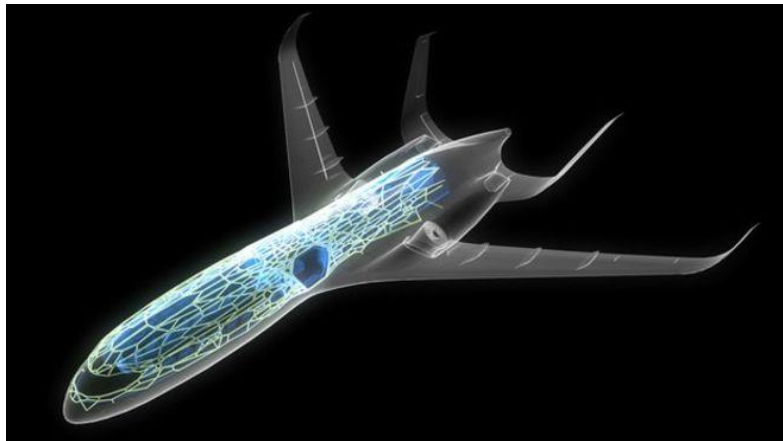




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΑΓΑΠΗ ΚΑΧΡΙΜΑΝΗ (Α.Μ. 6899)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ  
ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟΣ ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ

ΠΑΤΡΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2021



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος, αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, και αναφέρεται στα σύνθετα υλικά και στο ρόλο τους στην αεροναυπηγική.

Είναι γνωστό ότι τα σύνθετα υλικά χρονολογούνται από το 5000 π.Χ. περίπου, όταν οι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν για την ενίσχυση των τούβλων πηλού, πλέγμα άχυρων. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών, υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960), και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημόπλοιων. Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, κρούση και διάδοση ρωγμών, οι 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.

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η κατανόηση των σύνθετων υλικών, καθώς και με ποιόν τρόπο αυτά επηρεάζουν την επιστήμη των αεροσκαφών. Περιλαμβάνει παραδείγματα, πίνακες, διαγράμματα, καθώς και πλήθος εικόνων, για να είναι όσο το δυνατόν ευκολότερη η κατανόηση από τον αναγνώστη.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Σπυρίδων Γραμματικόπουλο, ακαδημαϊκό υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Αγάπη Καχριμάνη



**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:** Η κάτωθι υπογεγραμμένη Φοιτήτρια έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Η Φοιτήτρια  
Αγάπη Καχριμάνη

.....  
(Υπογραφή)

**Σημείωση:** Εάν η εργασία εκπονείται από δύο Φοιτητές γράφεται το αντίστοιχο κείμενο σύμφωνα με την υπόδειξη του άρθρου 8.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξής πτυχιακή εργασία περιγράφει σε γενικά πλαίσια τη σημασία και τις κατηγορίες των σύνθετων υλικών. Γίνεται μια εισαγωγή και σύντομη ιστορική αναδρομή για καλύτερη κατανόηση, και αναλύονται ορισμένες έννοιες. Στη συνέχεια, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο τα σύνθετα υλικά έχουν συμβάλει στην αεροναυπηγική, και πώς αυτά επηρεάζουν τη λειτουργία της.

Στο **πρώτο κεφάλαιο**, γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, δίνεται ο ορισμός τους κατά Bagwan D. Agarwal (1990), και γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των υλικών. Ταξινομούνται με βάση ορισμένα στοιχεία, και αναφέρονται τα υλικά ενίσχυσης των σύνθετων υλικών, όπως είναι οι ίνες. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς επίσης και το πρόβλημα των κενών που συναντάται σε αυτά.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο**, περιγράφονται συνοπτικά οι αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης, δηλαδή οι διεργασίες στις οποίες υπάρχει το χαρακτηριστικό το σύνθετο υλικό να βρίσκεται κατά τη μορφοποίηση ανάμεσα σε αεροστεγή καλύμματα και το καλούπι μορφοποίησης. Παρουσιάζονται τα είδη των υλικών για τις μήτρες, τα είδη των ενισχύσεων υπό μορφή ινών και τα αντικολλητικά καλουπιών ή είδη καλυμμάτων. Επιπλέον, αναφέρεται η μέθοδος του αυτόκλειστου φούρνου/κλιβάνου, γνωστή και ως Autoclave, όπου και περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του.

Στο **τρίτο κεφάλαιο**, γίνεται ανάλυση της μεθόδου του z-rinping, καθώς και το πώς αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στα αεροσκάφη.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο**, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο τα σύνθετα υλικά έχουν συμβάλει στα μαχητικά και πολιτικά αεροσκάφη, και ο ρόλος τους στη βελτίωσή τους, σε τομείς όπως αρθρώσεις (joints), καταλληλότητα της πτήσης, γνωστή ως Airworthiness, και στην τεχνολογία επισκευής των αεροσκαφών.

Στο **πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο**, αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα πτυχιακή εργασία.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά.....</b>	<b>2</b>
1.1 Γενικά.....	2
1.2 Η χρήση των σύνθετων υλικών στα αεροσκάφη.....	4
1.3 Ιστορική αναδρομή.....	4
1.4 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	4
1.5 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.....	7
1.6 Κοκκώδη σύνθετα υλικά.....	8
1.7 Πολύστρωτα ή στρωματικά σύνθετα υλικά.....	10
1.8 Ινώδη σύνθετα υλικά.....	11
1.9 Πολυμερικές μήτρες.....	15
1.9.1 Βασικές έννοιες.....	15
1.9.2 Ταξινόμηση πολυμερών.....	17
1.9.3 Πολυμερή και πλαστικά.....	18
1.9.4 Πλαστικά κατασκευών.....	21
1.9.4.1 Μηχανολογικά πλαστικά.....	21
1.9.5 Μηχανολογικά Θερμοπλαστικά Πολυμερή.....	22
1.10 Ενισχυτικές ίνες.....	22
1.10.1 Μορφές ινών.....	23
1.10.1.1 Ταινίες μίας διεύθυνσης.....	23
1.10.1.2 Υφαντά.....	23
1.10.2 Ίνες άνθρακα.....	27
1.10.2.1 Δομή των ινών άνθρακα.....	27
1.10.2.2 Παραγωγή ινών άνθρακα.....	28
1.10.3 Ίνες γυαλιού.....	32
1.10.4 Οργανικές ίνες.....	33
1.10.4.1 Ίνες αρωματικού πολυαμιδίου.....	34
1.10.4.2 Ίνες πολυαιθυλενίου.....	35
1.10.5 Ίνες βορίου.....	35
1.10.6 Κενά.....	36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών.....</b>	<b>40</b>
2.1 Μέθοδοι μορφοποίησης (Lay Up Techniques).....	40
2.1.1 Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay Up).....	40
2.1.2 Επίστρωση με ψεκασμό ινών (Spray Up Techniques).....	42

2.2 Χαρακτηριστικά μεθόδων επίστρωσης.....	44
2.3 Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια (Molding Techniques).....	45
2.3.1 Τεχνικές διαμόρφωσης με πρέσσα (Press Techniques).....	46
2.3.2 Μορφοποίηση με πρέσσα εν ψυχρώ (Cold Press Molding).....	47
2.3.3 Μορφοποίηση με πρέσσα εν θερμώ (Hot Press Molding).....	47
2.4 Ατέλειες στη μορφοποίηση .....	49
2.5 Οι τεχνικές χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (Resin Transfer Molding).....	51
2.5.1 Οι παραλλαγές της μεθόδου RTM (SCRIMP-RIFM-VARTM).....	53
2.6 Οι αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης.....	55
2.6.1 Πρώτες Ύλες.....	56
2.7 Μέθοδος αυτόκλειστου φούρνου-κλιβάνου (Autoclave Bag Molding Process).....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Η Μέθοδος Z-pinning.....</b>	<b>67</b>
3.1 Η τεχνική Z-pinning στα αεροσκάφη.....	69
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σύνθετα Υλικά και Αεροσκάφη.....</b>	<b>73</b>
4.1 Εισαγωγή.....	73
4.1.1 Παράγοντες για βελτιωμένα υλικά αεροσκαφών.....	74
4.1.2 Ινώδη σύνθετα υψηλής απόδοσης.....	75
4.1.3 Εφαρμογή των PMC.....	76
4.1.3.1 Αεροσκάφη σταθερών πτερυγίων.....	76
4.1.3.2 Εφαρμογή στα στρατιωτικά αεροσκάφη.....	78
4.1.3.3 Εφαρμογή στα πολιτικά αεροσκάφη.....	80
4.1.3.4 Κινητήρες αεριοστροβίλου.....	86
4.2 Joints.....	87
4.2.1 Συγκολλημένες αρθρώσεις (Adhesive Bonded Joints).....	89
4.2.1.1 Κατασκευαστικά συγκολλητικά.....	92
4.2.1.2 Αξιολόγηση των ιδιοτήτων του συγκολλητικού σε πίεση και ένταση.....	95
4.2.1.3 Υγρασία και περιβαλλοντικές επιδράσεις.....	95
4.2.2 Μηχανικά ενωμένες αρθρώσεις (Fastened/Bolted Joints).....	96
4.2.2.1 Γενικές εκτιμήσεις σχεδιασμού.....	96
4.2.3 Γενικές πτυχές μηχανικής υλικών .....	96
4.2.3.1 Συνδετήρες (fasteners) για σύνθετα υλικά.....	96
4.2.4 Πρόληψη της διάβρωσης.....	99
4.2.5 Ευθυγράμμιση στοιχείων στις αρθρώσεις.....	99
4.2.6 Συνδυασμός συγκολλημένων και βιδωμένων/καρφιτωμένων/ραμμένων υβριδικών συγκολλήσεων.....	100
4.3 Airworthiness ή καταλληλότητα πτήσης.....	101
4.3.1 Πιστοποιήσεις δομών ατράκτου.....	102
4.4 Τεχνολογία επισκευής.....	103
4.4.1 Ταξινόμηση των τύπων κατασκευών.....	105

4.4.2 Αξιολόγηση ανάγκης επισκευής.....	105
4.4.3 Απαιτήσεις επισκευής.....	107
4.4.4 Επίπεδα επισκευής.....	107
4.4.5 Επισκευές συγκολλημένων μπαλωμάτων (patches).....	108
4.4.5.1 Πτυχές μηχανικής υλικών.....	109
4.4.5.2 Υλικά μπαλωμάτων και συγκολλητικά.....	109
4.4.6 Βιδωμένες αρθρώσεις (Bolted repairs).....	111
4.4.6.1 Πτυχές μηχανικής υλικών.....	111
4.4.6.2 Εγκατάσταση μπαλωμάτων.....	112
4.5 Αυτοθεραπεία (Self-Healing) της βλάβης αποκόλλησης.....	115
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα.....</b>	<b>118</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>120</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά

### 1.1 Γενικά

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για ανθεκτικότερες και ελαφρύτερες κατασκευές, οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων υλικών. Η αύξηση της αντοχής και η ταυτόχρονη μείωση του βάρους, έχουν σαν τελικό αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας. Έτσι, το χαρακτηριστικό μέγεθος των νέων υλικών είναι οι υψηλές, σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά, τιμές του λόγου αντοχή/βάρος. Τα νέα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε ένα πλήθος κατασκευαστικών κλάδων, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, καθώς και οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων καθημερινής χρήσης. Στην κατηγορία των νέων υλικών συγκαταλέγονται και τα σύνθετα υλικά (Composite Materials) που ήδη παρουσιάζουν ευρύτατη εφαρμογή σε πολλούς κατασκευαστικούς τομείς.

Ένας ορισμός για τα σύνθετα υλικά, δόθηκε από τον Bagwan D. Agarwal το 1990, σύμφωνα με τον οποίο, *σύνθετα είναι τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Η βασική ιδέα της ανάπτυξης ενός σύνθετου υλικού, είναι η φυσική ανάμιξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών, και η δημιουργία ενός νέου υλικού με τελικές ιδιότητες διαφορετικές (καλύτερες) από τις αντίστοιχες των υλικών που το αποτελούν. Με την κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών καθώς και της τεχνικής ανάμιξής τους, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα σύνθετο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες. Επίσημα, το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920, και επρόκειτο για μήτρα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτη, προς τιμήν του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Σε ένα σύνθετο υλικό, διακρίνουμε δύο φάσεις. Η πρώτη ονομάζεται φάση ενίσχυσης, και είναι αυτή που φέρει τα ασκούμενα φορτία. Η δεύτερη φάση ονομάζεται μήτρα, και είναι αυτή που παίζει το ρόλο του μέσου μεταφοράς.

Ένας από τους πλέον διαδεδομένους τύπους σύνθετων υλικών είναι τα ινώδη (fiber reinforced composites), όπου μια συνεχής φάση (matrix), ενισχύεται με ίνες (fibers). Στην περίπτωση όπου ομάδες ινών είναι προσανατολισμένες προς ορισμένες κατευθύνσεις, τότε το υλικό που προκύπτει είναι ανισότροπο (anisotropic material), δηλαδή οι ιδιότητες μεταβάλλονται με την διεύθυνση. Σαν υλικά μήτρας συνήθως χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά ή διάφορα πολυμερή. Οι πλέον διαδεδομένες μήτρες είναι οι πολυμερικές, ενώ οι τύποι ινών που συνήθως χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά είναι οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι ίνες γυαλιού (glass fibers), οι ίνες aramid (Kevlar), οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers). Η εμφάνιση των πολυμερικών υλικών είχε σαν αποτέλεσμα την αντικατάσταση των μετάλλων σε πολλές κατασκευές και αυτό οφείλεται στη συμπεριφορά τους, την επάρκειά τους και στο χαμηλό κόστος τους.

Το πρώτο κύμα αντικατάστασης των μετάλλων με βιομηχανικά πλαστικά, άρχισε με την εμπορευματοποίηση του nylon το 1950. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε μια σειρά άλλων πολυμερικών υλικών, των οποίων η χρονολογική εμφάνιση φαίνεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1:** Ιστορική ανάπτυξη των πολυμερικών σύνθετων υλικών.

<b>ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>ΥΛΙΚΟ</b>
5000 π.Χ.	Μίγμα παπύρου-πίσσας
1500 π.Χ.	Επίστρωση ξύλου (καπλαμάς)
1909 μ.Χ.	Φαινολικά σύνθετα
1928. μ.Χ.	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ.	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ.	Πολυεστέρας - ίνες υάλου
1946 μ.Χ.	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ.	Σύνθετα Nylon – ίνες υάλου
1951 μ.Χ.	Σύνθετα πολυστυρενίου – υάλου
1956 μ.Χ.	Σύνθετα φαινόλης - αμιάντου
1964 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα – υάλου
1972 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες aramid
1975 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα aramid/γραφίτη

Αν συγκρίνουμε το κόστος ανά μονάδα βάρους των πλαστικών ρητινών με αντίστοιχο του χάλυβα, θα δούμε ότι το κόστος των πλαστικών ρητινών είναι μεγαλύτερο από εκείνο του χάλυβα. Παρόλα αυτά, το συνολικό κόστος παραγωγής ενός πλαστικού προϊόντος είναι πολύ κατώτερο από εκείνο του αντίστοιχου μεταλλικού. Η αντικατάσταση μεταλλικών κατασκευαστικών στοιχείων από αντίστοιχα πλαστικά σήμερα είναι της τάξεως του 12,5% κατά όγκο, ενώ έφτασε κατά το τέλος του 20<sup>ου</sup> αιώνα στο ύψος του 50% κατά όγκο. Το δεύτερο κύμα αντικατάστασης των μετάλλων, άρχισε με την ανάπτυξη υπερανθεκτικών και ελαφρών συνεχών ινών, όπως είναι οι ίνες άνθρακα, γραφίτη, aramid (Kevlar) και οι ίνες καρβιδίων του πυριτίου. Ήδη τα ινώδη σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και aramid, έχουν αρχίσει να αντικαθιστούν δύο βασικά μέταλλα, όπως είναι το αλουμίνιο και ο χάλυβας σε βασικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Ο κύριος λόγος αντικατάστασης του

αλουμινίου από προηγμένα σύνθετα υλικά στις αεροπορικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές, είναι κυρίως η μείωση του βάρους της κατασκευής. [1,2]

## 1.2 Η χρήση των σύνθετων υλικών στα αεροσκάφη

Η αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία σήμερα αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά προηγμένων συνθέτων υλικών και ήδη, σύμφωνα με τα στοιχεία του 1984, απορροφά το 75% της συνολικής κατανάλωσης σε προηγμένα υλικά σε ολόκληρο τον κόσμο. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά έχουν αντικαταστήσει μόνο ένα μικρό ποσοστό από το βάρος του αλουμινίου στην κατασκευή εμπορικών αεροσκαφών. Για παράδειγμα, στο Boeing 757 τα προηγμένα σύνθετα υλικά αντιπροσωπεύουν μόλις ένα ποσοστό μικρότερο του 3% του συνολικού βάρους του μεταλλικού μέρους του αεροσκάφους. Στο μέλλον, τα υλικά αυτά αναμένεται να καλύπτουν ένα ποσοστό 50-60% του συνολικού βάρους του αεροσκάφους. Αυτό θα συμβεί κατ' αρχήν στα πολεμικά αεροσκάφη και στη συνέχεια θα επεκταθεί στα εμπορικά επιβατικά. [1]

## 1.3 Ιστορική αναδρομή

Η επιστήμη των σύνθετων υλικών άρχισε να αναπτύσσεται σταθερά κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά δεν είναι νέα υλικά. Αντίθετα χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια. Πρόσφατα, οικονομικοί κυρίως λόγοι καθώς και κάποια έλλειψη φυσικών υλικών, οδήγησαν σε μια αυξανόμενη δημοτικότητα των συνθέτων. Πέρα από αυτούς τους λόγους, η δημοτικότητα των σύνθετων υλικών οφείλεται και σε μια σειρά άλλων λόγων, όπως είναι το μικρό τους βάρος σε συνδυασμό με τη μεγάλη τους αντοχή, το σχετικά χαμηλό κόστος τους, η μεγάλη ελευθερία στο σχεδιασμό κ.α. [1]

## 1.4 Πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι διαθέτουν συνήθως τις βέλτιστες ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν, και επιπλέον ιδιότητες που κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διέθετε. Έτσι, οι ιδιότητες ή αλλιώς τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών που τα καθιστούν ανώτερα από τα κοινά υλικά είναι:

- 1) Αντοχή σε κρούσεις
- 2) Ακαμψία
- 3) Αντίσταση σε διάβρωση
- 4) Αντίσταση σε φθορά λόγω χρήσης
- 5) Χαμηλό κόστος κατασκευής
- 6) Χαμηλό βάρος κατασκευής
- 7) Συμπεριφορά σε κόπωση
- 8) Θερμική μόνωση
- 9) Θερμική αγωγιμότητα
- 10) Ακουστική μόνωση

Ένα σύνθετο υλικό δεν μπορεί να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω ιδιότητες μαζί, και αυτό γιατί στην πράξη δεν υπάρχει ποτέ τέτοια απαίτηση. Μάλιστα μερικές από τις ιδιότητες αυτές είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση και θερμική αγωγιμότητα). Κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει μερικές από αυτές τις ιδιότητες. Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικότερα τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών ως κατασκευαστικών στοιχείων:

i) Άριστες μηχανικές ιδιότητες

Είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών. Αρκετοί τύποι ινών, έχοντας την προ απαιτούμενη αντοχή και δυσκαμψία, εντάσσονται στην κατηγορία των προηγμένων ινών. Οι ίνες βορίου και γραφίτη με τη μορφή λεπτών νημάτων (filaments) έχουν λάβει από τους ερευνητές μεγάλη προσοχή εξαιτίας της μεγάλης αντοχής και δυσκαμψίας τους.

ii) Ανάληψη φορτίου μετά την αστοχία

Τα σύνθετα υλικά έχουν την ιδιότητα να διατηρούν τα μεγάλα φορτία τους μετά από μια αστοχία, χαρακτηριστικό που παρατηρήθηκε πολλές φορές σε στατικές δοκιμές σύνθετων υλικών. Παρατηρήθηκε ακόμη, ότι τα ινώδη σύνθετα που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), μετά τη διαρροή τους εξακολουθούν και αναλαμβάνουν φορτία που φτάνουν το 85% της τάσης αστοχίας τους, ποσοστό που σε άλλες περιπτώσεις φτάνει το 110% ή 150% του ορίου διαρροής. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο ότι μετά την αστοχία συμβαίνει θραύση ινών, και έτσι η τάση μεταβιβάζεται σε πολλαπλές κατευθύνσεις μέσα στη μάζα του υλικού.

iii) Μικρή ευαισθησία σε ενκοπές και μεγάλη διάρκεια ζωής

Τα ινώδη σύνθετα υλικά παρουσιάζουν σχετικά μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη ενκοπών, και η διάδοση ρωγμών είναι περιορισμένη (μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση). Γενικά, τα ινώδη παρουσιάζουν πολύ αυξανόμενες τιμές στην ανά μονάδα βάρους διάρκεια ζωής σε κόπωση σε σχέση με το τιτάνιο, που είναι το ανθεκτικότερο από όλα τα μέταλλα σε κόπωση.

iv) Μείωση του αριθμού των τμημάτων της κατασκευής

Ο ελάχιστος αριθμός τμημάτων που απαιτούνται για μια κατασκευή από σύνθετα, είναι ένα πλεονέκτημα το οποίο αναδεικνύει παράλληλα πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερο κόστος επισκευής, παραγωγής και κατεργασίας, ενώ η κατασκευή παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία (σημαντικός παράγοντας στην αεροδιαστημική).

v) Βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες

Με την χρήση σύνθετων υλικών τύπου sandwich, μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν βέλτιστες αεροδυναμικές επιφάνειες, που χαρακτηρίζονται από διατήρηση του σχήματός τους, ακόμα και κάτω από την επίδραση υψηλών φορτίων.

vi) Αντίσταση στη διάβρωση

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, στα ενισχυμένα πλαστικά δεν παρατηρούνται φαινόμενα ηλεκτρικής διάβρωσης. Εξαιρέση αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία που μπορεί να υποβαθμίσει τις ιδιότητές τους. Όμως με κατάλληλη προστασία του υλικού το φαινόμενο αυτό μπορεί να ελεγχθεί.



vii) Απόσβεση σε ταλαντώσεις

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να απορροφήσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας και να υπάρξει απόσβεση στις μηχανικές ταλαντώσεις. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά.

viii) Αντοχή σε κρούσεις υψηλής ενέργειας

Η υψηλή αντοχή των ινωδών σύνθετων υλικών, περιορίζει την καταστροφή της κατασκευής, και τη διατήρηση του περιγράμματος γύρω από το σημείο της καταστροφής. Αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση των μετάλλων, όπου έχουμε υψηλή συγκέντρωση τάσεων γύρω από το σημείο της καταστροφής και μεγαλύτερη διάδοση των ρωγμών.

ix) Χαμηλό κόστος κατασκευής

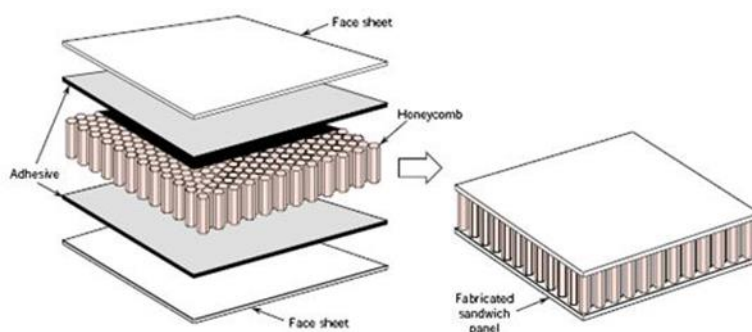
Από τις διάφορες εφαρμογές των ινωδών σύνθετων υλικών και ιδιαίτερα τις αεροναυπηγικές, έχει υπολογισθεί μια σημαντική μείωση του κόστους των κατασκευών. Μεγαλύτερη μείωση του κόστους παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή δυσκαμψία.

x) Μείωση του βάρους κατασκευής

Οι μειώσεις του βάρους των κατασκευών που προέκυψαν από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών, μπορούν να φθάσουν μέχρι το 50%, ενώ στις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνονται μεταξύ 20-80%. Η μεγαλύτερη μείωση βάρους παρατηρείται στα πιο απλά κατασκευαστικά στοιχεία (άξονες, άτρακτοι, πλαίσια). Παράδειγμα μείωσης του βάρους σε κατασκευή, είναι στα πτερύγια των αεροσκαφών, όπου το πάχος τους είναι μικρότερο από αυτό των παραδοσιακών από αλουμίνιο, και σε άξονες, ελατήρια και προφυλακτήρες στα αυτοκίνητα, για απορρόφηση ενέργειας κρούσης.

Τα σύνθετα υλικά, εκτός των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως, εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι τα εξής:

- 1) Έλλειψη ολκιμότητας
- 2) Μη επαρκή ανθεκτικότητα σε υπεριώδη ακτινοβολία, σε αυξομειώσεις της θερμοκρασίας και σε δράση χημικών
- 3) Χαμηλή αντίσταση σε μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες για τις πολυμερικές μήτρες
- 4) Σημαντική μείωση της εφελκυστικής αντοχής των υλικών όταν αυτά βρίσκονται σε μόνιμη τάση [1,2]



**Εικόνα 1.1:** Σύνθετο υλικό τύπου Sandwich με κυψελωτό πυρήνα (Honeycomb). [3]

## 1.5 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιούμε κάθε φορά, μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι η ευρεία ταξινόμηση των υλικών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2:** Ευρεία ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.

Τύπος σύνθετου υλικού	Παραδείγματα
Φυσικά σύνθετα υλικά	Ξύλο, οστά, μπαμπού, μύες, ιστοί
Μικροσύνθετα υλικά	Μεταλλικά κράματα, θερμοπλαστικά ενισχυμένα με λάστιχο, ABS, ενισχυμένα θερμοπλαστικά, πολύστρωτα σύνθετα
Μακροσύνθετα	Γαλβανισμένος χάλυβας, ενισχυμένο σκυρόδεμα

Τα περισσότερα από τα μηχανολογικά υλικά είναι συνδυασμοί δύο ή παραπάνω φάσεων, που συνδυάζονται μεταξύ τους σε μικροσκοπική κλίμακα, έτσι ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστες ιδιότητες. Η αντοχή και η στερρότητα (αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών) των μεταλλικών κραμάτων και των μηχανολογικών πολυμερών, επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό φάσεων υψηλής αντοχής σε φάσεις όλκιμου χαρακτήρα. Τα φυσικά σύνθετα και τα μηχανολογικά υλικά ανήκουν στην κατηγορία των μικροσύνθετων υλικών, γιατί οι ιδιότητές τους προκύπτουν από τη μικροσκοπική διάχυση της μιας φάσης μέσα στην άλλη.

Η δομή σε μερικές περιπτώσεις είναι τόσο λεπτή, που απαιτούνται μικροσκόπια μεγάλης διακριτικής ικανότητας για να παρατηρηθούν οι ξεχωριστές φάσεις. Η έννοια του όρου σύνθετο υλικό μπορεί επίσης να συνδέεται και με τη μακροσκοπική κλίμακα. Αυτό συνήθως συμβαίνει στα μηχανολογικά υλικά, που μπορεί να αποτελούνται από δύο ή και περισσότερα υλικά, που συνδυάζονται με κατάλληλο τρόπο να δίνουν ένα σύνθετο υλικό με επιθυμητές ιδιότητες. Έτσι ο γαλβανισμένος χάλυβας, που είναι χάλυβας με μια λεπτή επιστρωση ψευδαργύρου, συνδυάζει την αντοχή σε διάβρωση και την αντοχή του χάλυβα. Επομένως, μια διάκριση των σύνθετων υλικών με βάση την κλίμακα των συστατικών της ενίσχυσης είναι η εξής:

1) Μικροσύνθετα: Πρόκειται για υλικά, όπου η τάξη του μεγέθους των συστατικών του υλικού της μήτρας κυμαίνεται περίπου στα  $10^{-6}\text{m}$ . Στα μικροσύνθετα ανήκουν μεταλλικά κράματα και ενισχυμένα θερμοπλαστικά.

2) Μακροσύνθετα: Υλικά όπου η τάξη του μεγέθους των συστατικών του υλικού της μήτρας κυμαίνεται περίπου στα  $10^{-3}\text{m}$ . Στα μακροσύνθετα ανήκουν το ενισχυμένο σκυρόδεμα και ο γαλβανισμένος χάλυβας.

3) Νανοσύνθετα: Είναι υλικά όπου η τάξη του μεγέθους των συστατικών του υλικού της

μήτρας κυμαίνεται στα  $10^{-9}$ m. Στα νανοσύνθετα ανήκουν το carbon-black, τα σωματίδια πυριτιούχων ενώσεων, και οι νανοσωλήνες άνθρακα.

Μια άλλη ταξινόμηση των σύνθετων/μικροσύνθετων υλικών είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω, και βασίζεται στο διαφορετικό σχήμα και μέγεθος των ενισχύσεων που χρησιμοποιούνται. Τα περισσότερα μεταλλικά κράματα αποκτούν την πολυφασική δομή τους με μεταβολές που συμβαίνουν σε ατομικό επίπεδο. Άλλα σύνθετα μπορούν να παρασκευαστούν με φυσική ανάμιξη των διαφορετικών φάσεων που τα αποτελούν. Ταξινόμηση μικροσύνθετων υλικών:

1. Συνεχείς ίνες σε μήτρα: παράλληλες ή τυχαίας κατεύθυνσης,
2. Κοντές ίνες σε μήτρα: παράλληλες ή τυχαίας κατεύθυνσης,
3. Σωματίδια: σφαιρικά, επίπεδα, ελλειψοειδή, ακανόνιστου σχήματος, κοίλα, στερεά,
4. Πολύ μικρά σωματίδια μεγέθους  $<10^{-9}$  m,
5. Ελασματοειδούς μορφής,
6. Αλληλοδιαχεόμενα δίκτυα,
7. Πολυσύνθετα υβριδικά ενισχυμένα με κόκκους και ίνες. [1,2]

## 1.6 Κοκκώδη σύνθετα υλικά

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά είναι σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας. Οι κόκκοι αυτοί όμως δεν είναι πάντοτε μεταλλικοί. Τα κοκκώδη σύνθετα ταξινομούνται ως εξής:

### 1) Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Τέτοια υλικά είναι το σκυρόδεμα, που αποτελείται από κόκκους άμμου και πέτρας δεμένους με μίγμα τσιμέντου και νερού, το οποίο έχει σκληρύνει ύστερα από χημική αντίδραση. Επίσης, φολίδες μη μεταλλικών υλικών, όπως η μίκα ή το γυαλί που μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα μιας γυάλινης ή πλαστικής μήτρας αντίστοιχα.

### 2) Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μη μεταλλική μήτρα

Τέτοια υλικά έχουν κατασκευαστεί για την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, την αύξηση του συντελεστή θερμικής διαστολής και τη μείωση της φθοράς της μήτρας. Υπάρχουν σύνθετα υλικά με μεταλλική σκόνη σαν εγκλείσμα μέσα σε μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης, και με μεταλλικό εγκλείσμα υπό μορφή φολίδας.

### 3) Υλικά μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

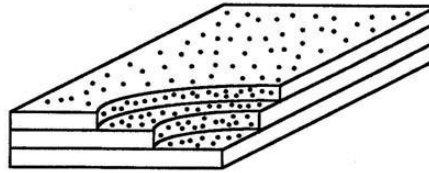
Το μεταλλικό εγκλείσμα σε αυτά τα υλικά έχει τη μορφή κόκκων μέσα στη μήτρα, και δεν είναι διαλυμένο μέσα σε αυτήν, όπως είναι στα κράματα. Παράδειγμα υλικού αυτής της κατηγορίας, είναι τα κράματα χαλκού ή χάλυβα που περιέχουν κόκκους μόλυβδου. Η ύπαρξη των κόκκων του μόλυβδου καθιστά το υλικό κατεργάσιμο στις εργαλειομηχανές. Μέταλλα όπως χρώμιο, βολφράμιο, μολυβδαίνιο και άλλα, μπορούν να αποτελέσουν το κοκκώδες εγκλείσμα άλλων μετάλλων που παρουσιάζουν όγκιμη συμπεριφορά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

#### 4) Υλικά μη μεταλλικού εγκλείσματος σε μεταλλική μήτρα

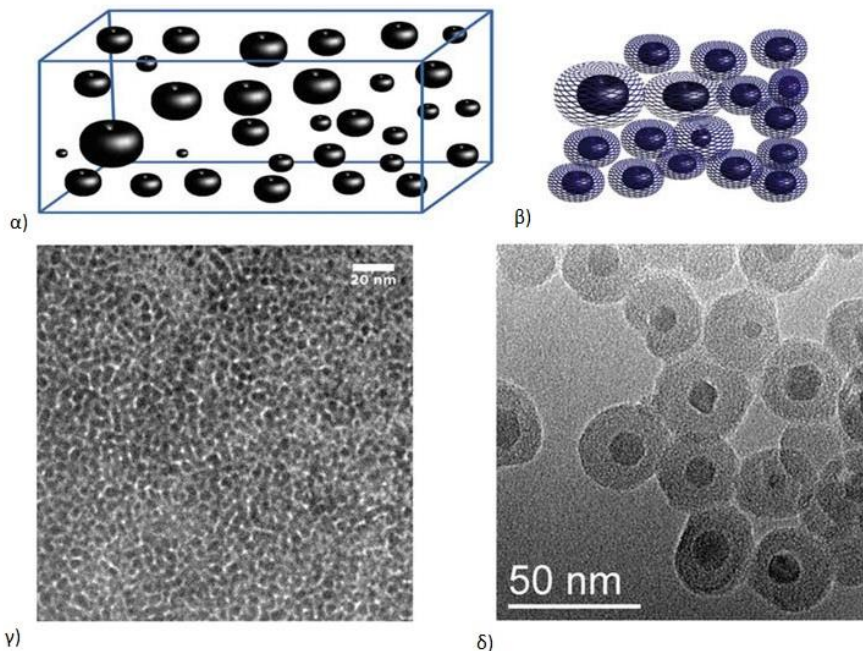
Μη μεταλλικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μορφή κοκκώδους εγκλείσματος μέσα σε μεταλλική μήτρα. Τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν ονομάζονται κεραμομέταλλα. Τα κεραμομέταλλα μπορεί να είναι δύο ειδών:

α) *Κεραμομέταλλα με κόκκους οξειδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα.* Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εργαλείων και εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας, όπου η αντίσταση στη διάβρωση είναι σημαντική.

β) *Κεραμομέταλλα με κόκκους καρβιδίου ενός μετάλλου μέσα σε μεταλλική μήτρα.* Το καρβίδιο του βολφραμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου, χρησιμοποιείται σε τμήματα μηχανών, τα οποία απαιτούν υψηλή σκληρότητα. Το καρβίδιο του χρωμίου μέσα σε μήτρα κοβαλτίου, έχει μεγάλη αντοχή στην οξείδωση και τη διάβρωση. Το καρβίδιο του τιτανίου μέσα σε μήτρα νικελίου ή κοβαλτίου, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. [1]



Εικόνα 1.2: Κοκκώδες σύνθετο υλικό. [3]



Εικόνα 1.3 α) Ένα κοκκώδες υλικό μπορεί να σχηματιστεί με τη διασπορά νανοσωματιδίων σε μια μήτρα, β) ή με την ομαδοποίηση εμβολιασμένων νανοσωματιδίων, γ) νανοσωματίδια κοβαλτίου σε μήτρα πυριτίδας, δ) νανοσωματίδια μαγνητίτη εμβολιασμένα με διοξείδιο του πυριτίου. [3]

## 1.7 Πολύστρωτα ή στρωματικά σύνθετα υλικά

Σε αυτού του τύπου τα υλικά, τόσο η μήτρα όσο και το έγκλεισμα έχουν τη μορφή φύλλων. Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες, που συνήθως μπορεί να είναι αντοχή, ακαμψία, αντίσταση στη διάβρωση, αντίσταση σε φθορά, εμφάνιση, ακουστική και θερμική μόνωση και άλλα. Τα κυριότερα είδη αυτών των υλικών είναι τα παρακάτω:

### 1) Διμέταλλα

Τα διμέταλλα είναι συνδυασμένα φύλλα δύο μετάλλων με σημαντικά διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής. Με την ύπαρξη αυτής της διαφοράς, μπορούν να κάμπτονται κατά έναν προκαθορισμένο τρόπο σε κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας. Εφαρμόζονται σαν εξαρτήματα μέτρησης θερμοκρασίας, σαν θερμοστάτες και άλλα.

### 2) Επιμεταλλωμένα μέταλλα

Η επιμετάλλωση είναι μια διαδικασία η οποία γίνεται για να μπορέσει ένα σύνθετο υλικό να συνδυάσει τις καλύτερες ιδιότητες του μετάλλου και του ίδιου του σύνθετου. Για παράδειγμα, τα υψηλής αντοχής κράματα αργιλίου, δεν είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, αλλά το καθαρό αργίλιο και μερικά κράματά του είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, δεν έχουν όμως υψηλή αντοχή. Ένα κράμα υψηλής αντοχής του αργιλίου επιμεταλλωμένο με ένα κράμα αργιλίου ανθεκτικό στη διάβρωση, αποτελεί ένα σύνθετο υλικό που διαθέτει και τις δύο ιδιότητες, δηλαδή υψηλή αντοχή και αντοχή στη διάβρωση. Ακόμα, υπάρχει και η χημική επιμετάλλωση, η οποία γίνεται μέσω μιας αντίδρασης μείωσης, για να τοποθετηθεί μέταλλο πάνω σε ένα υλικό χωρίς να υπάρξει διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα χημικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για τη χημική επιμετάλλωση είναι το νικέλιο.

### 3) Υαλος ασφαλείας

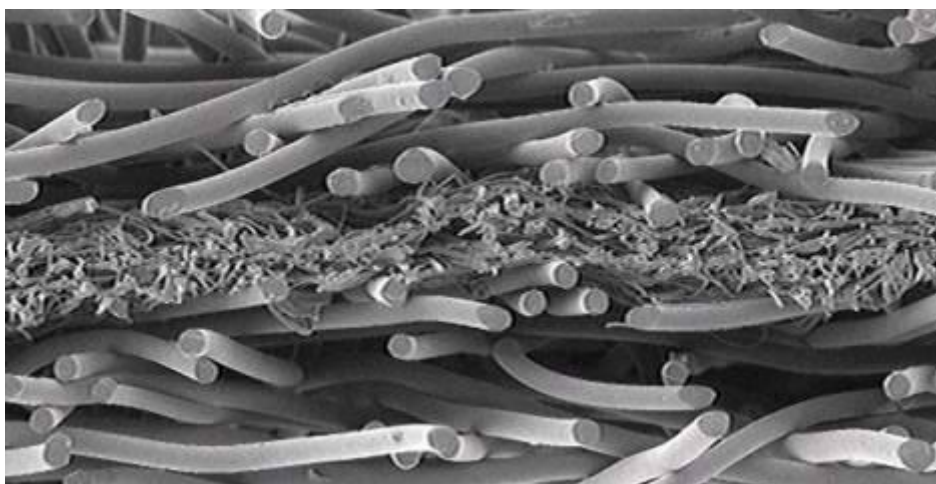
Ο υαλος ασφαλείας αποτελείται από ένα στρώμα ενός πλαστικού, του polyvinyl butyral ή αλλιώς πολυβινυλίου, συμπιεσμένο ανάμεσα σε δύο στρώματα συνήθως υάλου, υλικό που είναι αρκετά ανθεκτικό και διατηρεί τη διαφάνειά του κατά την αλλαγή συνθηκών στο περιβάλλον. Ένα μειονέκτημά του, πως είναι αρκετά εύθραυστο σε αντίθεση με το πολυβινύλιο που είναι εύκαμπτο και χαράζεται εύκολα. Επομένως, στην υαλο ασφαλείας η υαλος προστατεύει το πλαστικό από τη χάρση και του δίνει ακαμψία, και το πλαστικό μειώνει την ψαθυρότητα της υάλου, δηλαδή την παραμόρφωσή της πριν τη θραύση της. Ακόμη προσφέρει επιπλέον ανθεκτικότητα στην όλη κατασκευή.

### 4) Υλικά με επίστρωση πλαστικού

Πολλά υλικά μπορούν να διαβραχούν με διάφορα πλαστικά, ώστε να χρησιμοποιηθούν για ορισμένους σκοπούς. Ένα παράδειγμα είναι τα φύλλα γυαλιού και αμιάντου, τα οποία αν διαβραχούν με σιλικόνες, προκύπτει ένα υλικό με σημαντικές ιδιότητες. Επίσης, γυαλί ή νάλον μπορούν να διαβραχούν με διάφορες ρητίνες και να προκύψουν υλικά ανθεκτικά στην κρούση, που είναι κατάλληλα για θωρακίσεις. [1]



**Εικόνα 1.4:** Τύποι σύνθετων υλικών. [3]



**Εικόνα 1.5:** Multilayer Nonwovens-Πολυστρωματικά μη υφασμένα. [3]

### 1.8 Ινώδη σύνθετα υλικά

Τα ινώδη σύνθετα υλικά, αποτελούνται από έγκλεισμα υπό μορφή ινών μέσα σε μια συνεχή μήτρα. Η μήτρα μπορεί να είναι ένα οποιοδήποτε υλικό, από μια μεγάλη ποικιλία φυσικών ή τεχνητών υλικών.

Μια ίνα χαρακτηρίζεται από έναν πολύ μεγάλο λόγο μήκος/διάμετρο (aspect/ratio), ή αλλιώς  $l/d$ . Έχει παρατηρηθεί, ότι οι ίνες των διαφόρων υλικών είναι πολύ πιο άκαμπτες και ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά, που όμως βρίσκονται σε συνήθη μορφή. Για παράδειγμα, τα συνηθισμένα φύλλα γυαλιού έχουν τάση θραύσης μόνο μερικών MPa, ενώ οι ίνες γυαλιού του εμπορίου μπορούν να έχουν αντοχή θραύσης της τάξεως των 2,8-4,8 GPa, και όταν αυτές παρασκευάζονται σε εργαστήρια η τάση θραύσης μπορεί να φτάσει τα 7,0 GPa. Επίσης οι ίνες άνθρακα ή αλλιώς ανθρακονήματα υψηλής αντοχής, παρουσιάζουν αντοχή σε εφελκυσμό 3,5 έως 4,8 GPa, ενώ αυτές της υπερ-υψηλής αντοχής φτάνουν έως και 6,0 GPa. Αυτό δείχνει ότι η γεωμετρία μιας ίνας είναι αποφασιστικής σημασίας για τον υπολογισμό της αντοχής της ίνας, και θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν στις σχετικές εφαρμογές. Οι κρύσταλλοι του υλικού της ίνας είναι ευθυγραμμισμένοι κατά το διαμήκη άξονα της ίνας, ενώ υπάρχουν λιγότερες εσωτερικές ατέλειες στην ίνα σε σχέση με

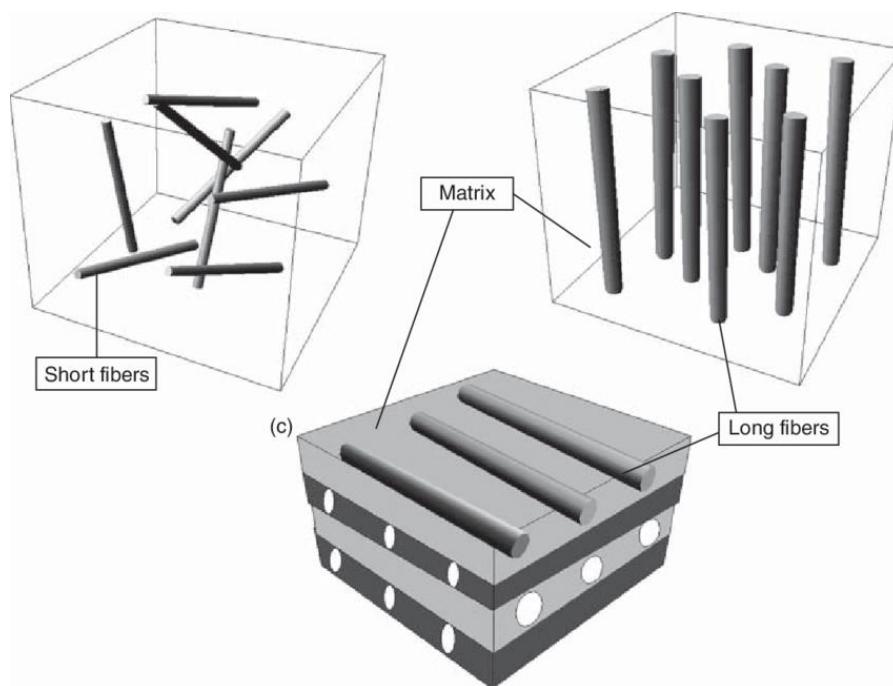
αυτές που υπάρχουν στο ίδιο το υλικό, που δεν είναι διαμορφωμένο σε μορφή ίνας. Οι ίνες διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1) Μακρές ίνες (long fibers)

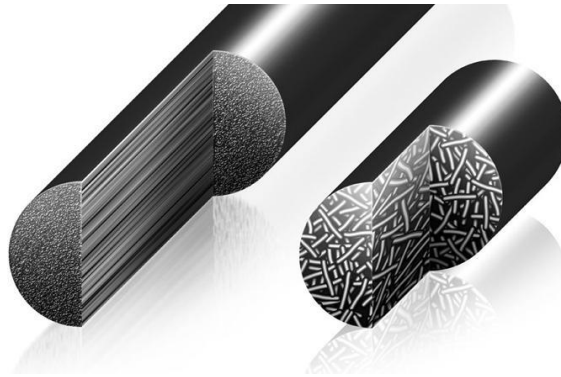
Είναι οι ίνες με μεγάλο λόγο μήκους/διάμετρο ( $l/d$ ) και με διάμετρο της τάξης μεγέθους των κρυστάλλων. Η ειδική ακαμψία και η ειδική αντοχή, όπως φαίνονται και στον Πίνακα 3, είναι λόγοι ενδεικτικοί της αποτελεσματικότητας της ίνας κυρίως σε κατασκευές ευαίσθητες σε βάρος, όπως είναι τα αεροσκάφη και τα διαστημόπλοια. Υλικά όπως ο χάλυβας έχουν θεωρητική αντοχή 20 GPa, ενώ ο κοινός δομικός χάλυβας έχει στην πράξη αντοχή 0,52 GPa έως 0,69 GPa. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις ατέλειες της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα, που αποτελούν ασυνέχειες αυτής της δομής (dislocations), από όπου ξεκινάει και η διαρροή του χάλυβα σε τάσεις πολύ μικρότερες από τις θεωρητικές.

2) Μικρού μήκους (whiskers)

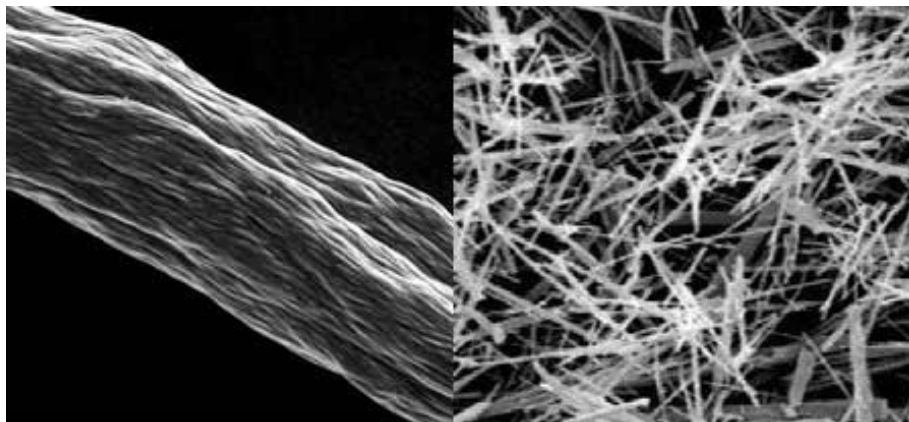
Είναι οι ίνες με μικρό λόγο μήκους/διαμέτρου ( $l/d$ ). Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι ασυνέχειες που εμφανίζονται στη δομή περιορίζονται στο ελάχιστο. Η αντοχή αυτών των ινών, υπερβαίνει κατά πολύ την αντοχή του αντίστοιχου υλικού που έχει τυχαία διαμόρφωση. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται κάποιες από τις ιδιότητές τους.



**Εικόνα 1.6:** α) Ενίσχυση με whiskers, (β) απλής κατεύθυνσης σύνθετο υλικό με μακρές ίνες, (γ) πολυστρωματικό, ελασματοποιημένο σύνθετο υλικό κατασκευασμένο από πολλαπλά στρώματα. [3]



**Εικόνα 1.7:** Ίνες άνθρακα (α) ευθυγραμμισμένες συνεχείς (β) τυχαίες ασυνεχείς. [3]



**Εικόνα 1.8:** α) Μακρές ίνες (long fibers), β) μικρού μήκους ίνες (whiskers). [3]

**Πίνακας 3:** Ιδιότητες μακρών ινών (long fibers).

Υλικό ίνας	$\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$T_s$ [GPa]	$T_s/\rho$ [Mm]	$E$ [GPa]	$E/\rho$ [Mm]
Αργίλιο	26,3	0,62	24	73	2,8
Τιτάνιο	46,1	1,90	41	115	2,5
Χάλυβας	76,6	4,10	54	207	2,7
Ε-γυαλί	25,0	3,40	136	72	2,9
Σ-γυαλί	24,4	4,80	197	86	3,5
Άνθρακας	13,8	1,70	123	190	14,0
Βηρύλλιο	18,2	1,70	93	300	16,0
Βόριο	25,2	3,40	137	400	16,0
Γραφίτης	13,8	1,70	123	250	18,0



**Πίνακας 4:** Ιδιότητες ινών μικρού μήκους (whiskers).

Υλικό ίνας	$\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ]	S(t) [GPa]	S(e) [GPa]	S(e)/ $\rho$ [Mm]	E [GPa]	E/ $\rho$ [Mm]
Χαλκός	87,4	12	3,0	34	124	1,4
Νικέλιο	87,9	21	3,9	44	215	2,4
Χάλυβας	76,8	20	13,0	170	200	2,6
B <sub>4</sub> C	24,7	45	6,7	270	450	18,0
SiC	31,2	83	11,0	350	840	27,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38,8	41	19,0	490	410	11,0
C	16,3	98	21,0	1300	980	60,0

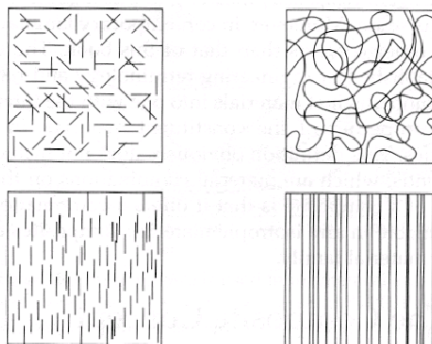
Όπου:  $\rho$ =πυκνότητα, S(t)=θεωρητική αντοχή, S(e)=πειραματική αντοχή, S(e)/ $\rho$ =ειδική πειραματική αντοχή, E=μέτρο ελαστικότητας, E/ $\rho$ =ειδικό μέτρο ελαστικότητας.

Άλλη μια ταξινόμηση των ινωδών σύνθετων υλικών, είναι ανάλογα με τη διάταξη και τον προσανατολισμό των ινών μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με αυτή, τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- 1) Μονοδιευθυντικά, με όλες τις ίνες να έχουν την ίδια διεύθυνση
- 2) Πολυδιευθυντικά, με τις ίνες να έχουν διαφορετική διεύθυνση

Τα Πολυδιευθυντικά ινώδη ταξινομούνται σε τρεις άλλες κατηγορίες που είναι:

- α) Σύνθετα υλικά με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- β) Σύνθετα υλικά με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- γ) Σύνθετα υλικά με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση [1, 2]



**Εικόνα 1.9:** Ινώδη σύνθετα υλικά. [3]

Οι ίνες είναι πρακτικά άχρηστες αν δεν είναι τέλεια ενσωματωμένες μέσα σε μια μήτρα σε μορφή συνθέτου υλικού. Η μήτρα προστατεύει τις ίνες από το περιβάλλον ενώ παράλληλα μεταφέρει τις τάσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν μήτρες έχουν συνήθως σημαντικά μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και ακαμψία από τα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν ενισχυτικές ίνες. Η πιο συνήθης εμπορική μορφή ενός ινώδους υλικού, είναι εκείνη του πολύστρωτου σύνθετου υλικού (laminated composite). Η στρωμάτωση αυτή μπορεί να έχει επίπεδη ή καμπύλη μορφή. Οι ίνες στο πολύστρωτο σύνθετο υλικό, μπορεί να είναι διατεταγμένες με διάφορους τρόπους, δηλαδή μπορεί να έχουν όλες την ίδια διεύθυνση ή μπορεί να υπάρχουν διάφορες ομάδες ινών με διαφορετικές διευθύνσεις. Η κάθε επιλογή εξαρτάται από τις ιδιότητες που επιθυμούμε να έχει το υπό κατασκευή σύνθετο υλικό. [1]

## **1.9 Πολυμερικές μήτρες**

Οι σημαντικές φυσικές ιδιότητες των πολυμερών, δηλαδή πολλών μονομερών μαζί, καθορίζονται από τη χημική δομή τους. Φαίνεται ότι πολλές από τις ιδιότητες των πολυμερών εξαρτώνται από τη μακροδομή τους. Στην πραγματικότητα όμως, ο τύπος της υπερμοριακής οργάνωσης εξαρτάται από τη χημική δομή της μακρομοριακής αλυσίδας, η οποία μας δίνει πληροφορίες για τις βασικές φυσικές ιδιότητές τους και τις βέλτιστες συνθήκες παραγωγής τους. Οι πληροφορίες αυτές αλλάζουν κατά τη σύνθεση του πολυμερούς, ανάλογα με τις σχετικές διευθετήσεις των ατόμων, των ατομικών ομάδων, των επαναλαμβανόμενων μονάδων και της μοριακής μάζας, καθώς και της κατανομής της μοριακής μάζας. Στα πολυμερή, το κύριο πρόβλημα της φυσικής τους είναι ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ της χημικής και της φυσικής δομής, με τις φυσικές ιδιότητες των πολυμερών. [1]

### **1.9.1 Βασικές έννοιες**

Ο όρος πολυμερές αποτελεί σύνθετο όρο των λέξεων πολλά μέρη. Με τον όρο μέρος εννοούμε τη δομική μονάδα του μακρομορίου. Στον Πίνακα 5 φαίνεται πώς δημιουργείται μια μακρομοριακή δομή με τη συνένωση πολλών μονομερών μετά από χημική αντίδραση.

**Πίνακας 5:** Παραγωγή πολυμερικών προϊόντων από διάφορες πρώτες ύλες.

Πρώτες ύλες	Βασικά πετροχημικά	Πολυμερή	Τελικά Προϊόντα
Φυσικό αέριο	Αιθυλένιο Προπυλένιο Στυρένιο Βινυλοχλωρίδιο Βουταδιένιο Κυκλοεξάνιο Ακετυλένιο	PE	Πλαστικά Ελαστομερή Ίνες Κόλλα
Αργό πετρέλαιο		PP	
Χλώριο Άζωτο		PS PVC ABS PA PUR	

Η παραγωγή των πολυμερών γίνεται κυρίως με μια από τις παρακάτω μεθόδους:

#### 1) Πολυμερισμός

Στον πολυμερισμό αντιδρούν μεταξύ τους ενώσεις μικρού μοριακού βάρους, οι οποίες περιέχουν έναν ή περισσότερους διπλούς δεσμούς, χωρίς να απελευθερώνεται άλλο προϊόν. Η ένωση των μορίων γίνεται με διάσπαση των διπλών δεσμών. Οι πέντε διαφορετικές βιομηχανικές μέθοδοι πολυμερισμού είναι:

α) *Πολυμερισμός μάζας.* Γίνεται απουσία διαλύτη. Το μίγμα αντιδράσεως αποτελείται από το μονομερές και από τον καταλύτη πολυμερισμού.

β) *Πολυμερισμός διαλύματος.* Τόσο το πολυμερές όσο και το μονομερές είναι διαλυτά στο διαλυτικό μέσο, και το πολυμερές λαμβάνεται με μορφή διαλύματος.

γ) *Πολυμερισμός αιωρήματος.* Όταν ο πολυμερισμός γίνεται σε υδατική φάση. Σε αυτήν την περίπτωση, το μονομερές είναι διεσπαρμένο σε μορφή μικρών σφαιρικών σταγονιδίων στην αρχή του πολυμερισμού, με αποτέλεσμα τα ενεργοποιημένα μονομερή να σχηματίζονται μέσα στα σταγονίδια.

δ) *Πολυμερισμός γαλακτώματος.* Όταν σχηματίζονται ενεργοποιημένα μονομερή μέσα στην υδατική φάση και όχι στα σταγονίδια, και συγχρόνως προστίθενται γαλακτοποιητές. Ο γαλακτοποιητής, προκαλεί τον λεπτό διασκορπισμό του μονομερούς μέσα στο μέσο αντιδράσεως, και τα σωματίδια του μονομερούς και πολυμερούς που προκύπτουν είναι πολύ μικρά από ότι στην περίπτωση του πολυμερισμού αιωρήματος.

ε) *Πολυμερισμός με κατακρήμνιση.* Όταν το πολυμερές είναι αδιάλυτο στο μονομερές ή εάν το μονομερές, αλλά όχι και το πολυμερές, είναι διαλυτό σε προστιθέμενο διαλύτη, τότε πρόκειται για πολυμερισμό με κατακρήμνιση. Το πολυμερές κατακρημνίζεται αμέσως μετά το σχηματισμό του συνήθως με τη μορφή μικρών σωματίων.

#### 2) Πολυσυμπύκνωση

Στην πολυσυμπύκνωση, σχηματίζονται προϊόντα μεγάλου μοριακού βάρους από δύο τουλάχιστον ενώσεις μικρού μοριακού βάρους, οι οποίες συνδέονται πολλαπλά μεταξύ τους με σύγχρονη αποβολή μιας ενώσεως μικρού μοριακού βάρους, συνήθως του νερού. Οι δύο

ενώσεις μικρού μοριακού βάρους πρέπει να περιέχουν τουλάχιστον δύο δραστικές ομάδες. Προς το τέλος της αντίδρασης παράγονται μακρομοριακές αλυσίδες μεγάλου μήκους.

### 3) Πολυπροσθήκη

Κατά την προσθήκη αντιδρούν μεταξύ τους δύο ή περισσότερα μονομερή, από τα οποία το καθένα διαθέτει τουλάχιστον δύο δραστικές ομάδες. Κατά την αντίδραση δεν απελευθερώνεται τρίτη ένωση ούτε διασπάται διπλός δεσμός. [1]

## 1.9.2 Ταξινόμηση πολυμερών

Λόγω του ότι τα πολυμερή αποτελούν πολύ μεγάλο κομμάτι των σύνθετων υλικών με χιλιάδες παραδείγματα, για την καλύτερη κατανόησή τους τα χωρίζουμε σε κατηγορίες ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά τους. Αναφερόμενοι στα πολυμερή ως ειδική κατηγορία υλικών, κάνουμε μια πρώτη διάκριση των υλικών σε υλικά μικρού μοριακού βάρους και σε υλικά μεγάλου μοριακού βάρους όπως τα πολυμερή. Μια διάκριση των πολυμερών είναι η εξής:

### 1) Ανάλογα με τη δομή

#### 2) Ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση

Τα μόρια των πολυμερών μπορεί να είναι μερικώς κρυσταλλικά ή σε απόλυτη αταξία. Στην κατάσταση της απόλυτης αταξίας, το πολυμερές μπορεί να εμφανίζεται σε υαλώδη και ψαθυρή μορφή, ή να είναι ρευστό με τα ιξώδη χαρακτηριστικά ενός υγρού ή την ελαστικότητα ενός λάστιχου. Η διάκριση αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το μοριακό βάρος και τη χημική δομή.

#### 3) Ανάλογα με το κόστος και τον τύπο του πολυμερούς

Σε μια βιομηχανία, μπορεί να υπάρχουν βασικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τον τρόπο παραγωγής ή τη συμπεριφορά των υλικών κατά την τελική τους χρήση. Σε κάθε εφαρμογή μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ πολυμερών χαμηλού ή υψηλού κόστους, καθώς και μεταξύ πολυμερών γενικής χρήσης και πολυμερών ειδικής χρήσης. Αυτός θα μπορούσε να είναι ένας πρώτος διαχωρισμός, ανάλογα με την τελική χρήση του υλικού. Στη βιομηχανία των πλαστικών, ένας σημαντικός παράγοντας, τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από την άποψη της τελικής χρήσης των προϊόντων, είναι η συμπεριφορά των πολυμερών σε υψηλές θερμοκρασίες.

#### 4) Ανάλογα τη χημική δομή

Η μοριακή δομή του πολυμερούς, οι χημικές ομάδες που περιέχονται, και ο τρόπος της σύνθεσης του πολυμερούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ένα μέσο διάκρισης των πολυμερών σε κατηγορίες.

#### 5) Ανάλογα με την τελική χρήση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, πολλές βιομηχανίες πλαστικών εφαρμόζουν την τεχνολογία των πολυμερών για την κατασκευή, και στη συνέχεια την παραγωγή συγκολλητικών ουσιών, ινών, ελαστικών και άλλων. Το είδος της τελικής εφαρμογής του προϊόντος μπορεί να αποτελέσει ένα κριτήριο για την κατάταξη των πολυμερών σε κατηγορίες. [1]

### 1.9.3 Πολυμερή και πλαστικά

Οι όροι πολυμερή και πλαστικά αρκετές φορές θεωρούνται συνώνυμοι, διαφέρουν όμως μεταξύ τους. Το πολυμερές είναι ένα καθαρό υλικό που προκύπτει από τη διαδικασία του πολυμερισμού, και εκπροσωπεί την οικογένεια των υλικών που χαρακτηρίζονται από μακρομοριακή δομή. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επιπρόσθετες ουσίες, λέγονται καθαρά πολυμερή, σπάνια όμως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές. Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, συχνά περιέχουν και διάφορες πρόσθετες ουσίες. Σε αυτήν την περίπτωση ονομάζονται πλαστικά. Οι ουσίες αυτές προστίθενται για διάφορους λόγους.

Στη συνέχεια περιγράφονται διάφορα πρόσθετα και οι λόγοι που προστίθενται στα πολυμερή.

- α) Αντιστατικά πρόσθετα (antistatic agents)
- β) Πρόσθετα σύζευξης (coupling agents)
- γ) Εγκλείσματα (fillers)
- δ) Αντιπυρικά (flame retardants)
- ε) Λιπαντικά (lubricants)
- στ) Πήγματα (pigments)
- ζ) Πλαστικοποιητές (plasticisers)
- η) Ενισχυτικά (reinforcements)
- θ) Σταθεροποιητές (stabilisers)

Οι δύο κύριες κατηγορίες πλαστικών είναι:

#### A) Θερμοπλαστικά υλικά (Thermoplastic Materials)

Τα πολυμερή που μαλακώνουν και ρέουν όταν σε αυτά εφαρμόζεται ταυτόχρονα πίεση και θερμότητα, λέγονται θερμοπλαστικά. Σε ένα θερμοπλαστικό τα μακρομόρια συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Μια εικόνα που θα ταίριαζε στην περιγραφή ενός θερμοπλαστικού υλικού, είναι αυτή των πολύ λεπτών ινών βαμβακιού που είναι τυχαία κατανεμημένες. Όταν το υλικό θερμανθεί, τότε η ένταση των διαμοριακών δυνάμεων μειώνεται πολύ, έτσι ώστε το υλικό να γίνεται μαλακό και εύκαμπτο, ενώ στη συνέχεια σε υψηλότερες θερμοκρασίες μετατρέπεται σε ιξώδες ρευστό. Όταν αυτό ψυχθεί, τότε μετατρέπεται και πάλι σε στερεό. Αυτός ο κύκλος της ρευστοποίησης με θέρμανση και της στερεοποίησης με ψύξη μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές. Το πλήθος των μορφοποιήσεων περιορίζεται από τη χημική τους υποβάθμιση.

Τα πλεονεκτήματα των θερμοπλαστικών είναι το χαμηλό ειδικό τους βάρος, η ευκολία στη μορφοποίηση, η υψηλή αντίσταση που εμφανίζουν στη διάβρωση και το γεγονός ότι η διαδικασία θέρμανσης ψύξης μπορεί να επαναληφθεί άπειρες φορές. Επίσης, ένα κατεστραμμένο κατασκευαστικό στοιχείο από θερμοπλαστικό μπορεί να επαναμορφοποιηθεί.

Τα μειονεκτήματά τους είναι η υποβάθμιση που παρουσιάζουν σε ορισμένες ιδιότητες με την επανάληψη των κύκλων θέρμανσης-ψύξης, καθώς επίσης και ότι το μέτρο ελαστικότητας E (ή μέτρο Young) και η αντοχή αλλάζουν συναρτήσεως του χρόνου. Επιπλέον, υπάρχει ένα ανώτατο όριο θερμοκρασίας, πάνω από το οποίο το στοιχείο δεν μπορεί να

χρησιμοποιηθεί σαν κατασκευαστικό στοιχείο. Το όριο αυτό της θερμοκρασίας ονομάζεται θερμοκρασία εκτροπής, και μετράται με συγκεκριμένη φόρτιση κάτω από δεδομένο ρυθμό θέρμανσης του δοκιμίου. Ένα ανάλογο παράδειγμα κατανόησης των κύκλων θέρμανσης-ψύξης είναι εκείνο του κεριού που υγροποιείται με τη θέρμανση και στερεοποιείται με την ψύξη. Παραδείγματα θερμοπλαστικών υλικών είναι το πολυαιθυλένιο, το PVC, το nylon, οι ακετάλες, τα πολυανθρακικά (PC), το πλεξιγκλάς (PMMA), και το πολυπροπυλένιο (PP).

Μια υποδιαίρεση των θερμοπλαστικών υλικών είναι αυτή που τα διακρίνει σε κρυσταλλικά (crystalline) και άμορφα (amorphous). Τα *κρυσταλλικά θερμοπλαστικά* έχουν δομή που χαρακτηρίζεται από την τάξη στη διευθέτηση των μακρομορίων τους. Τα *άμορφα θερμοπλαστικά* έχουν δομή που χαρακτηρίζεται από την τυχαία διάταξη των μακρομορίων τους. Εξαιτίας της πολύπλοκης δομής τους, δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα τέλεια κρυσταλλικό θερμοπλαστικό. Πλαστικά όπως το πολυαιθυλένιο και το nylon μπορεί να παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό κρυσταλλικότητας, αλλά περιγράφονται καλύτερα με τον όρο ημικρυσταλλικό (semi-crystalline) ή μερικώς κρυσταλλικό (partially crystalline). Πλαστικά όπως τα ακρυλικά και το πολυστυρένιο, είναι πάντα άμορφα. Η παρουσία της κρυσταλλικότητας στα πλαστικά που είναι δυνατόν να κρυσταλλωθούν, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική κατεργασία κατά την κατασκευή τους. Όμοια, οι μηχανικές ιδιότητες του πλαστικού εξαρτώνται από το ποσοστό της κρυσταλλικής φάσης που εμπεριέχεται σε αυτά.

Τα πλαστικά χαρακτηρίζονται από υψηλότερη πυκνότητα όταν κρυσταλλώνονται, και αυτό συμβαίνει λόγω της πυκνότερης συσσώρευσης των μακρομορίων τους.

Μερικά πλεονεκτήματα των κρυσταλλικών πλαστικών είναι:

- α) Ακαμψία, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες
- β) Χαμηλός συντελεστής τριβής
- γ) Σκληρότητα
- δ) Αντίσταση στη θραύση λόγω περιβαλλοντικών εντατικών πεδίων
- ε) Δυνατότητα ενίσχυσης
- στ) Ικανότητα παραμόρφωσης
- η) Υψηλότερη αντοχή σε ερπυσμό

Τα μειονεκτήματά τους είναι:

- α) Είναι πάντα αδιαφανή
- β) Παρουσιάζουν μεγάλη συρρίκνωση κατά τη μορφοποίησή τους

## B) Θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά (Thermosetting Plastics)

Τα πολυμερή που όταν θερμανθούν πολυμερίζονται (μη αντιστρέψιμη διαδικασία), και δεν επανατήκονται, λέγονται θερμοσκληρυνόμενα. Ένα θερμοσκληρυνόμενο θερμοπλαστικό παράγεται από μια χημική αντίδραση σε δύο στάδια. Στο πρώτο, παράγονται μακρομοριακές αλυσίδες ακριβώς όπως στα θερμοπλαστικά, που όμως είναι δυνατόν να αντιδράσουν περαιτέρω. Στο δεύτερο μορφοποιούνται, και κάτω από την επίδραση θερμότητας και πίεσης δημιουργούνται ισχυροί σταυροειδείς δεσμοί (crosslinks). Οι δεσμοί

αυτοί δημιουργούνται μεταξύ των μακρομορίων με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν μετά την ψύξη του να είναι στερεό και άκαμπτο. Η δομή του θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού χαρακτηρίζεται ως ένα πλέγμα (network) μορίων, που αποτελεί ουσιαστικά ένα ενιαίο μόριο, όπου τα μακρομόρια έχουν ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας κίνησης. Τα χαρακτηριστικά των θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών είναι ότι αυτά δεν ρευστοποιούνται με την επαναθέρμανση. Αν τα θερμάνουμε σε μεγάλο βαθμό, τότε αποσυντίθενται.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι η αρκετά υψηλή αντοχή τους, η χαμηλή ευφλεκτότητά τους, η υψηλή θερμική και χημική αντίσταση και η μεγάλη επιφανειακή σκληρότητα. Τα μειονεκτήματά τους είναι οι αργές μέθοδοι παραγωγής, καθώς επίσης το ότι παρουσιάζουν χαμηλές θερμοκρασίες χρήσης. Όπως στα θερμοπλαστικά, έτσι και στα θερμοσκληρυνόμενα η χημική σταθερότητα αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα. Παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων πλαστικών είναι η φαινολ-φορμαλδεΐδη, η μελαμίνη-φορμαλδεΐδη, η ουρία-φορμαλδεΐδη, οι εποξειδικές ρητίνες, και μερικοί πολυεστέρες.

Σήμερα, οι φαινόλες μαζί με άλλα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά που βασίζονται στην ουρία, τη μελαμίνη, τους ακόρεστους πολυεστέρες UP (unsaturated polyester), και τις εποξειδικές ρητίνες, αποτελούν τη ραχοκοκαλιά για ένα πλήθος εφαρμογών που βασίζονται στο υψηλό σημείο τήξης, τη μεγάλη χημική και θερμική διαστολή, τη μεγάλη ακαμψία, την επιφανειακή σκληρότητα, τη διαστατική σταθερότητα και την μη αναφλεξιμότητα των υλικών αυτών. Σε πολλές περιπτώσεις, ο συνδυασμός των ιδιοτήτων που διαθέτουν τα θερμοσκληρυνόμενα δεν καλύπτεται από τις ιδιότητες που προσφέρουν τα ανταγωνιστικά μηχανολογικά πλαστικά, όπως είναι το PPO, PET, PBT ή οι ακετάλες, ούτε όμως και τα υψηλής απόδοσης παράγωγα, όπως είναι τα PS, PES, PEEK.

Στο παρελθόν, τα θερμοσκληρυνόμενα είχαν αντικατασταθεί από τα θερμοπλαστικά μόνο σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου δεν υπήρχε ανάγκη από υψηλές θερμικές ιδιότητες. Όμως η αντικατάσταση αυτή σήμερα έχει περιοριστεί αρκετά. Στον Πίνακα 6 αναφέρονται τα κυριότερα πολυμερικά υλικά. [1]

**Πίνακας 6:** Τα κυριότερα πολυμερικά υλικά.

Κατηγορία	Όνομασία	Συντομογραφία
<b>ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ</b>	Polyethylene	PE
	Polypropylene	PP
	Polystyrene	PS
	Poly (vinyl chloride)	PVC
	Polyacetal	POM
	Acrylic	PMMA
	Polyamide (nylon)	PA
	Polycarbonate	PC
	Polytetrafluorethylene	PTFE
<b>ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ</b>	Epoxy	EP
	Melamine-formaldehyde	MF
	Urea-formaldehyde	UF
	Unsaturated polyester	UP
	Phenolic	PF
	Alkyd	-
	Polyurethane	PUR
<b>ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ</b>	Natural rubber	NR
	Styrene-butadiene rubber	SBR
	Polybutadiene	BR
	Butyl rubber	BUTYL
	Polychloroprene	CR
	Synthetic Polyisoprene	IR
	Nitrile	NBR
	Silicone rubber	-

#### 1.9.4 Πλαστικά κατασκευών

Τα πλαστικά διαθέτουν ένα ευρύ φάσμα ιδιοτήτων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό κάποιας κατασκευής. Αυτό όμως δεν σημαίνει πως για κάθε κατασκευή θα υπάρχει πάντα το πλαστικό εκείνο που θα διαθέτει τον απαιτούμενο συνδυασμό ιδιοτήτων, αλλά ότι ο σχεδιαστής θα πρέπει να γνωρίζει τις ιδιότητες των πλαστικών που έχει στη διάθεσή του και να επιλέξει το κατάλληλο. Κάποιες ειδικές κατηγορίες πλαστικών είναι οι παρακάτω. [1]

##### 1.9.4.1 Μηχανολογικά πλαστικά (*Engineering Plastics*)

Πολλά θερμοπλαστικά έχουν γίνει αποδεκτά με τον όρο μηχανολογικά πλαστικά. Ένας πιο δόκιμος όρος, είναι εκείνος σύμφωνα με τον οποίο ένα πλαστικό θα λέγεται μηχανολογικό όταν μπορεί να φέρει μηχανικά φορτία σε απεριόριστη χρονική διάρκεια. Με βάση αυτό το κριτήριο, τα θερμοπλαστικά μειονεκτούν έναντι των μετάλλων λόγω των μικρών αντοχών τους. Από την άλλη όμως, εμφανίζουν αντίσταση στη διάβρωση και



μορφοποιούνται εύκολα. Επομένως, ο λόγος που τα πλαστικά γίνονται ανταγωνιστικά σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά, είναι η εξισορρόπηση των ιδιοτήτων τους και το χαμηλό τους κόστος.

Τα πλαστικά που ανήκουν στην κατηγορία των μηχανολογικών πλαστικών, είναι το Νylon, οι ακετάλες, τα πολυκαρβονικά (polycarbonates), το οξείδιο του πολυφαινυλενίου (PPO), οι θερμοπλαστικοί πολυεστέρες, οι πολυσουλφόνες και το πολυφαινυλέν-σουλφίδιο. Τέλος, υπάρχει και το μη πλαστικοποιημένο u-PVC που χρησιμοποιείται στην βιομηχανία σωλήνων.

Στα μηχανολογικά πλαστικά υψηλής απόδοσης, ανήκουν τα polyethersulphone (PES), polyetheretherketone (PEEK) και τα polyamideimide όπως και ο δομικός αφρός (Structural Foam), τα ελαστομερή (Elastomers), τα πολυμερικά μίγματα (Polymer Alloys) και οι υγροί πολυμερικοί κρύσταλλοι (Liquid Crystal Polymers). [1]

### **1.9.5 Μηχανολογικά θερμοπλαστικά πολυμερή**

Ενώ τα θερμοπλαστικά μεγάλης κατανάλωσης είναι αρκετά γνωστά, τα μηχανολογικά πλαστικά των οποίων η κατανάλωση είναι αρκετά περιορισμένη, παραμένουν σχετικά άγνωστα σε χώρες με τεχνολογική υστέρηση.

Λόγω των μειονεκτημάτων που εμφάνισαν τα θερμοπλαστικά μεγάλης κατανάλωσης, ζητήθηκε η ανακάλυψη νέων υλικών. Κάποια από τα μειονεκτήματά τους είναι ότι οι μηχανικές τους αντοχές μειώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες και ότι όταν χρησιμοποιούνται αυτούσια, είναι εύφλεκτα και προάγουν τη φλόγα παράγοντας αέρια τα οποία είναι τοξικά. Τα νέα πολυμερή που αναπτύχθηκαν είναι:

- α) Πολυαμίδιο ή Nylon (PA)
- β) Πολυανθρακικά Πολυμερή ή Polycarbonates (PC)
- γ) Οξείδιο Πολυφαινυλενίου ή Polyphenylene oxide (PPO)
- δ) Πολυακετάλες ή Polyacetates (POM)
- ε) Πολυαιθεριμίδιο ή Polyetherimide (PEI)
- στ) Μίγματα Πολυμερών [1]

### **1.10 Ενισχυτικές Ίνες**

Στη βιομηχανία των σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται μια μεγάλη ποικιλία υλικών σε μορφή ινών για την ενίσχυση πλαστικών, μεταλλικών και κεραμικών υλικών. Με αυτόν τον τρόπο τα πλαστικά γίνονται ισχυρότερα, πιο δύσκαμπτα και πιο σκληρά. Κάποιες άλλες ιδιότητες των ινών είναι η χαμηλή τους πυκνότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θερμική αντίσταση. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών για την κατασκευή αεροσκάφους, είναι οι ίνες αρωματικού πολυαμιδίου, βορίου, άνθρακα και γυαλιού. Επιπλέον, άλλοι τύποι ινών είναι αυτές του πυριτίου, του πολυαιθυλενίου και του χαλαζία. [1]

### 1.10.1 Μορφές ινών

Οι ίνες που αναφέρθηκαν παραπάνω (εκτός του βορίου), παράγονται ως θύσανοι λεπτών νημάτων, δηλαδή ενωμένοι στη μια πλευρά και ελεύθεροι στην άλλη, που μπορούν να μετατραπούν σε ταινίες μιας διεύθυνσης σε μορφή υφαντών ή πλεκτών υφασμάτων, σωληνοειδών πλεξούδων, χαρτιών και ψαθών ή κομμένα σε μικρά κομμάτια σε σχήμα U. Αν αυτές οι μορφές ινών εμποτιστούν σε ρητίνες δημιουργούν τα προ-εμποτισμένα υλικά (prepregs, preimpregnated materials). Οι τεμαχισμένες ίνες συνδυάζονται συνήθως με θερμοπλαστικά υλικά. Τα υλικά αυτά τεμαχίζονται σε μικρούς σκληρούς κόκκους (pellets) που ωθούνται σε καλούπια με τη μέθοδο injection molding. Οι μορφές αυτές μπορούν να κατασκευαστούν από μίγματα ινών για να παράγουν υβριδικά (hybrid) σύνθετα, ταινίες ή πλεξούδες. [1]

#### 1.10.1.1 Ταινίες μιας διεύθυνσης

Οι μη υφαντές ταινίες αποτελούνται συνήθως από ελεύθερα δέματα, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από εκατοντάδες νήματα χωρίς στρέψη. Τα δέματα αυτά λέγονται tows. Οι ταινίες ψεκάζονται σε καλούπια χωρίς να δημιουργούν κενά. Οι ίνες εμποτίζονται σε ρητίνη για να παραμείνουν στη θέση τους, η οποία είναι μερικώς πολυμερισμένη για να έχει μια παχύρρευστη υφή με υψηλό ιξώδες. Ύστερα η ρητίνη επικαλύπτεται με ένα αποκολλητικό χαρτί (release paper) καλυμμένο με σιλικόνη, έτσι ώστε να μην κολλήσει η ρητίνη σε άλλα επίπεδα της ταινίας.

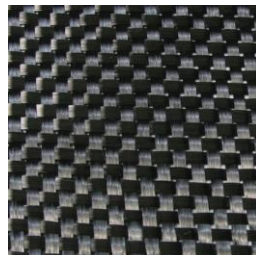
Πλεκτές ταινίες μιας διεύθυνσης έχουν τα tows ή rovings κατά το μήκος, που συγκρατούνται μεταξύ τους με αραιά τοποθετημένα υφάδια από ίνες πολυεστέρα ή γυαλιού, υπό μορφή πολύ λεπτού νήματος (yarn). [1]

#### 1.10.1.2 Υφαντά

Τα ενισχυτικά υφάσματα από ίνες έχουν σημειώσει ιδιαίτερη ανάπτυξη. Οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται είναι οι παρακάτω.

##### 1) Απλή πλέξη (Plain Weave)

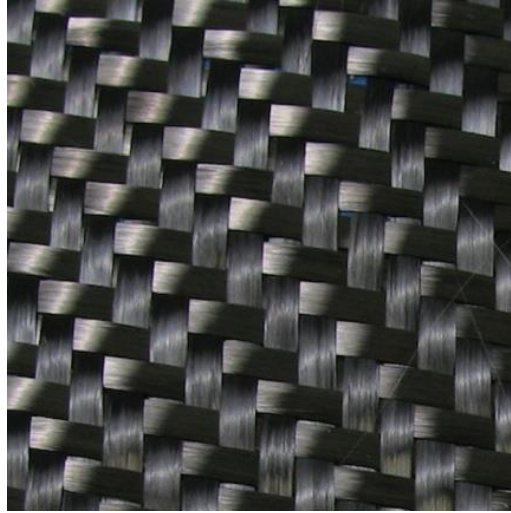
Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος και από τους πιο σταθερούς τύπους πλέξης. Οι διαμήκεις και οι εγκάρσιοι θύσανοι ινών, διασταυρώνονται κάθετα μεταξύ τους και βρίσκονται εναλλάξ η μια ομάδα πάνω από την άλλη.



**Εικόνα 1.10:** Απλή πλέξη (Plain weave). [3]

## 2) Διαγώνια πλέξη (Twill Weave)

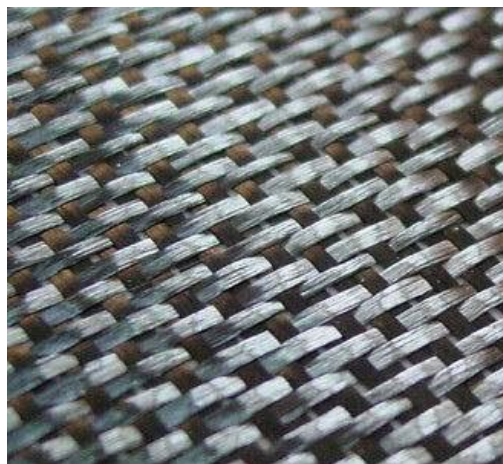
Η διαφορά αυτού του τύπου πλέξης από τον απλό, είναι ότι υπάρχει μεγαλύτερη πυκνότητα ινών ανά μονάδα επιφάνειας, και έχει διαφορετική μορφή σε κάθε όψη του υφάσματος. Χαρακτηρίζεται από μια διαγώνια γραμμή από την οποία φέρει και την ονομασία του (twill).



**Εικόνα 1.11:** Διαγώνια πλέξη (Twill weave). [3]

## 3) Πλέξη Satin

Σε αυτόν τον τύπο πλέξης, η μπροστινή επιφάνεια κυριαρχείται από τις διαμήκεις θυσάνους ινών (warp), ενώ έχει διαφορετική μορφή σε κάθε όψη του υφάσματος. Χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών.

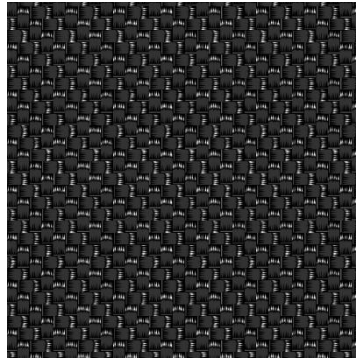


**Εικόνα 1.12:** Πλέξη Satin. [3]

## 4) Καλαθωτή πλέξη (Basket Weave)

Είναι μια παραλλαγή της απλής πλέξης, όπου δύο ή περισσότερες διαμήκεις θύσανοι διασταυρώνονται με δύο ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους ινών. Η πλέξη αυτή είναι

ισχυρότερη από την απλή αλλά λιγότερο σταθερή, εξαιτίας της σχετικής χαλαρότητας που παρουσιάζει.



**Εικόνα 1.13:** Καλαθωτή πλέξη (Basket weave). [3]

#### 5) Πλέξη LENO

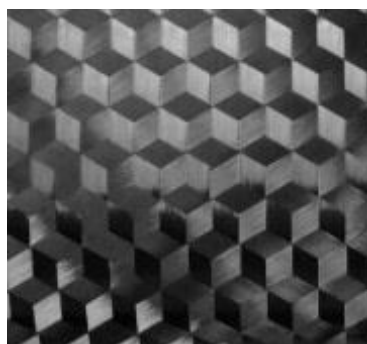
Αυτός ο τύπος πλέξης χαρακτηρίζεται ως μια κλειδωμένη πλέξη, η οποία περιορίζει στο ελάχιστο τη μετατόπιση των θυσάνων.



**Εικόνα 1.14:** Πλέξη LENO. [3]

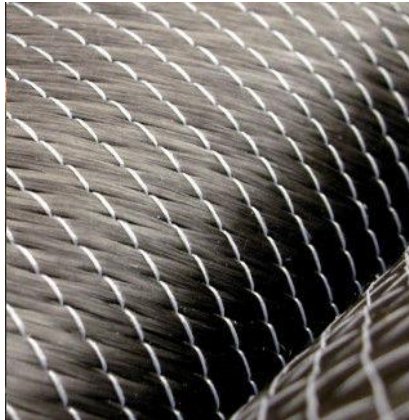
Μερικές επιπλέον πλέξεις είναι οι παρακάτω.

#### 1) Τριφασική πλέξη (Triaxial Weave)



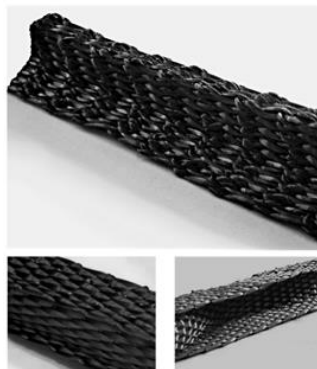
**Εικόνα 1.15:** Τριφασική πλέξη (Triaxial weave). [3]

2) Πολυαξονική πλέξη (Multiaxial Weave)



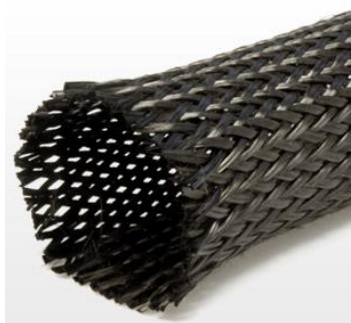
**Εικόνα 1.16:** Πολυαξονική πλέξη (Multiaxial weave). [3]

3) Τρισδιάστατη πλέξη (3D Braiding)



**Εικόνα 1.17:** Τρισδιάστατη πλέξη (3D Braiding). [3]

4) Τύπου σωλήνα (3D Tubing Weave)



**Εικόνα 1.18:** Τύπου σωλήνα (3D Tubing weave). [3]

Σε όλες τις πλέξεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, το κοινό σημείο είναι ότι οι διασταυρώσεις γίνονται στις 90°. Είναι όμως πιθανό να κατασκευάσουμε διαγώνια πλεκτά με κλίση 45° ή 60°. Αν το πλεκτό δημιουργείται από πλέξιμο, μπορεί να παραχθεί ένα ύφασμα στο οποίο τα στημόνια (τέλος) και τα υφάδια (αρχή) είναι ίσα ή παράλληλα χωρίς στρέβλωση, όπως προέρχεται από την ύφανση. Τα νήματα κρατούνται στη θέση τους με πολύ λεπτές πλεξούδες (yarns) από ίνες γυαλιού ή πολυεστερικές ίνες. Αυτού του είδους τα πλεκτά δημιουργούν ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα σύνθετα υλικά εξαιτίας του ότι οι ίνες είναι ευθύγραμμες. [1]

### **1.10.2 Ίνες Άνθρακα**

Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται από δύο υλικά που αποτελούν κατά κάποιο τρόπο τις πρώτες ύλες. Σαν πρώτες ύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως ρητίνη φανικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συνθετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Τα κυριότερα όμως είναι το PAN (πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο. Η παραγωγή κοντών ινών από αέριους υδρογονάνθρακες βρίσκεται σε εξέλιξη. [1]

#### *1.10.2.1 Δομή των ινών άνθρακα*

Οι ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και μέτρο και έχουν διάμετρο 7-8 μm. Αποτελούνται από κρυσταλλίτες γραφίτη τύπου turbo static, που είναι μια αλλοτροπική μορφή του άνθρακα. Μερικά από τα πλεονεκτήματά τους είναι οι υψηλές τιμές δυσκαμψίας, ο υψηλός λόγος αντοχής/βάρους και η χρησιμότητά τους σε συγκεκριμένες κατασκευές όπου απαιτείται μείωση του βάρους. Σε ένα μονοκρυσταλλό άνθρακα τα άτομα C του άνθρακα έχουν εξαγωνική διάταξη σε επίπεδα διατεταγμένα το ένα πάνω στο άλλο. Τα άτομα C σε κάθε επίπεδη στρώση συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς (υψηλό μέτρο Young), ενώ οι επίπεδες στρώσεις συγκρατούνται μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς Van der Waals (χαμηλό μέτρο Young), άρα έχουμε και έντονα ανισότροπες κρυσταλλικές μονάδες.

Για να παρουσιάζουν οι ίνες του άνθρακα υψηλό μέτρο και αντοχή, πρέπει οι επίπεδες στρώσεις του γραφίτη να είναι διατεταγμένες κατά τη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στην πραγματικότητα όμως, οι κρυσταλλικές μονάδες είναι πολύ μικρές, άτακτα διατεταγμένες και παρουσιάζουν ασυνέχειες δομής.

Το μέτρο των ινών άνθρακα εξαρτάται από το βαθμό προσανατολισμού των στρώσεων, ο οποίος εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής των ινών. Αν υπάρξουν ατέλειες στη δομή, τότε έχουμε και κενά αέρα (voids) πολύπλοκου σχήματος που διατάσσονται κατά μήκος της ίνας. Σε αυτά τα κενά συγκεντρώνονται τάσεις με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής της ίνας. Άλλες αδυναμίες που συνδέονται με τον τρόπο κατασκευής των ινών είναι οι επιφανειακές ατέλειες, καθώς και οι μακροκρυσταλλοί. Η διάταξη των επίπεδων στρώσεων κατά τη διατομή της ίνας αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τις εγκάρσιες και διατμητικές ιδιότητες της ίνας. [1, 2]

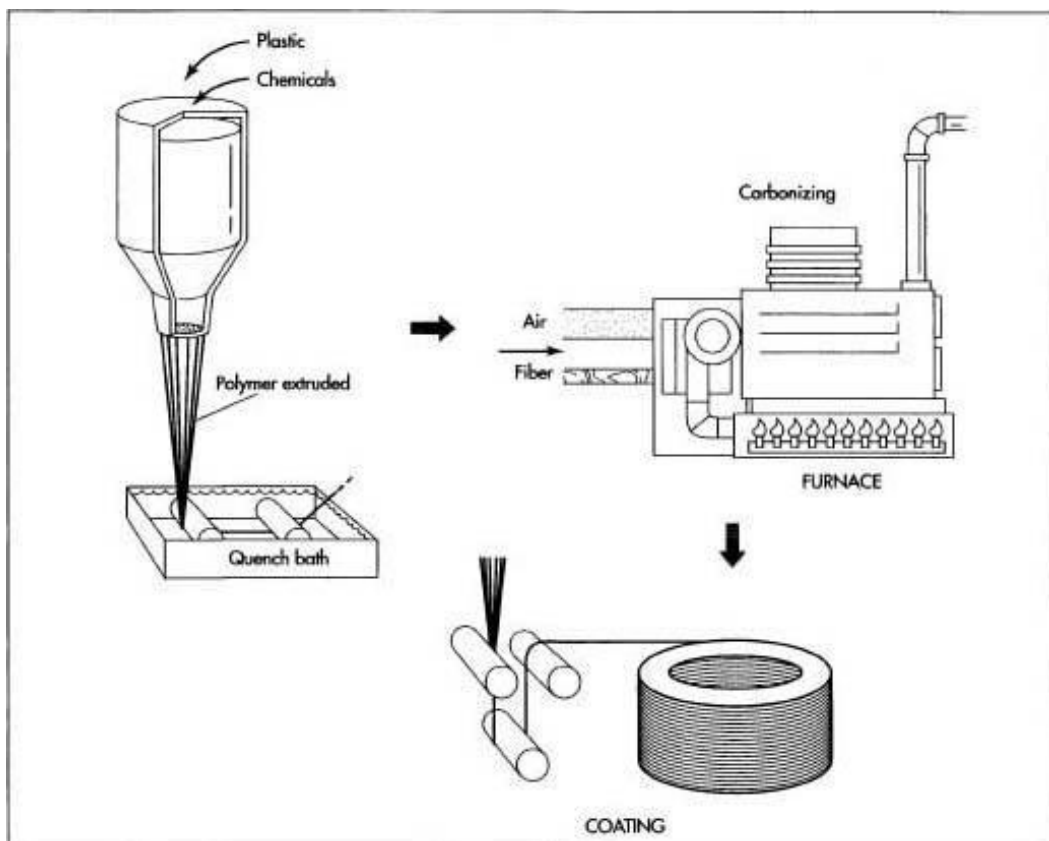
### 1.10.2.2 Παραγωγή των ινών άνθρακα

Οι κύριες μέθοδοι παραγωγής ινών άνθρακα, με το επίπεδο του γραφίτη προσανατολισμένο παράλληλα προς τον άξονα της ίνας, είναι οι ακόλουθες:

#### α) Προσανατολισμός του αρχικού πολυμερούς με προένταση

Σαν αρχικό πολυμερές χρησιμοποιείται το PAN (πολυ-ακρυλο-νιτρίλιο), το οποίο μοιάζει στη δομή με το πολυαιθυλένιο, με τη διαφορά ότι ορισμένα υδρογόνα έχουν αντικατασταθεί με ρίζες κυανίου (-CN). Αρχικά, το PAN με εφελκυσμό μετατρέπεται σε ίνες με την κύρια αλυσίδα προσανατολισμένη κατά τον άξονα των ινών. Στη συνέχεια, οι προεντεταμένες ίνες θερμαίνονται, οπότε οι ενεργές ίνες κυανίου αλληλοεπιδρούν και σχηματίζουν ένα πολυμερές με δομή κλίμακας (ladder polymer) που περιέχει έξι δακτυλίους. Ενώ η ίνα βρίσκεται κάτω από εφελκυστικό φορτίο, θερμαίνεται σε περιβάλλον οξυγόνου που το οδηγεί σε νέα χημική αντίδραση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σταυροειδών δεσμών (cross-links) μεταξύ των μορίων της κλίμακας.

Το οξειδωμένο PAN, με περαιτέρω θέρμανση μετατρέπεται σε γραφίτη του τύπου turbo static. Το μέτρο και η αντοχή των ινών εξαρτάται από την τελική θερμοκρασία επεξεργασίας, που προσδιορίζει το μέγεθος των κρυστάλλων και τον προσανατολισμό τους. Μια παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιεί σαν προγονικό υλικό (precursor) το rayon. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως οξείδωση.



Εικόνα 1.19: Κατασκευή των ινών άνθρακα. [3]

### β) Προσανατολισμός με περιδίνηση

Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην περιδίνηση τηγμένης πίσσας με αποτέλεσμα την παραγωγή ινών. Η πίσσα θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 350°C και μετατρέπεται με πολυμερισμό σε μεσοφασική πίσσα (mesophase pitch), που περιέχει ισότροπο και ανισότροπο (υγρή κρυσταλλική φάση) υλικό. Η τηγμένη πίσσα νηματοποιείται αφού περάσει μέσα από μικρές οπές. Κατά τη φάση αυτή επιτυγχάνεται και ο προσανατολισμός των μορίων. Ανάλογα με τις συνθήκες της νηματοποίησης, επιτυγχάνεται και διαφορετικός βαθμός προσανατολισμού. Στη συνέχεια, τα νήματα οξειδώνονται σε θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας τήξης για να αποφευχθεί η σύντηξη των διαφορετικών στρώσεων των ινών. Τέλος, τα νήματα ανθρακοποιούνται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 2000°C.

Σε μερικά από τα παραπάνω στάδια παραγωγής, απαιτείται ο σύγχρονος εφελκυσμός των ινών, έτσι ώστε να διατηρείται ο επιθυμητός προσανατολισμός και να αποφεύγεται η χαλάρωση. Οι ίνες που παράγονται με τη μέθοδο αυτή χαρακτηρίζονται από κρυστάλλους μεγαλύτερου μεγέθους από τους αντίστοιχους των ινών από PAN. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως πυρόλυση.

### γ) Προσανατολισμός κατά τη γραφίτιοποίηση

Κατά το στάδιο της γραφίτιοποίησης που συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες, οι ίνες που βασίζονται σε PAN, rayon ή πίσσα, μπορούν συγχρόνως να εφελκύνονται με αποτέλεσμα την ολίσθηση των επιπέδων του γραφίτη και τον περαιτέρω προσανατολισμό τους κατά τη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή και ως γραφίτιωση.

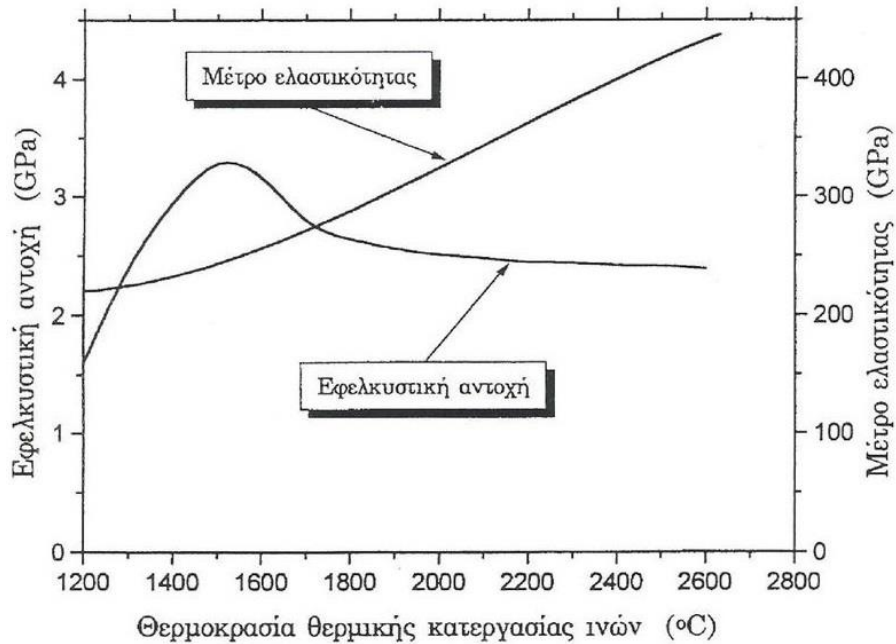
Όλες οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν κάποια βελτίωση. Κάθε μια από αυτές έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τη λειτουργικότητα, το κόστος, την ευκολία κατασκευής και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Με την κατάλληλη επιλογή της μεθόδου, των παραμέτρων στη μέθοδο και του προσανατολισμού των στρώσεων, μπορούμε να επιτύχουμε την κατασκευή ινών με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες που απαιτούνται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι ιδιότητες των ινών άνθρακα που βασίζονται στο PAN (Τύπου 1 και Τύπου 2), καθώς και οι ιδιότητες των ινών γυαλιού (E-glass) και Kevlar. Η μεταβολή της αντοχής και του μέτρου συναρτήσει της τελικής θερμοκρασίας γραφίτιοποίησης, φαίνεται στην Εικόνα 1.20 που βασίζεται στα αποτελέσματα της εργασίας των Watt, Philips και Johnson (1966).



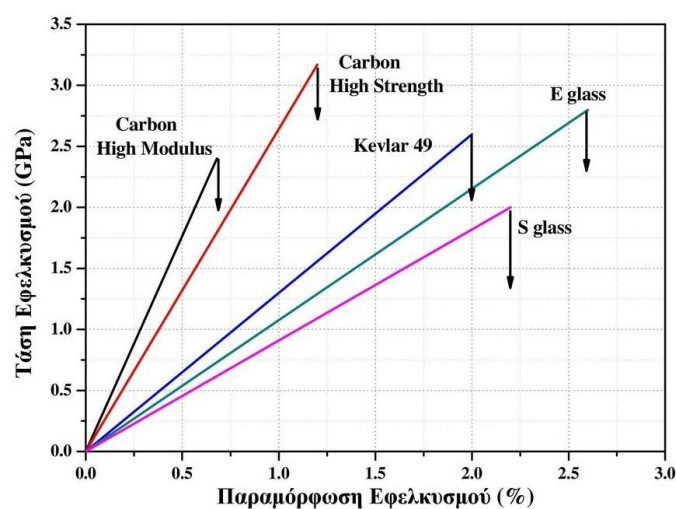
**Πίνακας 7: Ιδιότητες Ινών Άνθρακα, Γυαλιού και Kevlar 49.**

Ιδιότητα	Μονάδες	Carbon TYPE 1	Carbon TYPE 2	E-glass	Kevlar 49
Διάμετρος	μm	7,0 – 9,7	7,6 – 8,6	8 - 14	11,9
Πυκνότητα	10 <sup>3</sup> Kg m <sup>-3</sup>	1,95	1,75	2,56	1,45
Μέτρο E <sub>1</sub> Μέτρο E <sub>2</sub>	GNm <sup>-2</sup>	390 12	250 20	76 76	130 -
Παραμ/ση Θραύσης	%	0,5	1,0	1,8 - 3,2	2,2 - 2,8
Συντ/της Θερμικής Διαστολής	10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	α <sub>1</sub> : -0,5 - 1,2 α <sub>2</sub> : 7-12	-0,1 - -0,5 7-12	4,9 4,9	-2 59
Θερμική Αγωγιμότητα	Wm <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>	105	24	1,04	0,04
Ευκαμψία με βάση την ευκαμψία των ινών Carbon	-	1,00	1,56	1,44	0,59
Αντοχή σε εφελκυσμό	GNm <sup>2</sup>	2,2	2,7	1,4 - 2,5	2,8 - 3,6
Ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας	mm	0,71	0,37	0,12	-



**Εικόνα 1.20:** Επίδραση της θερμοκρασίας γραφίτιποίησης στο μέτρο και την αντοχή των ινών άνθρακα. [3]

Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν τέλεια ελαστική συμπεριφορά σχεδόν μέχρι την τάση θραύσεως. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των ινών άνθρακα Τύπου 1 και Τύπου 2 φαίνονται στην Εικόνα 1.21. Βλέπουμε ότι οι ίνες με υψηλό μέτρο ελαστικότητας  $E$  (ή μέτρο του Young), έχουν μικρότερη παραμόρφωση θραύσης (0,5%) σε αντίθεση με τις ίνες υψηλής αντοχής που παρουσιάζουν παραμόρφωση θραύσης της τάξης του 1%. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική δομή των δύο τύπων ινών.



**Εικόνα 1.21:** Καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  διαφόρων τύπων ινών. Τα κατακόρυφα βέλη αναφέρονται στη θραύση. [3]

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών είναι οι μεγάλες αποκλίσεις τους. Επομένως, πειράματα εφελκυσμού σε μεμονωμένες ίνες δίνουν αποτελέσματα αντοχής που κυμαίνονται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών. Τέτοια πειράματα, έδειξαν ότι η μέση αντοχή των ινών εξαρτάται από το ελεύθερο μήκος του δοκιμίου. [1]

### 1.10.3 Ίνες Γυαλιού

Ένας αριθμός από διαφορετικές συνθέσεις γυαλιού χρησιμοποιείται με συγκεκριμένες διαφορετικές ιδιότητες. Ο τύπος γυαλιού A, είναι υλικό που χρησιμοποιείται για παράθυρα, θεωρείται όμως απαρχαιωμένος για την κατασκευή των ινών. Δύο πλεονεκτήματα του τύπου A είναι το χαμηλό κόστος και η αντίσταση στα οξέα. Η ανάγκη για ειδικές ηλεκτρικές ιδιότητες οδήγησε στην ανάπτυξη του τύπου γυαλιού E, που χρησιμοποιείται σε κελύφη ραντάρ, και έχει σαν πλεονέκτημα την καλή αντίσταση στη δυσκαμψία. Το γυαλί τύπου C, αναπτύχθηκε εξαιτίας της χημικής του αντίστασης. Το τύπου D, αναπτύχθηκε ως ένας βελτιωμένος ηλεκτρικός τύπος για κελύφη ραντάρ. Επιπλέον, το S ή R γυαλί, αμερικανική και ευρωπαϊκή έκδοση αντίστοιχα, αναπτύχθηκε λόγω της υψηλότερης αντοχής και μέτρου σε σχέση με το γυαλί τύπου E για την ενίσχυση των πλαστικών υλικών. Ο τύπος γυαλιού T (Texces), λέγεται ότι έχει 36% υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό, 16% υψηλότερο μέτρο και 40% χαμηλότερη σταθερά χημικής διαστολής από ότι ο τύπος E, χωρίς όμως να υπάρχουν αποτελέσματα από δοκιμές. Οι διάμετροι των νημάτων γυαλιού κυμαίνονται μεταξύ 3μm και 20μm. Όσο μεγαλύτερη η διάμετρος των νημάτων, τόσο αυξάνεται και η παραγωγικότητα.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται από λιωμένο γυαλί εφελκύνοντάς το μέσα από συστήματα οπών, τα οποία έχουν κανονικά 102 ή 204 οπές με μέγιστη ταχύτητα 3000 ως 4000 m/s. Τα νήματα εκτείνονται και μειώνεται η διάμετρός τους. Τα νήματα αυτά ψύχονται πολύ γρήγορα με ακτινοβολία και με αγωγή, πριν επικαλυφθούν με τη ζωική κόλλα, η οποία εμποδίζει την τριβή ανάμεσα στα νήματα όταν τοποθετούνται μαζί για να δημιουργήσουν μια πλεξούδα, και αποτελείται από άμυλο και λιπαντικά φυτικά έλαια. Το σύνολο των ινών τυλίγεται σε έναν κύλινδρο στεγνό και θερμό.

Διάφοροι συνδυασμοί ορυκτών γυαλιών έχουν δοκιμαστεί για την κατασκευή ινών. Ο πιο κοινός τύπος ινών γυαλιού βασίζεται στο διοξείδιο του πυριτίου –silica- ( $\text{SiO}_2$ ), με προσθήκη οξειδίων του ασβεστίου, βορίου, νατρίου, σιδήρου και αλουμινίου. Τα γυαλιά αυτά είναι συνήθως άμορφα, ενώ αν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα αποκτούν κάποια κρυσταλλικότητα. Αυτό οδηγεί σε κάποια μείωση της αντοχής τους. Τρεις τύποι ινών γυαλιού είναι:

#### 1) Ο τύπος E (E-glass, E for electrical).

Είναι ο πιο κοινός τύπος γυαλιού που χρησιμοποιείται, έχει μεγάλη αντοχή και μέτρο, αντοχή στη δυσκαμψία, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες.

### 2) Ο τύπος C (C-glass, C for corrosion).

Είναι πιο ανθεκτικός στη χημική διάβρωση σε σχέση με τον τύπο E, πιο ακριβός και χαρακτηρίζεται από μικρότερη αντοχή. Ακόμη έχει σχεδόν την ίδια πυκνότητα με αυτή του τύπου E και μεγαλύτερη θερμοκρασία τήξης.

### 3) Ο τύπος S (S-glass, S for stiffness).

Είναι πιο ακριβός από τον τύπο E αλλά έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, υψηλότερη δυσκαμψία και αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από όλους τους υπόλοιπους τύπους γυαλιών, και χρησιμοποιείται αρκετά στην κατασκευή τμημάτων των αεροσκαφών, όπου το υψηλό τους κόστος αντισταθμίζεται από το υψηλό μέτρο ελαστικότητας.

Η αντοχή και το μέτρο του γυαλιού, καθορίζεται από την τρισδιάστατη δομή των οξειδίων από τα οποία συνίσταται. Σε αντίθεση με τις ίνες άνθρακα και Kevlar 49, οι ιδιότητες των ινών γυαλιού είναι ισότροπες, έτσι ώστε το μέτρο ελαστικότητας, για παράδειγμα, κατά μήκος και εγκάρσια προς τον άξονα της ίνας να είναι το ίδιο.

Η αντοχή των ινών, εξαρτάται από τις συνθήκες παραγωγής τους και το περιβάλλον ελέγχου. Ίνες που μόλις έχουν παρασκευασθεί και όπου έχουν ληφθεί όλα τα μέτρα προστασίας τους κατά την παρασκευή τους, έχουν αντοχή  $3,5 \text{ GNm}^{-2}$  και η διασπορά της αντοχής τους είναι πολύ μικρή. Η αντοχή τους ελαττώνεται όταν ελέγχονται σε υγρό περιβάλλον, λόγω της απορρόφησης υγρασίας από την επιφάνειά τους. Η επίδραση του περιβάλλοντος είναι ακόμη μεγαλύτερη όταν οι ίνες έρχονται σε επαφή με οξέα. Η αντοχή και το μέτρο εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και οι ίνες υπόκεινται σε στατική κόπωση.

Κατά την παραγωγή των ινών, και ιδιαίτερα στο στάδιο της περιέλιξής τους πάνω στο τύμπανο, οι ίνες υφίστανται τις περισσότερες βλάβες οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν την αντοχή τους. Αυτό αποφεύγεται με την επικάλυψή τους με ειδικό επικαλυπτικό (size coating) στα πρώτα στάδια της παρασκευής τους. Οι υπόλοιπες βλάβες που δεν μπορούν να αποφευχθούν, συμβαίνουν τυχαία κατά μήκος της ίνας και οδηγούν σε διασπορά της αντοχής, που εξαρτάται από το ελεύθερο μήκος των ινών.

Οι μηχανικές βλάβες είναι υπό τη μορφή επιφανειακών μικρορωγμών. Η επικάλυψη των ινών εφαρμόζεται επιδερμικά με sragay που περιέχει νερό και γαλάκτωμα πολυμερούς. Το είδος του επικαλυπτικού, εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν οι ίνες και εξυπηρετεί σκοπούς όπως προφύλαξη επιφάνειας των ινών από φθορά, σύνδεση των ινών μεταξύ τους, λίπανση ινών για αντοχή σε τάνυση, αύξηση πρόσφυσης ινών στη μήτρα και ότι οι ίνες αποκτούν μη στατικές ιδιότητες. [1]

#### **1.10.4 Οργανικές Ίνες**

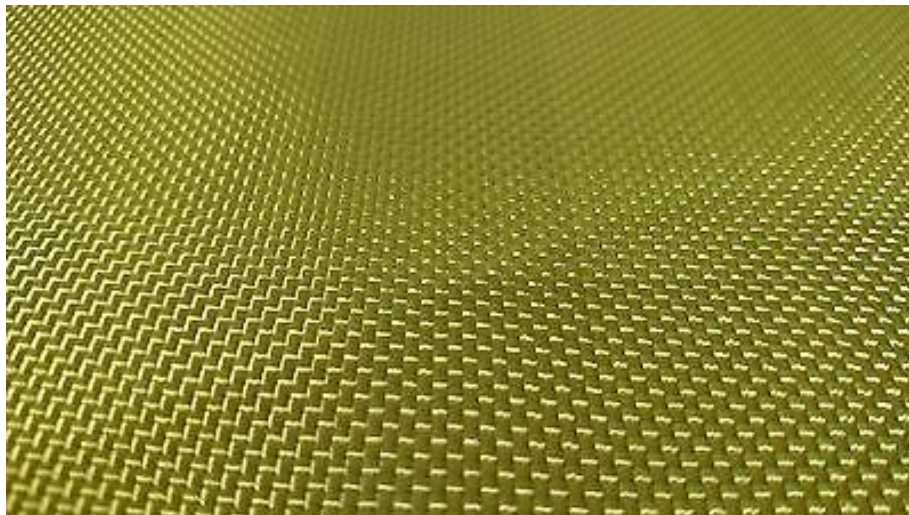
Μια νέα και σημαντική τάξη ινών, είναι αυτή που βασίζεται σε υψηλής αντοχής και μέτρου πολυμερικών ινών, που προκύπτουν από πλήρως προσανατολισμένα μέρη. Τέτοιες ίνες αναφέρονται παρακάτω. [1]

#### 1.10.4.1 Ίνες αρωματικού πολυαμιδίου

Είναι γνωστή με την ονομασία Kevlar, και είναι η πιο επιτυχής οργανική ίνα που έχει παρασκευαστεί βιομηχανικά. Ένα πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό ειδικό τους βάρος, και ένα μειονέκτημα είναι η δυσκολία στη μηχανική τους κατεργασία. Δεν υπάρχουν λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο παρασκευής τους, αλλά βασίζονται στο πολυ-παραβενζαμίδιο, και έχουν μέτρο Young ίσο με  $130 \text{ GNm}^2$ . Οι δύο τύποι ινών που υπάρχουν είναι το Kevlar 29 και το Kevlar 49 (ή αλλιώς PDR 49), το οποίο έχει υψηλή αντοχή και μέτριο μέτρο ελαστικότητας. Το Kevlar 29, συναντάται σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως καλώδια αντικατάστασης αμιάντου, επένδυση φρένων και πανοπλίες σε αμαξώματα. Το Kevlar 49 έχει υψηλό συντελεστή που χρησιμοποιείται σε προϊόντα καλωδίων και σχοινιών. Το Kevlar 49 έχει υψηλότερο μέτρο αλλά ίδια αντοχή με το Kevlar 29, και είναι το πλέον κατάλληλο για την ενίσχυση των σύνθετων υλικών.

Η δομή των ινών είναι ακτινικής μορφής. Ίνες με αυτή τη δομή παρουσιάζουν χαμηλό μέτρο διάτμησης κατά τη διεύθυνση του άξονα των ινών, ενώ οι εγκάρσιες ιδιότητές τους δεν είναι καλές. Τα αρωματικά πολυαμίδια είναι ανθεκτικά στη θερμότητα δεδομένου ότι είναι οργανικά πολυμερή.

Οι ίνες αρωματικού πολυαμιδίου είναι δύο ειδών. Βασίζονται στο ίδιο οργανικό μόριο, αλλά ο διαχωρισμός γίνεται με βάση την τοποθέτηση των ατόμων στο μόριο. Επομένως, έχουμε το Nomex που είναι σε μορφή κερήθρας και χρησιμοποιείται κυρίως στα πατώματα των αεροπλάνων, και τις ίνες para-aramid οι οποίες είναι διαθέσιμες από πολλούς κατασκευαστές και χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο του Young. Μαζί συνθέτουν το ύφασμα αραμιδίου 1414. Στον Πίνακα 8 φαίνονται οι διάφοροι τύποι ινών Kevlar που είναι διαθέσιμοι. [1,2]



**Εικόνα 1.22:** K-29 Para-Aramid Synthetic Fabric Coated. [3]

**Πίνακας 8:** Οι εμπορικοί τύποι ινών Kevlar.

Κατασκευαστής και εμπορική ονομασία	Μέτρο σε εφελκυσμό (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
Dupont: Kevlar 49	12	3,6
Kevlar 29	58	3,6
Kevlar RI	58	3,6
Enka: Twaron HM	121	3,15
Twaron	80	3,15
Teijin: Technora	70	3,01

#### 1.10.4.2 Ίνες πολυαιθυλενίου

Τα μακρομόριά τους είναι σχεδόν παράλληλα μεταξύ τους. Θεωρητικά οι ίνες αυτές πρέπει να έχουν ένα μέτρο ελαστικότητας της τάξης των  $220 \text{ Gm}^{-2}$ , τεχνικά όμως είναι αδύνατον να υπάρξει πλήρης προσανατολισμός των ινών. Το 1980, ο Ward παρήγαγε ίνες πολυαιθυλενίου με μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $60 \text{ Gm}^{-2}$  και αντοχή σε εφελκυσμό  $1,3 \text{ Gm}^{-2}$ . Ο προσανατολισμός των μακρομορίων επιτυγχάνεται κατά τον εφελκυσμό του πολυαιθυλενίου. Όπως και στις ίνες του άνθρακα, έτσι και σε αυτές τις ίνες το μέτρο του Young κατά το μήκος των ινών είναι μεγαλύτερο από εκείνο εγκάρσια του άξονα των ινών. Υψηλής αντοχής ίνες μπορούν να κατασκευαστούν από πολυαιθυλένιο με δύο διαδικασίες. Ένα ειδικό πολυμερές μεσαίου μοριακού βάρους μπορεί να εξωθηθεί και μετά να τανυστεί ή ένα πολυμερές πολύ υψηλού μοριακού βάρους μπορεί να διαλυθεί σε ένα διάλυμα παίρνοντας την τιμή gel και να φυγοκεντριστεί.

Το μειονέκτημα των ινών πολυαιθυλενίου είναι το σημείο τήξης τους, στους  $150^\circ\text{C}$ . Οι αρχικές εφαρμογές των ινών πολυαιθυλενίου ήταν σε σχοινιά και σε πανιά ιστιοπλοϊκών. Όμως σύνθετα υλικά με εποξειδικές ρητίνες που δοκιμάστηκαν με ίνες πολυαιθυλενίου, βρέθηκε ότι έχουν καλή αντίσταση σε κρούση και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Τα υβριδικά σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα σε εποξειδικές ρητίνες είναι υπό έρευνα. [1]

#### 1.10.5 Ίνες Βορίου

Τα νήματα βορίου δεν μοιάζουν καθόλου με τα υπόλοιπα ενισχυτικά. Παράγονται ως μονά νήματα μεγάλης διαμέτρου. Κάθε νήμα αποτελείται από ένα πυρήνα, είτε από σύρμα τανγκοτενίου είτε από ένα άνθρακα και μια λεπτή στρώση από βόριο. Το βόριο και ο άνθρακας επιλέχθηκαν ως υλικά για την παραγωγή ινών, εξαιτίας του ότι είναι τα δύο πιο ελαφρά στερεά, και είναι πρακτικά στη χρήση τους. Οι συγκεκριμένες ίνες έχουν πολύ μεγάλο κόστος, που πολλές φορές ξεπερνάει και αυτό των περισσότερων ινών άνθρακα.

Μεγάλα ποσά από prepregs βορίου χρησιμοποιήθηκαν το 1970 στους σταθεροποιητές των αεροσκαφών F-14 και F-15, στο φτερό του αεροσκάφους F-111, και σε τμήματα του αεροσκάφους B-1. Μερικές επιπλέον ίνες είναι ίνες χαλαζία, ίνες αμιάντου, ίνες πυριτίου, ίνες αλουμίνιας, ίνες από αλουμίνα-βόριο-πυρίτιο, ίνες φωσφόρου, μεταλλικές ίνες. [1]

#### 1.10.6 Κενά

Ανεξάρτητα από τον τύπο της ρητίνης, της ίνας και τυχόν επικάλυψη των ινών, η διαστρωματική διατμητική αντοχή (interlaminar shear strength) ενός σύνθετου υλικού μειώνεται κατά 7% για κάθε 1% περιεκτικότητα του σύνθετου σε κενά και αυτό συνεχίζει μέχρι το ποσοστό των 4% σε κενά. Επειδή και οι υπόλοιπες ιδιότητες επηρεάζονται από την ύπαρξη των κενών, είναι απαραίτητο να εξετασθεί ο τύπος των κενών, η περιεκτικότητά τους και οι λόγοι που αυτά εμφανίζονται.

Εκτός από τα μεγάλα κενά που δημιουργούνται κατά τη φάση της παραγωγής των σύνθετων υλικών, οι βασικοί τύποι κενών που αναπτύσσονται στα σύνθετα είναι:

1) Κενά που αναπτύσσονται κατά μήκος της επιφάνειας των ινών, και μπορεί να είναι σφαιρικά ή ελλειψοειδή. Η διάμετρός τους εξαρτάται από τη σχετική απόσταση των ινών και κυμαίνεται στα 5-20 μm.

2) Κενά που αναπτύσσονται μεταξύ των στρώσεων και σε περιοχές πλούσιες σε ρητίνη.

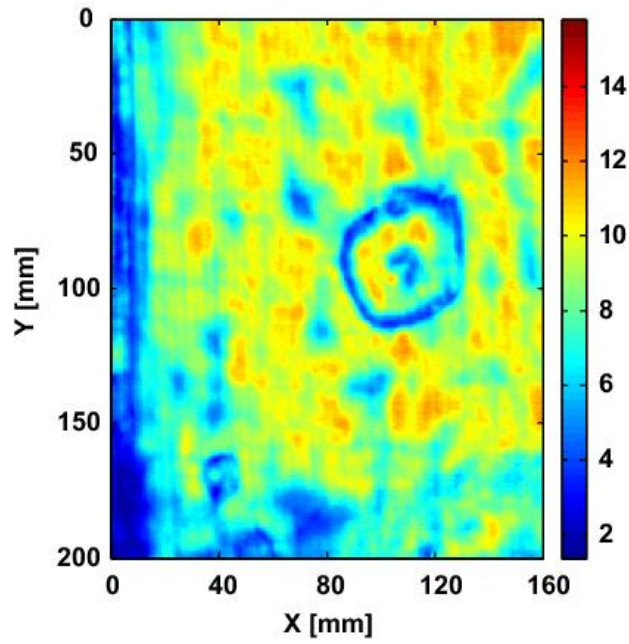
Τα κενά αναπτύσσονται κατά τη φάση παραγωγής των σύνθετων υλικών, λόγω της κακής διαβροχής των ινών από τη ρητίνη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό αέρα, το οποίο συμβαίνει σε συστήματα όπου οι ξηρές ίνες βρίσκονται πολύ κοντά ή μια στην άλλη και το ιξώδες της ρητίνης είναι πολύ υψηλό. Ένας άλλος λόγος είναι η παρουσία πτητικών αερίων, που παράγονται κυρίως στο στάδιο της τήξης στις θερμοπλαστικές μήτρες. Τα πτητικά μπορεί να είναι κατάλοιπα διαλυτών, προϊόντων χημικών αντιδράσεων ή κλάσματα μικρού μοριακού βάρους.

Η περιεκτικότητα σε κενά και η κατανομή τους εξαρτώνται από την κατά όγκο περιεκτικότητα των ινών, την κατανομή των ινών, τις ιδιότητες της ρητίνης (μήτρας) και τις συνθήκες παραγωγής, δηλαδή θερμοκρασία, πίεση και χρόνος. Τα κενά μπορούμε να τα μελετήσουμε με τους εξής τρόπους:

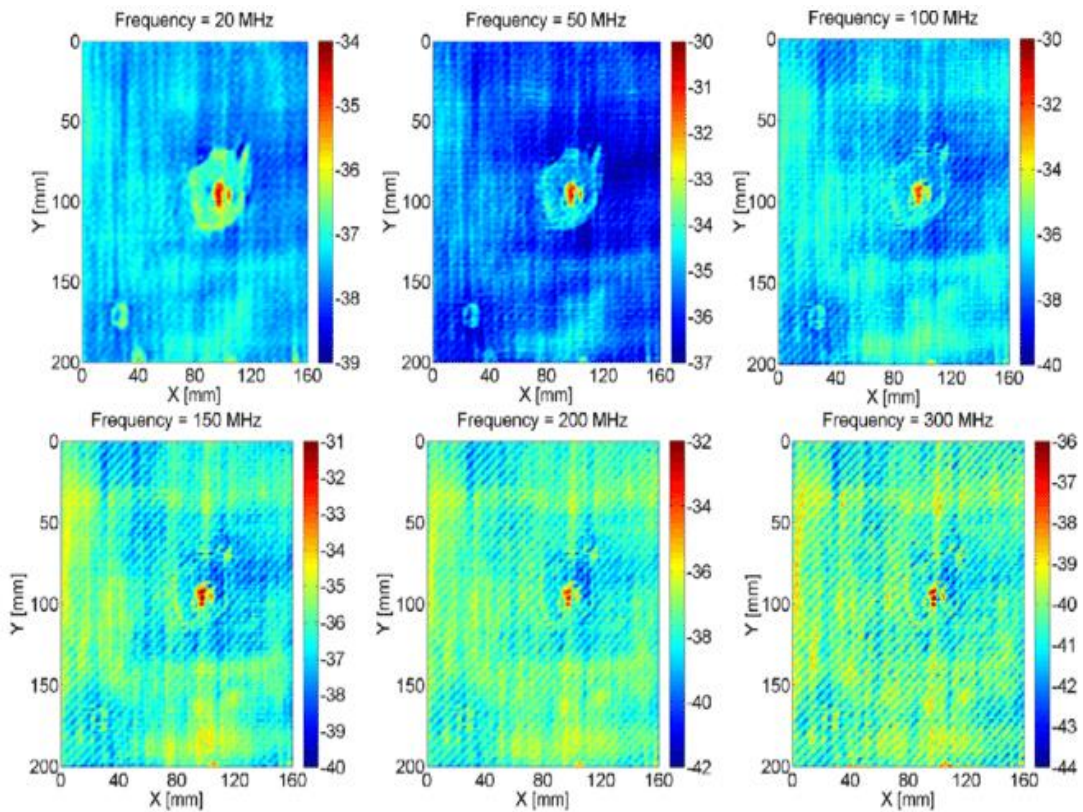
α) Με πραγματοποίηση ποσοτικής ανάλυσης σε μικροφωτογραφίες, που έχουν ληφθεί από διάφορα σημεία του σύνθετου. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μεγάλο αριθμό δοκιμών.

β) Με μέτρηση της πυκνότητας.

γ) Με υπέρηχους (ultrasonic scanning technique, C-scan). Είναι μια μέθοδος μη-καταστροφικού ελέγχου, με τη βοήθεια της οποίας μπορούν να εντοπιστούν κενά και αποκολλήσεις στρώσεων στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Το δοκίμιο σαρώνεται από υπερηχητικό παλμό και μετράται η απόκριση του υλικού. Η πληροφορία επεξεργάζεται και καταγράφεται σε δισδιάστατη εικόνα. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον ποιοτικό έλεγχο των φύλλων των σύνθετων υλικών. [1]

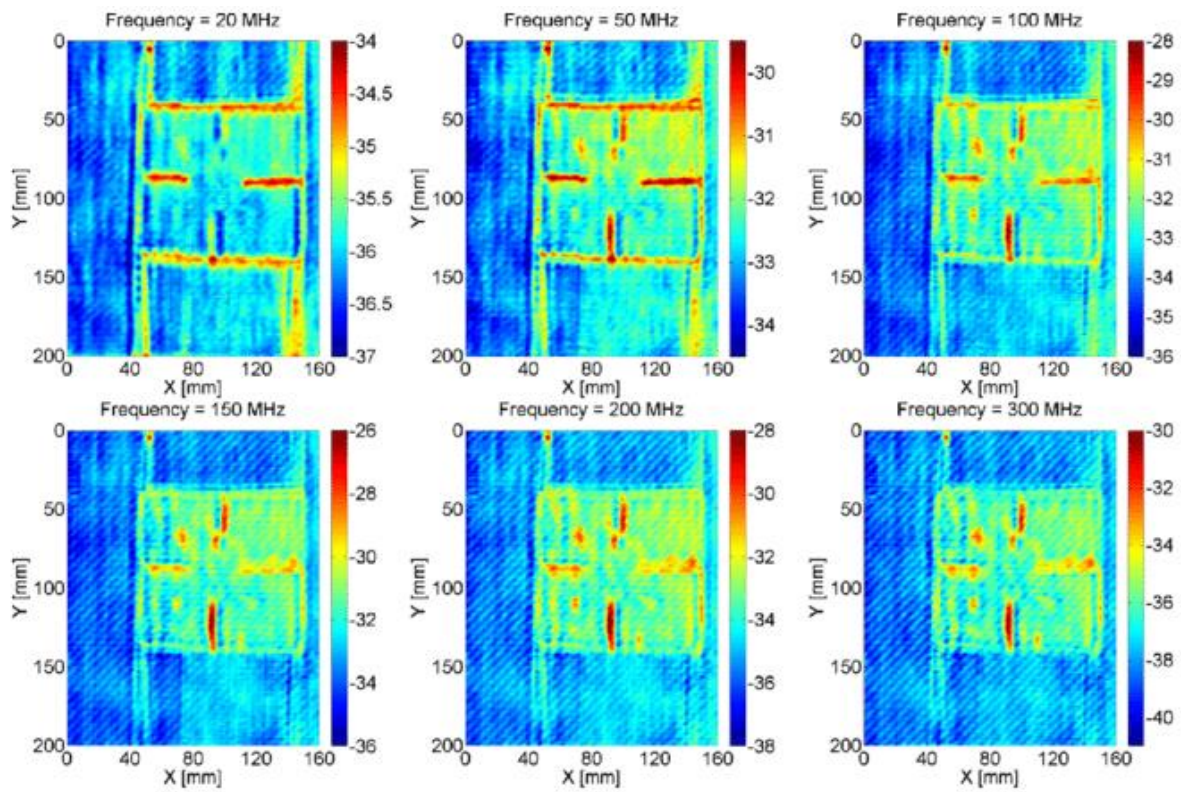


**Εικόνα 1.23:** Ultrasonic C-scan of a CFRP composite sample with holes. [3]



**Εικόνα 1.24:** C-scans obtained at various frequencies for a CFRP composite sample with holes. [3]





**Εικόνα 1.25:** C-scans-obtained-at-various-frequencies-for-a-CFRP-composite-sample-with-cracks. [3]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών

Ένα κύριο πρόβλημα των ερευνητών στα σύνθετα υλικά και των κατασκευαστών σε βιομηχανικό επίπεδο, είναι η κατασκευή αυτών των υλικών από άποψη εφαρμογών και περιθωρίων κέρδους. Η βιομηχανία των σύνθετων υλικών ανέπτυξε με βάση τις παραδοσιακές μεθόδους μορφοποίησης των μετάλλων, νέες μεθόδους για την κατασκευή τους. Υπάρχει έτσι η μέθοδος μορφοποίησης εν θερμώ με πρέσα (Compression Molding), η τεχνική περιέλιξης ινών (Filament winding) και άλλες. Παρακάτω, θα παρουσιαστούν οι κυριότερες μέθοδοι που εφαρμόζονται για την κατασκευή σύνθετων υλικών. [1]

#### 2.1 Μέθοδοι μορφοποίησης (Lay Up Techniques)

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της μεθόδου κατασκευής τους ανάλογα με τις τελικές επιθυμητές τους ιδιότητες. Σύμφωνα με το σχήμα, την αντοχή, το μέγεθος και την ποσότητα παραγωγής επιλέγεται και η μέθοδος με την οποία συνδυάζονται και μπαίνουν στο καλούπι τα βασικά δομικά τους στοιχεία. Αντίθετα με τα συνηθισμένα εξαρτήματα που έχουν κατασκευαστεί από υλικά όπως χάλυβας, ξύλο και άλλα, που βάζονται μετά την κατασκευή τους για φινίρισμα της εξωτερικής επιφάνειας, στην περίπτωση των σύνθετων υλικών, το φινίρισμα αυτό αποκτάται με τα βασικά τους στοιχεία να μπαίνουν στο καλούπι μέσω ειδικών επιστρώσεων εποξειδικών ρητινών (gel coatings). Ο έλεγχος των τελικών ιδιοτήτων του υλικού, επιτυγχάνεται με την αλλαγή των παραμέτρων αναλογία ρητίνης/ίνες, τύπος και προσανατολισμός της ενίσχυσης με ίνες, χρήση εσωτερικών ενισχύσεων. [1]

##### 2.1.1 Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay Up)

Σε αυτή την περίπτωση, στρώνεται με τη χρήση ρολού η θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη στα στρώματα των ινών, που είναι ύφασμα μακρών ινών (woven roving cloth) ή κοντών ινών τυχαίας διεύθυνσης (strand mat), για ομοιομορφία και αφαίρεση τυχόν παγιδευμένου αέρα.

Αυτή η διαδικασία απαιτεί αρχικά μια προετοιμασία του καλουπιού στο οποίο θα γίνει η μορφοποίηση. Η προετοιμασία αυτή είναι απαραίτητη, για να μην κολλήσει το κατασκευαζόμενο εξάρτημα πάνω στο καλούπι κατά τη μορφοποίηση. Έτσι το καλούπι καλύπτεται με ένα ειδικό αντικολλητικό υλικό (release material). Στον Πίνακα 9, παρουσιάζεται η ποικιλία των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αντικολλητικά. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού, γίνεται ανάλογα με την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας που θέλουμε να προκύψει, και το αν θα ακολουθήσει αργότερα άλλη επιφανειακή κατεργασία.

Το επόμενο βήμα, είναι η επικάλυψη του καλουπιού με ένα φύλλο μη ενισχυμένου πολυμερούς, που θα αποτελέσει και την εξωτερική επιφάνεια του κομματιού μετά το τέλος

της διαδικασίας μορφοποίησης. Το πολυμερές φύλλο είναι δυνατόν να είναι σε στερεή μορφή φιλμ, να ψεκαστεί πάνω στο καλούπι, ή να αποχυθεί πάνω σε αυτό. Μετά, ακολουθεί κάποιος έλεγχος για να διαπιστωθεί αν η επίστρωση του gel coating έγινε ομοιόμορφα. Ο έλεγχος είναι καθοριστικός για την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας του εξαρτήματος.

Στη συνέχεια, ετοιμάζεται η ενίσχυση του σύνθετου υλικού. Η ενίσχυση είναι σε μορφή υφάσματος πλεγμένων ινών (woven roving) ή πανιού κοντών ινών τυχαίας διεύθυνσης (strand mat). Το ύφασμα κόβεται στο ανάλογο μέγεθος του καλουπιού και επιστρώνεται σε αυτό, και ύστερα αναμιγνύεται η ρητίνη με τον απαραίτητο καταλύτη για το curing. Το συγκεκριμένο μίγμα μπορεί να απλωθεί στο καλούπι κατευθείαν, ή να ψεκαστεί με πιστόλι αέρα που αναμιγνύει ρητίνη και καταλύτη. Κατά την επίστρωση του καλουπιού με το μίγμα ρητίνη-καταλύτη, γίνεται και στρώσιμο με ρολά για να ομογενοποιηθεί η κατασκευή και για να διαπεράσει το μίγμα την ενίσχυση, και επίσης για να φύγει ο παγιδευμένος αέρας που υπάρχει στο πανί. Αν ο κατασκευαστής θέλει να επιτύχει αντοχή στη διάβρωση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ειδική ρητίνη και το πρώτο επιφανειακό φύλλο να είναι πλούσιο σε ρητίνη. Τέλος, γίνεται το curing της ρητίνης και μετά ακολουθούν 3 βασικοί έλεγχοι στην κατασκευή οι οποίοι είναι:

1) Ειδικός οπτικός έλεγχος: Χρησιμοποιείται φως ώστε να διαπιστωθούν τυχόν ανομοιομορφίες, κενά με αέρα, εσωτερικές ρωγμές.

2) Επιφανειακός έλεγχος: Εξετάζεται η επιφάνεια του υλικού για να διαπιστωθεί η ύπαρξη ινών που δεν καλύπτονται από τη ρητίνη.

3) Έλεγχος διατομής: Διαπιστώνεται η ανομοιομορφία (εφόσον υπάρχει) της κατασκευής ως προς το πάχος της.

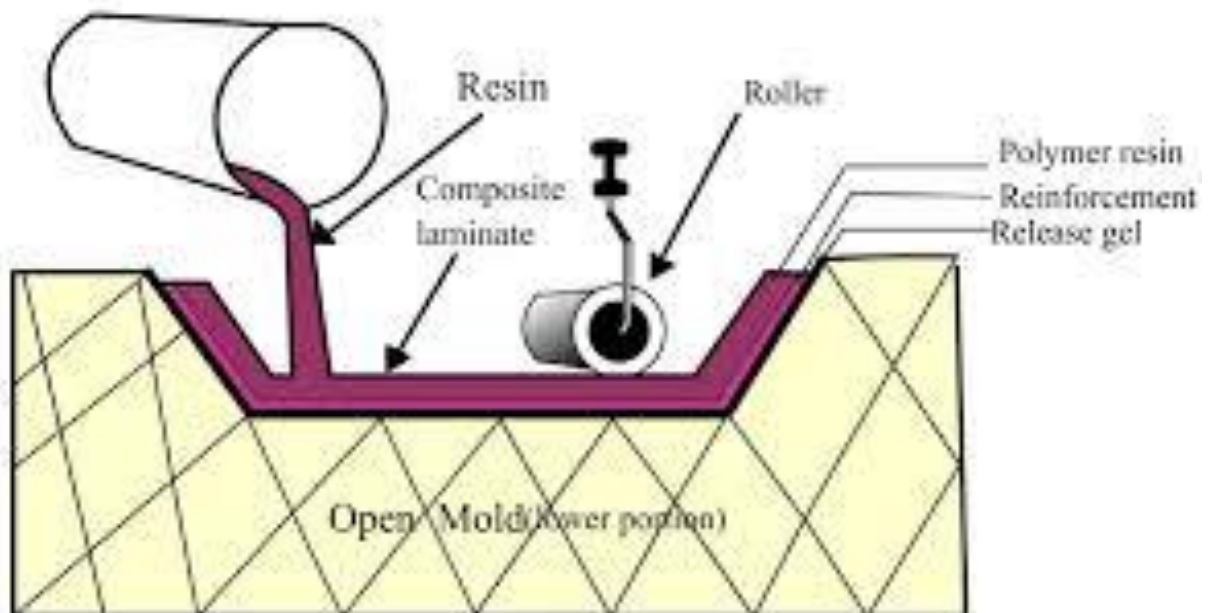
Το ελάχιστο πάχος για τη μέθοδο μορφοποίησης με επίστρωση με το χέρι είναι 0,8mm. Στην Εικόνα 2.1 φαίνεται η διαδικασία της επίστρωσης με το χέρι. [1]

**Πίνακας 9:** Αντικολλητικές Επιστρώσεις.

<b>Είδος Αντικολλητικού Υλικού</b>	<b>Μορφή</b>	<b>Χαρακτηριστικά</b>
Κερί	Ρευστή ή Ημίρρευστη μορφή	Πολύ καλό Γυάλισμα Καλή μεταφορά λεπτομερειών Πολλαπλές χρήσεις
PVA	Υγρό (ψεκάζεται συνήθως)	Υδατοδιαλυτό μιας χρήσης Δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας Άριστη αντικολλητικότητα
Φθοράνθρακες, Σιλάνια, Σιλκόνες	Υγρό ή Σπρέι	Υψηλό κόστος Μέτριο γυάλισμα επιφάνειας

Αντικολλητικά φιλμ, χαρτιά	Επικαλυμμένο χαρτί, σελοφάν, ΡVΑ φιλμ	Μιας χρήσης Απλά καλούπια
Εσωτερικής χρήσης Αντικολλητικές ουσίες (Internal Releases)	Υγρό (αναμιγνύεται με το gel επικάλυψης)	Άριστο γυάλισμα Καλή μεταφορά λεπτομερειών Δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας Δεν χρειάζεται επικύρωση του καλουπιού

### Hand Lay-Up



**Εικόνα 2.1:** Διαδικασία επίστρωσης με το χέρι (Hand Lay Up). [3]

#### 2.1.2 Επίστρωση με ψεκασμό των ινών (Spray Up Technique)

Εδώ έχουμε την προώθηση κοντών ινών μαζί με τη ρητίνη ή και ξεχωριστά προς την επιφάνεια του καλουπιού. Ο έλεγχος των τελικών ιδιοτήτων του υλικού, επιτυγχάνεται με την αλλαγή των παραμέτρων αναλογία ρητίνης/ίνες, τύπος και προσανατολισμός της ενίσχυσης με ίνες, χρήση εσωτερικών ενισχύσεων. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι και αυτή μια διαδικασία επίστρωσης του σύνθετου σε καλούπι, με τη διαφορά ότι γίνεται με τη βοήθεια ειδικού ψεκαστήρα και όχι πιστολιού όπως στην προηγούμενη τεχνική με το χέρι. Οι ίνες κόβονται σε μικρά μεγέθη και δεν είναι σε μορφή πανιού.

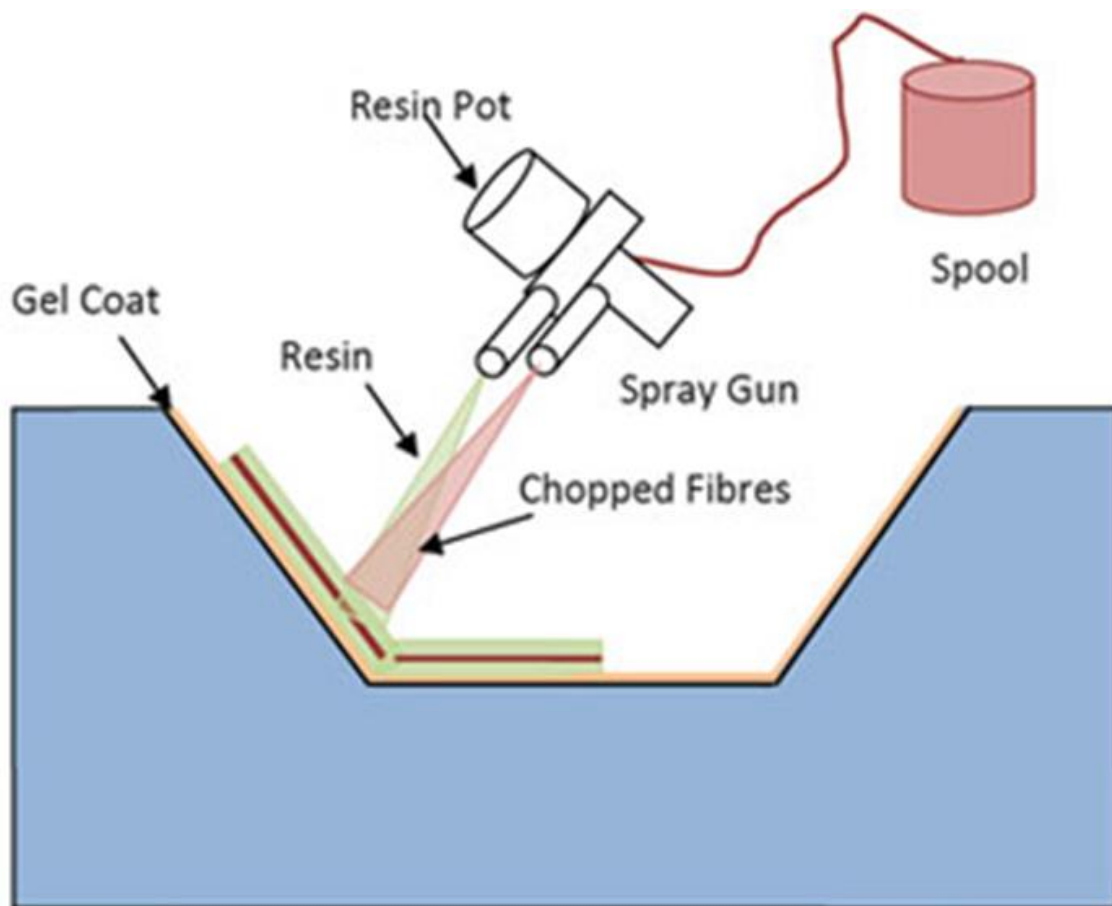
Αρχικά, γίνεται προετοιμασία του καλουπιού με επίστρωση αντικολλητικού coating και του αρχικού φύλλου πολυμερούς. Η διαδικασία από αυτό το σημείο και έπειτα είναι

ακριβώς η ίδια με τη hand lay up. Η πρώτη ύλη αποτελείται από τη ρητίνη του πολυμερούς και τις ίνες που είναι τυλιγμένες σε κάποιο γονίng, όπως οι κλωστές σε συνεχή μορφή. Στη συνέχεια, οι κοντές ίνες κόβονται με τη βοήθεια μηχανικού κόφτη (chopper). Αφού κοπούν οι ίνες, ψεκάζονται ταυτόχρονα μαζί με τη ρητίνη στην επιφάνεια του καλούπιού. Οι τρόποι ψεκασμού της ρητίνης στο καλούπι είναι:

α) Να υπάρχουν στο ψεκαστικό σύστημα δύο ακροφύσια, εκ των οποίων το πρώτο ψεκάζει ρητίνη αναμεμειγμένη με καταλύτη και το άλλο ρητίνη με προωθητικό (promoter).

β) Να υπάρχει στο ψεκαστικό σύστημα μόνο ένα ακροφύσιο, που ψεκάζει ρητίνη με καταλύτη, τα οποία έχουν αναμειχθεί σε ειδικό θάλαμο προ ανάμειξης.

Όπως συμβαίνει και στην επίστρωση με το χέρι, έτσι και εδώ η διαδικασία μορφοποίησης τελειώνει με τη συμπίεση του εξαρτήματος με ρολά για να ομογενοποιηθεί και να απομακρυνθεί ο αέρας. Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται η διαδικασία της επίστρωσης με ψεκασμό ινών.



**Εικόνα 2.2:** Επίστρωση με ψεκασμό ινών. [3]

Για τη μορφοποίηση με ψεκασμό ινών απαιτείται ένας ειδικός εξοπλισμός ο οποίος αποτελείται από:

α) Πιεστικά δοχεία (pots) για τον καταλύτη και τα άλλα διαλύματα.

β) Κόφτες για τις ίνες (choppers).

γ) Ακροφύσια ψεκασμού.

δ) Αγωγοί μεταφοράς υλικών στα ακροφύσια. Κατασκευάζονται συνήθως από υλικά όπως Teflon, Viton, PVF για αντοχή στη διάβρωση και στην υψηλή πίεση των υλικών.

ε) Αντλίες για τη ρητίνη και τον καταλύτη. Είναι συνήθως αντλίες με ελεγχόμενη παροχή από ειδικούς ενσωματωμένους ρυθμιστές.

Οι ίνες κόβονται σε μήκη 12-50mm από τους κόφτες. Οι κόφτες συνήθως είναι δύο κύλινδροι, ο ένας από αλουμίνιο και ο άλλος από ελαστικό, πάνω στους οποίους προσαρμόζονται οι λεπίδες που κόβουν τις ίνες. Για τα ψεκαστικά πιστόλια, υπάρχουν τέσσερις τύποι ανάλογα με το αν γίνεται χρήση αέρα για την εξώθηση του καταλύτη ή όχι, και τον τύπο της μίξης ρητίνης-καταλύτη (εσωτερική-εξωτερική). Οι τύποι αυτοί είναι:

α) Ψεκαστικό σύστημα εξωτερικής μίξης

β) Σύστημα με εσωτερική μίξη και χρήση αέρα

γ) Σύστημα με εσωτερική μίξη χωρίς αέρα

δ) Σύστημα ψεκασμού δύο δοχείων χωρίς αέρα [1]

## 2.2 Χαρακτηριστικά μεθόδων επίστρωσης

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με επίστρωση του καλουπιού έχουν κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα (είτε μιλάμε για την επίστρωση με το χέρι είτε με ψεκασμό), που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη χρήση τους. Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των μεθόδων.

Στις διαδικασίες επίστρωσης είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψιν κατά το σχεδιασμό ορισμένες λεπτομέρειες, όπως καλούπια με σύνθετη γεωμετρία και αλλαγές πάχους. Μετά τη μορφοποίηση, κόβεται ένα κομμάτι στις συγκεκριμένες διαστάσεις για την επιθυμητή κατασκευή. Το υλικό κόβεται με μαχαίρι και όχι με οδοντωτό κοπτικό εργαλείο μετά το χρόνο πήξης του (gel time). Η κοπή πρέπει να γίνει στην καλή επιφάνεια του εξαρτήματος. Να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι επίστρωσης εφαρμόζονται σε ανοιχτά καλούπια. [1]

**Πίνακας 10:** Χαρακτηριστικά Μεθόδων Επίστρωσης

<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ευελιξία στο σχεδιασμό εξαρτημάτων.</li> <li>2. Είναι δυνατή η παραγωγή μεγάλων και περίπλοκων κομματιών.</li> <li>3. Το κόστος του ελάχιστου εξοπλισμού είναι χαμηλό.</li> <li>4. Ως καλούπι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υλικό με σταθερό σχήμα.</li> <li>5. Είναι απλό το στήσιμο του εξοπλισμού και η έναρξη παραγωγής γίνεται σχετικά γρήγορα.</li> <li>6. Είναι εύκολες οι σχεδιαστικές αλλαγές.</li> <li>7. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εγκλείσματα και ενισχύσεις κατά την μορφοποίηση (ατσάλινα νύρα δυσκαμψίας κ.α.).</li> <li>8. Είναι δυνατές οι πολύστρωτες κατασκευές.</li> <li>9. Είναι απλή και εύκολη η εκπαίδευση των τεχνικών.</li> </ol>
<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Η μορφοποίηση έχει σχετικά υψηλό εργασιακό κόστος.</li> <li>2. Το τελικό προϊόν έχει μόνο την εξωτερική του επιφάνεια σε καλή μορφή.</li> <li>3. Η ποιότητα κατασκευής είναι συνάρτηση της ικανότητας του τεχνίτη.</li> <li>4. Η διαδικασία δεν προσφέρεται για μεγάλο όγκο παραγωγής.</li> <li>5. Δεν υπάρχει ομοιομορφία ποιότητας στα προϊόντα.</li> <li>6. Απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι πολυμερισμού μιας και το καλούπι βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.</li> <li>7. Υπάρχει υψηλός συντελεστής απωλειών σε πρώτες ύλες και ατελή προϊόντα.</li> </ol>

### 2.3 Τεχνικές μορφοποίησης με καλούπια (Molding Techniques)

Σε αυτήν την περίπτωση, το κυριότερο χαρακτηριστικό είναι ότι τα φύλλα του σύνθετου υλικού εξαναγκάζονται να εισέλθουν μέσα σε ένα καλούπι για να αποκτήσουν την τελική επιθυμητή μορφή. Σε αυτή τη διαδικασία μπορεί να περιλαμβάνεται η εφαρμογή πίεσης, κενού ή τίποτα από τα δύο. Η μορφοποίηση επίσης μπορεί να γίνεται εν θερμώ.

Στην περίπτωση που το υλικό έχει θερμοπλαστική μήτρα, απαιτείται η ψύξη του κάτω από τη θερμοκρασία τήξης ( $T_m$ ) ή τη θερμοκρασία μετάβασης υαλώδους κατάστασης ( $T_g$ ), για να είναι δυνατή η αφαίρεσή του από το καλούπι χωρίς να αλλάξει το διαμορφωμένο σχήμα του. Αυτό συνεπάγεται μια διαδικασία μορφοποίησης που περιλαμβάνει θέρμανση, διαμόρφωση υπό πίεση, ψύξη υπό πίεση.

Αν η μήτρα αποτελείται από θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη, πρέπει κατά τη διαμόρφωση να διατηρηθεί η θερμοκρασία για κάποιο χρονικό διάστημα ώστε να δημιουργηθεί μια σταθερή δομή στο υλικό (curing). Τότε η διαδικασία μορφοποίησης είναι θέρμανση, διαμόρφωση υπό πίεση, curing υπό πίεση. Γενικά τα περισσότερα σύνθετα με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα βγαίνουν από το καλούπι θερμά, αλλά μπορεί να υπάρξει και απόψυξη. Η πίεση που ασκείται κατά τη μορφοποίηση πάνω στο σύνθετο υλικό είναι τριών



ειδών:

α) Διαμόρφωση με συμπίεση (Compression Molding). Συμπίεση του σύνθετου υλικού μέσω της επαφής του με το άνω μέρος του καλουπιού που κλείνει.

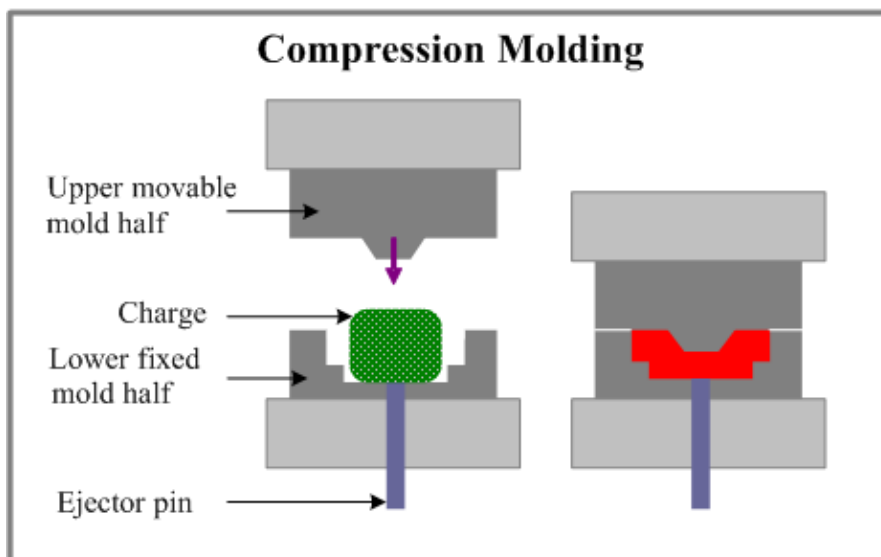
β) Μορφοποίηση με πίεση (Pressure forming). Συμπίεση του σύνθετου υλικού μέσω κάποιου αδρανούς αερίου ή και αέρα αμέσως μετά το κλείσιμο του καλουπιού.

γ) Μορφοποίηση εν κενώ (Vacuum forming). Δημιουργία αρνητικής πίεσης μέσω δημιουργίας κενού στο καλούπι. Το υλικό εξαναγκάζεται να πάρει την τελική του μορφή. [1, 2]

### 2.3.1 Τεχνικές διαμόρφωσης με πρέσα (Press Techniques)

Η τεχνική μορφοποίησης με πρέσα, συνίσταται στη χρήση ενός μικρού καλουπιού (θερμαινόμενου ή μη), μέσα στο οποίο τοποθετείται το σύνθετο υλικό και στην εφαρμογή εξωτερικής πίεσης για τη μορφοποίησή του. Αν έχουμε θερμό καλούπι η τεχνική είναι εν θερμώ, ενώ αν έχουμε ψυχρό καλούπι (θερμοκρασία περιβάλλοντος) η τεχνική είναι εν ψυχρώ. Το σύνθετο υλικό μπορεί να είναι θερμοπλαστική ή θερμοσκληρυνόμενη μήτρα. Οι ίνες μπορεί να βρίσκονται σε μορφή υφάσματος μακριών ινών (roning) ή κοντών ινών (stand), ή ακόμη και σε συνεχή μορφή. Όταν το σύνθετο έχει θερμοπλαστική μήτρα, μπορεί να βρίσκεται σε μορφή ενός φύλλου (laminare) ή σε πολύστρωτη πλάκα.

Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου, είναι ότι δίνει τη δυνατότητα να κατασκευαστούν πολύπλοκα κομμάτια σε μικρό χρονικό διάστημα. Ένα μειονέκτημα, είναι ότι δεν εξασφαλίζει ικανοποιητικές ανοχές για εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας, όπως επικαλύμματα πτερυγίων αεροσκαφών. Σε τέτοιες περιπτώσεις οδηγούμαστε σε μεθόδους υψηλότερης ακρίβειας. Αυτές αναφέρονται παρακάτω. [1]

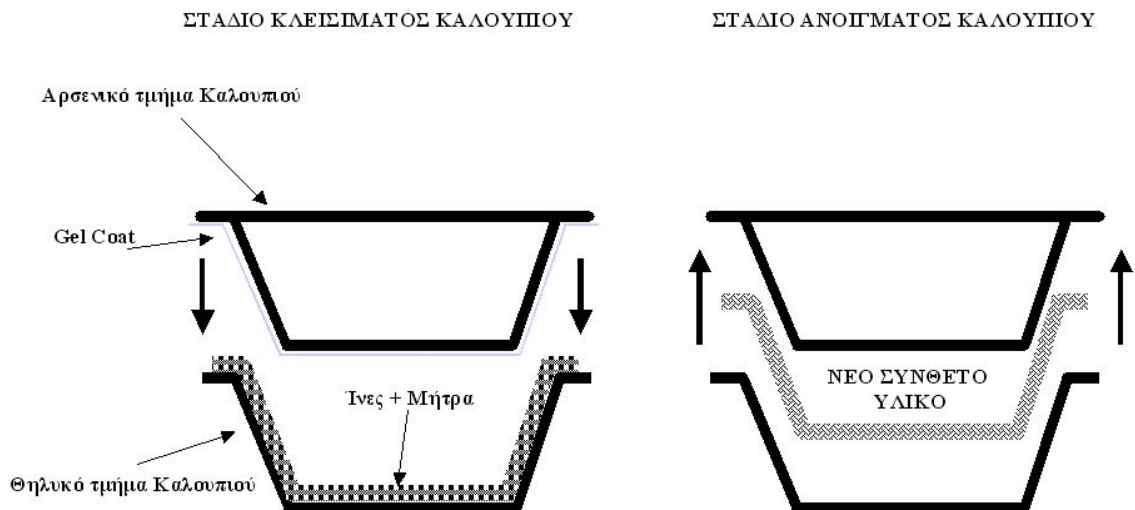


Εικόνα 2.3: Μορφοποίηση με πρέσα. [3]

### 2.3.2 Μορφοποίηση με πρέσα εν ψυχρώ (Cold press molding)

Η συγκεκριμένη τεχνική, μοιάζει με αυτή της επίστρωσης του καλουπιού με το χέρι (Hand Lay Up). Οι χρόνοι μορφοποίησης όμως είναι πολύ μικρότεροι, και επιπλέον χρησιμοποιείται μικτό και μη θερμαινόμενο καλούπι.

Το κοίλο μέρος του καλουπιού καλύπτεται αρχικά με ένα φύλλο μη ενισχυμένου πλαστικού (gel coat), το οποίο εξασφαλίζει την καλή ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας του εξαρτήματος. Στη συνέχεια, επιστρώνεται το ύφασμα των ινών πάνω από το gel coat και ακολουθεί η επίστρωση της ρητίνης πάνω στο ύφασμα. Το καλούπι κλείνει, και ασκείται χαμηλή πίεση σε αυτό για να εμποτιστεί ομοιόμορφα το ύφασμα των ινών από τη ρητίνη. Η συμπίεση του μητρικού υλικού γίνεται από το ίδιο το καλούπι που κλείνει, και εξαναγκάζει τη ρητίνη να κινηθεί σε όλη την επιφάνεια του υφάσματος των ινών εμποτίζοντάς το. Δεν απαιτείται υψηλή πίεση μορφοποίησης σε αυτή την περίπτωση. Οι χρόνοι μορφοποίησης κυμαίνονται στα 10-15 λεπτά. Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται η τεχνική μορφοποίησης με πρέσα εν ψυχρώ. [1]



Εικόνα 2.4: Μορφοποίηση με πρέσα εν ψυχρώ. [3]

### 2.3.3 Μορφοποίηση με πρέσα εν θερμώ (Hot press molding)

Οι τεχνικές μορφοποίησης εν θερμώ είναι δύο, και στηρίζονται στη μορφοποίηση με πρέσα του σύνθετου μέσω μικτού θερμαινόμενου καλουπιού. Οι τεχνικές αυτές είναι οι εξής:

#### α) Μορφοποίηση προ-διαμορφωμένων εξαρτημάτων (Pre-form molding)

Η μορφοποίηση γίνεται σε δύο στάδια. Το στάδιο της προ-διαμόρφωσης και το στάδιο της τελικής μορφοποίησης. Το πρώτο στάδιο, αρχίζει με τον ψεκασμό των κοντών ινών πάνω σε ένα διάτρητο μεταλλικό εκμαγείο, που έχει το τελικό σχήμα του εξαρτήματος. Σε αυτό το εκμαγείο γίνεται αναρρόφηση ρητίνης πάνω στις ίνες. Αφού ολοκληρωθεί ο ψεκασμός της ρητίνης, το προ-διαμορφωμένο εξάρτημα απομακρύνεται από το εκμαγείο και τοποθετείται

σε φούρνο για λίγα λεπτά για να γίνει η θέρμανση και η αρχική στερεοποίησή του. Αντί για κοντές ίνες, μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και ύφασμα κοντών ινών.

Στο δεύτερο στάδιο, το προκατασκευασμένο κομμάτι μεταφέρεται σε ένα θερμαινόμενο μικτό καλούπι, το οποίο είναι επικαλυμμένο με κάποια αντικολλητική ουσία για την εύκολη απομάκρυνση του εξαρτήματος. Στο πάνω μέρος του εξαρτήματος τοποθετείται ρητίνη, το καλούπι κλείνει και ασκείται πίεση. Η ρητίνη σε αυτό το σημείο συμπιεζόμενη από το καλούπι, καλύπτει όλη την επιφάνεια του εξαρτήματος.

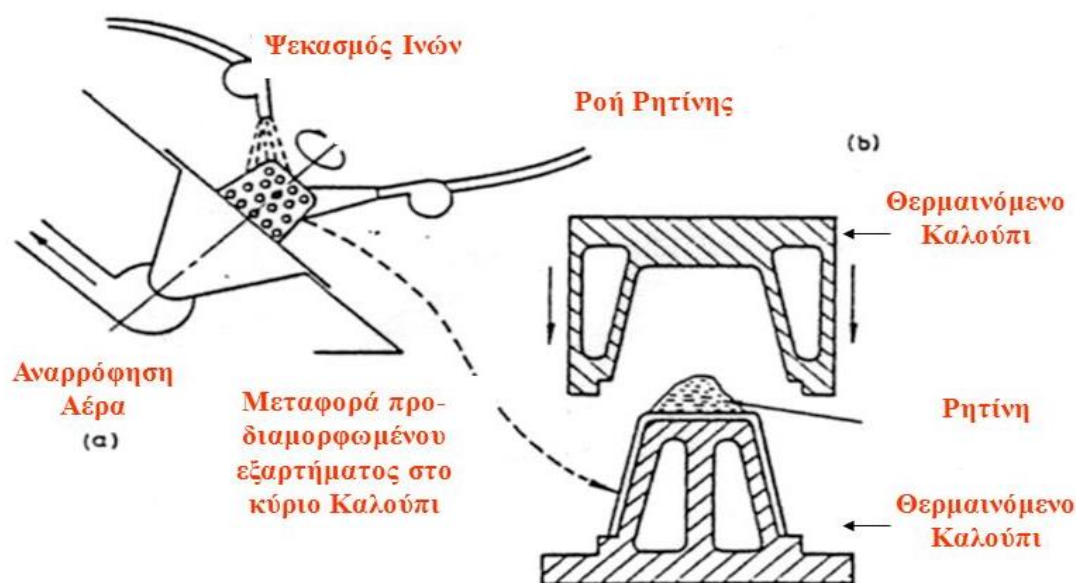
Ο χρόνος μορφοποίησης εξαρτάται από το δεύτερο στάδιο, καθώς καθορίζεται από τη θερμοκρασία που επικρατεί κατά την άσκηση πίεσης. Για υλικά που μορφοποιούνται στους 150°C ο χρόνος μορφοποίησης είναι 1 λεπτό. Όταν η θερμοκρασία μορφοποίησης είναι στους 80°C ο χρόνος μορφοποίησης είναι 10 λεπτά. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που είναι ακατάλληλη για μικρούς αριθμούς κομματιών. Συνιστάται όμως για μαζική παραγωγή όπου γίνεται απόσβεση του κατασκευαστικού κόστους.

#### β) Μορφοποίηση με συμπίεση (Compression molding)

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ έχουμε χρήση μικτού θερμαινόμενου καλουπιού. Η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα με την ταυτόχρονη θέρμανση και λιώσιμο του πολυμερούς και τη ροή του στα τοιχώματα του καλουπιού. Αυτό ισχύει για την περίπτωση που το πολυμερές είναι θερμοπλαστικό.

Αρχικά, το καλούπι θερμαίνεται στην απαραίτητη θερμοκρασία για τη διαμόρφωση. Στην περίπτωση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών, αυτή κυμαίνεται στους 130-160 °C. Στη συνέχεια, τοποθετείται η επιθυμητή ποσότητα φύλλων σύνθετου υλικού στο κάτω μέρος του καλουπιού, καλύπτοντας την επιφάνεια της κοιλότητάς του κατά 60-70%. Το καλούπι ύστερα κλείνει και ασκείται εξωτερική πίεση η οποία αυξάνεται με σταθερό ρυθμό μέχρι να επιτευχθεί μια προκαθορισμένη τιμή. Η τιμή της πίεσης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των ινών, τη μορφή των ινών, τη φύση της ρητίνης, τη δυσρευστότητα της ρητίνης στη θερμοκρασία μορφοποίησης και την επιφάνεια του καλουπιού όσον αφορά τη μορφή και το μέγεθος.

Οι τιμές της πίεσης στη μορφοποίηση με συμπίεση κυμαίνονται από 1,5 MPa έως 35 MPa. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος χρόνος για το άνοιγμα του καλουπιού, καθώς αυτός εξαρτάται από το πόσο διαρκεί ο πολυμερισμός του μητρικού υλικού. Όταν το καλούπι ανοίξει, το εξάρτημα απομακρύνεται με τη βοήθεια εμβόλων που ανέρχονται από τον πυθμένα του καλουπιού. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται η τεχνική μορφοποίησης με πρέσα εν θερμώ. [1]



α . Στάδιο προδιαμόρφωσης    β. Τελικό στάδιο διαμόρφωσης

Εικόνα 2.5: Μορφοποίηση με πρέσα εν θερμώ. [3]

## 2.4 Ατέλειες στη μορφοποίηση

Κατά τη μορφοποίηση με συμπίεση, υπάρχουν ορισμένες ατέλειες που είναι επιφανειακές ή έχουν να κάνουν με τη δομή του υλικού. Στην περίπτωση που οι ατέλειες είναι επιφανειακές, επηρεάζεται μόνο η εμφάνιση, αν όμως υπάρχουν δομικές ατέλειες επηρεάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Οι ατέλειες μπορεί να είναι:

### α) Πορώδης εξωτερική επιφάνεια

Συνήθως είναι ενδεικτική μιας πορώδους εσωτερικής δομής (voids). Δημιουργείται από τον παγιδευμένο αέρα κατά τη μορφοποίηση στο καλούπι. Ο αέρας παγιδεύεται ανάμεσα στα φύλλα του σύνθετου υλικού, ανάμεσα στις ίνες και τη μήτρα, ή ανάμεσα σε καλούπι και σύνθετο υλικό. Συνήθως ο αέρας απομακρύνεται από τον εξαερισμό του καλουπιού κατά τη ροή της ρητίνης, αλλά αν το υλικό έχει μεγάλο ιξώδες και ο εξαερισμός είναι ανεπαρκής, τότε παραμένει και δημιουργεί τα κενά αυτά.

### β) Διαστρωματικές ρωγμές ή φυσαλίδες (blisters)

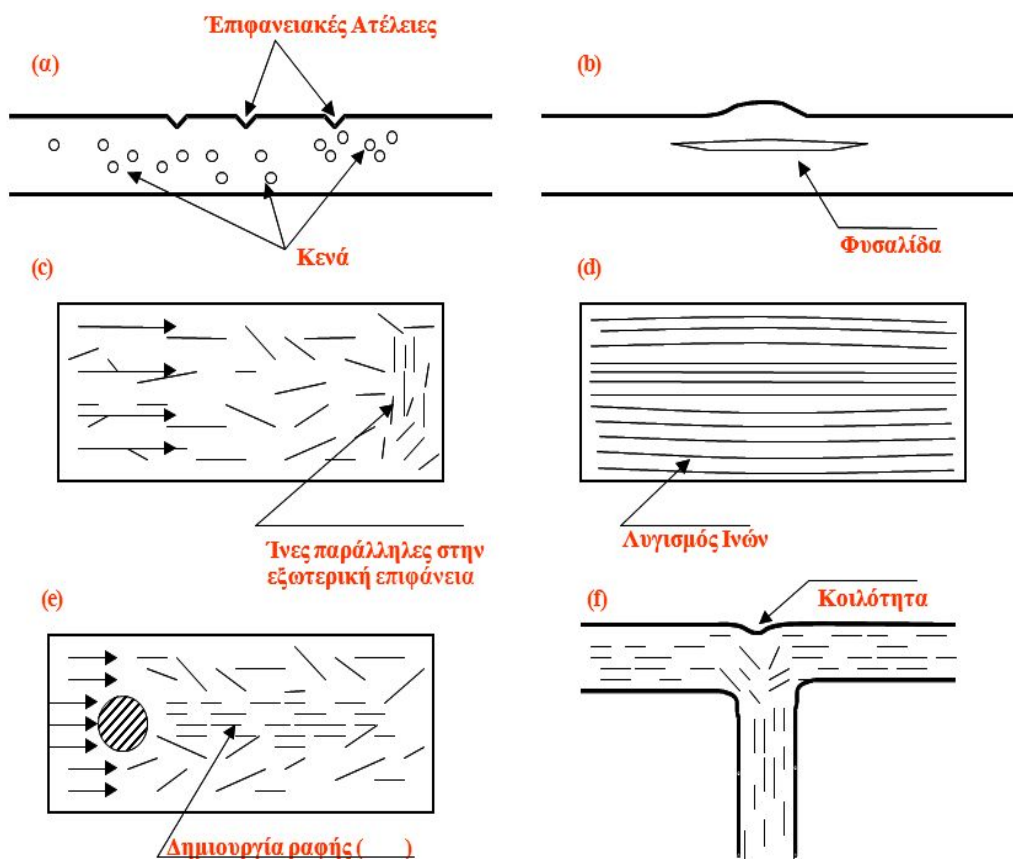
Οι ρωγμές δημιουργούνται στο τέλος της μορφοποίησης κατά το άνοιγμα του καλουπιού, ή σε κατεργασίες του εξαρτήματος μετά τον πολυμερισμό, λόγω της ύπαρξης θυλάκων με αέρα υπό πίεση που βρίσκονται στη μάζα του σύνθετου υλικού. Οι ρωγμές μπορούν να ελαττωθούν με ελάττωση της θερμοκρασίας διεργασίας, και αύξηση διαστρωματικής αντοχής με χρήση coatings των ινών ή άλλου τύπου μήτρας.

γ) Ατέλειες που αφορούν τη ροή των ινών στο καλούπι

Αυτές οι ατέλειες αφορούν τόσο τις κοντές όσο και τις μακριές ίνες. Οι κοντές ίνες, προσανατολίζονται ανάλογα με τη ροή της ρητίνης σε συγκεκριμένες περιοχές του σύνθετου υλικού, πράγμα που αναιρεί την ισορροπία του υλικού στο σημείο αυτό. Στα τοιχώματα του καλουπιού υπάρχει διάταξη των ινών παράλληλη σε αυτά. Αν υπάρχουν πείροι στο καλούπι η ροή της ρητίνης διαχωρίζεται, και πίσω από τον πείρο ενώνονται οι ροές. Σε αυτό το σημείο οι ίνες συγκεντρώνονται παράλληλα με τη ροή. Οι μακριές ίνες από την άλλη, έχουν την τάση να λυγίζουν προς τα άκρα του καλουπιού υπό την επίδραση της συνιστώσας της ροής που είναι κάθετη προς αυτές (transverse flow). Έτσι μειώνεται η αντοχή στη διεύθυνση των ινών.

δ) Σημεία διαστρωματικής υποχώρησης (sink marks)

Είναι τα σημεία του σύνθετου υλικού όπου αλλάζει απότομα η γεωμετρία, όπως τα νεύρα δυσκαμψίας (ribs). Η ροή της ρητίνης στη βάση των περιοχών αλλαγής γεωμετρίας, δημιουργεί περιοχές πλούσιες σε ίνες σε αυτό το σημείο και φτωχές σε ίνες απέναντι από αυτές. Οι δύο περιοχές έχουν διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, και κατά την ψύξη του υλικού η φτωχή σε ίνες περιοχή συρρικνώνεται περισσότερο από την άλλη δημιουργώντας υποχώρηση. Επομένως, η μέθοδος αυτή δεν συνιστάται για εξωτερικά τμήματα κατασκευών. Στην Εικόνα 2.6 φαίνονται οι ατέλειες αυτές. [1]



Εικόνα 2.6: Ατέλειες στη μορφοποίηση με συμπίεση και ροή ρητίνης. [3]

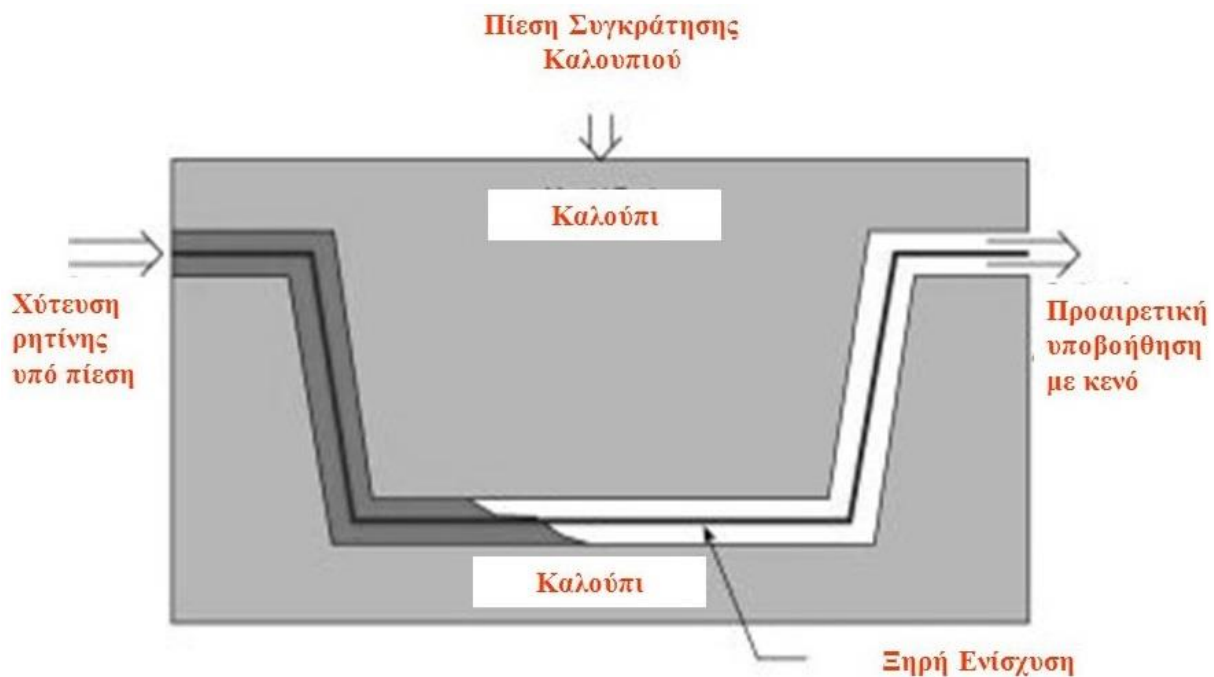
## 2.5 Οι τεχνικές χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (Resin transfer molding)

Είναι ένα είδος χύτευσης, με τη διαφορά ότι η ρητίνη δεν βρίσκεται σε κοιλότητα στο άνω μέρος του κλειστού καλούπιού, αλλά σε κάποιο ξεχωριστό δοχείο και διοχετεύεται υπό πίεση μέσα στο κλειστό καλούπι μέσω αγωγών.

Το καλούπι προετοιμάζεται κατάλληλα πριν από τη μεταφορά της ρητίνης, με την επίστρωση της ενίσχυσης και ίσως κάποιου gel coat. Η ενίσχυση μπορεί να αποτελείται από ίνες κάθε είδους και μορφής. Έτσι μπορεί να υπάρχουν οι διάφοροι τύποι υφασμάτων από συνεχείς ή μη συνεχείς ίνες. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να ψεκαστεί η εσωτερική επιφάνεια του καλούπιού με κοντές ίνες οι οποίες συγκρατούνται στη θέση τους με ειδική κόλλα.

Η προετοιμασία της ρητίνης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με προ ανάμιξη της ρητίνης με τον καταλύτη, και τοποθέτησή της στο δοχείο από όπου και θα μεταφερθεί στο καλούπι. Ο δεύτερος τρόπος, είναι να υπάρχουν ξεχωριστά δοχεία ρητίνης και καταλύτη, και το μίγμα να μεταφέρεται στο καλούπι αφού προηγηθεί ανάμιξη σε ειδική ζώνη ανάμιξης. Η πίεση μεταφοράς της ρητίνης στο καλούπι κυμαίνεται από 70 έως 700 MPa.

Στο καλούπι, δημιουργείται κενό για να απομακρυνθεί ο αέρας από αυτό και να εξαλειφθούν τυχόν ατέλειες μορφοποίησης (πχ κενά, φυσαλίδες κλπ). Στη συνέχεια η ρητίνη μεταφέρεται στο καλούπι, διασκορπίζεται και εμποτίζει τη μάζα των ινών δημιουργώντας ένα ομοιογενές υλικό. Αφού ολοκληρωθεί η έγχυση της ρητίνης, το καλούπι ασφαλιζεται και θερμαίνεται για το curing. Μετά το curing, το καλούπι ανοίγεται και το εξάρτημα απομακρύνεται. Η διάταξη μορφοποίησης φαίνεται στην Εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Χύτευση με μεταφορά ρητίνης. [3]

Κατά το σχεδιασμό και κατασκευή μιας διάταξης παραγωγής με μεταφορά ρητίνης, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να λάβει υπόψιν ο κατασκευαστής για να έχει το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

1) Κατασκευή καλουπιού ως προς το σχήμα και τα υλικά. Το καλούπι πρέπει να αντέχει την πίεση και τη θερμοκρασία μορφοποίησης, καθώς και να είναι χημικά αδρανής η επιφάνειά του.

2) Μέτρηση των επιτρεπόμενων ανοχών του καλουπιού.

3) Η τεχνική με μεταφορά ρητίνης είναι ακατάλληλη για μικρά κομμάτια.

4) Η επικάλυψη με φύλλο πολυεστέρα δίνει άριστη εξωτερική επιφάνεια.

5) Το βύσμα έγχυσης της ρητίνης να είναι από πολυσουλφίδιο που περιορίζει τον κίνδυνο ανάφλεξης της ρητίνης.

6) Τα θερμαντικά στοιχεία του καλουπιού είναι προτιμότερο να τοποθετούνται εξωτερικά στο καλούπι από πλευράς ευκολίας στην απομάκρυνση και επισκευή.

7) Οι οπές έγχυσης της ρητίνης πρέπει να συντελούν στην ομοιόμορφη κατανομή της στο σύνθετο.

8) Πρέπει να υπάρχουν αρκετές οπές για τον επαρκή εξαερισμό του καλουπιού.

Τα δοχεία ρητίνης πρέπει να είναι κοντά στο καλούπι, έτσι ώστε η ρητίνη να μην διανύει μεγάλες διαδρομές στους αγωγούς.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

1) Χαμηλό κόστος εξοπλισμού λόγω της χαμηλής πίεσης μορφοποίησης και πρώτων υλών

2) Δυνατότητα μορφοποίησης πολύπλοκων σχημάτων με εξαιρετική ακρίβεια

3) Πολύ καλή εξωτερική επιφάνεια του συνθέτου

4) Ελαχιστοποίηση ατελειών στη δομή

5) Ελαχιστοποίηση δευτερογενών κατεργασιών στο εξάρτημα

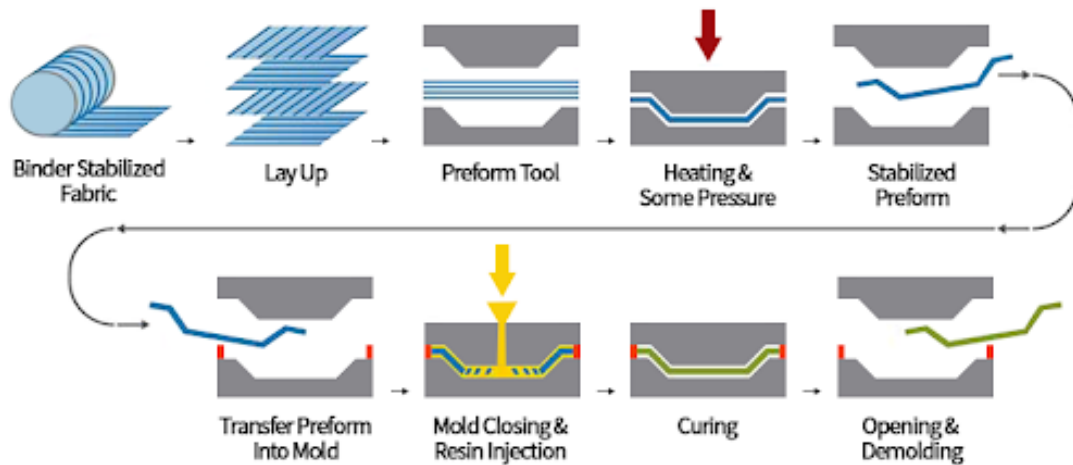
6) Δυνατότητα ενίσχυσης υλικού με ατσάλινα νεύρα δυσκαμψίας

7) Κατάλληλη για εξαρτήματα υψηλής τεχνολογίας

Σχετικά με την Εικόνα 2.8 (παρακάτω), οι χρόνοι διαμορφώνονται ως εξής:

Για τη μεταφορά του σύνθετου μέσα στο καλούπι χρειάζονται 10 sec. Για το κλείσιμο του καλουπιού και την έγχυση της ρητίνης, 20-40 sec. Για τη διαδικασία του curing απαιτούνται 45-120 sec. Το άνοιγμα και η αφαίρεση του σύνθετου παίρνει 10 sec.

Η όλη διαδικασία από τη μεταφορά του σύνθετου έως και την αφαίρεσή του από το καλούπι, διαρκεί περίπου 85-180 sec, δηλαδή από σχεδόν 1 ώρα έως και 3 ώρες. [1]



**Εικόνα 2.8:** RTM (Resin Transfer Molding). [3]

### 2.5.1 Οι παραλλαγές της μεθόδου RTM (SCRIMP-RIFM-VARTM)

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σειρά από βελτιώσεις της μεθόδου χύτευσης με μεταφορά ρητίνης. Αυτές βασίζονται στην RTM τεχνική και διαφοροποιούνται ως προς την προετοιμασία του δείγματος, του είδους της ροής της ρητίνης στο καλούπι ή το ίδιο το είδος της ρητίνης.

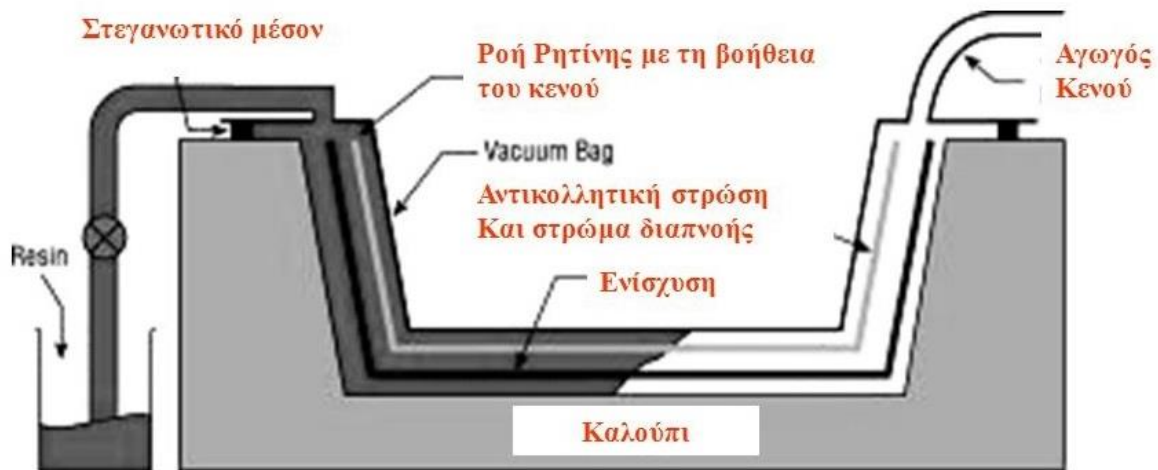
Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9, είναι η τεχνική μεταφορά ρητίνης σε ασκό κενού με υποβοήθηση από κενό. Εδώ όπως και στην κλασική RTM, οι στρώσεις της ξηρής ενίσχυσης τοποθετούνται σε ανοιχτό καλούπι. Μετά, κατασκευάζεται γύρω τους ο ασκός του κενού, όπως στην τεχνική του αυτόκλειστου φούρνου. Δηλαδή, τοποθετούνται στρώσεις αντικολλητικού φιλμ πάνω τους και ακόμη κάποιο είδος υφάσματος που επιτρέπει την κυκλοφορία του αέρα (στρώμα διαπνοής). Στη συνέχεια, τοποθετείται με ειδική στεγανωτική ταινία ένα ανθεκτικό φύλλο πολυμερούς το οποίο και μονώνεται από την ατμόσφαιρα. Αφού επιτευχθεί η στεγάνωση του συστήματος, η ρητίνη διοχετεύεται μέσα στο σύστημα των στρώσεων. Η ροή της ρητίνης υποβοηθάται και από το στρώμα διαπνοής το οποίο επιτρέπει την κυκλοφορία της ρητίνης στα επιφανειακά στρώματα ενίσχυσης. Η άσκηση κενού βοηθά στην κυκλοφορία της ρητίνης, με ταυτόχρονη απορρόφηση του επιπλέον αέρα και των αερίων μονομερών, υποπαραγώγων του πολυμερισμού.

Με την τεχνική αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μητρικά υλικά εποξειδικές ρητίνες, πολυεστέρες και βινυλεστέρες. Ως ενίσχυση δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για οποιοδήποτε σύστημα ινών ή πολύστρωτων ραμμένων ενισχύσεων, μιας και τα κενά επιτρέπουν τη γρήγορη διαβροχή από τη ρητίνη. Επίσης, μπορούν με αυτή την τεχνική να κατασκευαστούν και σύνθετα τύπου sandwich με οποιοδήποτε πυρήνα εκτός από honeycomb, γιατί πλημμυρίζει από ρητίνη.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι όσα και της παραδοσιακής RTM, με τη διαφορά ότι μόνο η μια πλευρά του υλικού έχει άριστη επιφάνεια λόγω της χρήσης του μισού ανοιχτού καλουπιού. Επιπλέον, έχει πολύ χαμηλότερο κόστος σε εξοπλισμό γιατί



χρησιμοποιείται ένα ανοιχτό καλούπι με μικρές αντοχές λόγω της μη άσκησης εξωτερικής πίεσης στη μορφοποίηση. Στα μειονεκτήματα της τεχνικής υπάρχουν η πολυπλοκότητά της και η αναγκαία εξειδίκευση του προσωπικού για την κατασκευή του ασκού κενού. Επίσης πρέπει οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται να έχουν μικρό ιξώδες, που σημαίνει ότι θα έχουν και σχετικά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες.



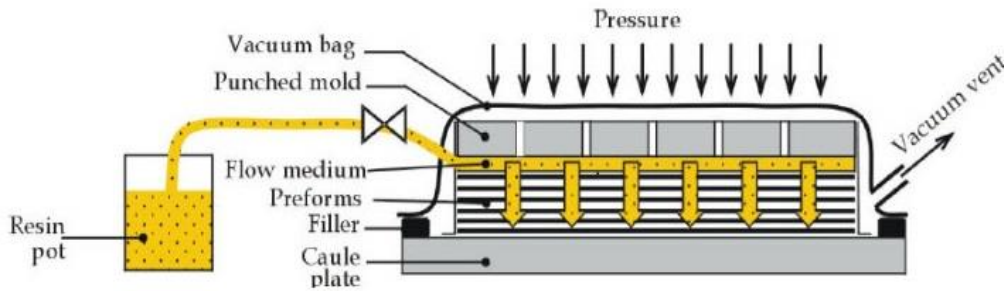
**Εικόνα 2.9:** Χύτευση με μεταφορά ρητίνης σε ασκό κενού VARTM. [3]

Η τεχνική χρησιμοποιείται για την κατασκευή σχετικά μεγάλων εξαρτημάτων ή επιφανειών όπως ημιτελή μικρά γιοτ, πάνελ για φορτηγά αυτοκίνητα και τρένα. Αυτό συνεπάγεται ότι αν δεν διαβραχούν όλα τα στρώματα των ινών, πρέπει να απορριφθούν μεγάλα κομμάτια παραγωγής με το αντίστοιχο κόστος.

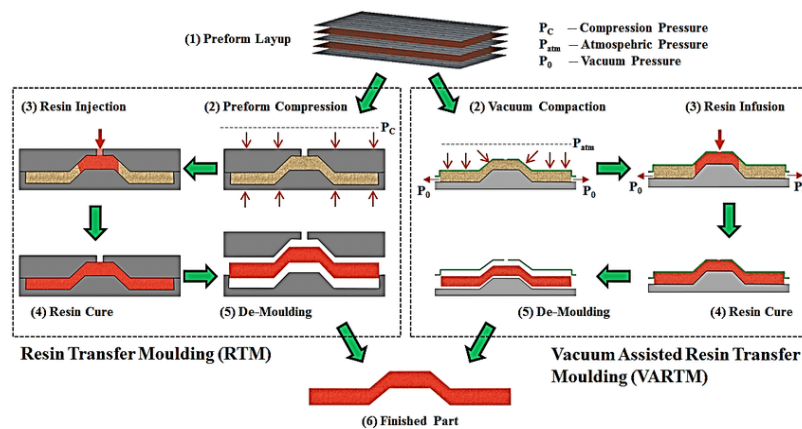
Μια άλλη παραλλαγή της μεθόδου RTM είναι η Resin Film Infusion (RFI) ή μέθοδος εμποτισμού με φιλμ ρητίνης. Μοιάζει στη διάταξη με τη μέθοδο του ασκού κενού αλλά εδώ η ρητίνη δεν εγχύεται στο καλούπι. Οι στρώσεις της ρητίνης εναλλάσσονται με τις στρώσεις των ινών στο καλούπι μιας και η ρητίνη επιστρώνεται σε μορφή πολύ λεπτού ειδικού φιλμ προ αναμεμιγμένου με καταλύτη. Αφού επιστρωθούν ρητίνη και ίνες, κλείνει ο ασκός κενού και το καλούπι θερμαίνεται. Η ρητίνη ρευστοποιείται και εμποτίζει τα στρώματα των ινών υποβοηθούμενη από το κενό. Μετά από ένα χρονικό διάστημα ολοκληρώνεται ο πολυμερισμός της και το σύνθετο είναι έτοιμο.

Η μέθοδος αν και δεν είναι διαδεδομένη εκτός των ορίων της αεροπορικής βιομηχανίας, έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Είναι δυνατόν να κατασκευαστούν εξαρτήματα υψηλών προδιαγραφών και αντοχών λόγω της ελάχιστης περιεκτικότητας σε κενά, της πολύ υψηλής κατά όγκο αναλογίας σε ίνες, και του πολυμερισμού σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι ασφαλής για το περιβάλλον και την υγεία των εργαζομένων λόγω της χρήσης ασκού κενού. Έχει χαμηλότερο κόστος σε πρώτη ύλη μιας και δεν απαιτεί τη χρήση προ εμποτισμένων στρώσεων ινών (prepregs). Όσον αφορά στα υλικά, χρησιμοποιούνται μόνο φιλμ εποξειδικής ρητίνης με οποιοδήποτε σύστημα ινών. Σε περίπτωση που πρέπει να μπει αφρώδης πυρήνας στο σύνθετο πρέπει να αντέχει τις θερμοκρασίες πολυμερισμού της ρητίνης (60-100°C). Με την τεχνική αυτή κατασκευάζονται τυπικά κώνοι για τα ραντάρ των αεροσκαφών (radome)

και τα σόναρ των υποβρυχίων. [1]



**Εικόνα 2.10:** Resin Film Infusion (RFI) ή μέθοδος εμποτισμού με φιλμ ρητίνης. [3]



**Εικόνα 2.11:** RTM και VARTM. [3]

## 2.6 Οι αεροστεγείς τεχνικές μορφοποίησης

Ο όρος αεροστεγείς είναι μια ελεύθερη μετάφραση του όρου “bag molding techniques”, με τον οποίο χαρακτηρίζονται στην αγγλόφωνη βιβλιογραφία οι τεχνικές μορφοποίησης που θα αναφερθούν. Πρόκειται για διεργασίες στις οποίες υπάρχει το χαρακτηριστικό, το σύνθετο υλικό να βρίσκεται κατά τη μορφοποίηση ανάμεσα σε αεροστεγή καλύμματα και το καλούπι μορφοποίησης. Έτσι, απομονώνεται το προς κατασκευή εξάρτημα από τα αέρια υπό πίεση ή το κενό που εξασκούνται κατά τη μορφοποίησή του. Τα καλύμματα αυτά είναι δυνατόν να είναι από διάφορα πολυμερή ή ακόμη από υπερπλαστικά κράματα μετάλλων.

Οι χρήσεις των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται με αυτήν την τεχνική ποικίλουν, και είναι δυνατόν να παραχθούν από διακοσμητικά αρχιτεκτονικά αντικείμενα έως και επιστρώσεις πτερυγίων αεροσκαφών υψηλών απαιτήσεων και υψηλής τεχνολογίας. Μπορεί να ειπωθεί ότι οι συγκεκριμένες τεχνικές μορφοποίησης αποτελούν τα τελειότερα εργαλεία που έχουν μέχρι τώρα αναπτυχθεί για την μορφοποίηση σύνθετων υλικών υψηλών απαιτήσεων.

Επειδή το κόστος μορφοποίησης είναι πολλές φορές υπολογίσιμο κατά μεγάλο ποσοστό, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός της παραγωγικής διαδικασίας όσον αφορά εξοπλισμό και πρώτες ύλες. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν από αυτούς κατά τη σχεδίαση και παραγωγή συνοψίζονται παρακάτω.

α) Αναπαραγωγιμότητα, διαθεσιμότητα και χαρακτηριστικά μορφοποίησης των υποψηφίων για επιλογή πρώτων υλών

β) Απαιτήσεις σε εξοπλισμό παραγωγής

γ) Απαιτούμενος εξοπλισμός για τελική συναρμολόγηση, επιθεώρηση και ποιοτικό έλεγχο  
Τα παραπάνω κριτήρια έχουν απομονωθεί μετά από κάποια εμπειρία ετών σε αυτές τις διεργασίες και εφαρμόζονται πιστά από όλους τους μεγάλους κατασκευαστές ανά τον κόσμο.  
[1]

### 2.6.1 Πρώτες ύλες

Πριν την παρουσίαση των ειδών των αεροστεγών μορφοποιήσεων, θα γίνει μια αναφορά στις διαθέσιμες και απαιτούμενες για τέτοιου είδους τεχνικές, πρώτες ύλες. Αυτές ανήκουν σε δύο κατηγορίες που αφορούν τα υλικά και τη μορφή της μήτρας όπως επίσης και των ινών.

#### A) Είδη υλικών για τις μήτρες

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι τόσο θερμοπλαστικά όσο και θερμοσκληρυνόμενα. Παρόλα αυτά, κατά κανόνα επικρατούν τα θερμοσκληρυνόμενα έναντι των θερμοπλαστικών. Το πολυσουλφίδιο (Polysulfone) και το PEEK (Polyetheretherketone) είναι τα ευρέως χρησιμοποιούμενα για αυτόν τον σκοπό θερμοπλαστικά. Όσον αφορά τα θερμοσκληρυνόμενα, είναι συχνή η χρήση ρητινών που δίνουν μια τελική λαμπερή επιφάνεια. Τα prepregs (προκατασκευασμένα) από πολυσουλφίδιο και PEEK είναι ψαθυρά και δύσκαμπτα. Οι θερμοκρασίες μορφοποίησής τους υπερβαίνουν τους 190°C και πολλές φορές απαιτούν μια προεργασία προσαρμογής στις επιφάνειες του καλουπιού, που γίνεται συνήθως με τη βοήθεια ενός θερμαντικού πιστολιού. Το στάδιο αυτό της προ-διαμόρφωσης γίνεται πολλές φορές και μέσα σε Autoclave. Αφού γίνει αυτό, μπορούν να αχθούν προς την τελική διαμόρφωση. Οι θερμοκρασίες προς την τελική μορφοποίηση κυμαίνονται γύρω από τους 240°C, και οι πιέσεις γύρω από τα 1,4 MPa.

Τα πλεονεκτήματα των θερμοπλαστικών είναι η άπειρη διάρκεια ζωής όταν αποθηκεύονται υπό συνθήκες περιβάλλοντος, οι μικροί χρόνοι μορφοποίησης λόγω του ότι δεν απαιτείται curing, και το ότι οι πολύ καλές θερμικές τους ιδιότητες δεν επηρεάζονται από την υγρασία. Κατά την επιλογή των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών, παίζει σπουδαίο ρόλο η περιεκτικότητά τους σε διαλύτες, οι οποίοι είναι πιθανόν κατά την εν θερμώ μορφοποίηση και πολυμερισμό να εξαερωθούν δημιουργώντας μια ατμόσφαιρα μορφοποίησης πλούσια σε μονομερή. Τα μονομερή αυτά είναι δυνατόν να προκαλέσουν τη δημιουργία κενών στο σύνθετο υποβαθμίζοντας τις τελικές του ιδιότητες. Όταν η χρήση τέτοιων ρητινών είναι αναπόφευκτη, ο σχεδιαστής φροντίζει να υπάρχει επαρκής εξαερισμός του καλουπιού. Όταν γίνεται χρήση τέτοιων ρητινών η μορφοποίηση συνηθίζεται να αναφέρεται ως “υγρής

επίστρωσης”. Είναι επίσης δυνατόν, η ρητίνη να περιέχει διάφορα μονομερή ως ενισχύσεις, τα οποία δεν απελευθερώνουν αέρια μονομερή κατά τη μορφοποίηση, αλλά αντιδρούν με τη ρητίνη ενισχύοντας τις τελικές της ιδιότητες.

#### *B) Είδη ενισχύσεων υπό μορφή ινών*

Σχεδόν όλα τα διαθέσιμα είδη ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή σύνθετων υλικών με την τεχνική που εξετάζεται. Έτσι έχουμε ίνες από γραφίτη, aramid, γυαλί, βόριο σε όλες τις μορφές υφασμάτων, κοντών ή συνεχών ινών, ραμμένων, πολύστρωτων και υβριδικών που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Βασική προϋπόθεση είναι η αρχική επεξεργασία της επιφάνειας των ινών με κάποιου είδους coating. Με τη βοήθεια του coating υποβοηθάται η συνάφεια μεταξύ ίνας-μήτρας και αναβαθμίζεται η συνεργασία τους. Άρα, πρέπει η επικάλυψη των ινών με coatings να είναι μια βασική προδιαγραφή του κατασκευαστή των σύνθετων ή των prepregs.

#### *Γ) Αντικολλητικά καλουπιών ή είδη καλυμμάτων*

##### 1) Αντικολλητικές ουσίες

Είναι ευνόητο ότι πρέπει πριν από τη μορφοποίηση να προηγηθεί μια προετοιμασία του καλουπιού με κάποια αντικολλητική ουσία. Οι ουσίες αυτές και οι μορφές τους καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, έχουν αναφερθεί στην παράγραφο που μιλάει για τη διαδικασία επίστρωσης με το χέρι-Hand Lay Up.

##### 2) Είδη καλυμμάτων στεγανοποίησης και “εξαερισμού” του υλικού

Το σύνθετο υλικό όπως αναφέρθηκε ήδη, επιστρώνεται με ένα ειδικό κάλυμμα που το στεγανοποιεί ως προς το περιβάλλον μορφοποίησης. Πριν επιστρωθεί το κάλυμμα αυτό, προηγείται η επίστρωση ενός διαπερατού από τον αέρα υφάσματος, για τη διαπνοή του σύνθετου. Μέσω αυτού του υφάσματος διαφεύγουν και τα τυχόν παραγόμενα κατά τη μορφοποίηση μονομερή, τα οποία και απομακρύνονται με τη βοήθεια ειδικών βαλβίδων εξαερισμού του καλουπιού ή των αεροστεγών καλυμμάτων.

Τα δύο αυτά είδη επικαλύψεων είναι δυνατόν να είναι μιας χρήσης ή επαναλαμβανομένων χρήσεων. Παρόλα αυτά, υπάρχουν σημαντικά μειονεκτήματα ως προς τη χρήση αναλώσιμων καλυμμάτων, από διάφορα πολυμερή φιλμ. Τα σημαντικότερα αυτά μειονεκτήματα είναι:

- α) Το κόστος παροχέτευσης των άχρηστων καλυμμάτων.
- β) Το κόστος σε ελαττωματικά προϊόντα λόγω διαρροών ρητίνης λόγω χαμηλής ποιότητας καλυμμάτων από πλαστικά φιλμ.
- γ) Η πιθανότητα μικρότερης διάρκειας ζωής του καλουπιού λόγω επιπλέον καθαρισμών από υπολείμματα φιλμ.

Είναι συνήθης η ενίσχυση του καλύμματος με κάποιο ύφασμα ινών γυαλιού. Το πιο διαδεδομένο υλικό για καλύμματα είναι η σιλικόνη.

Οι ερευνητές της GRUMMAN AEROSPACE CORPORATION προτείνουν την ακόλουθη σειρά πρώτων υλών για επαναχρησιμοποιούμενα καλύμματα:

##### 1) Πρώτες ύλες για μήτρα

DOW CORNING, 92-048 RTV SILICONE RUBBER LATEX

DOW CORNING, DC 92-009 RTV ΔΙΑΛΥΜΜΑ ΜΕ 1:1 ΣΕ ΝΑΦΘΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

GENERAL ELECTRIC, RTV 630

2) Υλικά γυαλιού

STYLE 1000, FIBERGLASS FABRIC ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΟΥΔΕΤΕΡΟ ΡΗ

UNITED MERCHANTS, KNITTED GLASS FABRIC

MOSITES & "D" AIRCRAFT PRODUCTS, RUBBER & RUBBER SHEETS [1]

## 2.7 Μέθοδος αυτόκλειστου φούρνου-κλιβάνου (Autoclave Bag Molding Process)

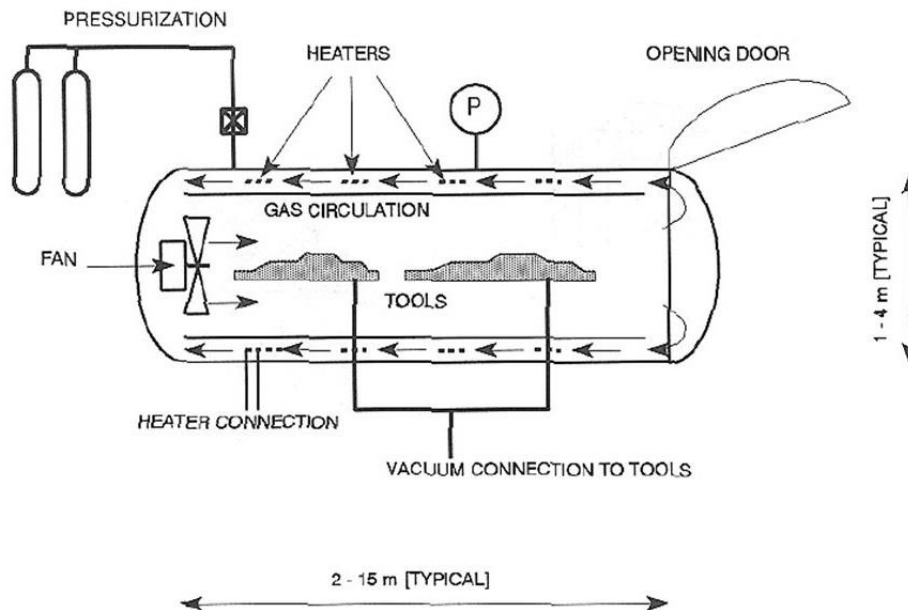
Η μέθοδος του αυτόκλειστου κλιβάνου είναι και η πλέον δαπανηρή από το σύνολο των bag-molding τεχνικών. Ο ρυθμός παραγωγής με χρήση αυτής δεν είναι υψηλός αλλά οι χρήσεις της, είναι τέτοιες που δεν απαιτούν αυξημένες ποσότητες. Προσφέρει υψηλή αξιοπιστία και ποιότητα κατασκευής, γι' αυτό και προτιμάται στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Η τεχνική συνίσταται στη διαμόρφωση του συνθέτου σε ένα θηλυκό καλούπι (το οποίο υπόκειται σε ειδική προετοιμασία), εντός ενός θαλάμου αυτόκλειστου με την άσκηση πίεσης κενού και θερμοκρασίας, βάσει μιας χαρακτηριστικής για το υλικό καμπύλης μορφοποίησης. Το κύριο τμήμα του αυτόκλειστου είναι ένας θάλαμος πίεσης από χάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Ο θάλαμος αυτός σχεδιάζεται με διάρκεια ζωής τουλάχιστον 50 χρόνια. Εσωτερικά, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας είναι τοποθετημένη μόνωση από φύλλο, που τις περισσότερες φορές είναι από κεραμικό υλικό. Λόγω της ευπάθειας του κεραμικού σε τυχόν παραγόμενα στον θάλαμο αέρια και ατμούς, υπάρχει εξωτερική επικάλυψη αυτού με φύλλο αλουμινίου ή ανοξειδωτού χάλυβα. Οι προδιαγραφές για τους αυτόκλειστους περιορίζουν τη μέγιστη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του αυτόκλειστου στους 60°C, σε συνθήκες μέγιστης εσωτερικής θερμοκρασίας. Μετά την τοποθέτηση της μόνωσης, εγκαθίσταται και ένας δακτυλιοειδής αγωγός ως διέξοδος για τον ατμό που θα κυκλοφορήσει στον αυτόκλειστο κατά τη λειτουργία του. Τέλος, στο πάτωμα του αυτόκλειστου υπάρχουν δύο ράγες στις οποίες κινείται το φορείο πάνω στο οποίο τοποθετείται το καλούπι.

Εάν ο αυτόκλειστος κλιβάνος είναι μικρός τότε θερμαίνεται ηλεκτρικά. Στην αντίθετη περίπτωση, υπάρχουν ειδικές πηγές θέρμανσης του ατμού που κυκλοφορεί μέσα σε αυτόν. Υπάρχουν αρκετά είδη συστημάτων θέρμανσης. Είναι δυνατόν να υπάρχει μια εσωτερική σπείρα από χάλυβα, μέσα στην οποία κυκλοφορούν τα αέρια προϊόντα της καύσης κατωτέρων υδρογονανθράκων. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνονται θερμοκρασίες από 450-540°C. Μια παλαιότερη τεχνική, είναι η κυκλοφορία θερμού λαδιού σε αυτή τη σπείρα. Επίσης, για θερμοκρασίες λειτουργίας από 150°C έως 175°C είναι δυνατή η θέρμανση του αερίου μέσα στον αυτόκλειστο με κυκλοφορία ατμού σε παρόμοια σπείρα από ανοξειδωτο χάλυβα.

Το αέριο του θαλάμου πρέπει να κυκλοφορεί ομοιόμορφα ώστε και η θέρμανση του συνθέτου να είναι ομοιόμορφη. Γι' αυτόν τον σκοπό υπάρχει συνήθως εγκατεστημένο

σύστημα κυκλοφορίας του αερίου. Η ταχύτητα του αερίου είναι περίπου 1-3 m/sec. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως αέρας, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>. Υπάρχουν δύο συστήματα ακόμη για την υποβοήθηση της μορφοποίησης. Το ένα συμπιέζει το αέριο του θαλάμου στην απαιτούμενη για τη διεργασία πίεση (αεροσυμπιεστής) και το άλλο δημιουργεί το κενό στα καλύμματα του συνθέτου (αντλία κενού). Η όλη διάταξη συμπληρώνεται από ένα σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή με τον οποίο παρακολουθείται συνεχώς και ελέγχεται η διεργασία της μορφοποίησης σε όλο το φάσμα των παραμέτρων της.

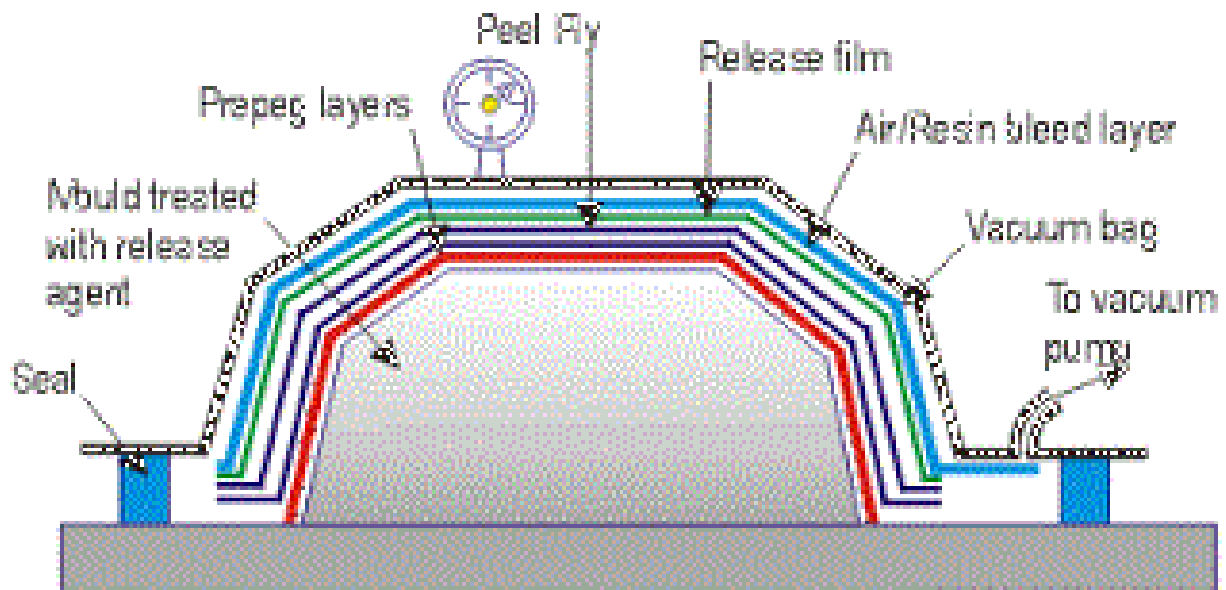


**Εικόνα 2.12:** Τομή αυτόκλειστο φούρνου Autoclave. [3]

Πριν από την εισαγωγή του υπό διαμόρφωση συνθέτου στον αυτόκλειστο, προηγείται μια διαδικασία προετοιμασίας του συστήματος καλουπιού-υλικού.

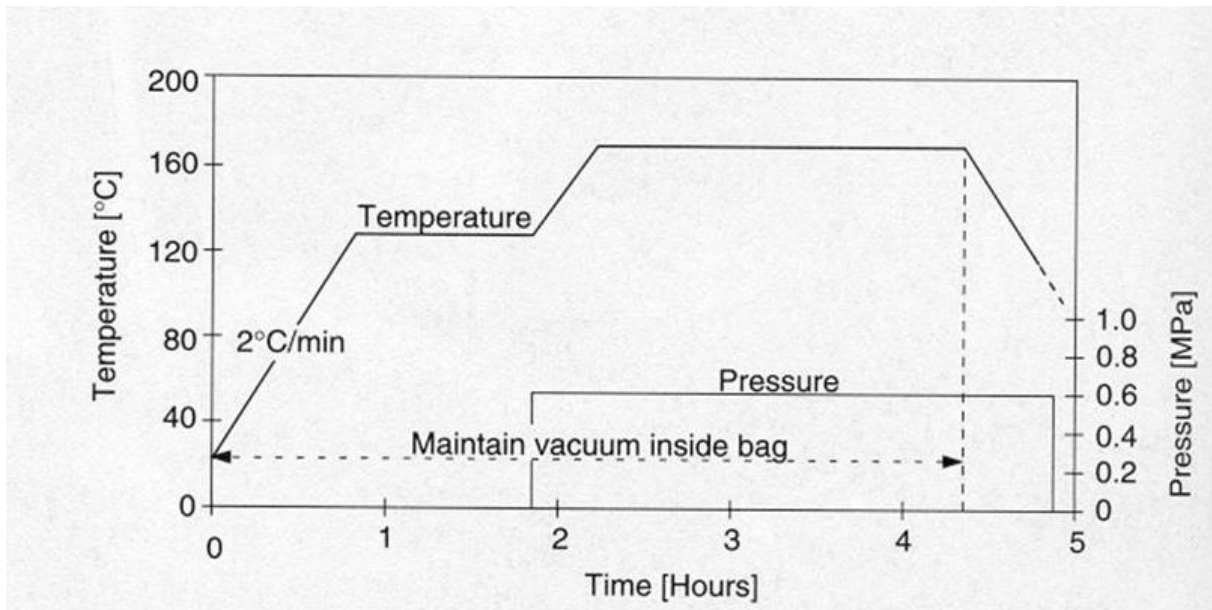
Αρχικά, καθαρίζεται με ακετόνη ή άλλο πτητικό διαλύτη (ισοπροπανόλη κλπ) η επιφάνεια της πλάκας πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το σύνθετο. Ακολουθεί η επιστρωση της πλάκας με κάποιο αντικολλητικό υλικό, ή επιστρώνεται ένα φύλλο (peel-ply) από νάιλον ή ύφασμα ινών γυαλιού που θα δώσει μια καλή εξωτερική επιφάνεια υλικού. Στη συνέχεια, επιστρώνεται το σύνθετο υλικό σε οποιαδήποτε μορφή του. Εάν πρόκειται για φύλλα συνθέτου υλικού, ακολουθεί άλλη μια στρώση peel-ply. Η προετοιμασία συνεχίζεται με την επιστρωση ενός φύλλου γνωστού σαν separator που έχει αντικολλητικές ιδιότητες και απαγορεύει το κόλλημα του συνθέτου με το επόμενο φύλλο που επιστρώνεται. Το υλικό του separator είναι συνήθως Teflon (PTFE). Μετά, τοποθετείται ένα φύλλο υφάσματος (πχ από ίνες γυαλιού) που απορροφά τυχόν περίσσεια ρητίνης που ρέει από το σύνθετο προς τα έξω. Το φύλλο αυτό ονομάζεται bleeder. Στη συνέχεια, επιστρώνεται μια λεπτή μεταλλική πλάκα και ένα φύλλο διαπνοής (air-breather), μέσω του οποίου απομακρύνονται τυχόν αέρια μονομερή και πλέον το όλο σύστημα των στρώσεων περιβάλλεται με μεταλλικές μπάρες (bars) για να συγκρατούνται οι στρώσεις των φύλλων. Η προετοιμασία κλείνει με την

επίστρωση του καλύμματος κενού (vacuum bag) που κολλάται περιφερειακά στην πλάκα με ειδική ταινία ελαστομερικής σιλικόνης υψηλής θερμικής αντοχής (tacky tape). Στην Εικόνα 2.13 φαίνονται οι στρώσεις κατά την προετοιμασία του υλικού.

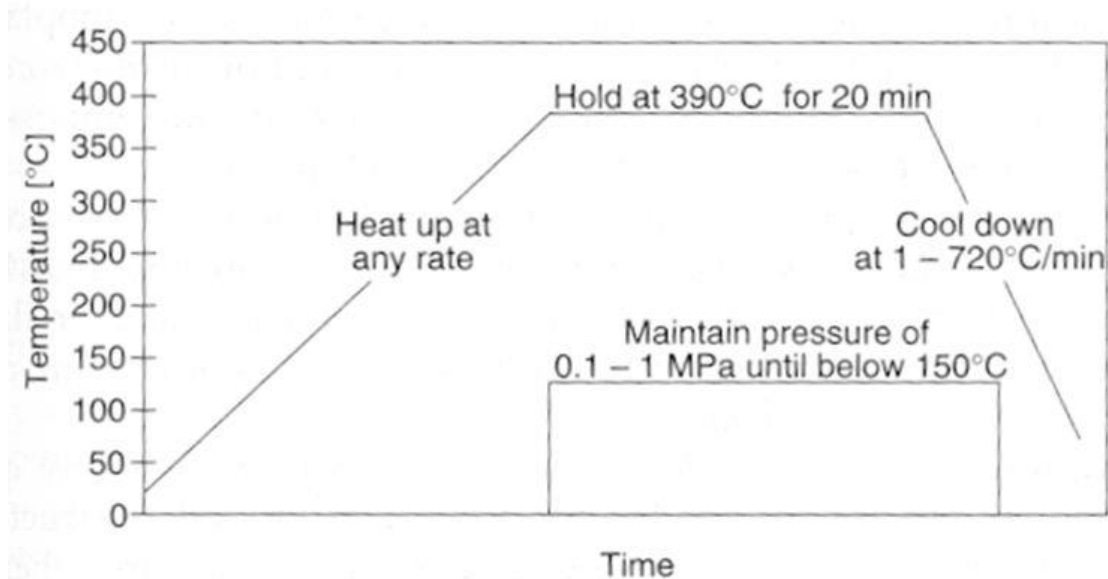


**Εικόνα 2.13:** Οι στρώσεις κατά την προετοιμασία του Vacuum Bag. [3]

Η καμπύλη μορφοποίησης σε αυτόκλειστο φούρνο για σύνθετα εποξειδικά και θερμοπλαστικά, φαίνονται στις Εικόνες 2.14, 2.15. Η μορφοποίηση αρχίζει τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Τότε, αρχίζει η άσκηση κενού κάτω από το κάλυμμα κενού. Επίσης, τότε αρχίζει η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι αυτή να ανέλθει σε μια επιθυμητή τιμή  $T$ . Τη χρονική στιγμή  $t_p$  εφαρμόζεται στο θάλαμο καθορισμένη πίεση  $P$ . Στην τιμή αυτή θα σταθεροποιηθεί για περίπου μια ή δύο ώρες. Το ιξώδες της ρητίνης αρχικά μειώνεται καθώς το πολυμερές περνά την  $T_g$  (θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης), αλλά στη συνέχεια αυξάνει καθώς αρχίζει ο πολυμερισμός της. Η πίεση εφαρμόζεται για να εξαναγκαστεί η περίσσεια της ρητίνης να βγει από τα φύλλα του συνθέτου.



**Εικόνα 2.14:** Τυπικές καμπύλες μορφοποίησης σε αυτόκλειστο φούρνο για εποξειδικά σύνθετα υλικά. [3]



**Εικόνα 2.15:** Τυπικές καμπύλες μορφοποίησης σε αυτόκλειστο φούρνο για θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά. [3]

Ενώ εφαρμόζεται σταθερή πίεση στο σύνθετο, φτάνει η χρονική στιγμή όπου ξεκινά η ψύξη. Όταν ολοκληρωθεί η ψύξη, σταματά η άσκηση πίεσης κενού και μπορεί να ανοίξει ο αυτόκλειστος και να αφαιρεθεί το εξάρτημα.

Οι παραπάνω καμπύλες είναι διαφορετικές από υλικό σε υλικό καθώς και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στον προσδιορισμό της μάζας της ρητίνης που ρέει εκτός του σύνθετου, ώστε να γνωρίζουμε μετά το πέρας της



μορφοποίησης την τελική περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε ρητίνη. Για τα συνήθη prepreg, σχεδόν 10% της ρητίνης ρέει εκτός του καλουπιού. Η ρητίνη που ρέει εκτός καλουπιού έχει και ένα θετικό αποτέλεσμα, επειδή διώχνει τον αέρα που είναι τυχόν παγιδευμένος στο σύνθετο εκτός καλουπιού, περιορίζοντας τα κενά που θα δημιουργούνται στη δομή του.

Για τη θεωρητική μελέτη της μεθόδου, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που αναφέρονται στις επιμέρους διεργασίες της μορφοποίησης. Οι A.Loss και G. Springer έχουν αναπτύξει ένα μοντέλο που εξομοιώνει μαθηματικά τη διεργασία μορφοποίησης σε αυτόκλειστο κλίβανο. Αποτελείται από τρία επιμέρους μοντέλα: το θερμικό, το ροϊκό και το μοντέλο κενών. Το θερμικό μοντέλο περιγράφει το θερμοκρασιακό πεδίο στο σύνθετο σαν συνάρτηση του χρόνου και της γεωμετρίας και το ροϊκό μοντέλο υπολογίζει τη ροή της ρητίνης εκτός συνθέτου καθώς και την τελική κατανομή του πάχους του υλικού. Τέλος, το μοντέλο των κενών καθορίζει την κατανομή, το μέγεθος, την πίεση και τη θερμοκρασία των κενών στο υλικό σαν συνάρτηση της θέσης τους και του χρόνου.

Με βάση την ανάλυση της διεργασίας στα επιμέρους στάδιά της, από τα τρία υπομοντέλα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα για τη μορφοποίηση με autoclave.

α) Η θερμοκρασία του κλιβάνου πρέπει να κινείται σε αυστηρά καθορισμένα όρια διότι κινδυνεύει να καταστραφεί το υλικό σε αντίθετη περίπτωση. Επειδή ο πολυμερισμός είναι εξώθερμη αντίδραση, η θερμοκρασία στο σύνθετο φτάνει κάποια μέγιστη τιμή. Εάν το υλικό έχει μεγάλο πάχος, τότε λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητάς του δεν αποβάλλει εύκολα θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας. Για σύνθετο από 64 φύλλα και ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 2.8°C/min, το άνω επιτρεπόμενο όριο των 180°C δεν ξεπερνάται με αύξηση του ρυθμού σε 28°C/min. Αν όμως οι στρώσεις διπλασιαστούν σε 128, τότε με την ίδια αύξηση του ρυθμού, η θερμοκρασία στο σύνθετο ξεπερνά το επιτρεπόμενο όριο.

β) Η πίεση πρέπει να έχει ορισμένο ρυθμό αύξησης και τέτοιες τιμές ώστε να υποβοηθά την περίσσεια ρητίνης και μόνο αυτή να φύγει προς τα bleeders, πριν αρχίσει το gel-time του υλικού. Εάν η πίεση εφαρμοστεί πολύ νωρίς θα υπάρξει απώλεια ρητίνης, ενώ αν εφαρμοστεί πολύ αργά κοντά στο gel-time, δεν θα ρεύσει όλη η περίσσεια.

γ) Πρέπει να γίνεται ομοιόμορφος πολυμερισμός ρητίνης στο σύνθετο, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται με ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας σε αυτό. Στο τέλος της διεργασίας, πρέπει στη μάζα του σύνθετου να έχει ξεπεραστεί ένας ορισμένος βαθμός πολυμερισμού.

δ) Ο χρόνος πολυμερισμού πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Η παράμετρος αυτή ελέγχεται από το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας.

ε) Πρέπει στο υλικό να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα κενά, προδιαγραφή που πληρείται με την εφαρμογή αρκετά μεγάλης πίεσης στο σύνθετο ώστε να διαλυθούν τα κενά και να διαφύγουν τα αέρια εκτός συνθέτου. Πέραν της μεθόδου του αυτόκλειστου φούρνου, υπάρχει η μορφοποίηση υπό πίεση ή υπό κενό και η υπερπλαστική μορφοποίηση.

Ένα παράδειγμα autoclave, είναι αυτός της εταιρείας Riba Composites. Ο συγκεκριμένος, είναι ένας αυτόκλειστος ο οποίος δημιουργήθηκε για την επεξεργασία συστατικών ινών άνθρακα ιδιαίτερα κατάλληλα για αεροναυπηγικές και αεροδιαστημικές παραγωγές. Είναι ο έκτος κατά σειρά αυτόκλειστος φούρνος της Riba Composites, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι 2,2mt x 04,5mt (200°C-10bar). [1]



**Εικόνα 2.16:** Ο αυτόκλειστος φούρνος (autoclave) της Riba Composites. [3]



**Εικόνα 2.17:** Αυτόκλειστος Melco Steel Inc., California Azusa. [3]



**Εικόνα 2.18:** Autoclave at the new 777X composite wing center, Everett Washington. [3]



**Εικόνα 2.19:** Autoclave at the new 777X composite wing center, Everett Washington. [3]



**Εικόνα 2.20:** Boeing 777X. [3]



**Εικόνα 2.21:** Boeing 777X. [3]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Η Μέθοδος Z-pinning

Το Z-pinning, είναι μια τεχνική για την εισαγωγή ενισχυτικών ινών κατά μήκος της κατεύθυνσης Z συνεχών πλαστικών υλικών ενισχυμένων με ίνες. Τα Z-rins μπορούν να είναι κατασκευασμένα από μέταλλο ή από προκατασκευασμένες μονοκατευθυνόμενες σύνθετες ίνες. Έχουν σχεδιαστεί για χρήση στην τεχνολογία pre-preg. Υπάρχουν εκτεταμένες πειραματικές ενδείξεις ότι η τεχνική αυτή βελτιώνει δραματικά την αντίσταση της σύνθετης δομής στην αποκόλληση. Η Εικόνα 3.1 δείχνει ένα πείρο Z τοποθετημένο ανάμεσα στις ίνες του υλικού. Ο πείρος απλώνει τις ίνες και δημιουργεί ένα διάκενο οβάλ σχήματος, το οποίο γεμίζει με ρητίνη. Ο πείρος ουσιαστικά εμποδίζει το σύνθετο υλικό να αποκολληθεί. Όταν εφαρμόζεται ένα φορτίο, οι ρωγμές τυπικά σχηματίζονται κατά μήκος της γραμμής του ανοίγματος.

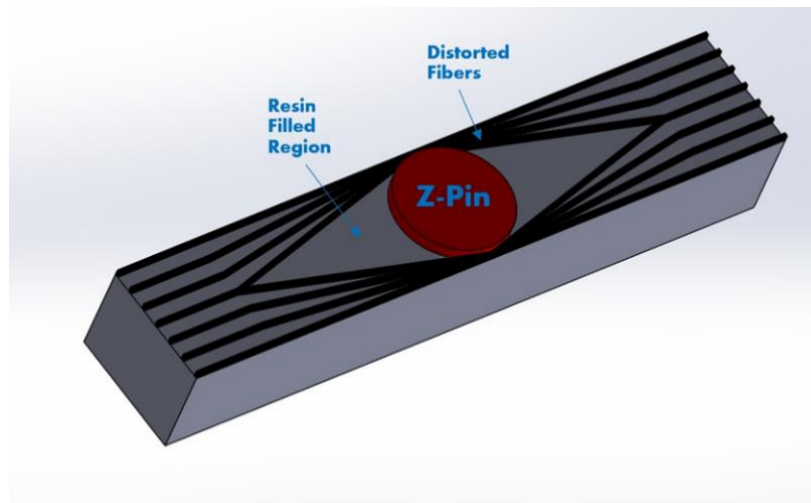
Οφέλη: Είναι μια ευέλικτη τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά υλικά που θα επωφεληθούν από την προστιθέμενη αντοχή και ανθεκτικότητα. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, όταν χρησιμοποιείται σε υλικά που υπόκεινται σε αποκόλληση, επειδή τα Z-rins μπορούν να εξουδετερώσουν αυτό το πρόβλημα. Έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή αεροσκαφών για να προσθέσει κατά κάποιον τρόπο, δύναμη. Με το Z-pinning των υλικών σε ένα αεροσκάφος, όπως τα πτερύγια, μπορεί να υπάρξει πολύ μεγαλύτερη αντοχή στη ζημιά κατά τη διάρκεια της πτήσης. Επίσης, εάν το αεροσκάφος έχει μια μικρή ρωγμή, το Z-pinning θα το αποτρέψει από καταστροφική ζημιά.

Η τεχνική αυτή επιτρέπει στα μέρη των ινών άνθρακα να παραμείνουν ελαφριά σε βάρος, ενώ ταυτόχρονα εξακολουθούν να είναι ισχυρά και πολύ ανθεκτικά. Η δοκιμή Z-rin διαφορετικού μεγέθους έδειξε ότι οι μεγαλύτερα pins οδηγούν σε αύξηση της αντοχής. Μια αύξηση μόνο κατά 1% στο μέγεθος του Z-rin, αυξάνει την ανθεκτικότητα κατά 6 έως 25 φορές περισσότερο. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι πολύ μεγάλο μέγεθος πείρου, μπορεί να διαταράξει τις ίνες του υλικού και να τις οδηγήσει σε καταστροφή, κοινώς σπάσιμο των ινών.

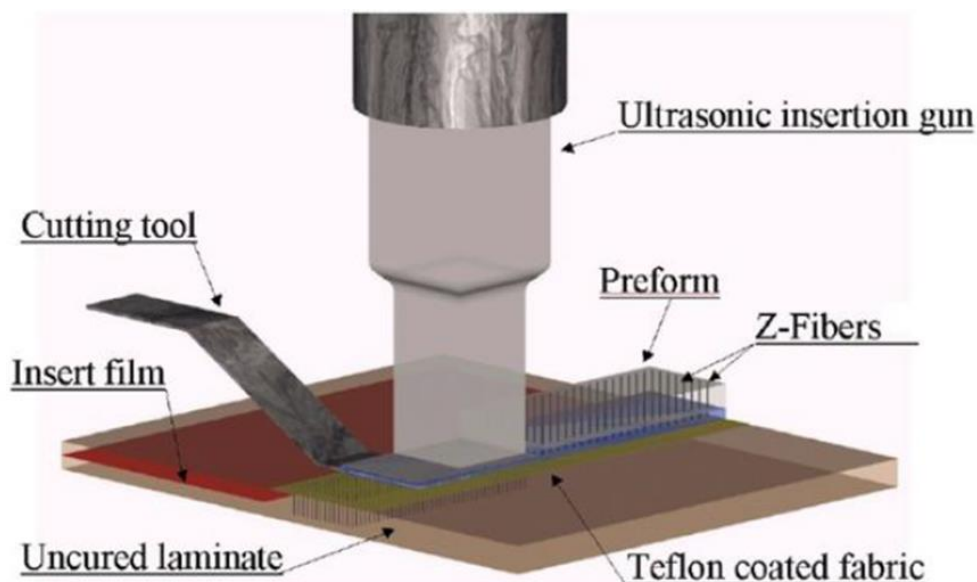
Παραγωγή: Υπάρχουν πολλοί τρόποι παρασκευής πέρων Z. Τυπικά τα Z-rins έχουν οδηγηθεί πρώτα σε προ-σκλήρυνση, και στη συνέχεια έχουν εισαχθεί σε σύνθετα υλικά. Μια διαδικασία, συνίσταται στην έλξη μιας δέσμης συνεχών ινών μέσω ενός λουτρού από υγρή ρητίνη, χρησιμοποιώντας μια μηχανή εξωθήσεως. Η ίνα έπειτα εξάγεται από το λουτρό διαμέσου της μήτρας, η οποία δημιουργεί το σχήμα και το μέγεθος της περόνης. Η καρφίτσα τοποθετείται στη συνέχεια με κάθετο προσανατολισμό σε αφρό για να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Ο ακροδέκτης μπορεί να είναι επικαλυμμένος ή επεξεργασμένος ως πρόσθετο βήμα ανάλογα με την εφαρμογή. Αυτή η διαδικασία είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς τρόπους παραγωγής των Z-rins, επειδή μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε διαφορετικά μεγέθη πέρων.

Κατασκευή: Οι πείροι, έχουν πολλούς τρόπους να εισαχθούν στο υλικό επιλογής. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί υπερηχητικό σφυρί. Το σφυρί συμπιέζει τον αφρό που περικλείει τους πείρους και τους ωθεί μέσα στο υλικό. Το σφυρί

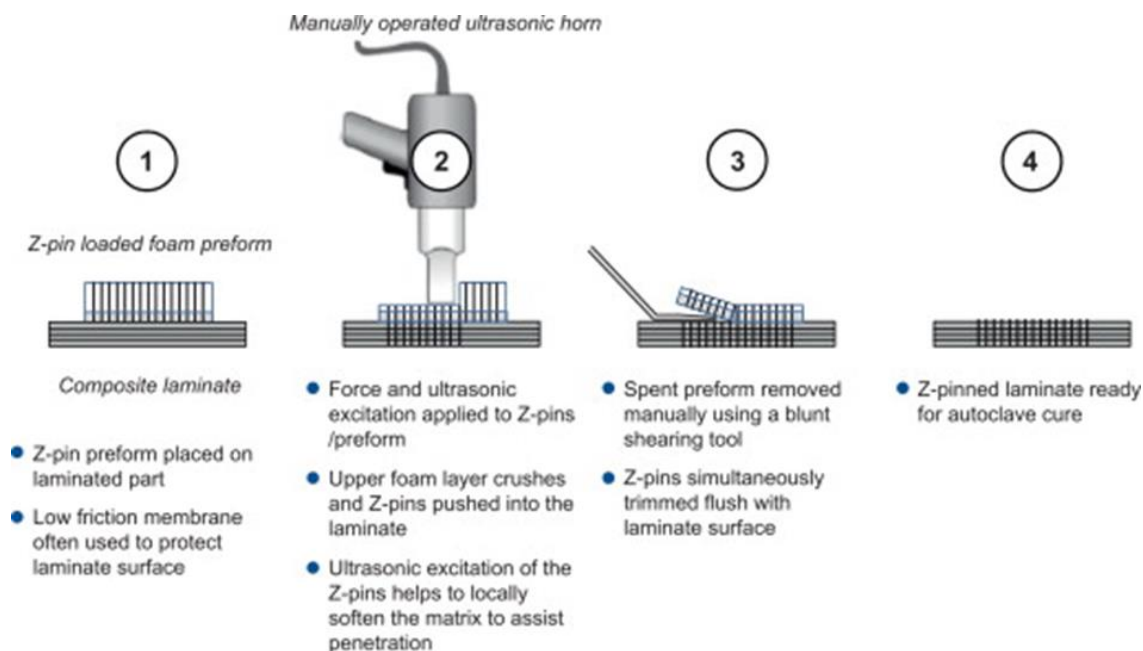
προκαλεί δονήσεις υψηλής συχνότητας στον πύρο καθώς συμπιέζεται. Η δονητική λοξοτομημένη άκρη των καρφισιών θερμαίνει τοπικά, και μαλακώνει τη ρητίνη, επιτρέποντας στις ίνες Z να διεισδύσουν στο πρόπλασμα με ελάχιστη διάσπαση των μακρών ινών. Ο υπόλοιπος πύρος και το έλασμα πάνω από την επιφάνεια, αφαιρούνται για να δημιουργηθεί μια ομαλή και ομοιόμορφη επιφάνεια. Η επιφάνεια μπορεί να τελειοποιηθεί με μια επίστρωση για να σφραγίσει τα pins μέσα στο υλικό. Ένα χειροκίνητο υπερηχητικό πιστόλι μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση των pins σε παραγωγή μικρής κλίμακας. Αυτό είναι ιδανικό για τη δοκιμή υλικών που περιέχουν Z-pins, επειδή μπορούν εύκολα να εισαχθούν σε οποιαδήποτε θέση στο υλικό. [5]



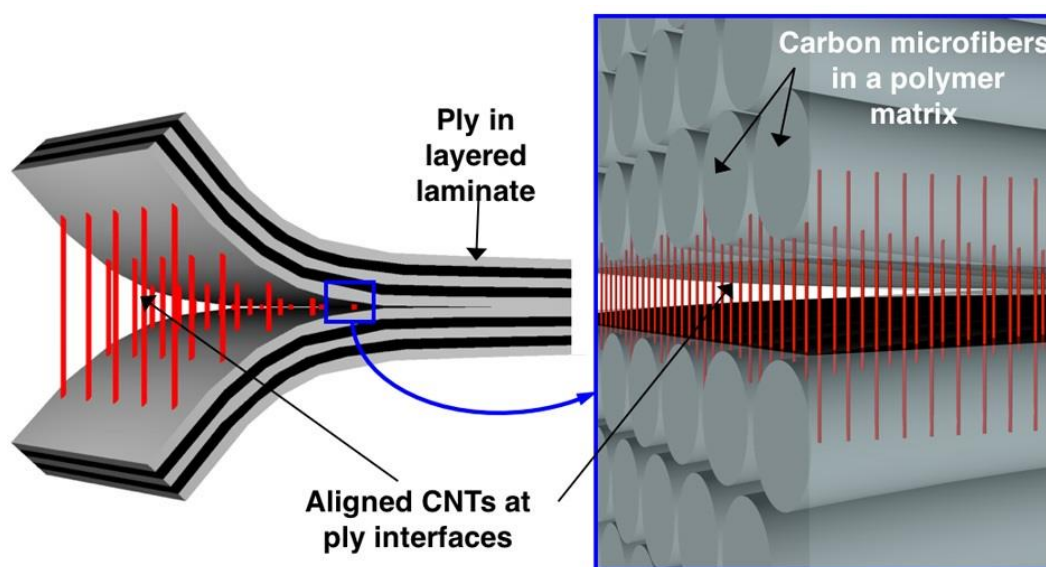
Εικόνα 3.1: Z-pin ανάμεσα στις ίνες υλικού. [3]



Εικόνα 3.2: Τοποθέτηση Z-pins με υπερηχητικό σφυρί σε υλικό. [3]



**Εικόνα 3.3:** Μέθοδος εισαγωγής Z-pins με υπερήχους. [3]



**Εικόνα 3.4:** Μικροϊνες άνθρακα σε πολυμερική μήτρα. [3]

### 3.1 Η τεχνική Z-pinning στα αεροσκάφη

Τα νέα επιβατικά αεροσκάφη Airbus και Boeing είναι πρωτίστως κατασκευασμένα από εξελιγμένα σύνθετα υλικά, όπως το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (carbon fiber reinforced plastic), εξαιρετικά ελαφριά, ανθεκτικά υλικά που μειώνουν το συνολικό βάρος του επιπέδου κατά 20% σε σύγκριση με τα αεροσκάφη τα οποία είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Τέτοια ελαφριά αεροσκάφη μεταφράζονται απευθείας σε εξοικονόμηση



καυσίμων, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την προτίμησή τους. Αλλά τα σύνθετα υλικά είναι επίσης πολύ ευάλωτα. Ενώ το αλουμίνιο μπορεί να αντέξει σχετικά μεγάλες επιπτώσεις πριν από τη ρωγμή, τα πολλά στρώματα στα σύνθετα υλικά μπορούν να σπάσουν λόγω μικρών συγκρούσεων-ρωγμών.

Οι μηχανικοί αεροδιαστημικής του MIT, βρήκαν έναν τρόπο να συνδέσουν τα σύνθετα στρώματα με τέτοιο τρόπο ώστε το υλικό που προκύπτει να είναι ουσιαστικά ισχυρότερο και πιο ανθεκτικό σε ζημιά από άλλα προηγμένα σύνθετα υλικά. Στερέωσαν τα στρώματα των σύνθετων υλικών μαζί χρησιμοποιώντας νανοσωλήνες άνθρακα, οι οποίες παρά το πολύ μικρό τους μέγεθος, είναι εξαιρετικά ισχυρές. Ενσωμάτωσαν Z-rins (μικροσκοπικούς νανοσωλήνες άνθρακα) μέσα σε μια πολυμερική μήτρα τύπου κόλλας, πιέζοντας το πλέγμα μεταξύ των στρωμάτων των σύνθετων ινών άνθρακα. Οι νανοσωλήνες λειτούργησαν μέσα στις ρωγμές κάθε σύνθετου στρώματος, σαν ικρίωμα για να συγκρατούνται τα στρώματα μαζί. Σε πειράματα για τη δοκιμή της αντοχής του υλικού, διαπιστώθηκε ότι σε σύγκριση με τα υπάρχοντα σύνθετα υλικά, τα ραμμένα σύνθετα υλικά ήταν 30% ισχυρότερα, αντέχοντας μεγαλύτερες δυνάμεις πριν διαλυθούν.

Ο Roberto Guzman (επικεφαλής της εργασίας ως μεταδιδακτορικού μεταπτυχιακού φοιτητή στο Τμήμα Αεροναυτικής και Αστροναυτικής - AeroAstro), συμπέρανε ότι η βελτίωση μπορεί να οδηγήσει σε ισχυρότερα, ελαφρύτερα εξαρτήματα του αεροπλάνου, ιδιαίτερα εκείνα που απαιτούν καρφιά ή μπουλόνια, τα οποία μπορούν να σπάσουν συμβατικά σύνθετα υλικά. Ο ίδιος επίσης, τόνισε ότι η συγκεκριμένη διαδικασία έχει αρκετά στάδια βελτίωσης και πως στο μέλλον θα υπάρχουν ακόμα πιο ελαφριά αεροσκάφη, πράγμα που σημαίνει εξοικονόμηση καυσίμων, οικονομία και καλύτερο περιβάλλον.

Τα σύνθετα υλικά σήμερα αποτελούνται από στρώματα οριζόντιων ινών άνθρακα, που συγκρατούνται μεταξύ τους με κόλλα πολυμερούς, την οποία ο Brian Wardle (καθηγητής του AeroAstro που συμμετέχει στη μελέτη) χαρακτηρίζει ως “πολύ, πολύ αδύναμη, προβληματική περιοχή”. Οι προσπάθειες ενίσχυσης αυτής της περιοχής κόλλας, περιλαμβάνουν τις μεθόδους ζεύξεως και τρισδιάστατης ύφανσης, που περιλαμβάνουν με τη σειρά τους την προσκόλληση ή την ύφανση δεσμών ινών άνθρακα μέσω σύνθετων στρωμάτων, παρόμοια με την ώθηση των καρφιών.

Σύμφωνα με τον Wardle, “ένα καρφί είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερο από τις ίνες άνθρακα. Έτσι, όταν οδηγούνται μέσα από το σύνθετο υλικό, σπάνε χιλιάδες ίνες άνθρακα και δημιουργείται βλάβη στο σύνθετο υλικό. Είμαστε σε θέση να βάλουμε αυτούς τους νανοσωλήνες, χωρίς να διαταράσσουμε τις μεγαλύτερες ίνες άνθρακα, και αυτό διατηρεί τη δύναμη του σύνθετου. Αυτό που μας βοηθά να ενισχύσουμε τη δύναμη, είναι ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν 1000 φορές περισσότερη επιφάνεια από τις ίνες άνθρακα, γεγονός που τους επιτρέπει να συνδεθούν καλύτερα με το πολυμερές πλέγμα”.

Οι Guzman και Wardle κατέληξαν σε μια τεχνική για την ενσωμάτωση ενός ικρίωματος νανοσωλήνων άνθρακα μέσα στην κόλλα πολυμερούς. Πρώτα, δημιούργησαν ένα «δάσος» κάθετα ευθυγραμμισμένων νανοσωλήνων άνθρακα, ακολουθώντας μια διαδικασία που η ομάδα του Wardle είχε προηγουμένως αναπτύξει. Στη συνέχεια, μεταβίβασαν το «δάσος» σε ένα κολλώδες, μη σκληρυμένο σύνθετο στρώμα και επαναλάμβαναν τη διαδικασία, για να

δημιουργήσουν μια στοίβα από 16 σύνθετα στρώματα (φύλλα) με νανοσωλήνες άνθρακα κολλημένους μεταξύ κάθε στρώματος.

Για να δοκιμάσουν την αντοχή του υλικού, η ομάδα πραγματοποίησε μια δοκιμή τάνυσης -μια τυποποιημένη δοκιμή που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αεροδιαστημικών εξαρτημάτων- όπου οι ερευνητές έβαλαν ένα μπουλόνι μέσα από μια τρύπα στο σύνθετο, και έπειτα το έσπασαν. Ενώ τα υπάρχοντα σύνθετα σπάνε συνήθως κάτω από τέτοια ένταση, η ομάδα διαπίστωσε ότι τα ραμμένα σύνθετα ήταν ισχυρότερα, ικανά να αντέξουν κατά 30% περισσότερη δύναμη πριν από τη ρωγμή.

Οι ερευνητές πραγματοποίησαν επίσης μια δοκιμή συμπίεσης ανοιχτής οπής, εφαρμόζοντας δύναμη για να συμπιεστεί η τρύπα του μπουλονιού. Στην περίπτωση αυτή, το ραμμένο σύνθετο κατανάλωνε 14% περισσότερη δύναμη πριν σπάσει, σε σύγκριση με τα υπάρχοντα σύνθετα υλικά. “Οι βελτιώσεις της αντοχής υποδηλώνουν ότι αυτό το υλικό θα είναι πιο ανθεκτικό σε οποιοδήποτε είδος βλάβης”, λέει ο Wardle. “Και δεδομένου ότι η πλειοψηφία των νεότερων αεροσκαφών είναι πάνω από το 50% σύνθετα κατά βάρος, η βελτίωση αυτών των τελευταίας τεχνολογίας σύνθετων υλικών έχει πολύ θετικές επιπτώσεις στη δομική απόδοση των αεροσκαφών”.

Ο Stephen Tsai, επίκουρος καθηγητής αεροναυπηγικής και αστροναυτικής στο MIT, αναφέρει ότι τα προηγμένα σύνθετα υλικά είναι ασύγκριτα στην ικανότητά τους να μειώνουν το κόστος των καυσίμων και συνεπώς τις εκπομπές αεροπλάνων. “Με το εγγενώς μικρό βάρος τους, δεν υπάρχει τίποτα στον ορίζοντα που να μπορεί να ανταγωνιστεί με σύνθετα υλικά για τη μείωση της ρύπανσης για εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη”, λέει ο Tsai, ο οποίος δεν συνέβαλε στη μελέτη. Ωστόσο, αναφέρει ότι η αεροναυπηγική βιομηχανία έχει αποφύγει την ευρύτερη χρήση αυτών των υλικών, κυρίως λόγω της έλλειψης εμπιστοσύνης στην αντοχή των υλικών σε ζημιές. Το έργο του καθηγητή Wardle απευθύνεται άμεσα στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να βελτιωθεί η ανοχή της βλάβης και, ως εκ τούτου, πώς μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη χρήση της εγγενώς ασύγκριτης απόδοσης σύνθετων υλικών. Η εργασία αυτή υποστηρίχθηκε από τις Airbus Group, Boeing, Embraer, Lockheed Martin, Saab AB, Spirit AeroSystems Inc., Textron Systems, ANSYS, Hexcel και TohoTenax μέσω της κοινοπραξίας NECST του Στρατού των ΗΠΑ. [4]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Σύνθετα Υλικά και Αεροσκάφη

#### 4.1 Εισαγωγή

Από τις αρχές τους 2000 μέχρι και σήμερα, η εφαρμογή των υψηλής απόδοσης ινωδών σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας στις κατασκευές των αεροσκαφών έχει επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό, αξιοποιώντας την εξοικονόμηση βάρους καθώς και άλλα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα υλικά αυτά. Τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα που ενισχύουν μήτρα εποξειδικής ρητίνης, είναι από τα πιο σημαντικά σύνθετα οπότε και αυτό στο οποίο θα επεκταθούμε περισσότερο.

Εκτός από την εξοικονόμηση βάρους, τα οφέλη των PMC (polymer matrix composites) υψηλής απόδοσης συγκριτικά με παρόμοιες κατασκευές από μέταλλα -κυρίως κράματα αλουμινίου-, περιλαμβάνουν εξαιρετικά βελτιωμένη αντίσταση σε ρωγμές από κόπωση, ανοσία στη διάβρωση, και την ικανότητα να σχηματίζουν μεγάλα ολοκληρωμένα στοιχεία, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τον αριθμό των αρθρώσεων, και μειώνοντας τη δομική πολυπλοκότητα σε ένα αεροσκάφος.

Εκτός από τα οφέλη, το υψηλό κόστος των ακατέργαστων υλικών και το υψηλό κόστος της κατασκευής των εξαρτημάτων αεροσκάφους που είναι από σύνθετα υλικά, είναι οι κύριοι λόγοι για την αρχικά αργή εφαρμογή, και παραμένουν εμπόδια για περαιτέρω εφαρμογές. Οι υπόλοιποι παράγοντες, περιλαμβάνουν το υψηλό κόστος της πιστοποίησης πρωτογενών σύνθετων κατασκευών, χαμηλότερη αντίσταση της μηχανολογικής καταστροφής (ζημίας), πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και περιορισμούς θερμοκρασίας. Ωστόσο, με τη συνεχή ανάπτυξη στα μέταλλα κατασκευών, ο ανταγωνισμός μεταξύ των σύνθετων υλικών και των κραμάτων αλουμινίου θα συνεχίσει να είναι έντονος.

Η ανάπτυξη στα κράματα αλουμινίου, περιλαμβάνει βελτιωμένη σκληρότητα, αντίσταση στη διάβρωση σε συμβατικά κράματα, νέα πολύ ελαφρύτερα κράματα, χαμηλού κόστους αεροδιαστημικά χυτά, μηχανολογικά κράματα υψηλών θερμοκρασιών και υπερπλαστικές διαμορφώσεις. Η ανάπτυξη σε κράματα τιτανίου, περιλαμβάνει τη χρήση προσχηματισμένης σκόνης (πούδρας) και σύνδεση υπερπλαστικού με διάχυση ή διαμόρφωση. Επιπλέον, οι προηγμένες τεχνικές συναρμογής όπως το λέιζερ ή η συγκόλληση τριβής, η αυτοματοποιημένη τεχνική πριτσινίσματος και οι υψηλής ταχύτητας κατεργασίες (αριθμητικά ελεγχόμενες - NC), κάνουν τις μεταλλικές κατασκευές πιο προσιτές και πιο οικονομικές.

Μια πρόσφατη πρόκληση για υψηλής απόδοσης ινώδη σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας, προέρχεται από μια νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί 3D εκτύπωση σε συνδυασμό με σύντηξη με λέιζερ, με σκοπό τη διαμόρφωση εξαρτημάτων τιτανίου και άλλων κραμάτων. Αυτή η τεχνολογία θα είναι ιδιαίτερα οικονομική για σχετικά χαμηλής έντασης και υψηλής αξίας εφαρμογές, όπως είναι τα εξαρτήματα κινητήρα στροβίλου (στροβιλοκινητήρα). Παρά αυτές τις εξελίξεις και τις δυνατότητες βελτίωσης των σύνθετων και συμβατικών κραμάτων, στην πραγματικότητα οι κατασκευές και οι κινητήρες των αεροσκαφών θα συνεχίσουν να

είναι ένας συνδυασμός υλικών, περιλαμβάνοντας διάφορα σύνθετα υλικά και μια γκάμα από κράματα μετάλλων, με την ισορροπία αυτών των δύο να εξαρτάται τόσο από πλευράς κατασκευής, όσο και από πλευράς οικονομικών. [4,7]

#### 4.1.1 Παράγοντες για βελτιωμένα υλικά αεροσκαφών

Η εξοικονόμηση του βάρους είναι ένας από τους πολλούς σημαντικούς παράγοντες για την ανάπτυξη των υλικών των αεροσκαφών. Τα διάφορα κίνητρα για την εισαγωγή ενός νέου υλικού παρουσιάζονται στον Πίνακα 11. Στον Πίνακα 12 βλέπουμε κατά προσέγγιση την εξοικονόμηση κόστους ανά μονάδα βάρους για μια σειρά τύπων αεροσκαφών. Η ασφάλεια και το κόστος είναι σημαντικοί αλληλένδετοι παράγοντες που αξιολογούνται κατά την επιλογή νέων υλικών για εφαρμογές σε αεροσκάφη.

Παρακάτω αναφέρονται οι κύριοι παράγοντες κόστους και ασφαλείας για την αξιολόγηση εναλλακτικών υλικών.

1) Κόστος προμήθειας: Κόστος του υλικού και υλικά εξαρτημάτων που έχουν απορριφθεί, κόστος κατασκευής, συμπεριλαμβανομένων των αναλώσιμων, κόστος συναρμολόγησης, όπως ενώσεις και προστασία της επιφάνειας.

2) Κόστος υποστήριξης διά βίου: Κόστος επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευής, συμπεριλαμβανομένης και της απώλειας χρήσης κατά τη διάρκεια αυτών των δραστηριοτήτων. Οι παράγοντες είναι:

α) Αντοχή: Αντίσταση στην κυκλική πίεση, περιβαλλοντικός υποβιβασμός, και καταστροφή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής.

β) Ανοχή ζημιών: Υπολειμματική αντοχή του συγκεκριμένου υλικού, η οποία οδηγεί σε τυπική καταστροφή. Το εξάρτημα πρέπει να αντέχει τα φορτία σχεδιασμού χωρίς αστοχία και χωρίς υπερβολική παραμόρφωση.

γ) Συντηρησιμότητα: Η κατασκευή πρέπει να ελέγχεται εύκολα για σημαντικές ζημιές και πρέπει να επισκευάζεται εντός αποδεκτών ορίων κατασκευής και αντοχής, με αποδεκτό κόστος και χρονικό πλαίσιο. [4]

**Πίνακας 11:** Οδηγοί και οφέλη από βελτιωμένα υλικά για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Μείωση βάρους	Βελτιωμένες ιδιότητες υλικού
Αυξημένο εύρος	Ομαλότερη και πιο αεροδυναμική μορφή
Μειωμένο κόστος καυσίμου	Ειδικές αεροελαστικές ιδιότητες
Υψηλότερο ωφέλιμο φορτίο	Ευρύτερη ανοχή θερμοκρασίας
Αυξημένη ευελιξία	Αυξημένη ανοχή ζημιών
	Μειωμένη ανισχευσιμότητα

Μειωμένο κόστος κατασκευής και συναρμολόγησης	Μειωμένο κόστος υποστήριξης εφόρου ζωής
Μειωμένο κόστος κτήσης	Γρήγορη επισκευή χαμηλού κόστους
Μειωμένο (τρέχον) λειτουργικό κόστος	Αντίσταση στην κόπωση και τη διάβρωση
	Αντίσταση σε μηχανολογική καταστροφή

**Πίνακας 12:** Παράγοντες και οφέλη από τα βελτιωμένα υλικά για αεροπορικές κατασκευές.

Μικρό πολιτικό	1
Πολιτικό ελικόπτερο	2
Στρατιωτικό ελικόπτερο	5
Μεγάλο μεταφορικό	4
Μεγάλο εμπορικό	6
Προηγμένο μαχητικό	6
VTOL	10
SST	19
Διαστημικό όχημα	600

\*Κοστολόγηση βάσει ορισμένων δεδομένων στα τέλη του 1980, αυτές οι εκτιμήσεις κανονικοποιούνται σε μικρές πολιτικές εφαρμογές. VTOL=vertical takeoff and landing, SST=supersonic transport

#### 4.1.2 Ινώδη σύνθετα υψηλής απόδοσης

Τα ινώδη σύνθετα υλικά μπορούν να παρέχουν εξαιρετικές βελτιώσεις σε σχέση με τα συμβατικά κράματα μετάλλων, που χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα και κατασκευές αεροσκαφών. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 13, η κοινή προσέγγιση είναι να χρησιμοποιούνται συνεχείς, δυνατές, δύσκαμπτες ίνες, για να ενισχύουν πιο αδύναμες και λιγότερο δύσκαμπτες μήτρες. Η ίνα και η μήτρα μπορούν να είναι πολυμερικές, μεταλλικές, κεραμικές, ή γυάλινες. Οι σύνθετες κατασκευές είναι διατεταγμένες ή προσαρμοσμένες κατά τη διάρκεια της κατασκευής των εξαρτημάτων, με τις ίνες προσανατολισμένες σε διάφορες κατευθύνσεις και επαρκείς συγκεντρώσεις, έτσι ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη δύναμη και ακαμψία. Στα αεροσκάφη, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ελασματοποιημένης ή σε μορφή φύλλων κατασκευής, που αποτελείται από στρώσεις που οι ίνες είναι μη κατευθυντικές ή αμφίδρομες. Κάτι τέτοιο μπορεί να εφαρμοστεί στο φτερό του αεροσκάφους. Εναλλακτικά, οι ίνες μπορούν να είναι διατεταγμένες με τεχνικές όπως ύφανση, πλέξη, και περιέλιξη νημάτων. [4,8]

**Πίνακας 13:** Επισκόπηση των σύνθετων ινών υψηλής απόδοσης.

Ίνες	Μήτρα	Τελικό σύνθετο
Άκαμπτη / ισχυρή / εύθραυστη / χαμηλής πυκνότητας	Σχετικά χαμηλή ακαμψία και αντοχή, όλκιμη ή εύθραυστη	Σκληρότητα μέσω συνεργιστικής δράσης
Υψηλή ανοχή θερμοκρασίας	Μπορεί να είναι πολυμερική, μεταλλική ή κεραμική	Υψηλή αντοχή και ακαμψία, σχετικά αδύναμη σε γωνίες ως προς τον άξονα των ινών
Φέρουν μεγάλο φορτίο ως ενίσχυση	Μεταδίδει φορτίο προς και από ίνες	Ιδιότητες βελτιστοποιημένες, προσαρμόζοντας τις κατευθύνσεις των ινών
Συνήθως συνεχείς	Δημιουργεί σχήμα και προστατεύει τις ίνες	
Προσανατολισμένες ώστε να ταιριάζουν με τις δομικές απαιτήσεις		

#### 4.1.3 Εφαρμογή των PMC

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση στη χρήση των PMC σε πλαίσιο και κινητήρα. [4]

##### 4.1.3.1 Αεροσκάφη σταθερών πτερυγίων

Στον Πίνακα 14, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εφαρμογής συνθέτων με ίνες άνθρακα στην κατασκευή του πλαισίου. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η εξοικονόμηση βάρους, η αντίσταση σε κόπωση και η ανοσία στη διάβρωση. Το κόστος παραμένει το κύριο μειονέκτημα.

Οι πρώιμες εφαρμογές των σύνθετων σε πολιτικό αεροσκάφος, ήταν κυρίως για δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια δομή όπως λεπτές, ελαφριές, κυψελωτές (honeycomb) πλάκες (panels) για πτερύγια, πηδάλια και πόρτες. Ωστόσο, από τότε τα υλικά υψηλής απόδοσης και το κόστος κατασκευής που ανέστειλαν τη χρήση συνθέτων για παχιά πρωτογενή δομή έχουν μειωθεί σημαντικά, λόγω της ανάπτυξης προηγμένων τεχνικών κατασκευής και τη μείωση κόστους υλικών. Ως αποτέλεσμα, παρόλο που το κόστος είναι ακόμη υψηλό συγκριτικά με τις μεταλλικές κατασκευές, το πλεονέκτημα, για παράδειγμα, του μειωμένου κόστους καυσίμου μέσω της εξοικονόμησης βάρους, τώρα υπερβαίνει το αρχικό κόστος για πολλές εφαρμογές στην πρωταρχική δομή σε πολιτικά αεροσκάφη.

Ένα παράδειγμα των πλεονεκτημάτων των σύνθετων υλικών σχετικά με την εξοικονόμηση του βάρους, είναι η περίπτωση ενός μαχητικού αεροσκάφους, όπου έχουμε πολύ λεπτότερα φτερά χάρη στην υψηλή ακαμψία των κατάλληλα προσαρμοσμένων σύνθετων υλικών. Οι εξαιρετικές ιδιότητες μορφοποίησης των σύνθετων, επιτρέπουν την παραγωγή πολύ λείων και πολύπλοκων καμπύλων επιφανειών με βελτιωμένη αεροδυναμική, και στην περίπτωση των στρατιωτικών αεροσκαφών, μειωμένη διατομή ραντάρ. [4,9,10]

**Πίνακας 14:** Σύγκριση άνθρακα/εποxy με τον Πίνακα 11. και συμβατικών κραμάτων αλουμινίου για εφαρμογές αεροσκαφών.

<b>Μείωση του βάρους</b>	<b>Κόστος απόκτησης</b>
Εξοικονόμηση 15-20% σε σύγκριση με τα κράματα αλουμινίου	Υψηλό κόστος πρώτων υλών
Μείωση του αριθμού των fasteners (βιδών)	Υψηλό κόστος πιστοποίησης
	Υψηλό κόστος κατασκευής
	Υψηλό ποσοστό μετατροπών
	Δυνατή ευρεία ενσωματωμένη δομή, ελαχιστοποίηση αρμών
<b>Επίδοση</b>	<b>Κόστος επισκευής</b>
Ομαλότερη, πιο αεροδυναμική μορφή	Αντίσταση στην κόπωση
Βελτιωμένες αεροελαστικές ιδιότητες	Ανοσία στη διάβρωση
Πιο ανθεκτικό στο ακουστικό περιβάλλον	Ευαισθησία σε κρούση
Πιο ανθεκτικό στο περιβάλλον εξυπηρέτησης	Επιρρεπή σε ελασματοποίηση
Βελτιωμένος περιορισμός πυρκαγιάς	Επιρρεπής σε ζημιές φωτισμού, απαιτεί αγωγίμη επίστρωση
Βελτιωμένη αντίσταση στη σύγκρουση	
Βελτιωμένες ιδιότητες stealth	

#### 4.1.3.2 Εφαρμογές στα στρατιωτικά αεροσκάφη

Οι πρώτες εφαρμογές, βασιζόνταν στα σύνθετα βορίου/εποxy. Για παράδειγμα, το αεροσκάφος F-14 του 1970, είχε οριζόντιο σταθερό ποιοτικό skin από βόριο/εποxy. Στα τελευταία αεροσκάφη, τα σύνθετα είναι σχεδόν αποκλειστικά φτιαγμένα από άνθρακα/εποxy ή από άνθρακα/BMI (bismaleimide resins). Σε δευτερεύουσες κατασκευές, χρησιμοποιούνται υβρίδια από άνθρακα/εποxy με αραμίδιο/εποxy ή γυαλί/εποxy. Πάνω



από το 70% των στρατιωτικών αεροσκαφών σήμερα είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην επιδίωξη της απόλυτης απόδοσης, με λιγότερη έμφαση στο κόστος.



**Εικόνα 4.1:** F-14 1970. [3]

Ένα παράδειγμα σύνθετων υλικών είναι το Stealth Northrop B-2 βομβαρδιστικό, το οποίο είναι περίπου 30% κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά. Το φτερό, το οποίο είναι περίπου όσο ένα Boeing 747, είναι περισσότερο κατασκευασμένο από άνθρακα/εροχγ με honeycomb skins και εσωτερική δομή. Σύνθετα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την άτρακτο του συγκεκριμένου αεροσκάφους.



**Εικόνα 4.2:** Το βομβαρδιστικό Stealth Northrop B-2. [3]

Η ανάγκη για υψηλή ακαμψία για να μειωθεί το βάθος των φτερών και των ουρών στα στρατιωτικά αεροσκάφη, διασφαλίζει ότι τα μελλοντικά αεροσκάφη θα συνεχίσουν να έχουν σύνθετα φτερά και skins. Η απαίτηση για stealth και για μικρό βάρος, εξασφαλίζει ότι το μεγαλύτερο μέρος των skins της ατράκτου θα είναι από σύνθετα υλικά. Για την απορρόφηση ραντάρ, οι άκρες κορυφής (leading edges-το μέρος των φτερών που έρχεται πρώτα σε επαφή με τον αέρα) θα είναι φτιαγμένες από honeycomb κατασκευή, με τα εξωτερικά σύνθετα skins να βασίζονται σε μη αγώγιμες ίνες, όπως χαλαζία και όχι άνθρακα στην υπόλοιπη κατασκευή. Αυτό το υλικό, επιτρέπει στα κύματα του ραντάρ να διεισδύσουν στον πυρήνα του honeycomb, ο οποίος είναι επικαλυμμένος με υλικό απορρόφησης ραντάρ αντί να ανακλάται από της δέκτες.

Παρά τα δομικά πλεονεκτήματα της κατασκευής κηρήθρας (honeycomb), υπάρχει μια τάση αντικατάστασης αυτής της μορφής κατασκευής σε ορισμένα εξαρτήματα με σκληρυμένα, επιστρωμένα σύνθετα πάνελ, λόγω του ότι αυτά είναι λιγότερο επιρρεπή σε ζημία και παγίδευση νερού. Γενικά, στα πρόσφατα πολεμικά αεροσκάφη, υπάρχει μια τάση να χρησιμοποιούνται μέταλλα στο μεγαλύτερο μέρος του φτερού, εξαιτίας του υψηλού κόστους των σύνθετων κατασκευών. Σε κάποιες περιπτώσεις, το κράμα τιτανίου χρησιμοποιείται για το κύριο μέρος του φτερού, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων κόπωσης και βαλλιστικής επίδρασης.

Ένα παράδειγμα αεροσκάφους με χρήση μεταλλικών και σύνθετων υλικών, είναι το Lockheed Martin F-22, το οποίο αποτελείται από 39% τιτάνιο, 16% κράμα αλουμινίου, 6% χάλυβα, 24% θερμοσκληρυνόμενο σύνθετο (άνθρακας/εποxy, άνθρακας/BMI και 1% θερμοπλαστικό).



**Εικόνα 4.3:** Το Lockheed Martin F-22. [3]

Τα μελλοντικά μαχητικά και αεροσκάφη επίθεσης θα είναι μη επανδρωμένα, και η έμφαση δίνεται σε ελιγμούς πολύ υψηλών G για την αποφυγή πυραύλων σε περιοχές υψηλού κινδύνου (7-9 φορές τα επιτρεπόμενα G σε επανδρωμένα αεροσκάφη). Λόγω των υψηλών τάσεων ατράκτου, μόνο οι πλήρεις σύνθετες κατασκευές μπορούν να ληφθούν υπόψιν για τόσο υψηλές απαιτήσεις απόδοσης, και ο σχεδιασμός θα βασίζεται σε πολύ υψηλές επιτρεπόμενες τάσεις.

Επίσης, στο μέλλον η “υγεία” της κατασκευής για επανδρωμένα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη θα παρακολουθείται όλο και περισσότερο από ενσωματωμένους αισθητήρες. Αυτοί οι αισθητήρες θα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ένταση, την πίεση, τη θερμοκρασία, και κάθε ζημία που προκαλείται από την κατασκευή, και μπορεί επίσης να παρέχει ένδειξη της απορροφημένης υγρασίας. [4,11]

#### 4.1.3.3 Εφαρμογές στα πολιτικά αεροσκάφη

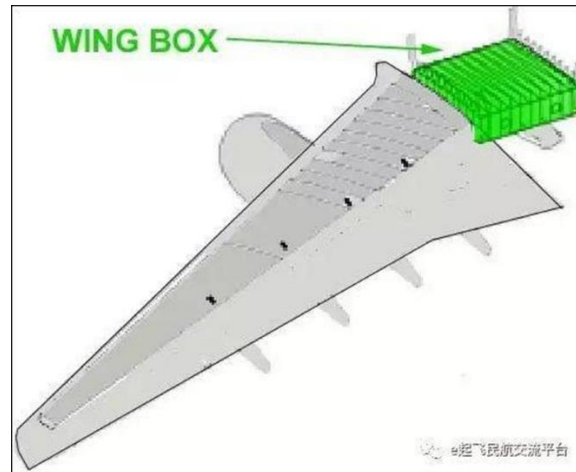
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σχέδια μεγάλων εμπορικών αεροσκαφών έχουν περιορίσει τη χρήση των σύνθετων υλικών σε δευτερεύουσες κατασκευές, όπως πτερύγια, ανελκυστήρες, πηδάλια. Ωστόσο, η Boeing χρησιμοποίησε το υλικό στις ουρές και στις δοκούς δαπέδου στο Boeing 777, και η Airbus το χρησιμοποίησε στον περισσότερο στόλο της.

Σχετικά με το αεροσκάφος Airbus A380, οι σύνθετες εφαρμογές ανέρχονται περίπου στο 16% του συνολικού βάρους της ατράκτου. Αυτό ισοδυναμεί θεωρητικά με τη χρήση σύνθετων υλικών για την αντικατάσταση περίπου του 20% της συμβατικής δομής αλουμινίου. Αυτό το αεροσκάφος, χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα στο τεράστιο φτερό (7m \* 8m \* 2.4m) και μέσα στην καμπίνα όπου τα δοκάρια του επάνω ορόφου είναι 7m \* 2.5m (μάκρος\*βάθος). Η κατασκευή του πτερυγίου αντιπροσωπεύει μια από τις μεγαλύτερες, πιο πολύπλοκες και κρίσιμες αεροδιαστημικές σύνθετες κατασκευές που έχουν υπάρξει σε εφαρμογές πολιτικών αεροσκαφών. Το βάρος του ανέρχεται στους 8 τόνους, από τους οποίους οι 5,3 τόννοι είναι από άνθρακα/εποxy. Εκτός από τον άνθρακα/εποxy, οι άκρες κορυφής των φτερών (leading edges-το σημείο του φτερού που έρχεται πρώτο σε επαφή με τον αέρα) είναι από γυαλί/θερμοπλαστικό που έχει βελτιωμένη αντοχή στην κρούση συγκριτικά με θερμοσκληρυνόμενα υλικά.

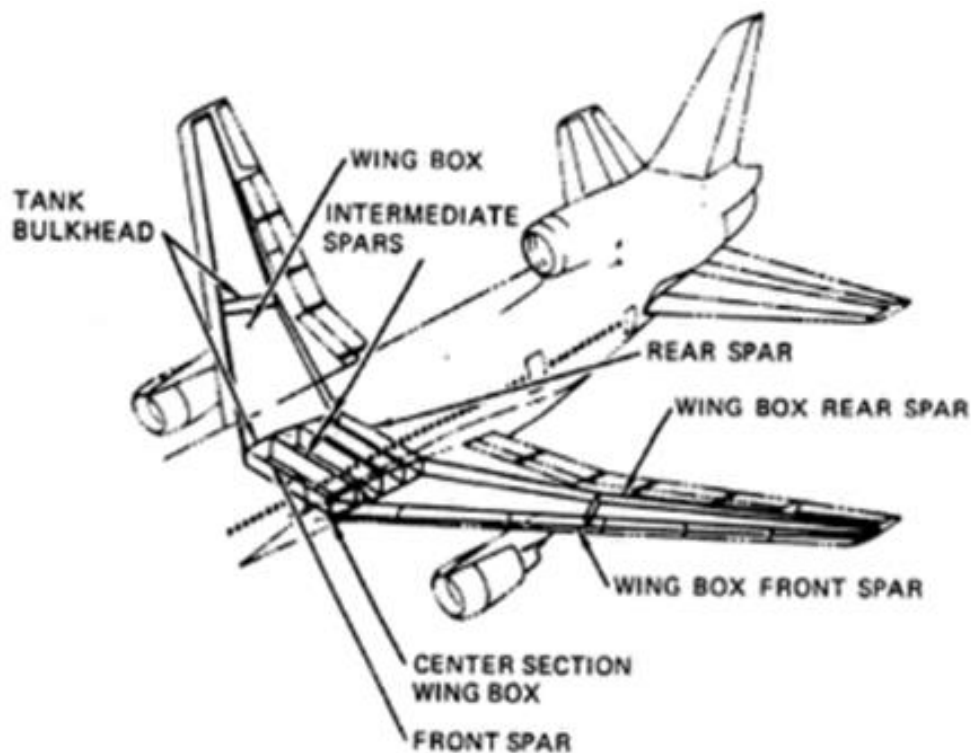


Εικόνα 4.4: Το Airbus A380. [3]

Η χρήση των σύνθετων υλικών για πρωτογενείς και άλλες εφαρμογές είναι ακόμη πιο εκτεταμένη στο Airbus A350, όπου τα σύνθετα αποτελούν το 53% της ατράκτου. Οι πρωτογενείς δομικές εφαρμογές περιλαμβάνουν το CWB (center wingbox), και τις πόρτες φορτίου (cargo doors), όπως στο A380. Το κύριο μέρος της ατράκτου (σκελετού) σχηματίζεται από τέσσερα πολύ μεγάλα πάνελ για την ελαχιστοποίηση των περιφερειακών αρθρώσεων. Ωστόσο, η πίσω άτρακτος είναι ένα τμήμα παρόμοιο με την πίσω άτρακτο του Boeing 787.



Εικόνα 4.5: Wingbox. [3]



Εικόνα 4.6: Center wing-box. [3]



**Εικόνα 4.7:** Airbus A350. [3]

Στο Boeing 787 όπως αναφέρεται και παρακάτω, σχεδόν όλες οι εμφανείς κατασκευές είναι από σύνθετα υλικά, συμπεριλαμβανομένου και μεγάλου μέρους του εσωτερικού. Όπως με τα A380 και A350, χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες τοποθέτησης ταινιών και προηγμένες τεχνικές χύτευσης ρητίνης, για την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και τη μείωση του μεγέθους και του κόστους των απαιτούμενων εγκαταστάσεων.

Σχετικά με μικρότερα αεροσκάφη μεταφοράς και γενικής κατηγορίας, το Beechcraft Starship ήταν το πρώτο αεροσκάφος κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά. Τα εταιρικά αεροσκάφη Premier 1 και Horizon έχουν επανέλθει σε μεταλλικά φτερά λόγω του κόστους και του περιορισμένου δυναμικού εξοικονόμησης βάρους. Ωστόσο οι άτρακτοι παραμένουν σύνθετες κατασκευές. [4,12]



**Εικόνα 4.8:** Beechcraft Starship. [3]



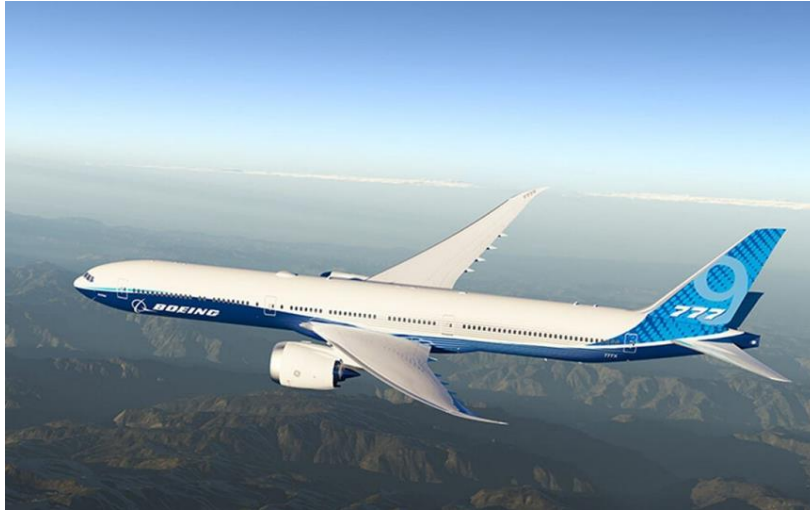
**Εικόνα 4.9:** Premier 1. [3]

Μια επανάσταση στη χρήση των σύνθετων υλικών για εμπορικά αεροσκάφη άρχισε με την έλευση του Boeing 787 Dreamliner. Αυτό το αεροσκάφος μεγάλου βεληνεκούς και μεγάλου μεγέθους (210 με 290 επιβάτες) δικινητήριο τζετ, είναι το πρώτο που χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά στην πλειοψηφία της κατασκευής του. Έτσι είναι ελαφρύτερο σε βάρος από τα προγενέστερα αεροσκάφη, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση καυσίμων (μείωση περίπου 20%), λιγότερες εκπομπές ρύπων και μεγαλύτερο εύρος αποστάσεων πτήσης. Επιπλέον, αυτή η κατασκευή με σύνθετα υλικά προσφέρει μια πιο άνετη εμπειρία πτήσης - η πίεση στην καμπίνα και τα επίπεδα της υγρασίας είναι υψηλότερα από τα προηγούμενα μοντέλα και τα επίπεδα θορύβου έχουν ελαττωθεί. Ακόμη, οι υπερυψωμένοι χώροι αποσκευών είναι πιο ευρύχωροι και τα παράθυρα είναι μεγαλύτερα.

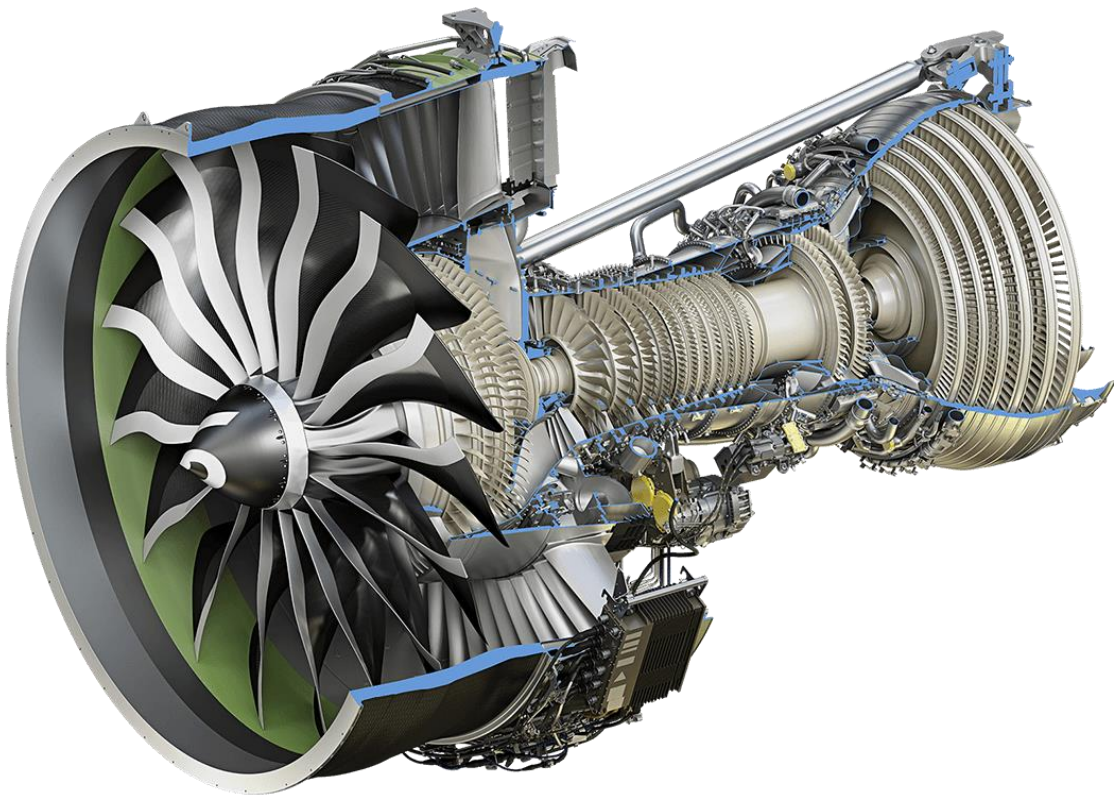


**Εικόνα 4.10:** Boeing 787 Dreamliner. [3]

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν το 50% κατά βάρος του Dreamliner και τα κράματα αλουμινίου το 20%. Αντίθετα, το Boeing 777X αποτελείται από 11% σύνθετα υλικά και 70% κράματα αλουμινίου. Τα σύνθετα υλικά και τα είδη αλουμινίου καθώς και τα άλλα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και για το 777X και για το 787, δηλαδή τα κράματα τιτανίου, χάλυβα κ.α. αναφέρονται στον Πίνακα 15.



**Εικόνα 4.11:** Boeing 777X. [3]



**Εικόνα 4.12:** Ο κινητήρας GE9X για το Boeing 777X, με λεπίδες ανεμιστήρα από άνθρακα/εποxy. [3]

Οι πιο συνηθεις δομές σύνθετων υλικών είναι πολύστρωτα συνεχών ινών άνθρακα μέσα σε εποξειδική ρητίνη, η πλειοψηφία των οποίων χρησιμοποιούνται στην άτρακτο (Εικόνα 4.13). Αυτά τα πολύστρωτα αποτελούνται από προ-εμβαπτισμένες ταινίες, οι οποίες τοποθετούνται η μια πάνω στην άλλη σε προ-αποφασισμένες διευθύνσεις χρησιμοποιώντας μια μηχανή συνεχούς τοποθέτησης ταινιών.

Ένα μονοκόμματο τμήμα της ατράκτου (ή βαρελιού) διαμορφώνεται με αυτόν τον τρόπο, το οποίο σε επόμενο στάδιο πολυμερίζεται κάτω από πίεση σε έναν τεράστιο αυτόκλειστο φούρνο. Έξι τέτοιες μονάδες βαρελιού προσαρτώνται η μια δίπλα στην άλλη για να σχηματίσουν την πλήρη άτρακτο του αεροπλάνου. Σε προηγούμενα εμπορικά αεροσκάφη, τα κύρια συστατικά της δομής της ατράκτου ήταν φύλλα αλουμινίου στερεωμένα μεταξύ τους με τη χρήση πριτσινιών.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της σύνθετης δομής βαρελιού σε σχέση με τους προηγούμενους σχεδιασμούς που χρησιμοποιούσαν κράματα αλουμινίου είναι:

α) Μειώσεις του κόστους συναρμολόγησης (σχεδόν 1500 φύλλα αλουμινίου που έχουν συγκολληθεί μεταξύ τους με σχεδόν 50.000 πριτσίνια έχουν εξαλειφθεί).

β) Μείωση του κόστους στις προγραμματισμένες συντηρήσεις και επιθεωρήσεις για διάβρωση και ρωγμές από κόπωση του υλικού.

γ) Μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης (τα πριτσίνια που προεξέχουν από τις επιφάνειες αυξάνουν την αντίσταση του αέρα και μειώνουν την αποδοτικότητα του καυσίμου).

**Πίνακας 15:** Τύποι και περιεκτικότητες υλικών για τα αεροσκάφη Boeing 787 και 777.

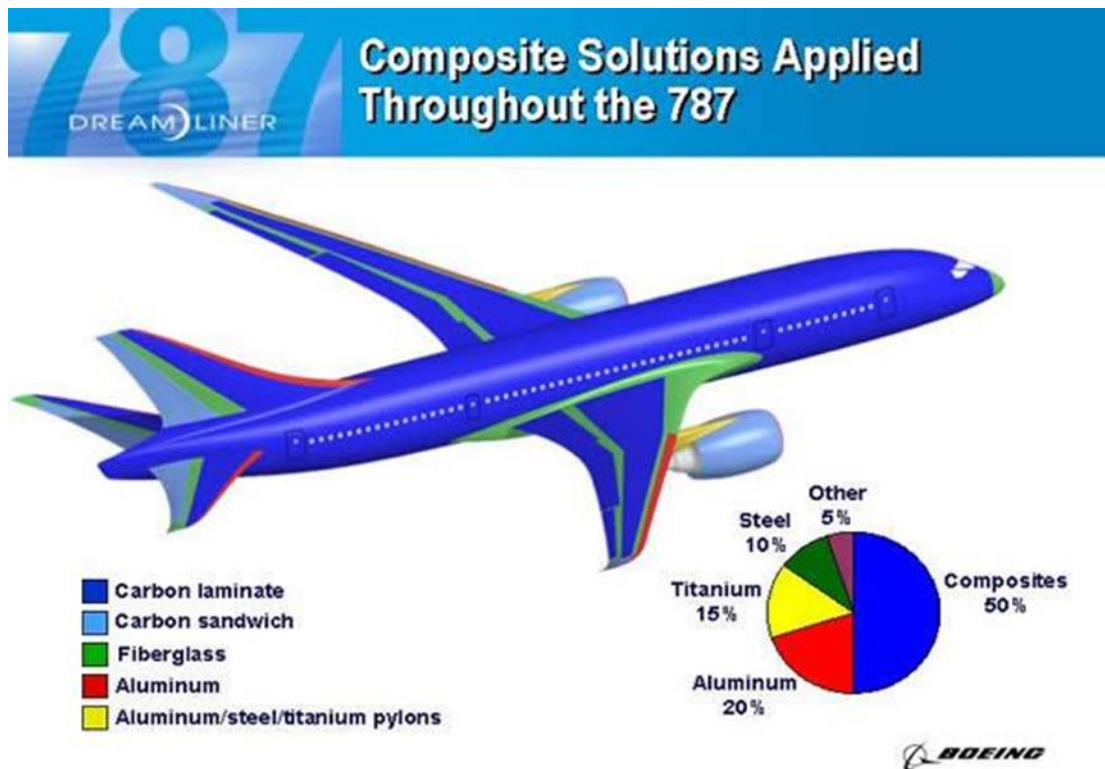
Περιεκτικότητα κατά (%) βάρος					
Αεροσκάφος	Σύνθετα υλικά	Κράματα αλουμινίου	Κράματα τιτανίου	Χάλυβας	Άλλα
<b>Boeing 787</b>	50	20	15	10	5
<b>Boeing 777</b>	11	70	7	11	1

Η άτρακτος του Dreamliner ήταν η πρώτη προσπάθεια για μαζική παραγωγή εξαιρετικά μεγάλων δομών σύνθετων υλικών, τα οποία αποτελούνται από ίνες άνθρακα εμβαπτισμένες μέσα σε ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές (εποξειδική ρητίνη). Έτσι κατέστη αναγκαίο για την Boeing (και των υπεργολάβων της) να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν νέες και καινοτόμες τεχνολογίες παραγωγής.

Όπως δείχνει η Εικόνα 4.13, τα πολύστρωτα από ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης στα φτερά και στις δομές των πτερυγίων και των ουρών του αεροπλάνου. Τα άλλα σύνθετα υλικά που αναφέρονται στην ίδια απεικόνιση, είναι εποξειδική ρητίνη, ενισχυμένη με ίνες γυαλιού και υβριδικά σύνθετα υλικά τα οποία αποτελούνται από ίνες γυαλιού και ανθρακονήματα. Αυτά τα άλλα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως στις δομές της ουράς και των οπίσθιων πτερυγίων του αεροπλάνου. Διατάξεις (πάνελ) τύπου sandwich χρησιμοποιούνται στα κιβώτια των μηχανών (π.χ. δομές περιβλήματος που περιβάλλουν τους κινητήρες), καθώς και στα καταληκτικά εξαρτήματα της ουράς. Οι εξωτερικές επιφάνειες για όλα αυτά τα πάνελ, είναι ίνες άνθρακα-εποξειδικής ρητίνης, όπου οι πυρήνες είναι κυψελώδεις δομές (κερήθρα), συνήθως κατασκευασμένες από στρώματα κράματος αλουμινίου. Η μείωση θορύβου σε αυτά τα εξαρτήματα κιβωτίων αυξάνεται με το να



ενσωματωθεί ένα μη μεταλλικό (ή υλικό) καπάκι εντός των κελιών της κερήθρας. [6]



**Εικόνα 4.13:** Θέσεις των διάφορων τύπων υλικού που χρησιμοποιούνται στο Boeing 787 Dreamliner. [3]

#### 4.1.3.4 Κινητήρας αεριοστρόβιλου

Ο κινητήρας αεριοστρόβιλου προσφέρει σημαντική πρόκληση και περιθώριο για καινοτόμες εξελίξεις στα σύνθετα για αεροναυτική εφαρμογή. Η εξοικονόμηση βάρους είναι ένα σημαντικό κίνητρο, γιατί η μείωση του βάρους της μηχανής έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές μειώσεις του βάρους της κατασκευής που απαιτείται για τη στήριξη του κινητήρα από το φτερό.

Η πιο απαιτητική εφαρμογή είναι οι μεγάλες λεπίδες του ανεμιστήρα. Υπάρχουν πολλές άλλες λιγότερο απαιτητικές εφαρμογές, που περιλαμβάνουν θήκες ανεμιστήρων, ανεμιστήρες και αγωγούς. Η χρήση των σύνθετων υλικών για μεγάλες λεπίδες του ανεμιστήρα έχει τη δυνατότητα για σημαντική εξοικονόμηση βάρους, και η υψηλή ειδική ακαμψία, αντοχή στην κόπωση, προσαρμοστικότητα και ικανότητα διαμόρφωσης των σύνθετων, είναι εξαιρετικά σημαντικές ιδιότητες.

Το μειωμένο βάρος σε σύγκριση με τις παραδοσιακές λεπίδες τιτανίου (συγκρίσιμες μόνο με τις προηγμένες κοίλες λεπίδες τιτανίου), επιτρέπει μείωση βάρους σε δίσκους, άξονες και ρουλεμάν. Οι λεπίδες από σύνθετα υλικά έχουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή στην κόπωση από ότι οι λεπίδες από μέταλλα. Αυτή είναι μια σημαντική ιδιότητα, διότι έχει τη δυνατότητα να μειώσει τον αριθμό των περιστατικών βλάβης της λεπίδας.

Η GE (General Electric) ήταν η πρώτη εταιρεία που εισήγαγε με επιτυχία τις λεπίδες ανεμιστήρα από άνθρακα/εποxy. Στην Εικόνα 4.12, φαίνεται η εφαρμογή της στο GE9X, το μεγαλύτερο και ισχυρότερο κινητήρα τζετ στον κόσμο, που αναπτύχθηκε για το νέο Boeing 777X. Αυτό έγινε εφικτό, ύστερα από έναν αριθμό βελτιώσεων στην τεχνολογία σύνθετων υλικών. Αυτές περιλάμβαναν πιο ανθεκτικές εποξειδικές ρητίνες, σκληρότερες και πιο σταθερές ίνες υψηλής τάσης, και βελτιωμένη τεχνολογία κατασκευής. Αυτές οι λεπίδες είναι φτιαγμένες από πλαστικοποιημένα φύλλα από μονοκατευθυντικές prepreg ταινίες και ύφασμα σε κλειστό καλούπι.

Περαιτέρω βελτιώσεις ανθεκτικότητας στα πτερύγια του ανεμιστήρα μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας ενίσχυση μέσω πάχους, είτε με ράψιμο, είτε με περιορισμένη ύφανση ινών. Ωστόσο, πιο πρόσφατες λεπίδες με ενίσχυση μέσω πάχους κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές υφασμάτων ακολουθούμενες από χύτευση ρητίνης. [4,13]

## 4.2 Joints

Οι κατασκευές του πλαισίου ουσιαστικά αποτελούνται από μια συνδεσμολογία από στοιχεία, που ενώνονται για να σχηματίσουν μια διαδρομή μετάδοσης φορτίου. Τα στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν skins, ενισχυτικά, κουφώματα και δοκούς, σχηματίζουν τα κύρια εξαρτήματα όπως φτερά, άτρακτο και ουρά (empennage). Οι συνδέσεις-αρθρώσεις, ή αλλιώς joints, είναι ενδεχομένως τα πιο αδύναμα σημεία του πλαισίου του αεροσκάφους, ώστε να μπορούν να καθορίσουν τη δομική του αποτελεσματικότητα.

Είναι επιθυμητό να μειωθεί ο αριθμός και η πολυπλοκότητα των συνδέσεων έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το βάρος και το κόστος. Έτσι, ένα σημαντικό πλεονέκτημα μιας σύνθετης κατασκευής είναι η ικανότητα σχηματισμού μεγάλων εξαρτημάτων, πράγμα που σημαίνει ελάττωση του αριθμού των συνδέσεων (joints) που απαιτούνται. Ωστόσο, το σχέδιο και η κατασκευή των υπόλοιπων συνδέσεων είναι ένα κύριο θέμα για την παραγωγή ασφαλών, οικονομικών και αποδοτικών δομών. Στην κατασκευή των αεροσκαφών υπάρχουν 3 είδη αρθρώσεων:

- 1) Mechanically fastened-Μηχανικά στερεωμένα χρησιμοποιώντας μπουλόνια ή πριτσίνια
- 2) Adhesively bonded-Συγκολλητικά ενωμένα χρησιμοποιώντας πολυμερική κόλλα
- 3) Συνδυασμό των δύο προηγούμενων

Με μηχανικά στερεωμένους συνδέσμους, τα φορτία μεταφέρονται μεταξύ των ενωμένων εξαρτημάτων με συμπίεση στις εσωτερικές όψεις των οπών στερέωσης, με ένα μικρότερο στοιχείο διάτμησης στις εξωτερικές όψεις των εξαρτημάτων. Με συγκολλημένους συνδέσμους τα φορτία μεταφέρονται κυρίως με διάτμηση στις επιφάνειες των εξαρτημάτων. Και στις δύο περιπτώσεις τα στοιχεία μετάδοσης του φορτίου (ο σύνδεσμος και η συγκόλληση) εντείνονται κυρίως σε διάτμηση κατά το μήκος της γραμμής άρθρωσης.

Η ευθυγράμμιση της διαδρομής φορτίου και η γεωμετρία των δομικών στοιχείων-εξαρτημάτων αποτελούν πολύ σημαντικούς παράγοντες στο σχεδιασμό των αρθρώσεων. Τα δομικά στοιχεία του πλαισίου συνήθως προορίζονται είτε σε συμπίεση, είτε σε διάτμηση. Η

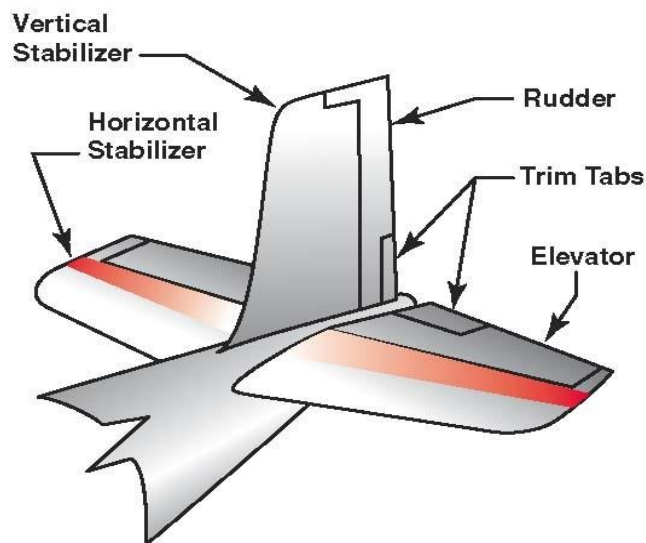
πρωτεύουσα κάμψη αποφεύγεται διατηρώντας, όσο γίνεται, γραμμική φόρτιση. Η δευτερεύουσα κάμψη που προκαλείται από μικρή εκκεντρότητα των φορτίων συμβαίνει σε αρκετούς τύπους αρθρώσεων και μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα.

Σε αντίθεση με τα μέταλλα, τα σύνθετα υλικά από ελασματοποιημένες ίνες έχουν σχετικά μικρή αντοχή σε πάχος κάτω από συμπυκνωμένα φορτία. Ωστόσο, τα μέταλλα (συνήθως κράματα αλουμινίου) μερικές φορές απαιτούνται για τη μετάδοση φορτίων μέσα και έξω από μια υψηλά φορτωμένη σύνθετη κατασκευή, όπου πρακτικά τα πεδία της πίεσης είναι πολύπλοκα.

#### *Σύγκριση μεταξύ μηχανικά συνδεδεμένων και συγκολλητικά ενωμένων συνδέσεων*

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του σχηματισμού των ενώσεων με συγκόλληση συγκριτικά με το βίδωμα φαίνονται στον Πίνακα 16. Παρότι υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για τα συγκολλημένα σύνθετα από πλευράς απόδοσης, υπάρχουν και πολλοί περιορισμοί ή μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη για κάθε πιθανή εφαρμογή. Για σχετικά λεπτές κατασκευές, όπου η κόπωση μπορεί να είναι πρόβλημα, η συγκόλληση είναι μια πολύ καλή λύση.

Η μηχανική στερέωση είναι τις περισσότερες φορές η πιο οικονομική επιλογή λόγω της απλότητάς της, του χαμηλού κόστους κατεργασίας και τις απλές απαιτήσεις επιθεώρησης. Ωστόσο, η διάτρηση οπών (hole drilling) ίσως είναι δύσκολη, εκτός και αν η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη. Σε περίπτωση που δεν γίνει με το σωστό τρόπο, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του συνθέτου. Οι αρθρώσεις στις σύνθετες κατασκευές του αεροσκάφους απαιτούν πολλές χιλιάδες ακριβούς συνδετήρες (fasteners), συνήθως από κράματα τιτανίου, και η εκτεταμένη σκλήρυνση μπορεί να απαιτηθεί για να αποφευχθεί ζημιά κατά τη σύσφιξη του μπουλονιού. Έτσι, η συγκόλληση μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση κόστους παρά το υψηλό κόστος των εργαλείων, των διεργασιών και του ποιοτικού ελέγχου. [4,14,15]



Εικόνα 4.14: Empennage. [3]

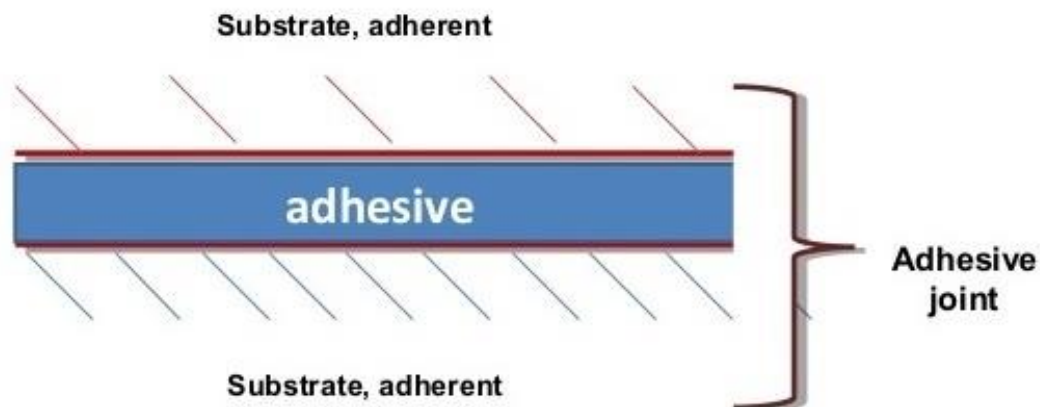
#### 4.2.1 Συγκολλημένες αρθρώσεις – Adhesive Bonded Joints

Στο σχεδιασμό των συγκολλημένων σύνθετων συνδέσμων, λαμβάνεται υπόψη κάθε στοιχείο που πρέπει να ενωθεί (προσκολλημένο) συμπεριλαμβανομένης της γεωμετρίας, του μεγέθους του υλικού κατασκευής, των πραγματικών και πιθανών τρόπων αστοχίας, των συντελεστών θερμικής διαστολής, του μεγέθους και της φύσης της εμπλεκόμενης φόρτωσης και το λειτουργικό περιβάλλον. Οι πιθανοί τρόποι αστοχίας περιλαμβάνουν:

- 1) Εφελκυσμό, συμπίεση ή διάτμηση των συγκολλήσεων
- 2) Διάτμηση ή αποφλοίωση στο συγκολλημένο στρώμα (συνεκτική αστοχία)
- 3) Διάτμηση ή αποφλοίωση στο σύνθετο στρώμα κοντά στην επιφάνεια
- 4) Διάτμηση ή αποφλοίωση στο πλούσιο στρώμα ρητίνης στην επιφάνεια του σύνθετου υλικού
- 5) Αστοχία συγκόλλησης στη μεταλλική ή σύνθετη/συγκολλητική διεπαφή

**Πίνακας 16:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συγκολλημένων και βιδωμένων αρθρώσεων.

	<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
<b>Συγκολλημένες αρθρώσεις</b>	Μικρή συγκέντρωση πίεσης στα συγκολλημένα σημεία	Περιορισμός το πάχους που μπορεί να ενωθεί με απλή διαμόρφωση αρμού
	Άκαμπτη σύνδεση	Η επιθεώρηση είναι δύσκολη εκτός από τα ακαθάριστα ελαττώματα
	Άριστες ιδιότητες κόπωσης	Επιρρεπή σε περιβαλλοντική υποβάθμιση
	Δεν υπάρχουν προβλήματα δυσφορίας	Ευαισθησία στην αποφλοίωση
	Ανθεκτικότητα στη διάβρωση	Προβλήματα υπολειπόμενου στρες όταν υπάρχει ένωση με μέταλλα
	Ομαλό περίγραμμα επιφάνειας	Δεν είναι δυνατή η αποσυναρμολόγηση
	Μικρό βάρος	Υψηλό κόστος εργαλείων
	Ανθεκτικότητα σε βλάβες	Απαιτεί υψηλό βαθμό ποιοτικού ελέγχου
	<b>Βιδωμένες αρθρώσεις</b>	
Μπορεί να αποσυναρμολογηθεί		Σημαντική συγκέντρωση στρες
Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο πάχος		Επιρρεπή σε αστοχία κόπωσης σε μεταλλικό εξάρτημα
Απλή διαμόρφωση συνδέσεων		Ο σχηματισμός οπών μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο σύνθετο
Απλή διαδικασία κατασκευής		Για σύνθετα υλικά, σχετικά λίγες ιδιότητες
Δεν είναι επιρρεπή στο περιβάλλον		Επιρρεπή σε διάβρωση σε μέταλλο
Ανθεκτικότητα στην αποφλοίωση		
Κανένα μείζον πρόβλημα υπολειπόμενου στρες		

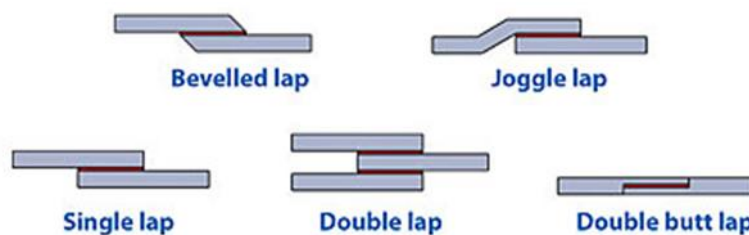


**Εικόνα 4.15:** Adhesive joint. [3]

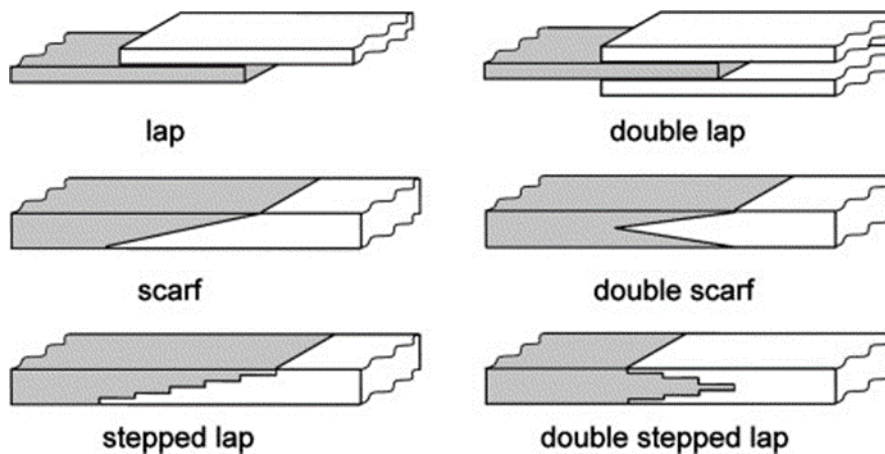
Ο σχεδιαστικός στόχος, είναι να αποτύχει ο σύνδεσμος από μαζική αποτυχία ενός από τα adherends (συγκολλημένες επιφάνειες). Ένα περιθώριο ασφαλείας περιλαμβάνεται γενικά στο σχεδιασμό για να παρέχεται ανοχή σε ζημιές και κατασκευαστικά ελαττώματα στο δεσμό (ευθεία του συνδέσμου). Γενικά, η κολλητική ένωση δεν πρέπει να είναι ούτε και να αφήνεται να γίνει ο ασθενέστερος σύνδεσμος στην άρθρωση, γιατί η αντοχή της κόλλας (συγκολλητικού) μπορεί να γίνει μεταβλητή, και η ανάπτυξη της ζημιάς ή της ατέλειας στο συγκολλητικό στρώμα μπορεί να είναι πολύ γρήγορη υπό κυκλική φόρτωση, και πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί. Για σύνθετα συγκολλητικά, η πολύ λεπτή και σχετικά εύθραυστη ρητίνη που συνδέει τις πτυχές κοντά στην επιφάνεια, είναι συχνά πιο επιρρεπής σε αστοχία από το συγκολλητικό στρώμα. Οι παράμετροι σχεδιασμού περιλαμβάνουν:

- 1) Ακαμψία και αντοχή των συγκολλήσεων
- 2) Αντοχή απόδοσης παραγωγής
- 3) Συντελεστής θερμικής διαστολής των συγκολλημένων σημείων
- 4) Κατεύθυνση των εφαρμοζόμενων φορτίων
- 5) Μήκος επικάλυψης των συγκολλημένων επιφανειών (adherends)
- 6) Πάχος συγκολλήσεων και κόλλας

Οι ιδιότητες που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς σχεδιασμού, πρέπει να είναι για την ασθενέστερη κατάσταση των υλικών. Για την κόλλα και τα συγκολλημένα σύνθετα αυτή είναι συνήθως η ζεστή/υγρή κατάσταση. Είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίσουμε ότι η δύναμη της διεπαφής της κόλλας και της συγκολλημένης περιοχής, δεν αποδυναμώνεται σημαντικά εξαιτίας της υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Βλάβη κόπωσης ή ερπυσμός στο στρώμα της κόλλας, μπορεί να αποφευχθεί ή να μειωθεί διατηρώντας την κόλλα σε ελαστική κατάσταση για το μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής της. Σημαντική πλαστική παραμόρφωση της κόλλας, είναι επιτρεπτή μόνο όταν η άρθρωση (joint) πιέζεται στο όριο φορτίου (το υψηλότερο αναμενόμενο φορτίο κατά τη διάρκεια ζωής του αεροσκάφους). Οι κλασικοί τύποι αρθρώσεων, κατάλληλοι για ένωση σύνθετων, είτε σε σύνθετα είτε σε μέταλλα, φαίνονται στην Εικόνα 4.16.



**Εικόνα 4.16:** Διάφοροι τύποι συνδεδεμένων αρθρώσεων. [3]



**Εικόνα 4.17:** Συνδεδεμένες αρθρώσεις. [3]

α) Single overlap joint (άρθρωση μονής-απλής επικάλυψης):

Είναι γενικά η πιο απλή άρθρωση από άποψη κατασκευής. Επειδή τα φορτία είναι συχνά αντισταθμισμένα (εκκεντρικά), αναπτύσσεται μια μεγάλη δευτερεύουσα ροπή κάμψης που έχει ως αποτέλεσμα η κόλλα να υποστεί σοβαρές καταπονήσεις. Χρησιμοποιείται μόνο για ελαφρώς φορτωμένες κατασκευές ή όταν η άρθρωση υποστηρίζεται από μια υποκείμενη δομή (εσωτερικό πλαίσιο, ενισχυτικό κλπ).

β) Double overlap joint (άρθρωση διπλής επικάλυψης):

Αυτή η άρθρωση δεν έχει πρωτεύουσα ροπή κάμψης επειδή το προκύπτον φορτίο είναι γραμμικό. Οι προκύπτουσες τάσεις, αν και είναι πολύ μικρότερες σε μέγεθος από τον απλό σύνδεσμο, παράγουν τάσεις αποφλοιώσης που περιορίζουν το πάχος του υλικού που μπορεί να ενωθεί. Οι τάσεις αποφλοιώσης και διάτμησης μειώνονται με συρρίκνωση των άκρων των αρθρώσεων.

γ) Scarf and stepped lap joints:

Όταν είναι συνδυασμένα σωστά παράγουν αμελητέες τάσεις αποφλοιώσης, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδέσουν σύνθετα εξαρτήματα ανεξαρτήτως πάχους. [4,16,17,18]

#### 4.2.1.1 Κατασκευαστικά συγκολλητικά

Τα περισσότερα κατασκευαστικά συγκολλητικά βασίζονται σε εροχίες, επειδή σχηματίζουν ισχυρούς δεσμούς με τα περισσότερα υποστρώματα και ιδιαίτερα σε υποστρώματα υψηλής ενέργειας, όπως τα μέταλλα. Τα εροχίες εμφανίζουν μικρή συρρίκνωση κατά τη διάρκεια του curing, μειώνοντας τις υπολειπόμενες τάσεις στο bond-line.

Ωστόσο, παρόλο που τα εροχίες έχουν υψηλή αντοχή και ακαμψία καθώς και πολλές άλλες επιθυμητές ιδιότητες, στη μη τροποποιημένη μορφή τους είναι πολύ εύθραυστα για να χρησιμοποιηθούν ως δομικές κόλλες (συγκολλητικά). Χρησιμοποιούνται διάφορες

προσεγγίσεις για την παροχή σκλήρυνσης, συμπεριλαμβανομένου του σχηματισμού ενός στερεού διαλύματος με ένα πιο όλκιμο πολυμερές, ή την ανάπτυξη διμετρικού πολυμερούς δικτύου με θερμοπλαστικά.

### Μορφές κόλλας

Τα κατασκευαστικά συγκολλητικά είναι γενικά διαθέσιμα σε δύο κύριες μορφές: paste (πάστας) και film (φιλμ).

Τα συγκολλητικά paste συνήθως αποτελούνται από ρητίνη και σκληρυντικό, τα οποία ανακατεύονται μεταξύ τους ακριβώς πριν τη χρήση. Υπάρχει περίπτωση να αποτελούνται από ένα μόνο συστατικό, όπου το curing προαναμιγνύεται με την κόλλα.

Τα συγκολλητικά film σχηματίζονται με επικάλυψη ενός λεπτού υφασμένου υφάσματος ή τυχαίου στρώματος με το συγκολλητικό σύστημα ρητίνης που είναι μερικώς σκληρυμένο για να αυξήσει το ιξώδες. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για το φορέα περιλαμβάνουν πολυμερή, όπως πολυεστέρα ή νάιλον. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται επίσης ίνες γυαλιού, κυρίως με κόλλες υψηλής θερμοκρασίας. Το υψηλό ιξώδες της ρητίνης, εμποδίζει τη ροή της κατά τα αρχικά στάδια της συγκόλλησης, όταν το film τοποθετείται στην προσκολλημένη επιφάνεια (adherend).

Ο carrier σε κατασκευαστική κόλλα τύπου film εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς όπως:

α) Ελέγχει τη ροή και αποτρέπει τη δημιουργία περιοχής με πολύ λεπτό στρώμα κόλλας κατά το σχηματισμό μιας άρθρωσης.

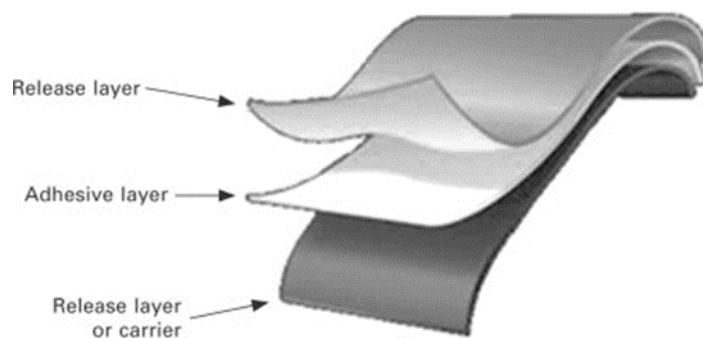
β) Παρέχει ένα μονωτικό στρώμα σε περίπτωση πλήρους συμπίεσης της ρητίνης (αυτό είναι σημαντικό όταν adherends κατασκευασμένα από άνθρακα/εποxy, συγκολλούνται με μέταλλα όπως αλουμίνιο, γιατί η ηλεκτρική επαφή μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή γαλβανική διάβρωση του αλουμινίου).

Τα συγκολλητικά film χρησιμοποιούνται ευρέως στις συγκολλήσεις των κατασκευών αεροσκαφών, και γενικά παρέχουν υψηλότερες αντοχές από τα αντίστοιχα συγκολλητικά paste. Μερικά άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι:

- α) Ευκολία τοποθέτησης της κόλλας στη συγκολλητική επιφάνεια
- β) Αποφυγή της ανάγκης ακριβούς ζύγισης και ανάμιξης
- γ) Αποφυγή ακαταστασίας, συγκριτικά με τις κόλλες paste
- δ) Ελαχιστοποίηση παγιδευμένου αέρα και πτητικών υλικών

Τα μειονεκτήματα των συγκολλητικών film περιλαμβάνουν υψηλό κόστος, την ανάγκη σχετικά υψηλών πιέσεων (συγκριτικά με paste μονού συστατικού) για εξασφάλιση της ροής του συγκολλητικού, υψηλές θερμοκρασίες για curing (180°C), χαμηλές θερμοκρασίες αποθήκευσης.





**Εικόνα 4.18:** Film adhesive. [3]

#### *Παράγοντες στην επιλογή συγκολλητικού*

Τα περισσότερα κατασκευαστικά συγκολλητικά είναι ικανά να συγκολλήσουν επιφάνειες, με την προϋπόθεση ότι μπορούν να εφαρμοστούν κατάλληλες επιφάνειες επεξεργασίας. Ωστόσο, εάν είναι δυνατές μόνο οι απλές επεξεργασίες (οικονομικοί λόγοι κλπ), επιλέγονται συγκεκριμένοι τύποι συγκολλητικού. Αυτό ισχύει και σε περιπτώσεις που οι επιφανειακοί ρύποι δεν μπορούν να αφαιρεθούν εντελώς πριν από τη συγκόλληση.

Το πρόβλημα του υπολειπόμενου στρες προκύπτει όταν ενώνονται adherends διαφορετικού συντελεστή θερμικής διαστολής με κόλλα που έχει υποστεί curing σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτό το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα σοβαρό όταν ενώνονται μέταλλα όπως αλουμίνιο, με ινώδη σύνθετα όπως άνθρακας/εποxy όπου έχουμε μεγάλη αναντιστοιχία συντελεστών διαστολής. Το υπολειμματικό στρες μπορεί να ελαχιστοποιηθεί επιλέγοντας συγκολλητικό με τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία curing, χαμηλό μέτρο διάτμησης, και αν θεωρηθεί απαραίτητο να χρησιμοποιείται χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή που συνιστάται και να επεκτείνεται ο χρόνος του curing.

Θερμοκρασίες πάνω από 100°C, προκαλούν υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων και ίσως προκαλέσουν υποβάθμιση του συγκολλητικού λόγω οξείδωσης ή άλλες ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις. Επιπλέον, πολλά συγκολλητικά σημειώνουν ιδιαίτερη απώλεια της σκληρότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά στους -40°C περίπου, πράγμα που συναντάται συχνά στις αεροναυπηγικές κατασκευές. Ωστόσο, τροποποιημένα εποξικά, ειδικά κάποια συγκολλητικά φιλμ, έχουν εξαιρετική αντίσταση στην απώλεια σκληρότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Σημαντικές οικονομικές πτυχές που σχετίζονται με τη χρήση συγκολλητικού, περιλαμβάνουν το κόστος των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των συγκολλητικών, της διάρκειας αποθήκευσης, την απαίτηση παροχής θερμότητας και πίεσης κατά το curing του συγκολλητικού, και την ανάγκη για εργαλεία, ειδικότερα ακριβά αντικείμενα όπως autoclaves. Άλλοι παράγοντες, περιλαμβάνουν το χρόνο της διεργασίας και το επίπεδο ικανότητας που απαιτείται από το προσωπικό στη χρήση κόλλας. [4]

#### 4.2.1.2 Αξιολόγηση των ιδιοτήτων του συγκολλητικού σε πίεση και ένταση

Τα συγκολλητικά films που βασίζονται σε σκληρυνόμενη epoxy γενικά χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν δομικές αρθρώσεις για εφαρμογές αεροσκαφών, αν και τα συγκολλητικά paste χρησιμοποιούνται επίσης για κάποιες εφαρμογές, ειδικά για επισκευές. Δύο συγκολλητικά films, τα FM 73 και FM 300 είναι παραδείγματα τυπικών συγκολλητικών που χρησιμοποιούνται σε συνδέσεις σύνθετο-σύνθετο και σύνθετο-μέταλλο. Οι θερμοκρασίες του curing είναι 120°C για FM 73, και 180°C για FM 300. Μια παραλλαγή του FM 300, το FM 300-2, έχει θερμοκρασία στο curing 120°C, ενώ παρέχει καλές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιείται ευρέως για την επισκευή σύνθετων κατασκευών. [4,19]

#### 4.2.1.3 Υγρασία και περιβαλλοντικές επιδράσεις

Τα εποξικά και άλλα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σαν βάσεις σε συγκολλητικά και μήτρες (matrix) σύνθετων υλικών, είναι υδρόφιλα, επομένως απορροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή απορροφούν σχετικά πολύ λιγότερη υγρασία, αλλά είναι επιρρεπή σε απορρόφηση και καταστρέφονται ή υποβαθμίζονται από οργανικούς διαλύτες. Με μεταλλικές συγκολλητικές επιφάνειες το νερό μπορεί να εισχωρήσει στα εκτεθειμένα άκρα της κόλλας. Η υγρασία απορροφάται στην επιφάνεια σε βαθμό που εξαρτάται από τη διαλυτότητα και τη σχετική υγρασία, και μετά διαχέεται στο μεγαλύτερο μέρος του υλικού. Επειδή οι πολυμερικές ίνες του φορέα είναι θερμοπλαστικές, η μεταφορά υγρασίας είναι σημαντικά λιγότερη από ότι στα πολυμερή θερμοσκληρυνόμενης μήτρας.

Δυστυχώς, από όλα τα υγρά, όπως αεροπορικά καύσιμα, λάδι μηχανής, υδραυλικό υγρό, το νερό είναι αυτό που προκαλεί την υποβάθμιση των συγκολλημένων αρθρώσεων με θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, ειδικότερα αν η μια από τις συγκολλημένες επιφάνειες είναι μέταλλο. Η απορροφούμενη υγρασία προκαλεί τα εξής προβλήματα:

- 1) Πλαστικοποιεί τη μήτρα μειώνοντας τις μηχανικές της ιδιότητες, ιδιαίτερα σε αυξημένες θερμοκρασίες.
- 2) Μειώνει τη θερμοκρασία μετατροπής γυαλιού T<sub>g</sub>, στην οποία λαμβάνουν χώρα δραματικές αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες.
- 3) Καταστρέφει την επαφή adhesive-adherends, ειδικά όταν έχουμε μέταλλο, εκτοπίζοντας την κόλλα.
- 4) Παράγει μη επιθυμητό υπολειπόμενο στρες προκαλώντας φούσκωμα και ράγισμα του συγκολλητικού. Αυτές οι πιέσεις αφαιρούνται κατά την ξήρανση.
- 5) Εξασθενεί την άρθρωση με έκπλυση μη αντιδρώντων συστατικών στο συγκολλητικό.
- 6) Διαταράσσει την άρθρωση σε θερμοκρασίες πάνω από 100°C με σχηματισμό υδρατμών.

[4,20]

## 4.2.2 Μηχανικά ενωμένες αρθρώσεις – Fastened/Bolted Joints

Η ένωση σύνθετων υλικών με μηχανική στερέωση απαιτεί οπές στερέωσης που κόβουν τις ίνες, καταστρέφοντας μέρος της διαδρομής φορτίου (load path). Ωστόσο, αν και παρατηρείται σημαντική απώλεια αντοχής, αποδεκτές αρθρώσεις μπορούν να γίνουν και η μηχανική στερέωση είναι συνήθως το μόνο εφικτό ή οικονομικό μέσο σύνδεσης, πολύ φορτωμένων σύνθετων εξαρτημάτων. [4,21]

### 4.2.2.1 Γενικές εκτιμήσεις σχεδιασμού

Ο στόχος της επίτευξης της ομαλής μεταφοράς φορτίου από τη μια άρθρωση στην άλλη, είναι παρόμοιος στη συγκόλληση και στη μηχανική στερέωση, αλλά οι μηχανισμοί μεταφοράς φορτίου είναι πολύ διαφορετικοί. Στη μηχανική στερέωση, η μεταφορά φορτίου γίνεται με συμπίεση στις επιφάνειες των οπών που διέρχονται από τα μέλη της άρθρωσης και με διάτμηση των συνδετήρων (fasteners). Προβλήματα μπορούν να προκύψουν από σχετικά χαμηλή συμπίεση (bearing) και εγκάρσιες δυνάμεις του σύνθετου συγκριτικά με το μέταλλο. Οι κύριες αστοχίες στις μηχανικές αρθρώσεις στα σύνθετα υλικά είναι:

- 1) Αστοχία έντασης
- 2) Αστοχία διάτμησης
- 3) Τράβηγμα μπουλονιού διαμέσου ελασμάτων (laminates)
- 4) Αστοχία έντασης διάσπασης
- 5) Αστοχία συμπίεσης
- 6) Αστοχία μπουλονιού

Ο τύπος της αστοχίας που λαμβάνει χώρα, εξαρτάται από το λόγο πλάτους/διαμέτρου της οπής (width/diameter –  $w/d$ ) και το λόγο απόσταση άκρης/διαμέτρου (edge distance/diameter –  $e/d$ ). Για μεγάλο  $w/d$  και  $e/d$  η άρθρωση αστοχεί σε συμπίεση. [4,22]

## 4.2.3 Γενικές πτυχές μηχανικής υλικών

### 4.2.3.1 Συνδετήρες (fasteners) για σύνθετα υλικά

Οι επιλογές για σύνθετες αρθρώσεις περιλαμβάνουν μεταλλικούς και μη μεταλλικούς συνδετήρες. Οι συνδετήρες τύπου flush, χρησιμοποιούνται για αεροδυναμική ομαλότητα ή για να παρέχουν απόσταση σε κινούμενες επιφάνειες. Μια μεγάλη ποικιλία συνδετήρων είναι διαθέσιμη, και πολλοί είναι ειδικά σχεδιασμένοι για χρήση με σύνθετα υλικά.

#### Μεταλλικοί συνδετήρες

Για να αποφύγουμε τη γαλβανική διάβρωση με άνθρακα/epoxy, οι μεταλλικοί συνδετήρες περιορίζονται σ' αυτούς που κατασκευάζονται από κράμα τιτανίου, ανοξείδωτο χάλυβα, ή Inconel. Άλλα μέταλλα όπως αλουμίνιο και κράμα χάλυβα, χρησιμοποιούνται αν

μπορούν να μονωθούν για να αποφευχθεί η απευθείας επαφή με το σύνθετο. Οι μεταλλικοί συνδετήρες ταξινομούνται ως:

1) Rivets (πριτσίνια) είναι μόνιμοι συνδετήρες ή αλλιώς σταθεροί συνδετήρες που συγκρατούνται από:

α) Πλαστική παραμόρφωση του άξονα του καρφιού.

β) Άμεση διόγκωση ενός παραμορφώσιμου χιτωνίου πάνω από έναν συμπαγή άξονα.

γ) Παραμόρφωση, τραβώντας ένα χιτώνιο πάνω από ένα κοίλο άξονα. Αυτοί είναι blind fasteners. Για να επιτραπεί η ανάπτυξη προσαρμογής παρεμβολής, ορισμένοι συνδετήρες αυτού του τύπου περιλαμβάνουν ένα παραμορφώσιμο μεταλλικό περίβλημα.

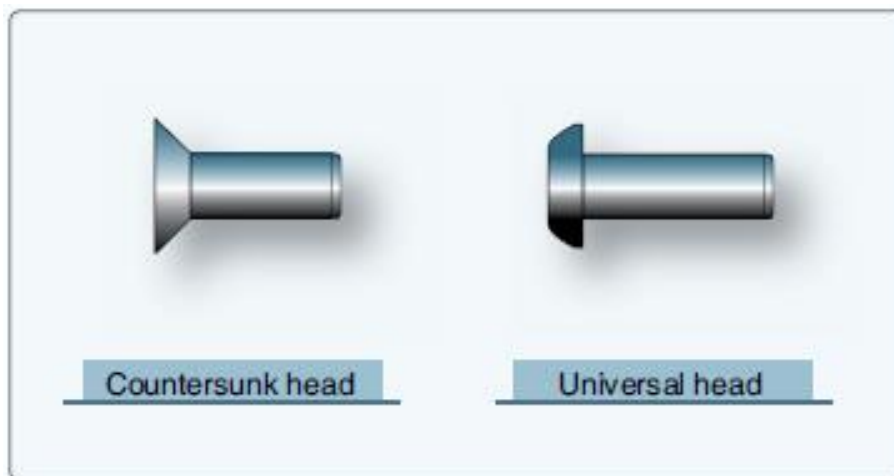
2) Bolts (μπουλόνια): σταθεροί ή δυνάμενοι να αφαιρεθούν συνδετήρες, χρησιμοποιώντας παξιμάδι του οποίου το υλικό είναι πιο μαλακό από το μπουλόνι, σε ένα σπειροειδές άκρο του άξονα που συγκρατούνται από:

α) Τυποποιημένα κλειδιά, και κλειδώνονται από καρφίτσες ή παξιμάδια αυτό-κλειδώματος.

β) Ένα εργαλείο που παραμορφώνει το collar (ειδικό παξιμάδι) σε επίπεδο σχεδίασης ροπής, κλειδώνοντας έτσι το παξιμάδι αυτό στον άξονα.

γ) Ένα παξιμάδι, που ενεργεί στην ίδια πλευρά με την κεφαλή, που τραβά το collar πάνω από ένα κοίλο άξονα, μέσω μιας σπειροειδούς ράβδου που διέρχεται από τον άξονα.

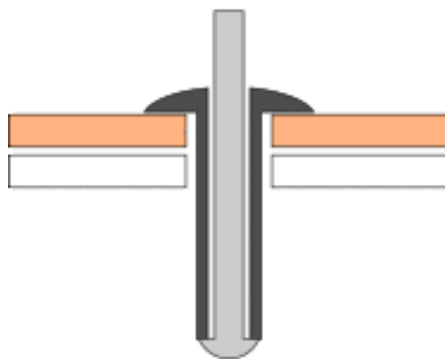
δ) Ένα παξιμάδι, που συνδέεται με πλάκα στο κάτω μέρος του skin.



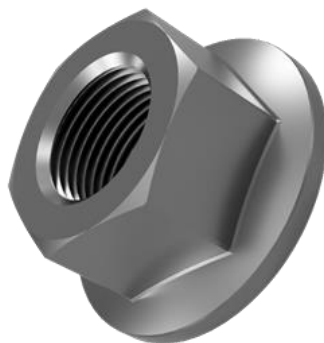
Εικόνα 4.19: Rivets. [3]



**Εικόνα 4.20:** Blind Rivets. [3]



**Εικόνα 4.21:** Blind rivet. [3]



**Εικόνα 4.22:** Collar nut. [3]



**Εικόνα 4.23:** Bolts. [3]

#### *Μη μεταλλικοί συνδετήρες*

Βασίζονται στην ενίσχυση των θερμοσκληρυνόμενων ή θερμοπλαστικών. Χρησιμοποιούνται για:

- α) Να αποφευχθεί το τόξο που μπορεί να δημιουργηθεί στο ρεζερβουάρ καυσίμου κατά τη διάρκεια κεραυνού
- β) Μείωση του βάρους
- γ) Αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής διαφάνειας, μειώνοντας τη διατομή του ραντάρ
- δ) Εξάλειψη προβλημάτων διάβρωσης

Οι μη μεταλλικοί συνδετήρες δεν έχουν την ίδια ικανότητα να φέρουν φορτία με συνδετήρες τιτανίου ή ανοξείδωτο χάλυβα, αλλά μπορούν να ανταγωνιστούν αυτούς που είναι κατασκευασμένοι από κράμα αλουμινίου σε ορισμένες εφαρμογές. Οι συνδετήρες που είναι κατασκευασμένοι από σύνθετα θερμοπλαστικής μήτρας, είναι παρόμοιοι με εκείνους που είναι κατασκευασμένοι από μέταλλα. [4,14]

#### **4.2.4 Πρόληψη της διάβρωσης**

Απαιτούνται ειδικές προφυλάξεις για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης στη μεταλλική πλευρά της άρθρωσης. Ένα μονωτικό στρώμα από γυαλί/εποxy ή αραμίδιο/εποxy, χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου ο άνθρακας/εποxy και κράματα αλουμινίου έρχονται σε επαφή. Κάποιες φορές το μονωτικό στρώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξωτερική πλευρά του εξαρτήματος προς αποφυγή ηλεκτρικής επαφής μέσω των συνδετήρων. Σε γενικές γραμμές, οι συνδετήρες που είναι κατασκευασμένοι από κράμα αλουμινίου ή χάλυβα, αποφεύγονται. Το κράμα τιτανίου είναι το υλικό που προτιμάται, με τον ανοξείδωτο χάλυβα ή το Inconel να είναι επίσης κατάλληλα αλλά με ένα όριο στο βάρος. [4]

#### **4.2.5 Ευθυγράμμιση στοιχείων στις αρθρώσεις**

Οι αρθρώσεις στις αεροπορικές κατασκευές συχνά απαιτούν shimming στη διαδικασία της συνδεσμολογίας (assembly), για να παραμείνουν τα κομμάτια σωστά

ευθυγραμμισμένα. Ωστόσο, το shimming είναι μια από τις πιο δαπανηρές εργασίες στην κατασκευή εξαρτημάτων ατράκτου. Τα μέρη από σύνθετα υλικά απαιτούν περισσότερο shimming από τα μεταλλικά μέρη για δύο πρωταρχικούς λόγους:

α) Οι ανοχές κατασκευής είναι χαμηλότερες εξαιτίας των παραλλαγών πάχους που σχετίζονται με μικρές αλλαγές στην περιεκτικότητα σε σύνθετες ρητίνες.

β) Τα σύνθετα υλικά είναι λιγότερο ανεκτικά στην προσαρμογή δύναμης, λόγω του υψηλού συντελεστή τους και της αδυναμίας απόδοσης.

Διάφορες προσεγγίσεις είναι δυνατές για το shimming.

α) Συμπαγή shims από ελασματωποιημένο τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα και σύνθετο υλικό

β) Ελασματωποιημένα shims από τιτάνιο, ανοξείδωτο χάλυβα ή Kapton

γ) Αποτυπώσιμο πλαστικό [4,14]

#### **4.2.6 Συνδυασμός συγκολλημένων και βιδωμένων/καρφιτσωμένων/ραμμένων υβριδικών αρθρώσεων (Hybrid Joints)**

Μια συγκολλημένη άρθρωση με δομική κόλλα είναι πολύ πιο δύσκαμπτη από μια παρόμοια άρθρωση που ενώνεται με μηχανική στερέωση, ακόμα και όταν ο μηχανικός σύνδεσμος έχει σχεδιαστεί βέλτιστα και χρησιμοποιούνται παρεμβολές προσαρμογής. Επιπλέον είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να σχεδιαστεί μια συγκολλημένη και βιδωμένη ή αλλιώς υβριδική άρθρωση (hybrid joint), στην οποία το φορτίο μοιράζεται αποτελεσματικά ανάμεσα σε κόλλα και μπουλόνι. Οι μέγιστες τάσεις διάτμησης και αποφλοίωσης εμφανίζονται κοντά στο τερματικό άκρο του συγκολλητικού στρώματος. Για να μοιραστεί αποτελεσματικά το φορτίο ανάμεσα στο συγκολλητικό στρώμα και τα μπουλόνια, είναι απαραίτητο τα μπουλόνια να τοποθετηθούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στα άκρα της κόλλας.

Αν και απαιτείται περισσότερη έρευνα, μια υβριδική προσέγγιση που χρησιμοποιεί στερέωση με καρφίτσωμα και συγκόλληση μπορεί να είναι επωφελής για διάφορους λόγους:

1) Οι συνδετήρες παρέχουν μια εναλλακτική διαδρομή του φορτίου, καθώς και ενίσχυση μέσω του πάχους, και επομένως μπορεί να περιορίσει την εξάπλωση της ζημιάς στο παχύ τμήμα των αρθρώσεων με συγκολλημένα σύνθετα, όπου η αστοχία θα συμβεί με την αποσύνδεση του συγκολλητικού στρώματος.

2) Οι συνδετήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις αρθρώσεις lap, για να μειώσουν τις δυνάμεις αποφλοίωσης. Ωστόσο, αυτή είναι μια επικίνδυνη εφαρμογή επειδή οι οπές της στερέωσης (εκτός και αν είναι πολύ καλά σφραγισμένες) επιτρέπουν την είσοδο του περιβάλλοντος στη διασύνδεση δεσμών στην πιο κρίσιμη περιοχή.

3) Η συγκόλληση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακούφιση των τοπικών πιέσεων σε μεταλλικό εξάρτημα σε άρθρωση μηχανικά ενωμένη, και να βελτιώσει σημαντικά τις ιδιότητες κόπωσης και στατικής αντοχής. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, η γραμμή ένωσης μεταφέρει το περισσότερο φορτίο και οι συνδετήρες γίνονται αποτελεσματικοί μόνο μετά την αστοχία της ένωσης. Αυτή η προσέγγιση, χρησιμοποιείται ευρέως με ένωση (με πριτσίνια) στη μεταλλική διαμήκη περιοχή σύνδεσης στην άτρακτο εμπορικών αεροσκαφών. Σε σύνθετη κατασκευή, αυτή η προσέγγιση είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθεί για την αναδιοργάνωση των περιοχών που είναι επιρρεπείς σε ζημιές. [4,23-29]

#### 4.3 Airworthiness ή καταλληλότητα πτήσης

Για το μέσο επιβάτη αεροπορικών εταιρειών, η λέξη airworthiness είναι απλώς μια έκφραση για την καταλληλότητα της πτήσης. Ωστόσο, ένας πιο συγκεκριμένος ορισμός είναι “ασφαλές για την κάλυψη των λειτουργικών αναγκών του χρήστη”. Για την επίτευξη ικανοποιητικού airworthiness, τα αντικρουόμενα χαρακτηριστικά σχεδίασης πρέπει να είναι ισορροπημένα έτσι ώστε να βελτιωθεί το επίπεδο ασφαλείας που είναι εγγενές σε έναν τύπο αεροσκάφους, και αποτελεί βασικό παράγοντα στο σχεδιασμό. Πρακτικές σύγχρονου σχεδιασμού τοποθετούν το airworthiness παράλληλα με έννοιες όπως επίδοση, αποδοτικότητα, λειτουργική αποτελεσματικότητα, αξιοπιστία, συντηρησιμότητα και οικονομία.

Οι βασικές προσπάθειες για την πιστοποίηση (επαλήθευση) σύνθετων κατασκευών, απλά υιοθέτησαν τις ήδη υπάρχουσες απαιτήσεις για τα μέταλλα, χωρίς να υπάρχει αναγνώριση της γενικής διαφοράς των δύο υλικών, παρόλο που αυτές οι διαφορές μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις εκτιμήσεις για το airworthiness. Για παράδειγμα, υπό στατική φόρτιση τα σύνθετα εμφανίζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά σε αστοχία και είναι εξαιρετικά ευαίσθητα σε συγκεντρώσεις καταπόνησης. Αντίθετα τα μέταλλα, εκτός μερικών εξαιρέσεων, εμφανίζουν πλαστική συμπεριφορά πάνω από ορισμένη πίεση, και δεν είναι ευαίσθητα σε εγχοπές υπό στατικές συνθήκες.

Από τις πιο κρίσιμες διαφορές ανάμεσα σε σύνθετα και μέταλλα, είναι η διαφορετική απόδοση σε διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα. Είναι πολύ σημαντικό να καθιερώνονται οι κρίσιμες ιδιότητες των υλικών, μετά την έκθεση σε υπερβολικά ζεστά και υγρά περιβάλλοντα στα οποία θα υποβληθεί η κατασκευή. Επιπλέον, πρέπει να αποδειχθεί ότι δεν θα υπάρξει υποβάθμιση ύστερα από έκθεση σε χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται συνήθως στο περιβάλλον λειτουργίας του αεροσκάφους, όπως υδραυλικά υγρά, αεροπορικά καύσιμα και υγρά αποπάγωσης.

Μια άλλη, λιγότερο κρίσιμη διαφορά μεταξύ μετάλλων και συνθέτων, είναι η ανάπτυξη βλάβης λόγω κόπωσης. Αυτό συχνά αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη κατάσταση σχεδιασμού στα μέταλλα, ενώ τα σύνθετα δείχνουν άριστη κατάσταση σε τέτοια φορτία. Τα επίπεδα πίεσης που σχετίζονται με το σχεδιασμό κρίσιμων περιπτώσεων φορτίου σε σύνθετα υλικά, όπως συμπίεση παρουσία ζημίας από κρούση, ήταν παραδοσιακά αρκετά χαμηλά για να διασφαλίσει ότι η ζημιά δεν θα αυξηθεί λόγω κόπωσης. Καθώς οι σχεδιαστές προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν πλήρως τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα αντοχής και σκληρότητας των σύνθετων υλικών, τα επίπεδα πίεσης στα εξαρτήματα θα αυξηθούν και τα προβλήματα κόπωσης πρέπει απαραίτητα να ληφθούν περισσότερο υπόψη στο airworthiness των μελλοντικών αεροσκαφών.

Τα σύνθετα που βασίζονται σε θερμοσκληρυνόμενες μήτρες γενικά επιδεικνύουν σημαντική ευαισθησία στην απορροφούμενη υγρασία και θερμοκρασία. Σε ένα φυσιολογικό λειτουργικό περιβάλλον αεροσκάφους, τα περισσότερα μηχανολογικά σύνθετα (τυπικά αυτά που έχουν ως βάση το epoxy), μπορούν να απορροφήσουν έως και 1% κατά βάρος υγρασία χωρίς αρνητικές επιπτώσεις στις ιδιότητές τους. Το πραγματικό επίπεδο υγρασίας που απορροφάται από το σύνθετο, είναι ανάλογο με την υγρασία περιβάλλοντος. Η υγρασία



μαλακώνει τη ρητίνη της μήτρας, μειώνοντας τις ιδιότητες των συνθέτων που βασίζονται στη ρητίνη, όπως ακαμψία και αντοχή στη διάτμηση και τη συμπίεση. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα εμφανές σε αυξημένες θερμοκρασίες, όταν η μήτρα μαλακώνει περισσότερο. Οι ίδιοι μηχανισμοί επηρεάζουν την απόδοση των εποξειδικών συγκολλητικών που χρησιμοποιούνται σε συγκολλημένους συνδέσμους. [4,30-39]

#### 4.3.1 Πιστοποιήσεις δομών ατράκτου

Οι ακόλουθες θεμελιώδεις απαιτήσεις έχουν αναπτυχθεί από την εμπειρία με μεταλλικά πλαίσια αεροσκαφών και παραμένουν η βάση για την πιστοποίηση σύνθετων δομών πλαισίου. Αυτά απαιτούν η κατασκευή να έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

##### 1) Στατική αντοχή

α) DLL (design limit load) – σχεδιασμός φορτίου ορίου. Καμία αστοχία ή μη αποδεκτές παραμορφώσεις. Το DLL είναι συνήθως το μέγιστο αναμενόμενο φορτίο στην κατασκευή κατά τη διάρκεια ζωής του.

β) DUL (design ultimate load) – σχεδιασμός τελικού φορτίου. Καμία αστοχία, αν και η περιορισμένη μόνιμη παραμόρφωση είναι αποδεκτή. Ισχύει ότι  $DUL = DLL * 1,5$ .

##### 2) Δύναμη κόπωσης

α) Προσέγγιση ασφάλειας ζωής. Δεν πρέπει να σημειωθεί σημαντική ρωγμή στη διάρκεια ζωής του πλαισίου που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστοχία. Αυτή η προσέγγιση, χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό των περισσότερων μεταλλικών κατασκευών στα παλαιότερα μαχητικά αεροσκάφη, και ακόμα χρησιμοποιείται για τα πολεμικά αεροσκάφη των ΗΠΑ, όπως F-18 και γενικά στα ελικόπτερα.

β) Προσεγγίσεις ασφαλούς αστοχίας:

i) Εναλλακτική διαδρομή φορτίου: Η κατασκευή είναι ανθεκτική στις ζημιές, έτσι ώστε να μπορεί να συμβεί ρωγμή, αλλά να μη μειώσει την αντοχή κάτω από το αποδεκτό επίπεδο πριν εκτοπιστεί. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται γενικά με σχεδιασμό διαδρομής πολλαπλών φορτίων, όπου σε περίπτωση αποτυχίας μιας διαδρομής φόρτωσης, οι υπόλοιπες διαδρομές φορτίου συνεχίζουν να παρέχουν το απαιτούμενο επίπεδο υπολειμματικής αντοχής έως ότου εντοπιστεί η ζημιά. Αυτή η προσέγγιση γενικά χρησιμοποιείται στην κατασκευή μεγάλων στρατιωτικών μεταγωγικών και πολιτικών αεροσκαφών.

ii) Προσέγγιση αργής ανάπτυξης ρωγμών: Η κατασκευή είναι ανθεκτική στις βλάβες, καθώς μπορεί να συμβεί ρωγμή, αλλά οι ρωγμές θα αναπτυχθούν αργά και δεν θα προκαλέσουν αστοχία για ολόκληρη τη ζωή της κατασκευής ή πριν από την ανίχνευση με προγραμματισμένη επιθεώρηση. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια κατασκευή διαδρομής μονού φορτίου, όπου η αστοχία θα ήταν καταστροφική. Το σχέδιο ανθεκτικότητας στις βλάβες για τέτοιες κατασκευές, βασίζεται στην υποτιθέμενη παρουσία ελαττωμάτων σε κρίσιμες περιοχές. Αυτή είναι η προσέγγιση σχεδιασμού που υιοθετήθηκε για τα σύγχρονα μαχητικά αεροσκάφη των ΗΠΑ, όπως τα F-16.

iii) Γενική απαίτηση ανοχής ζημιών: Η αντοχή της κατασκευής δεν πέφτει κάτω από ένα αποδεκτό όριο παρουσία μιας αντιπροσωπευτικής ζημιάς στην κατασκευή. Τέτοιες ζημιές είναι ρωγμή κόπωσης, διάβρωση και τυχαία μηχανολογική επαφή. Η κατασκευή πρέπει να

σχεδιαστεί, έτσι ώστε η ζημιά να είναι αρκετά σοβαρή για να θέσει σε κίνδυνο το όριο χωρητικότητας φορτίου.

iv) Ανθεκτικότητα, οικονομική ανάγκη: Για τη ζωή του αεροσκάφους, οι δαπανηρές επισκευές δεν θα απαιτούνται για ζημιές από κόπωση ή από διάβρωση. Αυτή δεν είναι μια ρυθμιζόμενη απαίτηση-ανάγκη, που σχετίζεται με το airworthiness. Ωστόσο, αυτό συχνά ορίζεται από τον πελάτη μαχητικού αεροσκάφους και είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή αεροσκάφους από εμπορική αεροπορική εταιρεία. [4]



**Εικόνα 4.24:** F-18. [3]

#### 4.4 Τεχνολογία επισκευής

Τα σύνθετα εξαρτήματα πλαισίου από άνθρακα/εποxy και παρόμοιων υλικών, είναι απρόσβλητα από τις δαπανηρές μορφές φθοράς που μαστίζουν το αλουμίνιο και πολλά άλλα κράματα που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ατράκτου, ιδίως ρωγμές κόπωσης και διάβρωση. Ωστόσο, αυτά τα σύνθετα είναι πολύ πιο εύκολο να πάθουν βλάβη κατά τη λειτουργία λόγω μηχανικής πρόσκρουσης. Είναι επιπλέον πιο επιρρεπή σε θερμική βλάβη. Επομένως, η επισκευή τέτοιων ζημιών αποτελεί κρίσιμη απαίτηση για υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής και συνεχή καταλληλότητα για πτήση (airworthiness) των σύνθετων εξαρτημάτων σε στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη. Ο Πίνακας 17 παραθέτει τις κύριες πηγές ζημιών που περιλαμβάνουν κακοδιαχείριση, σύγκρουση (από συντρίμμια διαδρόμου, πεσμένα εργαλεία, σύγκρουση από πτηνά), ζημιά-βλάβη επαφής στις πόρτες από κακή ένωση, βλάβη αποκόλλησης που προκαλείται από ανεπαρκή σκλήρυνση κατά τη συναρμολόγηση των εξαρτημάτων, αποκόλληση που προκαλείται από αφαίρεση και επανεγκατάσταση συνδετήρα (fastener), τοπική υπερθέρμανση που προκαλείται από πρόσκρουση καυτών καυσαερίων ή από κεραυνό.

Οι ελαφριές κατασκευές τύπου honeycomb (κυψέλη), απαιτούν τις περισσότερες κατασκευές επειδή τα skins λεπτής επιφάνειας καταστρέφονται εύκολα από τη μηχανική επαφή. Η διείσδυση της υγρασίας μπορεί να συμβεί μέσω κατεστραμμένων επιφανειών των skins, καθώς και μέσω κακώς σφραγισμένων περιοχών, με αποτέλεσμα τη διάβρωση όταν ο

πυρήνας είναι από κράμα αλουμινίου. Η βλάβη αποτελεί μεγαλύτερο πρόβλημα όταν το πλαίσιο είναι από σύνθετα παλαιότερης γενιάς, όπως εύθραυστες μήτρες.

Τα νέα σύνθετα αεροσκάφη, όπως τα Boeing 787 και Airbus 350, απασχολούν περισσότερες επεξεργασμένες, ολοκληρωτικά ενισχυμένες κατασκευές και ανθεκτικότερες μήτρες. Ωστόσο, σε αυτές τις νέες κατασκευές μπορεί να είναι δύσκολο να αντικατασταθεί η ζημιά σε περιοχές ενίσχυσης, όπου τα skins επιτρέπεται να λυγίζουν κάτω από το όριο φορτίου. Τέλος, πιο ολοκληρωμένες κατασκευές καθιστούν δύσκολη και δαπανηρή την αντικατάσταση εξαρτημάτων, αυξάνοντας έτσι την ανάγκη για αξιόπιστες και υψηλής απόδοσης επισκευές. [4,40-43]

### Πίνακας 17:

Σημαντικοί τύποι ζημιών που υπέστησαν σύνθετα εξαρτήματα αεροσκαφών.

Ελαττώματα	Τυπική αιτία
<b>Κατασκευαστικά ελαττώματα</b>	
Κενά	Κακός έλεγχος διαδικασίας
Ελασματοποίηση	Συμπερίληψη απελευθέρωσης film Κακός έλεγχος διαδικασίας Ελαττωματική διαδικασία διάτρησης οπών Κακή εφαρμογή εξαρτημάτων στη συναρμολόγηση
Επιφανειακή ζημιά	Κακός έλεγχος διαδικασίας Κακός χειρισμός
Λανθασμένες τρύπες	Λανθασμένη διαδικασία διάτρησης
<b>Μηχανική ζημιά</b>	
Περικοπές, γρατζουνιές, εκδορές	Κακή διαχείριση
Διεισδύσεις	Καταστροφή κακής διαχείρισης ή μάχης
Γδαρσίματα	Διάβρωση από βροχή ή χαλίκι
Ελασματοποιήσεις	Επίπτωση: εργαλεία, χαλάζι, πέτρες διαδρόμου Κατάψυξη ή απόψυξη Αεροδυναμικό ξεφλούδισμα Υπερφόρτωση κατά τη συναρμολόγηση ή την αφαίρεση Κεραυνός / στατική εκφόρτωση / laser / υπερθέρμανση

Αποκολλήσεις	Υποβάθμιση μεταλλικών διεπαφών, κολλητικών αρμών
Επιμήκυνση οπών	Κόπωση συμπεριλαμβανόμενη αποτυχία ρουλεμάν Μηχανικά στερεωμένη άρθρωση
Βαθουλώματα/συνθλίψεις πυρήνα	Κακός χειρισμός
Ζημιά άκρων, πορτών κλπ	Κακή εφαρμογή, κακός χειρισμός
<b>Περιβαλλοντική καταστροφή</b>	
Επιφανειακή οξείδωση, κάψιμο	Κεραυνός / laser / υπερθέρμανση
Διάβρωση πυρήνα	Διείσδυση υγρασίας, μεταλλικός πυρήνας
Οίδημα επιφάνειας	Λανθασμένη χρήση διαλυτών ή χρωμάτων

#### 4.4.1 Ταξινόμηση των τύπων κατασκευών

Για καλύτερη κατανόηση της εκτίμησης των βλαβών και των τεχνικών επισκευής, είναι αναγκαίο να υπάρξει μια ταξινόμηση των αεροπορικών δομών. Αυτές είναι:

α) Κρίσιμη δομή. Η ακεραιότητα της δομής-κατασκευής είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συνολικής ασφάλειας πτήσης του αεροσκάφους, για παράδειγμα, βασικά δομικά στοιχεία σε αεροσκάφη κατηγορίας μεταφορών.

β) Πρωτογενής δομή. Μεταφέρει φορτία πτήσης, εδάφους ή συμπίεσης. Η αποτυχία μειώνει τη δομική ακεραιότητα του αεροσκάφους.

γ) Δευτερογενής δομή. Αν η κατασκευή αποτύγχανε, θα επηρέαζε τη λειτουργία του αεροσκάφους αλλά δε θα οδηγούσε στην απώλειά της.

δ) Τριτογενής δομή. Η αστοχία της κατασκευής δε θα επηρέαζε σημαντικά τη λειτουργία του αεροσκάφους.

Η επιθεώρηση, η εκτίμηση ζημιών και οι απαιτήσεις επισκευής διαφέρουν σημαντικά μεταξύ αυτών των ταξινομήσεων. Ωστόσο, ακόμη και στα μεμονωμένα εξαρτήματα, ο επιτρεπόμενος τύπος και μέγεθος ζημιάς, και κατά συνέπεια αποδεκτές ενέργειες επισκευής, ποικίλουν ανάλογα με την κρισιμότητα της κατεστραμμένης περιοχής. [4]

#### 4.4.2 Αξιολόγηση ανάγκης επισκευής

Οι επιπτώσεις από ξένα αντικείμενα είναι ο κύριος τύπος ζημιάς σε σύνθετες αεροπορικές κατασκευές. Για να διασφαλιστεί η συνέχιση του airworthiness, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η σοβαρότητα της βλάβης και η ανισχευσιμότητα ως μέρος της συνεχιζόμενης συντήρησης. Μέθοδοι αναλυτικής αξιολόγησης υπολειμματικής δύναμης σε κατεστραμένα σύνθετα εξαρτήματα, χρειάζονται για να διασφαλιστεί ότι

πραγματοποιούνται μόνο απαραίτητες επισκευές. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ζημιάς είναι μια από τις ακόλουθες αποφάσεις:

- 1) Καμία επισκευή. Η ζημιά θεωρείται αμελητέα.
- 2) Επισκευή εμφάνισης ή στεγανοποίησης. Απαιτείται για διόρθωση μικρής ζημιάς.
- 3) Επισκευή κατασκευής. Απαιτείται εφόσον είναι εφικτό. Επειδή η αντοχή μειώνεται κάτω από την επιτρεπόμενη απόλυτη σχεδίαση, ή έχει τη δυνατότητα να μειωθεί σε κάποια επόμενη συντήρηση.
- 4) Η επισκευή δεν είναι οικονομικά εύλογη και το εξάρτημα πρέπει να αντικατασταθεί.

Παρακάτω αναφέρονται οι 5 κατηγορίες ζημιών που απεικονίζουν τη σχέση της ισχύος του σχεδιασμού και του μεγέθους της ζημιάς.

Κατηγορία 1: Επιτρεπόμενη ζημιά ή επιτρεπόμενα κατασκευαστικά ελαττώματα που δεν υποβαθμίζουν την κατασκευαστική ακεραιότητα, και ως εκ τούτου μπορεί να μην εντοπιστούν από προγραμματισμένες επιθεωρήσεις. Οι κατασκευές που έχουν τέτοιες ζημιές είναι ικανές να διατηρήσουν το απόλυτο φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της αεροπορικής κατασκευής. Παραδείγματα: Περιορισμένος διαχωρισμός ελασμάτων, αραιότητα της ύλης (πόροι) και μικρές γρατζουνιές. Δεν χρειάζεται επισκευές.

Κατηγορία 2: Ζημιά που μπορεί να ανιχνευθεί σε προγραμματισμένα διαστήματα ελέγχου. Αυτού του τύπου η ζημιά δεν πρέπει να αναπτυχθεί ή εάν υπάρξει αργή και συγκρατημένη ανάπτυξη, η υπολειμματική αντοχή της κατεστραμμένης κατασκευής κατά το διάστημα επιθεώρησης είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ικανότητα φορτίου ορίου. Παραδείγματα: Ορατή ζημιά από κρούση, βαθιές “ουλές”, διαχωρισμός ελασμάτων ή συγκολλήσεων, καθώς και τοπική καταστροφή από υπερθέρμανση. Οι επισκευές πρέπει να αποκαταστήσουν την απόλυτη ικανότητα φόρτισης.

Κατηγορία 3: Ζημιά που μπορεί να εντοπιστεί εύκολα (σε λίγες πτήσεις), από λειτουργίες ή από προσωπικό συντήρησης χωρίς ειδικές ικανότητες στην επιθεώρηση συνθέτων. Η κατασκευή μπορεί ακόμα να διατηρήσει την οριακή ικανότητα. Απαιτούνται αμέσως επισκευές για την αποκατάσταση της απόλυτης ικανότητας φορτίου.

Κατηγορία 4: Διακριτή ζημιά που μειώνει την αντοχή κάτω από το φορτίο ορίου σχεδιασμού, έτσι ώστε οι ελιγμοί να είναι περιορισμένοι, δηλαδή η κατασκευή μπορεί να επιτρέψει ασφαλή πτήση σε μειωμένα επίπεδα. Παραδείγματα: Ριπή ρότορα, ριπή ελαστικών, σοβαρή χαλαζόπτωση κατά την πτήση. Οι επισκευές χρειάζονται μετά την πτήση.

Κατηγορία 5: Σοβαρή ζημιά εντός ορίων σχεδίασης. Αυτό όμως είναι αυτονόητο για την κάθε επιχείρηση. Παραδείγματα: Ανώμαλη σύγκρουση εδάφους με οχήματα συντήρησης, συνθήκες υπερφόρτωσης πτήσης ή ασυνήθιστα κακές προσγειώσεις. Απαιτείται άμεση επισκευή.

Λόγω έλλειψης απλών αναλυτικών προσεγγίσεων για την εκτίμηση της αντοχής των κατεστραμμένων σύνθετων υλικών, χρησιμοποιούνται γενικά εμπειρικές μέθοδοι. Επειδή πρέπει να απομακρυνθεί η σοβαρή ζημιά, η κύρια απαίτηση είναι να εκτιμηθεί η αντοχή με την προκύπτουσα γεωμετρία αποκοπής. Πρόσφατη έρευνα για την ανάπτυξη προγνωστικής μοντελοποίησης της υπολειπόμενης αντοχής σύνθετων ελασμάτων, υπό τη γενική

επικεφαλίδα εικονικών δοκιμών, έδειξε ότι οι προηγμένες τεχνικές υπολογιστικής μοντελοποίησης μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια την αντοχή των σύνθετων ελασμάτων που περιέχουν τρύπες διαφόρων μεγεθών και σχημάτων. [4,43-45]

#### 4.4.3 Απαιτήσεις επισκευής

Οι δομικές απαιτήσεις για επισκευή ποικίλουν ανάλογα το εξάρτημα ή το κατασκευαστικό στοιχείο. Για παράδειγμα, τα skins του φτερού είναι κρίσιμα για την αντοχή σε ένταση ή συμπίεση, τα skins της ουράς και οι επιφάνειες ελέγχου είναι συχνά κρίσιμα για αστοχία, και τα skins πλαισίου και των spars μπορεί να είναι κρίσιμα για σταθερότητα και λυγισμό.

Για δομές ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια, οι κανονισμοί περί airworthiness απαιτούν η επισκευασμένη κατασκευή να ταιριάζει με την ανοχή ζημιών και την αντοχή στην κόπωση της αρχικής κατασκευής. Δηλαδή η επισκευασμένη δομή, πρέπει να είναι ικανή να φέρει το τελικό φορτίο σχεδιασμού ακόμη και σε περίπτωση επιτρεπόμενης ζημιάς (π.χ. βλάβη από διαχωρισμό, πρόσκρουση) και μπορεί να επιτύχει την αντοχή στην κόπωση, της αρχικής κατασκευής. Εκτός από τη δύναμη, την ακαμψία και τη σταθερότητα, ορισμένες βασικές ιδιότητες που πρέπει να αποκατασταθούν περιλαμβάνουν αεροδυναμικό σχήμα, ισορροπία, απόσταση από τα κινούμενα μέρη, και αντίσταση σε χτύπημα από κεραυνό. Τα μαχητικά-στρατιωτικά αεροσκάφη ίσως απαιτήσουν την αποκατάσταση των ιδιοτήτων stealth του εξαρτήματος, που μπορεί να επηρεάσουν τον επιλεγμένο τύπο επισκευής. [4,44,46-51]

#### 4.4.4 Επίπεδα επισκευής

Μια σημαντική εκτίμηση στην επιλογή των επισκευών, είναι το επίπεδο στο οποίο μπορεί να είναι ή πρέπει να πραγματοποιηθεί η επισκευή. Οι δραστηριότητες επισκευής εκτελούνται σε ένα από τα ακόλουθα επίπεδα.

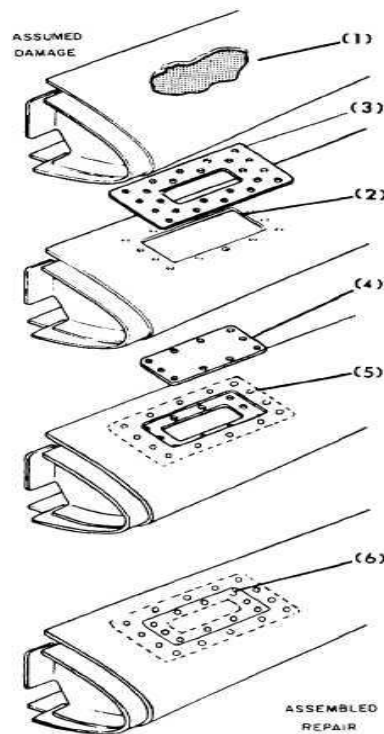
α) Επίπεδο πεδίου (Field level). Εκτελείται απευθείας στο αεροσκάφος, στην περίπτωση όπου είναι διαθέσιμο εξειδικευμένο προσωπικό και/ή επαρκείς εγκαταστάσεις. Τέτοιες δραστηριότητες, περιορίζονται γενικά σε μικρές επισκευές σε μη βασικές δομές ή σε μη κρίσιμες επισκευές σε πρωτογενή δομή. Οι επισκευές πεδίου έκτακτης ανάγκης μπορεί να πραγματοποιηθούν για να καταστήσουν το αεροσκάφος λειτουργικό ή να το φέρουν πίσω στη βάση, σε κατάσταση μάχης. Οι επιδιορθώσεις ζημιών μάχης (battle damage-BDR), μπορούν να πραγματοποιηθούν γρήγορα από σχετικά ανειδίκευτους τεχνικούς που χρησιμοποιούν ελάχιστο εξοπλισμό. Στη συνέχεια μπορούν να αντικατασταθούν με μόνιμες επισκευές.

β) Επίπεδο αποθήκης (Depot level). Εκτελείται από εξειδικευμένο προσωπικό και οι εγκαταστάσεις είναι διαθέσιμες (έως και εργοστασιακή ικανότητα σε ορισμένες περιπτώσεις). Ωστόσο, εάν το εξάρτημα είναι πολύ μεγάλο ή δύσκολο να αφαιρεθεί από το αεροσκάφος, οι επισκευές εφαρμόζονται απευθείας στο αεροσκάφος. [4]

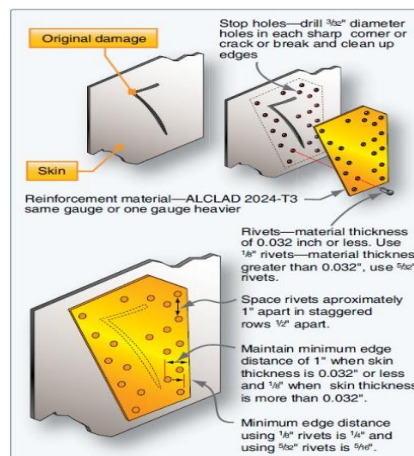
#### 4.4.5 Επισκευές συγκολλημένων μπαλωμάτων

Ένα μπάλωμα (patch) γενικά καλύπτει ένα κυκλικό κόψιμο που γίνεται για την αφαίρεση του κατεστραμένου υλικού. Το κυκλικό σχήμα χρησιμοποιείται για ευκολία κατεργασίας και για ελάττωση της συγκέντρωσης πιέσεων.

Ως πρώτη προσέγγιση, μια επιδιόρθωση εξωτερικού μπαλώματος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μισό, από μιας διπλής επικάλυψης σύνδεσμο (joint), και προϋποθέτει ότι παρέχεται επαρκής υποστήριξη από τον πυρήνα της κυψελώδους δομής. Είναι κατάλληλα πατημένα στα άκρα του για να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη τάση διάτμησης και αποφλοίωσης. [4]



Εικόνα 4.25: Flush patch. [3]



Εικόνα 4.26: Patch. [3]

#### 4.4.5.1 Πτυχές μηχανικής υλικών

Οι επιλογές για εξωτερικά μπαλώματα χρησιμοποιώντας συστατικά όπως άνθρακα/εποxy είναι:

- α) Άνθρακας/εποxy που βασίζονται σε προεμποτισμένα υλικά (cocured ή precured).
- β) Άνθρακα/εποxy που βασίζονται σε υγρή τοποθέτηση με ανθρακούχο πανί και ρητίνη.
- γ) Κράμα τιτανίου βασισμένο σε ελασματωποιημένο φύλλο.

Το λεπτό φύλλο μετάλλου από τιτάνιο παράγει ένα patch με καλές μηχανικές ιδιότητες. Σε αυτή την περίπτωση, τα στρώματα από φύλλα μετάλλου που συμπλέκονται με συγκολλητικό film (μεμβράνη), συνδέονται με το μητρικό φύλλο. Αυτή η προσέγγιση λειτουργεί πολύ καλά για επισκευές σε αρκετά επίπεδες, λεπτές περιοχές. Για την απόκτηση δυνατών και ανθεκτικών επισκευών με επιθέματα από κράμα τιτανίου είναι απαραίτητο το φύλλο να επεξεργάζεται σωστά. [4]

#### 4.4.5.2 Υλικά μπαλωμάτων και συγκολλητικά

Οι ιδιότητες αποθήκευσης και επεξεργασίας των συγκολλητικών επισκευών και μητρών, επηρεάζουν έντονα την υποστήριξη των συνθέτων. Για καλές μηχανικές ιδιότητες, μια ιδανική ρητίνη μήτρας ή συγκολλητικό είναι αυτό που:

- α) Είναι αποθηκευμένο για μεγάλες περιόδους σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- β) Είναι γρήγορο στο curing σε μέτριες θερμοκρασίες.
- γ) Είναι επεξεργάσιμο υπό απλές συνθήκες σάκου κενού (vacuum bag).

Σαφώς και δεν υπάρχουν υλικά που έχουν όλα τα παραπάνω. Πρέπει να γίνουν διάφοροι συμβιβασμοί. Οι κύριες μορφές για κατασκευαστικά συγκολλητικά που χρησιμοποιούνται για επισκευές στα αεροσκάφη είναι συγκολλητικά films και paste. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους απεικονίζονται στον Πίνακα 18. Τα συγκολλητικά φιλμ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εργασίες επισκευής σε μερικώς precured κατάσταση. Για τα συγκολλητικά paste, οι δυσκολίες ζύγισης και ανάμιξης σωστών ποσοτήτων ρητίνης και σκληρυντικών αντιμετωπίζονται χρησιμοποιώντας κατάλληλη συσκευασία. Κάθε συσκευασία περιλαμβάνει δύο συστατικά προ ζυγισμένα για μια εφαρμογή και διαχωρίζονται με ένα εύθραυστο σφράγισμα.



**Πίνακας 18:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των films και pastes.

	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<b>FILMS</b>	Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες	Περιορισμένη ζωή (διάρκεια) αποθήκευσης 6-12 μήνες
	Βολικό και αξιόπιστο	Απαιτεί ψυκτική αποθήκευση και μεταφορά (-20°C τυπικά)
	Δεν απαιτείται ανάμειξη	Ελάχιστες ποσότητες παραγγελίας
	Μπορεί να εξελιχθεί για βελτίωση των χαρακτηριστικών	Δυσνητικά μεγάλοι χρόνοι παράδοσης
		Υψηλό κόστος
	<b>ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ</b>
<b>PASTES</b>	Πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες	Απαιτεί ζύγιση και ανάμειξη συστατικών
	Μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης	Χειροκίνητη εφαρμογή στην επιφάνεια συγκόλλησης
	Απαιτήσεις για χαμηλότερη πίεση, για αποφυγή κενών	
	Μπορεί να αγοραστεί σε μικρές ποσότητες	

Η προσέγγιση επισκευής που παρέχει τον καλύτερο συνδυασμό διαμορφωσιμότητας και μηχανικών ιδιοτήτων, είναι το μάλωμα να υποστεί curing σε προσκληρυνόμενη μορφή σε ένα κατάλληλο κατασκευαστικό συγκολλητικό film. Ωστόσο, οι υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες επιτυγχάνονται με precuring του patch (μάλωμα) σε έναν autoclave, υπό βελτιστοποιημένες συνθήκες επεξεργασίας, και έπειτα σύνδεση-συγκόλληση σε ξεχωριστή λειτουργία. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε επισκευές scarf. Αυτές οι δύο προσεγγίσεις, cocure και precure, μερικές φορές αναφέρονται ως προσεγγίσεις soft patch και hard patch αντιστοίχως.

Η CACRC (Commercial Aircraft Composite Repair) έχει καθιερώσει διάφορες προδιαγραφές υλικού για εφαρμογές επισκευής. Η υιοθέτηση κοινών υλικών επισκευής σε πολλά αεροσκάφη και οι κατασκευαστές θα βοηθήσουν στη διαχείριση του κόστους υποστήριξης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής, απλοποιώντας την απογραφή ευπαθών υλικών (υλικά που φθείρονται). [4,52]

#### 4.4.6 Βιδωμένες αρθρώσεις (Bolted repairs)

Οι επισκευές των σύνθετων βασίζονται σε καθιερωμένες διαδικασίες για επισκευές μεταλλικών στοιχείων αεροσκάφους. Είναι κατάλληλα για επισκευή πεδίου για παχιά φύλλα (πάνω από 3mm), που περιέχουν ζημιά μεγάλου μεγέθους όπου η βιδωμένη σύνδεση μπορεί να διατηρήσει τα φορτία σχεδιασμού. Τέτοιες επισκευές έχουν το πλεονέκτημα ότι το κατεστραμμένο στοιχείο δεν απαιτεί στέγνωμα.

Τα βιδωμένα μπαλώματα είναι συνήθως εξωτερικά, αλλά μπορεί να είναι και σε εσωτερική επιφάνεια και η ζημιωμένη τρύπα να γεμίζει με πληρωτικό ρητίνης. Οι συγκεντρώσεις πιέσεων που σχετίζονται με φορτία bearing σε μια επισκευή, δεν είναι σοβαρό μειονέκτημα σε μια σύνθετη κατασκευή που ήδη έχει στερεωθεί μηχανικά (π.χ. ένα φτερό από skin σύνθετου υλικού βιδωμένο σε μεταλλική ή σύνθετη κατασκευή). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιων επισκευών, είναι ότι τα μπουλόνια παρέχουν μια εγκάρσια ενίσχυση, που μπορεί να είναι αποτελεσματική στην αποφυγή εξάπλωσης των προϋπαρχόντων ελασμάτων που σπάνε.

Μια εναλλακτική επιλογή είναι η προσέγγιση η συγκολλημένη/συνδεδεμένη, παρόλο που δεν είναι γενικά δυνατό να απαιτήσουν ικανοποιητική κατανομή φορτίου μεταξύ μηχανικών συνδετήρων (fasteners) και συγκολλητικού (κόλλας). [4]

##### 4.4.6.1 Πτυχές μηχανικής υλικών

Το κράμα τιτανίου γενικά χρησιμοποιείται για μεταλλικά patches γιατί δεν ταλαιπωρείται από γαλβανική διάβρωση όταν έρχεται σε επαφή με άνθρακα/εποxy. Αυτό δεν ισχύει για το κράμα αλουμινίου. Ωστόσο, τα patches από κράμα αλουμινίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν ληφθούν προφυλάξεις για να αποφευχθεί η διάβρωση, μονώνοντας την επιδιόρθωση από τη δομή άνθρακα/εποxy χρησιμοποιώντας στεγανωτικό ή υαλοβάμβακα. Το κράμα αλουμινίου είναι σημαντικά πιο εύκολο στο τρύπημα (drilling) από το τιτάνιο, και επομένως είναι πιο κατάλληλο για γρήγορη επισκευή ζημιών, σε περίπτωση που οι εγκαταστάσεις είναι περιορισμένες.

Ο άνθρακας/εποxy είναι μια εναλλακτική λύση για το κράμα τιτανίου για το μπάλωμα, και μπορεί να σχηματιστεί σε υγρή τοποθέτηση από υφασμένο ύφασμα άνθρακα. Τα μπαλώματα από σύνθετα υλικά που σχηματίζονται από προεμποτισμένα, παρέχουν σημαντικά υψηλότερες αντοχές σε bearing.

Οι συνδετήρες τύπου countersunk γενικά απαιτούνται για αεροδυναμικό προφίλ. Εκτός και αν το patch είναι τοποθετημένο στην εσωτερική επιφάνεια, τα άκρα του θα πρέπει να στρίβονται για διατήρηση αεροδυναμικής ομαλότητας. Γενικά το patch δεν πρέπει να προεξέχει πάνω από 4mm. [4]

#### 4.4.6.2 Εγκατάσταση μπαλωμάτων

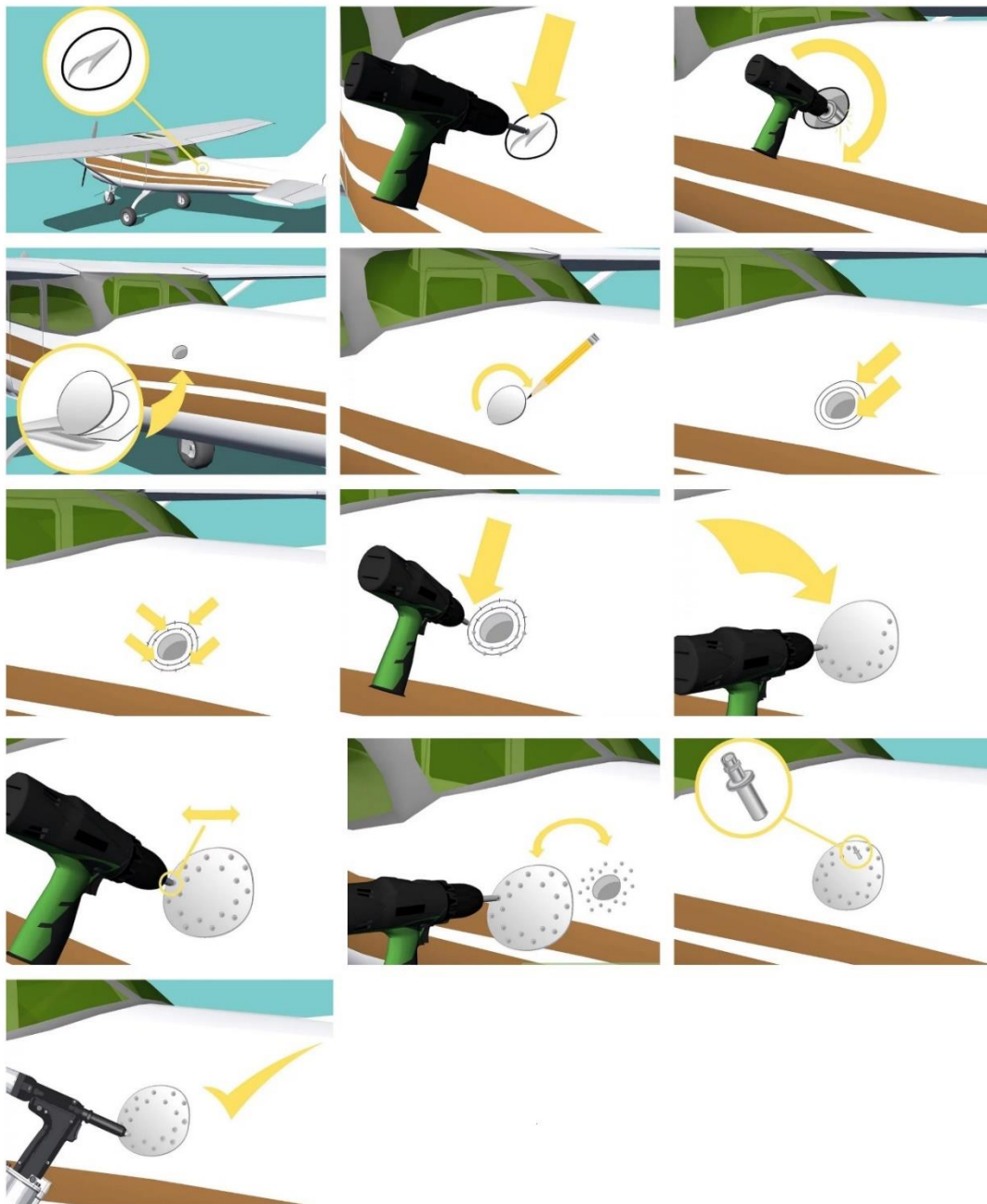
Οι συνδετήρες κράματος αλουμινίου συνήθως χρησιμοποιούνται για μόνιμες επισκευές, αν και ο χάλυβας που είναι ανθεκτικός στη διάβρωση είναι μια κατάλληλη εναλλακτική λύση. Οι συνδετήρες τύπου blind (εφαρμόζονται μόνο από τη μια πλευρά), είναι οι πιο κρίσιμοι γιατί υπόκεινται σε φόρτωση μονής διάτμησης.

Το patch πρώτα τρυπιέται με το κατάλληλο μοτίβο τρύπας και στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε ένα πρότυπο για διάτρηση του σύνθετου skin. Τα τεμάχια από κράμα αλουμινίου αρχικά τρυπιούνται σε μικρό μέγεθος (undersize), και στη συνέχεια ανοίγονται σε πλήρες μέγεθος κατά τη διάτρηση του σύνθετου υλικού. Επειδή είναι πολύ πιο σκληρό από το αλουμίνιο, το τιτάνιο τρυπιέται στο τελικό μέγεθος.

Τα patches γενικά εγκαθίστανται σε υγρή κατάσταση, με στεγανωτικό σε όλες τις διεπαφές, ιδιαίτερα αν η επισκευασμένη δομή είναι δεξαμενή καυσίμου. Αυτή είναι μια ιδιαίτερα σημαντική απαίτηση εάν το μπάλωμα αλουμινίου χρησιμοποιείται για να απομονώσει ηλεκτρικά το μπάλωμα από σύνθετο. Η πρόσβαση είναι μόνο από τη μια πλευρά, άρα οι συνδετήρες τύπου blind χρησιμοποιούνται όποτε είναι δυνατόν, και ειδικοί συνδετήρες blind έχουν αναπτυχθεί για σύνθετες εφαρμογές. Αυτοί παρέχουν την πλήρωση της οπής του κοιλία χωρίς ανάπτυξη υπερβολικής πίεσης που θα μπορούσε να διαχωρίσει το σύνθετο υλικό. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί αν χρησιμοποιούνται με μαλακό μέταλλο.

Η απόδοση μεταφοράς φορτίου με συνδετήρες μονής διάτμησης είναι περιορισμένοι επειδή οι συνδετήρες τείνουν να περιστρέφονται υπό φορτίο προκαλώντας αστοχία ρουλεμάν στο σύνθετο skin. Έτσι, για βελτιωμένη απόδοση μεταφοράς φορτίου σε αρθρώσεις υψηλής φόρτωσης, είναι συνήθως απαραίτητο να χρησιμοποιείται μια πλάκα στήριξης για τη φόρτωση των συνδετήρων σε διπλή διάτμηση.

Η διάτρηση οπών στα σύνθετα μπορεί να είναι πρόβλημα, ακόμη και όταν είναι δυνατή η πρόσβαση και από τις δύο πλευρές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εφεδρική πλάκα. Σε περίπτωση που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφεδρική πλάκα, είναι πολύ εύκολο να δημιουργηθεί μια υπερμεγέθους οπή, ή όταν χρησιμοποιείται υπερβολική πίεση να προκληθεί αποκόλληση ή διάσπαση του πίσω μέρους. [4]



**Εικόνα 4.27:** Επιδιόρθωση μικρής ζημιάς στο skin αεροσκάφους. [3]

Η Εικόνα 4.27 απεικονίζει τον τρόπο επιδιόρθωσης μιας μικρής ζημιάς στο skin ενός αεροσκάφους. Τα βήματα της επιδιόρθωσης είναι:

- 1) Σχεδιάζεται ένας κύκλος γύρω από την κατεστραμμένη περιοχή.
- 2) Τρυπάται μια πιλοτική τρύπα (δηλαδή μια μικρή τρύπα διατηρημένη σε ένα κομμάτι κατασκευαστικού υλικού) στον κύκλο, έτσι ώστε ένα μεγαλύτερο Unibit να μπορεί εύκολα να τρυπήσει το αλουμίνιο.
- 3) Χρησιμοποιώντας μια προτιμώμενη μέθοδο, κόβεται το αλουμίνιο μέσα στον κύκλο που έχει σχεδιαστεί αρχικά γύρω από τη ζημιά. Ξεφλουδίζεται η νέα τρύπα.

4) Κόβεται ένα κυκλικό patch από ένα φύλλο αλουμινίου που έχει ίδιο πάχος με το αρχικό skin του αεροσκάφους. Η διάμετρος εξαρτάται από τον αριθμό σειρών πριτσινιών που θα εγκατασταθούν. Ξεφλουδίζεται το εξωτερικό άκρο του επιθέματος.

5) Το patch κεντράρεται πάνω από την οπή του skin του αεροσκάφους και σημειώνεται το περίγραμμά του.

6) Από τη στιγμή που το αλουμίνιο που χρησιμοποιείται εδώ είναι 0,040" (1,01mm), και τα πριτσίνια έχουν διάμετρο 4/32" (3,17mm), η απόσταση άκρου για το τρύπημα θα είναι 1/4" (6,35mm). Το έλασμα που κόβεται για αυτή την επισκευή είναι αρκετά μεγάλο σε διάμετρο για 2 σειρές καρφιών (rivets), άρα θα σχηματιστεί μια γραμμή 1/4" (6,35mm) από τη μικρή τρύπα και 1/4.

7) Μόλις σχεδιαστούν οι γραμμές απόστασης των άκρων, επισημαίνεται η θέση για κάθε rivet. Ο κανόνας για την απόσταση από τα πριτσίνια είναι τουλάχιστον 4 φορές τη διάμετρο του πριτσινιού, και το πολύ 12 φορές τη διάμετρο του πριτσινιού. Το κάθε διάστημα μεταξύ κάθε rivet πρέπει να είναι το ίδιο και εντός των ορίων.

8) Στη συνέχεια, τρυπιούνται οι pilot holes (πιλοτικές τρύπες) όπου βρίσκονται τα πριτσίνια, με ένα μικρό τρυπάνι ώστε να είναι δυνατή η διάτρηση των οπών σε πλήρες μέγεθος, χωρίς να υπάρξει παραμόρφωση του φύλλου αλουμινίου.

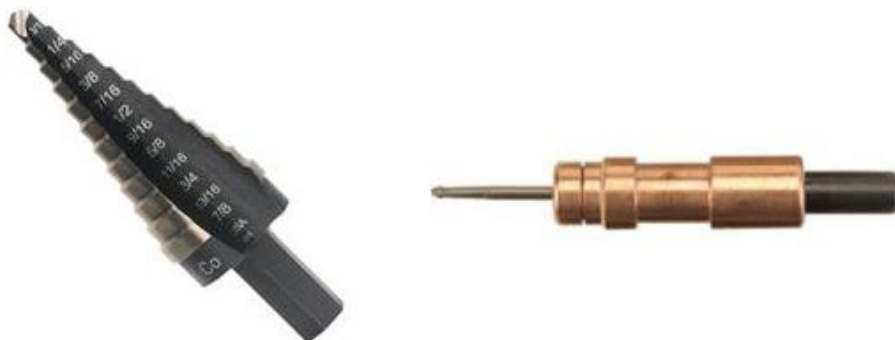
9) Το patch ασφαλίζεται στο skin, και ανοίγονται τρύπες στο patch. Χρησιμοποιούνται οι τρύπες που έχουν διατρηθεί προηγουμένως στο skin ως οδηγός.

10) Με το patch στερεωμένο στην επιφάνεια (skin) επεκτείνονται οι οπές στην κατάλληλη διάμετρο. Χρησιμοποιούνται clocos (ειδικοί συνδετήρες) για να διαβεβαιωθεί ότι το patch δε θα μετακινηθεί κατά τη διάρκεια διάνοιξης των οπών.

11) Το patch αφαιρείται από το skin και καθαρίζονται όλες οι οπές, τόσο στο patch όσο και στο skin.

12) Μετά το καθάρισμα, το patch ασφαλίζεται ξανά στο skin χρησιμοποιώντας clocos.

13) Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα rivets, ασφαρίζεται το patch στο skin του αεροσκάφους.



**Εικόνα 4.28:** Unibit drill και Cleco fastener. [3]

#### 4.5 Αυτό-θεραπεία (Self-healing) της βλάβης αποκόλλησης

Η βλάβη αποκόλλησης είναι μια διαδεδομένη λειτουργία αποτυχίας σε σύνθετα ελάσματα (πολυστρωματικά φύλλα), έτσι έχουν διεξαχθεί μελέτες σχετικά με τη σκοπιμότητα παροχής μιας ικανότητας αυτοθεραπείας. Αν και αυτό θα ήταν πολύ πλεονεκτικό, είναι μια περίπλοκη λειτουργία με απρόβλεπτες συνέπειες. Ωστόσο, αντιπροσωπεύει ένα βήμα στην προσομοίωση βιολογικών συστημάτων, που είναι μακροπρόθεσμος στόχος στην ανάπτυξη πολυλειτουργικών σύνθετων υλικών.

Έχουν μελετηθεί αρκετές προσεγγίσεις. Ωστόσο, για αυτοθεραπεία, η απλούστερη προσέγγιση είναι η απελευθέρωση (μετά από βλάβη αποκόλλησης) μιας υγρής ρητίνης και σκληρυντικού, που μπορούν να διεισδύσουν στην αποκόλληση και στη συνέχεια να θεραπεύσουν για να αποκαταστήσουν την ακεραιότητα της κατεστραμμένης περιοχής. Άλλες παραλλαγές είναι δυνατές, όπως η ενσωμάτωση ενός καταλύτη για τη σκλήρυνση της υγρής ρητίνης στη σύνθετη μήτρα. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις για την επίτευξη αυτής της ιδανικής ικανότητας:

α) Την ενσωμάτωση κοίλων εύθραυστων ινών (γενικά γυαλί), που περιέχουν τα συστήματα επισκευής υγρών.

β) Η ενσωμάτωση μικροκαψουλών (microcapsules) που περιέχουν το σύστημα επισκευής υγρών στη μήτρα του σύνθετου υλικού.

Στην ιδανική περίπτωση, αυτές οι προσεγγίσεις δεν θα πρέπει να απαιτούν περαιτέρω εφεύρεση, απαιτώντας έτσι ότι η ρητίνη συνδέεται και σκληραίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ρητίνες θα έπρεπε να παρέχουν αποδεκτές μηχανικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων και κάτω από δύσκολες συνθήκες ζεστού/κρύου. Επιπλέον, για να μειωθεί η διαταραχή στο σύνθετο, οι εύθραυστες ίνες ή οι μικροκάψουλες πρέπει να είναι πολύ μικρές.

Σε μικρές μελέτες, απαιτήθηκε στη συνέχεια κάποια επεξεργασία. Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου γυάλινοι σωλήνες που περιέχουν εποξειδική ρητίνη ενός τμήματος υψηλής σκλήρυνσης, τοποθετημένες σε συγκεκριμένες περιοχές διασύνδεσης σε ένα έλασμα άνθρακα/εποxy, ήταν σε θέση να αποκαταστήσουν ένα σημαντικό επίπεδο αντοχής συμπίεσης μετά την πρόσκρουση. Ωστόσο, χρειάστηκε μια αύξηση της θερμοκρασίας για να επηρεαστεί η συσκευή.

Άλλες μελέτες πλησιέστερες στην ιδανική απαίτηση, έχουν δείξει την ικανότητα να επιδιορθώνουν την αποκόλληση χρησιμοποιώντας ρητίνες σκλήρυνσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, μικροκάψουλες ρητίνης μέσης διαμέτρου 166mm, ενσωματώθηκαν σε μια εποξειδική μήτρα που περιέχει σωματίδια καταλύτη, σχηματίζοντας επί του περιβλήματος ένα πολυεστερικό πολυμερές υψηλής διασταυρούμενης σύνδεσης στην ελασματοποιημένη περιοχή. Η ρητίνη που απελευθερώθηκε καθώς οι μικροκάψουλες έσπασαν, αποδείχθηκε ότι είναι ικανή να διεισδύσει και να θεραπεύσει τις αποκολλήσεις σε δείγματα δοκών διπλού προβόλου, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προκαλούνται από κόπωση. Με την εφαρμογή θέρμανσης σε 80°C, επιτεύχθηκε 80% ανάκτηση ενέργειας θραύσης, η οποία μειώθηκε περίπου 40% υπό σκλήρυνση θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Σαφώς, αυτές οι εξελίξεις βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ωστόσο, η δυνατότητα αυτό-θεραπείας είναι πολλά υποσχόμενη μακροπρόθεσμα.

Μια άλλη καινοτόμος προσέγγιση για την επούλωση της ελασματοποίησης είναι η ενσωμάτωση θερμοπλαστικών βελόνων πάχους σε έλασμα άνθρακα/εροxy. Η ραφή βελτιώνει την αντοχή στην αποκόλληση. Όταν συμβαίνει η ελασματοποίηση, μπορεί να εφαρμοστεί θερμότητα για να λιώσει το θερμοπλαστικό, επιτρέποντάς του να ρέει μέσα στις αποκολλήσεις. Αν και αυτή η προσέγγιση δεν είναι αυτόματη, επειδή βασίζεται σε εξωτερική παρέμβαση για την εφαρμογή θερμότητας, έχει αποδειχθεί ότι αποκαθιστά τη σκληρότητα του συστήματος. [4,40,53-55]





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, είναι η ανάλυση των σύνθετων υλικών, από το πρώτο κύμα αντικατάστασης των μετάλλων με βιομηχανικά πλαστικά, μέχρι και σήμερα. Επίσης, δίνεται έμφαση στο πόσο σημαντικά έχουν συμβάλει σε πολλούς τομείς, και ειδικά στον τομέα της αεροναυπηγικής.

Η εισαγωγή στα σύνθετα υλικά με την επεξήγηση κάποιων όρων και βασικών εννοιών, την ταξινόμησή τους, καθώς και την ταξινόμηση πολυμερικών μητρών και ενισχυτικών ινών, οδηγεί στις κυριότερες μεθόδους μορφοποίησής τους, με τη σημαντικότερη να είναι αυτή του αυτόκλειστου κλιβάνου, ή αλλιώς Autoclave.

Από τις πιο πρόσφατες τεχνικές είναι αυτή του z-rinping, όπου συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των σύνθετων υλικών. Οι μηχανικοί αεροδιαστημικής του MIT, διαπίστωσαν ότι η συγκεκριμένη τεχνική αυξάνει την ανθεκτικότητα των ραμμένων, όπως λέγονται, υλικών κατά 30%. Η διαδικασία αυτή βρίσκεται σε εξέλιξη, και μελλοντικά θα συμβάλλει στην ύπαρξη ακόμα ελαφρύτερων αεροσκαφών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς μειωμένο βάρος αεροσκάφους ισούται με εξοικονόμηση καυσίμου και οικονομία.

Αν και τα σύνθετα υλικά αντικατέστησαν τα μέταλλα το 1950, από το 2000 μέχρι σήμερα έχουμε τη μεγαλύτερη επέκτασή τους στον τομέα των αεροσκαφών, όπου και συνέβαλαν στην εξοικονόμηση του βάρους τους.

Όσο σημαντικά και αν είναι όμως τα υλικά αυτά, δημιουργούν αρκετά εμπόδια, τα οποία είναι υπεύθυνα για την αργή εφαρμογή τους στα αεροσκάφη. Μερικά από αυτά είναι κυρίως το υψηλό κόστος των μη κατεργασμένων υλικών, και της κατασκευής των εξαρτημάτων του αεροσκάφους. Όσον αφορά την επιλογή νέων υλικών για εφαρμογές στα αεροσκάφη, δύο κύριοι παράγοντες είναι η ασφάλεια και το κόστος.

Στα μαχητικά αεροσκάφη, οι πρώτες εφαρμογές σύνθετων έγιναν το 1970, με τη χρήση βορίου/εποxy, ενώ σήμερα ένα τεράστιο ποσοστό χρησιμοποιεί άνθρακα/εποxy ή άνθρακα/BMI. Στο μεγαλύτερο μέρος όμως του φτερού, προτιμάται ακόμη μέταλλο, όπως το κράμα τιτανίου, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων κόπωσης και βαλιστικής επίδρασης. Ο κύριος λόγος μη αποκλειστικής χρήσης συνθέτων, είναι το υψηλό κόστος τους.

Στα πολιτικά αεροσκάφη, οι αεροπορικές εταιρείες έχουν περιορίσει τη χρήση συνθέτων σε δευτερεύουσες κατασκευές, όπως πτερύγια. Η Boeing χρησιμοποίησε σύνθετα υλικά σε ουρές και δοκούς δαπέδου, ενώ η Airbus σε ένα μεγάλο μέρος του στόλου της.

Εκτός όμως από τα μεγάλα αεροσκάφη, είδαμε ότι σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν και σε μικρότερα αεροσκάφη μεταφοράς, με το Beechcraft Starship να είναι το πρώτο αεροσκάφος πλήρως κατασκευασμένο από σύνθετα.

Στο πλαίσιο, τα κύρια εξαρτήματα όπως φτερά και ουρά, συνδέονται με αρθρώσεις, γνωστές και ως joints, όπου και είναι τα πιο αδύναμα σημεία του πλαισίου του αεροσκάφους.

Πολύ σημαντικό για ένα αεροσκάφος, είναι το airworthiness ή αλλιώς καταλληλότητα της πτήσης, που είναι συνώνυμο με έννοιες όπως επίδοση, αξιοπιστία, οικονομία. Αποτελεί το βασικό παράγοντα στο σχεδιασμό, και για να θεωρηθεί ικανοποιητικό, πρέπει τα χαρακτηριστικά σχεδίασης να βρίσκονται σε ισορροπία.

Αν και τα σύνθετα υλικά δεν προσβάλλονται από βλάβες που ταλαιπωρούν μέταλλα και κράματα, είναι πολύ εύκολο να πάθουν βλάβη κατά τη λειτουργία, από μηχανική πρόσκρουση, καθώς και θερμική βλάβη. Αν θέλουμε να υπάρχει συνεχής καταλληλότητα πτήσης, τόσο σε στρατιωτικά, όσο και σε πολιτικά αεροσκάφη, πρέπει η επισκευή να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν, καθώς αποτελεί κρίσιμη απαίτηση.

Οι ζημιές χωρίζονται σε κατηγορίες, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η σχέση της ισχύς σχεδιασμού με το μέγεθος της ζημιάς. Με αυτόν τον τρόπο, γνωρίζουμε εάν δε χρειάζονται επισκευές, αν χρειάζονται μετά την πτήση, ή αν η επισκευή πρέπει να γίνει άμεσα.

Στον τομέα της επισκευής, σημαντικό ρόλο παίζουν τα patches, ή αλλιώς μπαλώματα, τα οποία είναι από άνθρακα/epoxy ή από κράμα τιτανίου. Οι κύριες μορφές κατασκευαστικών συγκολλητικών για επισκευές, είναι films και paste, στην περίπτωση που η επισκευή αφορά συγκολλημένο patch. Αν έχουμε βιδωμένο patch, τότε χρησιμοποιούνται συνδετήρες (fasteners).

Το κομμάτι της αυτοθεραπείας (self-healing) της βλάβης αποκόλλησης, βρίσκεται σε εξέλιξη.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιώργος Παπανικολάου, Διονύσης Μουζάκης, *Σύνθετα Υλικά*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2007.
- [2] Σημειώσεις E-Class, του εργαστηριακού μαθήματος *Σύνθετα Υλικά*, 2016.
- [3] Εικόνες διαδικτύου με τα εξής links:
- [4] Alan A. Baker, Murray L. Scott, *Composite Materials for Aircraft Structures*, Third Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston Virginia, 2016.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia, Z-pinning.
- [6] Callister William D., *Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών*, 9η έκδοση, Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2015.
- [7] Baker, A.A., Dutton S., and Kelly, D., *Composite Materials for Aircraft Structures*, AIAA Education Series, AIAA, Reston, VA, 2004.
- [8] Bunsell, A. R., "Fibre Reinforcement", *Willey Encyclopedia of Composites*, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2012, PP.950-965.
- [9] Vlot, A., and Gunnik, J. W. (eds), *Fibre Metal Laminates an Introduction*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [10] Palmer, R. J., "History of Composites in Aeronautics", *Willey Encyclopedia of Composites*, John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, 2012, PP. 1280-1320.
- [11] Molent, L., and Swanton, G., "The DSTO Contribution to the Fatigue Life Reassessment of the RAAF F/A-18 Hornet Centre Barrel Structure", DSTO-TR-3062, Aerospace Division, Defence Science and Technology Organisation, Australia, 2014.
- [12] Pora, J., "Composite Materials in the Airbus A380-From History to Future", *Proceedings of ICCM13*, Plenary lecture, CD-ROM, 2001.
- [13] Marsh, G., "Aero Engines Lose Weight Thanks to Composites", *Reinforced Plastics*, Vol. 56, No. 6, 2012, pp. 32-35.
- [14] Niu, M. C. Y., "Joining", *Composite Airframe Structures*, Conmilit Press, Hong Kong, 1992, pp. 285-356.
- [15] Yan, D., Neild, S. A., and Drinkwater, B. W., "Modelling and Measurement of the Nonlinear Behaviour of Kissing Bonds in Adhesive Joints", *NDT & E International*, Vol. 47, 2012, pp. 18-25.

- [16] Hart-Smith, L. J., "Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures", *Handbook of Adhesion Technology*, edited by L. F. M. da Silva, and R. D. Adams, Springer-Verlag, Berlin, 2011, pp. 1101-1147.
- [17] Hart-Smith, L. J., "Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints", NASA CR-2218, 1974.
- [18] Potter, D. L., "Primary Adhesively Bonded Structure Technology (PABST). Design Handbook for Adhesive Bonding", AFFDL-TR-79-3129, 1979.
- [19] Kieger, R. B., "Stress Analysis Concepts for Adhesive Bonding of Aircraft Primary Structure", *Adhesively Bonded Joints: Testing Analysis, and Design*, ASTM STP 981, edited by W. S. Johnston, 1988.
- [20] Comyn J., "The Relationship Between Joint, Durability and Water Diffusion", *Developments in Adhesives*, edited by Kinloch, Applied Science, Publishers, United, Kingdom, 1981, Chapter 2.
- [21] Camanho, P., and Tong, L. (eds), *Composite Joints and Connections*, Woodhead, Oxford, UK, 2011.
- [22] Hart-Smith, L. J., "Mechanically-Fastened Joints for Advanced Composites-Phenomenological Considerations and Simple Analyses", *Fibrous Composites in Structural Design*, edited by E. M. Lenoe, D. W. Oplinger, and J. J. Burke, Springer, 1980, pp. 543-574.
- [23] Hart-Smith, L. J., "Design Methodology for Bonded-Bolted Composite Joints, Vol 1, Analysis Derivations and Illustrative Solutions", AFWAL-TR-81-3154, 1982.
- [24] Woos, M. D., Tong, L., Luo, Q., Sun, X., Kaltzos, A., and Rispler, A., "Failure of Stitched Composite L-Joints under Tensile Loading-Experiment and Simulation", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 6, 2009, pp. 715-742.
- [25] Tong, L., Jain, L. K., Leong, K. H., Kelly, D., and Hertzberg, I., "Failure of Transversely Stitched RTM Lap Joints", *Composite Science and Technology*, Vol. 58, No. 2, 1998, pp. 221-227.
- [26] Jain, L. K., Leong, K. H., Mai, Y.-W., and Tong, L. "Effect of Through-Thickness Stitching on the Fatigue Life of Composite Single-Lap Joints", *Applied Composite Materials*, Vol. 5, No. 6, 1998, pp. 399-409.
- [27] Plain, K., and Tong, L., "An Experimental Study on Mode I and II Fracture Toughness of Laminates Stitched with a One-Sided Technique", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, No.2, 2011, pp. 203-210.

- [28] Matsuzaki, R., Shibata, M., and Todoroki, A., "Improving Performance of GFRP/Aluminum Single Lap Joints Using Bolted/Co-Cured Hybrid Method", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, 2008, pp. 154-163.
- [29] Graham, D., P., Rezai, A., Baker, D., Smith, P. A., and Watts, J. F., "The Development and Scalability of a High Strength, Damage Tolerant, Hybrid Joining Scheme for Composite-Metal Structures", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 64, 2014, pp. 11-24.
- [30] Meekons, K. J., "The Origins and Evolution of Design Requirements for British Military Aircraft", *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 204, No. 2, 1990, pp. 147-155.
- [31] Cardrick, A. W., and Curtis, P. T., "Certification of Composite Structures for Military Aircraft", Aerotech '92 (The Aerospace Technology Exhibition and Congress), Birmingham, England, 14-17 Jan 1992.
- [32] U.K. Ministry of Defence, Directorate of Standardisation, "Design and Airworthiness Requirements for Service Aircraft, Volume 1-Aeroplanes", DEF STAN 00-970, May, 1988.
- [33] U.S. Department of Defence, "Aircraft Structures: General Specifications For", AFGS-87221A, 8 June 1990.
- [34] Federal Aviation Administration, "Federal Aviation Regulations, Part 25, Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes", December 2014.
- [35] Elby, D., Hoffman, P., Hoffman M., and Polakovics, D., "Managing Safety: The Mathematical Basis and Origins of the Navy's Factor of Safety", Naval Aviation Structural Integrity and Ageing Aircraft Conference, San Diego, California, 3-5 Feb. 1998.
- [36] Ripley, E., L., and Candrick, A. W., "The UK Approach to the Certification of Composite Components for Military Aeroplanes and Helicopters", AGARD Report No. 660, April 1977.
- [37] Perry, F. S., "Harrier II: A Comparison of U.S. and U.K. Approaches to Fatigue Clearance", AGARD Meeting on An Assessment of Fatigue Damage and Crack Growth Prediction Techniques, September 1993.
- [38] Dutton, S. E., and Lofland, R. A., "Certification of Structural Composites Components Usen on the MD900 Helicopter", *Proceedings of ICCM-11*, Gold Coast, Australia, 14-18 July 1997, Vol. I, edited by M. L. Scott, Australian Composite Structures Society, Melbourne, Australia, 1997, pp. 535-542.
- [39] Federal Aviation Administration, "Advisory Circular: Composite Aircraft Structure", AC20-107B (Change 1), 24 Aug. 2010.

- [40] Baker, A. A., "Repair Techniques for Composite Structures", *Composite Materials in Aircraft Structure*, edited by D. H. Middleton, Longman Scientific and Technical Publishers, 1990, pp. 207-277.
- [41] Baker, A. A., "Joining and Repair of Aircraft Composite Structures", *Composites Engineering Handbook*, edited by P. K. Mallik, Marcel Dekker, New York, 1997, pp. 671-776.
- [42] U.S. Department of Defense, *Composite Materials Handbook*, MIL-HDBK-17-3F, 2002.
- [43] Federal Aviation Administration, Composite Aircraft Structure: Advisory Circular (AC) 20-107B, Change1, 2010.
- [44] Wang, C. H., Gunnion, A. J., Orifici, A. C. and Rider, A., "Residual Strength of Composite Laminates Containing Scarfed and Straight-Sided- Holes", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42, 2011, pp. 1951-1961.
- [45] Ridha, M., Wang, C. H., Chen, B. Y., and Tay, T. E., "Modelling Complex Progressive Failure in Notched Composite Laminates with Varying Sizes and Stacking Sequences", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 58, 2014, pp. 16-23.
- [46] Cox, B., Yang, Q., "In Quest of Virtual Tests for Structural Composites", *Science*, Vol. 314, No. 5802, 2006, pp. 1102-1107.
- [47] Goh, J. Y., Georgiadis, S., Orifici, A. C., and Wang, C. H., "Effects of Bondline Flaws on the Damage Tolerance of Composite Scarf Joints", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 55, 2013, pp. 110-119.
- [48] Harman, A., and Wang, C. H., "Damage Tolerance and Impact Resistance of Composite Scarf Joints", ICCM-162007, Kyoto, Japan.
- [49] Turan, K., "Buckling Behavior of Adhesively Patch-Repaired Composite Plates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 26, 2014, pp. 3253-3261.
- [50] Fawcett, A., Trostle, J., and Ward, S., "777 Empennage Certification Approach", *Proceedings of ICCM-11*, Gold Coast, Australia, 14-18 July 1997.
- [51] Hu, F. Z., and Soutis, C., "Strength Prediction of Patch-Repaired CFRP Laminates Loaded in Compression", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No.7, 2000, pp. 1103-1114.
- [52] Campilho, R. D. S. G., de Moura, M. F. S. F., Ramantani, D. A., Morais, J. J. L., and Domingues, M. S., "Buckling Behaviour of Carbon-Epoxy Adhesively Bonded Scarf Repairs", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 23, No. 10-11, 2009, pp. 1493-1513.
- [53] Armstrong, K., and Barrett, R. T., *Care and Repair of Advanced, Composites*, SAE International, New York, 1998.

[54] Kessler, M. R., Sottos, N. R., and White, S. R., "Self-Healing Structural Composite Materials", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, No. 8, 2003, pp. 743-753.

[55] Williams, G. J., Bond, I. P., and Trask, R. S., "Compression After Impact Assessment of Self-Healing, CFRP", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40, No. 9, 2009, pp. 1399-1406.

[56] Yang, T., Zhang, J., Mouritz, A. P., and Wang, C. H., "Healing of Carbon Fibre-Epoxy Composite T-Joints Using Mendable Polymer Fibre Stitching", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 1499-1507.