



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΦΙΑΛΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Γ. ΨΑΡΡΟΣ

Επιβλέπων: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΦΥΑΛΗΣ
ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΠΟ
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ Γ. ΨΑΡΡΟΣ

Επιβλέπων: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 20/10/2015

Χριστοφόρου Ευάγγελος, Καθηγητής

Μητσούλης Ευάγγελος, Καθηγητής

Τσετσέκου Αθηνά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, ο οποίος με βοήθησε καθοριστικά με τις συμβουλές, τις υποδείξεις του και την άριστη επιστημονική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές, κ. Αθηνά Τσετσέκου και κ. Ευάγγελο Μητσούλη τόσο για την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, όσο και για τα μαθήματα που διδάσκουν στον Τομέα της Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, τις γνώσεις από τα οποία χρησιμοποίησα για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό της ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ (Ε.Α.Β) και ιδιαίτερα τον κ. Βασίλειο Στεργίου και όλη την επιστημονική ομάδα στο Ερευνητικό Εργαστήριο Προηγμένων Συνθέτων Υλικών για την άριστη συνεργασία και υποστήριξη κατά την κατασκευή του δοχείου αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Ευχαριστώ, επιπλέον, την εταιρεία EBETAM Α.Ε. τόσο για την πολύτιμη συνεργασία κατά την υδραυλική δοκιμή του δοχείου, όσο και για την ενημέρωση που μου προσέφερε σε θέματα πιστοποίησης που αφορούν τα δοχεία αποθήκευσης αέρα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Αρφαριώτη Ευστάθιο για τη βοήθειά του στην κατασκευή του δοχείου πίεσης, τον μεταπτυχιακό φοιτητή Σπυρίδωνα Αγγελόπουλο για το χρόνο που διέθεσε στη διόρθωση της εργασίας και την οικογένειά μου για τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην κατασκευή ενός πρότυπου κυλινδρικού δοχείου πίεσης από ανθρακονήματα. Παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής του και η υδραυλική δοκιμή στην οποία υπόκειται.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι αρχές των σύνθετων υλικών, τα χαρακτηριστικά τους και τα πεδία εφαρμογής τους. Παράλληλα, αναλύονται οι τεχνικές μορφοποίησης των προεμποτισμένων σύνθετων υλικών, καθώς και οι ιδιότητες και οι τομείς εφαρμογής αυτών.

Στην συνέχεια, γίνεται αναφορά στους τύπους και τις εφαρμογές των δοχείων πίεσης, δίνοντας βαρύτητα στα κυλινδρικά δοχεία και στις εφαρμογές τους στη βιομηχανία.

Στο πειραματικό μέρος, παρουσιάζεται λεπτομερώς όλη η διαδικασία κατασκευής του κυλινδρικού δοχείου, η οποία πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας, στο Ερευνητικό Εργαστήριο Προηγμένων Σύνθετων Υλικών και παρατίθενται όλες οι πληροφορίες και οι διαδικασίες που εκτελέστηκαν κατά την κατασκευή.

Τέλος, για να γίνει ο χαρακτηρισμός του δοχείου, ακολούθησε υδραυλική δοκιμή, με τη συμβολή της εταιρείας EBETAM A.E, η οποία και αναλύεται στο τελευταίο μέρος, μαζί με τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και τους προτεινόμενους εναλλακτικούς τρόπους κατασκευής.

ABSTRACT

This thesis focuses on the construction of a prototype cylindrical pressure vessel made of carbon fibers and presents the manufacturing procedure and the hydraulic test in which the vessel was subjected.

More specifically, the first part is dedicated to present the principles of the composite materials, alongside their characteristics and their application field. Furthermore, an analysis about the prepregs, their molding techniques, their properties and their applications is being presented.

On the second part, the types and the applications of the pressure vessels are mentioned, with a focus on the cylindrical pressure vessels and their industrial applications.

The experimental part of this thesis, presents, in detail, the manufacturing process of the cylindrical vessel, which was held in the facilities of HAI S.A. and all the related information and procedures which were used during the construction.

Finally, in order to characterize the properties and the tensile strength of the vessel, the hydraulic pressure test was conducted with the contribution of MIRTEC S.A. The results, the conclusions and the future directions are being presented at the last part of this thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ABSTRACT	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	VII
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	IX
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	X
1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	2
1.2.1 Πλαστική εποχή	2
1.2.2 Β' Παγκόσμιος Πόλεμος - Πρόωρη καινοτομία στα σύνθετα υλικά	3
1.2.3 Προσαρμογή σύνθετων υλικών στην καθημερινή ζωή	4
1.2.4 Αλματώδης πρόοδος για τα σύνθετα υλικά	4
1.2.5 Τα σύνθετα υλικά σήμερα και στο μέλλον.....	5
1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	5
1.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	8
1.5 ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (FIBER-REINFORCED COMPOSITES)	8
1.5.1 Ανθρακονήματα (Carbon fibers).....	11
1.5.2 Ίνες γυαλιού (Glass fibers).....	12
1.5.3 Οργανικές ίνες (Kevlar).....	13
1.6 ΣΥΝΔΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ- ΜΗΤΡΕΣ.....	13
1.6.1 Συνδετικά υλικά θερμική διαμόρφωσης (thermoset)	14
1.6.2 Θερμοπλαστικά συνδετικά υλικά (thermoplastic)	15
1.7 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΕΜΠΟΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ (PREPREG)	15
1.7.1 Τύποι προεμποτισμένων υφασμάτων.....	17
1.7.2 Ιδιότητες προεμποτισμένων σύνθετων υλικών.....	18
1.7.3 Μορφοποίηση προεμποτισμένων σύνθετων υλικών.....	19
1.8 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	21
1.8.1 Αεροπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές	22
1.8.2 Αυτοκινητοβιομηχανία και μεταφορές	22
1.8.3 Ναυπηγική	22
1.8.4 Βιομηχανία αθλητικών ειδών.....	22
1.8.5 Αιολική ενέργεια.....	23
1.8.6 Άλλες εφαρμογές.....	23

2 ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ.....	25
1.9 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
1.10 ΤΥΠΟΙ ΔΟΧΕΙΩΝ ΠΙΕΣΗΣ.....	25
1.10.1 Σφαιρικά δοχεία πίεσης.....	26
1.10.2 Κυλινδρικά δοχεία πίεσης.....	27
1.10.3 Είδη κεφαλών.....	28
3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ	31
1.11 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	31
1.12 CAD (COMPUTER-AIDED DESIGN).....	31
1.12.1 Τομείς εφαρμογής.....	31
1.13 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ SOLIDWORKS.....	32
1.14 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	34
1.15 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ.....	37
1.16 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	41
1.16.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά.....	41
1.17 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ LAY-UP.....	45
1.18 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ PRE-VACUUM.....	52
1.19 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ–AUTOCLAVE PROCESSING.....	56
1.20 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ.....	66
1.20.1 Secondary bonding.....	67
1.20.2 Co-bonding.....	69
1.21 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	69
4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ	71
1.22 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
1.23 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ.....	71
1.23.1 Διαδικασία υδραυλικής δοκιμής.....	72
1.24 ΔΟΚΙΜΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	72
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1: ΤΥΠΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	1
ΣΧΗΜΑ 2: ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	4
ΣΧΗΜΑ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	7
ΣΧΗΜΑ 4: ΤΥΠΟΙ ΙΝΩΝ	9
ΣΧΗΜΑ 5: ΪΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ	11
ΣΧΗΜΑ 6: ΪΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ	12
ΣΧΗΜΑ 7: ΪΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ	13
ΣΧΗΜΑ 8: ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΙΝΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ	16
ΣΧΗΜΑ 9: ΤΥΠΟΙ ΠΡΟΕΜΠΟΤΙΣΜΕΝΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ.....	18
ΣΧΗΜΑ 10: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ PREPREG.....	19
ΣΧΗΜΑ 11: ΑΕΡΟΣΤΕΓΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ (BAG MOLDING TECHNIQUES)	20
ΣΧΗΜΑ 12: ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΠΡΕΣΑ & TUBE ROLLING PROCESS	21
ΣΧΗΜΑ 13: ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΣΑΚΟΥΛΑ ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ	21
ΣΧΗΜΑ 14: ΤΜΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ AIRBUS 787	22
ΣΧΗΜΑ 15: ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ.....	26
ΣΧΗΜΑ 16: ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΔΟΧΕΙΑ ΠΙΕΣΗΣ	27
ΣΧΗΜΑ 17: ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΔΟΧΕΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	28
ΣΧΗΜΑ 18: ΤΥΠΟΙ ΚΕΦΑΛΩΝ	29
ΣΧΗΜΑ 19: ΤΡΕΙΣ ΜΟΡΦΕΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΣΤΟ SOLIDWORKS.....	33
ΣΧΗΜΑ 20: ΟΙ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ	34
ΣΧΗΜΑ 21: ΣΧΕΔΙΟ ΠΡΩΤΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ.....	35
ΣΧΗΜΑ 22: ΣΧΕΔΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ.....	36
ΣΧΗΜΑ 23: ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	36
ΣΧΗΜΑ 24: ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ	37
ΣΧΗΜΑ 25: ΤΟΜΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ	37
ΣΧΗΜΑ 26: ΕΙΔΗ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	38
ΣΧΗΜΑ 27: ΚΑΛΟΥΠΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	40
ΣΧΗΜΑ 28: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΤΡΑΣ	42
ΣΧΗΜΑ 29: ΣΥΝΘΗΚΕΣ CURING	44
ΣΧΗΜΑ 30: RELEASE FILM	45
ΣΧΗΜΑ 31: RELEASE FILM ΣΤΗΝ ΚΕΦΑΛΗ.....	46
ΣΧΗΜΑ 32: ΠΡΩΤΗ ΣΤΡΩΣΗ (ΚΥΚΛΙΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ).....	47
ΣΧΗΜΑ 33: ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΚΥΚΛΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ.....	48
ΣΧΗΜΑ 34: ΠΡΩΤΗ ΣΤΡΩΣΗ (ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΓΡΑΜΜΟ ΚΟΜΜΑΤΙ)	49
ΣΧΗΜΑ 35: ΠΡΩΤΗ ΣΤΡΩΣΗ (ΛΩΡΙΔΑ).....	51
ΣΧΗΜΑ 36: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ PRE-VACUUM	53

ΣΧΗΜΑ 37: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ PRE-VACUUM	53
ΣΧΗΜΑ 38: RELEASE PEEL-PLY	54
ΣΧΗΜΑ 39: PRE-VACUUM	55
ΣΧΗΜΑ 40: AUTOCLAVE ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ ΕΑΒ	56
ΣΧΗΜΑ 41: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ AUTOCLAVE	57
ΣΧΗΜΑ 42: PEEL-PLY	58
ΣΧΗΜΑ 43: RELEASE FILM	59
ΣΧΗΜΑ 44: AUTOCLAVE VACUUM	60
ΣΧΗΜΑ 45: ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	61
ΣΧΗΜΑ 46: ΚΥΚΛΟΣ ΠΙΕΣΗΣ	61
ΣΧΗΜΑ 47: ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΟΨΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ	62
ΣΧΗΜΑ 48: ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΣΤΟΜΙΟ	63
ΣΧΗΜΑ 49: ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ	64
ΣΧΗΜΑ 50: ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΕΛΙΚΩΝ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ	65
ΣΧΗΜΑ 51: ΕΠΟΞΙΚΗ ΚΟΛΛΑ	66
ΣΧΗΜΑ 52: ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΓΙΑ ΤΟ SECONDARY BONDING	68
ΣΧΗΜΑ 53: ΜΟΡΦΗ ΔΟΧΕΙΟΥ ΜΕΤΑ ΤΟ SECONDARY BONDING	68
ΣΧΗΜΑ 54: ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΒΕΡΝΙΚΙ	70
ΣΧΗΜΑ 55: ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ	73
ΣΧΗΜΑ 56: ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΚΟΛΛΗΣΗΣ	76

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

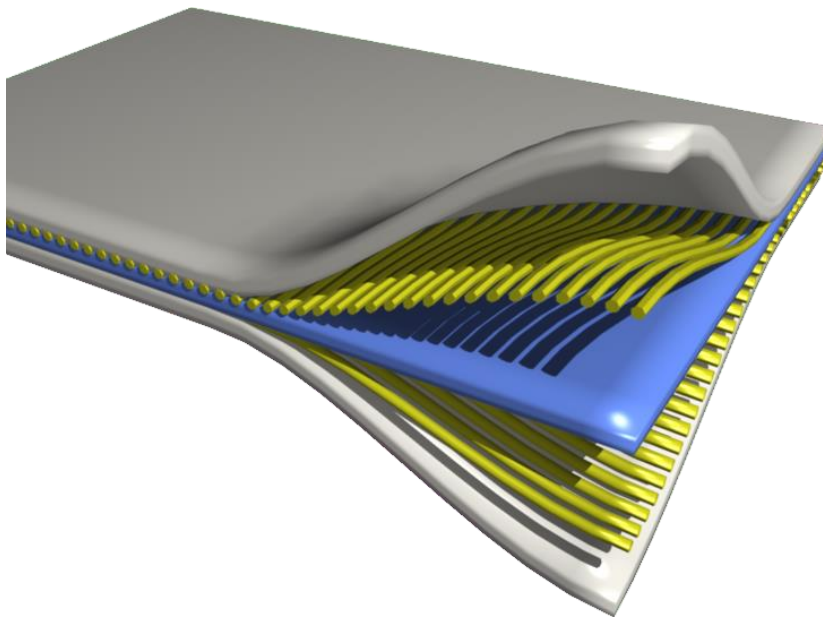
ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΒΑΡΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	6
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΙΝΩΝ	8
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΙΝΩΝ	10
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: STACKING SEQUENCE ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: STACKING SEQUENCE ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΓΡΑΜΜΩΝ ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: STACKING SEQUENCE ΛΩΡΙΔΩΝ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΛΛΑΣ	67
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: STACKING SEQUENCE ΛΩΡΙΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟ CO-BONDING	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΧΕΙΟΥ ΠΙΕΣΗΣ	69

1 Σύνθετα υλικά

1.1 Εισαγωγή

Ως σύνθετο υλικό ορίζεται ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών, που το καθένα έχει διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα νέο σύνθετο υλικό με εξαιρετικό συνδυασμό ιδιοτήτων των μεμονωμένων υλικών από το οποίο αποτελείται. Βασικό χαρακτηριστικό για να ονομασθεί ένα υλικό σύνθετο είναι τα δύο υλικά από τα οποία αποτελείται να παραμένουν χωριστά και διακριτά μέσα στη δομή. Για αυτούς τους λόγους, σαν σύνθετα υλικά δεν μπορούν να θεωρηθούν για παράδειγμα το ξύλο, τα οστά ή τα μεταλλικά κράματα, παρόλο που αποτελούνται από περισσότερες από μία ουσίες. Ένα σύνθετο υλικό συνήθως προτιμάται από τα τυπικά μεταλλικά ή κεραμικά υλικά για διάφορους λόγους, όπως: μικρότερο βάρος, ισχυρότερες ιδιότητες ή ακόμα και λιγότερο κόστος παραγωγής.

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Η πρώτη φάση είναι η μήτρα, που είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση και τη φάση ενίσχυσης (δισπαρμένη φάση). Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των δύο φάσεων, των σχετικών τους ποσοστών αναλογίας και της γεωμετρίας [1].



Σχήμα 1: Τυπικό παράδειγμα σύνθετου υλικού [wikipedia.org]

Τυπικά παραδείγματα σύνθετων υλικών είναι:

- Σύνθετα δομικά υλικά, όπως τσιμέντα ή οπλισμένο σκυρόδεμα
- Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες διαφόρων υλικών
- Μεταλλικά σύνθετα υλικά
- Κεραμικά σύνθετα υλικά (σύνθετα κεραμικά και μεταλλικά πλέγματα)

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται γενικά για την κατασκευή κτηρίων, γεφυρών και άλλων δομών, όπως κύτη πλοίων, πάνελ πισινών, αμαξώματα αγωνιστικών αυτοκινήτων, ντουζιέρες, μπανιέρες, δεξαμενές αποθήκευσης, νεροχύτες και πάγκους. Τα πιο προηγμένα παραδείγματα χρήσης των σύνθετων υλικών είναι στην αεροπορική και διαστημική τεχνολογία, όπου το περιβάλλον είναι πολύ απαιτητικό.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η επιστήμη των σύνθετων υλικών άρχισε να αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούνται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Οι πρώτες χρήσεις των σύνθετων υλικών χρονολογούνται από το 1500 π.Χ. όταν οι αρχαίοι Αιγύπτιοι και συνολικά οι άποικοι της Μεσοποταμίας χρησιμοποιούσαν ένα μίγμα από λάσπη και άχυρο για τη δημιουργία ισχυρότερων και ανθεκτικότερων κτηρίων. Τα άχυρα συνέχισαν από τότε να παρέχουν ενίσχυση σε αρχαία σύνθετα προϊόντα, όπως σε κεραμικά και βάρκες.

Αργότερα, το 1200 μ.Χ. οι Μογγόλοι ήταν αυτοί που κατασκεύασαν το πρώτο σύνθετο τόξο. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ξύλου, ελεφαντόδοντου και ζωικής κόλλας, τα τόξα συμπιέζονταν και στη συνέχεια τυλίγονταν με φλοιό σημύδας. Τα συγκεκριμένα τόξα ήταν πολύ ισχυρά και εξαιρετικά ακριβή. Εξαιτίας αυτής της σύνθετης τεχνολογίας, τέτοιου είδους τόξα αποτελούσαν τα πιο ισχυρά όπλα στη γη μέχρι την εφεύρεση της πυρίτιδας.

1.2.1 Πλαστική εποχή

Η σύγχρονη εποχή των σύνθετων υλικών δεν ξεκίνησε παρά μόνο όταν οι επιστήμονες ανέπτυξαν το πλαστικό. Μέχρι τότε οι μόνες πηγές συνδετικών και κόλλας ήταν φυσικές ρητίνες που προέρχονταν από τα φυτά και τα ζώα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1900 αναπτύχθηκαν πλαστικά όπως το βινύλιο, το πολυστυρένιο

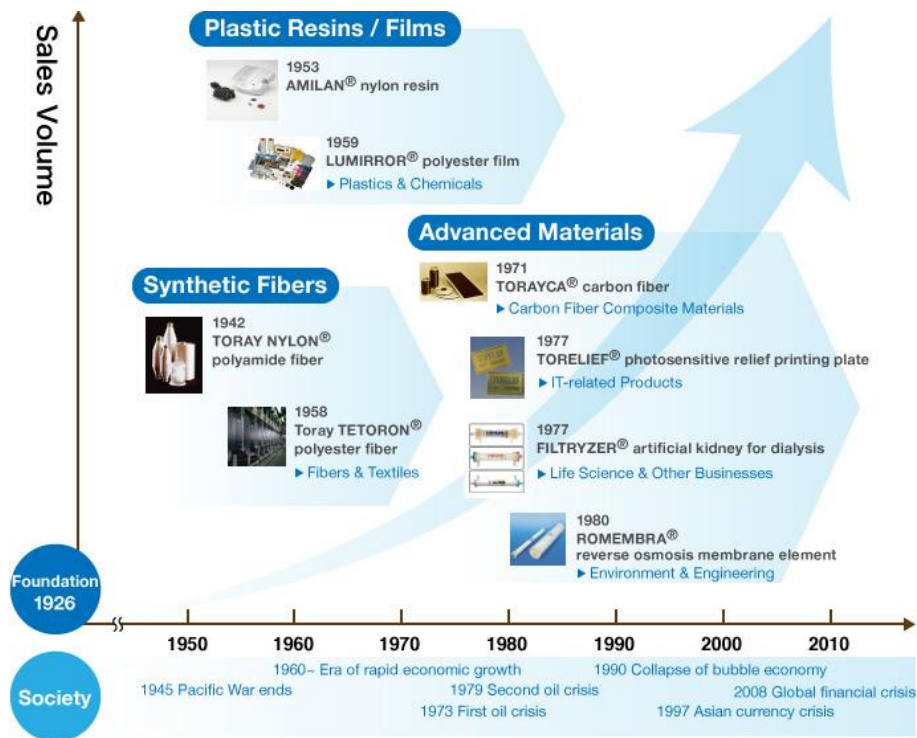
και οι πολυεστέρες, τα οποία ξεπερνούσαν πια τις ιδιότητες των ρητινών που προέρχονταν από την φύση.

Ωστόσο, τα πλαστικά αυτά από μόνα τους δεν θα μπορούσαν να παράγουν την απαιτούμενη δύναμη για τις δομικές εφαρμογές. Κάποιου είδους ενίσχυση ήταν αναγκαία για να παρέχει την απαραίτητη αντοχή και ακαμψία. Το 1935, η εταιρεία Owens Corning παρήγαγε τις πρώτες ίνες γυαλιού, το fiberglass. Το fiberglass, όταν συνδυαστεί με πλαστικό πολυμερές, δημιουργεί μια απίστευτα ισχυρή και ελαφριά δομή.

Αυτή είναι η αρχή της βιομηχανίας των πολυμερών ενισχυμένων με ίνες (Fiber Reinforced Polymers, FRP) όπως τη γνωρίζουμε σήμερα.

1.2.2 Β' Παγκόσμιος Πόλεμος - Πρόωρη καινοτομία στα σύνθετα υλικά

Πολλές από τις μεγαλύτερες καινοτομίες του ανθρώπου οφείλονται στου πολέμους. Ακριβώς όπως οι Μογγόλοι ανέπτυξαν το σύνθετο τόξο, έτσι και η βιομηχανία κατά το Β' Παγκόσμιο πόλεμο έφερε σε πλήρη παραγωγή τα FRP. Ο λόγος ήταν η ανάγκη για νέα διαφορετικά υλικά για ελαφριές εφαρμογές, κυρίως στα στρατιωτικά αεροσκάφη. Σύντομα ανακαλύφθηκε ότι υπάρχουν πολλαπλά οφέλη κατά τη χρήση των σύνθετων ινών γυαλιού, οι οποίες μπορούσαν επίσης να είναι 'αόρατες' στα ραδιοκύματα. Γι' αυτό το λόγο, σύντομα χρησιμοποιήθηκαν σε καταφύγια ηλεκτρονικού εξοπλισμού ραντάρ.



Σχήμα 2: Ιστορική εξέλιξη σύνθετων υλικών [2]

1.2.3 Προσαρμογή σύνθετων υλικών στην καθημερινή ζωή

Μέχρι το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου πολέμου, η βιομηχανία των σύνθετων υλικών, παρόλο μικρή, ήταν πλέον αρκετά εξειδικευμένη. Με τη μείωση της ζήτησης για στρατιωτικά προϊόντα, οι καινοτόμοι στη βιομηχανία των σύνθετων υλικών προσπάθησαν να εισαγάγουν τα υλικά αυτά και σε άλλες αγορές. Η ναυσιπλοΐα ήταν μια προφανής βιομηχανία όπου θα μπορούσαν με επιτυχία να χρησιμοποιηθούν τα σύνθετα υλικά. Έτσι, το πρώτο εμπορικό σκάφος κατασκευάστηκε το 1946.

Ήταν η εποχή εκείνη, επίσης, που αναπτύχθηκαν νέες διαδικασίες παραγωγής σύνθετων υλικών και κατ' επέκταση και νέα προϊόντα. Ο Brandt Goldsworthy, γνωστός και ως 'παππούς των σύνθετων υλικών', ήταν ο πρωτοπόρος της εποχής. Ο ίδιος πιστώνεται και την πρώτη σανίδα του σερφ από fiberglass, η οποία και έφερε την επανάσταση στον αθλητισμό.

1.2.4 Αλματώδης πρόοδος για τα σύνθετα υλικά

Στη δεκαετία του 1970 η βιομηχανία των σύνθετων υλικών άρχισε να 'ωριμάζει'. Αναπτύχθηκαν ακόμα καλύτερα οι πλαστικές ρητίνες καθώς και οι ενισχυτικές ίνες. Μέσα στη δεκαετία αυτή, η εταιρεία DuPont ανέπτυξε ένα νέο είδος ίνας, αυτή του

αραμιδίου, γνωστή και ως Kevlar. Η συγκεκριμένη ίνα είναι το βασικό συστατικό στην κατασκευή πανοπλιών εξαιτίας της πολύ υψηλής της αντοχής. Τα ανθρακονήματα (carbon fibers), επίσης, ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται και από τότε τείνουν να αντικαταστήσουν τα μεταλλικά υλικά.

1.2.5 Τα σύνθετα υλικά σήμερα και στο μέλλον

Η βιομηχανία των σύνθετων υλικών βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, με ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξής της σήμερα να επικεντρώνεται γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις μεταφορές. Πτερύγια ανεμογεννητριών, αεροσκάφη, ελικόπτερα και διαστημικές εφαρμογές είναι μόνο μερικές από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών.

Στο μέλλον, για την παραγωγή των σύνθετων υλικών θα χρησιμοποιούνται ακόμα καλύτερες ρητίνες και ίνες, καθώς σιγά σιγά θα ενσωματώνονται και στα νάνο-υλικά.

Ερευνητικά και πανεπιστημιακά προγράμματα ασχολούνται, όχι μόνο με τη δημιουργία καλύτερων τρόπων παραγωγής για τα σύνθετα υλικά, αλλά και νέων, πιο φιλικών προς το περιβάλλον ρητινών, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν σε ανακυκλώσιμα πλαστικά και βιοϋλικά.

Τα σύνθετα υλικά, με την πάροδο των χρόνων, θα συνεχίσουν να κάνουν τον κόσμο ελαφρύτερο, ισχυρότερο, ανθεκτικότερο και ένα καλύτερο μέρος για ζωή [2].

1.3 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα πολλά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση και ευρεία χρήση τους σε διάφορους κλάδους. Παρακάτω αναλύονται μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών, καθώς και τα οφέλη που αυτά παρέχουν.

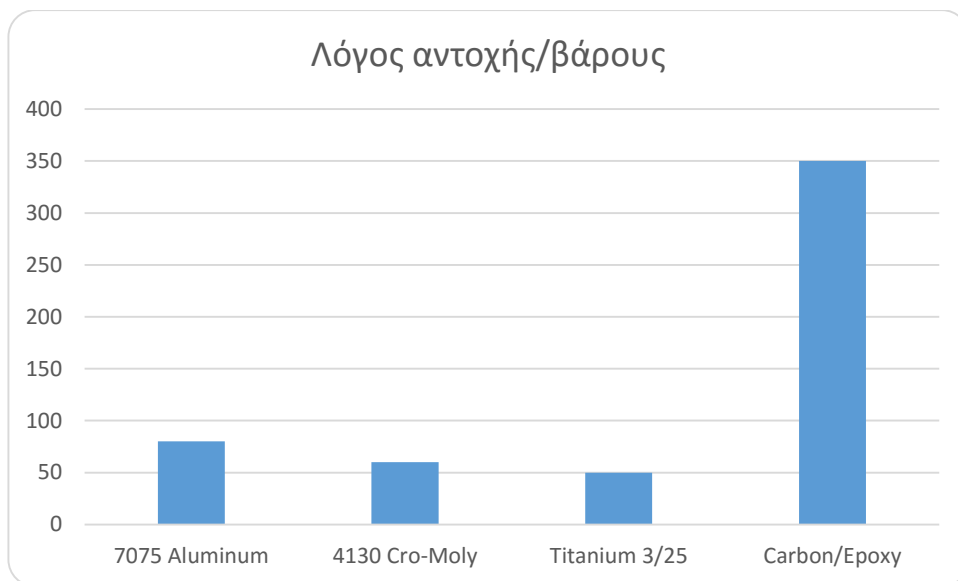
- Χαμηλό βάρος

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι πολύ ελαφριά, ειδικά σε σύγκριση με υλικά όπως το σκυρόδεμα, τα μέταλλα και το ξύλο. Μια συνήθης σύνθετη δομή μπορεί να ζυγίσει 75% λιγότερο σε σχέση με μια δομή χάλυβα με την ίδια δύναμη και αντοχή.

- Υψηλή αντοχή

Όλα τα σύνθετα υλικά είναι εξαιρετικά ισχυρά, ειδικά αν λάβουμε υπόψη την αντοχή ανά μονάδα βάρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ίνες υψηλής αντοχής, όπως το αραμίδιο (Kevlar) και το S-Glass, που χρησιμοποιούνται ευρέως στις πανοπλίες. Λόγω της υψηλής αντοχής των υλικών αυτών, οι στρατιώτες μπορούν να προστατεύονται από εκρήξεις και βαλλιστικές απειλές.

Πίνακας 1: Αναλογίες αντοχής ανά μονάδα βάρους μεταλλικών και σύνθετων υλικών

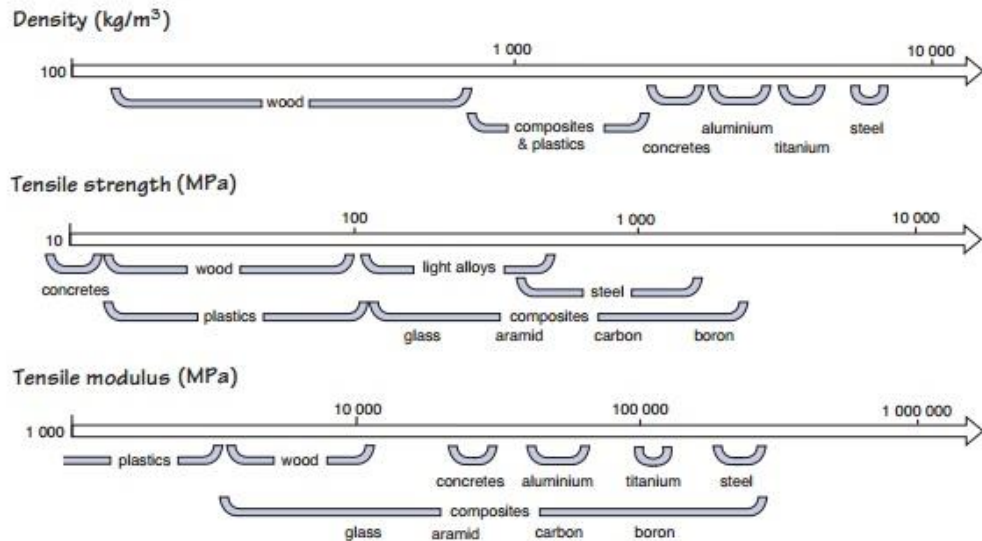


- Αντοχή στη διάβρωση και τα χημικά

Τα σύνθετα υλικά είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε χημικές ουσίες και δεν παρουσιάζουν σκουριά ή διάβρωση. Αυτός είναι και ο λόγος που μια από τις πρώτες βιομηχανίες που χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά ήταν η ναυσιπλοΐα.

- Ελαστικότητα

Όλα τα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες έχουν εξαιρετικές ελαστικές ιδιότητες. Όταν τα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε κάμψη, τείνουν να επιστρέφουν στην αρχική τους θέση. Αυτό είναι ιδανικό για εφαρμογές όπως ελατήρια, αναρτήσεις αυτοκινήτων και τόξα τοξοβολίας.



Σχήμα 3: Σύγκριση ιδιοτήτων μεταξύ διαφόρων υλικών [3]

- Αγωγιμότητα

Ορισμένα σύνθετα υλικά όπως το fiberglass είναι μη αγώγιμα. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική, διότι πολλές δομές χρειάζεται να είναι ισχυρές, ενώ ταυτόχρονα να μην άγουν τον ηλεκτρισμό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι σκάλες. Σκάλες από αλουμίνιο μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, ενώ σκάλες κατασκευασμένες από fiberglass δεν αποτελούν κίνδυνο αν τις διασχίσει κάποιο ηλεκτροφόρο καλώδιο.

- Μείωση αριθμού τμημάτων κατασκευής

Ο αριθμός των τμημάτων που απαιτούνται για μια κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι ο ελάχιστος δυνατός. Αυτό αναδεικνύει και ένα παράλληλο πλεονέκτημα που είναι αυτό του χαμηλότερου κόστους συντήρησης και επισκευής, ενώ παράλληλα η κατασκευή παρουσιάζει μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Άλλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά είναι:

- Σημαντική ανθεκτικότητα έναντι κόπωσης, ερπυσμού και κρούσης
- Θερμική και ακουστική αγωγιμότητα
- Χαμηλή θερμική διαστολή
- Ηλεκτρομαγνητική διάχυση

Ένα σύνθετο υλικό, πάντως, δεν διαθέτει όλες τις παραπάνω ιδιότητες-πλεονεκτήματα ταυτοχρόνως, καθώς δεν υπάρχει ποτέ τέτοια απαίτηση στην πράξη. Άλλωστε, ορισμένες από τις ιδιότητες είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση, θερμική αγωγιμότητα). Κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει μερικές από αυτές τις ιδιότητες [3, 4].

Πίνακας 2: Εφαρμογές διαφόρων τύπων ινών

Κριτήριο	Ίνες άνθρακα	Ίνες υάλου	Ίνες αραμιδίου
Υψηλές θερμοκρασίες	+	-	-
Υπεριώδης ακτινοβολία	++	+	-
Υγρασία	+	-	-
Αλκαλικό & όξινο περιβάλλον	++	--	+
Γαλβανική διάβρωση	--	+	+
Ερπυσμός	++	--	-
Θραύση υπό τάση, διάβρωση υπό τάση	++	--	+
Κόπωση	++	-	+
Κρούση	-	+	++

1.4 Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι:

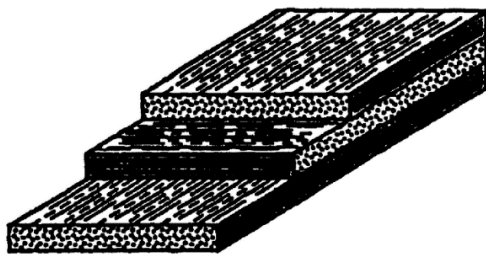
- Χαμηλή αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Έλλειψη πλαστικότητας: Στη φάση της οριακής κατάστασης αστοχίας εμφανίζεται ψαθυρή θραύση. Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά έχουν τη δυνατότητα να αναλάβουν υψηλές ελαστικές παραμορφώσεις κι έτσι αυξάνουν σημαντικά την πλαστικότητα των δομικών στοιχείων που έχουν ενισχυθεί με αυτά.
- Σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής.
- Περιορισμένα ειδικευμένα συνεργεία, πράγμα το οποίο δικαιολογείται από την πρόσφατη εμφάνιση των σύνθετων υλικών [4].

1.5 Ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-reinforced composites)

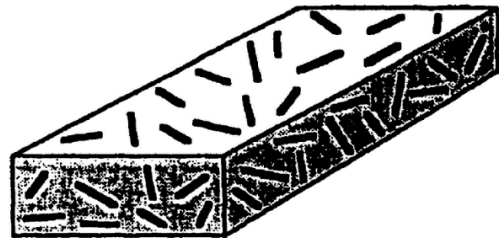
Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν την ενισχυτική φάση, η οποία είναι αυτή που παρέχει τη δύναμη και την ακαμψία. Η ενίσχυση μπορεί να γίνει είτε με ίνες (συνεχείς ή κοντές), είτε με σωματίδια. Τα σωματίδια μέσα σε ένα σύνθετο υλικό συνήθως έχουν τις ίδιες διαστάσεις προς όλες τις κατευθύνσεις και μπορούν να είναι

σφαιρικά, ελλειψοειδή ή να έχουν κάποιο άλλο ακανόνιστο σχήμα. Τα σωματίδια αυτά, ωστόσο, είναι πολύ ασθενέστερα από τις συνεχείς ίνες, αλλά και πολύ φθηνότερα.

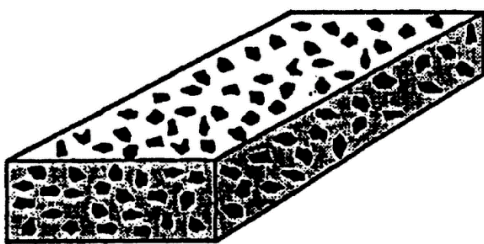
Οι γεωμετρία μιας συνεχούς ίνας έχει ως κύριο χαρακτηριστικό το πολύ μεγαλύτερο μήκος της σε σχέση με την διάμετρό της. Η αναλογία μήκους προς διάμετρο είναι γνωστή ως *aspect ratio*, και μπορεί να ποικίλλει. Οι συνεχείς ίνες έχουν μεγάλο *aspect ratio*, οι ασυνεχείς μικρότερο. Όταν γίνεται ταυτόχρονα χρησιμοποίηση συνεχών ινών, αυτές έχουν ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό, ενώ στην περίπτωση των ασυνεχών ινών, ο προσανατολισμός είναι τυχαίος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα διαφόρων ινωδών ενισχύσεων παρατηρούνται στο Σχήμα 4.



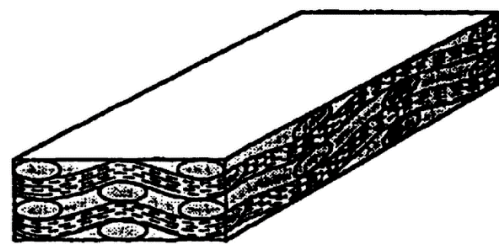
Continuous fibers



Discontinuous fibers, whiskers



Particles



Fabric, braid, etc.

Σχήμα 4: Τύποι ινών [5]

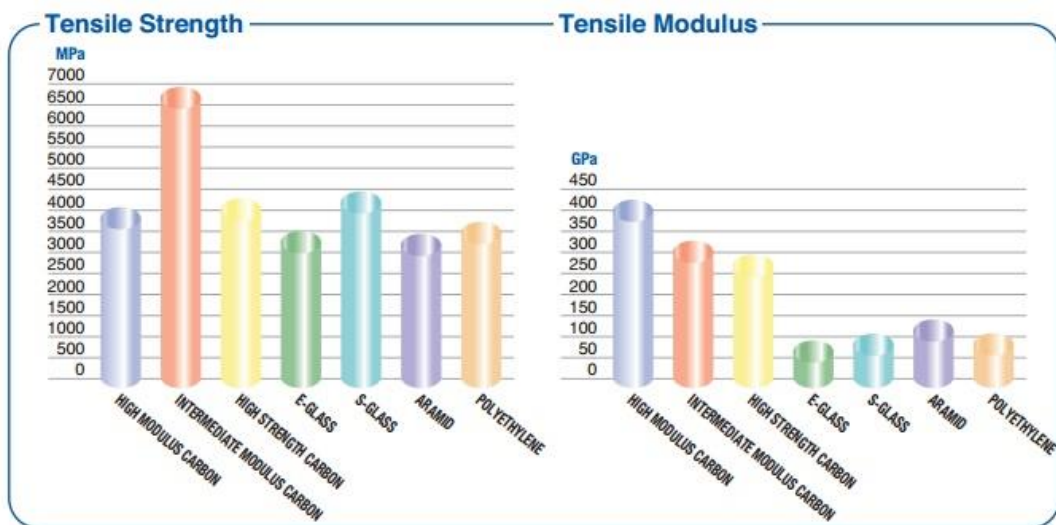
Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με συνεχείς ίνες χρησιμοποιούνται τις περισσότερες φορές σε μορφή στρωμάτων με διάφορους προσανατολισμούς των ινών, ώστε να δώσουν την επιθυμητή αντοχή και ακαμψία. Ένα τυπικό ποσοστό όγκου ινών σε σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής είναι 60-70% του συνολικού όγκου. Όπως είναι φυσιολογικό, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος της ίνας, τόσο υψηλότερη αντοχή,

αλλά και τόσο μεγαλύτερη ευελιξία έχει κατά την κατασκευή. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής είναι αρκετά μεγαλύτερο.

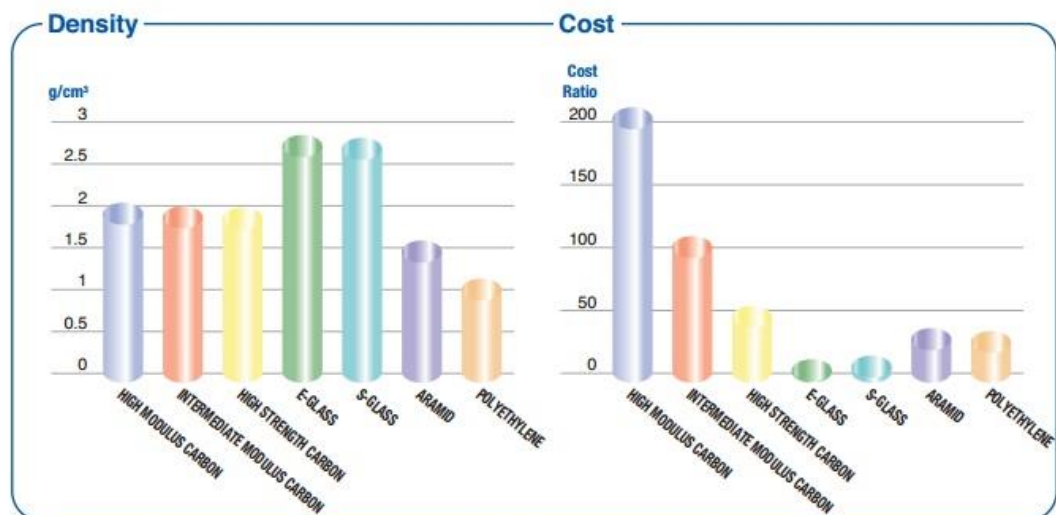
Οι πιο διαδεδομένες ίνες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία είναι τα ανθρακονήματα, τα υαλονήματα και οι ίνες αραμιδίου. Άλλοι τύποι ινών λιγότερο διαδεδομένοι είναι οι ίνες βορίου, πυριτίου και χαλαζία [5].

Οι ιδιότητες διαφόρων τύπων ινών και η σύγκριση αυτών παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 3, Πίνακας 4).

Πίνακας 3: Ιδιότητες διαφόρων ινών και σύγκριση μεταξύ τους [8]

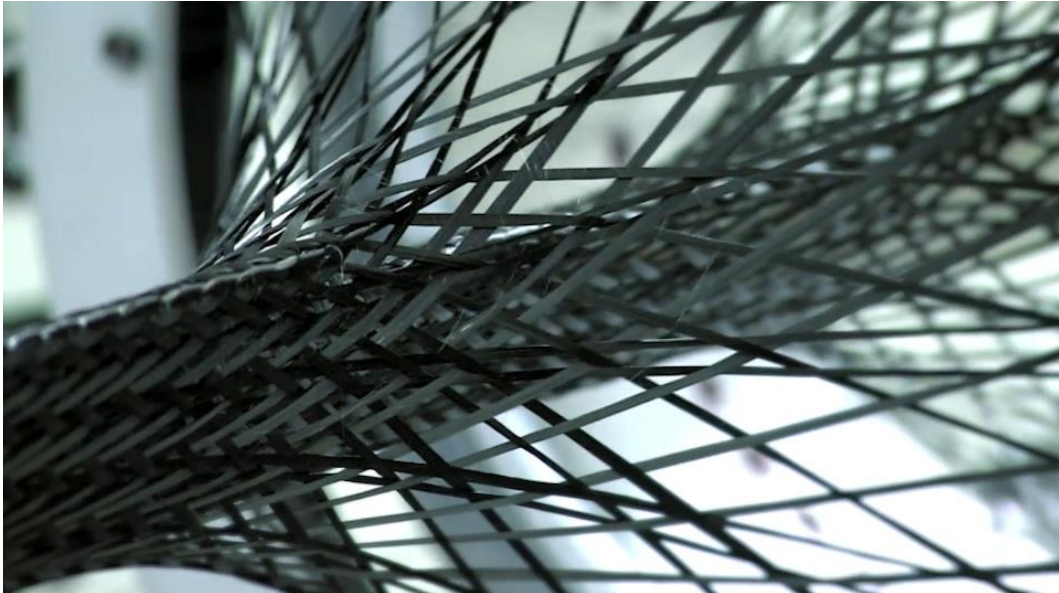


Πίνακας 4: Πυκνότητα και κόστος διαφόρων τύπων ινών [8]



1.5.1 Ανθρακονήματα (Carbon fibers)

Οι ίνες άνθρακα είναι αγωγίμες, έχουν εξαιρετικό συνδυασμό υψηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό, έχουν πολύ χαμηλή (ελαφρώς αρνητική) θερμική διαστολή (CTE) και προσφέρουν καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 5: Ίνες άνθρακα [info.craftechind.com]

Οι ίνες άνθρακα συχνά κατηγοριοποιούνται με βάση το μέτρο ελαστικότητας. Υπάρχουν πέντε κατηγορίες που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά: τα χαμηλού συντελεστή ελαστικότητας, κανονικού συντελεστή, ενδιάμεσου συντελεστή, υψηλού συντελεστή και εξαιρετικά υψηλού συντελεστή. Σε γενικές γραμμές, οι χαμηλού μέτρου ελαστικότητας ίνες έχουν συντελεστή εφελκυσμού μικρότερο από 30MSI και οι εξαιρετικά υψηλού μέτρου ελαστικότητας ίνες έχουν συντελεστή εφελκυσμού μεγαλύτερο από 75MSI (ο χάλυβας έχει συντελεστή εφελκυσμού 29MSI). Καθώς ο συντελεστής αυξάνεται, οι ίνες τείνουν να γίνουν εύθραυστες, ακριβότερες και πιο δύσκολο να χειριστούν. Περαιτέρω, η αντοχή σε εφελκυσμό των ινών αυξάνει γενικά καθώς ο συντελεστής αυξάνεται από την πρώτη κατηγορία μέχρι την ενδιάμεση, αλλά στη συνέχεια τείνει να μειωθεί για τις δύο επόμενες κατηγορίες. Για τους λόγους αυτούς, κανονικές και ενδιάμεσες ίνες τείνουν να δίνουν την καλύτερη συνολική απόδοση, εκτός εάν η εφαρμογή απαιτεί πολύ

μεγάλη ακαμψία. Αυτό φαίνεται ακόμα πιο καθαρά όταν λαμβάνεται υπόψιν ο συνδυασμός τιμής των ινών και διαθεσιμότητας.

1.5.2 Ίνες γυαλιού (Glass fibers)

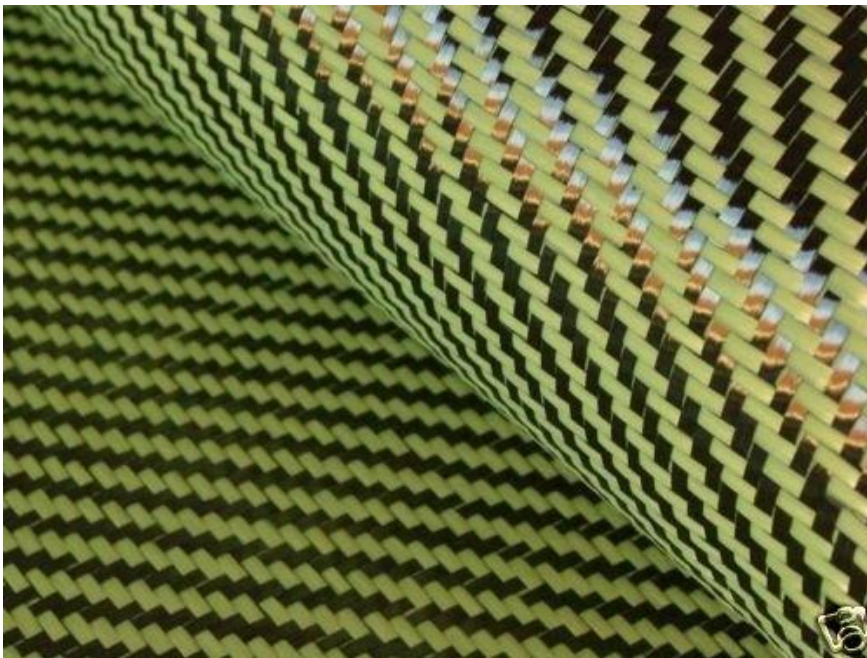
Οι ίνες υάλου παρουσιάζουν τις τυπικές ιδιότητες του γυαλιού, όπως σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση. Επίσης, είναι εύκαμπτες, ελαφρές και σχετικά φτηνές. Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τις ίνες υάλου τον πλέον συνήθη τύπο ινών που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρού κόστους. Η υψηλή αντοχή τους αποδίδεται στο μικρό αριθμό και το μικρό μέγεθος των ατελειών στην επιφάνειά τους. Όλες οι ίνες υάλου έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες, αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Η αντοχή της ίνας μειώνεται εξαιτίας των φθορών που επέρχονται κατά την πορεία των διαφόρων φάσεων παραγωγής του σύνθετου υλικού, των παραμενουσών τάσεων και των δευτερογενών φορτίων (διατμητικά και εγκάρσια στη διεύθυνση των ινών). Η αντοχή των ινών σε διάβρωση εξαρτάται από τη σύνθεση της ίνας, το διαβρωτικό διάλυμα και το χρόνο έκθεσης. Η εφελκυστική αντοχή τους μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για ένα εύρος τιμών θερμοκρασιών, που μπορούν να εκτεθούν τα πολυμερή συνδετικά υλικά (έως 275° C, ανάλογα με το είδος του συνδετικού υλικού).



Σχήμα 6: Ίνες γυαλιού [www.tapplastics.com]

1.5.3 Οργανικές ίνες (Kevlar)

Οι πιο γνωστές από τις οργανικές ίνες είναι οι ίνες αραμιδίου (aramid), οι οποίες έχουν υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας κατά την αστοχία, γεγονός που τις κάνει ιδανικές για την προστασία έναντι πρόσκρουσης και βαλλιστικών ενεργειών. Λόγω της μικρής πυκνότητάς τους, έχουν υψηλό λόγο εφελκυστικής αντοχής ως προς το βάρος και υψηλό λόγο μέτρου ελαστικότητας ως προς το βάρος, άρα είναι πολύ ελκυστικές για χρήση σε αεροσκάφη και στις θωρακίσεις των σκελετών τους. Όντας φτιαγμένες από πολυμερές υλικό, έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα πολυμερή συνδετικά υλικά: μικρή θλιπτική αντοχή, υφίστανται ερπυσμό, απορροφούν υγρασία και είναι ευαίσθητες στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV).



Σχήμα 7: Ίνες αραμιδίου [raremetalsmatter.com]

1.6 Συνδετικά υλικά - μήτρες

Στα σύνθετα υλικά ο ρόλος της μήτρας είναι καθοριστικός γιατί επιτελεί μια σειρά από πολύ σημαντικές λειτουργίες. Συγκεκριμένα, διατηρεί τη συνοχή του συνθέτου, μιας και συγκρατεί τις ίνες μαζί και μεταφέρει το φορτίο μεταξύ των ινών, του συνδετικού υλικού και των στηρίξεων. Επίσης, προστατεύει τις ίνες από τις μηχανικές τριβές και το περιβάλλον και παραλαμβάνει μέρος του φορτίου, κυρίως

τις εγκάρσιες τάσεις και την ενδοστρωματική (εντός του επιπέδου) διάτμηση. Η μήτρα προστατεύει την επιφάνεια της ενίσχυσης από το περιβάλλον και από άλλους παράγοντες, όπως η υγρασία και η θερμότητα, αποτρέποντας ενδεχόμενη χημική προσβολή. Στην περίπτωση που η μήτρα είναι πιο όλκιμη από την ενίσχυση, μπορεί να προστατεύσει το υλικό από ενδεχόμενη θραύση. Μερικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως η εγκάρσια δυσκαμψία και η αντοχή, εξαρτώνται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Αυτές επηρεάζουν την επιλογή του συνδετικού υλικού περισσότερο απ' ό,τι οι ίνες. Επιπλέον, βασική παράμετρος επιλογής του συνδετικού υλικού είναι και η θερμοκρασία χειρισμού. Τα συνδετικά υλικά μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά. Τα πολυμερή συνδετικά υλικά είναι τα πλέον συνήθη, επειδή προσδίδουν ένα βασικό πλεονέκτημα που είναι η ευκολία κατασκευής πολύπλοκων τμημάτων με μικρό κόστος σε εξοπλισμό και μικρή επένδυση κεφαλαίου. Η ενίσχυση των πλαστικών με ίνες εξαλείφει το πρόβλημα του ερπυσμού. Τα πρώτα βήματα στην πορεία σχεδιασμού των σύνθετων υλικών είναι η επιλογή ορισμένων συνδετικών υλικών και αντίστοιχων μεθόδων παραγωγής. Η φύση της μήτρας είναι εκείνη που καθορίζει τη μέθοδο κατασκευής του σύνθετου. Η επιλογή του συνδετικού υλικού γίνεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες, την αντοχή σε διάβρωση και την πυραντοχή του πολυμερούς συνδετικού υλικού μέσα στο τελικό προϊόν. Η αντοχή σε διάβρωση του σύνθετου υλικού εξαρτάται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Παρόλο που οι ίνες άνθρακα είναι χημικά αδρανείς, η ακεραιότητα του σύνθετου υλικού τίθεται σε αμφισβήτηση αν αλλοιωθεί το συνδετικό υλικό. Πάντως, η επιλογή της κατάλληλης ρητίνης πρέπει να γίνεται στην αρχή της πορείας σχεδιασμού. Ορισμένες ιδιότητες, όπως η εγκάρσια δυσκαμψία και αντοχή, επηρεάζονται βασικά από το συνδετικό υλικό, με τις ίνες να έχουν πολύ μικρή επιρροή. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε ρητίνη δεν μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε ίνα. Η μήτρα και η ενίσχυση πρέπει να έχουν καλή φυσικοχημική πρόσφυση και να μη λαμβάνουν χώρα μεταξύ τους χημικές και άλλες αλληλεπιδράσεις. Όταν η πρόσφυση της ενίσχυσης και της μήτρας είναι καλή, τότε και η λειτουργία του σύνθετου είναι καλή [6].

1.6.1 Συνδετικά υλικά θερμική διαμόρφωσης (thermoset)

Τα συνδετικά υλικά θερμικής διαμόρφωσης ή θερμοσκληρυνόμενα δημιουργούνται μέσω ενός μη αναστρέψιμου χημικού μετασχηματισμού του συστήματος ρητίνης, σε ένα άμορφο πολυμερές συνδετικό υλικό. Γενικά, το πολυμερές ονομάζεται

σύστημα ρητίνης (resin system) κατά τη διαδικασία και συνδετικό υλικό ή μητρώο (matrix), όταν το πολυμερές έχει στερεοποιηθεί. Τα thermoset είναι τα πιο κοινά συστήματα ρητινών που χρησιμοποιούνται, λόγω της εύκολης χρήσης και του χαμηλού κόστους. Οι πιο συνήθεις ρητίνες θερμικής διαμόρφωσης είναι οι εξής: πολυεστερικές (polyester resins), βινυλεστερικές (vinylester), εποξικές (epoxy) και φαινόλης (phenolic) [6, 7].

1.6.2 Θερμοπλαστικά συνδετικά υλικά (thermoplastic)

Ένα θερμοπλαστικό πολυμερές (thermoplastic) δεν υφίσταται κανένα χημικό μετασχηματισμό κατά τη διάρκεια επεξεργασίας. Αντιθέτως, το πολυμερές μαλακώνει από τη στερεή φάση που είναι και επιστρέφει ξανά σε αυτή με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας. Τα θερμοπλαστικά έχουν υψηλή πυκνότητα για τις θερμοκρασίες επεξεργασίας, η οποία τα καθιστά δύσκολα σε ότι αφορά την επεξεργασία. Ο εμποτισμός τους δυσκολεύει με την υψηλή πυκνότητα κι έτσι πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για να εξασφαλιστεί η επαφή μεταξύ ινών και πολυμερούς. Μπορούν να επισκευαστούν, διότι η μετάπτωση στο μαλακό στάδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί πολλές φορές με την εφαρμογή θερμότητας. Τα πιο συνήθη θερμοπλαστικά συνδετικά υλικά είναι τα εξής: Poly-Ether Ether-Ketone (PEEK), Polyphenylene sulfide (PPS), Polysulfone (PSUL), Polyetherimide (PEI), Polyamideimide (PAI) [6, 7].

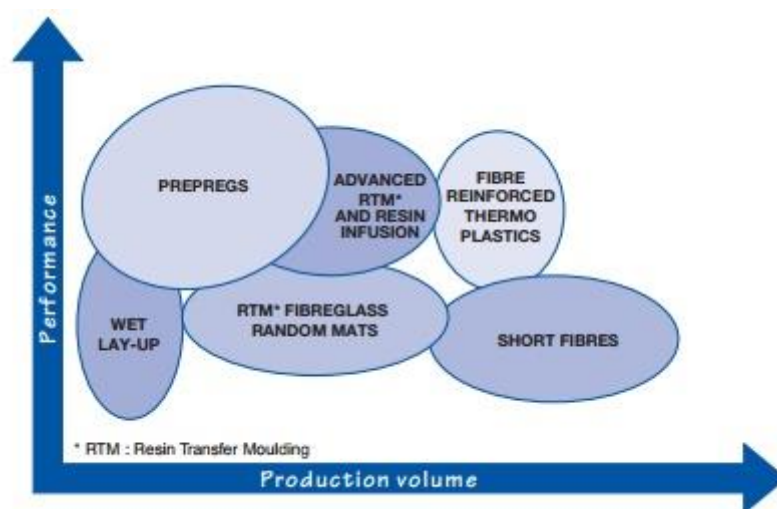
1.7 Η τεχνολογία των προεμποτισμένων σύνθετων υλικών (prepreg)

Τα prepreg αποτελούνται από ένα υλικό ενίσχυσης (reinforcement) - ανθρακονήματα, ίνες γυαλιού κ.λπ. - σε μονοδιευθυντική (unidirectional) ή πλεκτή (woven) μορφή, προεμποτισμένα σε προκαθορισμένο και ελεγχόμενο επίπεδο μέσα σε μήτρα ρητίνης. Όλα τα prepreg έχουν σαφώς προκαθορισμένο χρόνο ζωής (out life) σε θερμοκρασία δωματίου. Αποθηκεύονται σε καταψύκτη για να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής τους. Η αντιδραστικότητα ενός συγκεκριμένου συστήματος prepreg είναι προκαθορισμένη και αυτό, ως αποτέλεσμα, υποδεικνύει την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μια συγκεκριμένη ρητίνη θα υποστεί θερμικό curing. Οι παράμετροι out-life και η ελάχιστη θερμοκρασία curing είναι σημεία κλειδιά για την βελτιστοποίηση της επιλογής υλικών, ισορροπώντας το χρόνο που απαιτείται για το lay up (ειδικά σε μεγάλες κατασκευές) και στην επιλογή του

υλικού του καλουπιού. Όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του curing, τόσο χαμηλότερο το κόστος εξοπλισμού. Τα prepreg προμηθεύονται με ελεγχόμενο level of tack (κολλώδης ιδιότητα). Οι στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και με ακρίβεια στο καλούπι για να δώσουν υψηλό επίπεδο στον έλεγχο του προσανατολισμού των ινών, χωρίς τον κίνδυνο μετακίνησης, wash out των ινών, ή την ανάπτυξη περιοχών πλούσιων σε ρητίνη κατά την μετέπειτα επεξεργασία. Όλα αυτά θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλεια της απόδοσης.

Το prepreg θεωρείται το απόλυτο σύνθετο υλικό, διότι η θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη από την οποία αποτελείται, πολυμερίζεται σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση και υφίσταται μια χημική αντίδραση που το μετατρέπει σε ένα στερεό δομικό υλικό που έχει εξαιρετική αντοχή, έχει ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι σκληρό, άκαμπτο και πολύ ελαφρύ.

Ενδεικτικό της χρησιμότητας των προεμποτισμένων σύνθετων υλικών είναι ότι στις αρχές της δεκαετίας του '80 θεωρούνταν ως πολύ εξιδεικευμένα υλικά και χρησιμοποιούνταν μόνο στο 5% των αεροσκαφών και μόνο σε μη κρίσιμα σημεία τους. Σήμερα, αποτελούν τις βασικές δομές των αεροσκαφών, καθώς αποτελούν περισσότερο από το 50% του σκελετού των Airbus A350 XWB και Boeing 787. Πιο πρόσφατες εφαρμογές αποτελούν οι υποθαλάσσιοι σωλήνες για πετρέλαιο και φυσικό αέριο, καθώς και οι δεξαμενές υψηλής πίεσης. Αυτή η συνεχής χρησιμοποίηση των prepreg σε σχέση με τα μέταλλα έχει τη βάση της στην υψηλότερη αντοχή ως προς το συνολικό βάρος, τη μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση, αλλά και την ευελιξία στο σχεδιασμό [8].



Σχήμα 8: Χρησιμοποιούμενες ίνες σε σχέση με την απόδοση [8]

1.7.1 Τύποι προεμποτισμένων υφασμάτων

Τα prepreg υφάσματα αποτελούνται από δύο τουλάχιστον νήματα, τα οποία υφαίνονται μεταξύ τους: το ‘στημόνι’ (warp) και το ‘υφάδι’(weft).

Το στυλ ύφανσης ποικίλλει ανάλογα με τον τρόπο ύφανσης, δηλαδή τον τύπο πτύχωσης (crimp) και την καλυπτικότητα (drapeability) αυτών. Όταν η πτύχωση των ινών είναι μικρή, τότε οι μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος είναι μεγαλύτερες, καθώς οι ίσιες ίνες μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερα φορτία. Αντίθετα, όσο λιγότερη είναι η καλυπτικότητα, τόσο ευκολότερο είναι για τα υφάσματα να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα σχήματα.

Οι τρεις βασικοί τύποι πλέξης είναι:

- Απλή πλέξη (Plain weave)

Σε αυτόν τον τύπο πλέξης οι διαμήκεις και οι εγκάρσιοι θύσανοι ινών διασταυρώνονται μεταξύ τους κάθετα και βρίσκονται εναλλάξ η μία ομάδα πάνω από την άλλη.

- Πλέξη τύπου Satin (Satin weave)

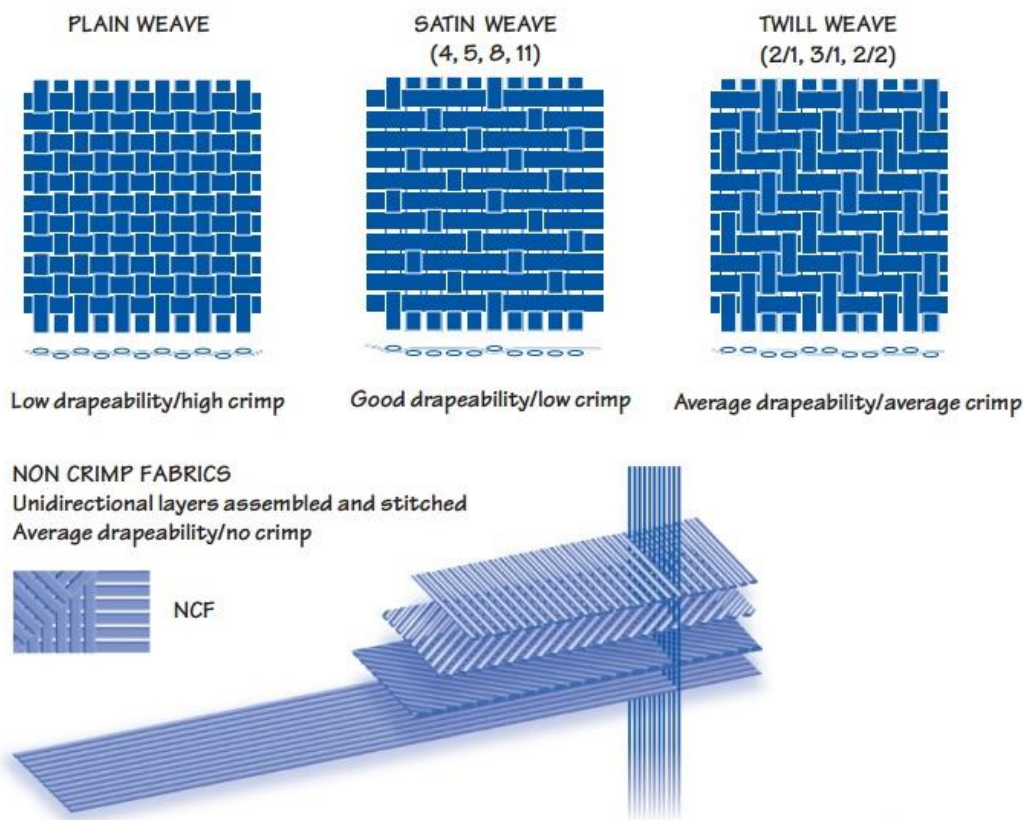
Σε αυτόν τον τύπο πλέξης η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τους διαμήκεις θυσάνους ινών, ενώ υπάρχει διαφορετική μορφή αν κοιτάξουμε το ύφασμα από τις δύο όψεις του.

- Διαγώνια πλέξη (Twill weave)

Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τις παραπάνω δύο και η όψη της είναι διαφορετική από κάθε πλευρά. Χαρακτηρίζεται από μια διαγώνια γραμμή (twill), από την οποία παίρνει και την ονομασία της.

- Prepreg μονής κατεύθυνσης (Unidirectional)

Ο τύπος αυτός στην ουσία δεν αποτελείται από πλέξη, αλλά από συνεχόμενες ίνες όλες προς την ίδια κατεύθυνση. Έτσι, δεν παρουσιάζει καθόλου πτυχώσεις (Σχήμα 9) [8].



Σχήμα 9: Τύποι προεμποτισμένων υφασμάτων [8]

1.7.2 Ιδιότητες προεμποτισμένων σύνθετων υλικών

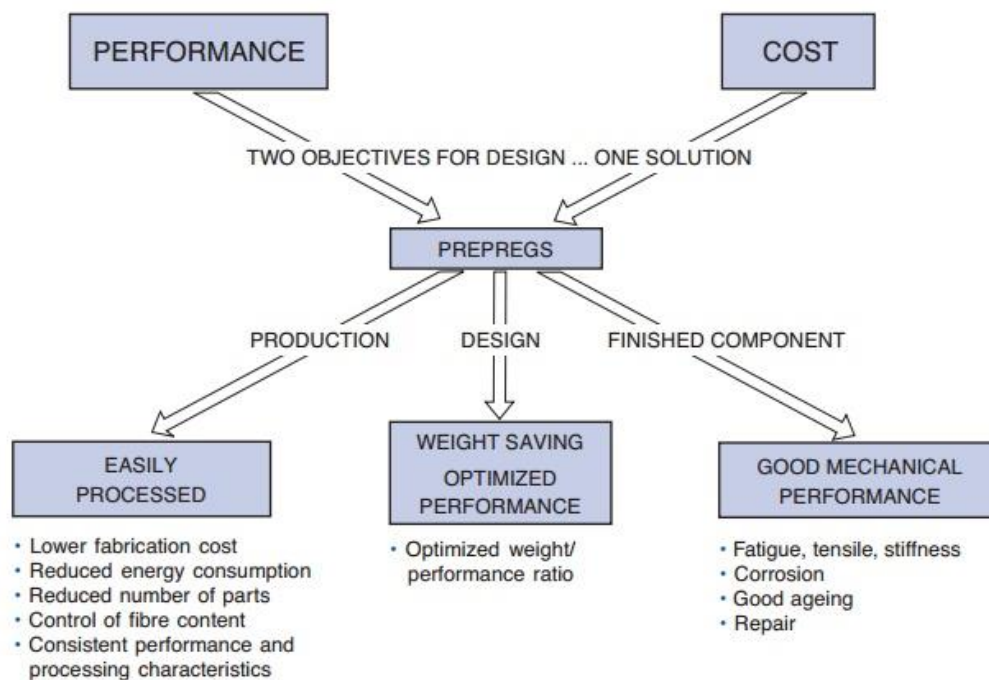
Τα δύο βασικά κριτήρια που επηρεάζουν την επιλογή των prepreg υλικών για την εκάστοτε εφαρμογή είναι το κόστος και η απόδοση. Τα πλεονεκτήματα των υλικών αυτών που αφορούν αυτά τα δύο κριτήρια μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Αυτές είναι:

- Παραγωγή
- Σχεδιασμός
- Τελικό προϊόν

Κατά την παραγωγή, τα κόστη κατασκευής δεν είναι πολύ μεγάλα όταν αναζητούμε μέγιστη απόδοση, ενώ ταυτόχρονα η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ χαμηλότερη σε σχέση με την κατασκευή από κάποιο μέταλλο. Ταυτόχρονα, ο αριθμός των μερών μιας κατασκευής μπορεί να μειωθεί δραστικά με τη χρησιμοποίηση των prepreg υλικών, ενώ υπάρχει η δυνατότητα για πλήρη έλεγχο του τύπου των ινών, του τρόπου παραγωγής, αλλά και των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.

Όσον αφορά το σχεδιασμό, ο λόγος βάρους προς την απόδοση είναι ο καλύτερος από κάθε άλλο υλικό, οπότε μπορούν να σχεδιαστούν εξαρτήματα διαφόρων σχεδίων και μεγεθών.

Το τελευταίο και σημαντικότερο πλεονέκτημα αφορά καθαρά το τελικό προϊόν. Ένα προϊόν χαρακτηρίζεται από την απόδοση και τις αντοχές του. Ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από prepreg έχει όλα τα πλεονεκτήματα που έχουν αναφερθεί και αφορούν γενικά τα σύνθετα υλικά όπως, άριστες μηχανικές αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη, αντοχή στη διάβρωση κ.α. [8].



Σχήμα 10: Διάγραμμα ροής επιλογής prepreg [8]

1.7.3 Μορφοποίηση προεμποτισμένων σύνθετων υλικών

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα, γενικά, των σύνθετων υλικών είναι ότι δίνουν τη δυνατότητα να επιλεγεί η μέθοδος κατασκευής τους ανάλογα με τις τελικές επιθυμητές ιδιότητες. Έτσι, σύμφωνα με το σχήμα, την αντοχή, το μέγεθος και την ποσότητα παραγωγής, επιλέγεται η μέθοδος με την οποία θα κατασκευαστεί το προϊόν. Τυπικές διαδικασίες μορφοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι:

- Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay-Up)
- Επίστρωση με ψεκασμό ινών (Spray-Up Technique)
- Τεχνικές επίστρωσης με καλούπια (Molding Techniques)
 - Τεχνική διαμόρφωσης με πρέσα (Press Technique)

- Μορφοποίηση με πρέσα εν ψυχρώ (Cold Press Molding)
- Μορφοποίηση με πρέσα εν θερμώ (Hot Press Molding)
- Τεχνική χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (Resin Transfer Moulding)
- Μορφοποιήσεις με περιστροφή
 - Φυγοκεντρική μορφοποίηση (Centrifugal Forming)
 - Μορφοποίηση με περιστροφή (Rotational Moulding)
 - Μέθοδος περιέλιξης ινών (Filament Winding)

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μορφοποίηση σύνθετων υλικών διαφόρων τύπων. Επειδή τα προεμποτισμένα σύνθετα υλικά αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία σύνθετων υλικών, χρησιμοποιούνται δηλαδή σε κατασκευές που απαιτούν άριστες μηχανικές ιδιότητες, έχουν αναπτυχθεί οι τεχνικές αεροστεγούς μορφοποίησης.

- Αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης (Bag Molding Techniques)
 - Μέθοδος αυτόκλειστου φούρνου (Autoclave Bag Molding Process)
 - Μορφοποίηση υπό πίεση ή υπό κενό (Vacuum Bag Oven Process)



Σχήμα 11: Αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης (Bag Molding Techniques) [8]

- Tube Rolling Process
- Μορφοποίηση σε πρέσα (Match Moulding Process)



Σχήμα 12: Μορφοποίηση σε πρέσα & tube rolling process [8]

- Μορφοποίηση με σακούλα και θετική πίεση (Pressure Bag Process)



Σχήμα 13: Μορφοποίηση με σακούλα και θετική πίεση [8]

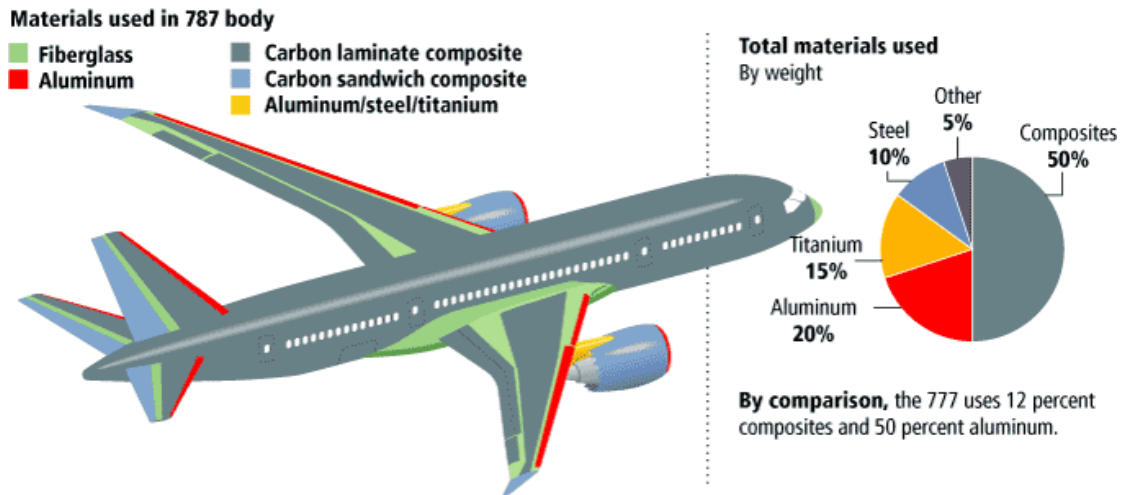
Όλες οι παραπάνω διαδικασίες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, το σύνθετο υλικό βρίσκεται κατά τη μορφοποίηση σε αεροστεγή καλύμματα και στο καλούπι μορφοποίησης. Οι χρήσεις των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με αυτές τις τεχνικές αφορούν κυρίως επιστρώσεις πτερυγίων αεροσκαφών και γενικά εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Οι συγκεκριμένες τεχνικές μορφοποίησης αποτελούν τα τελειότερα εργαλεία που έχουν ως τώρα αναπτυχθεί για τη μορφοποίηση σύνθετων υλικών υψηλών απαιτήσεων [5, 8].

1.8 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά και ειδικότερα τα FRP δεν χρησιμοποιούνται πια μόνο σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών έχει δώσει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής τους και σε άλλους τομείς τις τεχνολογίας. Αυτοί είναι:

1.8.1 Αεροπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές

Τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των σύνθετων υλικών σε επιβατικά αεροπλάνα όπως τα Airbus A350 XWB, Airbus 380 και Boeing 787, αλλά και σε στρατιωτικά, όπως το ελικόπτερο Super Puma (EUROCOPTERAS 332C-1) αγγίζει το 50-60% της κύριας δομής τους.



Σχήμα 14: Τμήματα χρησιμοποίησης σύνθετων υλικών στο Airbus 787 [3]

1.8.2 Αυτοκινητοβιομηχανία και μεταφορές

Η χρησιμοποίηση σύνθετων υλικών στις μεταφορές οφείλεται κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό στη μείωση του κόστους κατασκευής και συντήρησης και επιπλέον στη μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση καυσίμων.

1.8.3 Ναυπηγική

Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί τον βασικό, ίσως, τομέα χρήσης των σύνθετων υλικών. Βασικός λόγος είναι η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων σκαφών με χύτευση σε καλούπια.

1.8.4 Βιομηχανία αθλητικών ειδών

Η χρήση τους γίνεται σε αθλήματα όπου χρησιμοποιούνται κυρίως κατασκευές που επιδέχονται μεγάλες τάσεις και υψηλές ταχύτητες, όπως πλαίσια αγωνιστικών ποδηλάτων, πέδιλα του σκι, μπαστούνια του γκολφ, καλάμια ψαρέματος και άλλα.

1.8.5 Αιολική ενέργεια

Χρησιμοποιούνται κυρίως για να προσδώσουν την απαραίτητη ακαμψία, χωρίς τη ταυτόχρονη προσθήκη βάρους. Αυτό κάνει τις ανεμογεννήτριες πιο αποτελεσματικές στην παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας.

1.8.6 Άλλες εφαρμογές

Σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σωλήνων και δεξαμεμών αποθήκευσης υγρών και αερίων, παπουτσιών, αλεξίσφαιρων γιλέκων και άλλων [9].

2 Δοχεία πίεσης

2.1 Εισαγωγή

Τα δοχεία πίεσης (pressure vessels) αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μηχανικές κατασκευές, καθώς μπορούν να βρεθούν σε οποιαδήποτε μηχανή, από μία ατμομηχανή του 18^{ου} αιώνα, μέχρι και σε ένα διαστημόπλοιο του 21^{ου}.

Κατασκευασμένα συνήθως από χάλυβα, μερικές φορές από κράματα τιτανίου και αλουμινίου και σε σπανιότερες περιπτώσεις από γυαλί και πλαστικά, τα δοχεία πίεσης έχουν αναπτυχθεί και αναλυθεί σχεδόν στο μέγιστο βαθμό. Ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η κατασκευή τους ελέγχεται από πρότυπα, κώδικες και οδηγίες κατασκευής σε όλες τις χώρες στις οποίες κατασκευάζονται. Η ύπαρξη αυτών των προτύπων οφείλεται σε δύο λόγους: τη δυνατότητα και την αναγκαιότητα. Η δυνατότητα οφείλεται στην ύπαρξη σχετικά απλών εξισώσεων από τη θεωρία πλακών και κελυφών (theory of plates and shells) για την περιγραφή τους, με τις οποίες είναι εύκολο να βρεθούν ακριβείς αριθμητικές και αναλυτικές λύσεις. Η αναγκαιότητα διότι η μη ύπαρξη αξιόπιστων προβλέψεων για τη συμπεριφορά δοχείων που περιέχουν υγρά ή αέρια υπό πίεση μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι τα δοχεία πίεσης να είναι πλέον οι πιο αξιόπιστες μηχανικές δομές και να χρησιμοποιούνται επιτυχημένα σε όλους τους βιομηχανικούς κλάδους [10].

2.2 Τύποι δοχείων πίεσης

Θεωρητικά, τα δοχεία πίεσης μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιοδήποτε σχήμα, ωστόσο τα συνηθέστερα σχήματα είναι αυτά που αποτελούνται από κομμάτια σφαιρών, κυλίνδρων και κώνων, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σημεία συγκέντρωσης των τάσεων. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σχέδιο είναι ένας κύλινδρος με πώματα που ονομάζονται κεφαλές (heads). Το σχήμα των κεφαλών μπορεί να είναι ημισφαιρικό (hemispherical), ελλειψοειδές (ellipsoidal) ή κυρτό (torispherical). Πιο σύνθετα σχήματα που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι πολύ πιο δύσκολο να αναλυθούν για ασφαλή χρήση και συνήθως πολύ πιο δύσκολο να κατασκευαστούν.

Μια σφαίρα θεωρείται το ιδανικότερο σχήμα για δοχείο πίεσης, καθώς όχι μόνο μπορεί να αναλυθεί η συμπεριφορά της πολύ εύκολα, αλλά και η ανάλυση αυτή δείχνει ότι η αντοχή της λόγω του σφαιρικού σχήματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από το κυλινδρικό σχήμα, κυρίως λόγω της ομοιομορφίας του σχήματος. Παρόλα αυτά, η κατασκευή δοχείου σφαιρικού σχήματος είναι πολύ δύσκολή και ακριβή, με αποτέλεσμα ο πιο συνηθισμένος τύπος δοχείων πίεσης να είναι τα κυλινδρικά με 2:1 ημι-ελλειπτικές κεφαλές. Αυτού του τύπου δοχεία έχουν περίπου τη μισή αντοχή από ένα αντίστοιχο σφαιρικού σχήματος με το ίδιο πάχος τοιχώματος [11].

2.2.1 Σφαιρικά δοχεία πίεσης

Τα σφαιρικά δοχεία πίεσης χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση υγρών σε υψηλή πίεση, σε μεγάλο μέγεθος και σε εξωτερικούς χώρους. Εξαιτίας του σφαιρικού σχήματος υπάρχει μια ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων στην επιφάνεια της σφαίρας, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά, το οποίο σημαίνει πως δεν υπάρχουν αδύνατα σημεία.



Σχήμα 15: Σφαιρικά δοχεία πίεσης [www.wermac.org]

Ένα δοχείο αποθήκευσης σε σφαιρικό σχήμα έχει το μειονέκτημα ότι χρειάζεται μεγάλο αριθμό βοηθητικού εξοπλισμού, όπως εξαερισμούς και σωλήνες, ώστε να προληφθούν τυχόν αλλαγές από την υψηλή εξωτερική θερμοκρασία και τις βαρομετρικές διαφοροποιήσεις, αλλά και σκάλες και σημεία γείωσης, λόγω του μεγάλου μεγέθους που συνήθως έχουν.

Πλεονεκτήματα των σφαιρικών δοχείων πίεσης είναι ότι έχουν το μικρότερο εμβαδόν επιφάνειας ανά μονάδα όγκου σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σχήμα, το οποίο σημαίνει πως η θερμότητα που μεταφέρεται από το θερμότερο περιβάλλον

στο υγρό που βρίσκεται μέσα στη σφαίρα είναι πολύ μικρότερη από τα κυλινδρικά ή τα παραλληλεπίπεδα δοχεία [11].

2.2.2 Κυλινδρικά δοχεία πίεσης

Τα δοχεία πίεσης κυλινδρικού σχήματος χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, από πυροσβεστήρες και μπουκάλες οξυγόνου, μέχρι δοχεία αποθήκευσης υγρών και αερίων σε πολύ μεγάλες πιέσεις. Η σχετική ευκολία στην κατασκευή τους έχει οδηγήσει στη χρησιμοποίησή τους σε διάφορα μεγέθη και εφαρμογές.



Σχήμα 16: Κυλινδρικά δοχεία πίεσης [www.wermac.org]

Σε σχέση με τις σφαίρες, οι κύλινδροι είναι λιγότερο ικανοί στις πολύ υψηλές πιέσεις, καθώς η αδυναμία που έχουν εμφανίζεται στις κεφαλές τους. Αυτή η αδυναμία μειώνεται με τη χρήση κεφαλών κυκλικών διατομών. Για να κατασκευαστεί ένα κυλινδρικό δοχείο ίδιας αντοχής με ένα σφαιρικό, θα πρέπει το πάχος των τοιχωμάτων να είναι αρκετά πιο μεγάλο [11].

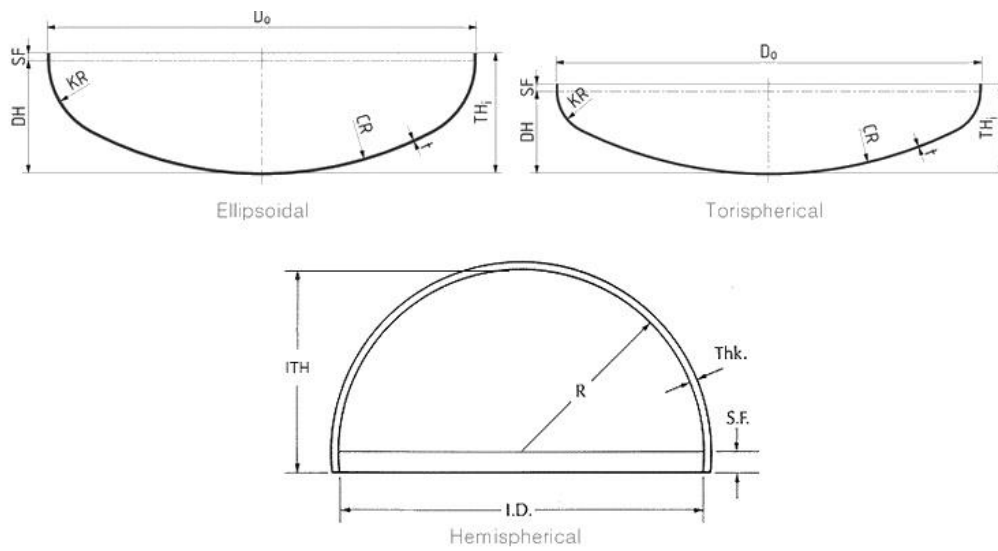


Σχήμα 17: Κυλινδρικά δοχεία υψηλής πίεσης [punjab-pk.all.biz]

2.2.3 Είδη κεφαλών

Τα είδη των κεφαλών που χρησιμοποιούνται στα κυλινδρικά δοχεία πίεσης μπορεί να είναι τρία (Σχήμα 18):

- **Ελλειψοειδεις κεφαλές:** Οι κεφαλές αυτές ονομάζονται επίσης και 2:1 ελλειπτικές κεφαλές και έχουν το πιο εργονομικό σχήμα από όλες διότι το ύψος τους είναι 4 φορές μικρότερο από τη διάμετρό τους. Η ακτίνα τους κυμαίνεται μεταξύ του κυρίου και του δευτερεύοντος άξονα.
- **Ημισφαιρικές κεφαλές:** Οντάς η σφαίρα το ιδανικότερο σχήμα για δοχεία πίεσης, έτσι και η ημισφαιρική κεφαλή θεωρείται η ιδανικότερη επιλογή για κεφαλές. Η ακτίνα (R) της κεφαλής είναι ίδια με αυτή του κυλινδρικού μέρους του δοχείου.
- **Κυρτές κεφαλές:** Οι κεφαλές αυτές έχουν μια κυρτή κεφαλή με σταθερή ακτίνα (CR), το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το είδος της κεφαλής και την κυρτότητά της. Η μετάβαση από τον κύλινδρο στο κυρτό μέρος της κεφαλής ονομάζεται άρθρωση (knuckle) και το σχήμα της είναι τοροειδές (toroidal). Το αδύνατο σημείο της κεφαλής αυτής είναι η άρθρωση, ωστόσο αυτό μπορεί να απαλειφθεί με μεγαλύτερο πάχος στο σημείο εκείνο.



Σχήμα 18: Τύποι κεφαλών [www.wermac.org]

Από τις παραπάνω κεφαλές, οι κυρτές συνήθως χρησιμοποιούνται σε δοχεία που η πίεση δεν υπερβαίνει τα 10bar ενώ οι άλλες δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε δοχεία για μεγαλύτερες πιέσεις [11].

3 Σχεδιασμός και κατασκευή δοχείου πίεσης

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος παραγωγής της δεξαμενής από σύνθετα υλικά. Η αρχή γίνεται με το σχεδιασμό της στο λογισμικό SolidWorks, αφού πρώτα επιλέχθηκε ο τρόπος κατασκευής της. Με βάση τα διαθέσιμα μέσα και διαδικασίες, αποφασίστηκε η χρήση ενός αρσενικού καλουπιού για την κατασκευή δύο όμοιων κομματιών, τα οποία στη συνέχεια ενώθηκαν με τη διαδικασία του bonding, σχηματίζοντας το τελικό σχήμα της δεξαμενής.

3.2 CAD (Computer-aided design)

Τα τελευταία χρόνια όλοι σχεδόν οι τομείς της μηχανικής αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς, κυρίως λόγω της εισαγωγής των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η ικανότητα που δίνεται μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή για την εμφάνιση μιας γεωμετρίας, έχει αλλάξει σημαντικά τόσο την εκπαίδευση, όσο και την επαγγελματική πρακτική της μηχανικής.

Η σχεδίαση με χρήση Η/Υ, γνωστή ως CAD (Computer-Aided Design), είναι σχεδίαση μέσω συστημάτων πληροφορικής που έχει ως στόχο τη δημιουργία, τροποποίηση, ανάλυση και βελτιστοποίηση ενός προϊόντος. Περιλαμβάνει την τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου δεδομένων για τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος.

3.2.1 Τομείς εφαρμογής

Η σχεδίαση μέσω Η/Υ (CAD) 2D και 3D ξεκίνησε στις μηχανολογικές εφαρμογές και στη συνέχεια επεκτάθηκε και σε άλλες εφαρμογές, όπου τελικά η χρησιμοποίησή της είναι απολύτως απαραίτητη.

Μηχανολογικές εφαρμογές

Οι περισσότερες εφαρμογές αφορούν την αεροναυπηγική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία καθώς και τη βιομηχανία μετάλλων, κατασκευών και συσκευασίας. Αυτό συμβαίνει διότι όλες αυτές οι βιομηχανίες απαιτούν τρισδιάστατη απεικόνιση και ανάλυση των προϊόντων κυρίως για τη

συναρμολόγησή τους, η οποία μπορεί να αποτελείται σε κάποιες περιπτώσεις από εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες κομμάτια. Η σχεδίαση με χρήση συστημάτων πληροφορικής είναι η κατάλληλη, διότι δεν είναι μόνο οικονομικά συμφέρουσα, αλλά έχει και κάποια ακόμα πλεονεκτήματα. Αρχικά, μπορεί να γίνει σχεδίαση και προσομοίωση της κίνησης και των προδιαγραφών ενός προϊόντος πριν ακόμα ξεκινήσει η παραγωγή του. Επίσης, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος, μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Τέλος, η ύπαρξη κατάλληλων 'interfaces' (STEP, IGES, STL, BREP) κάνει πολύ απλή, όχι μόνο τη μεταφορά αρχείων από το ένα σύστημα στο άλλο, αλλά και την απευθείας μεταφορά του προϊόντος σε μηχανήματα για την κατασκευή του. Υπάρχουν πολλοί προμηθευτές διεθνώς, με τα κυριότερα συστήματα να είναι τα CATIA – Dassault Systèmes, UG – Unigraphics solutions, Solidworks – Dassault Systèmes, Inventor/Autocad – Autodesk, Solidesign – Intergraph/ Unigraphics solutions.

Ηλεκτρονικές εφαρμογές

Αφορούν κυρίως τη σχεδίαση πλακετών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ηλεκτρολογικής σχεδίασης. Όλα τα συστήματα ηλεκτρονικής σχεδίασης πρέπει να συνεργάζονται και να έχουν άμεση σύνδεση με μηχανολογικό σύστημα, για να ελέγχουν τη δυνατότητα συναρμολόγησης του προϊόντος.

Άλλοι τομείς εφαρμογών

Κατασκευές: Εφαρμογές σε κατασκευές κτηρίων και διαφόρων μεγάλων ειδικών έργων.

Χαρτογράφηση (mapping): Συστήματα GIS (Graphics Information Systems).

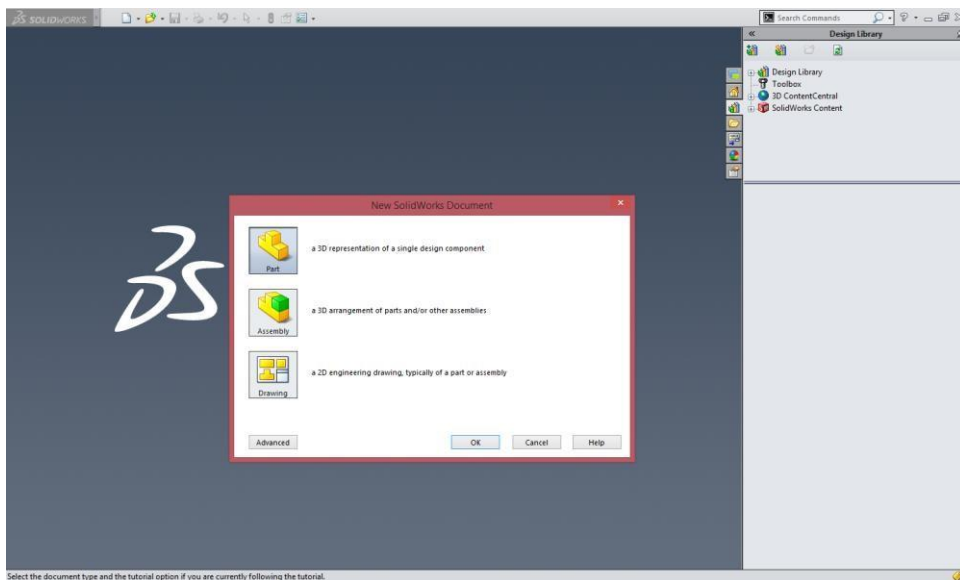
Ένδυση: Η εφαρμογή της στη βιομηχανία ένδυσης είναι ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο και χαρακτηρίζεται από μεγάλη αποδοτικότητα [12].

3.3 Λογισμικό SolidWorks

Το SolidWorks είναι ένα λογισμικό ολοκληρωμένης παραμετρικής τρισδιάστατης σχεδίασης που επιτρέπει στο χρήστη τη σχεδίαση ενός 3-D μοντέλου, δίνοντάς του ταυτόχρονα τη δυνατότητα αλλαγής των διαστάσεων, των περιορισμών και των σχέσεων.

Το λογισμικό SolidWorks δίνει τη δυνατότητα οργάνωσης των αρχείων σε τρεις μορφές (Σχήμα 19):

- **Εξαρτήματα:** Αποτελούν το βασικό στοιχείο σχεδιασμού μιας δεδομένης γεωμετρίας συγκεκριμένων διαστάσεων.
- **Συναρμολογήσεις:** Αυτού του είδους τα αρχεία χρησιμοποιούνται για τη συναρμολόγηση δύο ή περισσότερων εξαρτημάτων.
- **Σχέδια:** Εξαρτήματα ή συναρμολογήσεις που χρησιμοποιούνται για σχέδια 2-D.

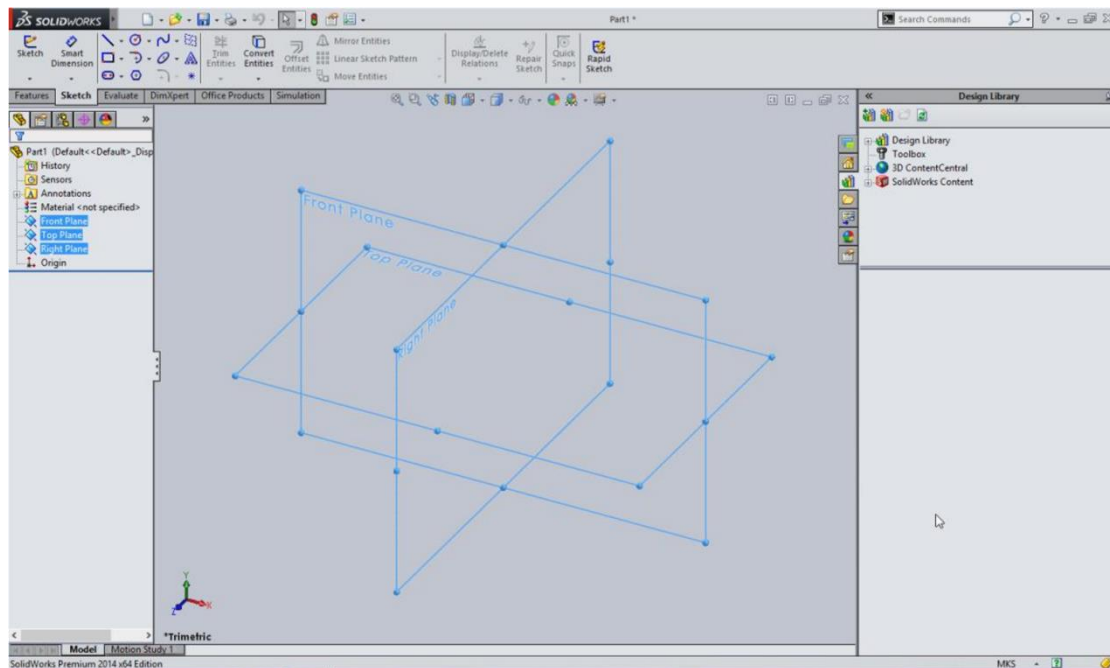


Σχήμα 19: Τρεις μορφές οργάνωσης στο SolidWorks

Σαν παράμετροι αναφέρονται οι περιορισμοί, των οποίων οι τιμές καθορίζουν τελικά τη γεωμετρία του μοντέλου. Οι παράμετροι μπορούν να είναι είτε αριθμητικές παράμετροι, όπως μήκος γραμμών, διάμετρος κύκλου ή γεωμετρικές παράμετροι, όπως εφαπτόμενες ή παράλληλες γραμμές, ομόκεντροι κύκλοι κ.α. Οι αριθμητικές παράμετροι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω της χρήσης των 'σχέσεων' (relations), το οποίο επιτρέπει σε αυτές να καταγράψουν ακριβώς τις προθέσεις του σχεδιαστή.

Για τη δημιουργία ενός εξαρτήματος, χρειάζεται τουλάχιστον μια εντολή σχεδίασης (sketch), η οποία πάντα εκτελείται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο (plane) της σχεδιαστικής επιφάνειας (Front, Right ή Top Plane) (Σχήμα 20). Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει από έναν μεγάλο αριθμό εργαλείων για τη σχεδίαση όπως, γραμμές

κύκλοι, τετράγωνα, πολύγωνα και πολλά άλλα ανάλογα με την ανάγκη του κάθε σχεδίου [12].



Σχήμα 20: Οι επιλογές επιπέδων

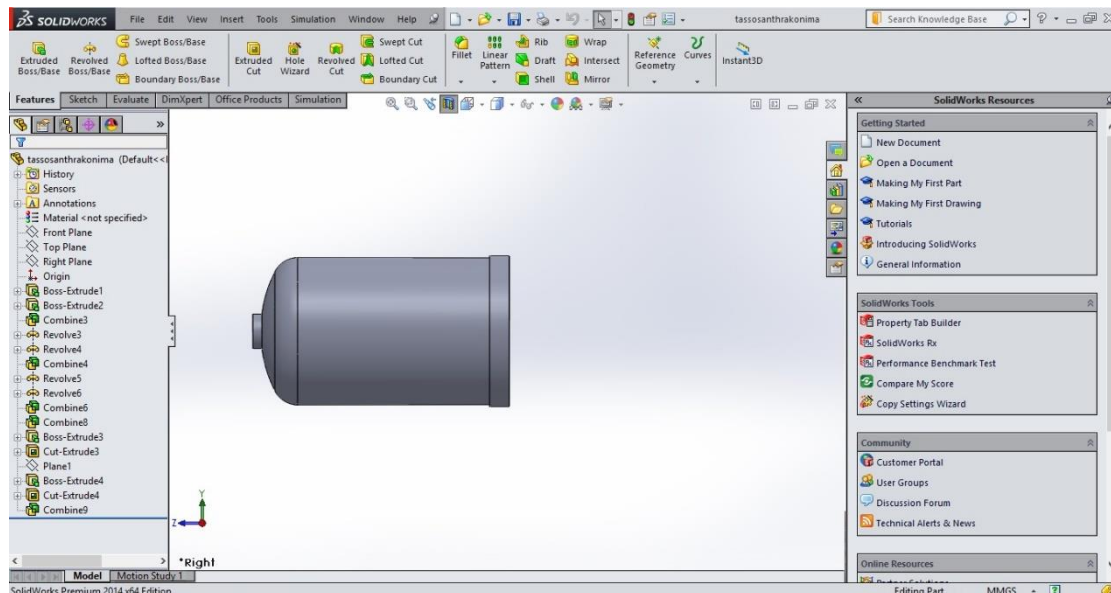
3.4 Σχεδιασμός δεξαμενής

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει για να ξεκινήσει η κατασκευή ενός εξαρτήματος είναι ο σχεδιασμός του είτε σε χαρτί, είτε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πριν από την έναρξη του σχεδιασμού, λήφθηκαν υπόψιν οι εξής παράμετροι:

- **Μέγεθος και σχήμα δεξαμενής:** Η επιλογή του κυλινδρικού σχήματος έγινε διότι στην αγορά υπάρχει μεγάλη γκάμα κυλινδρικών δεξαμενών κατασκευασμένων από μεταλλικά υλικά (κυρίως χάλυβα). Όσον αφορά το μέγεθος, αυτό επιλέχθηκε καθαρά για κατασκευαστικούς λόγους. Η διαθεσιμότητα καλουπιών κυλινδρικού σχήματος σε διάφορα μεγέθη ήταν περιορισμένη, οπότε επιλέχθηκε αυτό το οποίο με την ευκολότερη δυνατή επεξεργασία θα μπορούσε να γίνει κατάλληλο για καλούπι σύνθετων υλικών.
- **Ιδιότητες υλικού:** Το ανθρακόνημα σαν υλικό είναι δύσκολο να μορφοποιηθεί και να επεξεργαστεί, οπότε προϋποθέτει σχήματα σχετικά απλά με λίγες γωνίες και καμπύλες.

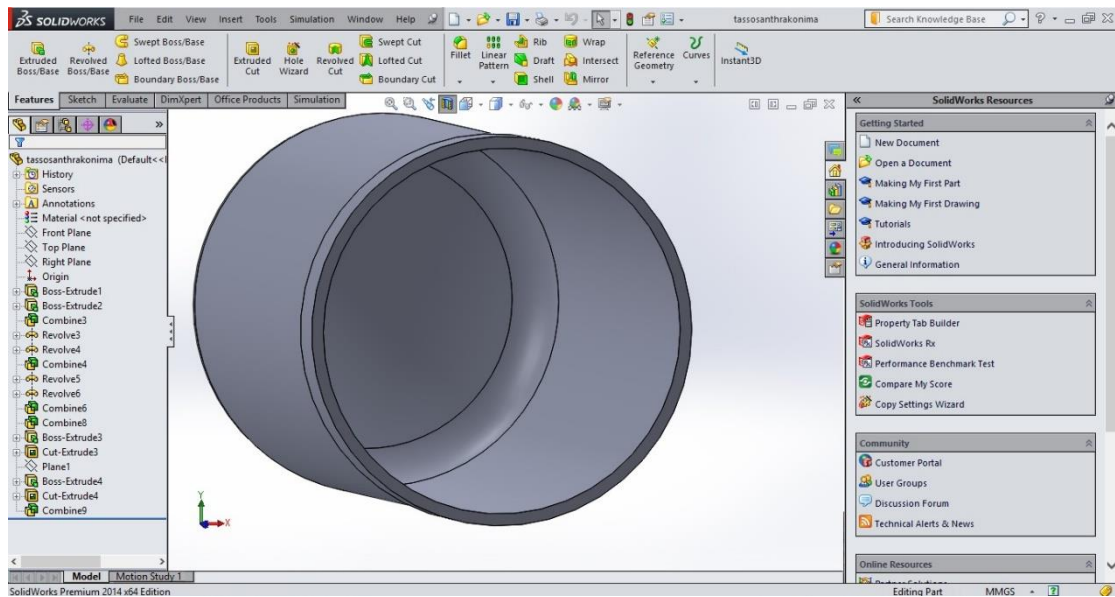
- **Αριθμός μερών κατασκευής:** Η ‘συγκόλληση’ τμημάτων από ανθρακονήματα είναι σχετικά δύσκολη και συνήθως είναι το πιο αδύναμο σημείο μιας κατασκευής. Η κατασκευή κυλινδρικής δεξαμενής σε ένα τμήμα δεν κατέστη δυνατή, οπότε αποφασίστηκε η κατασκευή να χωριστεί σε δύο ίδια τμήματα και στην συνέχεια αυτά τα τμήματα να ‘συγκολληθούν’ μεταξύ τους.
- **Χαρακτηριστικά υλικού:** Στα χαρακτηριστικά του υλικού ανήκει κυρίως το πάχος της κάθε στρώσης. Σύμφωνα με το datasheet για το ανθρακόνημα που χρησιμοποιήθηκε, αυτό έχει πάχος περίπου 0,22mm μετά το θερμικό κύκλο, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Αφού λήφθηκαν υπόψιν όλα τα παραπάνω και επιλέχθηκε το είδος του καλουπιού, το σχήμα του, και το πάχος του δοχείου, ξεκίνησε ο σχεδιασμός των δύο κομματιών στο SolidWorks, ώστε να υπάρχει σε ηλεκτρονική μορφή το σχέδιο της δεξαμενής.



Σχήμα 21: Σχέδιο πρώτου κομματιού

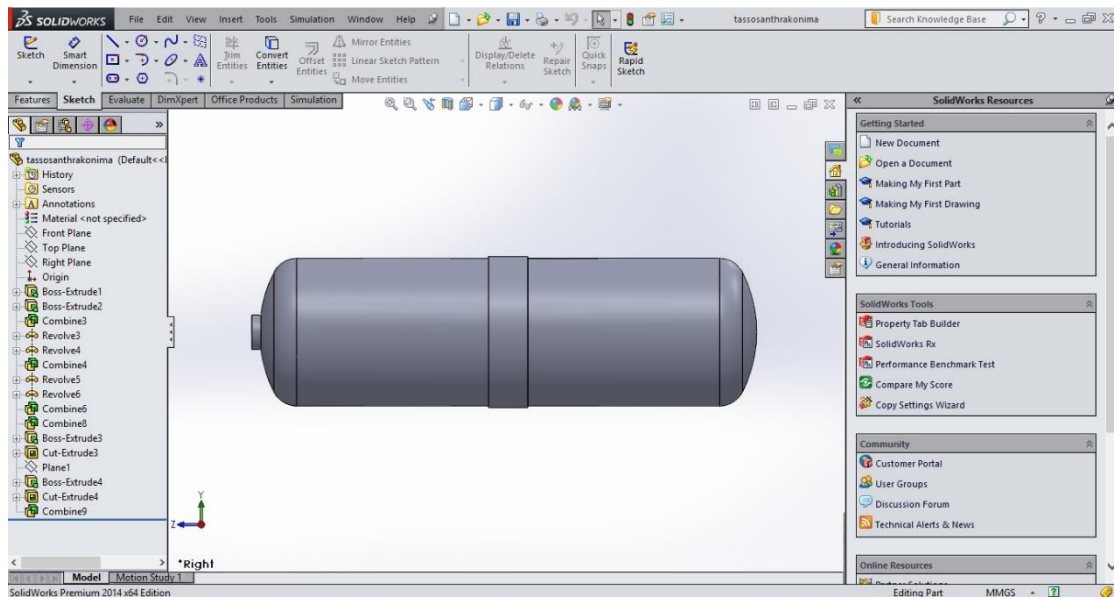
Χρησιμοποιώντας τις εντολές Sketch σχεδιάστηκαν σε 2D τα βασικά σχήματα του σχεδίου και στη συνέχεια με τις εντολές Boss-Extrude, Revolve και Cut-Extrude το σχέδιο αναπτύχθηκε σε 3D μορφή (Σχήμα 21).



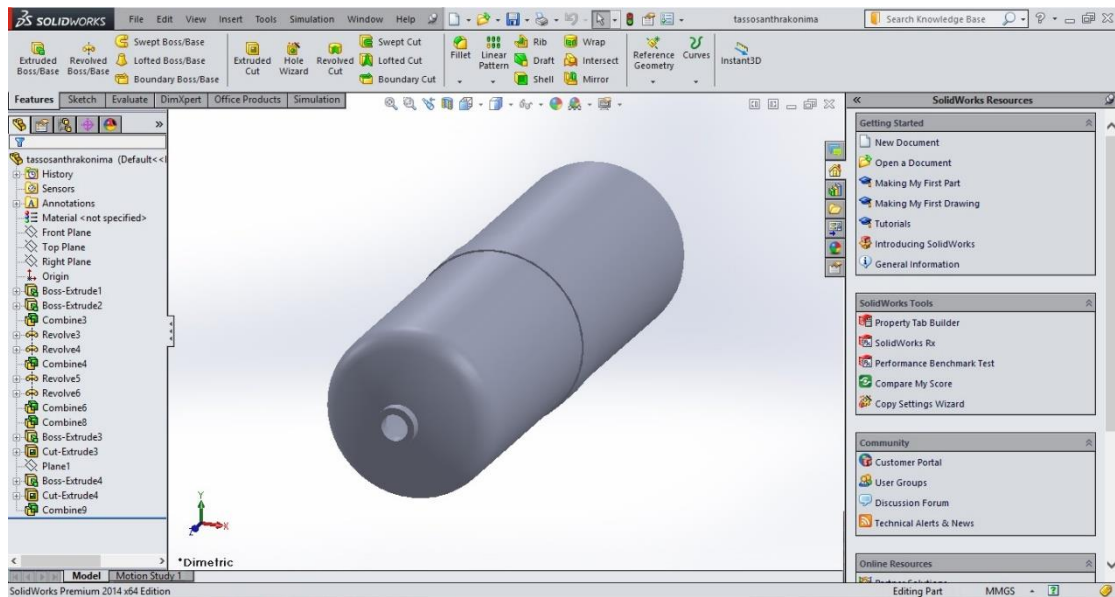
Σχήμα 22: Σχέδιο δεύτερου κομματιού

Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάστηκε και το δεύτερο μέρος της κατασκευής (Σχήμα 22).

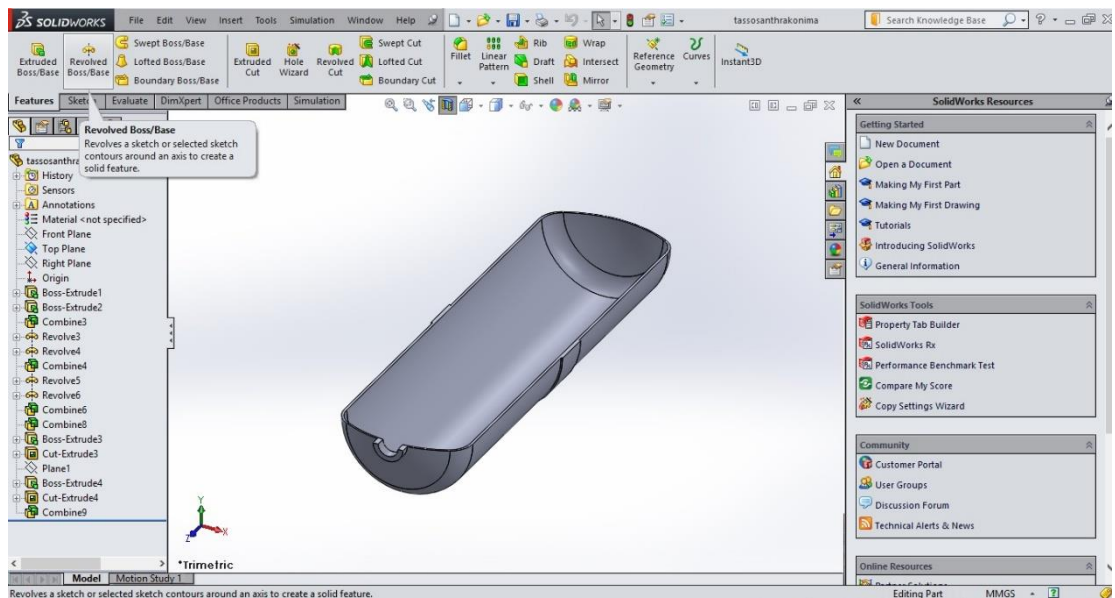
Στη συνέχεια, με τις εντολές Combine τα δύο κομμάτια ενώθηκαν, δημιουργώντας το τελικό σχέδιο (Σχήμα 23).



Σχήμα 23: Τελικό σχέδιο



Σχήμα 24: Τελικό σχέδιο



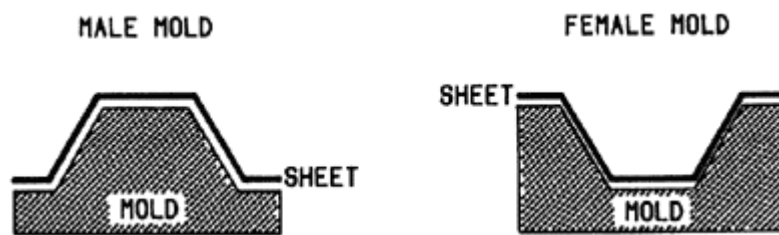
Σχήμα 25: Τομή τελικού σχεδίου

3.5 Κατασκευή – προετοιμασία καλούπιου

Όπως συμβαίνει στις κατεργασίες χύτευσης των μετάλλων, έτσι και στα συνθετικά υλικά, για να τους δώσουμε το επιθυμητό σχήμα χρειαζόμαστε ένα καλούπι. Το καλούπι είναι σημαντικότερο κεφάλαιο στη διαδικασία της κατασκευής ανθρακονημάτων, αφού μαζί με το πρωτότυπο, αποτελούν την ουσιαστική επένδυση ενός κατασκευαστή. Από τη στιγμή που θα φτιάξουμε το (ακριβό) καλούπι, μεγάλο μέρος της αξίας των αρχικών προϊόντων θα παίζει το ρόλο της

απόσβεσης του καλουπιού. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό πως η τιμή μιας κατασκευής από ανθρακονήματα εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από το καλούπι: αν υπάρχει, η τιμή θα είναι πολύ χαμηλότερη απ' ό,τι αν πρέπει να κατασκευαστεί το καλούπι από το μηδέν.

Τα συνηθισμένα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται ένα καλούπι είναι διάφορα μέταλλα, γύψος και συνθετικά υλικά ρητίνης ή πολυεστέρα. Καλύτερο είναι το καλούπι που έχει φτιαχτεί από το ίδιο υλικό με το κομμάτι που θέλουμε φτιάξουμε. Και εφόσον εδώ μιλάμε για ανθρακονήματα και συνθετικά υλικά, το ιδανικό καλούπι φτιάχνεται από τέτοια υλικά. Ο βασικός λόγος που επιθυμούμε κοινά υλικά για καλούπι και κομμάτι είναι διότι κατά τη θερμική επεξεργασία του συνόλου, κάθε υλικό πρέπει να έχει ίδιο ποσοστό διαστολής, ώστε να μη χάσουν την επαφή μεταξύ τους, λόγω αποκόλλησης σε κάποιο σημείο. Μια δεύτερη κύρια κατηγοριοποίηση των καλουπιών γίνεται σύμφωνα με τη δυνατότητα αποτύπωσης του υφάσματος στην εσωτερική ή την εξωτερική τους επιφάνεια, όποτε έχουμε αντίστοιχα τα “θηλυκά” (αρνητικά) καλούπια και τα “αρσενικά” (θετικά) (Σχήμα 26). Ένας πρώτος τρόπος επιλογής μεταξύ των δυο τύπων γίνεται βάσει της ποιότητας της επιφάνειας που μας ενδιαφέρει περισσότερο, ειδικά αν το υπό κατασκευή κομμάτι φτιάχνεται καθαρά για αισθητικούς λόγους. Η επιφάνεια που εφάπτεται στο καλούπι είναι κατά κανόνα πιο λεία, ενώ η άλλη περισσότερο τραχιά.



Σχήμα 26: Είδη καλουπιού [www.empirewest.com]

Συνεπώς, η τελική επιλογή του καλουπιού έγινε με βάση τη διαθεσιμότητα χρόνου, την τελική εφαρμογή και την επιφάνεια που επιθυμούσαμε να γίνει λεία. Η κατασκευή ενός καλουπιού από παρόμοιο υλικό με το ανθρακόνημα εγκαταλείφθηκε αμέσως, λόγω του κόστους κατασκευής και της πολυπλοκότητάς του. Τελικά, επιλέχθηκε η χρήση μιας μεταλλικής κυλινδρικής δεξαμενής με ελλειψοειδείς κεφαλές ως καλουπιού, μήκους ακριβώς του μισού από το επιθυμητό τελικό μήκος κατασκευής, αφού είχε ήδη αποφασιστεί η κατασκευή δύο όμοιων τμημάτων και η μετέπειτα κόλλησή τους. Το υλικό του καλουπιού ήταν χάλυβας

ST12 ψυχρής έλασης και χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Το κυλινδρικό τμήμα της δεξαμενής είχε ύψος 21cm και περίμετρο 46cm. Οι διαστάσεις αυτές μας ενδιαφέρουν διότι το καλούπι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σαν ‘αρσενικό’, ώστε η απόλυτα λεία επιφάνεια στο τελικό προϊόν να είναι η εσωτερική, καθώς πρόκειται για δεξαμενή αποθήκευσης αερίου. Για να γίνει εφικτή η χρησιμοποίησή του σαν καλούπι, έγινε αρχικά απομάκρυνση του χρώματος με ειδικά χημικά και αμμοβολή, καθώς η διαδικασία παραγωγής ενός κομματιού από ανθρακονήματα εμπεριέχει θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες, στις οποίες δεν πρέπει να παρεμβαίνει τίποτα στη διεπιφάνεια καλουπιού –ανθρακονήματος, κάτι που θα είχε σαν αποτέλεσμα την αποκόλληση των δύο υλικών και την παραποίηση του τελικού σχήματος του προϊόντος. Στη συνέχεια, ακολούθησε η λείανση όλων των κολλήσεων και τυχόν ατελειών από την επιφάνεια του καλουπιού, διότι τυχόν ανωμαλίες και εξογκώματα μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος και τη δυνατότητα αποκόλλησής του από το καλούπι. Μια τελευταία αλλά πολύ σημαντική επεξεργασία που έγινε στο καλούπι, ήταν να δημιουργηθεί μια μικρή κωνικότητα ($\sim 1^\circ$), ξεκινώντας από τη βάση και φτάνοντας στο πάνω μέρος του καλουπιού. Αυτό συνέβη καθώς χωρίς να επηρεάζεται το τελικό σχήμα, έγινε πολύ εύκολη η αποκόλληση του προϊόντος από το καλούπι. Η σημασία αυτής της κωνικότητας έγκειται στο ότι τα κυλινδρικού σχήματος καλούπια είναι αυτά που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη δυσκολία αποκόλλησης του τελικού προϊόντος από αυτά, μετά την ολοκλήρωση του θερμικού κύκλου.



Σχήμα 27: Καλούπι κατασκευής

3.6 Κατασκευή δεξαμενής

3.6.1 Χρησιμοποιούμενα υλικά

Το υλικό που χρησιμοποιήσαμε ήταν πλεκτά prepreg HexPly M18/1 της εταιρείας HEXCEL. Το υλικό ενίσχυσης του συγκεκριμένου υφάσματος είναι ανθρακονήματα και η μήτρα εποξική ρητίνη. Τα υφάσματα της κατηγορίας M18 έχουν αναπτυχθεί κυρίως για να πληρούν τις απαιτήσεις της αεροδιαστημικής βιομηχανίας και συναντώνται στις κύριες δομές των κατασκευών, χρησιμοποιώντας τις τυπικές διαδικασίες παραγωγής. Η μήτρα έχει βελτιωμένες ιδιότητες, οι οποίες επιτρέπουν εύκολο lay-up, καλύτερο tack-life και καλύτερο φινίρισμα στην τελική επιφάνεια. Η χαμηλή πρόσληψη υγρασίας επιτρέπει καλές ιδιότητες τόσο σε υγρό, όσο και σε στεγνό περιβάλλον, ακόμη και σε θερμοκρασίες έως 135° C [13].

Χαρακτηριστικά υφάσματος

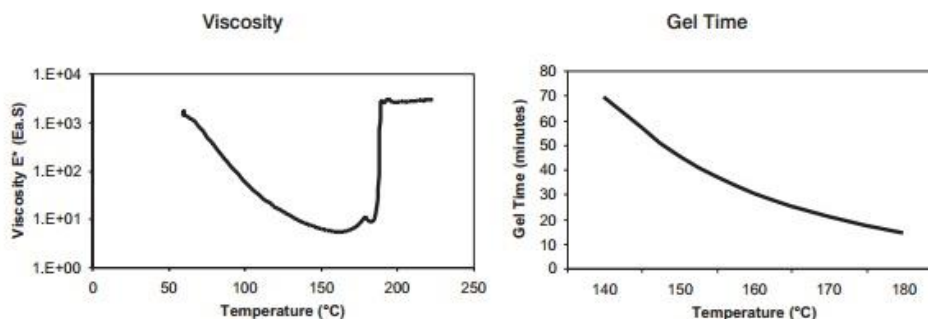
- Πολύ καλές ιδιότητες σε υγρό περιβάλλον και υψηλές θερμοκρασίες (συνεχής λειτουργία στους 135° C και ταυτόχρονα υγρό περιβάλλον).
- Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας (0,74% μετά από μια εβδομάδα στους 70° C με 95% σχετική υγρασία RH).
- Ευέλικτος cure cycle (από 135° C έως 210° C, με ή χωρίς post cure).
- Συγκεκριμένος cure-cycle για μορφοποίηση σε σακούλα κενού.

Χαρακτηριστικά αποθήκευσης prepreg

- Tack-life – 13 μέρες σε θερμοκρασία δωματίου 23° C.
- Out-life – 15 μέρες σε θερμοκρασία δωματίου 23° C.
- Shelf-life – 12 μήνες στους -18° C (από την ημερομηνία κατασκευής).

Χαρακτηριστικά μήτρας

Resin Matrix Properties



Typical Neat Resin Data

Colour	Orange
Density	1.22 g/cm ³
Glass Transition Temperature T _g Dry	196 °C
Glass Transition Temperature T _g wet	
14 days in water @70°C	165 °C
Tensile Strength	66 MPa
Tensile Modulus	4.2 GPa
Tensile Strain	1.58 %
Poisson Ratio	0.40%
Linear coefficient of thermal expansion	55.10 ⁻⁶ °K ⁻¹
Fracture toughness, K _{Ic}	0.93 MPa.√m
Strain energy release rate, G _{Ic}	230 J/m ²

Σχήμα 28: Χαρακτηριστικά μήτρας [13]

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 28, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης είναι αρκετά υψηλή (196°C). Τα κύρια χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι η αντοχή σε εφελκυσμό που φτάνει τα 66MPa και το μέτρο ελαστικότητας που φτάνει τα 4,2GPa. Παράλληλα, δίδονται και δύο διαγράμματα που αφορούν το ιξώδες κατά τη θέρμανση της ρητίνης (Σχήμα 28) [13].

Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες

Πίνακας 5: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιούμενου υλικού [13]

Prepreg Properties – HexPly® M18/1 UD and Woven Carbon Prepregs

Physical Properties

	Units	42% G947 UD	43% G939 Fabric
Fibre Density	g/cm ³	1.78	1.78
Filament count/tow		3000	3000
Resin Density	g/cm ³	1.22	1.22
Fibre areal weight	g/m ²	160	220
Nominal Cured Ply Thickness	mm	0.165	0.227
Nominal Fibre Volume	%	55	55

Mechanical Properties

Test	Standard	Units	Temp (°C)	Condition UD	42% G947 Fabric	43% G939
0° Tensile Strength	EN2561	MPa	-55	Dry	1750	750
			RT	Dry	1750	800
			135	Wet	1700	800
90° Tensile Strength		MPa	RT	Dry	55	800
0° Tensile Modulus	EN2561	GPa	-55	Dry	127	67
			RT	Dry	128	65
			135	Wet	133	67
90° Tensile Modulus		GPa	RT	Dry	9.3	67
0° Compression Strength	EN2850 Type A	MPa	-55	Dry	1500	850
			RT	Dry	1200	800
			135	Wet	750	500
90° Compression Strength		MPa	RT	Dry	220	800
0° Compression Modulus	EN2850 Type A	GPa	-55	Dry	121	62
			RT	Dry	121	64
			135	Wet	121	63
90° Compression Modulus		GPa	RT	Dry	10.2	62
0° ILSS (Short beam shear)	EN2563	MPa	RT	Dry	95	70
			75	Wet	65	56
			135	Wet	50	40
In-plane Shear Strength	EN6031	MPa	RT	Dry	95	100
			75	Wet	90	85
			135	Wet	70	65

Στον Πίνακα 5 δίνονται αρχικά οι φυσικές ιδιότητες του προεμποτισμένου υλικού. Πιο συγκεκριμένα, κοιτάζοντας την τελευταία στήλη (fabric), παρατηρούμε την πυκνότητα των ινών που είναι 1,78g/cm³ και την αντίστοιχη τιμή της ρητίνης που είναι 1,22g/cm³. Πολύ σημαντικό, κυρίως για το σχεδιασμό, είναι το πάχος του υφάσματος μετά τη μορφοποίηση, που δίδεται ίσο με 0,0227mm [13].

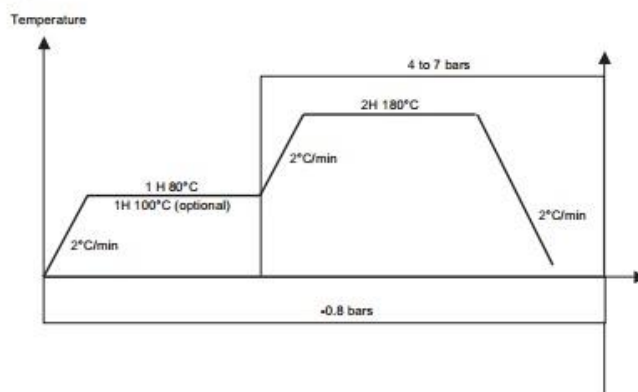
Στον δεύτερο πίνακα δίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού (προτελευταία στήλη). Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με τα πρότυπα EN και ISO και δίνονται από τον κατασκευαστή, βοηθώντας στο σχεδιασμό, αλλά και στην πρόβλεψη των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος.

Συνθήκες curing

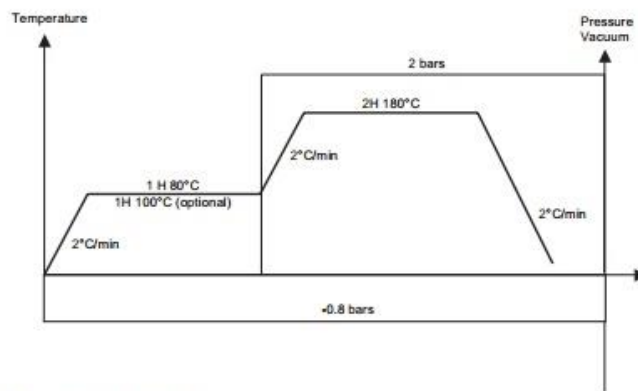
Παρακάτω δίνονται τρεις κύκλοι curing για τα τρία διαφορετικά είδη μορφοποίησης που μπορεί να επιδεχθεί το prepreg (Σχήμα 29).

Curing Conditions

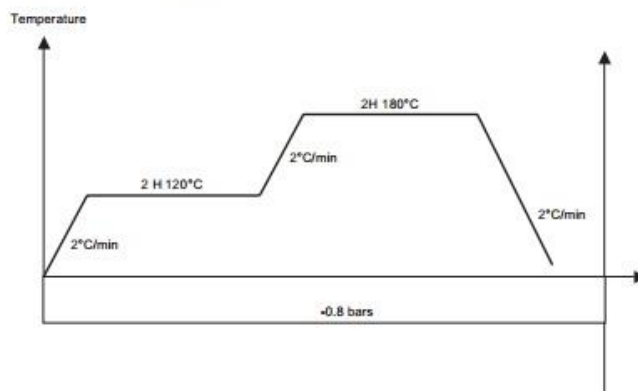
Monolithic Parts (autoclave)



Sandwich parts (autoclave)



Vacuum bag cycle (monolithic and sandwich parts):



Σχήμα 29: Συνθήκες Curing [13]

3.7 Διαδικασία lay-up

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία του lay-up, η εξωτερική επιφάνεια του καλουπιού περάστηκε τρεις φορές με αποκολλητικό LOCTILE 700-NC της εταιρείας Frekote, ώστε να γίνει ευκολότερη η αποκόλληση του δοχείου από το καλούπι μετά το θερμικό κύκλο. Για τον ίδιο λόγο, πριν από το στρώσιμο, επάνω στην επιφάνεια του καλουπιού απλώθηκε ειδικό ‘release film’ καφέ χρώματος, για να διευκολυνθεί ακόμα περισσότερο η απομάκρυνση αυτού από τη σύνθετη κατασκευή μετά το ψήσιμο (Σχήμα 30, Σχήμα 31).



Σχήμα 30: Release film



Σχήμα 31: Release film στην κεφαλή

Στη συνέχεια, ξεκίνησε το lay-up πάνω στο καλούπι. Λόγω της πολυπλοκότητας του σχήματος, δεν θα ήταν δυνατό να καλυφθεί όλο το καλούπι με ένα μονοκόμματο πατρόν (πατρόν είναι ουσιαστικά τα αναπτύγματα στο επίπεδο των επιμέρους τρισδιάστατων καμπυλών). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η κάθε στρώση αποτελείται από ένα κυκλικό κομμάτι διαμέτρου 25cm και από ένα παραλληλόγραμμο κομμάτι 20×50cm².



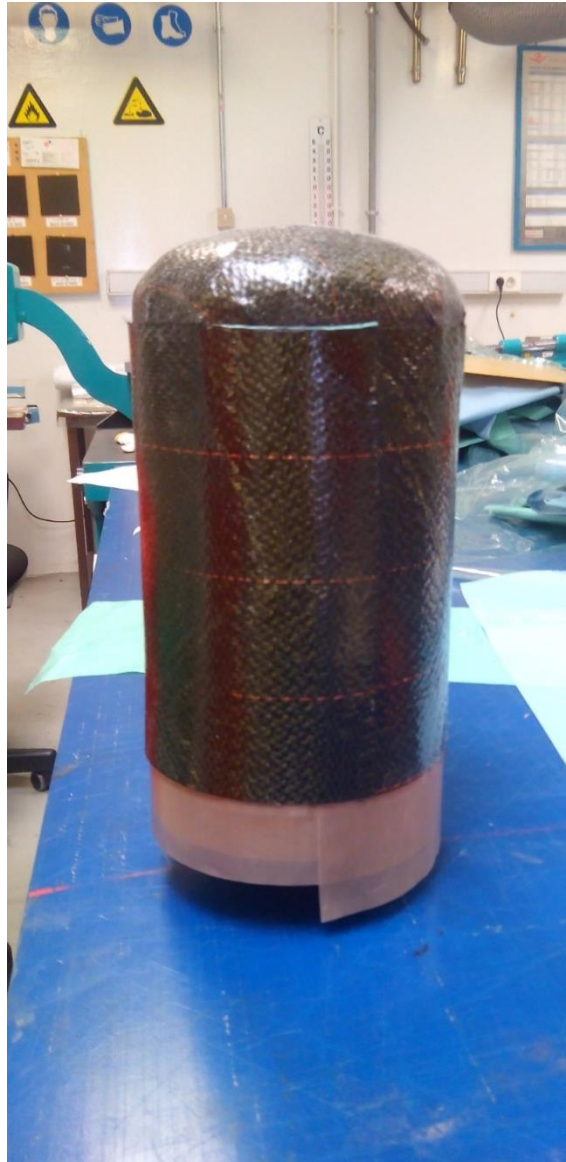
Σχήμα 32: Πρώτη στρώση (κυκλικό κομμάτι)

Σε κάθε στρώση, αρχικά, τοποθετείται το κυκλικό τμήμα στο επάνω μέρος του καλουπιού και στη συνέχεια με ψαλίδι κόβεται η επιπλέον καμπυλότητα, ώστε τελικά να δημιουργηθεί ένα ευθύγραμμο τμήμα (Σχήμα 32, Σχήμα 33).



Σχήμα 33: Τελική μορφή κυκλικού κομματιού

Έπειτα, ακολουθούσε η τοποθέτηση του παραλληλόγραμμου κομματιού. Η τοποθέτηση γινόταν με overlap 3cm σε σχέση με το κυκλικό κομμάτι, ενώ overlap δημιουργούνται και στο ίδιο το κομμάτι της τάξης των 4cm (Σχήμα 34). Η κάθε επόμενη στρώση του παραλληλόγραμμου κομματιού ξεκινούσε 8cm δεξιότερα από την προηγούμενη αρχική θέση, ώστε ύστερα από τις 10 στρώσεις, το πάχος να είναι όμοιο σε όλη την περιφέρεια του κυλίνδρου.



Σχήμα 34: Πρώτη στρώση (παράλληλόγραμμο κομμάτι)

Η πρώτη στρώση, η οποία αποτελείται από το κυκλικό και το παραλληλόγραμμο κομμάτι, τοποθετήθηκε με τις ίνες σε διεύθυνση $0^{\circ}/90^{\circ}$. Στο Σχήμα 34 βλέπουμε ξεκάθαρα τις κόκκινες διακεκομμένες γραμμές, οι οποίες υποδηλώνουν την κύρια διεύθυνση των ινών. Στη συνέχεια, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ακριβώς η ίδια και για τις υπόλοιπες στρώσεις, με εναλλαγή στις διευθύνσεις από $0^{\circ}/90^{\circ}$ σε $45^{\circ}/-45^{\circ}$. Αυτό έγινε για να υπάρχει μια ισορροπία όσον αφορά τις τάσεις, να υπάρχουν, δηλαδή, ίνες σε τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις, το οποίο προσδίδει στην κατασκευή αντοχή σε πολλές διευθύνσεις. Η αντοχή σε πολλές διευθύνσεις είναι πολύ σημαντική για μια κατασκευή σαν αυτή, διότι μια δεξαμενή αποθήκευσης αερίου πρέπει να έχει καλή αντοχή σε όλες τις διευθύνσεις, αφού οι

τάσεις που δέχεται από την εσωτερική πίεση είναι μεγάλες. Ειδικά στις κεφαλές, που είναι τα σημεία που δέχονται τις περισσότερες τάσεις, είναι απαραίτητο οι ίνες να υπάρχουν σε πολλές διευθύνσεις, ώστε να προσδίδουν στην κατασκευή μεγαλύτερη αντοχή.

Οι παρακάτω πίνακες δείχνουν το stacking sequence, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο δηλαδή τοποθετήθηκαν τα υφάσματα σε κάθε στρώση (Πίνακας 6, Πίνακας 7).

Πίνακας 6: Stacking sequence κυκλικών κομματιών

Κύκλος			
Sequence	Ply	Material	Direction
1	Ply.1	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
2	Ply.2	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
3	Ply.3	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
4	Ply.4	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
5	Ply.5	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
6	Ply.6	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
7	Ply.7	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
8	Ply.8	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
9	Ply.9	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
10	Ply.10	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°

Πίνακας 7: Stacking sequence παραλληλόγραμμων κομματιών

Παραλληλόγραμμα			
Sequence	Ply	Material	Direction
1	Ply.1	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
2	Ply.2	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
3	Ply.3	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
4	Ply.4	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
5	Ply.5	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
6	Ply.6	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
7	Ply.7	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
8	Ply.8	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°
9	Ply.9	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
10	Ply.10	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	45°/-45°

Από την 4^η στρώση μέχρι τη 9^η, μαζί με το κυκλικό και το παραλληλόγραμμο κομμάτι τοποθετήθηκε και από μία λωρίδα στο κάτω μέρος του κυλίνδρου 2,5×45cm² (Σχήμα 35). Αυτό έγινε ώστε να δημιουργηθεί ένα ‘χείλος’, το οποίο βοήθησε στο να αυξηθεί το πάχος στο συγκεκριμένο σημείο, ώστε τελικά να

υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια για τη μετέπειτα ένωση των δύο μερών του κυλίνδρου.



Σχήμα 35: Πρώτη στρώση (λωρίδα)

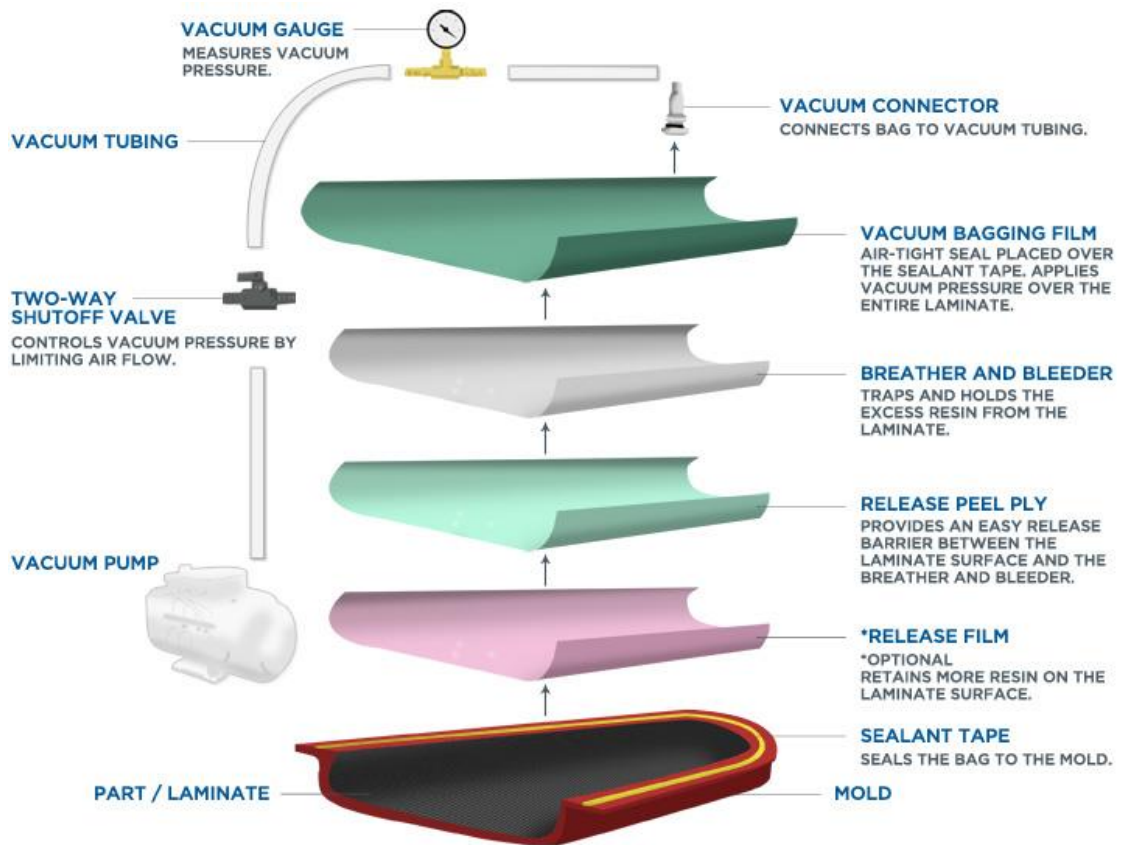
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά το stacking sequence για τις λωρίδες (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Stacking sequence λωρίδων

Sequence	Ply	Material	Direction
1	Ply.4	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
2	Ply.5	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
3	Ply.6	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
4	Ply.7	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
5	Ply.8	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°
6	Ply.9	HexPly [®] M18/1 HMV woven tape	0°/90°

3.8 Διαδικασία pre-vacuum

Αφού τελειώνει το lay-up για κάθε στρώση και πριν ξεκινήσει η επόμενη, ακολουθούσε η διαδικασία του pre-vacuum. Το pre-vacuum είναι μια διαδικασία η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούν καλούπι. Όταν γίνεται σωστά, δημιουργεί μια ομοιόμορφα κατανεμημένη συμπίεση γύρω από την επιφάνεια του lay-up. Αυτό με τη σειρά του βοηθάει ώστε το prepreg να πάρει ακριβώς το σχήμα του καλουπιού, αλλά και να ελαχιστοποιηθούν τυχόν κενά (φυσαλίδες ή ρυτιδώσεις) ανάμεσα στα στρώματα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί ένα πορώδες φύλλο (release peel-ply) και ένα πανί ανακούφισης (breather-cloth), τα οποία βοηθούν στο να φεύγουν τα εγκλωβισμένα αέρια από τα κενά που υπάρχουν. Στην ουσία, δημιουργείται ένας αεροστεγής 'φάκελος', από τον οποίο, μέσω μια βαλβίδας, απομακρύνεται ο αέρας, ασκώντας στο ανθρακόνημα και το καλούπι εξωτερική πίεση που φτάνει το 1bar, συμπιέζοντάς το πάνω στο καλούπι.



Σχήμα 36: Διαδικασία pre-vacuum [www.fibreglast.com]



Σχήμα 37: Λειτουργία pre-vacuum [13]

Η διαδικασία αυτή έγινε 10 φορές, έπειτα, δηλαδή, από το τελείωμα κάθε στρώσης, για χρονικό διάστημα 30 λεπτών η κάθε μια. Η χρονική διάρκεια των 30 λεπτών είναι μια τυπική χρονική διάρκεια που επαρκεί για να φέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο γενικός κανόνας είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος pre-vacuum μεταξύ των στρώσεων, τόσο καλύτερο είναι και το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 38: Release peel-ply



Σχήμα 39: Pre-vacuum

3.9 Διαδικασία μορφοποίησης–autoclave processing

Το τελευταίο στάδιο για την παραγωγή του τελικού προϊόντος είναι η διαδικασία του curing σε αυτόκλειστο φούρνο (autoclave), σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή δομικών εξαρτημάτων πολύ υψηλής ποιότητας και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εξαρτημάτων από prepreg με μεγάλη περιεκτικότητα σε ίνες και πολύ λίγα περιεχόμενα κενά μεταξύ των στρωμάτων.

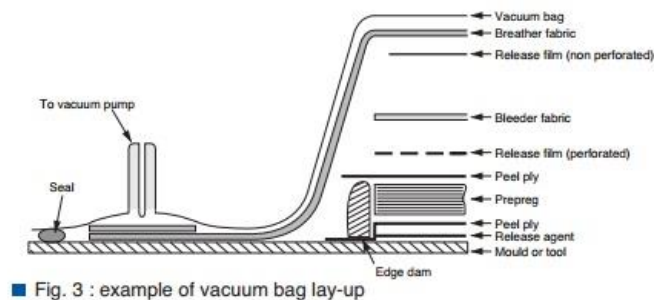


Σχήμα 40: Autoclave εταιρείας EAB

Η τεχνική του αυτόκλειστου φούρνου απαιτεί μια παρόμοια διάταξη με αυτήν του vacuum, αλλά ταυτόχρονα με αυτό υπάρχει και μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης μέσα στο φούρνο. Στην ουσία, τέτοιου είδους φούρνοι αποτελούν μεγάλα δοχεία πίεσης, τα οποία παρέχουν όλες τις συνθήκες εκείνες που απαιτούνται για τη σκλήρυνση (curing) των προεμποτισμένων σύνθετων υλικών, αφού μπορούν να ελεγχθούν:

- η εφαρμογή του κενού (vacuum)
- η πίεση
- η θερμοκρασία σκλήρυνσης (cure temperature)
- και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας (heat-up rate)

Στο παρακάτω Σχήμα 41 δίνεται ολόκληρη η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά τη μορφοποίηση σε αυτόκλειστο φούρνο και τα είδη υφασμάτων που τοποθετούνται ανάμεσα στη vacuum bag και τα σύνθετα υλικά.



■ Fig. 3 : example of vacuum bag lay-up

Σχήμα 41: Διαδικασία Autoclave [13]

Η παραπάνω διάταξη των υφασμάτων μπορεί να γίνει με παραλλαγές, ανάλογα με την εφαρμογή του τελικού προϊόντος, αλλά και την επιθυμητή ποιότητα του αποτελέσματος.

Ένας τυπικός κύκλος στον αυτόκλειστο φούρνο απαιτεί μικρό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας μέχρι την επιθυμητή τιμή, στη συνέχεια παραμονή στη σταθερή υψηλή θερμοκρασία ώστε να επέλθει η απαραίτητη σκλήρυνση - πολυμερισμός της εποξικής ρητίνης και τέλος, μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, πάλι με μικρό ρυθμό πτώσης. Οι χαμηλοί ρυθμοί απαιτούνται κυρίως για να υπάρχει ομοιόμορφη διαστολή και συστολή των διαφορετικών υλικών του καλουπιού και του εξαρτήματος.

Ταυτόχρονα με τη θερμοκρασία, απαιτείται υψηλή σταθερή πίεση, η οποία μπορεί να φτάνει μέχρι και τα 10bar σε περιπτώσεις αντικειμένων με μεγάλο πάχος [8].

Όταν τελειώσει το layup ξεκίνησε η προετοιμασία της κατασκευής για το autoclave. Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζονται τα υφάσματα με τα οποία τυλίχτηκε η κατασκευή πριν από την είσοδό της στο φούρνο.



Σχήμα 42: Peel-ply

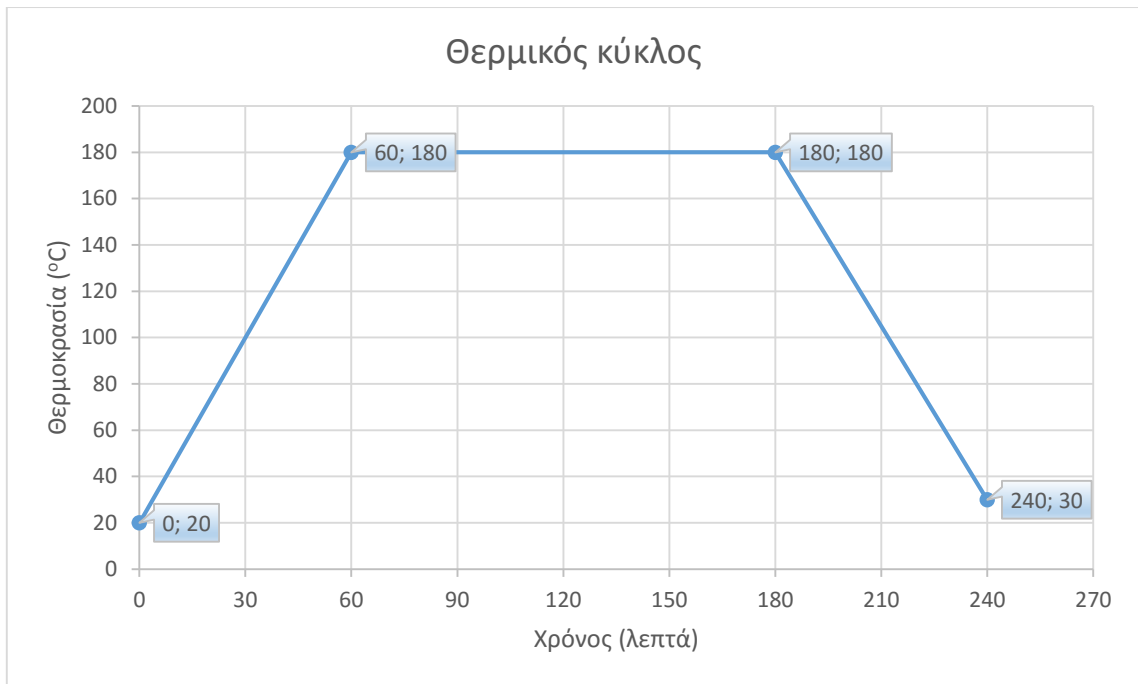


Σχήμα 43: Release film

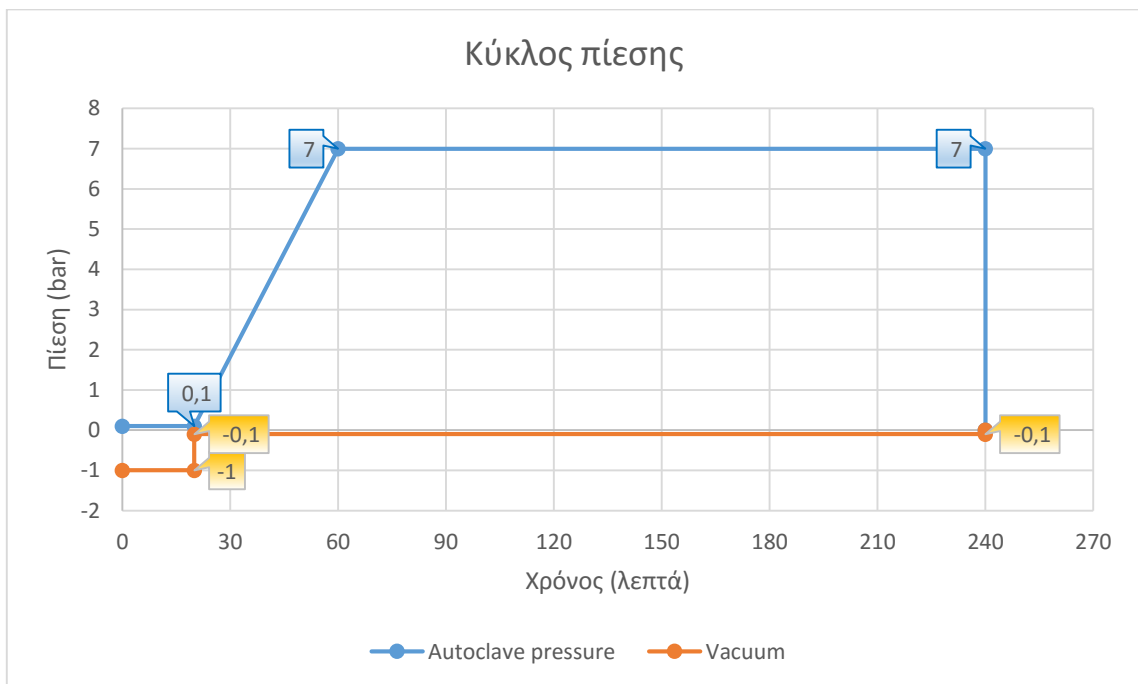


Σχήμα 44: Autoclave vacuum

Το ψήσιμο των προεμποτισμένων ανθρακονημάτων, όπως έχει ήδη αναλυθεί, απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτές αφορούν τη θερμοκρασία και το θερμικό κύκλο, την πίεση μέσα στον αυτόκλειστο φούρνο, αλλά και την πίεση από το vacuum μέσα στο 'φάκελο'. Αυτές προγραμματίστηκαν πριν από την έναρξη του ψησίματος και παρουσιάζονται αναλυτικά στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 45, Σχήμα 46).



Σχήμα 45: Θερμικός κύκλος



Σχήμα 46: Κύκλος πίεσης

Συνολικά, το κάθε κομμάτι έμεινε στο φούρνο για τέσσερις ώρες. Ο θερμικός κύκλος ξεκινούσε από την θερμοκρασία δωματίου και με βήμα 2°C/min έφτασε στην απαιτούμενη θερμοκρασία πολυμερισμού των 180°C μετά από 80min. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία μειώθηκε σχεδόν σε θερμοκρασία δωματίου με τον ίδιο

ρυθμό καθόδου. Ο σχετικά χαμηλός αυτός ρυθμός ανόδου και καθόδου προγραμματίζεται ώστε τα δύο διαφορετικά υλικά που είναι σε επαφή, ο χάλυβας του καλουπιού και τα ανθρακονήματα, να συστέλλονται και να διαστέλλονται με τον ίδιο ρυθμό, ώστε να μην υπάρχουν ανωμαλίες στο τελικό προϊόν από τυχόν διαφορετικό ρυθμό διαστολής ή συστολής.

Μετά το τέλος της διαδικασίας, ακολούθησε το ξεκαλούπωμα και η παραλαβή του πρώτου μισού του δοχείου.



Σχήμα 47: Εσωτερική όψη τελικού κομματιού

Στο Σχήμα 49 παρατηρούμε τη διαφορά στην εσωτερική και εξωτερική υφή. Η εσωτερική πλευρά είναι απολύτως λεία ενώ η εξωτερική έχει κάποιες ανωμαλίες και δεν έχει τη χαρακτηριστική λάμψη που έχει η εσωτερική. Οι ανωμαλίες που παρατηρούνται οφείλονται στο lay-up, κατά το οποίο και εμφανίστηκαν. Τέτοιου είδους λωρίδες εμφανίζονται πολύ συχνά σε πολυστρωματικές κατασκευές με αρσενικό καλούπι, διότι ύστερα από κάποιες στρώσεις υπάρχει δυσκολία ακριβούς αποτύπωσης, κυρίως λόγω του σχήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ομοιομορφία στην τελική κατασκευή. Λόγω της μεγάλης πίεσης που ασκείται στο ψήσιμο, εμφανίζονται όλες αυτές οι ανωμαλίες, οι οποίες συνήθως έχουν γύρω τους και περίσσεια ρητίνης (πορτοκαλί περιοχές). Οι συγκεκριμένες ανωμαλίες εμφανίστηκαν μετά την 6^η στρώση, οπότε δεν επηρεάζουν την κατασκευή και θεωρούνται αποδεκτές.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία παραγωγής ακολουθήθηκε και για το δεύτερο κομμάτι, με την ίδια ακριβώς διαστρωμάτωση, τον ίδιο ακριβώς θερμικό κύκλο και κύκλο πίεσης, με τη μόνη διαφορά ότι ανάμεσα στην 2^η και 3^η στρώση τοποθετήθηκε χαλύβδινο στόμιο με εσωτερικό σπείρωμα και λαιμό ίδιας καμπυλότητας με την κεφαλή, ώστε να εφάπτεται ακριβώς στα ανθρακονήματα (Σχήμα 48).



Σχήμα 48: Μεταλλικό στόμιο

Για να γίνει εφικτή η τοποθέτηση των πρώτων δύο στρώσεων και των 8 στρώσεων μετά το στόμιο και να υπάρχει η απαραίτητη οπή για το δοχείο στα κυκλικά κομμάτια αφαιρέθηκε από το κέντρο ένα μικρό κυκλικό κομμάτι διαμέτρου 4cm.



Σχήμα 49: Εσωτερική επιφάνεια τελικών κομματιών



Σχήμα 50: Εξωτερική επιφάνεια τελικών κομματιών

3.10 Διαδικασία συγκόλλησης κομματιών

Η συγκόλληση δύο κομματιών από ανθρακόνημα ονομάζεται bonding και μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις κατηγορίες.

- **Co-curing:** Είναι η σύνδεση – κόλληση δύο κομματιών από προεμποτισμένα ανθρακονήματα κατά τη θερμική τους επεξεργασία με ταυτόχρονη χρησιμοποίηση κόλλας (adhesive).
- **Secondary bonding:** Είναι η ένωση μέσω κόλλας (adhesive) δύο ή περισσότερων κομματιών τα οποία είναι ήδη μορφοποιημένα (cured). Κατά τη διάρκεια της κόλλησης, η μόνη χημική ή θερμική αντίδραση που συμβαίνει είναι η αντίδραση της ίδιας της κόλλας.
- **Co-bonding:** Είναι η ένωση δύο ή περισσότερων κομματιών εκ των οποίων τουλάχιστον ένα έχει μορφοποιηθεί πλήρως (fully cured) και τουλάχιστον ένα άλλο δεν έχει μορφοποιηθεί (uncured) [14].

Για τη συγκόλληση των κομματιών χρησιμοποιήθηκε κόλλα EC-1648-A/B της εταιρείας 3M, η οποία αποτελείται από τη βάση (B) και τον καταλύτη (A), τα οποία αναμιγνύονται σε αναλογία 3/2.



Σχήμα 51: Εποξική κόλλα

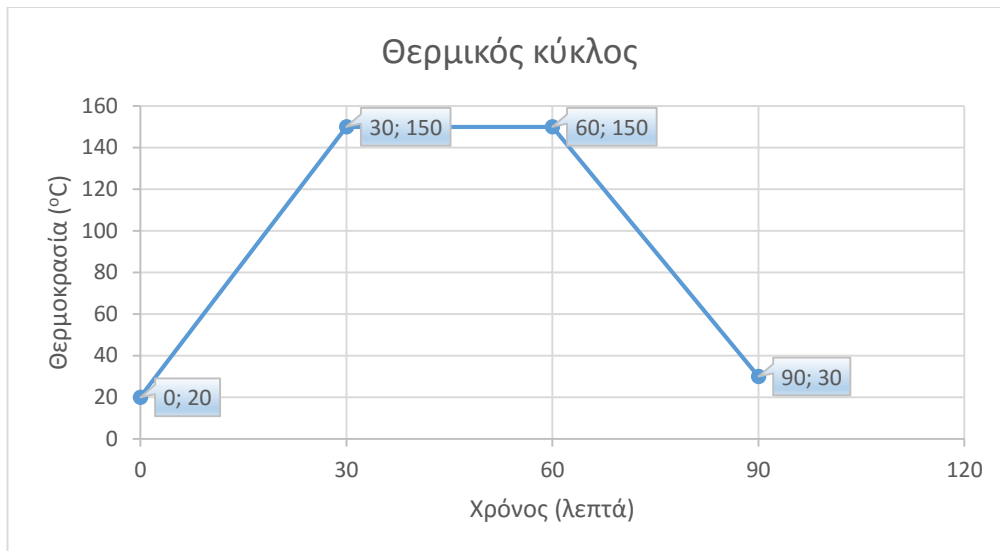
Η συγκεκριμένη εποξική κόλλα έχει σχεδιαστεί για ένωση πολυεστερικών πάνελ και προσφέρει υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και απαιτεί σκλήρυνση σε θερμοκρασία δωματίου που κυμαίνεται από 24-48 ώρες ή σκλήρυνση σε υψηλή θερμοκρασία για 30 min [15].

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά κόλλας [15]

Product Description	Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.	
	(B) Base	(A) Accelerator
Color:	White	Green
Base:	Modified Epoxy	Synthetic Resin
Weight/Gallon:	10.9 lbs./gal.	8.7 lbs./gal.
Viscosity:	Heavy Paste	Heavy Paste
Solids:	100%	100%
Work Life:	Approximately 60 Min.	Approximately 60 Min.
Mix Ratio:	3 parts by wt.	2 parts by wt.

3.10.1 Secondary bonding

Αυτός ο τύπος κόλλησης χρησιμοποιήθηκε για την ένωση των δύο μορφοποιημένων κομματιών. Η ένωση έγινε στο χείλος των δύο κομματιών. Αρχικά, λειάνθηκε η περιοχή της κόλλησης και η περιοχή γύρω από αυτήν με γυαλόχαρτο, καθώς οι προδιαγραφές για τη χρησιμοποίηση της κόλλας απαιτούν απολύτως λείες και καθαρές επιφάνειες συγκόλλησης. Ύστερα από τη δημιουργία της παχύρευστης κόλλας, οι επιφάνειες καλύφθηκαν από αυτήν και τοποθετήθηκαν στο φούρνο στους 150° C για 30min, ώστε να γίνει ο πολυμερισμός και να επέλθει η σκλήρυνση της κόλλας και έτσι η ένωση των κομματιών [14].



Σχήμα 52: Θερμικός κύκλος για το secondary bonding



Σχήμα 53: Μορφή δοχείου μετά το secondary bonding

3.10.2 Co-bonding

Μετά τη διαδικασία ένωσης των δύο κομματιών, ακολούθησε η διαδικασία του co-bonding, καθώς προστέθηκαν στην περιφέρεια του κυλίνδρου γύρω από την κόλληση 5 στρώσεις μη μορφοποιημένου prepreg σε μορφή λωρίδων $8 \times 45 \text{cm}^2$, για να προσδώσουν μια παραπάνω ενίσχυση στο σημείο, το οποίο θεωρείται και το ασθενέστερο της κατασκευής. Το stacking sequence των στρώσεων αυτών ακολουθεί στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Stacking sequence λωρίδων για το co-bonding

Λωρίδες			
Sequence	Ply	Material	Direction
1	Ply.1	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape	0°/90°
2	Ply.2	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape	0°/90°
3	Ply.3	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape	0°/90°
4	Ply.4	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape	0°/90°
5	Ply.5	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape	0°/90°

Στην συνέχεια, το κομμάτι τοποθετήθηκε στο φούρνο για περίπου 4 ώρες με συνθήκες πίεσης - κύκλου πίεσης, θερμοκρασίας - θερμικού κύκλου και vacuum, ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο κομμάτια, οι οποίες ευνοούν και τη σωστή μορφοποίηση των μη μορφοποιημένων υλικών, αλλά και τη σωστή ένωση αυτών με τα μορφοποιημένα, με τη διαδικασία του co-bonding.

3.11 Τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευής

Πίνακας 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά δοχείου πίεσης

Υλικό κατασκευής	HexPly [®] M18/1 HVM woven tape
Εσωτερικός όγκος	9lt
Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου	143,95mm
Εξωτερική διάμετρος κυλίνδρου	148,64mm
Πάχος τοιχώματος	3.22mm
Πάχος τοιχώματος στο χείλος	4.69mm
Είδος κεφαλών	Ελλειψοειδείς
Βάρος	1,347kg
Υλικό πάματος	Χάλυβας



Σχήμα 54: Τελική μορφή κυλινδρικού δοχείου πίεσης μετά από το βερνίκι

4 Υδραυλική δοκιμή δοχείου πίεσης

4.1 Εισαγωγή

Οι δοκιμές πίεσης εκτελούνται για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η στεγανότητα των συστημάτων πίεσης. Μια δοκιμή πίεσης είναι απαραίτητη για ένα νέο σύστημα πίεσης πριν από τη χρήση, για ένα υπάρχον σύστημα πίεσης μετά από επισκευή, ή κατά τον περιοδικό έλεγχο αυτού. Οι διαθέσιμες μέθοδοι για δοκιμές πίεσης είναι: (α) υδραυλική δοκιμή και (β) πνευματική δοκιμή. Η υδραυλική δοκιμή πραγματοποιείται με τη χρήση νερού ως μέσο δοκιμής και θεωρείται πιο ασφαλή από την πνευματική δοκιμή που χρησιμοποιεί αέριο ως μέσο δοκιμής, επειδή το νερό είναι σχεδόν ασυμπίεστο, οπότε απαιτείται μικρό ποσοστό ενέργειας για να αναπτυχθεί υψηλή πίεση και συνεπώς μικρότερη απελευθέρωση ενέργειας σε περίπτωση αστοχίας. (Πολύ μικρός όγκος νερού διαφεύγει κάτω από υψηλή πίεση, εάν κάποιο δοχείο αστοχήσει) [16].

4.2 Υδραυλική δοκιμή

Η υδραυλική δοκιμή είναι ένας τρόπος με τον οποίο τα δοχεία πίεσης μπορούν να ελεγχθούν για τις αντοχές και τις διαρροές τους. Η δοκιμή περιλαμβάνει την πλήρωση του δοχείου με υγρό, συνήθως νερό και τη συμπίεση του δοχείου στην καθορισμένη πίεση δοκιμής. Οι υδραυλικές δοκιμές είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για σωλήνες και δοχεία πίεσης και ακολουθεί τα πρότυπα ασφαλείας, τα οποία ορίζονται από την εκάστοτε χώρα ή την E.E.

Η πίεση δοκιμής είναι πάντοτε σημαντικά ανώτερη από την πίεση λειτουργίας, ώστε να μπορεί να δοθεί ένας παράγοντας ασφαλείας. Αυτός, συνήθως, είναι το 150% από τη σχεδιασμένη πίεση λειτουργίας του δοχείου και μπορεί να κυμανθεί από 166,6% μέχρι 143%, ανάλογα με τα πρότυπα ασφαλείας. Για να περάσει ένα δοχείο με επιτυχία την υδραυλική δοκιμή, πρέπει να παραμείνει στην πίεση δοκιμής για 10 λεπτά της ώρας [16].

4.2.1 Διαδικασία υδραυλικής δοκιμής

Οπτικός έλεγχος

Πριν από την έναρξη της υδραυλικής δοκιμής γίνεται οπτικός έλεγχος των δοχείων. Στον έλεγχο αυτό ελέγχεται το δοχείο τόσο εξωτερικά, όσο και εσωτερικά, για τυχόν ρωγμές, παραμορφώσεις ή διάβρωση. Επίσης, γίνεται οπτικός έλεγχος στα κρίσιμα σημεία της κατασκευής, όπως ο λαιμός, το σπείρωμα και οι κεφαλές.

Έλεγχος περιφερειακών εξαρτημάτων

Ο έλεγχος αυτός αφορά όλα τα περιφερειακά εξαρτήματα που μπορεί να έχει ένα δοχείο πίεσης, όπως: μανόμετρο, κλείστρο σιφωνικό σωλήνα κ.α.

Έλεγχος για διαρροές

Ο έλεγχος αυτός αποτελεί το τελευταίο στάδιο πριν από την υδραυλική δοκιμή και πραγματοποιείται απλώς με το γέμισμα του δοχείου με νερό και την οπτική παρατήρηση για τυχόν διαρροές, κυρίως στα κρίσιμα της κατασκευής.

Εάν το δοχείο περάσει τους τρεις αυτούς ελέγχους, τότε μπορεί να ξεκινήσει η υδραυλική δοκιμή.

Υδραυλική δοκιμή

Κατά την υδραυλική δοκιμή, το δοχείο πίεσης 'πρεσάρεται' στην πίεση δοκιμής και παραμένει στην πίεση αυτή για 10 λεπτά. Αν η αντοχή του στην πίεση αυτή δεν είναι ικανοποιητική ή το δοχείο παρουσιάσει κάποια διαρροή ή κάποια ρωγμάτωση, τότε κρίνεται ακατάλληλο για χρήση.

4.3 Δοκιμή κυλινδρικής δεξαμενής και αποτελέσματα

Για τη δοκιμή της κυλινδρικής δεξαμενής χρησιμοποιήθηκε μανόμετρο κλάσης 1, την εταιρείας WIKA, με δυνατότητα μέτρησης έως 600bar, διακριβωμένο στις 7/4/2015 με βάση τα ελληνικά πρότυπα, συνδεδεμένο με εύκαμπτο υδραυλικό σωλήνα φτιαγμένο με βάση το πρότυπο DIN/EN853, οπότε και πιστοποιημένο για χρήση σε δοκιμές πίεσης.



Σχήμα 55: Υδραυλική δοκιμή

Αφού το δοχείο πέρασε τον οπτικό έλεγχο, ξεκίνησε η υδραυλική δοκιμή του. Εξαιτίας της απουσίας συγκεκριμένης πίεσης δοκιμής, η υδραυλική δοκιμή έγινε σταδιακά ανά 5bar, με έλεγχο του δοχείου εξωτερικά για τυχόν διαρροές σε κάθε στάδιο.

Τελικά, σε πίεση 12bar παρατηρήθηκε διαρροή σε μορφή μονής φυσαλίδας κοντά στην ένωση των δύο κομματιών, οπότε και σταμάτησε ο υδραυλικός έλεγχος.

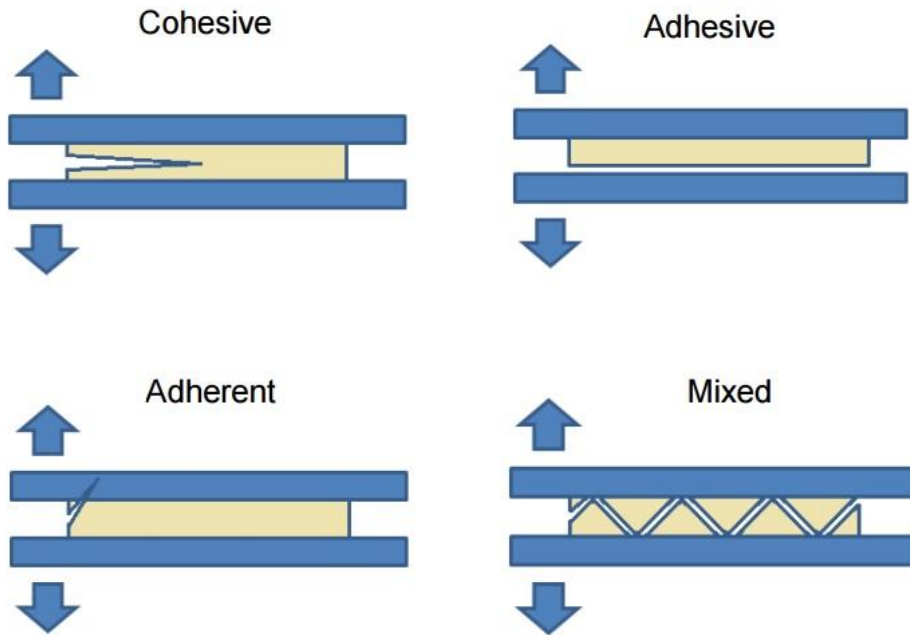
5 Συμπεράσματα – Μελλοντική Εργασία

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής δοκιμής είναι κατώτερα του αναμενόμενου. Η αναμενόμενη πίεση θραύσης- αστοχίας, με βάση το χρησιμοποιούμενο υλικό και τη διαστρωμάτωση του υλικού θα έπρεπε να είναι κοντά στα 30bar.

Με βάση το είδος και τον τρόπο κατασκευής του δοχείου, τα δύο σημεία που αναμενόταν να είναι τα πιο αδύναμα κατά τη διάρκεια της υδραυλικής δοκιμής ήταν το σημείο συγκόλλησης των δύο κομματιών και η περιοχή γύρω από το μεταλλικό λαϊμό. Το σημείο στο οποίο έγινε η διαρροή, πολύ κοντά στο σημείο συγκόλλησης, υποδεικνύει πως τελικά το νερό βρήκε κάποια δίοδο στο σημείο αυτό, ξεπερνώντας τόσο την ίδια τη συγκόλληση όσο και τις πέντε στρώσεις ανθρακονήματος που τοποθετήθηκαν για περαιτέρω ενίσχυση της συγκόλλησης κατά την διαδικασία του co-bonding.

Τα αίτια αστοχίας της συγκόλλησης μπορεί να είναι:

- Συνεκτική αστοχία (cohesive failure): Πρόκειται για αστοχία της κόλλας σε χαμηλότερα φορτία από τα αναμενόμενα και μπορεί να οφείλεται είτε σε λάθος κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης, είτε στην ύπαρξη υγρασίας ή άλλων ρύπων στην κόλλα.
- Αποτυχία κόλλησης (adhesive failure): Πρόκειται για αστοχία μεταξύ των επιφανειών της κόλλας και μίας από τις δύο συγκολλούμενες επιφάνειες που μπορεί να οφείλεται στην κακή προετοιμασία των επιφανειών πριν από την εφαρμογή της κόλλας πάνω σε αυτές, ή στη μικρή επιφάνεια συγκόλλησης.
- Adherent failure: Πρόκειται για αστοχία της κόλλας, η οποία εξαπλώνεται προς το κομμάτι το οποίο έχει συγκολληθεί και δημιουργεί τη διαρροή. Οφείλεται όχι μόνο σε αστοχία της κόλλας, αλλά και του ανθρακονήματος.
- Μικτός τύπος: Πρόκειται για συνδυασμό των παραπάνω ειδών αστοχίας [17].



Σχήμα 56: Τύποι αστοχιών κόλλησης [17]

Για την αποφυγή των παραπάνω αστοχιών, θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερος ο αριθμός των στρώσεων για τη δημιουργία του 'χειλούς', ώστε να υπήρχε μεγαλύτερη επιφάνεια συγκόλλησης, όπως και ο αριθμός των στρώσεων κατά τη διαδικασία του co-bonding, ώστε να υπήρχε ακόμα καλύτερη αντοχή και συνοχή στο σημείο γύρω από την ένωση.

Οι εποξικές κόλλες αυτών των προδιαγραφών απαιτούν απόλυτα λείες επιφάνειες, οπότε ακόμα μεγαλύτερη έμφαση θα έπρεπε να είχε δοθεί στη λείανση και τον καθαρισμό της επιφάνειας πριν από την εφαρμογή της κόλλας πάνω σε αυτήν.

Ένας εναλλακτικός τρόπος κατασκευής τέτοιου δοχείου, ο οποίος θα εξαλείψει πλήρως το πρόβλημα της συγκόλλησης, θα μπορούσε να ήταν η κατασκευή τους σε ένα ενιαίο κομμάτι. Αυτό θα ήταν δυνατό με τη χρήση διαφορετικού υλικού για καλούπι, το οποίο θα έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με το ανθρακόνημα (θερμική συστολή και διαστολή), ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα κατά το θερμικό κύκλο και θα μπορούσε στη συνέχεια να απομακρυνθεί από το εσωτερικό του δοχείου. Αν επιτευχθεί αυτό, θα μπορούσαν να κατασκευαστούν παρόμοια δοχεία πίεσης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όχι μόνο λόγω της υψηλότερης αντοχής τους, αλλά και λόγω του πολύ μικρότερου βάρους τους σε σχέση με τα μεταλλικά.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. ΜΗΤΣΟΥΛΗΣ, «Πολυμερή και σύνθετα υλικά,» τόμ. IV, ΑΘΗΝΑ, ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ -ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΕΜΠ, 2008, pp. 8_1-8_3.
- [2] T. Jonshon, «History of Composites,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>. [Πρόσβαση 10 Ιουλίου 2015].
- [3] T. Jonshon, «Benefits of Composites,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/tp/Benefits-Of-Composites.htm>. [Πρόσβαση 10 Ιουλίου 2015].
- [4] F. Campell, «Structural Composite Materials,» ASM International, 2010, pp. 14-16.
- [5] Γ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ και Δ. ΜΟΥΖΑΚΗΣ, «Σύνθετα Υλικά,» Αθήνα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007, pp. 258-291.
- [6] Σ. ΚΟΥΚΟΥΛΙΑΝΤΑ, «Συμπεριφορά δοκών λεπτότοιχης διατομής I από FRP υπό εγκάρσια φορτία,» ΑΘΗΝΑ, 2014.
- [7] K. K. Chawla, Composite Material: Science and Engineering, 3η επιμ., Springer, 2013.
- [8] Hexcel©, HexPly®Prepreg Technology, Hexcel Corporation, 2013.
- [9] K. Y. Lin, «Composite Materials: Materials, Manufacturing, Analysis, Design and Repair,» Washington, Boeing Department of Aeronautics and Astronautics at the University of Washington, 2014, pp. 10-20.
- [10] V. V. Vasiliev, «Composite Pressure Vessels,» Bull Ridge Publishing, pp. 1-3.

- [11] ASME, «ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC),» ASME, New York NY, 2013.
- [12] DASSAULT SYSTEMS, «SOLIDWORKS 2014,» 2014.
- [13] Hexcel Corporation, HexPly® M18/1 180°C, curing epoxy matrix, Product DataSheet, τόμ. Publication FTA274b, Hexcel Corporation, 2015.
- [14] D. I. T. Kruse, «AIRBUS S.A.S,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.cfk-convention.com/fileadmin/Convention_2013/Referenten/Vortraege/CFK_Conv2013_KRUSE.pdf. [Πρόσβαση 25 Σεπτεμβρίου 2015].
- [15] 3M, «Scotch-Weld™ Structural Adhesive EC-1648 B/A Technical Data,» 2002. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://multimedia.3m.com/mws/media/2412450/3mtm-scotch-weldtm-structural-adhesive-ec1648-b-a.pdf>. [Πρόσβαση 25 Σεπτεμβρίου 2015].
- [16] SLAC , «Pressure Systems: Installation, Inspection, Maintenance, and Repair,» 18 Δεκεμβρίου 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www-group.slac.stanford.edu/esh/eshmanual/references/pressureReqInspectMaintRepair.pdf>. [Πρόσβαση 9 Οκτώβριου 2015].
- [17] A. S. Cebrián, «BONDING OF COMPOSITES STRUCTURES,» Zurich, 2013.