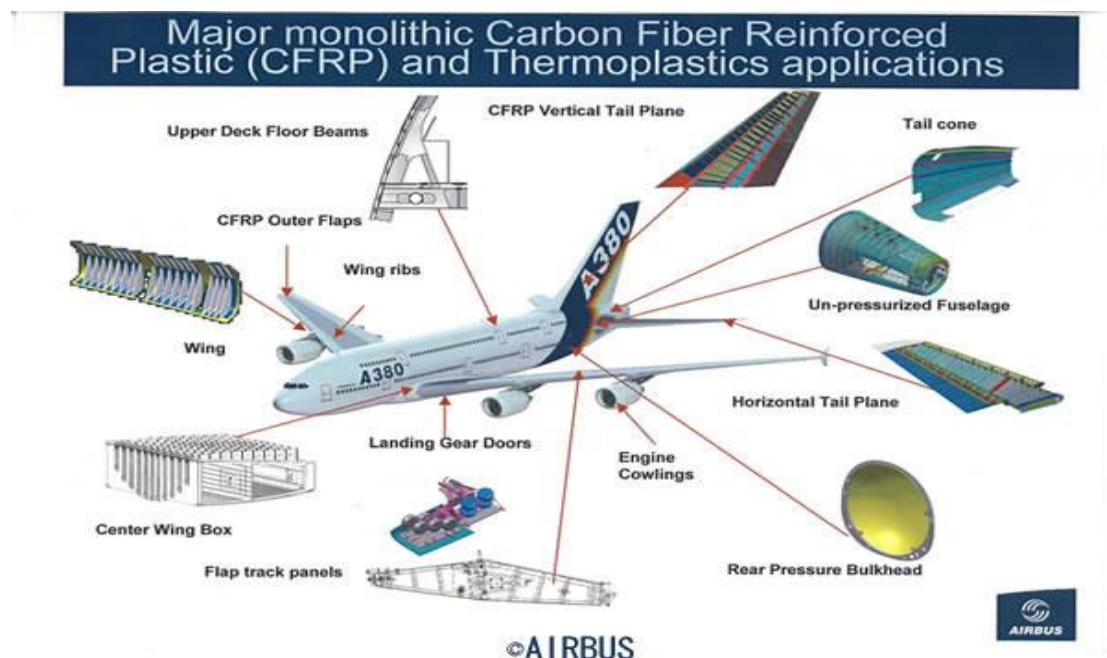
Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης. Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

Ειδικότερα τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε:

Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική: Λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη της τεχνολογίας των νέων υλικών ο κλάδος της αεροναυπηγικής έχει αρχίσει να χρησιμοποιεί τα σύνθετα υλικά. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σύνθετα υλικά παρέχουν στις αντίστοιχες βιομηχανίες κατασκευές ελαφρύτερες και αυξάνουν το ωφέλιμο φορτίο ή μειώνουν το κόστος λειτουργίας για το ίδιο ωφέλιμο φορτίο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το γεγονός ότι πλέον τα περισσότερα αεροσκάφη πολιτικής αεροπορίας είναι κατασκευασμένα με σύνθετο υλικό σε ποσοστό περίπου 50% (Σχήμα.1).

Ιστορικά η χρήση των σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική έχει ως εξής:

- **1950:** Χρήση σε δευτερεύουσες κατασκευές αεροπλάνων και ελικοπτέρων.
- **1960:** Χρήση σε προωθητήρες ρουκετών.
- **1965:** Χρήση σε εκτοξευτήρες πυραύλων.
- **1970-1974:** Χρήση σε πτερύγια και μηχανικά μέρη ελικοπτέρων.
- **1980:** Χρήση σε πηδάλια αεροσκαφών της πολιτικής αεροπορίας.



Σχήμα 1: Εφαρμογή σύνθετων υλικών σε πολιτικό αεροσκάφος (composite.worldpress.com)

Αυτοκινητοβιομηχανία:

Η εκτεταμένη χρήση των σύνθετων υλικών στη βιομηχανία οφείλεται στο γεγονός ότι τα υλικά αυτά παρέχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και καυσίμου λόγω της μείωσης του κόστους και της ελάττωσης του βάρους της κατασκευής. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως στη καμπίνα αγωνιστικών αυτοκινήτων (Σχήμα.2) όπου παρέχουν μεγάλη αντοχή σε τάσεις με ταυτόχρονη μείωση του βάρους αλλά και στη κατασκευή προφυλακτήρων και εξαρτημάτων (Σχήμα.3).



Σχήμα 2: Εφαρμογή σύνθετου υλικού σε καμπίνα αγωνιστικού αυτοκινήτου
(www.automotivemanufacturingsolutions.com)



Σχήμα 3: Εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας από σύνθετα υλικά (kiycarbon.en.made-in-china.com)

Ναυπηγική:

Στη ναυπηγική έχουν αρχίσει τα σύνθετα υλικά με πολυμερή μήτρα κυρίως και ίνες γυαλιού (GRP- glass reinforcement plastics) να αντικαθιστούν τα παραδοσιακά υλικά και να χρησιμοποιούνται από τις βιομηχανίες για την κατασκευή σκαφών αναψυχής αλλά και αγωνιστικών σκαφών (Σχήμα.4). Αυτό συμβαίνει γιατί τα σύνθετα αυτά υλικά παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στη διάβρωση και μείωση του βάρους.



Σχήμα 4: Εφαρμογή σύνθετου υλικού στην ναυπηγική (www.futuna-yachts.com)

Ηλεκτρικές Εφαρμογές:

Η ανάγκη για ηλεκτρική μόνωση οδήγησε στην κατασκευή διαφόρων τύπων γυαλιού με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον e-glass. Αυτού του τύπου οι ίνες εκτός από ηλεκτρική μόνωση, όταν αναμειχθούν με ρητίνη, δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής ηλεκτρικών εξαρτημάτων με πολύπλοκο σχήμα (Σχήμα.5).



Σχήμα 5: Σύνθετα υλικά σε ηλεκτρονικές εφαρμογές (www.bbtsolution.com)

Παραγωγή Δεξαμενών και σωλήνων:

Τα σύνθετα υλικά λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους και της εξαιρετικής αντίστασης που έχουν στη διάβρωση του υλικού χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων. Σε αυτά μπορεί να γίνει αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών και μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων. Μπορεί ακόμα να γίνει αποθήκευση πεπιεσμένων αερίων όπως το υδρογόνο (Σχήμα.6).



Σχήμα 6: Δοχείο πίεσης από σύνθετο υλικό (www.ctgtd.com)

Αθλητικά Είδη:

Η μείωση του βάρους, η αντοχή σε δυσμενείς συνθήκες του περιβάλλοντος και στη διάβρωση οδήγησαν στην κατασκευή αθλητικών ειδών από σύνθετο υλικό. Εδώ χρησιμοποιούνται κυρίως σύνθετα υλικά τύπου sandwich (honeycomb) και CFRP με χαρακτηριστικά παραδείγματα την κατασκευή σκελετών ποδηλάτων, ρακέτες του τένις, χειμερινού και καλοκαιρινού αθλητικού εξοπλισμού κ.α.

Ιατρική:

Η ολοένα και αυξανόμενη τάση για χρήση σύνθετων υλικών σε πολλές εφαρμογές οδήγησε στην ανάπτυξη των βίο-υλικών. Έτσι ο κλάδος της ιατρικής έχει αρχίσει να χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά σε πολλούς τομείς της. Παραδείγματα αποτελούν διάφορα εμφυτεύματα κυρίως στην οδοντιατρική, τεχνητές βαλβίδες και τεχνητά μέλη του σώματος (Σχημα.7).



Σχήμα 7: Τεχνητό μέλος από σύνθετο υλικό (www.amputee.co.za)

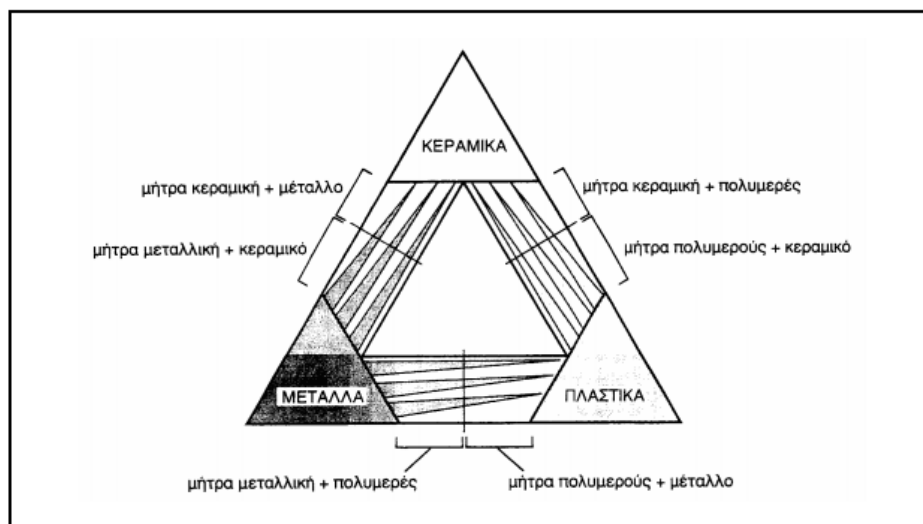
Πίνακας 1: Εφαρμογές σύνθετων υλικών

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
<i>Ναυπηγική</i>	Σκαριά πλοίων, κατάστρωμα, κατάρτια, σταθεροποιητές (stabilizers)
<i>Ιατρική</i>	Γέφυρες δοντιών, βαλβίδες καρδιάς, τεχνητοί δεσμοί
<i>Αυτοκινητοβιομηχανία</i>	Σκελετός αυτοκινήτου, πλαίσιο οργάνων, προφυλακτήρες, αεροτομές, δισκόφρενα, άξονες κ.α.
<i>Αθλητικά Είδη</i>	Μπαστούνια του golf, ρακέτες tennis, χειμερινός και καλοκαιρινός αθλητικός εξοπλισμός (πέδιλα ski, snowboard, wakeboard)
<i>Αεροναυπηγική</i>	Πτερύγια, κεραίες , σκελετός αεροσκάφους
<i>Ηλεκτρικά/ Ηλεκτρονικά είδη</i>	Διακόπτες, μονωτικά υλικά, μικροτσίπ
<i>Οικιακά είδη</i>	Σκάλες, καρέκλες, οροφές, γραφεία
<i>Χημική</i>	Δοχεία υψηλής πίεσης, δεξαμενές

1.6 Ορισμός (Agarwal-1990)

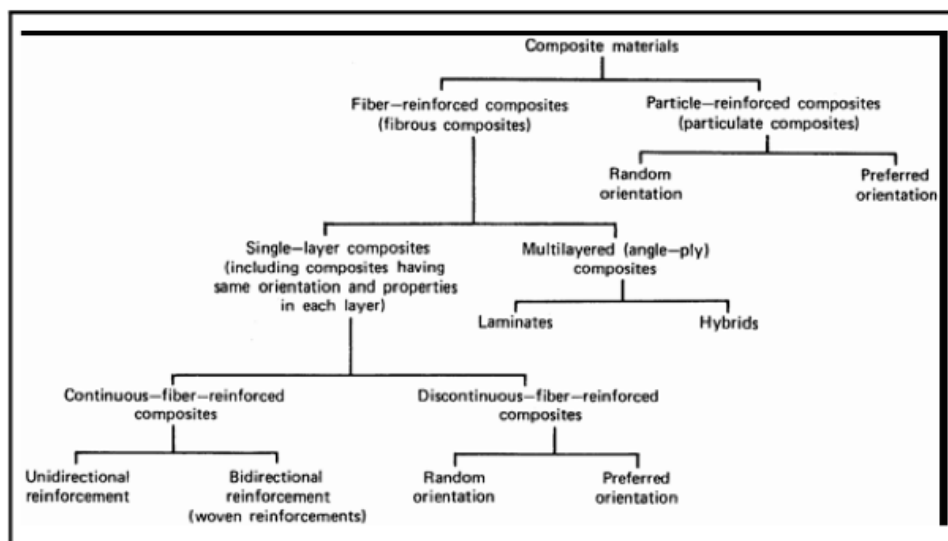
Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους [1].

Τα δύο αυτά συστατικά συνδυάζονται για να επιτευχθούν συγκεκριμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά καθώς από μόνα τους ξεχωριστά δεν μπορούν να τα πετύχουν. Το πρώτο από τα δύο συστατικά προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και ονομάζεται **συστατικό ενίσχυσης**. Το δεύτερο συστατικό ονομάζεται **μήτρα**, είναι χαμηλής πυκνότητας κι εξασφαλίζει στο σύνθετο υλικό τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Για να εντάσσεται ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων θα πρέπει το υλικό αυτό να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον πενταπλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (>10%) [3,4].



Σχήμα 8: Κατηγορίες σύνθετων υλικών [1]

1.7 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών



Σχήμα 9: Ταξινόμηση σύνθετων υλικών [1]

1.7.1 Μήτρα (Matrix)

Τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται ανάλογα με τη φύση της μήτρας σε τρεις κυρίως κατηγορίες:

- Σύνθετα μεταλλικής μήτρας
- Σύνθετα πολυμερικής μήτρας
- Σύνθετα κεραμικής μήτρας

Γενικά ο βασικός ρόλος της μήτρας ως ένα από τα δύο συστατικά του σύνθετου υλικού είναι ότι εξασφαλίζει την υψηλή μηχανική αντοχή αυτού. Ουσιαστικά η μήτρα έχει δύο βασικές λειτουργίες στο σύνθετο υλικό. Από τη μία συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους και τις προστατεύει από τυχόν φθορές και προσβολές που οφείλονται στο περιβάλλον. Από την άλλη έχει τη δυνατότητα να μεταβιβάζει τις μηχανικές τάσεις, που ασκούνται στο σύνθετο υλικό, προς τις ίνες αλλά και να ανακόπτει τη διάδοση ρωγμών που οφείλονται στη θραύση των ινών. Προκειμένου να ικανοποιηθούν τα παραπάνω θα πρέπει η μήτρα να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και το σημείο τήξης της να είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Ανάλογα με τον τύπο της,

η μήτρα επηρεάζει θερμικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες του σύνθετου. Επηρεάζει ακόμα και τη διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση, την αντοχή σε κάμψη καθώς επίσης και τις αντοχές σε εγκάρσια φόρτιση κατά τον εφελκυσμό, την κάμψη και τη θλίψη. Τέλος αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι είναι η ίδια η μήτρα που καθορίζει ουσιαστικά τη θερμοκρασία λειτουργίας και τις παραμέτρους της παραγωγικής διαδικασίας για την κατασκευή του σύνθετου [1], [5-9].

1.7.1.1 Οργανικές Μήτρες

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (PMC) αποτελούνται από ένα πολυμερές ως μήτρα και από ίνες ή κόκκους ως μέσο ενίσχυσης. Τα συγκεκριμένα σύνθετα, λόγω του ότι έχουν καλές ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου, χαμηλό κόστος και παράγονται με ευκολία, χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η ταξινόμησή τους μπορεί να γίνει βάσει του είδους του πολυμερούς που χρησιμοποιείται ως υλικό της μήτρας. Οι τρεις βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται οι οργανικές μήτρες είναι οι α) θερμοσκληρυνόμενες, β) θερμοπλαστικές, γ) ελαστομερείς με πιο διαδεδομένες τις θερμοσκληρυνόμενες [9].

1.7.1.2 Θερμοσκληρυνόμενες Οργανικές Μήτρες

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή έχουν πολύ καλές θερμικές ιδιότητες (υψηλό σημείο τήξης), θερμοσταθερότητα, υψηλή δυσκαμψία, μειωμένη αναφλεξιμότητα και επιφανειακή σκληρότητα. Οι θερμοσκληρυνόμενες οργανικές μήτρες, λόγω του ότι έχουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις για μηχανικές ιδιότητες είναι αυξημένες. Ειδικότερα, οι συγκεκριμένες μήτρες στην τελική φάση επεξεργασίας τους (στάδιο μορφοποίησης του σύνθετου) σχηματίζουν ένα δικτύωμα με την επίδραση της θερμοκρασίας αποτελούμενο από σταυροδεσμούς. Η δημιουργία των σταυροδεσμών ουσιαστικά οφείλεται στην ανάμειξη της ρευστής ρητίνης με τους κατάλληλους σκληρυντές, όπου μετατρέπεται σε σκληρό, άκαμπτο και ψαθυρό στερεό. Στο τελικό προϊόν υπάρχει συνοχή στο πλέγμα καθώς τα μόρια συνδέονται με κύριους δεσμούς εμποδίζοντας έτσι την πλαστική παραμόρφωση και τα φαινόμενα ερπυσμού. Τα σύνθετα υλικά που περιέχουν τις μήτρες αυτές έχουν την ιδιότητα, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, να γίνονται ψαθυρότερα και σκληρότερα λόγω της αύξησης του πλήθους των διαμοριακών δεσμών. Τα θερμοσκληρυνόμενα

πολυμερή, επειδή όταν θερμανθούν πολυμερίζονται και η συγκεκριμένη διαδικασία είναι μη αναστρέψιμη, μορφοποιούνται κατά την πρώτη τους θέρμανση.

Οι θερμοσκληρυνόμενες οργανικές μήτρες μπορεί να είναι:

- **Πολυεστερικές ρητίνες:** Ο πολυεστέρας σχηματίζεται χρησιμοποιώντας ειδικές αλκοόλες όπως η γλυκόζη μαζί με διβασικά οργανικά οξέα και προσθήκη κατάλληλων μονομερών. Οι πολυεστέρες που χρησιμοποιούνται για τα σύνθετα υλικά είναι κυρίως δύο ειδών. Οι χαμηλού κόστους ορθοφθαλικοί πολυεστέρες που χρησιμοποιούνται ευρέως και οι ισοφθαλικοί πολυεστέρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για κατασκευές με υψηλές απαιτήσεις καθώς έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι παχύρευστες και πολυμερίζονται από μόνες τους μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Για να μπορεί να ελεγχθεί ο πολυμερισμός σε σαφή χρονικά πλαίσια προστίθενται καταλύτες, επιταχυντές και αναστολείς. Ο ρόλος των καταλυτών είναι η έναρξη της διαδικασίας του πολυμερισμού και προστίθενται πριν τη χρησιμοποίηση της ρητίνης. Η προσθήκη του επιταχυντή και του αναστολέα γίνεται για την επιτάχυνση και την επιβράδυνση της διαδικασίας του πολυμερισμού αντίστοιχα. Τέλος η αντίδραση του πολυμερισμού είναι εξώθερμη και χρειάζεται προσοχή στο ποσό της θερμότητας που εκλύεται για να μην θραυστεί το υλικό. Για την αποφυγή αυτού πρέπει να ελέγχεται το πάχος του υλικού.
- **Εποξειδικές (εποξικές) ρητίνες:** Οι εποξικές ρητίνες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα άλλα είδη ρητινών και παρουσιάζουν πολύ υψηλή απόδοση. Λόγω του ότι έχουν άριστες κολλητικές ιδιότητες και εξαιρετική αντίσταση στο νερό βρίσκουν εφαρμογή στην αεροναυπηγική σαν κύριο υλικό αλλά και σαν gel-coat. Έχουν ακόμη υψηλή αντίσταση στα χημικά και μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Οι εποξικές ρητίνες επίσης ελαχιστοποιούν τις εσωτερικές τάσεις στο υλικό επειδή παρουσιάζουν πολύ μικρή συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνση. Για τον πολυμερισμό τους δεν χρησιμοποιείται καταλύτης, όπως στις υπόλοιπες ρητίνες, αλλά σκληρυντής ο οποίος είναι συνήθως κάποια αμίνη. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 200°C. Τέλος οι εποξικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλότερο κόστος σε σχέση με τους πολυεστέρες το οποίο μπορεί να είναι από δύο έως δεκαπέντε φορές μεγαλύτερο ανάλογα το πόσο ειδική είναι η ρητίνη.

- **Φαινολικές ρητίνες:** Οι φαινολικές ρητίνες χρησιμοποιούνται κυρίως σε προϊόντα που προέρχονται από καλούπια όπως μέρη αεροπλάνων, ηλεκτρικά κυκλώματα, επικαλυπτικά κ.α. Πρόκειται για ομάδα ρητινών που σχηματίζεται από την αντίδραση φαινολών και φορμαλδεϋδών με γνωστότερη μορφή τον βακελίτη. Οι φαινολικές ρητίνες βρίσκουν εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία καθώς παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη θερμότητα και στην τριβή. Έχουν όμως μέτριες μηχανικές ιδιότητες και χαμηλή πλαστικότητα. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C [6], [9-10].

1.7.1.3 Θερμοπλαστικές Οργανικές Μήτρες

Θερμοπλαστικά είναι τα πολυμερή υλικά τα οποία υπό την επίδραση θερμότητας και πίεσης καθίστανται εύπλαστα και ρέουν. Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες οι οποίες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals και λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή διαδικασία καθιστώντας έτσι το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει διότι ανάμεσα στα μακρομόρια των θερμοπλαστικών πολυμερών δεν υπάρχουν δεσμοί με αποτέλεσμα όταν αυξάνεται η θερμοκρασία να αυξάνεται και η κινητικότητα των μακρομορίων σε ανεξαρτησία κινήσεων του ενός μακρομορίου με το άλλο. Τα περισσότερα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούση (High Impact Polystyrene-HIPS), το πολυ-μεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυαιθυλένιο (PE). Τα σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική οργανική μήτρα έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Παρουσιάζουν συγκεκριμένα μεγάλες ενέργειες θραύσης, μεγάλη αντοχή και ακαμψία που οφείλεται στις ιδιότητες των μονομερών τους και στο μεγάλο μοριακό τους βάρος. Το κύριο μειονέκτημα των συγκεκριμένων μητρών είναι το υψηλό ιξώδες που δυσκολεύει τον εμποτισμό των δεσμίδων των ινών. Έχουν όμως και πολλά πλεονεκτήματα εκτός από καλές μηχανικές ιδιότητες. Μπορεί να γίνει γρήγορη παρασκευή τελικού προϊόντος η οποία μάλιστα είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον καθώς ο πολυμερισμός γίνεται στο εργοστάσιο παραγωγής όπου οι συνθήκες ελέγχου είναι ευκολότερες. Τέλος

μπορεί το σύνθετο υλικό που παρασκευάζεται να είναι εύκολα ανακυκλώσιμο και τα κομμάτια του να συγκολλώνται με απλή θέρμανση [6], [9-10].

1.7.1.4 Ελαστομερείς Μήτρες

Οι ελαστομερείς μήτρες είναι γραμμικά πολυμερή με τυχαίο προσανατολισμό και διακλαδισμένες αλυσίδες. Με την επιβολή εξωτερικού φορτίου προκαλούνται μεγάλες παραμορφώσεις. Λόγω του ότι διαθέτουν μικρή δυσκαμψία, μετά την άρση του εξωτερικού φορτίου, επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα. Παραδείγματα ελαστομερών μητρών είναι οι σιλικόνες το καουτσούκ (φυσικό, σύνθετο) κ.α. Τέτοια υλικά όμως μπορούν να υποστούν πλαστική παραμόρφωση και να είναι αδύνατο να επανέλθουν στο αρχικό τους σχήμα μετά την αποφόρτιση διότι τα μακρομόριά τους έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση με χαρακτηριστικό παράδειγμα τα λάστιχα του αυτοκινήτου. Για την αποφυγή της πλαστικής παραμόρφωσης ακολουθείται η διαδικασία του βουλκανισμού κατά την οποία γίνεται θέρμανση του καουτσούκ με θείο και δημιουργούνται έτσι σταυροδεσμοί μεταξύ των μορίων ενισχύοντας τη δομή του ελαστικού. Τέλος, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ελαστομερές υλικό να γίνεται σκληρότερο, ανθεκτικότερο στη διάβρωση από εξωγενείς παράγοντες και λιγότερο ευαίσθητο στις θερμοκρασιακές μεταβολές [9].

1.7.2 Μεταλλικές Μήτρες

Οι μεταλλικές μήτρες χρησιμοποιούνται κυρίως όταν οι εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται το σύνθετο υλικό είναι υψηλών θερμοκρασιών. Υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταλλικές μήτρες είναι κυρίως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο. Οι συγκεκριμένες μήτρες προσφέρουν μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στο σύνθετο υλικό σε σχέση με τις οργανικές. Βασικό πλεονέκτημα έναντι των οργανικών είναι ότι οι μεταλλικές μήτρες μειώνουν την ευαισθησία του σύνθετου υλικού στην παρουσία διαλυτών και διευρύνουν τα θερμοκρασιακά όρια χρήσης του υλικού. Βελτιώνουν επίσης την ακαμψία, τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα για ειδικές εφαρμογές και αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου. Η σύνδεση (συγκόλληση, κόλληση) τέλος των τεμαχίων με μεταλλική μήτρα είναι ευκολότερη.

Οι μεταλλικές όμως μήτρες μπορούν να δημιουργήσουν εύθραυστες μεσομεταλλικές ενώσεις στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας και προκαλούν έτσι αποκόλληση ινών από τη μήτρα με αποτέλεσμα να επέρχεται μικρορωγμάτωση και θραύση των ινών. Τα σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα κι επομένως το βάρος της κατασκευής είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτά που έχουν οργανική μήτρα. Παρουσιάζουν τέλος σε υψηλές θερμοκρασίες φαινόμενα διάλυσης των ινών (π.χ. ίνες SiO_2 σε μήτρα Al) και η παραγωγή του σύνθετου είναι πολύ δύσκολη με πολύ μεγάλο κόστος [1,5,9].

1.7.3 Κεραμικές Μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι από τη φύση τους σκληρά, έχουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση και στη χημική προσβολή, παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες και τήκονται δύσκολα. Τα σύνθετα υλικά με κεραμική μήτρα έχουν υψηλή αντοχή στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αυξημένη μηχανική αντοχή. Τα παραπάνω ενισχύουν οι ίνες του σύνθετου οι οποίες ανάλογα με το ποσοστό τους μέσα στο υλικό βελτιώνουν την ολκιμότητα και την αντοχή της μήτρας. Οι κεραμικές μήτρες ακόμη έχουν τη δυνατότητα να προστατεύουν την ενισχυτική φάση και να εξασφαλίζουν την αναγκαία θερμομηχανική ισορροπία στην ενισχυτική φάση ώστε να επιτυγχάνεται ενίσχυση της μηχανικής συμπεριφοράς σε κατάσταση φόρτισης. Σημαντικό πρόβλημα στις μήτρες αυτές είναι το γεγονός ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των ενισχυτικών ινών με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνάφεια μεταξύ τους [1,11].

1.8 Μέσα Ενίσχυσης

Τα σύνθετα κατατάσσονται ανάλογα με το μέσο ενίσχυσης σε τέσσερις κατηγορίες:

- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (fibers)
- Σύνθετα ενισχυμένα με τεμαχίδια (particulate fillers)
- Σύνθετα ενισχυμένα με δομικά στοιχεία (honeycomb panels-κυψελωτά στρώματα)
- Σύνθετα ενισχυμένα με φύλλα (laminar fillers)

1.8.1 Ενίσχυση με Τεμαχίδια

Τα τεμαχίδια που λαμβάνουν μέρος στην ενίσχυση των σύνθετων υλικών είναι μεταλλικά ή αμέταλλα κι έχουν ασυνεχή μορφή και μικρές διαστάσεις. Τα σύνθετα αυτά υλικά αποτελούνται από τεμαχίδια ενός ή πολλών υλικών που βρίσκονται διασκορπισμένα στη μήτρα διαφορετικού υλικού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων υλικών είναι το σκυρόδεμα, η σκόνη αλουμινίου και άλλες οξειδωτικές ουσίες που περιέχονται σε καύσιμα πυραύλων, κράματα μετάλλων και διάφορα αμέταλλα σωματίδια που είναι συνήθως κεραμικά υλικά σε μεταλλικές μήτρες [5].

1.8.2 Ενίσχυση με Δομή Πολυστρώματος

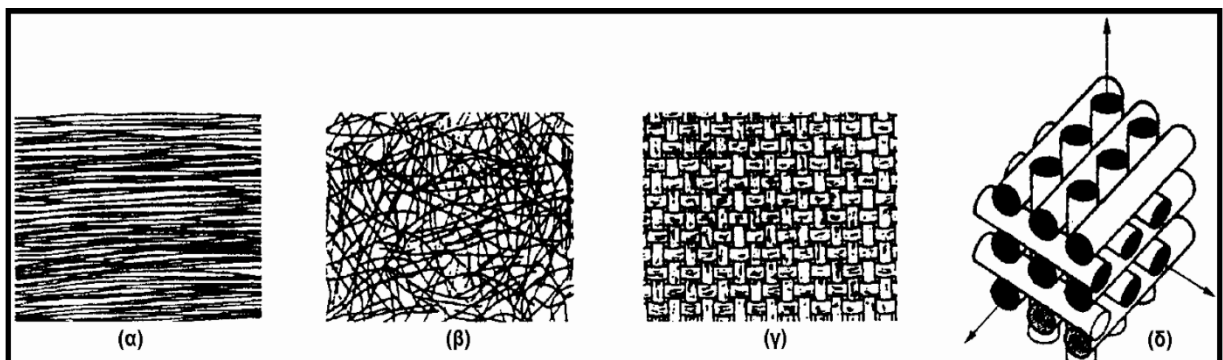
Τα πολυστρώματα είναι διφασικά υλικά και αποτελούνται από δύο συνεχείς φάσεις μία του πολυμερούς και μία του μέσου ενίσχυσης που εναλλάσσονται η μία επί της άλλης ως προς το ύψος του υλικού. Τα διφασικά αυτά υλικά είναι διαφορετικά και συνεργάζονται μεταξύ τους. Τα σύνθετα υλικά με δομή υποστρώματος παρουσιάζουν αντοχή στη θραύση, ακαμψία και βελτιωμένη αντοχή στη διάβρωση και την τριβή. Τέλος αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι ιδιότητες της κάθε κατασκευής επηρεάζονται από τις ιδιότητες των υλικών που τις αποτελούν.

1.8.3 Ενίσχυση με Ίνες

Οι ίνες αποτελούν το κύριο μέσο ενίσχυσης στα σύνθετα υλικά κι αυτό γιατί προσδίδουν στο υλικό μεγάλη αντοχή. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι ίνες υψηλής τεχνολογίας οι οποίες έχουν πολύ υψηλή αντοχή και ακαμψία σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα. Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μία συνεχή μήτρα. Οι ίνες μπορεί να είναι κεραμικές, πολυμερικές ή μεταλλικές. Μία ίνα χαρακτηρίζεται από ένα πολύ μεγάλο λόγο μήκους προς τη διάμετρο (aspect ratio, l/d). Η γεωμετρία της ίνας είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό της αντοχής της ίνας και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις εφαρμογές. Τέλος έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες είναι πολύ πιο ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά που βρίσκονται στη συνήθη μορφή. Για παράδειγμα τα φύλλα γυαλιού έχουν τάση θραύσεως μερικά MPa ενώ οι ίνες γυαλιού φτάνουν τιμές της τάξεως των 3-5 GPa [1,9].

Τα ινώδη σύνθετα υλικά ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διεύθυνση των ινών μέσα στη μήτρα διακρίνονται σε (Σχήμα.10):

- **Μονοδιευθυντικά σύνθετα:** Στα μονοδιευθυντικά σύνθετα όλες οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση.
- **Πολυδιευθυντικά σύνθετα:** Στα πολυδιευθυντικά σύνθετα οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις και μπορούν να χωριστούν σε σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης, σε σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης και σε σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση [1].



Σχήμα 10: Διάταξη ινών: (α) Μονοδιευθυντικές ίνες, (β) Ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) Ίνες με πλέξη Ύφανσης, (δ) Ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη [1]

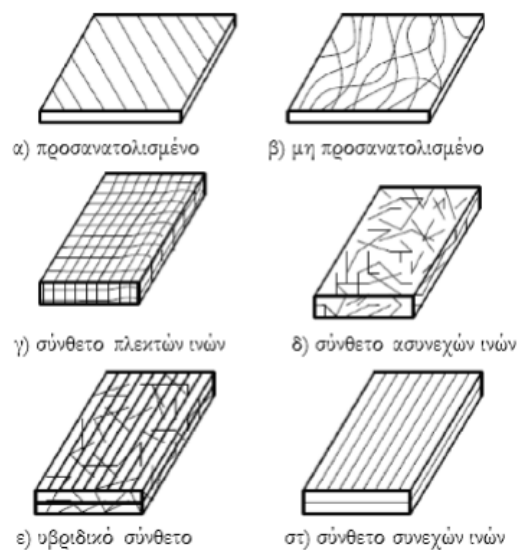
Τα ινώδη σύνθετα μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους και ανάλογα με το λόγο του μήκους των ινών προς τη διάμετρο τους (l/d).

Συγκεκριμένα χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

1. **Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers)**, όταν $l/d \geq 100$.
2. **Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers)**, όταν $l/d < 100$. Οι κοντές ίνες χρησιμοποιούνται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.
3. **Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers)**, με $d < 1 \mu\text{m}$ και $l \cong 100 \mu\text{m}$. Τα νηματίδια αυτά είναι ουσιαστικά λεπτοί μονοκρύσταλλοι κεραμικού υλικού.

Βάσει του τρόπου τοποθέτησης και του συνδυασμού των ινών στη μήτρα του υλικού, τα ινώδη σύνθετα υλικά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες (Σχήμα.11):

- Σύνθετα με **συνεχείς ίνες** οι οποίες είναι πλεγμένες με διάφορους τρόπους.
- Σύνθετα με **υφασμένες ίνες** οι οποίες αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα οπότε είναι δύσκολο να αποκολληθούν.
- Σύνθετα με **μη υφασμένα συνεχή νήματα** και χωρίς προσανατολισμό.
- Σύνθετα με **στρώματα ασυνεχών ινών** στα οποία οι ίνες είναι διάσπαρτες και μη προσανατολισμένες μέσα στη μήτρα.
- Υβριδικά σύνθετα τα οποία αποτελούνται από περισσότερους του ενός τύπους ινών, αλλά και ανεξάρτητα από συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες.



Σχήμα 11: Τύποι σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες [9]

1.9 Μορφή Ινών

Οι περισσότερες ίνες εκτός από αυτές που περιέχουν βόριο παράγονται ως θύσανοι λεπτών νημάτων. Τα νήματα αυτά μετατρέπονται εύκολα σε ταινίες μιας διεύθυνσης σε μορφή υφαντών ή πλεκτών υφασμάτων, χαρτιών και ψαθών κομμένα σε κομμάτια με σχήμα U ή σε μορφή σωληνοειδών πλεξούδων. Εάν τα νήματα αυτά εμποτιστούν με διάφορες ρητίνες τότε δημιουργούνται τα προεμποτισμένα σύνθετα υλικά (prepregs) τα οποία έχουν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες. Λόγω του ότι τα παραπάνω υλικά μπορούν να κατασκευαστούν και από θερμοπλαστικά και από θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, υπάρχουν πολλά διαθέσιμα υλικά με συγκεκριμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες το καθένα που μπορεί να βρει εφαρμογή σε πολλά πεδία. Υπάρχουν διάφορες μορφές ινών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή

σύνθετων υλικών. Από αυτές οι κυριότερες είναι, οι θύσανοι λεπτών νημάτων, τα ενισχυτικά υφάσματα και οι ταινίες μίας διεύθυνσης [2,9].

1.9.1 Ταινίες μίας Διεύθυνσης

Οι μη υφαντές ταινίες μίας διεύθυνσης αποτελούνται συνήθως από tows ή rovings, τα οποία ψεκάζονται σε καλούπια χωρίς να δημιουργούνται κενά. Είναι σημαντικό οι συγκεκριμένες ίνες να προεμποτίζονται με ρητίνη προκειμένου να παραμένουν σταθερές στις θέσεις τους. Η ρητίνη θα πρέπει να είναι μερικώς πολυμερισμένη έτσι ώστε να είναι παχύρρευστη με σχετικά υψηλό ιξώδες ή με ένα θερμοπλαστικό πολυμερές. Για να μην κολλήσει η ρητίνη σε άλλα επίπεδα της ταινίας, επικαλύπτεται με ένα αποκολλητικό χαρτί «release paper», το οποίο είναι επικαλυμμένο με σιλικόνη.

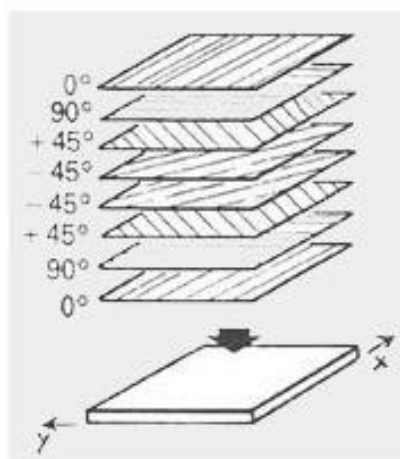
1.9.1.1 Θύσανοι Νημάτων

Οι θύσανοι νημάτων μπορούν να κατασκευαστούν είτε ως ένα ελεύθερο δέμα αποτελούμενο από πολλές χιλιάδες νήματα με στρέψη το οποίο ονομάζεται "yarn" και μοιάζει με πλεξούδα είτε ως ένα ελεύθερο δέμα χωρίς στρέψη το οποίο ονομάζεται "tow" και μοιάζει με στουπί. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι η ονομασία που θα φέρουν κάθε φορά επηρεάζεται άμεσα από την κατασκευαστική τους διαδικασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα δέματος με στρέψη είναι η πλεξούδα εκατοντάδων ινών γυαλιού, ενώ χωρίς στρέψη μπορούν να είναι οι ίνες άνθρακα και αρωματικού πολυαμιδίου.

1.9.1.2 Ενισχυτικά Υφάσματα

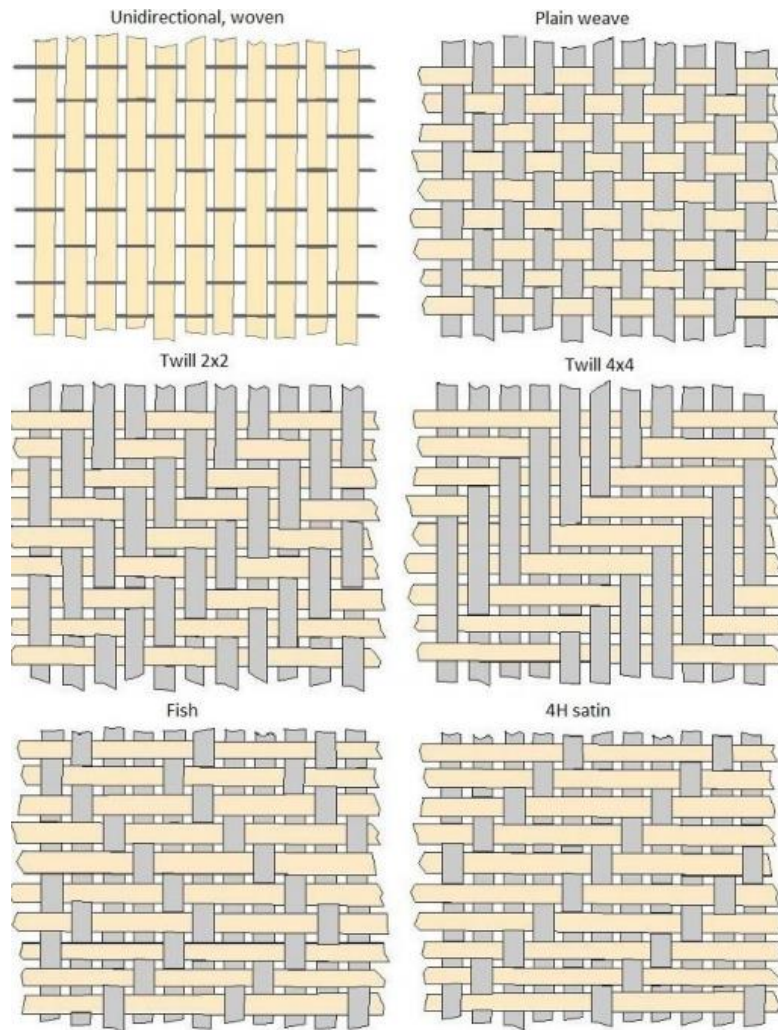
Στην περίπτωση που το φορτίο εφαρμόζεται στο επίπεδο και στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις τότε στην κατασκευή του σύνθετου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ενισχυτικό ύφασμα κατά το οποίο υπάρχουν κύρια νήματα και στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Τα νήματα αυτά είναι ίσα σε αριθμό ανά μονάδα μήκους τόσο στην εγκάρσια όσο και στη διαμήκη διεύθυνση. Κατ' αυτόν τον τρόπο η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια και μέγιστη και στις δύο διευθύνσεις. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται στη διεύθυνση της διχοτόμου της γωνίας που σχηματίζεται από τα δύο

κύρια νήματα. Τα σύνθετα υλικά που παρουσιάζουν αυτές τις αντοχές στις κάθετες διευθύνσεις των νημάτων ονομάζονται "ορθότροπα". Για να κατασκευαστεί τέτοιο υλικό στο τρισδιάστατο χώρο, το οποίο ονομάζεται "σχεδόν ισότροπο", τοποθετούνται πολλές στρώσεις υφάσματος με τις κύριες διευθύνσεις τους διευθετημένες με τρόπο τέτοιο που επιτρέπει στο υλικό να συμπεριφέρεται στα φορτία κατ' ανάλογο τρόπο σε όλες τις διευθύνσεις (Σχήμα.12).



Σχήμα 12: Κατασκευή σχεδόν σύνθετου Ισότροπου [5]

Τα ενισχυτικά υφάσματα περιλαμβάνουν πολλούς τύπους με χαρακτηριστικές πλέξεις. Οι βασικότεροι τύποι που χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή των σύνθετων υλικών φαίνονται στην Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υφάσματος [9]

Απλή Πλέξη (Plain weave)

Η απλή πλέξη είναι ο πιο συνηθής τρόπος πλέξης καθώς είναι πολύ σταθερός. Αποτελείται από εγκάρσιους και διαμήκεις θυσάνους ινών οι οποίοι διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ ο ένας πάνω στον άλλο. Η απλή πλέξη εφαρμόζεται πολύ εύκολα στις καμπύλες επιφάνειες παρ' ότι οι ίνες τους δεν στρεβλώνονται πολύ εύκολα. Το γεγονός αυτό κάνει την απλή πλέξη πολύ αποτελεσματικό ενισχυτικό μέσο.

Διαγώνια Πλέξη (Twill)

Η διαγώνια πλέξη χαρακτηρίζεται από μία διαγώνια γραμμή στο ύφασμα από την οποία φέρει και την ονομασία της. Η συγκεκριμένη πλέξη έχει μεγάλη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας και διαφορετική μορφή όψης στις δύο επιφάνειες του υφάσματος.

Πλέξη Satin

Η πλέξη Satin χρησιμοποιείται ευρύτατα στην παραγωγή των σύνθετων υλικών. Σε αυτόν τον τύπο πλέξης η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τους διαμήκεις θυσάνους ινών και έχει διαφορετική μορφή το ύφασμα στις δύο όψεις του. Τα υφάσματα των συγκεκριμένων πλέξεων είναι επίπεδα, εμποτίζονται εύκολα κι έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες. Τέλος λόγω του ότι υπάρχει χαμηλή σταθερότητα και ασυμμετρία χρειάζεται προσοχή κατά τη χρήση για να μην δημιουργηθούν τάσεις.

Καλαθωτή Πλέξη (Basket weave)

Η καλαθωτή πλέξη αποτελεί παραλλαγή της απλής πλέξης. Εδώ η εναλλαγή των διαμηκών και των εγκάρσιων θυσάνων ινών γίνεται ανά δύο ή περισσότερους ενώ στην απλή εναλλάξ ανά ένα θύσανο ινών. Επειδή η συγκεκριμένη πλέξη παρουσιάζει μια σχετική χαλαρότητα δεν είναι τόσο σταθερή όσο η απλή αλλά είναι πιο ισχυρή.

Πλέξη Leno

Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται ως μία «κλειδωμένη» πλέξη η οποία περιορίζει στο ελάχιστο την μετατόπιση των θυσάνων. Είναι μία απλή μορφή πλέξης κατά την οποία οι διπλανοί διαμήκεις θύσανοι ινών πλέκονται γύρω από τους διπλανούς εγκάρσιους δημιουργώντας έτσι ένα σπειροειδές ζεύγος. Τέλος επειδή από μόνα τους αυτά τα υφάσματα δεν μπορούν να δημιουργήσουν ένα αποτελεσματικό σύνθετο

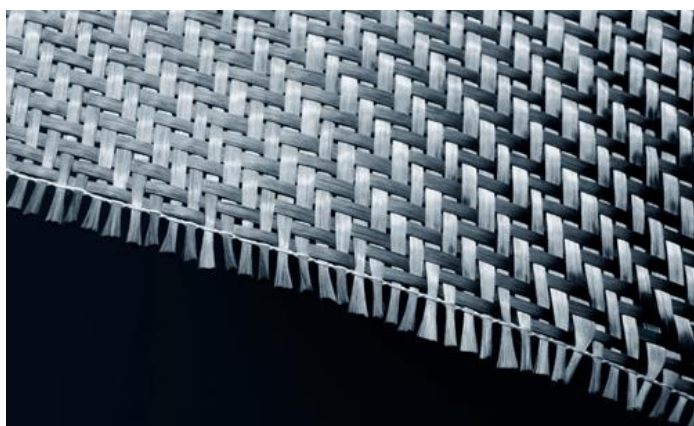
υλικό, χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με υφάσματα διαφορετικών πλέξεων.

Σε όλες τις παραπάνω πλέξεις το κοινό σημείο είναι ότι οι διασταυρώσεις γίνονται στις 90°. Είναι όμως πιθανόν να κατασκευάσουμε «διαγώνια πλεκτά» με κλίση 45° ή 60°. Το γεγονός ότι σε αυτά τα σύνθετα οι ίνες είναι ευθύγραμμες τα κάνει πιο δύσκαμπτα και πολύ ισχυρά. Τέλος το σύνθετο υλικό σαν κατασκευή έχει χειρότερες ιδιότητες απ' ό,τι η ίνα που το αποτελεί καθώς οι ίνες καταλαμβάνουν το 70% περίπου του όγκου του υλικού.

1.10 Τύποι Ινών

Οι ενισχυτικές ίνες για να προσφέρουν θετική ενίσχυση στο υλικό της μήτρας και επομένως στο σύνθετο υλικό γενικότερα θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα, χαμηλή πυκνότητα (ρ) και υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (σ^*). Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι κύριοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι τα ανθρακονήματα (carbon fibers), υαλονήματα (glass fibers) και οι ίνες πολυαραμιδίου (Kevlar) [5].

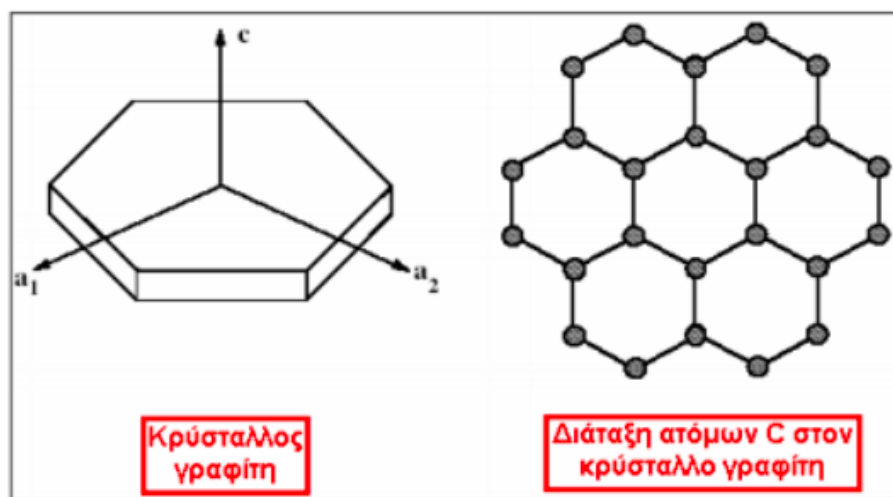
1.10.1 Ίνες Άνθρακα (Carbon Fibers)



Σχήμα 14: Ίνες άνθρακα (altairnlighten.com)

Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς με ταυτόχρονη ελάττωση του βάρους. Στα υψηλών απαιτήσεων σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται οι συγκεκριμένες ίνες γιατί προσφέρουν ενίσχυση

πολύ μεγάλης αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Συγκεκριμένα, ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Οι κρυσταλλίτες αυτοί, λόγω του ότι έχουν ισχυρό προσανατολισμό παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων, προσφέρουν υψηλή στιβαρότητα, αντοχή σε θραύση και χαμηλή θερμική διαστολή στο σύνθετο υλικό κατά τη διεύθυνση αυτή. Οι καλές μηχανικές ιδιότητες και κυρίως το υψηλό μέτρο ελαστικότητας οφείλονται στο γεγονός ότι τα άτομα του άνθρακα διατάσσονται πολύ πυκνά στη γραφιτική δομή με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων (Σχήμα.15). Στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις ο δεσμός των ατόμων του άνθρακα είναι πολύ ισχυρός ομοιοπολικός. Αντίθετα στις γειτονικές στρώσεις ο ασθενής δεσμός τύπου Van der Waals μειώνει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας κατ' αυτή τη διεύθυνση. Ατέλειες δομής οδηγούν στη δημιουργία κενών πολύπλοκου σχήματος, τα οποία διατάσσονται κατά μήκος της ίνας. Λόγω αυτών των κενών συγκεντρώνονται εκεί οι τάσεις με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή της ίνας. Τέλος άλλες αδυναμίες δομής μπορούν να είναι οι επιφανειακές ατέλειες και οι μακροκρύσταλλοι που συνδέονται με τον τρόπο παρασκευής των ινών [1,5,6].



Σχήμα 15: Εξαγωνική Γραφιτική Δομή [1]

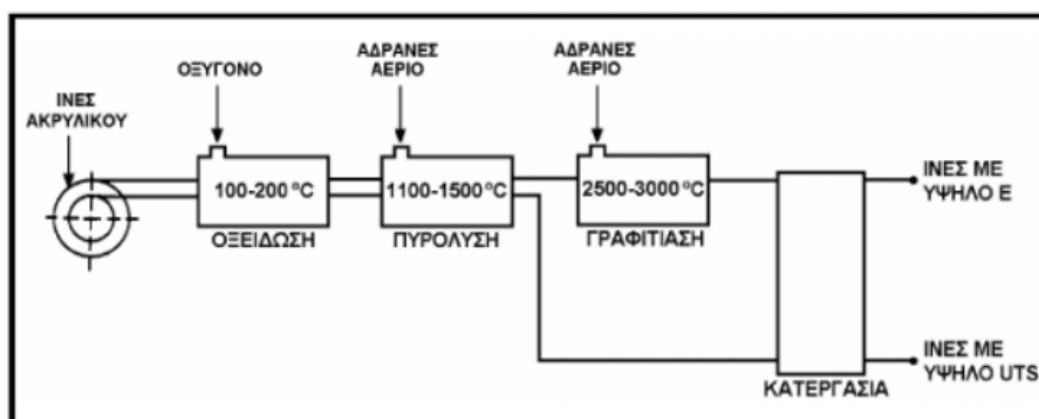
1.10.1.1 Παραγωγή Ινών Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα παράγονται κυρίως από δύο πρώτες ύλες. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη μια μεγάλη ποικιλία υλικών όπως ρητίνη φαινικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συνθετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Οι πιο

διαδεδομένες όμως πρώτες ύλες είναι οι πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο.

1.10.1.2 Ίνες Άνθρακα με βάση το PAN

Η αρχιτεκτονική και ο τρόπος διευθέτησης των ιών του PAN επηρεάζει άμεσα τις ιδιότητες των ανθρακονημάτων και το βαθμό ανισοτροπίας τους, ο οποίος ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία έως την πλήρη ανισοτροπία. Η παραγωγή ιών άνθρακα με βάση το PAN περιλαμβάνει τρία στάδια όπως φαίνεται στο σχήμα 16.



Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ενισχυτικών ιών άνθρακα σε τρία στάδια
(www.engineershandbook.com)

Τα τρία στάδια παραγωγής είναι τα εξής :

1. **Οξείδωση ιών PAN:** Το πολυμερές PAN με την οξείδωση μετατρέπεται σε μια δομή κλιμακωτής μορφής αποτελούμενη από ενωμένους δακτυλίους που σχηματίζουν τη βάση της τελικής δομής της ίνας. Η οξείδωση γίνεται στον αέρα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (100-200°C) με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης έτσι ώστε να ευθυγραμμιστούν οι αλυσίδες του πολυμερούς. Τέλος η οξειδωμένη ίνα από PAN δεν είναι εύφλεκτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του αμιάντου.
2. **Πυρόλυση:** Η πυρόλυση γίνεται υπό τάση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1000-1500°C. Οι παραγόμενες ίνες

χαρακτηρίζονται ως "ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής" (High Strength Carbon Fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.

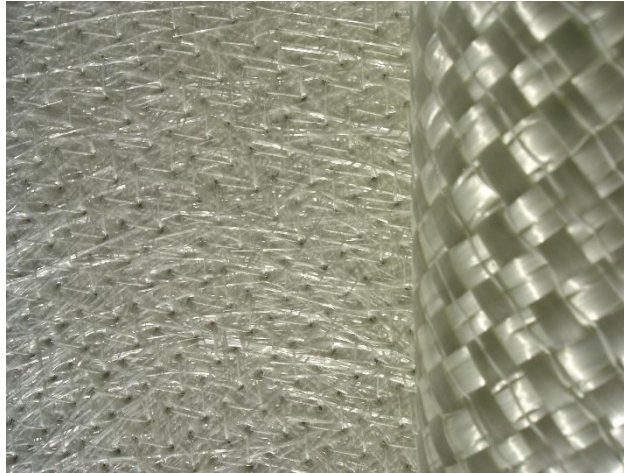
3. **Γραφίτοποίηση:** Στο στάδιο της γραφίτοποίησης πραγματοποιείται περαιτέρω θέρμανση στους 2000-3200 °C προκειμένου να παραχθούν υψηλού μέτρου ελαστικότητας ίνες. Η γραφίτιση γίνεται με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, η οποία οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως "ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας" (High Module Carbon Fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa και διάμετρο περίπου 10 μm.

Γενικά κατά το σχεδιασμό του σύνθετου υλικού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας καθώς σε οξειδωτική ατμόσφαιρα η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ινών άνθρακα είναι 500°C. Υπάρχει μεγάλη ευχέρεια δυνατοτήτων στο τελικό σύνθετο όσον αφορά τις ιδιότητές του καθώς υπάρχει μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής. Ανάλογα δηλαδή με την τιμή της θερμοκρασίας που εκτελούνται τα στάδια παραγωγής επηρεάζονται οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες του σύνθετου όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τέλος έχει αποδειχθεί ότι όσο περισσότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν οι ίνες και όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι, τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες φέρουν [2,9].

1.10.1.3 Ίνες Άνθρακα με Βάση την Πίσσα

Η πίσσα από πετρέλαιο και κάρβουνο αποτελεί σημαντική πρώτη ύλη για την κατασκευή ινών άνθρακα. Οι συγκεκριμένες ίνες, παρ' ότι αυτό δεν ίσχυε παλιότερα, μπορούν να έχουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό σε σχέση με αυτές που έχουν ως βάση το PAN. Μπορούν ακόμα να έχουν υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα και ειδική αντοχή. Ενδεικτικά οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας κυμαίνονται από 150 μέχρι 900GPa και η αντοχή στον εφελκυσμό φτάνει τα 3GPa με πυκνότητα 2.15g/cc. Τέλος, βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε δορυφορικές κατασκευές που απαιτούν υψηλότερο διαθέσιμο ειδικό μέτρο ελαστικότητας ενώ λιγότερη εφαρμογή βρίσκουν σε αεροναυπηγικές εφαρμογές [9].

1.10.2 Ίνες Γυαλιού(Glass Fibers)



Σχήμα 17: Ίνες Γυαλιού (betterwayproducts.com)

Η χρήση των ινών γυαλιού ως ενισχυτικά μέσα ολοένα γίνεται και πιο διαδεδομένη με την πάροδο του χρόνου. Οι ίνες γυαλιού άρχισαν να χρησιμοποιούνται στα σύνθετα της πρώτης γενιάς (1940) και τώρα έχουν ευρεία χρήση στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας.

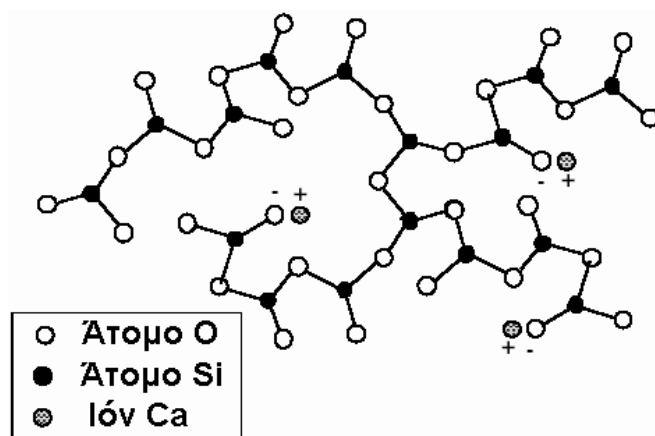
Τα υαλονήματα συνδυάζουν χαμηλό κόστος με υψηλή αντοχή, γεγονός που τα κάνει πολύ δημοφιλή στη χρήση τους. Έχουν όμως πολλά μειονεκτήματα με βασικά, το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, τη μικρή δυσκαμψία και τη μικρή αντοχή στη φθορά από τριβή. Η τριβή, η οποία προκαλεί εγχαράξεις και εκδορές, οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών και της ικανότητας πρόσφυσής τους στην πολυμερική μήτρα.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται μεμονωμένα ή μία από την άλλη και μπορούν να ενωθούν πολλές μαζί δημιουργώντας νήματα (strands). Παράλληλα, μη στριμμένα μεταξύ τους νήματα μπορούν να ενωθούν και να δημιουργήσουν πλεξίδες νημάτων (rovings). Οι πλεξίδες νημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είναι, 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. Οι ίνες γυαλιού όταν αναμειχθούν με πολυμερική μήτρα, είτε ως

συνεχείς είτε ως ασυνεχείς, δημιουργούν το fiberglass το οποίο αποτελεί σύνθετο υλικό [1].

1.10.2.1 Δομή και Τύποι Ινών Γυαλιού

Η τρισδιάστατη δομή και η διάταξη των συστατικών οξειδίων του γυαλιού επηρεάζουν την αντοχή του και το μέτρο ελαστικότητάς του. Το γυαλί αποτελεί μη κρυσταλλικό πυριτικό άλας, το οποίο περιέχει οξείδια που επηρεάζουν τις ιδιότητές του. Στη δομή του άμορφου γυαλιού (Σχήμα.18) κάθε πολυέδρο είναι ένας συνδυασμός ατόμων οξυγόνου γύρω από ένα άτομο πυριτίου, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα άτομα οξυγόνου σχηματίζουν με τα ιόντα νατρίου ιοντικούς δεσμούς και δε συνδέονται κατευθείαν με το πλέγμα.



Σχήμα 18: Δομή άμορφου γυαλιού [1]

Η προσθήκη οξειδίων επηρεάζει σημαντικά τη δομή του πλέγματος καθώς επίσης και την αντοχή του με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα να παράγονται ίνες με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Λόγω του ότι το γυαλί έχει τρισδιάστατη δομή οι ιδιότητες των ινών του είναι ισότροπες και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Σημαντικό ρόλο στην αντοχή των ινών, εκτός από την προσθήκη ή μη των οξειδίων, παίζει το περιβάλλον και ο τρόπος παρασκευής τους. Μπορεί, για παράδειγμα, το υγρό περιβάλλον να μειώσει την αντοχή τους, επειδή απορροφάται υγρασία στην επιφάνειά τους. Ομοίως και ο τρόπος περιέλιξής τους στο τύμπανο κατά την παρασκευή, μπορεί επίσης να μειώσει την αντοχή τους.

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού [1]

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΤΥΠΟΣ			
		E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση %	• SiO ₂	54	60	65	>99,5
	• Al ₂ O ₃	16	25	25	-
	• B ₂ O ₃	8	-	-	-
	• CaO	17	9	-	-
	• MgO	5	6	10	-
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)		75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)		2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)		2.54	2.50	2.48	2.20
Θερμοκρασία τήξης (°C)		900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)		550	650	650	750

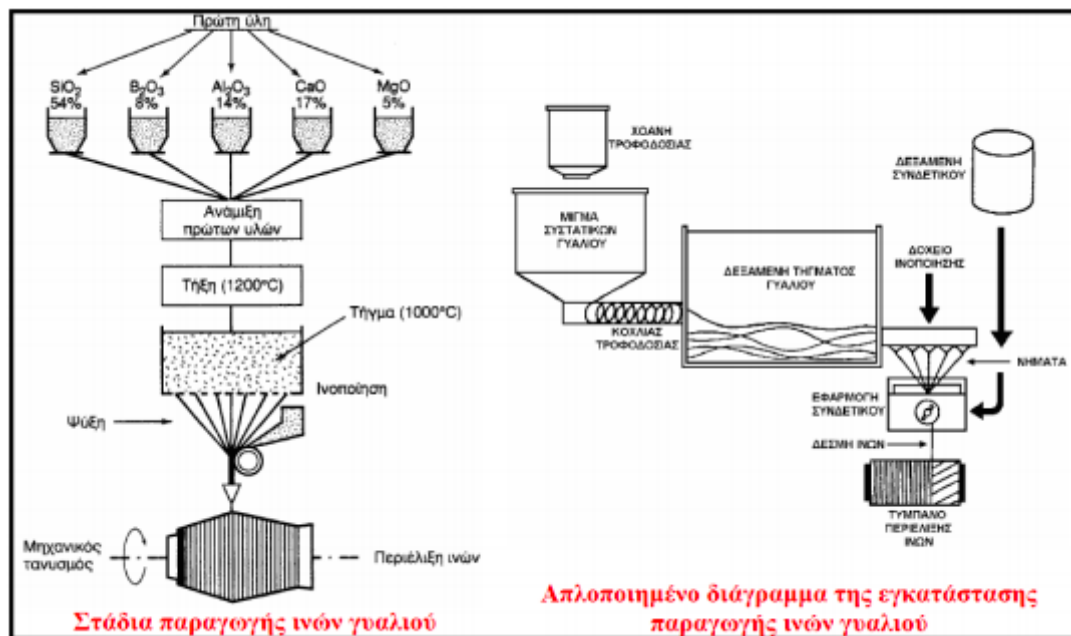
E-glass (E: Electrical): Τα συγκεκριμένα υαλονήματα έχουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, καλή συμπεριφορά σε αλλαγές των καιρικών συνθηκών και μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία. Λόγω των παραπάνω έχουν γίνει και τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι έχουν μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

C-glass (C: corrosion): Αποτελούν υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση και έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα τύπου E. Έχουν όμως υψηλό κόστος.

S-glass (S: stiffness): Χαρακτηρίζονται από μεγάλη δυσκαμψία και υψηλή θερμική αντοχή. Οι συγκεκριμένες ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία [1,5,9].

1.10.2.2 Παραγωγή Ινών Γυαλιού

Στο παρακάτω σχήμα 19 φαίνονται τα στάδια παραγωγής των ινών γυαλιού όπου στηρίζονται στην εκβολή τήγματος γυαλιού μέσα από μήτρα με διάτρητο πυθμένα.



Σχήμα 19: Διαδικασία παραγωγής υαλονημάτων [1]

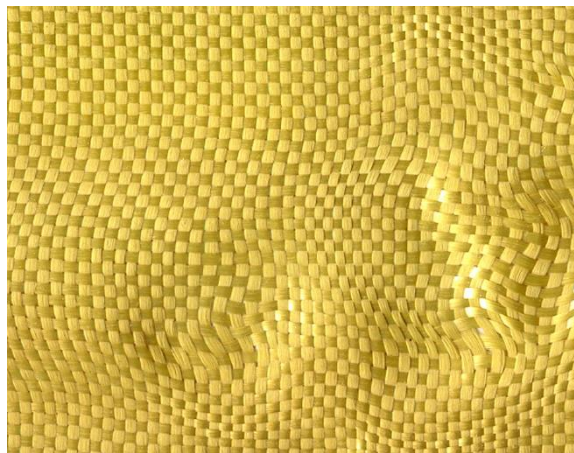
Η παραγωγή ινών γυαλιού περιλαμβάνει 6 φάσεις:

1. Τοποθέτηση της πρώτης ύλης στην δεξαμενή, όπου και τήκεται.
2. Τροφοδότηση του τήγματος σε κυλινδρικά δοχεία, τα οποία έχουν διάτρητο πυθμένα με διάμετρο οπών 1-2 mm. Μετά την τροφοδότηση το γυαλί ρέει υπό την επίδραση της βαρύτητας από τις οπές του πυθμένα.
3. Οι ίνες που παράγονται τανύζονται μηχανικά σε ένα σύνολο μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο (1-15μm) και ακολουθεί η ψύξη τους υπό τον ελαφρό ψεκασμό με νερό.
4. Επιβολή προστατευτικού λιπαντικού συνδετικού υλικού (binder) ή ειδικών κολλοειδών πρόσθετων (sizings) στις ίνες, οι οποίες διέρχονται από έναν μάντα. Τα παραπάνω δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις για την καλύτερη πρόσφυση των ινών στη μήτρα.
5. Περιτύλιξη των ινών ανά δέσμες σε τύμπανο που περιστρέφεται.

6. Ξήρανση των ρολών των ινών πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε διεργασία μορφής.

Κατά την παραγωγή των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των ινών μεταξύ τους αλλά και με άλλα αντικείμενα, για να μην προκαλούνται επιφανειακές κακώσεις στην ίνα. Για τον έλεγχο της διαμέτρου της ίνας ρυθμίζεται η στάθμη του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, η πυκνότητα, η ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου και η διάμετρος των οπών του. Τέλος τα χημικά που προστίθενται διακρίνονται σε **προσωρινά** και **συμβατά**. Ο ρόλος των *προσωρινών* πρόσθετων είναι, από τη μία να προστατεύουν την ίνα από τη μείωση της αντοχής της λόγω της τριβής της με τις άλλες ίνες και από την άλλη, να συνδέουν τις ίνες μεταξύ τους σε περίπτωση που οι ίνες διαμορφώνονται σε πλέξη ύφανσης. Τα *συμβατά* πρόσθετα βελτιώνουν την αρχική πρόσφυση ρητίνης-γυαλιού και μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις των περιβαλλοντικών επιδράσεων όπως για παράδειγμα η υγρασία [1,5].

1.10.3 Ίνες Πολυαραμιδίου (Kevlar)

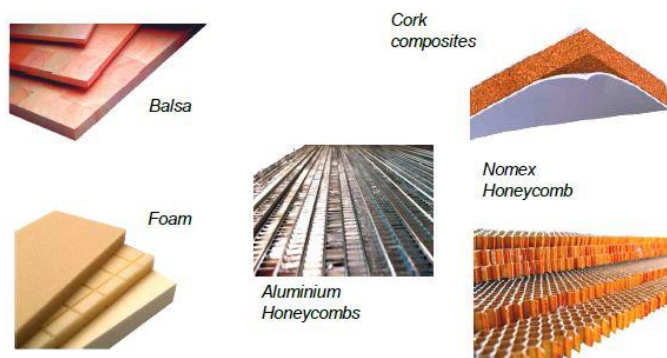


Σχήμα 20: Ίνες Αραμιδίου (www.ballyribbon.com)

Είναι ένα αρωματικό πολυαμίδιο με στερεούς μοριακούς δεσμούς. Έχει την υψηλότερη σχέση αντοχής προς βάρος (σ/γ) από οποιοδήποτε άλλο ύφασμα και διατίθεται από την εταιρεία Dupont σε δύο κυρίως τύπους: τον τύπο Κέβλαρ 29 που έχει χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας και τον τύπο 49 που έχει υψηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Το κέβλαρ εμποτίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με αυτόν που εμποτίζεται το υαλοϋφασμα, με εποξειδικές ρητίνες, μόνο που το συγκεκριμένο ύφασμα στο τελικό προϊόν είναι κατά 20% ελαφρύτερο από το υαλοϋφασμα. Το

κέβλαρ ακόμη έχει μεγαλύτερη ειδική τάση (σ/γ) και μεγαλύτερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/γ), από οποιοδήποτε υαλοϋφασμα και έχει περίπου τον ίδιο συντελεστή θερμικής διαστολής με τον γραφίτη με αποτέλεσμα να μπορούν να συνδυαστούν σε υβριδικές συνθέσεις. Στα συγκεκριμένα υφάσματα επίσης δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητές τους και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου και έχουν κατά δέκα φορές περίπου μεγαλύτερη ειδική τάση από το αλουμίνιο. Γενικότερα το κέβλαρ έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες εκτός από αντοχή σε φορτία θλίψης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνονται υβριδικές συνθέσεις υφάσματος κέβλαρ με γραφίτη κυρίως ή υαλοϋφασμα και αποκτώνται έτσι οι επιθυμητές αντοχές. Οι ίνες αραμιδίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε κράνη και αλεξίσφαιρα. Πέρα από αυτές τις χρήσεις, τα συγκεκριμένα υφάσματα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις αεροπορικές κατασκευές (δομικά στοιχεία, έλικες) και στην κατασκευή πυραυλοκινητήρων με σημαντική μείωση του βάρους.

1.11 Σύνθετα Στρωματοειδή (Honeycombs)



Σχήμα 21: Honeycomb (www.azom.com)

Σύνθετα υλικά μπορούν να προκύψουν και χωρίς εμποτισμό με ρητίνη στις διάφορες ίνες και υφάσματα. Συγκεκριμένα, ένα σύνθετο υλικό μπορεί να δημιουργηθεί και από τον μηχανικό συνδυασμό από διαφορετικά υλικά. Τα σύνθετα στρωματοειδή προκύπτουν από ένα πυρήνα και από μία στρώση εκατέρωθεν του πυρήνα. Ο πυρήνας είναι ένα ελαφρύ υλικό, το οποίο μεταφέρει τις διατμητικές τάσεις μεταξύ των δύο επιστρώσεων. Οι επιστρώσεις είναι από πιο ισχυρό υλικό και είναι ανθεκτικές στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης που εφαρμόζονται στο επίπεδό τους.

Η επικόλληση των στρωμάτων με τον πυρήνα θα πρέπει να είναι πολύ καλή για να μην υπάρχουν σχετικές κινήσεις μεταξύ των επιστρώσεων και να μην δημιουργούνται ρυτίδες με την επιβολή φορτίου. Οι επιστρώσεις γενικώς είναι πολύ λεπτές επιφάνειες και φυσικό είναι να παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλή αντοχή σε όλα τα φορτία που δεν εφαρμόζονται στο επίπεδό τους και υψηλή αντοχή στα φορτία που εμφανίζονται στο επίπεδό τους.

Επομένως τα σύνθετα στρωματοειδή έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τα φορτία μεταφέρονται στο επίπεδο των επιστρώσεων.
- Οι επιστρώσεις παραμένουν επίπεδες διότι συγκρατούνται από τον πυρήνα.
- Η απόσταση μεταξύ των επιστρώσεων είναι σταθερή και παρεμποδίζεται η δημιουργία κυματώσεων ή ρυτιδώσεων.
- Αποκτάται ένα υλικό στο οποίο γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πυρήνα και των επιστρώσεων.

Τέλος σε περιπτώσεις που εφαρμόζεται φορτίο τοπικά ο πυρήνας ενισχύεται στην περιοχή αυτή με την εγκατάσταση χιτωνίου κατάλληλου για το φορτίο της κοχλίωσης.

1.12 Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών

Για την τελική μορφοποίηση κυρίως των θερμοπλαστικών αλλά και των θερμοσκληρυνόμενων σύνθετων υλικών απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός διεργασιών. Ο βαθμός αυτοματισμού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική ποιότητα του συνθέτου, το οποίο είναι βέβαια πιο ποιοτικό όταν η μορφοποίησή του είναι πιο αυτοματοποιημένη.

Οι κύριες τεχνικές μορφοποίησης είναι οι εξής:

- *Αυτόκλειστη Χύτευση (Autoclave Moulding)*
- *Χύτευση με Συμπίεση (Compression Moulding)*
- *Περιέλιξη Νημάτων*
- *Χύτευση με Σάκο Πίεσης (Pressure Bag Moulding)*
- *Εμποτισμός με το Χέρι (Hand lay-up)*

- *Μορφοποίηση με Εμβάπτιση (Pultrusion)*
- *Χύτευση με Έγχυση Αντιδράσεως (RIM-Reaction Injection Moulding)*
- *Χύτευση με Μεταφορά Ρητίνης (RTM- Resin Transfer Moulding)*
- *Μορφοποίηση με Spray*
- *Μορφοποίηση με Σακούλα Κενού (Vacuum Bag Moulding)*
- *Μορφοποίηση με Έγχυση Κενού (Vacuum Infusion)*

1.12.1 Αυτόκλειστη Χύτευση (Autoclave Moulding)

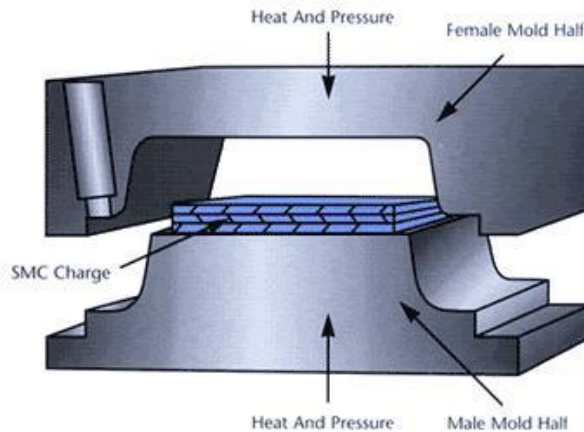
Πρόκειται για μέθοδο που παράγει σύνθετα πυκνότερα και χωρίς κενά κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης και αυξημένης θερμοκρασίας. Αποτελεί τροποποίηση της πίεσης και του κενού σάκου χύτευσης η συγκεκριμένη μέθοδος, ενώ ο φούρνος θερμαίνεται υπό πίεση και είναι εξοπλισμένος με συστήματα κενού. Η αυτόκλειστη χύτευση χρησιμοποιείται κυρίως σε αεροπορικές βιομηχανίες για την κατασκευή μερών που έχουν υψηλή αναλογία ισχύος με βάρος, για μέρη αεροσκαφών και πυραύλων και τέλος όταν οι ίνες του σύνθετου είναι προεμποτισμένες (prepreg). Τα κομμάτια που τοποθετούνται στο φούρνο είναι κυρίως προϊόντα εποξικής ρητίνης καθώς διαθέτει καλύτερες ιδιότητες από τις κοινές ρητίνες. Αυτό συμβαίνει γιατί οι πιέσεις μέσα στο φούρνο κυμαίνονται από 50 έως 120 psi , επομένως οι απαιτήσεις είναι υψηλές. Η συνήθης θερμοκρασία λειτουργίας του φούρνου για τέτοια υλικά είναι 180°C. Τα κομμάτια που εισέρχονται είναι προϊόντα lay-up σε καλούπι, τα οποία έχουν υποστεί τη διαδικασία vacuum προκειμένου στο τελικό προϊόν να μην υπάρχουν ατέλειες. Τέλος υπάρχουν διάφορα μεγέθη φούρνων, αλλά κάθε βιομηχανία διαθέτει μέγεθος φούρνων ανάλογα με το μέγεθος του προς κατασκευή κομματιού.



Σχήμα 22: Αυτόκλειστος Φούρνος (Autoclave)

1.12.2 Χύτευση με Συμπίεση (Compression Moulding)

Για τη μορφοποίηση των σύνθετων με συμπίεση χρειάζεται ένα αρσενικό και ένα θηλυκό θερμαινόμενο καλούπι. Το ύφασμα τοποθετείται ανάμεσα στα δύο καλούπια, ενώ για την μορφοποίησή του εφαρμόζεται εξωτερική πίεση έτσι ώστε το ύφασμα να πάρει το σχήμα του καλουπιού. Οι πιέσεις κυμαίνονται από 150 έως 1500 psi και η θερμοκρασία από 225°C έως 325°C. Η μορφοποίηση μπορεί να γίνει και με ψύξη η οποία γίνεται στο καλούπι. Η μήτρα του σύνθετου υλικού μπορεί να είναι και θερμοπλαστική και θερμοσκληρυνόμενη. Οι ίνες είναι δυνατόν να βρίσκονται σε μορφή υφάσματος, μακρών (roving) ή κοντών ινών (strand), είτε ακόμη και σε συνεχή μορφή. Το δε σύνθετο υλικό όταν έχει θερμοπλαστική μήτρα μπορεί να βρίσκεται σε μορφή ενός φύλλου (laminat) ή σε πολύστρωτη πλάκα. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το γεγονός ότι μπορούν να κατασκευασθούν πολύ πολύπλοκα σχήματα. Λόγω αυτού ελαχιστοποιούνται οι μετέπειτα ενέργειες όπως οι διάφορες λειάνσεις και η μέθοδος γίνεται πολύ αυτοματοποιημένη. Η χύτευση με συμπίεση χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτοκινητοβιομηχανίες.



Σχήμα 23: Διαδικασία Χύτευσης υπό συμπίεση (greenhulk.net)

1.12.3 Μορφοποίηση με Περιέλιξη Νημάτων

Κατά τη μορφοποίηση με περιέλιξη νημάτων ένα θερμαινόμενο τύμπανο περιστρέφεται και παράγονται έτσι σύνθετα κοίλα και κυλινδρικά υψηλών προδιαγραφών. Οι διάφορες ίνες άνθρακα, αραμιδίου γυαλιού κ.α. αρχικά εμποτίζονται κι έπειτα περιτυλίσσονται στο καλούπι επιθυμητού σχήματος. Λόγω του ισχυρού προσανατολισμού, του απόλυτου ελέγχου τοποθέτησης των ινών και της ομοιομορφίας της δομής, το προϊόν που προκύπτει διαθέτει πολύ υψηλή μηχανική αντοχή. Τελευταίο στάδιο της διαδικασίας είναι η ξήρανση της κατασκευής σε κλίβανο ή στον αέρα. Τα προκείμενα προϊόντα χρησιμοποιούνται, ως δοχεία πίεσης, ως δεξαμενές καυσίμων και χημικών καθώς επίσης και σε φρεάτια.

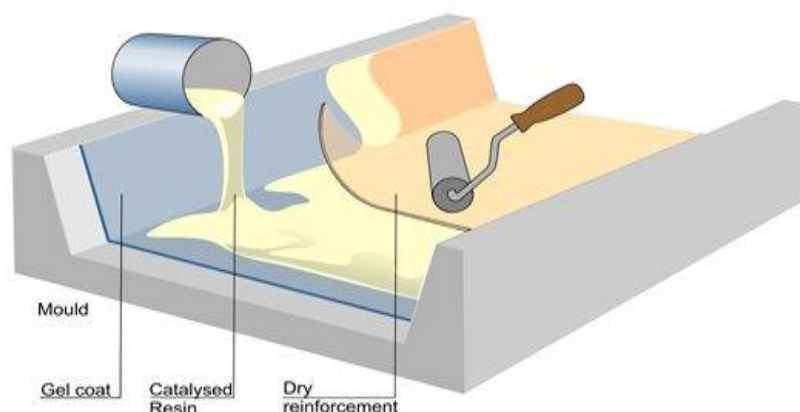
1.12.4 Χύτευση με Σάκο Πίεσης (Pressure Bag Moulding)

Στη μορφοποίηση με σάκο πίεσεως χρησιμοποιούνται μόνο θηλυκά και διαιρούμενα καλούπια. Συγκεκριμένα, ο σάκος, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από φύλλο ή καουτσούκ, καλύπτει το σύνθετο με πίεση από 30 έως 50 psi μέχρι να εξέλθει ο εγκλωβισμένος αέρας και να μείνει η περίσσεια ρητίνης. Τα προϊόντα που προκύπτουν από τη μέθοδο αυτή μπορεί να είναι λεπίδες ανεμογεννητριών.

1.12.5 Εμποτισμός με το Χέρι (Hand lay-up)

Ο εμποτισμός με το χέρι αποτελεί πολύ απλή ανοιχτή μέθοδο μορφοποίησης σύνθετου υλικού. Είναι κατάλληλη για μεγάλα εξαρτήματα όπως κύτη σκαφών. Κατά

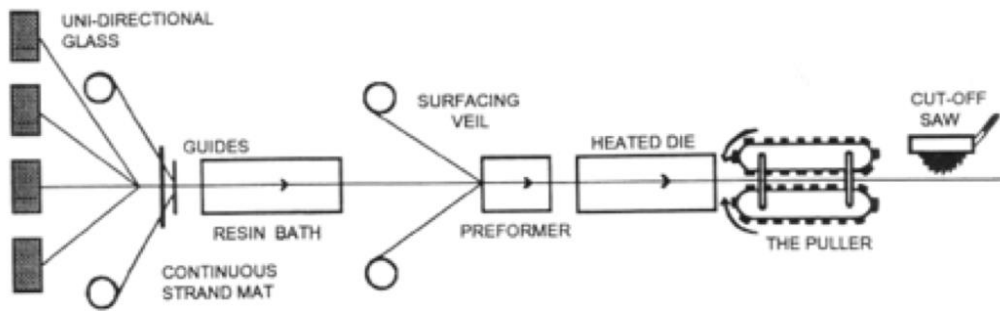
τη μέθοδο αυτή ύφασμα γυαλιού ή ανθρακονήματος τοποθετείται πάνω στο καλούπι και ταυτόχρονα χύνεται η ρητίνη. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι εποξικές, οι οποίες έχουν αναμειχθεί με καταλύτη προκειμένου να υποστεί σκλήρυνση και ταυτόχρονα χωρίς εξωτερική θερμότητα να σκληρυνθεί και το σύνθετο. Η ρητίνη απλώνεται στο ύφασμα με τη βοήθεια πινέλου ή με ψεκασμό, ενώ το ύφασμα στρώνεται με το χέρι ή με ειδικούς κυλίνδρους προκειμένου να φύγει ο παγιδευμένος αέρας. Τέλος για να έχει καλύτερη επιφάνεια το προϊόν τοποθετείται gel coat ανάμεσα στο καλούπι και το ύφασμα.



Σχήμα 24: Hand lay-up (www.nuplex.com)

1.12.6 Μορφοποίηση με Εμβάπτιση/ Τραβηχτή διέλαση (Pultrusion)

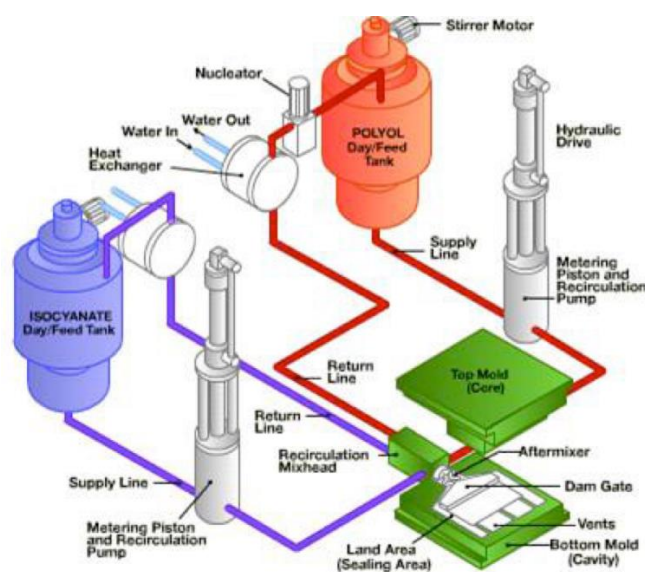
Η συγκεκριμένη τεχνική μορφοποίησης χρησιμοποιείται όταν απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος όπως διάφοροι σωλήνες, αγωγοί δοκοί κ.α. Είναι μια συνεχής μέθοδος κατασκευής ενισχυμένων σύνθετων υλικών κατά την οποία ίνες γυαλιού ή ανθρακονήματος, εμβαπτίζονται σε λουτρό από ρητίνη. Οι ίνες μπορεί να είναι μονής διεύθυνσης ή και πλεκτά και είναι διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους. Μετά το λουτρό οδηγούνται σε χαλύβδινη μήτρα όπου το προϊόν λαμβάνει την τελική του διατομή ώστε να ταιριάζει με το προφίλ του σχεδιασμού. Μετά τη στερεοποίησή του το προϊόν εφελκύεται διαμέσου της μήτρας από ειδική συσκευή ελκυσμού. Τέλος υπάρχει η κοπή του συνθέτου για να επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος. Τα σύνθετα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μέθοδο έχουν υψηλή αντοχή στον επιμήκη άξονα καθώς σε αυτή τη διεύθυνση οι ίνες είναι ισχυρά προσανατολισμένες.



Σχήμα 25: Pultrition (www.engineershandbook.com)

1.12.7 Χύτευση με Έγχυση Αντιδράσεως (RIM-Reaction Injection Moulding)

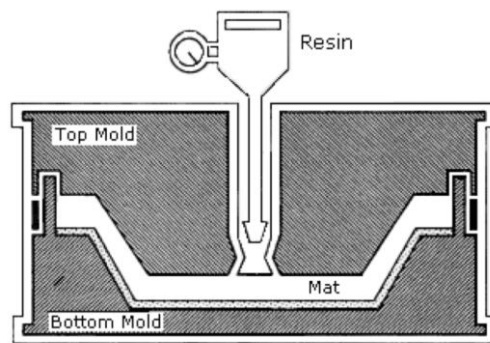
Χύτευση με έγχυση αντιδράσεως (RIM), είναι μια μέθοδος χαμηλής πίεσης που περιλαμβάνει μηχανική ανάμιξη συχνά με εξοπλισμό διανομής και όχι με πρόσκρουση και αμέσως εγχέεται το μίγμα στην κλειστή κοιλότητα του καλουπιού. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται είναι δραστικά πολυμερή όπως πολυαμίδια, πολυόλες, ισοκυανικά, πολυουρεθάνες. Οι γρήγοροι κύκλοι χυτεύσεως, που παρέχονται από τις συγκεκριμένες ρητίνες, είναι κατάλληλοι για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και στα έπιπλα, όπως προφυλακτήρες αυτοκινήτων, φτερά αυτοκινήτων, πίνακες, περιβλήματα συσκευών και εξαρτημάτων επίπλων. Τέλος όταν οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι κόντες ή υπάρχουν νιφάδες ινών με σκοπό την δημιουργία όσο το δυνατόν πιο ισοτροπικού προϊόντος, η διαδικασία ονομάζεται ενισχυμένη αντίδραση χυτεύσεως με έγχυση (RRIM).



Σχήμα 26: Μορφοποίηση με έγχυση αντιδράσεως (www.reactioninjectionmolding.com)

1.12.8 Χύτευση με Μεταφορά Ρητίνης (RTM- Resin Transfer Moulding)

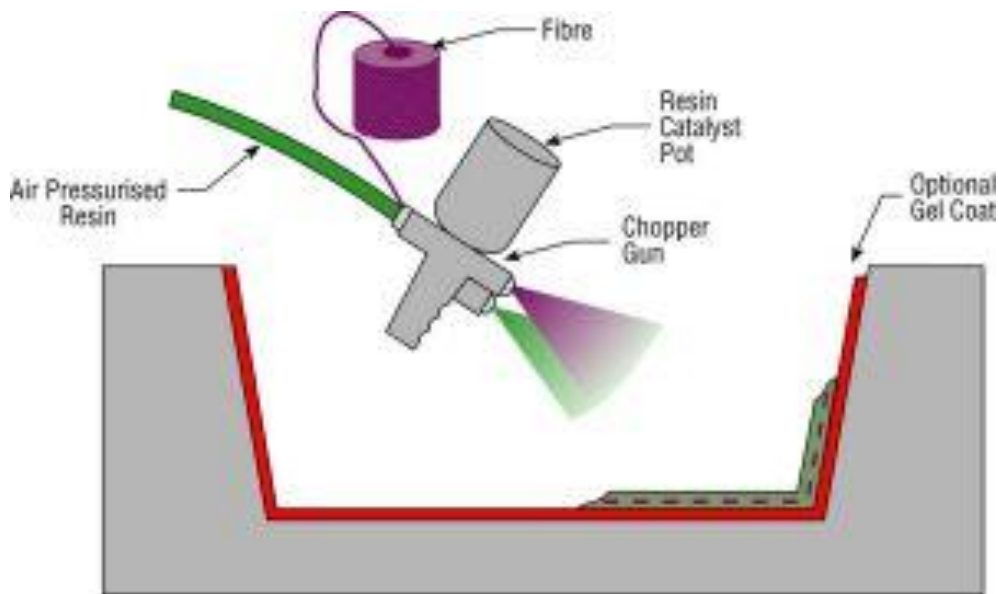
Πρόκειται για χύτευση χαμηλής πίεσης και χρησιμοποιείται όταν οι ποσότητες παραγωγής είναι μέτριες. Κατά τη συγκεκριμένη μορφοποίηση το ύφασμα στρώνεται στο καλούπι, το οποίο μετά κλείνει και σφίγγεται. Ακολουθεί μεταφορά ρητίνης με χαμηλό ιξώδες, η οποία αναγκάζει τον παγιδευμένο αέρα να διαφύγει διαμέσου ειδικά τοποθετημένων αγωγών. Οι ρητίνες είναι αναμειγμένες με κατάλληλους καταλύτες και είναι συνήθως εποξικές, πολυεστερικές ή φαινολικές. Τα προϊόντα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μέθοδο έχουν ομοιόμορφο πάχος σε όλες τις πλευρές τους και αφορούν κυρίως αυτοκίνητα, μέρη σώματος καθώς και οικιακό εξοπλισμό. Τέλος για βέλτιστο φινίρισμα της επιφάνειας τοποθετείται gel coat στην επιφάνεια του καλουπιού πριν από την χύτευση.



Σχήμα 27: Μορφοποίηση με μεταφορά ρητίνης (osha.gov)

1.12.9 Μορφοποίηση με Spray

Η μορφοποίηση με spray αποτελεί παρόμοια τεχνική με αυτή του hand lay up μόνο που είναι πιο οικονομική και μέσω αυτής μπορούν να παραχθούν πιο πολύπλοκα σύνθετα. Στη συγκεκριμένη τεχνική το σύνθετο υλικό επαλείφεται με ρητίνη και στις περισσότερες περιπτώσεις τα πληρωτικά υλικά εναποτίθενται στην επιφάνεια του καλουπιού με πιστόλι ψεκασμού. Έπειτα με ειδικούς κυλίνδρους απεγκλωβίζεται ο παγιδευμένος αέρας κι επέρχεται έτσι ομοιογένεια στην επιφάνεια του υφάσματος. Τέλος η ρητίνη, η οποία είναι κυρίως πολυεστερική, σκληραίνει σε θερμοκρασία δωματίου. Για άριστο φινίρισμα επιφάνειας χρησιμοποιείται gel coat.



Σχήμα 28: Μορφοποίηση με Spray (www.reactioninjectionmolding.com)

1.12.10 Μορφοποίηση με Σακούλα Κενού (Vacuum Bag Moulding)

Κατά τη μορφοποίηση με σακούλα κενού δημιουργείται ουσιαστικά μια σακούλα η οποία με τη βοήθεια βαλβίδων και αντλιών αέρα εξαλείφει πλήρως τον αέρα που υπάρχει μέσα στη σακούλα. Αναλυτικότερα, αφού γίνει το lay up του prepreg (ύφασμα προεμποτισμένο με ρητίνη) υλικού σε αρσενικό ή θηλυκό καλούπι τότε ένα φιλμ πολυβινυλικής αλκοόλης ή νάιλον τοποθετείται πάνω από το lay-up και σφραγίζεται στη φλάντζα του καλουπιού. Το κενό αφαιρείται από το σάκο που σχηματίζεται από την ταινία, ενώ το σύνθετο σκληρύνεται σε θερμοκρασία δωματίου ή αυξημένες θερμοκρασίες. Με αυτή τη μέθοδο υπάρχει καλύτερη πρόσφυση των στρωμάτων στο καλούπι ενισχύοντας έτσι το σύνθετο περισσότερο. Προηγμένα προεμποτισμένα υφάσματα τοποθετούνται σε αυτόκλειστους φούρνους με ταυτόχρονη μορφοποίηση με vacuum bag.



Σχήμα 29: Vacuum bag

1.12.11 Μορφοποίηση με Έγχυση Κενού (Vacuum Infusion)

Η έγχυση κενού, που ονομάζεται επίσης έγχυση ρητίνης, χρησιμοποιεί έναν σάκο κενού, στον οποίο τοποθετούνται μέσα υφάσματα από ίνες άνθρακα ή γυαλιού. Η συγκεκριμένη διαδικασία μορφοποίησης είναι μια τεχνική που στηρίζεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ της διάταξης που χρησιμοποιείται και του περιβάλλοντος. Η διαφορά αυτή της πίεσης χρησιμοποιείται για να ασκηθεί μηχανική πίεση στο πολύστρωτο καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής του, αλλά και για να γίνει η αναρρόφηση της ρητίνης. Κατόπιν αφήνεται ρητίνη ή συνδυασμός ρητινών να εγχυθούν από έναν αγωγό με την βοήθεια του κενού. Με αυτόν τον τρόπο εμποτίζονται με ρητίνη τα υφάσματα. Με την ασκούμενη πίεση πάνω στο κομμάτι καθώς και με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, μετά από κάποιες ώρες, ανάλογα πάντα και το μέγεθος, εξάγεται ένα σύνθετο κομμάτι.

Με την διαδικασία αυτή, μορφοποιούνται ελάσματα συνθέτων υλικών πάχους μέχρι και 6 ιντσών. Οι επιφάνειες είναι υψηλής ποιότητας καθώς τοποθετείται gel coat ανάμεσα στο καλούπι και στο κομμάτι.



Σχήμα 30: Vacuum infusion

1.13 Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετων υλικών

Τα κατασκευαστικά υλικά χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές τους ιδιότητες, προσδιορίζοντας άμεσα την συμπεριφορά τους σε συγκεκριμένες τάσεις. Οι ιδιότητες αυτές, είναι:

- **Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young**

Το μέτρο ελαστικότητας Young εκφράζει την παραμόρφωση ενός μονοδιάστατου σώματος, πρακτικά ενός σώματος με μεγάλο μήκος και μικρή διατομή. Το μέτρο ελαστικότητας ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του. Αναφέρεται ότι η ίνα και η μήτρα συμπεριφέρονται σαν ιδανικά ελαστικά υλικά, η διεπιφάνεια ανάμεσα στη μήτρα και στην ίνα είναι απειροστικά λεπτή, η μήτρα είναι ομοιογενής και ότι οι ίνες είναι διανεμημένες σε κανονική διάταξη.

Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές, και ακολουθούν τον νόμο του Hooke, ο οποίος στα ομογενή ισότροπα υλικά ορίζει ότι η σχέση μεταξύ μιας επιβαλλόμενης τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ που προκαλείται είναι :

Αξονική Τάση

$$\text{Στην ίνα: } \sigma = E_f \cdot \varepsilon_f \quad (1.1)$$

$$\text{Στη μήτρα: } \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (1.2)$$

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_f = \sigma_f \cdot A_f \quad \text{και} \quad (1.3)$$

$$P_m = \sigma_m \cdot A_m \quad (1.4)$$

Όταν υπάρχει τέλεια επαφή ανάμεσα στην ίνα και στη μήτρα, τότε:

$$E_f = \varepsilon_m = \varepsilon_s \quad (1.5)$$

Το συνολικό φορτίο P_s που φέρει το σύνθετο είναι το άθροισμα των φορτίων ίνας και μήτρας, άρα:

$$\begin{aligned} P_s &= P_f + P_m \Leftrightarrow \sigma_s \cdot A_s = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f + E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m \Leftrightarrow E_s = E_f \cdot \frac{A_f}{A_s} + E_m \cdot \frac{A_m}{A_s} \Leftrightarrow \\ E_s &= E_m \cdot (1 - \varphi) + \varphi \cdot E_f \end{aligned} \quad (1.6)$$

όπου φ = κλάσμα όγκου των ινών

Εγκάρσιες Τάσεις

$$\text{Ισχύει: } \sigma_f = \sigma_m = \sigma_z \quad \text{αλλά} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon_f \neq \varepsilon_m \neq \varepsilon_s \quad (1.8)$$

$$\text{Άρα: } \varepsilon_f = \frac{\sigma_z}{E_f} \quad \text{και} \quad (1.9)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_z}{E_m} \quad (1.10)$$

Επομένως, εφόσον η συνολική παραμόρφωση είναι ίση με το μέσο όρο των παραμορφώσεων της μήτρας και της ίνας ζυγισμένες με τα κλάσματα όγκου τους:

$$\begin{aligned} E_z &= (1 - \varphi) \cdot \varepsilon_m + \varphi \cdot \varepsilon_f \Leftrightarrow \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_z} \Leftrightarrow \varepsilon_z = \frac{\sigma_z \cdot (1 - \varphi)}{E_m} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow E_z = \left(\frac{\varphi}{E_f} + \frac{1 - \varphi}{E_m} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (1.11)$$

- **Μέτρο διάτμησης**

Το μέτρο διάτμησης χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση.

Τα πιο συνηθισμένα κατασκευαστικά υλικά, τα μέταλλα, είναι ισοτροπικά, που σημαίνει ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση επιβολής του φορτίου. Η μηχανική τους συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηριστεί από δύο μεγέθη, το μέτρο ελαστικότητας ϵ και τον λόγο Poisson ν . Το μέτρο διάτμησης εξαρτάται άμεσα από τα άλλα δύο μεγέθη.

Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά ορθοτροπικά, δηλαδή έχουν τουλάχιστον δύο ή και περισσότερα επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στην διεύθυνση εφαρμογής της και διαφορετική στην κάθετη σε αυτήν διεύθυνση. Επίσης, το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο από τα μεγέθη ελαστικότητας και Poisson.

Για τον χαρακτηρισμό των υλικών αυτών απαιτούνται εννέα μεγέθη, τρία για κάθε διεύθυνση: E_{xy} , E_{xz} , E_{yz} , V_{xy} , V_{xz} , V_{yz} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} . Στα ορθοτροπικά υλικά, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ διατμητικών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων σε διαφορετικά επίπεδα.

Έστω ότι $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz}$ και θεωρώντας ίσες τις δυνάμεις στο σύνθετο και αθροίζοντας τις παραμορφώσεις έχουμε:

$$G_{xy} = \left(\frac{\varphi}{G_f} + \frac{1-\varphi}{G_m} \right)^{-1} \quad \text{και} \quad (1.12)$$

$$G_{xz} = \varphi \cdot G_f + (1 - \varphi) \cdot G_m \quad (1.13)$$

- **Λόγος Poisson**

Λόγος του Poisson καλείται ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης προς την αξονική στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος σ-ε όταν το υλικό υποβάλλεται σε απλή μονοαξονική φόρτιση.

$$\text{Ο λόγος του Poisson ορίζεται ως: } V_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \quad (1.14)$$

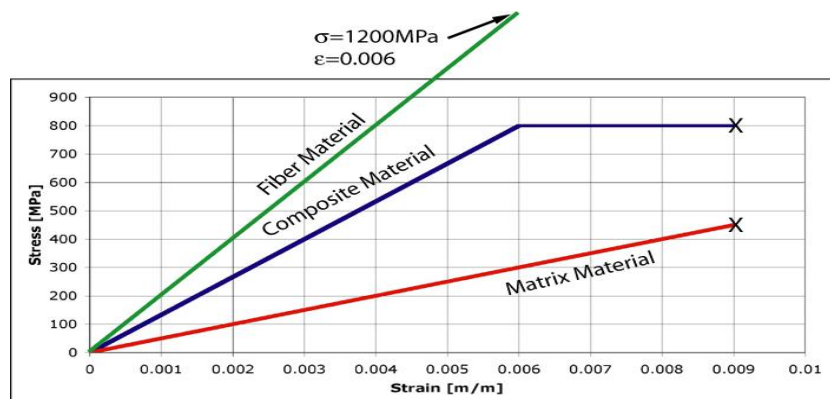
Για τα σύνθετα υλικά υπάρχουν τρία ανεξάρτητα στοιχεία του V_{ij} , και ισχύει:

$$\frac{V_{xy}}{E_s} = \frac{V_{xy}}{E_z} \quad \text{και} \quad (1.15)$$

$$G_{xz} = \frac{E_z}{2 \cdot (1 + V_{xz})} \quad (1.16)$$

Σημειώνεται, ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι σε κατάσταση φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, με σταθερό ρυθμό, μέχρι τελικά να επέλθει η θραύση. Η συμπεριφορά αυτή κατατάσσει τα σύνθετα υλικά ως ψαθυρά.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων σύνθετου υλικού.



Σχήμα 31: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων σύνθετου υλικού

2 Δοχεία Πίεσης

2.1 Εισαγωγή

Δοχείο πίεσης είναι ένα δοχείο σχεδιασμένο να αποθηκεύει κάποιο αέριο ή υγρό υπό πίεση, η οποία είναι διαφορετική από αυτήν της ατμοσφαιρικής πίεσης. Λόγω του ότι αυτή η διαφορετική πίεση είναι πολύ επικίνδυνη και έχουν συμβεί πολλά θανατηφόρα ατυχήματα, ο σχεδιασμός, κατασκευή και η λειτουργία των συγκεκριμένων δοχείων ρυθμίζονται από μηχανικές αρχές οι οποίες υποστηρίζονται από τη νομοθεσία. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι αυτά τα δοχεία διαφέρουν από χώρα σε χώρα λόγω διαφορετικών νομοθεσιών, αλλά πάντα λαμβάνονται οι παράμετροι όπως η μέγιστη πίεση και θερμοκρασία βάσει καθορισμένου συντελεστή ασφαλείας, η αντοχή στη διάβρωση και η ελάχιστη θερμοκρασία σχεδιασμού για ψαθυρή θραύση. Στα παραπάνω περιλαμβάνονται και οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι όπως η ραδιογραφία, η δοκιμή με υπερήχους, η δοκιμή πίεσης με νερό (hydrotest) ή πνευματικά με αέρα ή κάποιο άλλο αέριο. Η προτιμώμενη δοκιμή είναι η δοκιμή υδροστατικής γιατί είναι μια πολύ ασφαλής μέθοδος δοκιμών, καθώς απελευθερώνει πολύ λιγότερη ενέργεια σε περίπτωση θραύσης που επρόκειτο να συμβεί (το νερό δεν αυξάνει ραγδαία τον όγκο του, ενώ λαμβάνει χώρα ταχεία αποσυμπίεση, σε αντίθεση με αέρια όπως ο αέρας).

2.2 Χαρακτηριστικά Δοχείων Πίεσης

2.2.1 Σχήμα δοχείων

Τα δοχεία πίεσης μπορούν θεωρητικά να έχουν οποιοδήποτε σχήμα αλλά αυτά που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι οι σφαίρες, οι κύλινδροι και οι κώνοι (Σχήμα.32). Ένας κοινός σχεδιασμός κυλινδρικού δοχείου για παράδειγμα αποτελείται από το κύριο μέρος του κυλίνδρου και τα πώματα που ονομάζονται και κεφαλές (ημισφαιρικές ή κοίλες). Θεωρητικά τα σφαιρικά δοχεία πίεσης έχουν διπλάσια δύναμη έναντι των κυλινδρικών για δεδομένο πάχος τοιχώματος κι αυτό γιατί έχουν ιδανικό σχήμα για να διατηρήσουν την εσωτερική πίεση. Μεγάλο όμως μειονέκτημα των σφαιρικών δοχείων είναι ότι είναι δύσκολα στην κατασκευή κι επομένως πιο

ακριβά. Γι' αυτό τελικά επιλέγονται τα κυλινδρικά δοχεία πίεσης. Αυτά μπορεί να είναι με ημι-ελλειπτικές κεφαλές ή με πώματα σε κάθε άκρο. Τέλος τα μικρότερα δοχεία πίεσης είναι κατασκευασμένα από ένα σωλήνα και δύο καλύμματα.



Σχήμα 32: Διάφορα σχήματα δοχείων πίεσης (wikipedia.org)

2.2.2 Δομικά Υλικά

Τα περισσότερα δοχεία πίεσης κατασκευάζονται από χάλυβα. Για την κατασκευή ενός κυλινδρικού ή σφαιρικού δοχείου πίεσης θα πρέπει τα εξαρτήματα έλασης και τα σφυρήλατα κομμάτια να συγκολληθούν μεταξύ τους. Μερικές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, που επιτυγχάνονται από την έλαση ή τη σφυρηλάτηση, θα μπορούσαν να επηρεαστούν αρνητικά από τη συγκόλληση, εκτός αν ληφθούν ειδικές προφυλάξεις. Εκτός από την επαρκή μηχανική αντοχή, τα ισχύοντα πρότυπα υπαγορεύουν τη χρήση του χάλυβα με υψηλή αντοχή στην κρούση, ιδιαίτερα για τα δοχεία που χρησιμοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε εφαρμογές όπου ο χάλυβας θα υποστεί διάβρωση, πρέπει να χρησιμοποιείται ειδικό ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό. Μερικά δοχεία πίεσης είναι δυνατόν να κατασκευαστούν και από σύνθετα υλικά με περιέλιξη νήματος, το οποίο συγκρατείται από πολυμερική μήτρα. Οι πιο διαδεδομένες ίνες για τέτοιες κατασκευές είναι οι ίνες γυαλιού και οι ίνες άνθρακα. Λόγω της πολύ υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό των ινών άνθρακα τα δοχεία αυτά μπορούν να είναι πολύ πιο ελαφριά, αλλά είναι πολύ πιο δύσκολο να κατασκευαστούν. Το σύνθετο υλικό τυλίγεται συνήθως γύρω από ένα μεταλλικό καλούπι, σχηματίζοντας ένα σύνθετο περιτυλιγμένο δοχείο πίεσης. Τέλος τα δοχεία πίεσης μπορεί επίσης να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα (PCV) ή άλλα υλικά τα

οποία είναι ευαίσθητα στην εφαρμογή τάσης όπως τα διάφορα πολυμερή σε δοχεία ανθρακούχων ποτών και ο χαλκός στις σωληνώσεις.

2.2.3 Σφαιρικό Δοχείο Πίεσης

Το συγκεκριμένο δοχείο πίεσης χρησιμοποιείται συνήθως για την αποθήκευση ρευστών υψηλής πίεσης. Τα δοχεία πίεσης σφαιρικής συμμετρίας δεν έχουν σημεία αδυναμίας καθώς έχουν ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην επιφάνειά τους τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Έχουν επίσης πολύ ισχυρή δομή, το μειονέκτημά τους όμως είναι ότι η κατασκευή τους είναι πολύ δαπανηρή. Μεγάλο πλεονέκτημα των συγκεκριμένων δοχείων είναι ότι έχουν μικρότερο εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου από οποιοδήποτε άλλου σχήματος δοχείο. Αυτό σημαίνει, τέλος, ότι η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται από το θερμό περιβάλλον στο υγρό στη σφαίρα, θα είναι μικρότερη από εκείνη για κυλινδρικά ή παραλληλεπίπεδα δοχεία αποθήκευσης.

2.2.4 Ασφάλεια

Για τους κανονισμούς της ασφάλειας το δοχείο πίεσης είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε πριν γίνει έκρηξη, να εμφανιστεί μια ρωγμή επιτρέποντας να διαφύγει η κάποια ποσότητα υγρού μειώνοντας ταυτόχρονα έτσι την πίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της καλλιέργειας μεγαλύτερης ρωγμής η οποία προκαλεί θραύση στην πίεση λειτουργίας. Πολλά πρότυπα δοχείων πίεσης απαιτούν τα δοχεία να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να υπάρχει διαρροή πριν την έκρηξη και αν δεν συμβαίνει αυτό τότε περνούν από πιο αυστηρές δοκιμές. Τέλος απαραίτητη είναι η χρήση βαλβίδων ασφαλείας ή βαλβίδων εκτόνωσης προκειμένου η πίεση να μην διαρρεύσει κατά την λειτουργία.

2.2.5 Χρήσεις

Τα δοχεία πίεσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών τόσο στη βιομηχανία όσο και στον ιδιωτικό τομέα. Εμφανίζονται σε αυτούς τους τομείς σαν βιομηχανικά δοχεία αποδοχής πεπιεσμένου αέρα και σαν οικιακές δεξαμενές αποθήκευσης ζεστού νερού. Άλλα παραδείγματα των δοχείων πίεσης είναι οι καταδυτικές μπουκάλες, οι θάλαμοι επανασυμπίεσης, οι πύργοι απόσταξης, οι αντιδραστήρες πίεσης, οι αυτόκλειστοι φούρνοι και πολλές άλλες δεξαμενές σε

εξορυκτικές επιχειρήσεις, τα δυλιστήρια πετρελαίου και οι πετροχημικές εγκαταστάσεις, οι δεξαμενές πυρηνικού αντιδραστήρα, οι δεξαμενές airbrake σιδηροδρομικών οχημάτων, οι δεξαμενές airbrake οδικού οχήματος και δοχεία αποθήκευσης για υγροποιημένα αέρια όπως η αμμωνία, το χλώριο και το υγραέριο (προπάνιο, βουτάνιο) [12], [13].

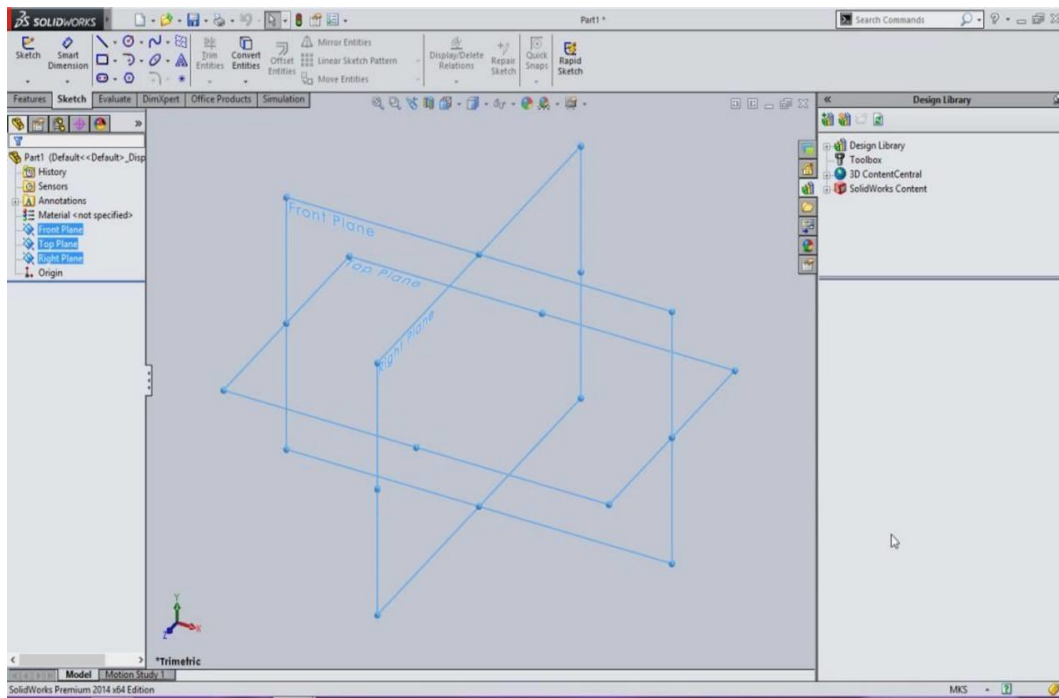
3 Σχεδιασμός και Κατασκευή Δεξαμενής Αποθήκευσης Πεπιεσμένου Αέρα

3.1 Εισαγωγή

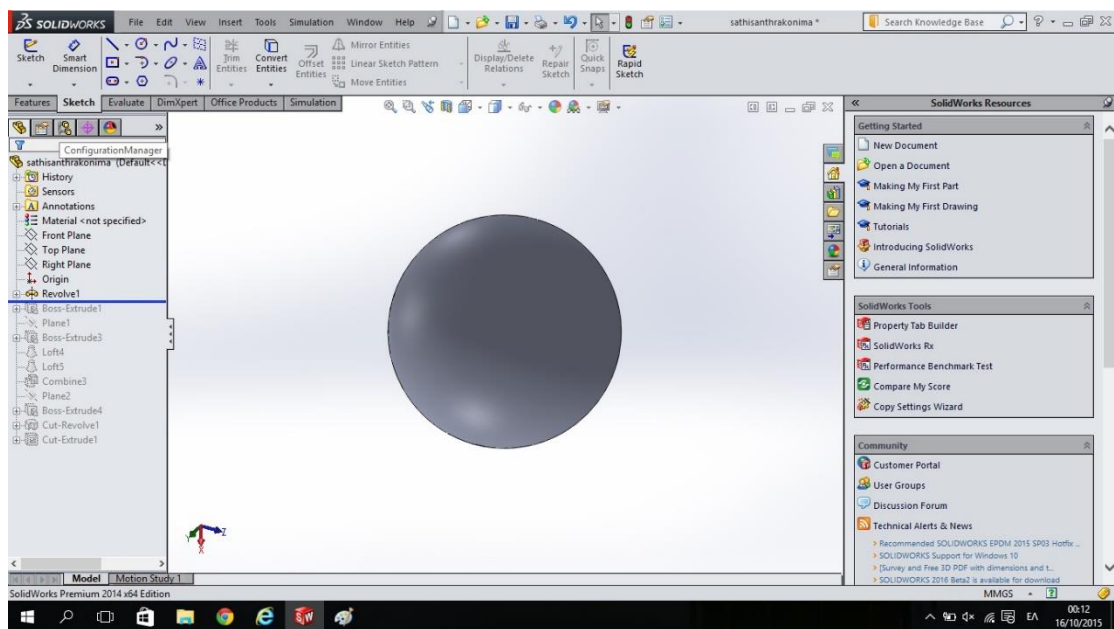
Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή της δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα από σύνθετο υλικό, που πραγματοποιήθηκε στην Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία (Ε.Α.Β) στον τομέα έρευνας και ανάπτυξης σύνθετων υλικών. Ο σχεδιασμός της κατασκευής έγινε με το πρόγραμμα σχεδιασμού CAD (Computer-aided design) Solidworks, είναι σφαιρικής συμμετρίας και χωρητικότητας 13 λίτρων. Αποτελεί πρότυπη κατασκευή καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα σχέδια. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε σύνθετο υλικό Carbon fiber Prepreg (προεμποτισμένο ανθρακόνημα) της εταιρείας HEXCEL με κωδικό όνομα HexPly M18-1 H MV, το οποίο είναι αεροδιαστημικών προδιαγραφών και έχει εξαιρετική αντοχή στον εφελκυσμό και στην κρούση, ελεγχόμενη ροή και είναι ιδανικό για εργασίες στον αυτόκλειστο φούρνο (Autoclave).

3.2 CAD-Solidworks

Ο σχεδιασμός της κατασκευής έγινε στο πρόγραμμα Solidworks. Συγκεκριμένα, το σχέδιο άρχισε με την επιλογή του επιπέδου, όπου μπορεί να είναι το top plane, το front plane και το right plane (Σχήμα.33). Στη συνέχεια με την εντολή sketch σχεδιάστηκε ο κύκλος σε επίπεδο δύο διαστάσεων (2D) και με την εντολή resolve ο κύκλος μετατράπηκε σε σφαίρα σε επίπεδο τριών διαστάσεων (3D) (Σχήμα.34).

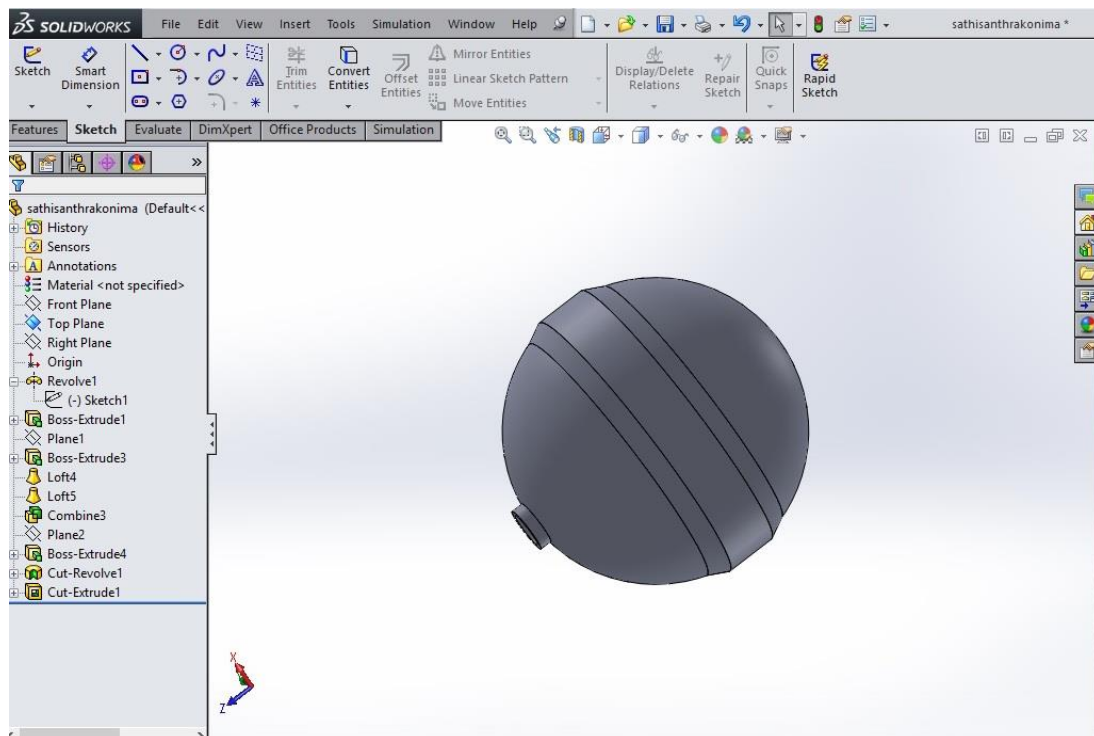


Σχήμα 33: Επιλογή επιπέδου σχεδίασης



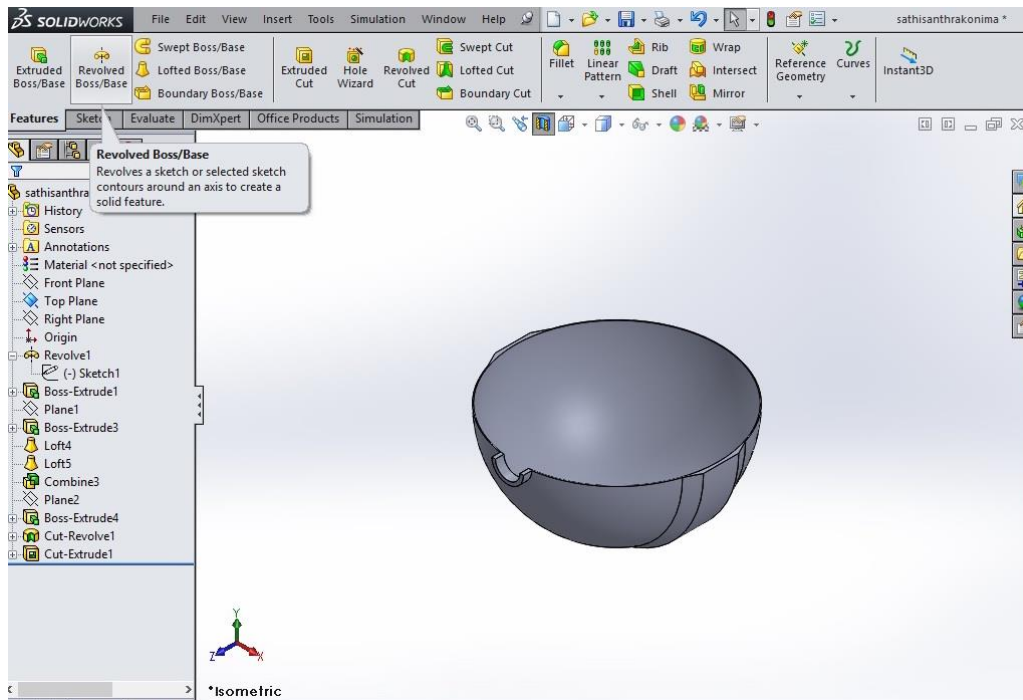
Σχήμα 34: Σφαίρα χωρίς σχεδιασμό "χείλους"

Με τις εντολές boss extrude δημιουργήθηκε το χείλος της ένωσης και με την εντολή loft έγινε ουσιαστικά πιο ομαλή η ένωση του χείλους με την υπόλοιπη κατασκευή. Λόγω του ότι το χείλος και η σφαίρα ήταν δύο διαφορετικά σώματα χρησιμοποιήθηκε η εντολή combine προκειμένου να γίνουν αυτά τα δύο ένα σώμα (one body) (Σχήμα.35).



Σχήμα 35: Τελικό σχέδιο κατασκευής

Τέλος χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές cut resolve και cut extrude για να δημιουργηθεί κενό στο εσωτερικό της σφαίρας και στη βάση της βαλβίδας αντίστοιχα (Σχήμα.36).



Σχήμα 36: Τομή και εσωτερικό κατασκευής

3.3 Ιδιότητες Χρησιμοποιούμενου Υλικού

Το HexPly M18 χρησιμοποιήθηκε για να πληρούνται οι απαιτήσεις των αεροδιαστημικών βιομηχανιών σε πρωτογενείς δομές με τυπικές διαδικασίες παραγωγής. Η μήτρα έχει βελτιωμένες ιδιότητες, οι οποίες επιτρέπουν το εύκολο στρώσιμο (lay-up) του υφάσματος στο καλούπι και δημιουργούν λεία επιφάνεια μετά από φινίρισμα. Το συγκεκριμένο υλικό έχει εξαιρετική απόδοση μέχρι τους 150°C αλλά είναι ιδανικό και μέχρι τους 180°C.

Τα οφέλη και χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού είναι τα εξής:

- Χαμηλή πυκνότητα μήτρας , η οποία προσφέρει εξοικονόμηση βάρους
- Εξαιρετική αντοχή και ανοχή στη βλάβη
- Χαμηλή πρόσληψη υγρασίας
- Απλός θερμικός κύκλος, ο οποίος δεν περιλαμβάνει διαδικασίες μετασκλήρυνσης
- Ιδανικό για χύτευση χαμηλών πιέσεων

Cured Matrix Properties (cured at 180°C)

		Method
Tensile strength	81.1 MPa	ISO R527 type 1
Tensile modulus	3.50 GPa	ISO R527 type 1
Tensile strain	3.7%	ISO R527 type 1
Poisson's ratio	0.38	ISO R527 type 1
Flexural strength	140 MPa	ISO 178
Flexural modulus	2.86 GPa	ISO 178
Compression strength	373 MPa	ISO 604
Toughness K_{1C}	0.89 MPa \sqrt{m}	Tested in accordance with
Toughness G_{1C}	193 J/m ²	EGF Task Group on Polymers and Composites protocol.
Glass transition temperature (T _g)	198°C	DMTA
Cured density	1.16 g/cm ³	
Vol. shrinkage	1.12%	

Prepreg Storage Life

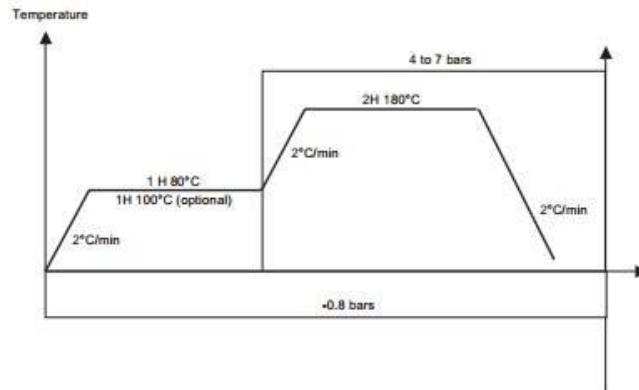
■ Tack Life	@ 23°C	30 days (processing out life @ 23°C, 40 days)
■ Guaranteed Shelf Life	@ -18°C	12 months

Πίνακας 3: Ιδιότητες υλικού μήτρας [14]

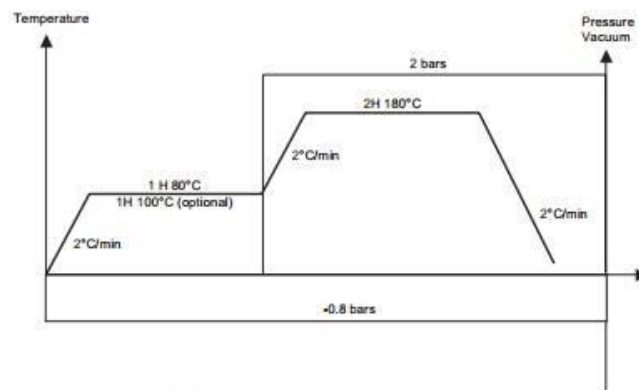
Το prepreg υλικό που χρησιμοποιήθηκε ανάλογα με την εφαρμογή που θα έχει μπορεί να μορφοποιηθεί βάση τριών θερμικών κύκλων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 37.

Curing Conditions

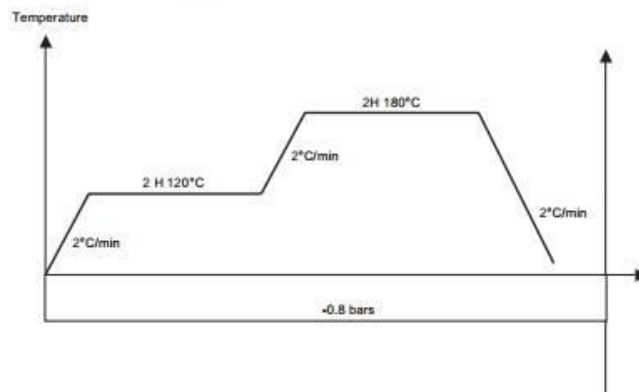
Monolithic Parts (autoclave)



Sandwich parts (autoclave)



Vacuum bag cycle (monolithic and sandwich parts):



Σχήμα 37: Τύποι θερμικών κύκλων ανάλογα το χρησιμοποιούμενο υλικό [14]

3.4 Διαδικασία Κατασκευής

Η δεξαμενή είναι σφαιρικής συμμετρίας και αποτελείται από δύο ημισφαίρια τα οποία έχουν συνδεθεί μεταξύ τους με τη διαδικασία του co-bonding. Στα δύο αυτά μέρη έχει ακολουθηθεί η ίδια τεχνική παρασκευής με τη μόνη διαφορά ότι στο δεύτερο ημισφαίριο προστέθηκε η βαλβίδα (χαλύβδινο πάμα) διοχέτευσης του αεριού. Η διαδικασία κατασκευής περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Προετοιμασία και κατασκευή καλουπιού
- Διαδικασία lay-up
- Μορφοποίηση σύνθετου υλικού
- Διαδικασία bonding

3.4.1 Προετοιμασία και Κατασκευή καλουπιού

Για καλούπι χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή αποθήκευσης οξυγόνου του πιλότου από αεροσκάφος τύπου A-7. Η συγκεκριμένη δεξαμενή είναι ορειχάλκινη, η οποία έχει παρόμοιο θερμικό κύκλο με αυτόν του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς δεν υπήρξαν προβλήματα στις διαστολές και τις συστολές του υλικού κατά το ψήσιμο. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε γιατί δεν υπήρχε η δυνατότητα σχεδίασης καλουπιού εξαρχής και κόπηκε σε δύο ημισφαίρια τα οποία όταν συνδεθούν, δημιουργούν την δεξαμενή δεκατριών λίτρων που επιθυμείται. Τα δύο μέρη του καλουπιού τροχίστηκαν για να πάρουν τις επιθυμητές διαστάσεις και προκειμένου να είναι έτοιμα για την διαδικασία του lay-up πέρασαν από αμμοβολή και χημική διεργασία. Με την αμμοβολή και τη χημική προσβολή αφαιρέθηκε εξ' ολοκλήρου το χρώμα που είχε η δεξαμενή (Σχήμα.38), το οποίο μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην κόλληση του υφάσματος κατά το ψήσιμο, καθώς επίσης απομακρύνθηκαν και τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να είχε η επιφάνεια του καλουπιού. Μετά τον καθαρισμό της, η επιφάνεια του καλουπιού καλύφθηκε με αποκολλητικό (Loctite 700-NC Frecote) έτσι ώστε μετά το ψήσιμό να είναι εύκολη η αποκόλληση της σύνθετης κατασκευής (Σχήμα.39).



Σχήμα 38: Καλούπι κατασκευής



Σχήμα 39: Αποκολλητικό και καλούπι μετά τη διαδικασία αφαίρεσης του χρώματος

Το αποκολλητικό χρησιμοποιήθηκε με πολύ προσοχή λόγω του ότι αποτελεί καρκινογόνα ουσία με τη βοήθεια πανιού, ενώ η χρήση γαντιών και μάσκας ήταν απαραίτητη. Το Frekote επαλείφθηκε σε όλη την επιφάνεια και των δύο μερών από τρεις φορές με διάλειμμα 20 λεπτών κάθε φορά προκειμένου να στεγνώσει πριν επαλειφθεί ξανά. Αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να αποκολληθεί το ύφασμα και να γίνει λεία η από μέσα επιφάνεια της κατασκευής. Τέλος, λόγω του ότι το καλούπι ήταν αρσενικό η εξωτερική επιφάνεια της σύνθετης κατασκευής δεν ήταν δυνατό να γίνει λεία γι' αυτό και στο τέλος της κατασκευής καλύφθηκε με βερνίκι.

3.4.2 Διαδικασία lay-up (Στρώσιμο Σύνθετου υλικού)

Αρχικά τα υφάσματα Carbon Fiber Prepreg αφήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για να ξεπαγώσουν καθώς φυλάσσονται σε καταψύκτες με θερμοκρασία -23°C . Μόλις ξεπάγωσαν άρχισε η διαδικασία του lay-up σε καθαρό χώρο, κατά την οποία έγινε μελέτη της επιφάνειας του καλουπιού και το ύφασμα κόπηκε στις επιθυμητές διαστάσεις (Σχήμα.40). Στη συνέχεια, άρχισε η τοποθέτηση των στρώσεων κατά το τρόπο που φαίνεται στον πίνακα 4 λαμβάνοντας ένα σημείο αναφοράς. Κάθε μία στρώση γίνονταν prevacuum με σκοπό την ολική αφαίρεση του αέρα ανάμεσα στις στρώσεις. Με αυτόν τρόπο εξαλείφονται και οι τυχόν ατέλειες που έχουν δημιουργηθεί στην επιφάνεια.



Σχήμα 40: Ύφασμα κομμένο στις επιθυμητές διαστάσεις

Πίνακας 4: Πλάνο διαδικασίας επίστρωσης καλουπιού (stacking sequence table)

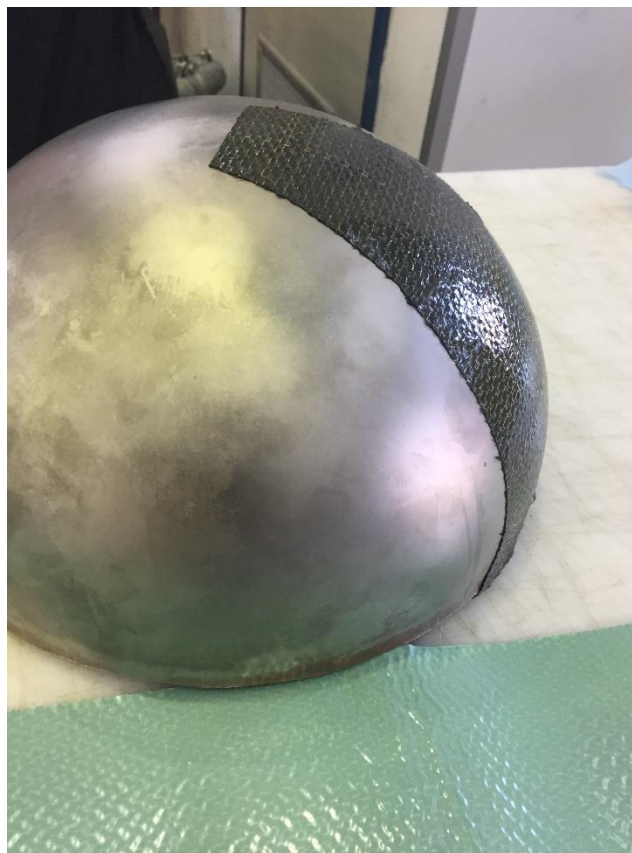
Sequence	Material	Ply (τραπεζίων)	Z1	Ply (κυκλικού)	Z1	Ply (λωρίδας)	Z1
Sequence 1	HexPly M18-1 HMV	Ply 1	0°/90°	Ply 1	0°/90°		
Sequence 2	HexPly M18-1 HMV	Ply 2	45°/-45°	Ply 2	90°/0°		
Sequence 3	HexPly M18-1 HMV	Ply 3	-45°/45°	Ply 3	0°/90°		
Sequence 4	HexPly M18-1 HMV	Ply 4	90°/0°	Ply 4	90°/0°	Ply 1	90°/0°
Sequence 5	HexPly M18-1 HMV	Ply 5	45°/-45°	Ply 5	0°/90°	Ply 2	0°/90°
Sequence 6	HexPly M18-1 HMV	Ply 6	-45°/45°	Ply 6	90°/0°	Ply 3	90°/0°
Sequence 7	HexPly M18-1 HMV	Ply 7	0°/90°	Ply 7	0°/90°	Ply 4	0°/90°
Sequence 8	HexPly M18-1 HMV	Ply 8	45°/-45°	Ply 8	90°/0°	Ply 5	90°/0°
Sequence 9	HexPly M18-1 HMV	Ply 9	-45°/45°	Ply 9	0°/90°	Ply 6	0°/90°
Sequence 10	HexPly M18-1 HMV	Ply 10	90°/0°	Ply 10	90°/0°		

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα πραγματοποιήθηκαν συνολικά δέκα στρώσεις από ύφασμα σε σχήμα τραπεζίου, δέκα στρώσεις από ύφασμα σε σχήμα κυκλικό και έξι στρώσεις από ύφασμα σε σχήμα λωρίδας. Συγκεκριμένα, η διαδικασία του lay-up ξεκίνησε με το στρώσιμο των υφασμάτων ανθρακονήματος με σχήμα τραπεζίου (Σχήμα.41), όπου το ένα κομμάτι διαδέχονταν το άλλο κυκλικά ξεκινώντας από ένα σημείο αναφοράς. Σε κάθε στρώση χρησιμοποιούνταν επτά κομμάτια κατά μέσο όρο τα οποία συνδέονταν μεταξύ τους με overlap, καλύπτοντας δηλαδή το ένα το άλλο κατά 2,5cm. Το overlap γίνεται προκειμένου να υπάρχει καλύτερη συγκράτηση μεταξύ των υφασμάτων και κάθε φορά θα πρέπει να γίνεται σε διαφορετικό σημείο. Στη συνέχεια, μετά την εκάστοτε στρώση των τραπεζίων τοποθετούνταν και το κυκλικό κομμάτι στην κορυφή του καλουπιού για να καλύπτει το κενό που δημιουργείται από τα τραπέζια. Από την τέταρτη στρώση και μετά άρχισε να τοποθετείται και λωρίδα υφάσματος με μοναδικό σκοπό να δημιουργήσει χείλος έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η σύνδεση των δύο κομματιών, μετά το ψήσιμό τους, κατά τη διαδικασία του co-bonding που θα αναλυθεί μετέπειτα.

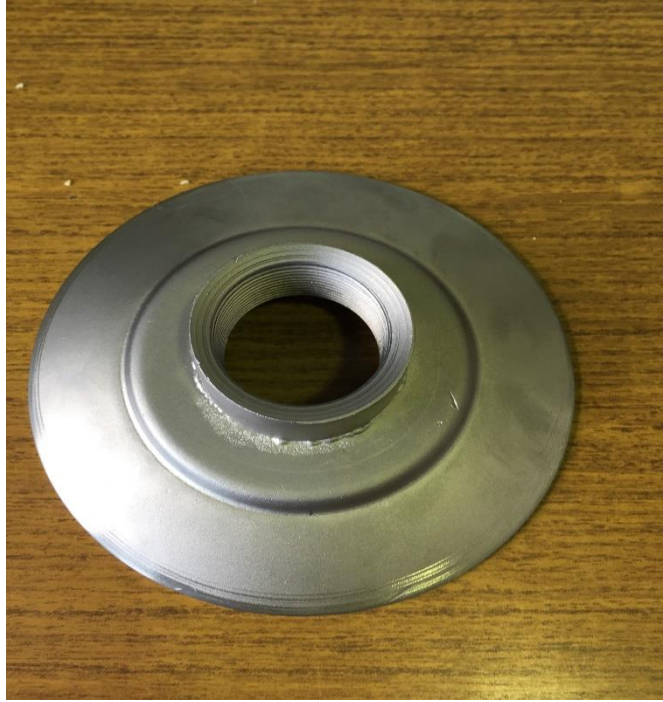
Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4 όλα τα υφάσματα δεν τοποθετήθηκαν τυχαία. Το carbon fiber prepreg που χρησιμοποιήθηκε ήταν διπλής διεύθυνσης με τον άξονα z1 να συμβολίζει τον κύριο άξονα διεύθυνσης του υφάσματος. Όσον αφορά τα τραπέζια, στην 1^η και 7^η στρώση η διεύθυνση των ινών είναι 0°/90° με κύρια διεύθυνση τις 0° όπου αρχικά ήταν ο κάθετος άξονας στο σημείο αναφοράς ενώ στην 4^η και 10^η η διεύθυνση των ινών είναι 90°/0° με κύρια διεύθυνση τις 90°. Στην 2^η, 5^η, 8^η στρώση η διεύθυνση των ινών είναι 45°/- 45° με κύρια διεύθυνση τις 45° ενώ στην 3^η, 6^η, 9^η η

διεύθυνση των ινών είναι $-45^{\circ}/45^{\circ}$ με κύρια διεύθυνση τις -45° . Στις λωρίδες και τα κυκλικά κομμάτια το μόνο που άλλαζε κάθε φορά ήταν ο κάθετος άξονας. Τέλος όλη αυτή η μελέτη για τη διεύθυνση των ινών έγινε για να υπάρχει καλύτερη κατανομή των τάσεων κατά τη δοκιμή θραύσης της κατασκευής.

Η ίδια διαδικασία lay-up ακολουθήθηκε και στο δεύτερο ημισφαίριο με τη μόνη διαφορά ότι μετά την 2^η στρώση τοποθετήθηκε η χαλύβδινη βάση της βαλβίδας διοχέτευσης του αερίου (Σχήμα.42). Με αυτήν την τεχνική υπήρξε μηχανική συγκράτηση του πώματος και ήταν αδύνατον να προκαλέσει ρήγμα στην κατασκευή.



Σχήμα 41: Έναρξη διαδικασίας lay-up/ 1η στρώση



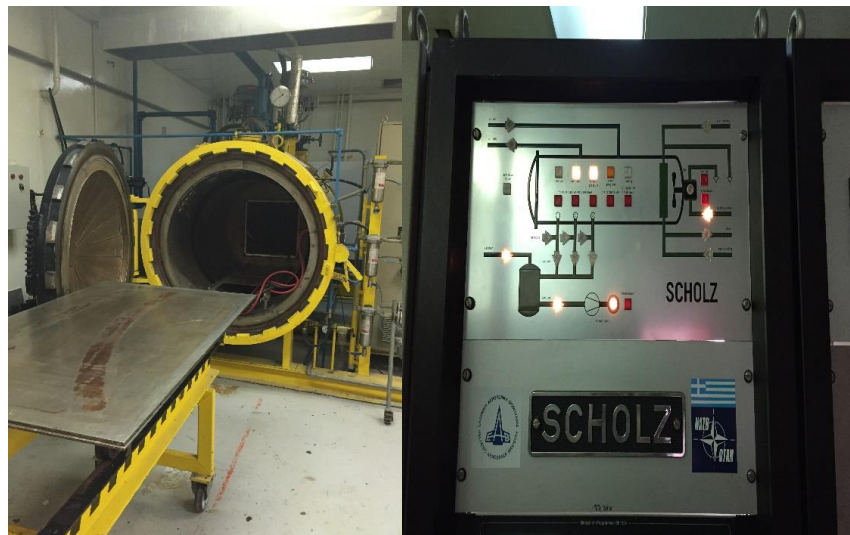
Σχήμα 42: Χαλκιδινη βάση βαλβίδας



Σχήμα 43: Ολοκληρωμένη φάση διαδικασίας lay-up

3.4.3 Μορφοποίηση Σύνθετου Υλικού (Autoclave)

Μετά το πέρας της διαδικασίας του lay-up, το καλούπι εισήλθε στον αυτόκλειστο φούρνο (autoclave Σχήμα.44). Το autoclave είναι της γερμανικής εταιρίας Scholz.



Σχήμα 44: Autoclave εταιρείας E.A.B

Συγκεκριμένα, για να μπορέσει το καλούπι να μπει στο φούρνο περνά μία διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά:

- **Σακούλα**

Χρησιμοποιείται για την δημιουργία πλήρους κενού. Στην παρούσα κατασκευή χρησιμοποιήθηκε σακούλα υψηλών θερμοκρασιών, η οποία όμως έχει μεγάλο κόστος.



Σχήμα 45: Σακούλα vacuum

- **Peel Ply**

Τοποθετήθηκε μια στρώση peel ply πάνω από την τελευταία στρώση του υφάσματος. Το peel ply δεν μένει πάνω στην κατασκευή αλλά αφαιρείται μετά το πέρας του ψησίματος. Αυτή η στρώση αφήνει πάνω στο κομμάτι μια λεία, φινιρισμένη επιφάνεια, η οποία δεν χρειάζεται περαιτέρω λείανση. Το κομμάτι επίσης προστατεύεται από την μόλυνση της ατμόσφαιρας με τυχόν σκόνες. Το peel ply επίσης απορροφά την αποβολή ρητίνης από το ύφασμα και εμποδίζει την επαφή της με το breather.



Σχήμα 46: Peel ply

- **Ύφασμα αποκόλλησης (Release film)**

Σε κάθε υλικό που πολυμερίζεται μέσα σε καλούπι, χρησιμοποιείται ένα αποκολλητικό μέσο. Στη συγκεκριμένη κατασκευή προκειμένου να μην κολλήσει το breather πάνω στο καλούπι χρησιμοποιήθηκε ύφασμα αποκόλλησης το οποίο τοποθετήθηκε πάνω από το peel ply.



Σχήμα 47: Release film

- **Ύφασμα αναπνοής (Breather)**

Το υλικό αυτό είναι σαν "κουβέρτα" το οποίο μπαίνει ανάμεσα στο κομμάτι και στην σακούλα και είναι απαραίτητο για την δημιουργία του πλήρους κενού.



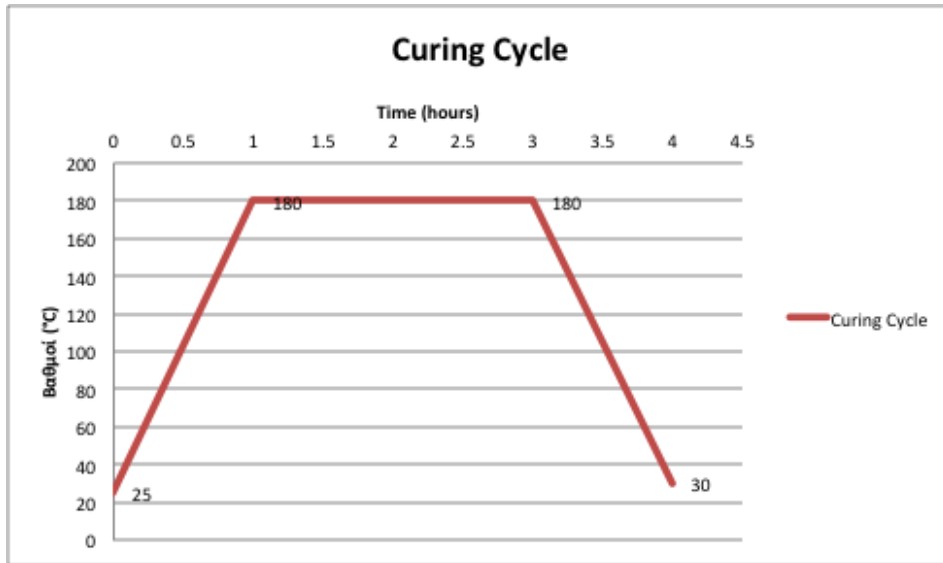
Σχήμα 48: Breather

- **Ταινία κόλλησης (Sealant tape)**

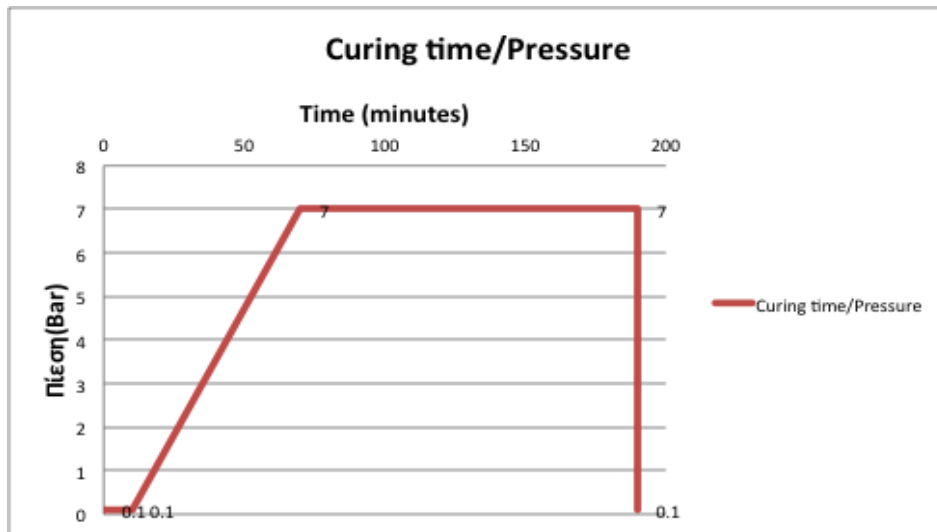
Η ταινία κόλλησης χρησιμοποιήθηκε για να στεγανοποιήσει το κομμάτι. Τοποθετείται δηλαδή ανάμεσα στην μεταλλική βάση και στη σακούλα. Εδώ πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι για πλήρη στεγανοποίηση θα πρέπει η ταινία κόλλησης να τοποθετείται πολύ προσεχτικά για να μην υπάρχουν πόροι απ' όπου μπορεί να διαφύγει ο αέρας.

3.4.3.1 Ανάλυση Διαδικασίας Μορφοποίησης

Οι συνθήκες ψήσιματος ήταν 180°C υπό πίεση 7 bar ενώ στην κατασκευή γινόταν και ταυτόχρονο vacuum. Το ψήσιμο διήρκτησε 4 ώρες . Μία ώρα χρειάστηκε για να φτάσει στους 180° C η κατασκευή, έπειτα παρέμεινε 2 ώρες στους 180° C και τέλος αποψύχθηκε για άλλη μια ώρα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα. Η σειρά με την οποία τοποθετούνται τα παραπάνω αναλώσιμα υλικά είναι η εξής: Πρώτα τοποθετείται vacuum bag μετά ύφασμα real ply (πράσινο) για να απορροφήσει την αποβολή της ρητίνης από το υλικό και από επάνω τοποθετείται ύφασμα release film για να μην κολλήσει το καλούπι πάνω στο breather.



Σχήμα 49: Θερμικός Κύκλος autoclave



Σχήμα 50: Curing time/pressure

Μετά το ψήσιμο, λόγω του ότι το καλούπι είναι αρσενικό, από μέσα η κατασκευή προκύπτει λεία ενώ απ' έξω ματ που οφείλεται στο real ply (Σχήμα.51). Τέλος, τα δύο καλούπια ψήθηκαν με ακριβώς τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 51: Εσωτερική επιφάνεια κατασκευής (αριστερά), εξωτερική επιφάνεια κατασκευής (δεξιά)

3.4.4 Διαδικασία Bonding

Μετά τη διαδικασία στρωσίματος και ψησίματος των δύο ημισφαιρίων ήταν αναγκαία η κοπή του κάτω μέρους τους με τροχό, καθώς και η λείανσή τους προκειμένου να μπορέσουν να εφαρμόσουν όσο το δυνατό καλύτερα και να επέλθει η κόλληση. Εδώ αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι για να είναι τέλεια η επαφή των δύο κομματιών πάρθηκαν σημεία αναφοράς κι έτσι ξεκίνησε η διαδικασία του bonding (Σχήμα.52).



Σχήμα 52: Σημεία αναφοράς για την έναρξη της διαδικασίας bonding

Υπάρχουν κυρίως τρία είδη bonding, τα οποία είναι τα εξής:

1. **Co-Bonding**: Co-bonding γίνεται αφότου έχουν ψηθεί τα δύο κομμάτια που προορίζονται για την ένωση με στρώσιμο επιπλέον υφάσματος σύνθετου υλικού στην ένωση.
2. **Secondary Bonding**: Για τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι απαραίτητη η χρήση εποξικής κόλλας, η οποία τοποθετείται στην ένωση των κομματιών προτού τα ήδη ψημένα κομμάτια ξαναμπούν για ψήσιμο για να στερεοποιηθεί η κόλλα.

3. **Co-Curing Bonding:** Στο Co-Curing τοποθετείται η κόλλα προτού τα δύο κομμάτια ψηθούν, όποτε γίνεται ψήσιμο ταυτόχρονα της κόλλας και του καλουπιού με στόχο να γίνουν ένα σώμα.

Στη συγκεκριμένη κατασκευή επιλέχθηκε αρχικά το secondary bonding με χρήση ειδικής κόλλας για αεροπορικές προδιαγραφές (EC-1648-A/B) (Σχήμα.53). Η ρητίνη αυτή αποτελείται από την βάση Β και τον σκληρυντή Α, που αναμειγνύονται με αναλογία 3/2. Το μείγμα αυτό απλώθηκε στην ένωση των τροχισμένων επιφανειών των δύο ημισφαιρίων. Έπειτα με βοήθεια επιβολής βάρους (Σχήμα.54) τα δύο ημισφαίρια ήρθαν σε επαφή κι έτσι εμφανίστηκε η περίσσεια της κόλλας, η οποία απλώθηκε εκ νέου. Τέλος η κατασκευή μπήκε στο φούρνο για μία ώρα σε θερμοκρασία 150 °C βάσει προδιαγραφών προκειμένου η κόλλα να στερεοποιηθεί πλήρως.



Σχήμα 53: Εφαρμογή κόλλας στην επιφάνεια του χείλους της κατασκευής



Σχήμα 54: Επιβολή βάρους για στερεοποίηση της κόλλας πριν την εισαγωγή στον φούρνο

Μετά το ψήσιμο με την κόλλα ξεκίνησε η διαδικασία του co-bonding όπου τοποθετήθηκαν άλλες 5 στρώσεις από ύφασμα carbon fiber prepreg πλάτους 7cm περίπου πάνω στα χείλη που είχαν δημιουργηθεί από τις λωρίδες. Κατά τη στρώση των συγκεκριμένων υφασμάτων έγινε πάλι overlap για περαιτέρω κράτηση. Μετά το στρώσιμο ψήθηκε πάλι όλη η κατασκευή στον αυτόκλειστο φούρνο στους 180°C υπό πίεση 7 bar. Τέλος μετά το ψήσιμο η κατασκευή καλύφθηκε με μια στρώση από βερνίκι καθαρά για οπτικούς λόγους προσδίδοντας στην κατασκευή μόνο 10 g (Σχήμα 55).



Σχήμα 55: Τελική μορφή κατασκευής

3.5 Χαρακτηριστικά Κατασκευής

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Κατασκευής

Υλικό Κατασκευής	HexPly M18-1 HMV
Υλικό βάσης Βαλβίδας	Χάλυβας
Εσωτερική Διάμετρος Σφαίρας	310.4 mm
Εξωτερική Διάμετρος Σφαίρας	315.1 mm
Όγκος	13 lt
Βάρος	2,043kg
Πάχος Τοιχώματος Σφαίρας	3,3mm
Πάχος Τοιχώματος Σφαίρας στην Ένωση	4,7mm

4 Διαδικασία Υδραυλικής Δοκιμής της Κατασκευής

4.1 Εισαγωγή

Ορισμός: Υδραυλική δοκιμή είναι η διαδικασία επανελέγχου που πραγματοποιείται σε δοχεία πίεσης προκειμένου να ελεγχθεί η αντοχή τους.

Ο σκοπός αυτών των διαδικασιών είναι να εξασφαλισθεί το γεγονός ότι οι δοκιμές πίεσης διεξάγονται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Οι δοκιμές πίεσης εκτελούνται για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, αξιοπιστία, και η στεγανότητα των συστημάτων πίεσης. Η δοκιμή πίεσης είναι απαραίτητη για ένα δοχείο ή μια δεξαμενή πριν τη χρήση. Υπάρχουν δύο μέθοδοι για δοκιμές πίεσης: η υδροστατική και η πνευματική. Η υδροστατική δοκιμή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας νερό ως το μέσο δοκιμής, ενώ μια πνευματική δοκιμή πεπιεσμένου αέρα χρησιμοποιεί αέρα, άζωτο, ή οποιοδήποτε μη-εύφλεκτο και μη τοξικό αέριο.

Οι δοκιμές πίεσης πρέπει να γίνονται πάντα υπό ελεγχόμενες συνθήκες, σύμφωνα με εγκεκριμένο σχέδιο δοκιμών και να τεκμηριώνονται σε μια εγγραφή δοκιμασίας.

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική δοκιμή καθώς το συγκεκριμένο δοχείο βάσει προδιαγραφών κατατάσσεται στην κατηγορία επικινδυνότητας 3 με όριο κατηγοριών το 4, συνεπώς το συγκεκριμένο δοχείο πίεσης ανήκει σε υψηλή κατηγορία επικινδυνότητας. Με την υδραυλική δοκιμή του λοιπόν εξασφαλίζεται η αντοχή του στην καθημερινή επιβολή πίεσης [15], [16].

4.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Δοκιμής

Πριν αρχίσει η διαδικασία της υδραυλικής δοκιμής το δοχείο ελέγχθηκε βάσει προτύπων ασφαλείας που ορίζει η Ευρωπαϊκή Ένωση. Συγκεκριμένα, με οπτικό έλεγχο αναζητήθηκαν επιφανειακές ατέλειες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβλήματα κατά τον έλεγχο. Έπειτα με φακό ελέγχθηκε το εσωτερικό για την ύπαρξη πόρων ενώ όταν το δοχείο γέμιζε με νερό αφέθηκε για λίγο χρόνο προκειμένου να παρατηρηθούν τυχόν διαρροές.

Μετά την παραπάνω διαδικασία το δοχείο πίεσης συνδέθηκε με μανόμετρο (Σχήμα.56) της εταιρείας WIKA το οποίο έχει δυνατότητα μέτρησης έως 600 bar. Το

συγκεκριμένο μανόμετρο είναι διακριβωμένο στις 7/9/2015 με βάση τα Ελληνικά πρότυπα οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

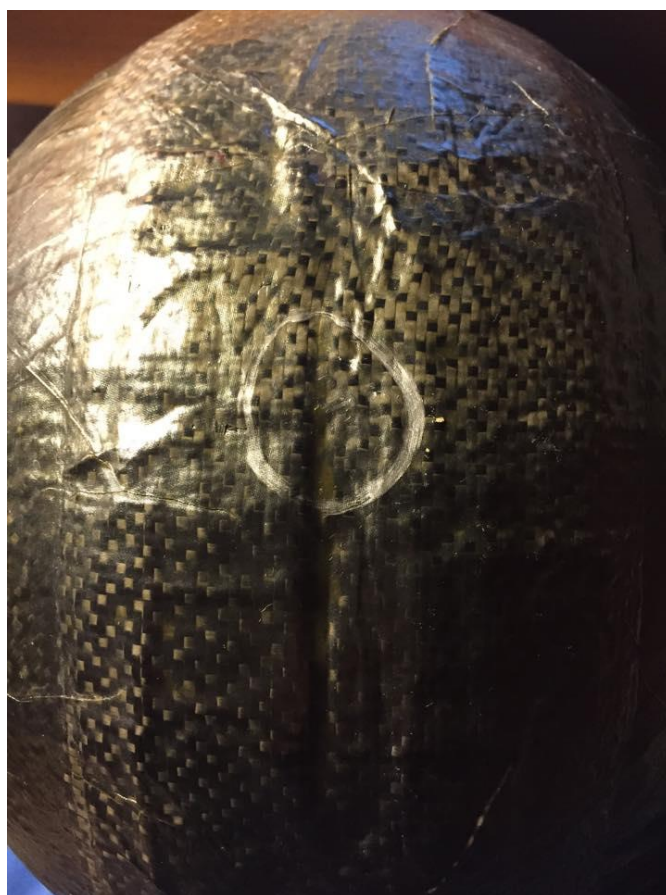


Σχήμα 56: Δοχείο πίεσης συνδεδεμένο με την παροχή αέρα για την επιβολή πίεσης

Για ελεγχόμενη δοκιμή υπήρξε επιβολή πίεσης ανά 5bar και γινόταν οπτικός έλεγχος του δοχείου για τυχόν διαρροές ή διαστολή αυτού προκειμένου να συνεχιστεί η διαδικασία. Η πίεση στην οποία παρατηρήθηκε η πρώτη αστοχία ήταν στα 15bar κοντά στην ένωση των δύο κομματιών με μορφή μονής φυσαλίδας και βάσει προτύπων και κανόνων ασφαλείας η υδραυλική δοκιμή σταμάτησε.

5 Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

Το δοχείο πίεσης εμφάνισε αστοχία σε πολύ μικρότερη τιμή πίεσης από την αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, στόχος ήταν το δοχείο να λειτουργεί στα 10bar που σημαίνει ότι θα έπρεπε να αντέχει περίπου σε σταθερή πίεση 30bar για χρόνο 10 λεπτών. Η αστοχία εμφανίστηκε κοντά στην ένωση (συγκόλληση των δύο καλουπιών) (Σχήμα.57) με τη μορφή μονής φυσαλίδας, όπου το υγρό άρχισε να διαρρέει από τους πόρους που είχαν δημιουργηθεί.



Σχήμα 57: Ένδειξη αστοχίας και εμφάνισης πόρου στην κατασκευή

Οι πόροι αυτοί προφανώς έχουν σχηματιστεί από το εσωτερικό της κατασκευής κι από εκεί το υγρό βρήκε δίοδο να διαφύγει προς τα πάνω. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην ένωση από το co-bonding αλλά και λόγω της εποξικής κόλλας που χρησιμοποιήθηκε, η οποία είναι ευαίσθητη σε υδάτινο περιβάλλον, στο οποίο έγινε η δοκιμή. Ένας άλλος λόγος της αστοχίας μπορεί να είναι και το κακό curing της κόλλας κατά το secondary bonding όπως και η κακή ανάμειξη της ρητίνης με τον σκληρυντή. Είναι σίγουρο επίσης ότι η αντοχή στην ένωση αναμενόταν να είναι πολύ

μικρότερη από την υπόλοιπη κατασκευή καθώς στο συγκεκριμένο τμήμα χρησιμοποιήθηκαν μόνο πέντε στρώσεις υφάσματος πάνω από την κόλλα. Στο υπόλοιπο μέρος της κατασκευής δεν φάνηκε να υπήρξε διαρροή.

Για την αποφυγή της αστοχίας, αυτό που θα έπρεπε να συμβεί είναι να μην είχε χρησιμοποιηθεί καλούπι σε διαιρετά μέρη για να αποφευχθεί η ένωσή τους, απ' όπου άρχισε η διαρροή. Συνήθως σε σφαιρικής ή κυλινδρικής συμμετρίας κατασκευές χρησιμοποιείται ένα πολυμερικό καλούπι με αέρα, πάνω στο οποίο στρώνεται το ύφασμα και μετά το ψήσιμο αφαιρείται με έλξη από το κενό που έχει αφεθεί. Εκ του αποτελέσματος θα έπρεπε να υπήρχαν περισσότερες από πέντε στρώσεις στην ένωση παρά το γεγονός ότι στο πρόγραμμα προσομοίωσης ANSYS, με υποδεέστερο σύνθετο υλικό, το δοχείο φάνηκε να αντέχει σε επιβολή μεγαλύτερης πίεσης. Με τις περισσότερες στρώσεις θα αυξανόταν το πάχος του τοιχώματος της κατασκευής και επομένως και η αντοχή του. Θα έπρεπε ακόμη να υπήρχε μεγαλύτερη επιφάνεια χείλους προκειμένου η μηχανική συγκράτηση να ήταν αποτελεσματικότερη. Τέλος, μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στον καθαρισμό και τη λείανση της επιφάνειας του καλουπιού έτσι ώστε να μην υπάρχουν ατέλειες, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν αργότερα προβλήματα, κατά το στρώσιμο των υφασμάτων.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf.
- [2] Δ. Μουζάκης, Γ. Παπανικολάου, «Σύνθετα Υλικά», Αθήνα: Κλειδάριθμος, 2007.
- [3] Ε. Κόλλια, «Περιβαλλοντική γήρανση σε ακραίες θερμοοξειδωτικές ή/και υγροθερμικές συνθήκες ινωδών σύνθετων υλικών κυανοεστερικής μήτρας. Θερμομηχανικός χαρακτηρισμός και αρχική μελέτη των μηχανισμών υποβάθμισης του υλικού», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
- [4] Δ. Καστάνης, «Παρασκευή και χαρακτηρισμός ενισχυτικών νανοδομών και πολυμερών σύνθετων υλικών βασισμένων στους νανοσωλήνες άνθρακα», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [5] Ε. Καβελάκης, «Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα», Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010.
- [6] W.D. Callister, «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών», Θεσσαλονίκη: Τζιόλα, 2004.
- [7] Δ. Παντελής, «Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά: Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές», Αθήνα: Παπασωτηρίου, 1996.
- [8] Κ. Παναγιώτου, «Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών», τόμ. 2, Αθήνα: Πήγασος, 2000.
- [9] Μ.-Ε. Μητρούση, «Μελέτη της μεταβολής της απόσβεσης πολυμερικών και σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοσωματιδίων», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [10] Α. Γκότης, «Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών», Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.
- [11] Α. Καλίνη, «Διηλεκτρική Απόκριση Σύνθετων Συστημάτων Ελαστομερικής Μήτρας-Ανόργανων Νανο-σωματιδίων», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [12] <http://www.techbriefs.com/component/content/article/ntb/tech-briefs/manufacturing-and-prototyping/747>.
- [13] D. Fryers and J. Harvey, «High Pressure Vessels», Springer, 1998.

- [14] www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M18_eu.pdf.
- [15] www.fastservice.gr/index.php/pyrasfaleia/anagomosh-synthrhsh-pyrosbesthron/view/productdetails/virtuermart_product_id/164/virtuermart_category_id/35.
- [16] www.group.slac.stanford.edu/esh/eshmanual/references/pressureProcedtest.pdf.
- [17] Κ. Μπέλτσιος, «Επιστήμη και Τεχνολογία Σύνθετων Υλικών», Θεσσαλονίκη: Τζιόλα, 2004.