

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πειραματική Μελέτη Μηχανικής Συμπεριφοράς  
Σύνθετου Υλικού Συγκολλημένου Με Κόλλα  
Νέας Γενιάς**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**

**ΚΑΡΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ. 5578)**

**ΜΠΟΥΜΠΟΥΛΙΝΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ (Α.Μ. 5582)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΤΣΙΡΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ – ΜΑΙΟΣ 2014**

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	5
<b>1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ</b> .....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών .....	8
1.3 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών ως προς το Υλικό Ενίσχυσης .....	11
1.3.1 Ινώδη Σύνθετα Υλικά .....	11
1.3.2 Κοκκώδη Σύνθετα Υλικά .....	14
1.3.3 Πολύστρωτα Σύνθετα Υλικά .....	14
<b>2 ΙΝΕΣ</b> .....	15
2.1 Ίνες γυαλιού .....	16
2.2 Ίνες άνθρακα .....	19
2.3 Ίνες πολυμερούς .....	22
2.4 Ίνες μεταλλικές .....	23
2.5 Ίνες κεραμικές .....	25
2.6 Ίνες τριχικές .....	26
2.7 Ίνες φυσικών ορυκτών .....	27
<b>3 ΜΗΤΡΑ</b> .....	27
3.1 Οργανικές μήτρες .....	28
3.2 Μεταλλικές μήτρες .....	29
3.3 Κεραμικές μήτρες .....	29
3.4 Εφαρμογές Σύνθετων Υλικών .....	30
3.5 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινώδων σύνθετων .....	34
3.5.1 Γεωμετρία Ινών .....	35
3.5.2 Ποσοστό Ινών .....	35
3.5.3 Προσανατολισμός των Ινών .....	35
3.5.4 Συνάφεια Ινών Μήτρας .....	36
3.5.5 Τελική Επιλογή Υλικών .....	37
3.6 Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών .....	38

<b>4 ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ</b> .....	44
4.1 Γενικά .....	44
4.2 Μηχανική συνένωση υλικών .....	44
4.3 Συνένωση υλικών με συγκόλληση .....	46
4.3.1 Μετωπική συγκόλληση .....	46
4.3.2 Συγκόλληση με Επικάλυψη .....	47
4.3.3 Συγκολλήσεις ενός στρώματος .....	47
4.3.4 Συγκολλήσεις διπλού στρώματος .....	47
4.3.5 Συγκολλήσεις με πρόσθεση κομματιού .....	47
4.3.6 Συγκολλήσεις Σκαλωτές .....	48
4.3.7 Συγκολλήσεις Λοξές .....	48
4.3.8 Συγκόλληση με Επαγωγή .....	49
4.3.9 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση .....	49
4.3.10 Συγκόλληση με LASER .....	49
4.4 Κατηγορίες κολλών .....	50
4.5 Διαδικασία συγκόλλησης υλικών .....	51
4.6 Ταυτόχρονη χρήση μηχανικών τρόπων σύνδεσης και συγκόλλησης .....	52
4.7 Συνένωση υλικών με τη μέθοδο ανάμιξης με τριβή .....	52
4.7.1 Διαδικασία συνένωσης .....	53
<b>5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b> .....	55
5.1 Περιγραφή Δοκιμών .....	55
5.2 Κατηγοριοποίηση Δοκιμών .....	57
5.3 Κωδικοποίηση Δοκιμών .....	60
5.4 Πειραματική Διάταξη .....	62
5.5 Μηχανική Συμπεριφορά σε Εφελκυσμό .....	64
<b>6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ</b> .....	65
6.1 Δοκίμια Αναφοράς .....	65
6.2 Δοκίμια Θερμικά Επεξεργασμένα .....	69
6.3 Σύγκριση δοκιμών αναφοράς και δοκιμών θερμικά επεξεργασμένων .....	71

6.4 Δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση .....	73
<b>7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ .....</b>	<b>77</b>
<b>8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>79</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν όλο και μεγαλύτερο τμήμα των αεροπορικών δομών, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή αξιοπιστία και αναλογία ειδικής αντοχής/βάρους, ενώ η ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στις καιρικές συνθήκες τα καθιστά ικανά να λειτουργούν στο απαιτητικό περιβάλλον της πτήσης. Τμήματα των πτερύγων όπως και καλύμματα κινητήρων κατασκευάζονται εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά. Ενώ μέχρι τώρα η συνένωση των τμημάτων από σύνθετα υλικά γινόταν με ήλους, η χρήση κόλλας κερδίζει συνεχώς έδαφος στην εφαρμογή της, κάτι που οδηγεί σε ανάγκη για έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς των συγκολλημένων τμημάτων. Η συνεχιζόμενη ανάγκη για βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η αντοχή, το μικρό βάρος, η ευκολία συγκόλλησης και το κόστος, οδηγούν στην μελέτη για ανάπτυξη νέων κολλών με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες. Στην εργασία αυτή αρχικά θα γίνει πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των διεργασιών συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά καθώς και των αντίστοιχων πειραματικών διατάξεων. Εν συνεχεία, θα γίνουν πειράματα εφελκυσμού για την μέτρηση της μέγιστης διατμητικής τάσης σε δοκίμια που θα προκύψουν από συγκολλημένα κατασκευαστικά αεροπορικά στοιχεία, για την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του συγκολλημένου με την νέα μέθοδο/κόλλα υλικού.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση της κόλλας σύνθετων υλικών LMB που χρησιμοποιείται για την συνένωση του σύνθετου αεροναυπηγικού υλικού AS4/8552 έναντι της κόλλας Epibond 1590 που χρησιμοποιείται ευρέως μέχρι σήμερα. Μελετήθηκε για αυτό τον σκοπό η συμπεριφορά των δύο κολλών, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την συνένωση του παραπάνω υλικού, σε δοκιμές εφελκυσμού.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο Πατρών στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής των Υλικών με την βοήθεια του καθηγητή και εισηγητή αυτής της πτυχιακής εργασίας Κατσιρόπουλο Χρήστο. Τα πειραματικά δοκίμια χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: Σε δοκίμια αναφοράς, σε δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία και σε δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον υγρασίας. Οι δυο τελευταίες κατηγορίες δοκιμίων δημιουργήθηκαν ώστε να μελετηθεί η υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων της κόλλησης σε σχέση με την κόλληση στα δοκίμια αναφοράς. Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια δύο διαφορετικών παχών γραμμής συγκόλλησης ώστε να διαπιστωθεί πως το εν λόγω πάχος επηρεάζει την αντοχή των συγκολλημένων τμημάτων. Κατόπιν με τα αποτελέσματα που θα συγκεντρώσουμε θα εξετάσουμε μέσω διαγραμμάτων κατά πόσο είναι δυνατόν αυτή η κόλλα να χρησιμοποιηθεί βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα στην αντικατάσταση των ηλώσεων σε διάφορα μέρη των αεροσκαφών

Καρράς Γεώργιος (Α.Μ. 5578)  
Μπουμπουλίνης Στέφανος (Α.Μ. 5582)  
Πάτρα, Μάιος 2014

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

.....  
(Υπογραφή)

.....  
(Υπογραφή)

# 1.ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

## 1.1 Γενικά

Οι μεγάλοι ρυθμοί τεχνολογικής ανάπτυξης, οι νέες απαιτήσεις για ελαφρές και λεπτότοιχες κατασκευές, οι πολυάξονικές καταπονήσεις καθώς και τα εφαρμοζόμενα υψηλά μηχανικά φορτία, οδήγησαν στην ανάπτυξη και χρήση νέων υλικών τα οποία θα είναι ικανά να ανταποκριθούν στις υψηλές αυτές απαιτήσεις. Παράλληλα άρχισε να αυξάνεται το ενδιαφέρον για την αξιοπιστία και την ασφαλή λειτουργία των σύγχρονων κατασκευών καθώς και η ανάγκη για την παραγωγή “οικολογικών υλικών” με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος παραγωγής. Με τον όρο “οικολογικά υλικά” αναφερόμαστε σε υλικά με ιδιότητες όπως μεγάλη διάρκεια ζωής, μικρό ποσοστό αποβλήτων, ευκολία παραγωγής κ.α. Τέτοιες απαιτήσεις αλλά και πολλές άλλες εφαρμογές, οδήγησαν σε νέα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες, πιο ελαφρά και εύκολα στη διαμόρφωσή τους. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι τα υλικά αυτά έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάζονται με βελτιωμένες τις ιδιότητές τους σε συγκεκριμένους προσανατολισμούς ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Μία κατηγορία τέτοιων υλικών είναι τα **σύνθετα υλικά** (composite materials) (Σχήμα 1). Είναι κοινώς αποδεκτό πως δεν υπάρχει ένας απόλυτα σαφής ορισμός του τι ακριβώς είναι ένα σύνθετο υλικό κι αυτό οφείλεται στο ότι ο συγκεκριμένος όρος είναι πολύ γενικός και περιλαμβάνει μέσα του πολλές κατηγορίες υλικών. Ως γενικός ορισμός θα μπορούσαμε να πούμε ότι *σύνθετο υλικό είναι η φυσική ανάμειξη σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων υλικών και η δημιουργία ενός νέου υλικού με τελικές ιδιότητες διαφορετικές και βελτιωμένες από τις αντίστοιχες των υλικών που το αποτελούν*. Επομένως με την κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών καθώς και της τεχνικής ανάμειξής τους μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα σύνθετο υλικό με τις επιθυμητές ιδιότητες. Σε ένα σύνθετο υλικό μπορούμε να διακρίνουμε δύο μέρη. Τη «μήτρα» (matrix) και την ενίσχυση (ίνες). Κατά τη χρήση του συνθέτου, η μήτρα και η ενίσχυση αναλαμβάνουν διαφορετικούς ρόλους. Η μήτρα, αν και έχει μικρότερη αντοχή και συνήθως πολύ μικρότερο κόστος από την ενίσχυση, είναι το υλικό το οποίο συνδέει, προστατεύει και υποστηρίζει το υλικό της ενίσχυσης, το κατανέμει ομοιόμορφα, ενώ στα ινώδη σύνθετα, φροντίζει να διατηρούνται οι ίνες στις επιθυμητές διευθύνσεις.



Σχήμα 1: Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Επίσης προσφέρει αντοχή έναντι στη διάδοση ρωγμών, επιτρέποντας τη σταδιακή αλλά παράλληλα ελεγχόμενη αποκόλλησή της από την ενίσχυση, απορροφώντας μεγάλα ποσά της εξωτερικής ενέργειας. Ως προς τα ινώδη σύνθετα, οι εγκάρσιες ως προς τη διεύθυνση των ινών μηχανικές και θερμικές τους ιδιότητες, καθώς και η αντοχή τους σε διάτμηση, καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τη μήτρα. Καθώς η μήτρα είναι η φάση που έρχεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον, δηλαδή με την υγρασία, τη θερμότητα και τα διάφορα χημικά, είναι αυτή που καθορίζει και την αντίσταση του σύνθετου στις εξωτερικές συνθήκες. Η ενίσχυση του σύνθετου υλικού είναι αυτή που βασικά φέρει όλα τα μηχανικά φορτία, έχοντας συνήθως πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, αλλά και αντοχή, από ότι η μήτρα του υλικού. Αναφερόμενοι στα ινώδη σύνθετα, οι ίνες σε διεύθυνση παράλληλη με τη διεύθυνση φόρτισής τους καθορίζουν σχεδόν όλες τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένων του μέτρου ελαστικότητας, της αντοχής εφελκυσμού, της αντοχής σε κόπωση, της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας καθώς και της θερμικής διαστολής. Η συνεργασία λοιπόν μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης, που σχετίζεται με το βαθμό πρόσφυσης που έχει επιτευχθεί ανάμεσα στις δύο φάσεις, δίνει στο σύνθετο υλικό ιδιότητες που τις περισσότερες φορές το καθιστούν καταλληλότερο και γενικά ανώτερο σε πολλές εφαρμογές από τα κοινά, συμβατικά υλικά όπως ο σίδηρος, το αλουμίνιο, το πλαστικό κ.α.

## **1.2 Ιστορική Εξέλιξη των Σύνθετων Υλικών**

Η χρήση των σύνθετων υλικών δεν αποτελεί εφεύρεση των τελευταίων χρόνων, ούτε καν των τελευταίων δεκαετιών όπως φαίνεται και στο Σχ 2. Από την εποχή κιόλας της Αρχαίας Ελλάδας υπάρχουν αρκετά παραδείγματα χρήσης σύνθετων δομών είτε στην πολεμική τεχνολογία της εποχής είτε σε πιο απλές καθημερινές εφαρμογές. Φυσικά αυτά τα υλικά δεν είναι τίποτα άλλο παρά η προσπάθεια μίμησης της φύσης από τον άνθρωπο.

Υλικά που εύκολα βρίσκουμε στη φύση (ξύλο, πέτρα, πηλός, κόκαλα) χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους ενισχύοντας τα υλικά αυτά με πρόσθετα συστατικά. Ένα δέντρο για παράδειγμα, αποτελείται από ένα ενισχυμένο με ίνες υλικό του οποίου η δύναμη προέρχεται από τις ίνες κυτταρίνης που αυξάνονται στις κατευθύνσεις που ταιριάζουν με το βάρος των κλαδιών. Τα παραδείγματα του καλαμιού, του κορμού κάθε δέντρου και των φύλων των λουλουδιών είναι άλλες περιπτώσεις φυσικών σύνθετων υλικών. Υλικά όπως ο πηλός, η πίσσα και οι ρητίνες, είναι από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος ως μητρικό υλικό για να δημιουργήσει σύνθετα υλικά. Ενδείξεις χρησιμοποίησης τέτοιων υλικών καθώς και κάποιες τεχνικές κατασκευής υπάρχουν σε κεραμικά του 5000π.Χ.

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι πλάκες από πολύστρωτες βέργες ξύλου, παρουσίαζαν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από το φυσικό ξύλο έναντι στρέβλωσης που οφειλόταν στην απορρόφηση υγρασίας.

Στη Μεσοποταμία (1000π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεκτεταμένο σκυρόδεμα, που χρησιμοποιείται στις οικοδομές της σύγχρονης εποχής, δεν είναι παρά η μετεξέλιξη



της τεχνικής της ανάμιξης γύψου με ζωικό τρίχωμα, η οποία ήταν μια πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής στους αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγούμενη 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 διαστημοπλοίων.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες ενισχύσεις στις αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

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

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

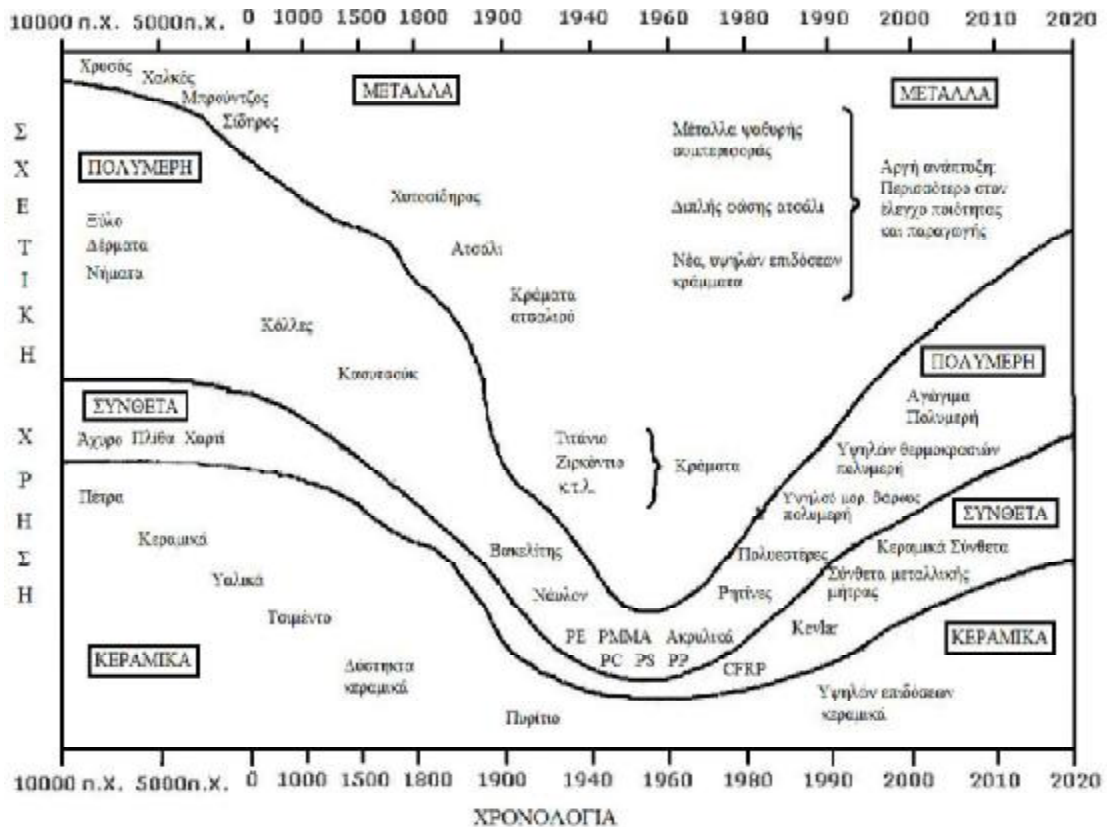
Η μεγάλη ποικιλία ινών και ρητινών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει το πιο κατάλληλο σύστημα υλικών που καλύπτει τις απαιτήσεις του, σύστημα που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικά.

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

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

Το χαρτί αποτελεί κι αυτό ένα φυσικό ινώδες σύνθετο υλικό με πολύ ενδιαφέρουσα ιστορία ανάπτυξης και εξέλιξης. Ο πάπυρος υπήρξε η πιο διαδεδομένη γραφική ύλη σε όλη την αρχαιότητα, μέχρι και το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Αυτό το υδρόβιο φυτό, ύψους δύο έως τεσσάρων μέτρων, αφθονούσε ιδιαίτερα στις όχθες του Νείλου στην Αίγυπτο, αλλά και στη Σικελία, στην περιοχή των Συρακουσών. Οι κατασκευαστές χώριζαν το παχύ τριγωνικό του στέλεχος σε φύλλα, τα οποία αποτελούσαν τους κυλίνδρους του παπύρου. Έπειτα, εφάρμοζαν αυτές τις σελίδες σταυροειδώς, τη μία με την άλλη, τις κολλούσαν και τις

χτυπούσαν μ' ένα ξύλινο σφυράκι, ώστε να δημιουργηθεί μία επιφάνεια όσο το δυνατόν πιο ενιαία. Με ένα ελαφρό κολλάρισμα, μπορούσε κανείς να γράψει στον πάπυρο, ο οποίος αξίζει να σημειωθεί πως είχε μεγάλη αντοχή και διάρκεια.



Σχήμα 2 : Η σχετική χρήση των διάφορων δομικών υλικών μέσα στο χρόνο

Το παρακάτω σύντομο ιστορικό των σύνθετων υλικών (Σχήμα 3) μας δείχνει ότι ο άνθρωπος από τα πρώτα χρόνια της ύπαρξής του είχε συλλάβει και εφαρμόσει την έννοια του σύνθετου υλικού. Η εξέλιξη όμως των σύνθετων υλικών δεν παρουσιάζεται η ίδια στο πέρασμα των ετών. Μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ. η εξέλιξη είναι πολύ αργή και τα σύνθετα υλικά της εποχής εκείνης δε διέφεραν σημαντικά από τα αντίστοιχα των Αρχαίων Αιγυπτίων, Ελλήνων κ.α. ούτε σε ποιότητα, ούτε σε μεθόδους κατασκευής. Ραγδαία εξέλιξη των σύνθετων σημειώνεται τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και ιδιαίτερα τις δύο τελευταίες δεκαετίες εξ' αιτίας μιας άλλης πραγματικά εκρηκτικής εξέλιξης, αυτής των πολυμερών.

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΥΛΙΚΟ
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

*Σχήμα 3 : Ιστορική ανάπτυξη των πολυμερικών σύνθετων υλικών*

### **1.3 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών ως προς το Υλικό Ενίσχυσης**

#### **1.3.1 Ινώδη Σύνθετα Υλικά**

Τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι αυτά που προσφέρουν τις καλύτερες συγκριτικά ιδιότητες κατέχοντας την πρώτη θέση στην προτίμηση των βιομηχανιών σε ότι αφορά υλικά υψηλών προδιαγραφών. Ειδικότερα, τα ενισχυμένα με συνεχείς ίνες πολυμερή υλικά αποτελούν έναν από τους πιο απλούς τύπους σύνθετων υλικών. Η επιτυχία των συγκεκριμένων υλικών οφείλεται στην υψηλή ειδική αντοχή και το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας. Στα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υλικά, οι ίνες και οι μήτρες συνδυάζουν τις επιμέρους φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με σκοπό τη δημιουργία ενός εντελώς νέου και πιο αναβαθμισμένου υλικού, όσων αφορά τη μηχανική του συμπεριφορά

Μια ίνα χαρακτηρίζεται από τον πολύ μεγάλο λόγο μήκους/διαμέτρου που διαθέτει καθώς και τις αναβαθμισμένες ιδιότητες που παρουσιάζει. Επομένως η γεωμετρία αλλά και όλη η διαδικασία παραγωγής της ίνας είναι τα σημεία στα οποία μπορεί κανείς να εξηγήσει αυτή τη συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό μπορεί να ερμηνευτεί αν σκεφτεί κανείς πως το κάθε υλικό έχει την πιο τέλεια δομή που μπορεί να επιτευχθεί όταν κατασκευάζεται υπό τη μορφή ίνας. Έτσι μέσα στην ίνα οι κρύσταλλοι του υλικού είναι ευθυγραμμισμένοι κατά το διαμήκη άξονά της, ενώ πρέπει ακόμα να τονιστεί ότι οι εσωτερικές δομικές ατέλειες μπορούν να περιοριστούν στο ελάχιστο.

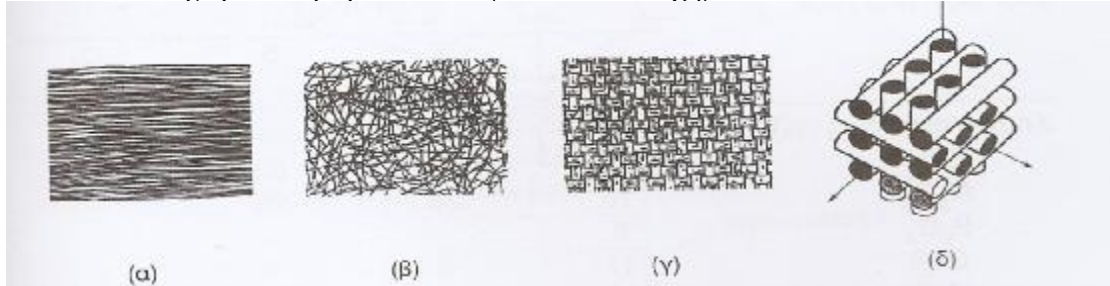
Ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών στη μάζα της μήτρας αποτελεί βασικό κριτήριο για την ταξινόμηση των σύνθετων στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται προς την ίδια διεύθυνση.
2. Πολυδιευθυντικά σύνθετα στα οποία οι ίνες προσανατολίζονται προς διάφορες διευθύνσεις.

Τα πολυδιευθυντικά υλικά διακρίνονται με τη σειρά τους σε υλικά στα οποία :

- Οι ίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις.
- Οι ίνες έχουν πλέξη ύφανσης.
- Οι ίνες έχουν τρισσορθογώνια ύφανση.

Η κατηγοριοποίηση των ινών φαίνεται στο Σχήμα 4.



**Σχήμα 4:** Τύποι διάταξης των ινών : (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

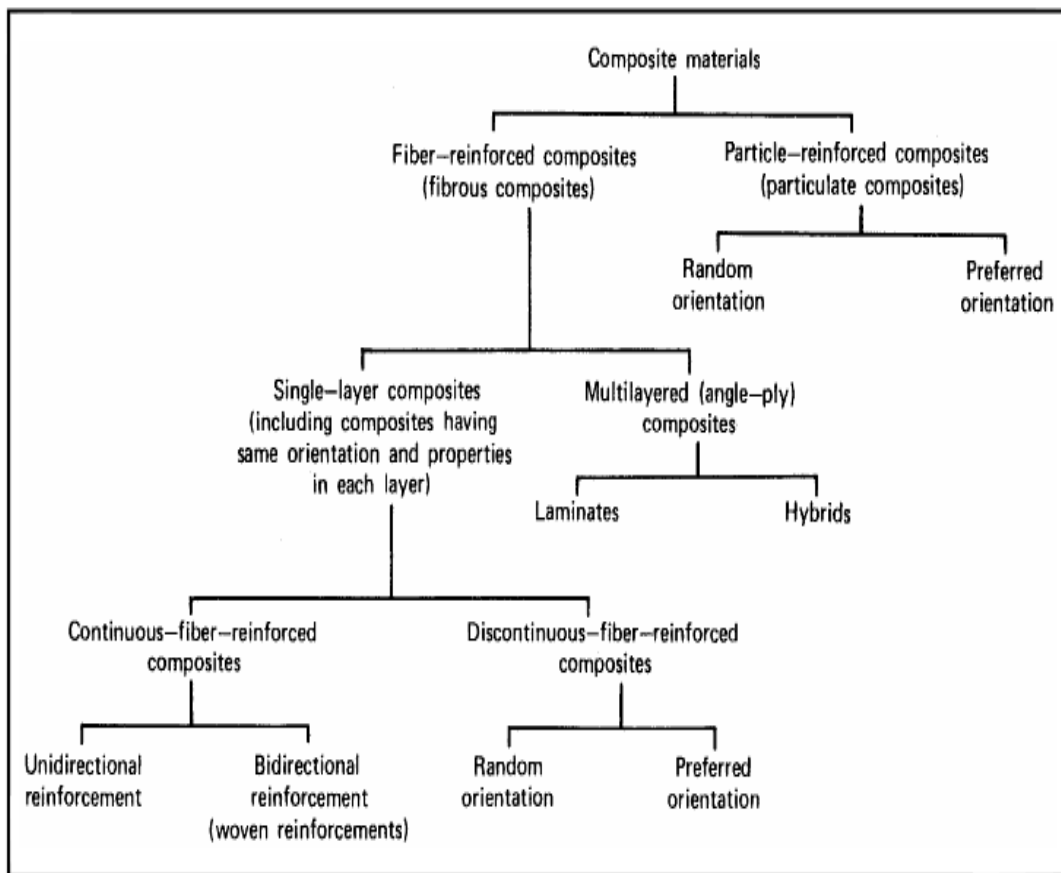
Τα υλικά αυτά συνήθως αποτελούνται από έναν αριθμό φύλλων (layers) μήτρας-ινών, ώστε να εξασφαλίζεται κάποιο επιθυμητό πάχος. Η κατασκευή μιας πλάκας σύνθετου υλικού (laminate) ξεκινά επομένως με τη δημιουργία ενός φύλλου μήτρας-ινών (ply). Το πάχος των φύλλων είναι της τάξης των 0.1mm έως 1mm. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ποιότητα πρόσφυσης των ινών σε κάθε φύλλο μήτρας-ινών, καθώς και η ποιότητα συνένωσης των φύλλων μεταξύ τους. Στο Σχήμα 5 γίνεται αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ινών

Τύπος Ίνας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ίνες Γυαλιού (E-glass, S-glass)	Υψηλή αντοχή Χαμηλό κόστος	Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας Μικρή διάρκεια ζωής σε κόπωση Μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες
Ίνες Αραμιδίων (Aramid - Kevlar)	Υψηλή εφελκυστική αντοχή Μικρή πυκνότητα	Χαμηλή θλιπτική αντοχή Μεγάλη απορρόφηση υγρασίας
Ίνες Βορίου (Boron)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή θλιπτική αντοχή	Υψηλό κόστος
Ίνες Άνθρακα (Carbon - AS4, T300, C6000)	Υψηλή αντοχή Υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Σχετικά υψηλό κόστος
Ίνες Γραφίτη (Graphite - GY-70, pitch)	Πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος
Κεραμικές Ίνες (Ceramic - silicon carbide, alumina)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος

**Σχήμα 5 :** Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ενισχυτικών Ινών

Εάν για την κατασκευή ενός φύλλου χρησιμοποιηθούν συνεχείς ή μακριές ίνες, αυτές μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε μία διεύθυνση, είτε σε δύο διευθύνσεις, συνήθως κάθετες μεταξύ τους. Στην περίπτωση που οι ίνες είναι σε μία διεύθυνση, σ' αυτή τη διεύθυνση παρουσιάζεται και η μεγαλύτερη αντοχή του φύλλου, ενώ στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες η αντοχή είναι πολύ μικρή. Αν χρησιμοποιηθούν κοντές ίνες μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε μία διεύθυνση είτε σε τυχαίες διευθύνσεις. Τα σύνθετα υλικά με κοντές ίνες έχουν γενικά μικρότερη αντοχή από αυτά με συνεχείς ίνες. Ωστόσο με τυχαίο προσανατολισμό των ινών μπορούν να επιτευχθούν συγκρίσιμες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις, εξασφαλίζοντας μια ψευδοϊσοτροπία στο υλικό. Ο κύριος ρόλος των ινών είναι να φέρουν το φορτίο. Βασικό χαρακτηριστικό των ινών είναι η μικρή τους διάμετρος και το σχετικά μεγάλο ειδικό τους βάρος. Λόγω των μικρών διαστάσεων των ινών, τα πειράματα που γίνονται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων αυτών είναι ιδιαίτερος απαιτητικά. Τα πειράματα αυτά είναι είτε εφελκυσμός μίας ίνας, είτε εφελκυσμός μερικών ινών μαζί. Από τα πειράματα αυτά φαίνεται ότι η θραύση των ινών είναι ψαθυρή και οι παραμορφώσεις θραύσης πολύ μικρές.

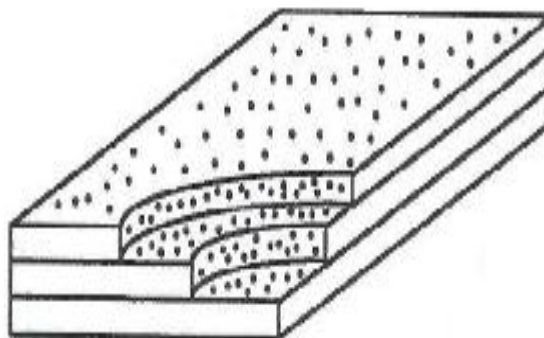
Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6 : Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

### 1.3.2 Κοκκώδη Σύνθετα Υλικά

Στα κοκκώδη σύνθετα υλικά η ενίσχυσή τους αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια (σχήμα κόκκου) κάποιου πολύ ισχυρού και ανθεκτικού υλικού τα οποία είναι διεσπαρμένα σε μία μήτρα διαφορετικού υλικού (Σχ 7). Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως και η μήτρα. Έτσι διακρίνουμε τέσσερις δυνατούς συνδυασμούς :

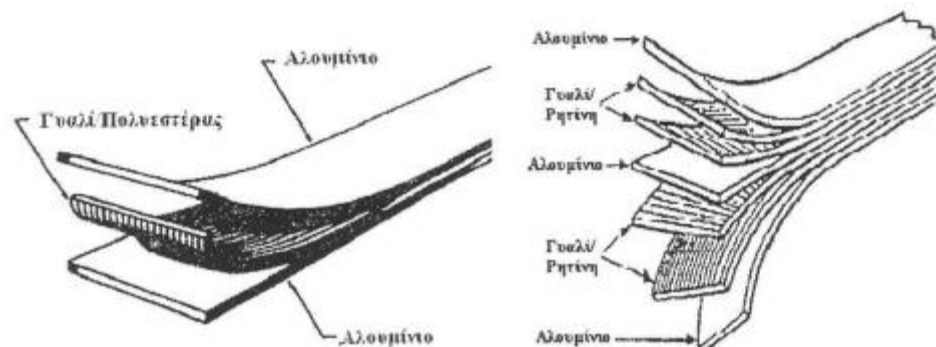


Σχήμα 7: Κοκκώδη σύνθετα υλικά

- Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα.
- Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μη μεταλλική μήτρα.
- Σύνθετα μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα.
- Σύνθετα μη μεταλλικής ενίσχυσης σε μεταλλική μήτρα.

### 1.3.3 Πολύστρωτα Υλικά

Σε αυτού του τύπου τα υλικά η μήτρα και η ενίσχυση έχουν τη μορφή φύλλων. Έτσι τα υλικά αυτά αποτελούνται από αλληπάλληλες στρώσεις ομοίων ή και διαφορετικών υλικών (Σχήμα 8) και ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο με εξαιρετικές ιδιότητες που συνήθως είναι αντοχή, ακαμψία, ελαφρότερη κατασκευή, αντίσταση στη διάβρωση, αντίσταση στη φθορά, αισθητική, θερμική μόνωση, ακουστική μόνωση κ.α.



Σχήμα 8 : Πολύστρωτα σύνθετα υλικά

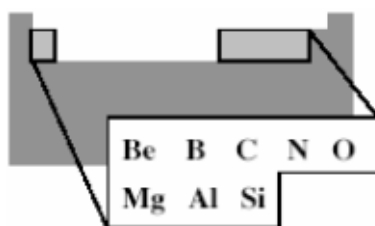
Στον παρακάτω Σχήμα 9 γίνεται μια αναφορά στις χαρακτηριστικές ιδιότητες των προαναφερθεισών ινών

Τύπος Ίνας	Κατασκευαστής	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
<u>Ίνες Γυαλιού (Glass Fibres)</u>				
<i>E-glass</i>	<i>Corning</i>	3450	72.5	2.54
<i>S-glass</i>	<i>Corning</i>	4480	85.6	2.49
<u>Ίνες Άνθρακα (Carbon Fibres)</u>				
<i>AS4</i>	<i>Hercules</i>	3730	235	1.81
<i>T300</i>	<i>Amoco</i>	3654	231	1.77
<i>T350/42</i>	<i>Amoco</i>	5033	290	1.77
<i>F1TS</i>	<i>Hercules</i>	2830	248	1.82
<i>IM-6</i>	<i>Hercules</i>	4480	290	1.80
<i>IM-7</i>	<i>Hercules</i>	5170	290	1.80
<u>Ίνες Γραφίτη (Graphite Fibres)</u>				
<i>T-50</i>	<i>Union Carbide</i>	2070	393	1.67
<i>GY-70</i>	<i>Celanese</i>	1725	517	1.86
<i>Pitch, Type P</i>	<i>Union Carbide</i>	1725	345	2.02
<u>Ίνες Βορίου (Boron Fibres)</u>				
<i>0.004" diameter</i>	<i>Textron</i>	3516	400	2.57
<i>0.0056" diameter</i>	<i>Textron</i>	3516	400	2.49
<u>Ίνες Αραμιδίων (Aramid - Kevlar Fibres)</u>				
<i>Kevlar 29</i>	<i>DuPont</i>	3792	62	1.44
<i>Kevlar 49</i>	<i>DuPont</i>	3792	131	1.47
<u>Ίνες από Κεραμικά Υλικά (Ceramic Fibres)</u>				
<i>Silicon Carbide, 0.0056" diameter</i>	<i>Textron</i>	3448	427	3.04
<i>Nicalon</i>	<i>Nippon Carbon</i>	2070	172	2.60
<i>Alumina, FP-2</i>	<i>DuPont</i>	1725	380	3.70
<i>Saphikon</i>	<i>Saphikon</i>	3100	380	3.80

Σχήμα 9 : Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών

## 2. ΙΝΕΣ

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα (ρ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2η και 3η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Σχήμα 10).



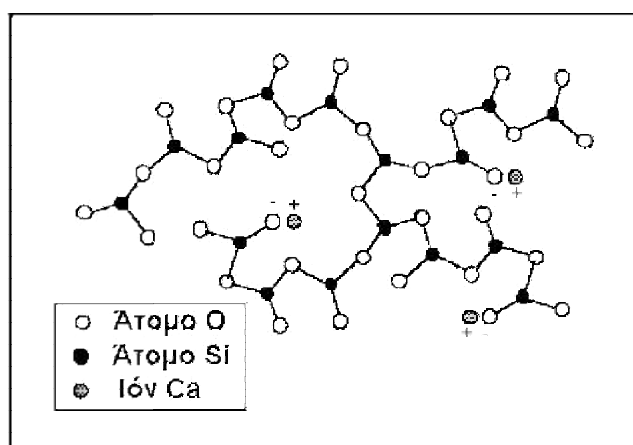
Σχήμα 10 : Περιοδικός πίνακας

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

## 2.1 Ίνες γυαλιού (glass fibers)

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά.

Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Δομή γυαλιού

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO <sub>2</sub> καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO <sub>2</sub> (Διοξείδιο του πυριτίου)	54	60	65	>99,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Οξείδιο του Αργιλίου)	16	25	25	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Οξείδιο του βορίου)	8	-	-	-
CaO (Οξείδιο του καλίου)	17	9	-	-
MgO (Οξείδιο του μαγνησίου)	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού



**E-glass (E=electrical):** Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

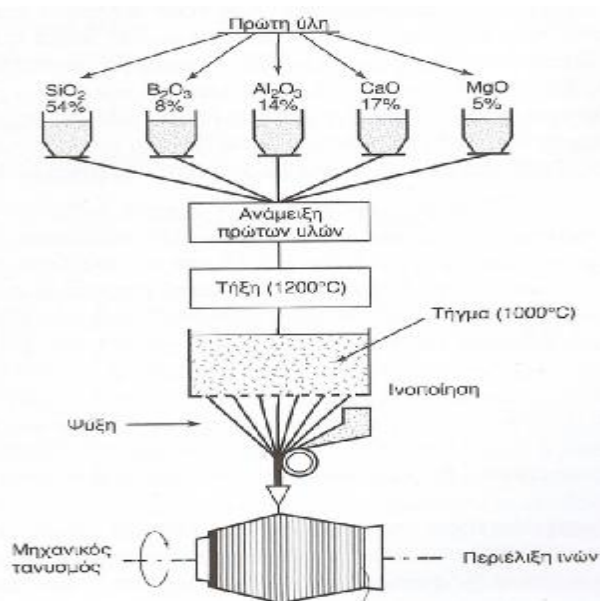
**C-glass (C=corrosion):** Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.

**S-glass (S=stiffness):** Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά  $\text{SiO}_2$  (διοξείδιο του πυριτίου) (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρό πυρίτιο.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκ τριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (Σχήμα. 12) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:



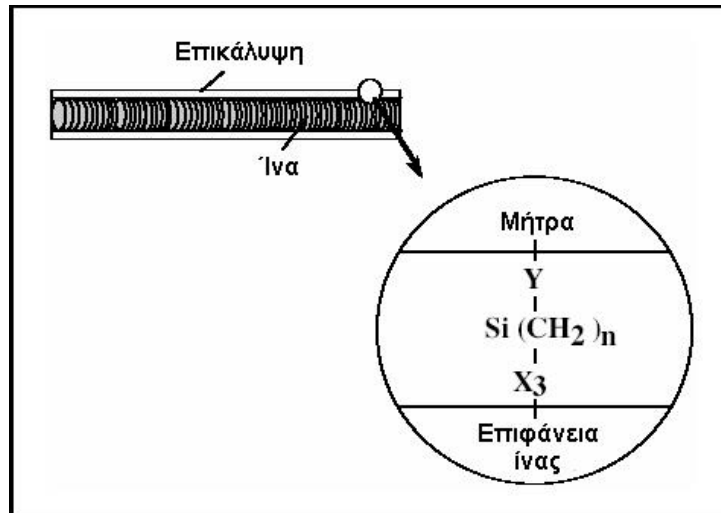
Σχήμα 12: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού

- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο ( $1 \pm 15 \mu\text{m}$ ) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη).
- Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλύτερη πρόσφυση ινών-μήτρας.
- Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s).
- Τα ρολά υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

#### **ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:**

- Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, της πυκνότητας του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου.
- Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.
- Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε *προσωρινά* και *συμβατά*. Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με τις άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης και ακόμη προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες.

Συνήθως χρησιμοποιούνται αμυλέλαια, που διευκολύνουν αποτελεσματικά την πρόσφυση ίνας και ρητίνης εμποτισμού. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία  $\geq 340 \text{ }^\circ\text{C}$  για χρονικό διάστημα 15-20 h. Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης-γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων. Πρόκειται περί οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου  $X_3\text{Si}(\text{CH}_2)_n\text{Y}$ , όπου Y ομάδα συμβατή προς την πολυμερική μήτρα, X υδρολύσιμη ομάδα στο πυρίτιο και  $n=0 \div 3$ , η δράση των οποίων περιγράφεται στο *Σχήμα 13*.



*Σχήμα 13: Δράση οργανοπυριτικών ενώσεων*

• Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλονήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών μπορεί να επιφέρει αλλαγές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

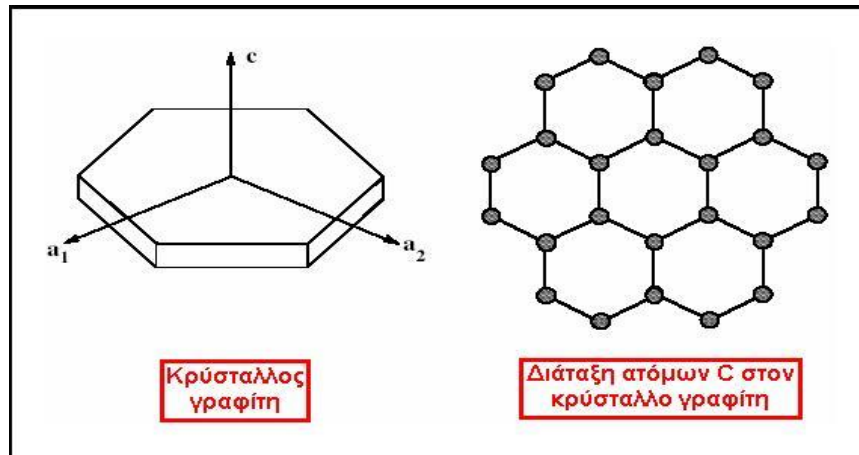
Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού τα συναντάμε συχνά στην καθημερινή μας ζωή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο τομέας της ναυπηγικής όπου έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά, και ιδιαίτερα το ξύλο, αφού η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια αποτελούν μεγάλα πλεονεκτήματα. Ακόμα χρησιμοποιούνται σε πολλά ηλεκτρικά είδη όπως ηλεκτρικούς διακόπτες, ηλεκτρικούς διανομείς, υποδοχές ηλεκτρικών λαμπτήρων κ.α. αφού προσφέρουν ηλεκτρική μόνωση και τη δυνατότητα κατασκευής ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος.

## 2.2 Ίνες άνθρακα (carbon fibers)

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες ίνες είναι, συνήθως, ίνες άνθρακα.

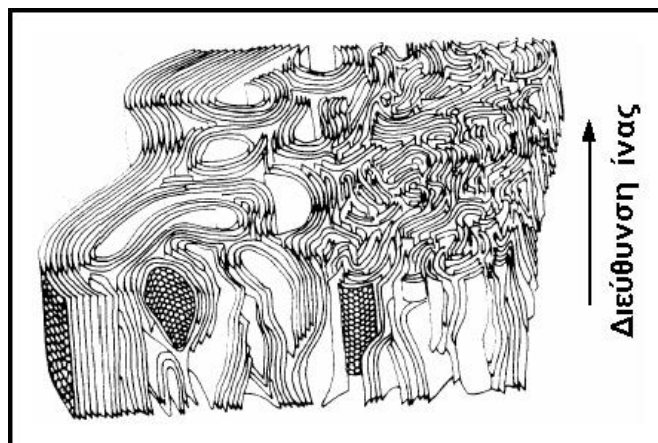
Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. Σχήμα 11. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 15.

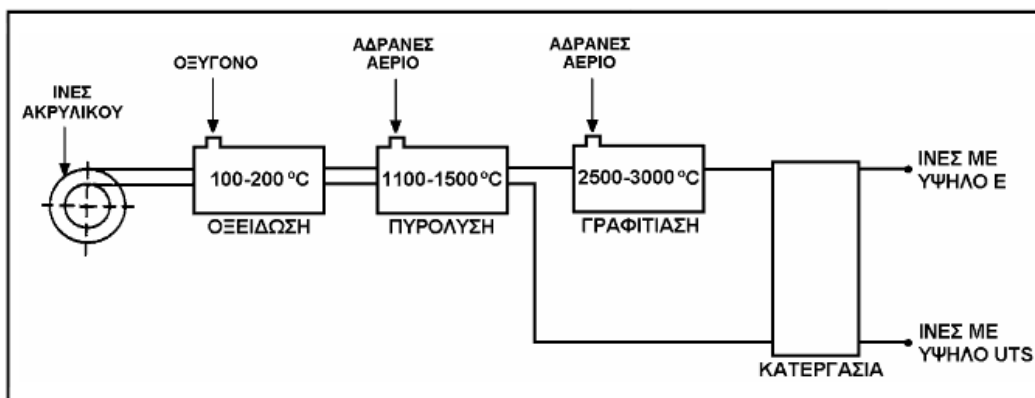


Σχήμα 14 (πάνω): Διάταξη ατόμων άνθρακα σε κρύσταλλο γραφίτη

Σχήμα 15 (κάτω): Δομή ανθρακονήματος



Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα. Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Σχήμα 16):



*Σχήμα 16: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα*

- *Οξείδωση* των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 °C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- *Πυρόλυση*, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500°C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως *ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής* (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa.
- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται *γραφιτίαση*, με ταυτόχρονη αποκρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως *ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας* (high module carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρος τους είναι περίπου 10 μm.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξείδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξείδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

*Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.*

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 °C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.
- Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διεύθυνσης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία.
- Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιλίας και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιλίας και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.
- Τέλος, το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

### 2.3 Ίνες πολυμερούς (*polymer fibers*)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Τα νήματα Nylon και πολυεστέρα παράγονται με φυγοκεντρική περιδίνηση τήγματος, ενώ ακρυλικά και κυτταρινικά νήματα παρασκευάζονται με φυγοκεντρική περιδίνηση διαλύματος και συνακόλουθες τεχνικές καθίζησης ιζήματος. Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- **Kevlar-29:** Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-49:** Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- **Kevlar-149:** Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm<sup>3</sup>), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίνακα 3 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425

**Πίνακας 3:** Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας, βλ. Σχήμα 17. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

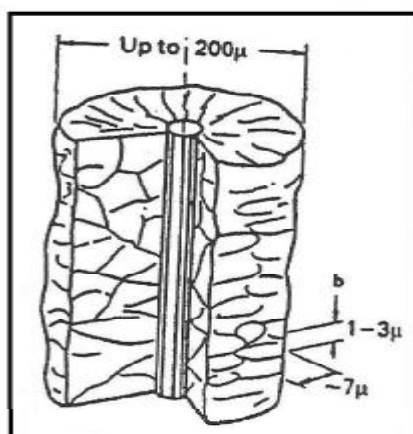


**Σχήμα 17 :** Δομή ίνας Kevlar

#### 2.4 Μεταλλικές ίνες

Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B), το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) θα μπορούσαν να αποτελέσουν εξαιρετικά ενισχυτικά συνθέτων υλικών, αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό βάρος τους (ειδική ακαμψία). Το βόριο είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό για την κατασκευή ινών ενίσχυσης, ωστόσο οι τεχνικές παραγωγής μεταλλικών ινών ενίσχυσης εξακολουθούν να παραμένουν πολύ δαπανηρές.

Το **βόριο** είναι το περισσότερο υποσχόμενο υλικό, για την κατασκευή ινών ενίσχυσης. Βασικότερο χαρακτηριστικό των ινών βορίου (μεταλλικές ίνες) είναι ότι έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο κυμαίνεται από 380 GPa έως 415 GPa. Σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάμετρο τους έχουν εξαιρετική αντίσταση σε λυγισμό. Η ιδιότητα αυτή έχει ως συνέπεια μεγάλη θλιπτική αντοχή για τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες βορίου. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι το κόστος τους, που είναι υψηλότερο ακόμα και από το αντίστοιχο πολλών τύπων ινών άνθρακα (Σχήμα 18). Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κυρίως για αεροναυπηγικές εφαρμογές.



Σχήμα 18 : Ίνα Βορίου με ίνα άνθρακα

Ως συμπαγές υλικό είναι σκληρό και εύθραυστο και, επομένως, η κατασκευή ινών με μηχανουργική κατεργασία καθίσταται αδύνατη. Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

#### Αναγωγή από Αλογονίδιο του Βορίου

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως  $\text{BCl}_3$ ) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας ( $1100^\circ\text{C}$ ) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15  $\mu\text{m}$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 16. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100÷200  $\mu\text{m}$ , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.

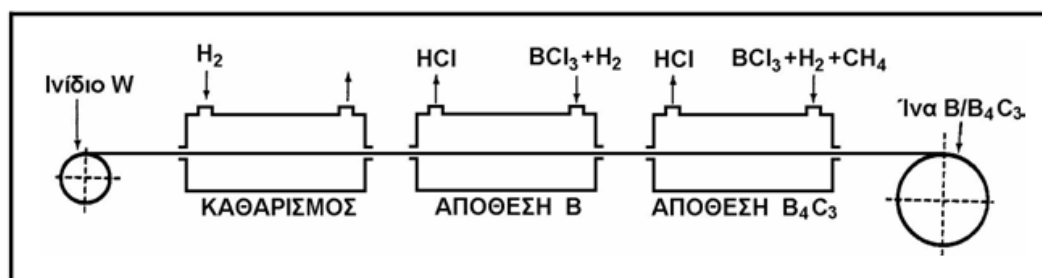
#### Απόθεση με Τεχνική CVD

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Η τεχνική αυτή είναι οικονομικότερη από την προηγούμενη, αλλά το προϊόν έχει χαμηλότερη μηχανική αντοχή.

Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή ( $E = 300\div 420\text{GPa}$ ,  $\text{UTS} = 3000\div 3700\text{MPa}$ ), ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους  $500^\circ\text{C}$ . Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες, θα πρέπει να χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου. Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο



σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου.



Σχήμα 19: Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου.

## 2.5 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες  $Si_3N_4$ , BeO,  $B_4C$  και  $ZrO_2$ .

Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια.

### ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

(α) Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου  $10 \div 25 \mu m$  και εξωτερική διάμετρο  $100 \div 150 \mu m$ .

(β) Από πολυμερικές ίνες (Nicalon). Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία  $850^\circ C$  μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία ( $>1000^\circ C$ ) προκαλεί κρυστάλλωση σε  $\beta$ -SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο  $10 \div 15 \mu m$ .

(γ) Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού. Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει  $\sim 15\%$  κ.β.  $SiO_2$ . Θέρμανση σε θερμοκρασία  $700 \div 900^\circ C$  οδηγεί σε υπόλειμμα  $SiO_2$  και ελεύθερο άνθρακα. Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία  $\sim 1500^\circ C$  και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC. Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο  $\sim 0.1 \div 1 \mu m$  και μήκος  $\sim 50 \mu m$ .

Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίνακα 4). Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
<b>Ιδιότητα</b>			
Πυκνότητα, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	3.3	2.6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d ( $\mu$ m)	140	15	<1

**Πίνακας 4:** Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400°C, ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900°C, λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) διαμέτρου 250 $\mu$ m έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800°C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

## 2.6 Τριχικές ίνες (whiskers)

Οι τριχικές είναι νηματικοί μονοκρύσταλλοι που παράγονται με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε αναγωγική ατμόσφαιρα, κάτω από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η διάμετρος τους είναι της τάξης του 1 $\mu$ m, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Οι εξωτερικές τους επιφάνειες είναι λείες και δεν παρουσιάζουν ζώνες συγκέντρωσης τάσεων.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλούμινα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλια και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιδίων σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

Στον Πίνακα 5 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιδίων από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC (Ινα)	SiC (Τριχίτης)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Ινα)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Τριχίτης)
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	900	1600	800	1300

**Πίνακας 5:** Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιδίων από SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## 2.7 Ίνες φυσικών ορυκτών

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμίαντος και η μαρμαρυγία (mica).

Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20nm, και έχουν διάμετρο ~10μm και μήκος αρκετά cm. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι θερμοκρασία 500°C, οπότε η μηχανική αντοχή του υλικού μειώνεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας της ίνας είναι της τάξης των 160GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500GPa. Ο αμίαντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλειο σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700÷900MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm<sup>3</sup>.

## 3. ΜΗΤΡΑ

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους.
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές.
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες.
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί το ρόλο, με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα, πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

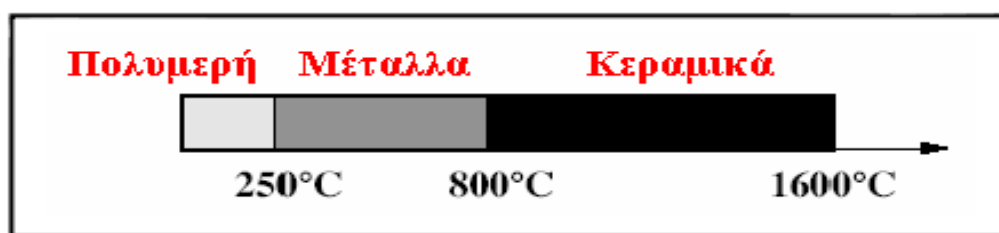
- Ολκιμότητα.
- Ανθεκτικότητα.
- Σχετική ευκαμψία.
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού.

Οι ιδιότητες αυτές πρέπει επίσης να παρουσιάζουν «συμβατότητα» με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του συνθέτου υλικού, καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας – μήτρας.

Ανάλογα με το υλικό της μήτρας διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές (Πολυμερικές).
- Μεταλλικές.
- Κεραμικές.

Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του συνθέτου. Μία γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

Τα αντίστοιχα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντμήσεις:

PMC: Polymer Matrix Composite

MMC: Metal Matrix Composite

CMC: Ceramic Matrix Composite

### 3.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε:

(α) **Θερμοπλαστικές**: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες.

Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS).

Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμιάντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής.

(β) **Θερμοσκληρυνόμενες**: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Τέτοιες μήτρες είναι:

- **Πολυεστερικές ρητίνες** που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- **Εποξειδικές ρητίνες** με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200° C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική.
- **Φαινολικές ρητίνες**, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.

### 3.2 Μεταλλικές μήτρες

Μέταλλα, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα. Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μήτρων, αφού η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης οργανικών μήτρων είναι πολύ χαμηλή (~300°C), ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500°C.

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 6.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
<ul style="list-style-type: none"><li>• Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες.</li><li>• Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.</li><li>• Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.</li><li>• Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.</li><li>• Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.<ul style="list-style-type: none"><li>• Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.</li><li>• Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.</li><li>• Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO<sub>2</sub> σε μήτρα Al).</li><li>• Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.</li><li>• Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.</li></ul>

*Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).*

### 3.3 Κεραμικές μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και την χημική προσβολή.

Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Η ολκιμότητα και το ποσοστό των ινών επιδρούν ευνοϊκά στη βελτίωση της αντοχής της μήτρας.

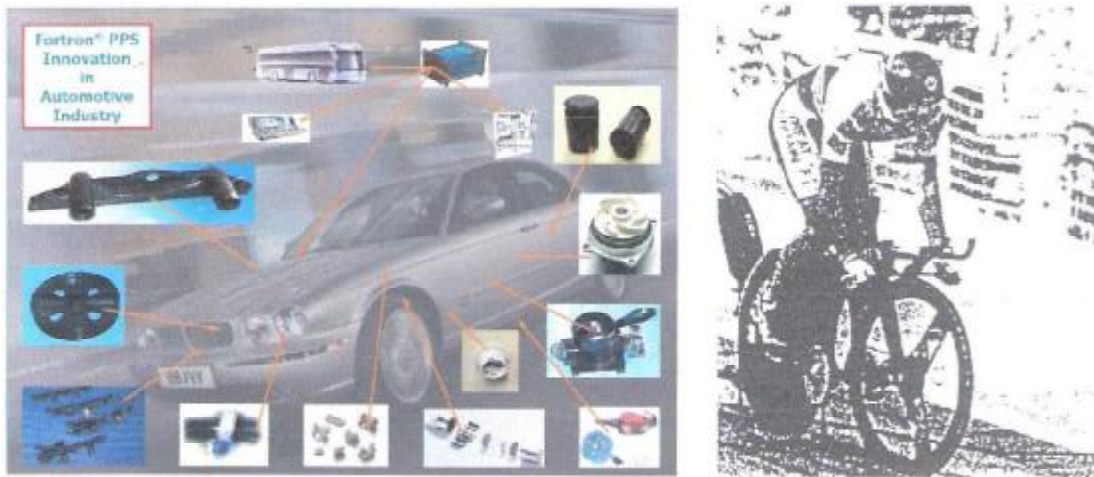
Το σημαντικότερο πρόβλημα στη χρήση κεραμικών μητρών εντοπίζεται στη συνάφεια ινών- μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν, επίσης, οι μήτρες άνθρακα, ενώ ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο. Είναι γνωστές οι οικοδομικές κατασκευές τσιμέντου με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ινών αμιάντου (ελενίτ), ινών γυαλιού, καθώς επίσης και οι κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών γυαλιού ή αμιάντου.

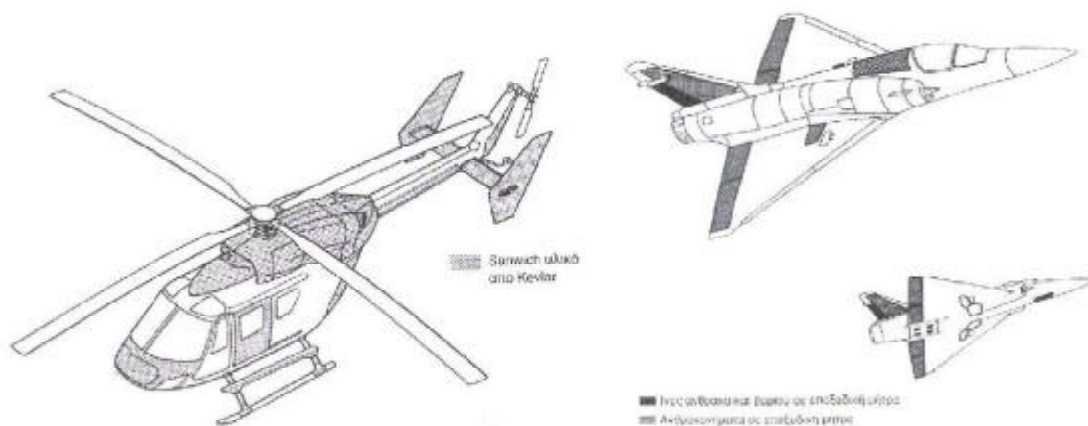
### 3.4 Εφαρμογές σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε δευτερεύουσας σημασίας κατασκευαστικά στοιχεία. Αυτό ίσχυσε μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του '60 απ' όπου σιγά σιγά επεκτάθηκαν σε πρωτεύουσας σημασίας κατασκευαστικά στοιχεία κυρίως σε ναυπηγικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές. Η μείωση του κόστους ανάπτυξης, σχεδίασης και παραγωγής των σύνθετων υλικών καθώς και η απόκτηση γνώσης και εμπειρίας για τη συμπεριφορά τους μετά από πολλά έτη εφαρμογής τους, οδήγησε στην επέκτασή τους σε ευρύτερες εφαρμογές.

Σήμερα τομείς όπως η οικοδομική (σκυρόδεμα οπλισμένο ή μη), οι αυτοκινητοβιομηχανίες (Σχήμα 21), η αεροναυπηγική (Σχήμα 22) οι βιομηχανίες ειδών αναψυχής, αθλητικών ειδών και ηλεκτρονικών χρησιμοποιούν σε μεγάλη κλίμακα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες. Ακόμα και πλαστικά υλικά ενισχυμένα με κόκκους άλλων ισχυρότερων υλικών ή μετάλλων (κοκκώδη υλικά) έχουν αυξανόμενη χρήση στη βιομηχανία.



Σχήμα 21 : Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην καθημερινή ζωή



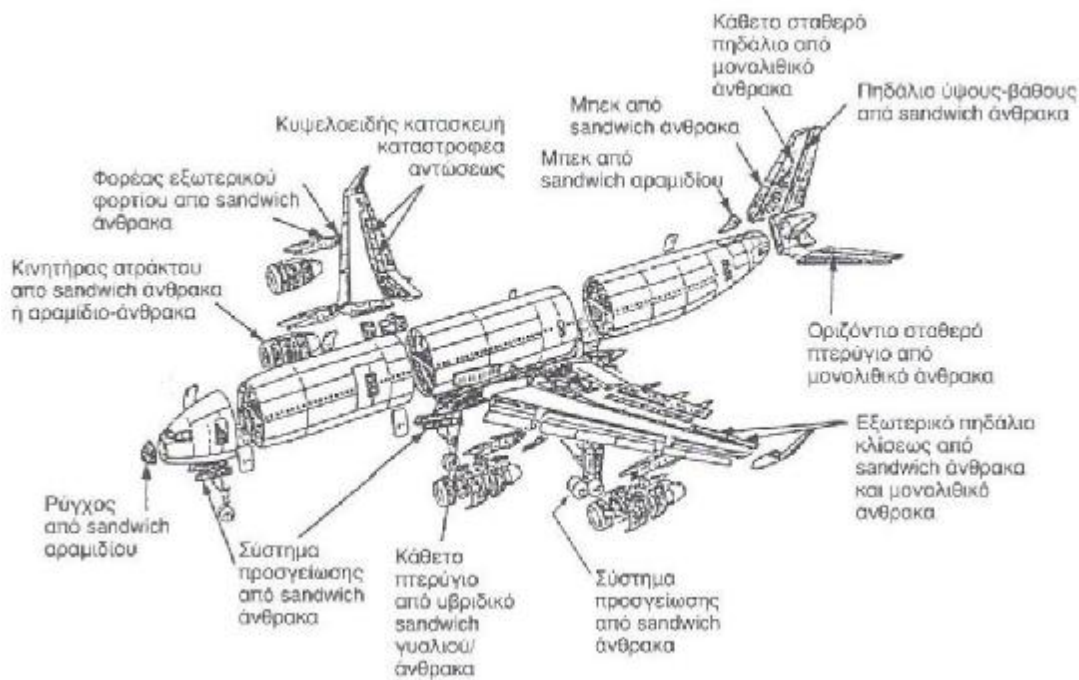
Σχήμα 22 : Εφαρμογές σύνθετων υλικών αεροναυπηγική

Πιο αναλυτικά για την αεροδιαστημική, η χρησιμοποίηση ελαφρύτερων υλικών, σημαίνει είτε τη μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου, είτε τη βασική μείωση του κόστους λειτουργίας για το ίδιο μεταφερόμενο φορτίο. Ένα καλό παράδειγμα του μεγέθους που μπορούν να συντελέσουν τα σύνθετα στην εξοικονόμηση βάρους οπότε και στο κόστος γενικότερα είναι η περίπτωση της κατασκευής δορυφόρων, όπου το κόστος της εκτόξευσης μπορεί να υπερβαίνει το κόστος του σχεδιασμού αλλά και όλης της κατασκευής του. Έτσι λοιπόν τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου πλαστικά, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαστημοπλοίων και δορυφόρων, για την κατασκευή στηριγμάτων ηλιακών κυψελίδων, δεξαμενών αποθήκευσης προωθητικών αερίων, καθώς και για την κατασκευή κορμών μηχανής αλλά και κινούμενων τμημάτων μηχανής.

Εκτός από τη δραστική μείωση του βάρους στις κατασκευές, τα υλικά αυτά με τον πολύ μικρό συντελεστή διαστολής προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα διαστάσεων στις κατασκευές. Η κατασκευή κεραίων καθώς και φίλτρων ή στηριγμάτων τηλεσκοπίων, στηρίζεται τώρα αποκλειστικά στα υλικά αυτά. Τα εξαρτήματα αυτά όπως και αρκετά άλλα αποτελούν τον απαραίτητο εξοπλισμό του διαστημοπλοίου και εκτίθενται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από - 100 έως 100°C, ανάλογα με το αν το εξάρτημα αυτό εκτίθεται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία ή βρίσκεται κάτω από τη σκιά του διαστημοπλοίου.

Στα μαχητικά αεροσκάφη τα σύνθετα υλικά προσφέρουν εξαιρετικές ιδιότητες και επιτρέπουν τον ολοένα και πιο βελτιωμένο σχεδιασμό τους. Τα νέα προγράμματα παραγωγής αεροσκαφών δίνουν πρωταρχική έμφαση στη χρησιμοποίηση τέτοιων υλικών, αρχικά τουλάχιστον, στα πιο ευπαθή σημεία. Αντίστοιχα σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας, τα σύνθετα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά με βασικό στόχο τη μείωση του βάρους σε εσωτερικά τμήματα, όπως στο δάπεδο του αεροσκάφους, στις πόρτες αποσκευών και στη όλη εσωτερική επίπλωση. Τελευταία όμως έχει αρχίσει η αντικατάσταση πολλών δομικών τμημάτων των αεροσκαφών, εσωτερικά και εξωτερικά (Σχήμα 23).

Για παράδειγμα στο Airbus A310 ο οριζόντιος σταθεροποιητής (rudder) αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από σύνθετα υλικά και συνδυάζοντας ίνες γυαλιού, άνθρακα και Kevlar, επιτυγχάνεται μια συνολική εξοικονόμηση βάρους της τάξης των 400 κιλών. Ακόμα στο Airbus A320, χρησιμοποιούνται σύνθετα εποξειδικής ρητίνης/ινών άνθρακα τόσο στα πτερύγια όσο και στο ουραίο πτερύγιο, εξοικονομώντας συνολικά πάνω από 800 κιλά σε σχέση πάντα με την παραδοσιακή κατασκευή από ειδικά κράματα αλουμίνιου. Ως μια ένδειξη του τι σημαίνει η εξοικονόμηση βάρους σε μια αεροπορική κατασκευή αναφέρεται το γεγονός ότι σε ένα DC-10, έχει υπολογιστεί, ότι το κάθε κιλό μείωσης του βάρους του αεροσκάφους, εξοικονομούνται ετησίως 2900 λίτρα καυσίμου!



**Σχήμα 23 :** Εφαρμογές σύνθετων υλικών αεροναυπηγική

Πιο συγκεκριμένα, παραδείγματα εφαρμογών σύνθετων υλικών σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας και της ζωής μας γενικότερα, αναφέρονται στα δύο σχήματα που ακολουθούν.

ΜΗΤΡΑ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ag	CdO	Ηλεκτρικές επαφές υλικών.
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Πυρηνικοί αντιδραστήρες.
Be	BeO	Αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές.
Co	ThO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Μαγνητικό υλικό αντοχής σε ερπυσμό.
Ni-20% Cr	ThO <sub>2</sub>	Μέρη κινητήρων μηχανών.
Pb	PbO	Πλέγματα μπαταριών.
Pt	ThO <sub>2</sub>	Νήματα, μέρη ηλεκτρικών συσκευών.
W	ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	Νήματα, θερμαντικά σώματα.
Co	WC	Αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία

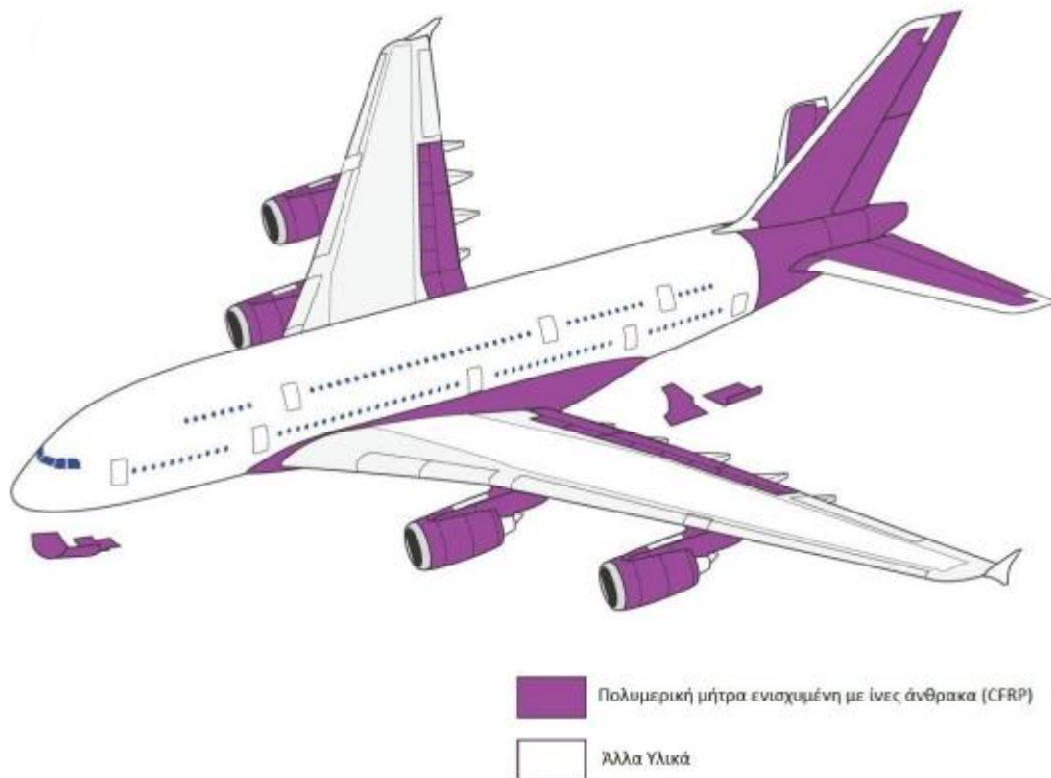
**Σχήμα 24 :** Παραδείγματα και εφαρμογές των κυριότερων σύνθετων υλικών με την ενίσχυση σωματιδίων



Βιομηχανία	Παραδείγματα Εφαρμογών		
	Πολυμερική Μήτρα	Κεραμική Μήτρα	Μεταλλική Μήτρα
Αεροπορική	Φτερά, άτρακτος, σύστημα προσγείωσης, πτερύγια ελικοπτερών	Φρένα, ακροφύσια ρουκετών, προστατευτικά καλύμματα από τη θερμοκρασία	Κεραίες, στύλοι αντιστάσεως (Ορθοστάτες)
Αυτοκινήτων	Διάφορα μέρη από το σασί του αυτοκινήτου, προφυλακτήρες, άξονας κίνησης, φύλλα οοίστας, σαλόνι	Φρένα	Κεφαλές εμβόλων
Σκαφών	Κατάστρωμα, ιστία, σκελετός πλοίου	-	-
Χημική	Σωλήνες, δοχεία πίεσης, δεξαμενές	-	-
Επιπέλων	Καρέκλες, Τραπέζια, Σκάλες, Διακοσμητικά	-	-
Ηλεκτρικών Ειδών	Διακόπτες, μονωτές, ηλεκτρικοί πίνακες	-	Υπεραγωγοί, νήματα για λυχνίες, ηλεκτρόδια
Διαφόρων Κατασκευών		Είδη θερμομόνωσης, κοπτικά εργαλεία, μηχανήματα συμπατοποίησης	-
Αθλητικών Ειδών	Καλάμια ψαρέματος, μπαστούνια γκολφ, κανώ, πισίνες, εξοπλισμός σκι	-	-
Ιατρικού Εξοπλισμού		Διάφορα είδη	-

*Σχήμα 25 : Παραδείγματα εφαρμογών ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών με πολυμερική, κεραμική και μεταλλική μήτρα*

Στα πλαίσια της ευρείας χρήσης και της συνεχόμενης και παράλληλα αυξανόμενης ανάπτυξης των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών, είναι πλέον εκτεταμένη η προσπάθεια της εφαρμογής των θερμοσκληραινόμενων σύνθετων υλικών σε διαφορές μηχανολογικές κατασκευές. Ειδικά σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπως στη σύγχρονη αεροναυπηγική, τα σύνθετα υλικά θερμοσκληραινόμενης μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή γυαλιού, ανάλογα με την εφαρμογή, παίζουν σημαντικό ρόλο (Σχήμα 26). Αυτό οφείλεται στις καλύτερες θερμικές και χημικές τους ιδιότητες σε σχέση με τα θερμοπλαστικά και τα συμβατικά μεταλλικά υλικά.



**Σχήμα 26 :** Εφαρμογές πολυμερικής μήτρας ενισχυμένης με ίνες άνθρακα (CFRP) σε σύγχρονο αεροσκάφος

Τα κυριότερα θερμοσκληραινόμενα υλικά που χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σαν μητρικά υλικά είναι :

- *Βακελίτης:* Καλές μηχανικές ιδιότητες, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, δάπεδα.
- *Εποξειδική ρητίνη :* Ακριβό υλικό, κόλλες, σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, σκάφη θαλάσσης.
- *Πολυεστερικές ρητίνες :* Τα πολυεστερικά πλαστικά γενικά μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστικά είτε θερμοσκληραινόμενα, ανάλογα με τη χημική σύσταση, ενώ οι ακόρεστοι πολυεστέρες ή αλλιώς πολυεστερικές ρητίνες είναι θερμοσκληραινόμενα. Παρόμοιες εφαρμογές με την εποξειδική ρητίνη, αλλά φτηνότερο.
- *Βινυλεστέρας :* Μηχανικές ιδιότητες και κόστος κάπου ανάμεσα σε πολυεστέρες και εποξειδικές ρητίνες, χρησιμοποιείται εκτεταμένα σε σύνθετα, ενισχυμένα με ίνες, πλαστικά.

### 3.5 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινώδων σύνθετων

Κατά την επιλογή των υλικών ενίσχυσης και μήτρας, κατά το σχεδιασμό ενός σύνθετου υλικού, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη και άλλες παράμετροι όπως: η διάμετρος , το μήκος, η κατ' όγκο περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο υλικό, η ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού της μήτρας και η συμβατότητα των υλικών ινών και μήτρας. Όλες αυτές οι ιδιότητες συντιθέμενες προσδιορίζουν και τις τελικές ιδιότητες του ινώδους σύνθετου υλικού.

### 3.5.1 Γεωμετρία ινών

Βασική παράμετρος είναι ο *συντελεστής σχήματος* της ίνας ( $s$ ) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους ( $A$ ) προς την ακτίνα ( $r$ ) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως συνεχών ή ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες. Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους. Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος ( $A_c$ ), για δεδομένη διάμετρο ίνας ( $d$ ), που ορίζεται από τη σχέση

$$A_c = \frac{\sigma_f d}{2 \tau_i}$$

όπου:  $\sigma_f$  η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και  $\tau_i$  η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας – μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου μήκους  $A_c$ , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή, ενώ, αν είναι μεγαλύτερο ( $>15A_c$ ), η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

### 3.5.2 Ποσοστό ινών

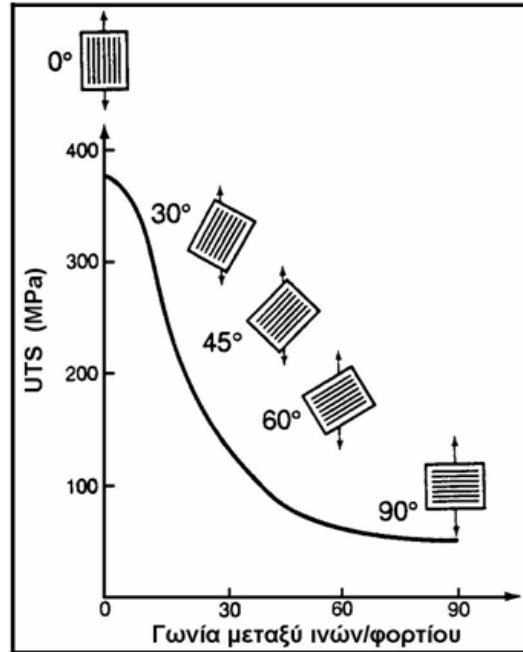
Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Πολλές φορές, για την καλύτερη ενίσχυση της μήτρας δεν χρησιμοποιείται ένας, μόνον, τύπος ινών, αλλά συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων. Τα παραγόμενα ονομάζονται *υβριδικά σύνθετα* (hybrid composites).

### 3.5.3 Προσανατολισμός των ινών

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.

Από το Σχήμα 27 συνάγεται ότι για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας,  $E$ ) και η βέλτιστη αντοχή, UTS επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.



**Σχήμα 27:** Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό σύνθετου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

### 3.5.4 Συνάφεια ινών μήτρας

Η καλή συνάφεια ινών – μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Η διεπιφάνεια ίνας – μήτρας, ορίζεται ως η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας – μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου.

Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό:

- Οι ίνες γυαλιού επενδύονται με ουσίες που εξασφαλίζουν τη συνάφεια με τη μήτρα και την αντίσταση του συνθέτου στην υγρασία.
- Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).
- Οι ίνες βορίου επικαλύπτονται με BN ή SiC, όταν συνδυάζονται με μήτρα αλουμινίου. Ίνες B με επικάλυψη SiC αναφέρονται ως Borsic.

### 3.5.5 Τελική επιλογή υλικών

Στους Πίνακες 7-9 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τέννις, μαστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος)
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκίνητο - βιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

*Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας*

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Εμβολα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC & B <sub>4</sub> N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

*Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας*

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προ- διαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 °C). Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, ZrO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> και κεραμικά γυαλιά	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> & SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομό- νωσης.

**Πίνακας 9:** Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας

### 3.6 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη - διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών σύνθετων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

A. Μορφοποίηση σύνθετου οργανικής μήτρας.

1. Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετου (Σχήμα 17).

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up).
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag).
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

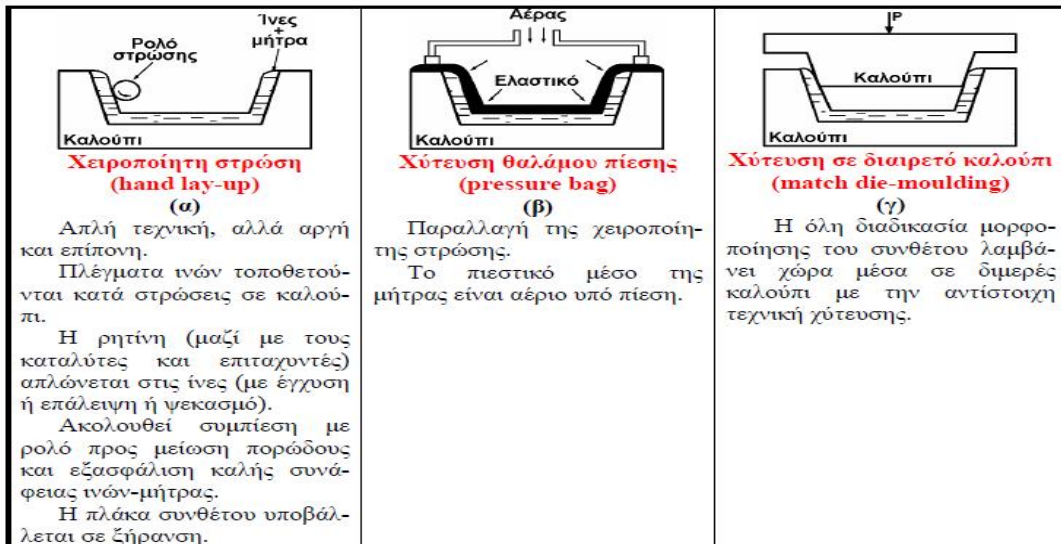
2. Συνεχής μορφοποίηση σύνθετου (Σχήμα 18-20).

- Περιέλιξη νήματος (filament winding).
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC).
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion).

B. Μορφοποίηση σύνθετου μεταλλικής μήτρας (Σχήμα 21-23).

- Συνδιέλαση (co-extrusion).
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process).
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση.
- Απόθεση υλικού μήτρας.

C. Μορφοποίηση σύνθετου κεραμικής μήτρας.

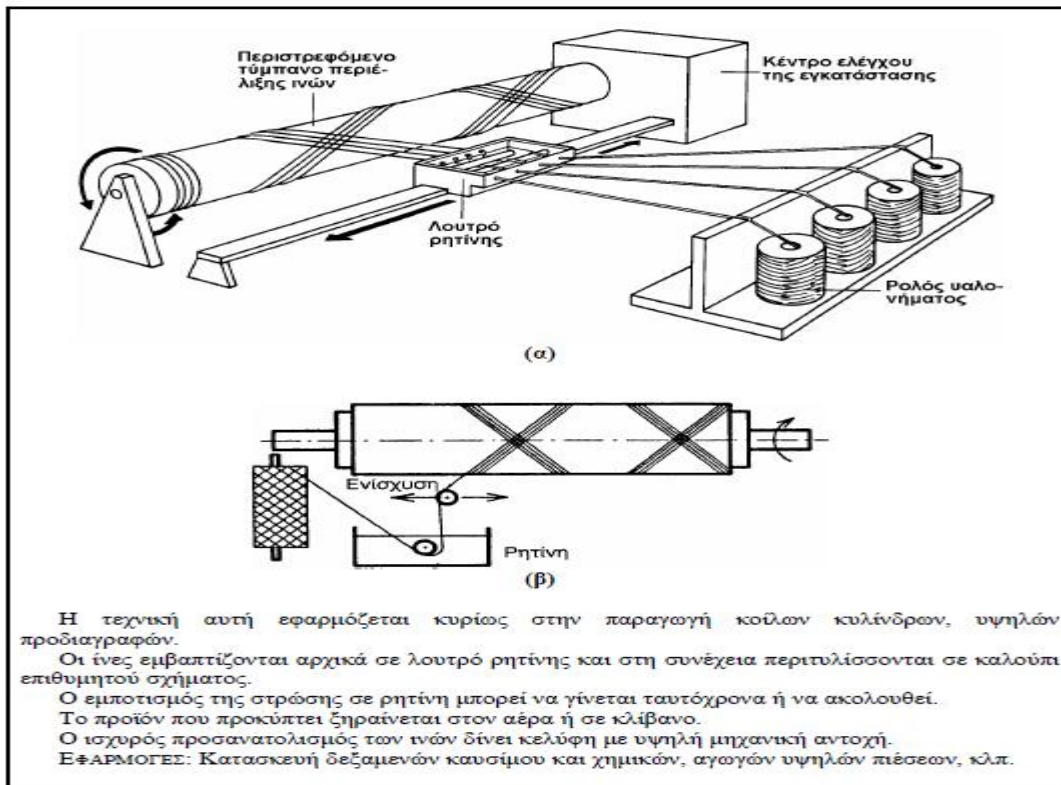


**Σχήμα 28:** Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

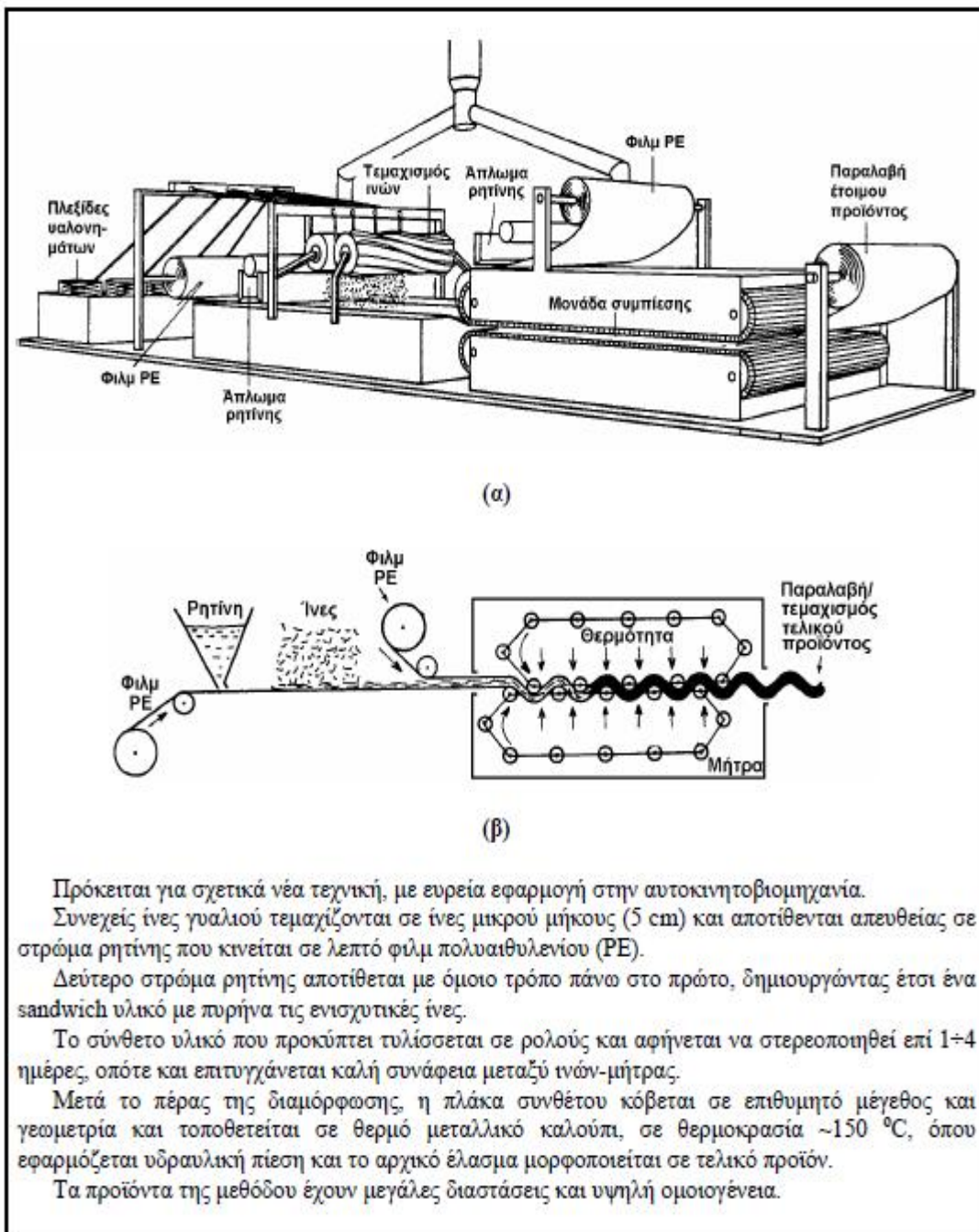
Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

Οι ασυνεχείς (μικρού μήκους) ίνες συνδυάζονται με το υλικό μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.

Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



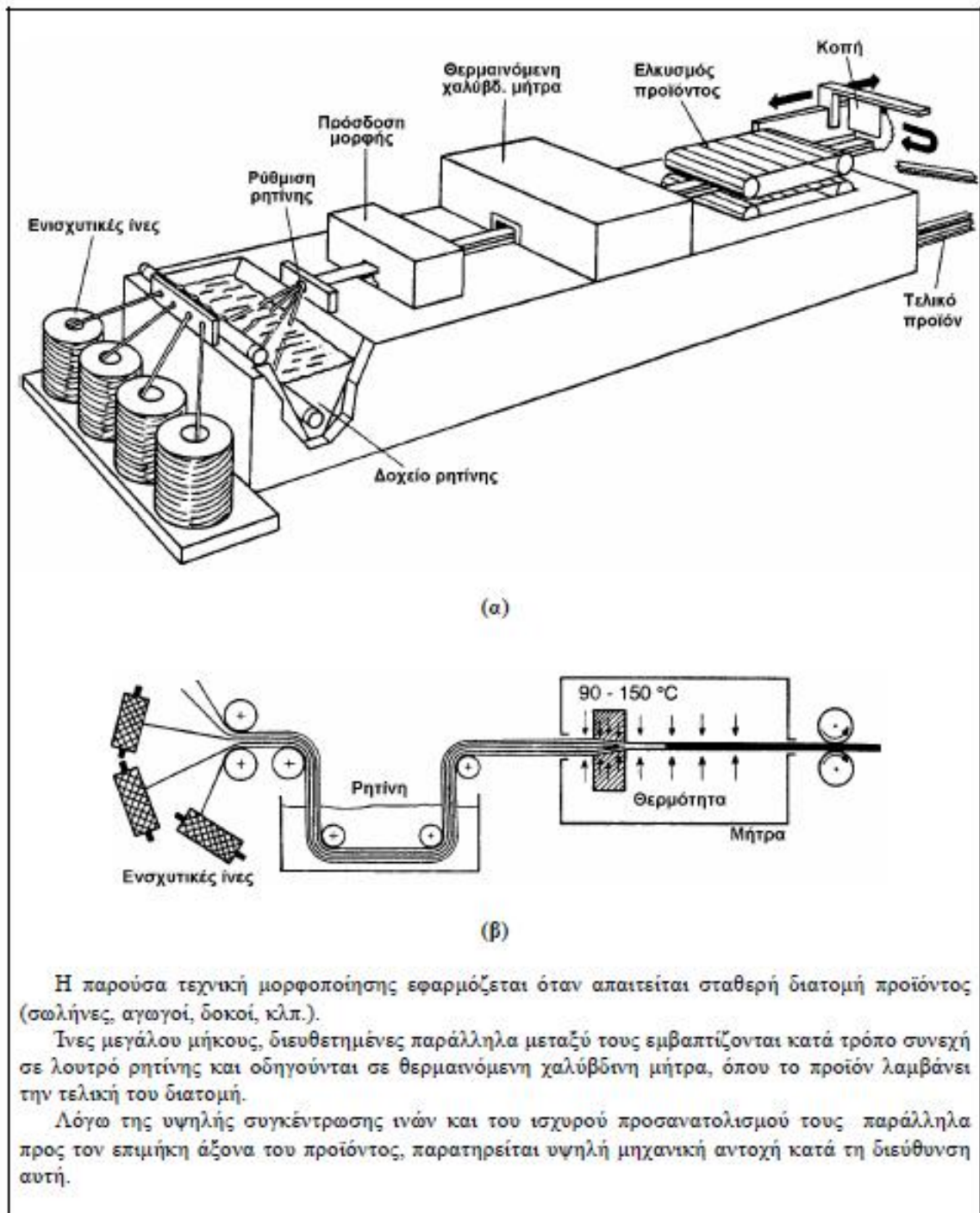
**Σχήμα 29:** Συνεχής μορφοποίηση σύνθετου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



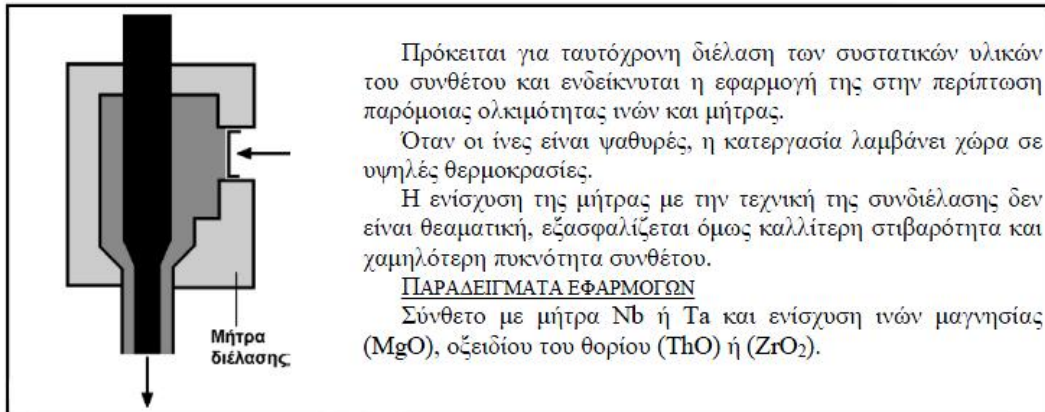
Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνική, με ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε λεπτό φίλμ πολυαιθυλενίου (PE). Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich υλικό με πυρήνα τις ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίσσεται σε ρολούς και αφήνεται να στερεοποιηθεί επί 1÷4 ημέρες, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία ~150 °C, όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.

**Σχήμα 30:** Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.

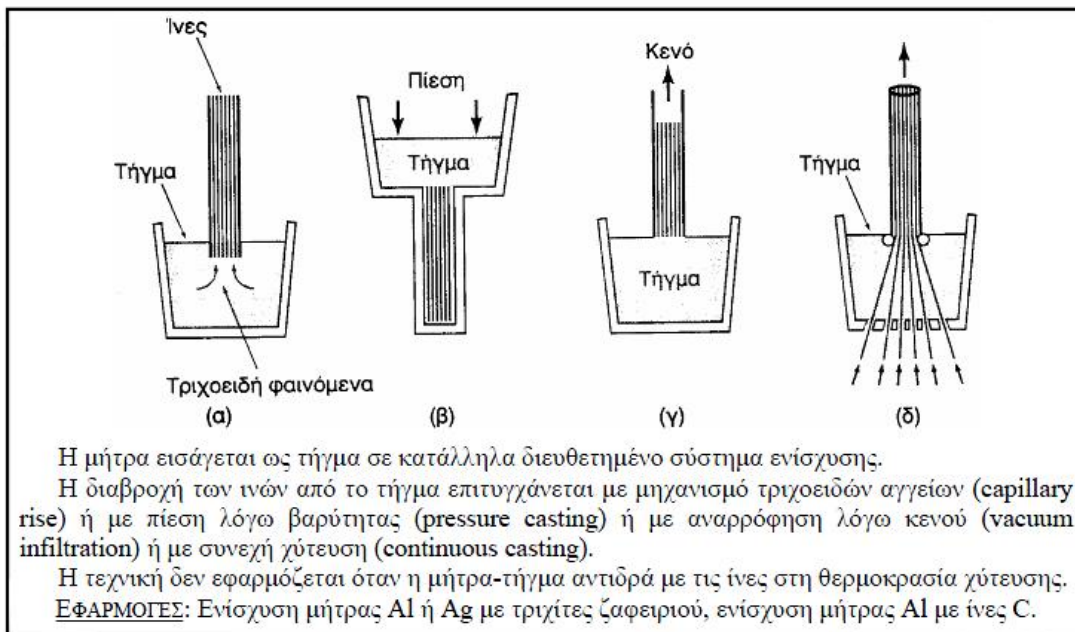




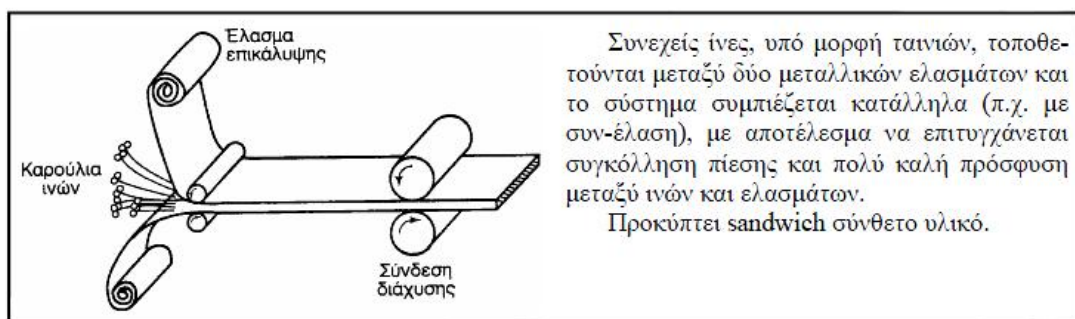
**Σχήμα 31:** Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



Σχήμα 32: Συνδιέλαση (co-extrusion)



Σχήμα 33 : Μορφοποίηση με (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση



Σχήμα 34: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκκραπόθεση.

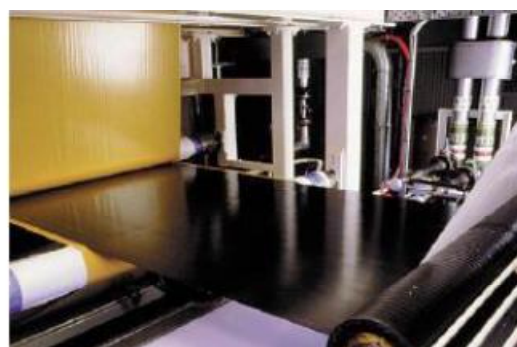
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Με CVD αποτίθενται Al και Ni σε ίνες C. Με ηλεκκραπόθεση από διάφορα διαλύματα τους αποτίθενται Al, Cu και Ni σε ενισχυτικές ίνες κάθε τύπου. Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλύτερη συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης. Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό (για εξασφάλιση καλής πρόσφυσης ινών-μήτρας) και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία ευρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Σύνθετα κεραμικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες SiC. Σύνθετα με μήτρα νιτρίδιο του πυριτίου και ενίσχυση ινών W, SiC ή C. Όταν το παραγόμενο σύνθετο υλικό πρέπει να λαμβάνει μη επίπεδη μορφή, η στρωματοποίηση επιτελείται μέσα σε καλούπια με ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, π.χ. με έγχυση (injection moulding) ή με ψεκασμό (spray moulding). Πιο πρόσφατα, με την ανάπτυξη 3-D (τρισδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

Παρακάτω βλέπετε την διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα ινών που είναι προεμποτισμένες σε ρητίνη (Σχήμα 35, Σχήμα 36)



*Σχήμα 35: Προεμποτισμένες ίνες σε ρητίνη Σχήμα 36: Διαδικασία προεμποτισμού ινών*

## 4.ΣΥΝΕΝΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ

### 4.1 Γενικά

Κατά την διαδικασία δημιουργίας μιας κατασκευής από σύνθετα υλικά, τα στοιχειώδη τμήματα πρέπει να είναι συνενωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε η συνολική κατασκευή να διατηρεί την ακεραιότητά της, ενώ ταυτόχρονα υποβάλλεται σε διάφορα είδη φορτίσεων που επιβάλλει το περιβάλλον λειτουργίας της.

Η χρήση σύνθετων υλικών έναντι μεταλλικών στοιχείων σε σύνθετες κατασκευές σχεδόν πάντα, μειώνει σε αισθητό βαθμό τον αριθμό των επιμέρους τμημάτων μερικές φορές από εκατοντάδες σε δεκάδες. Με αυτό τον τρόπο φαίνονται σαφώς τα διάφορα πλεονεκτήματα, όπως η μείωση βάρους και κόστους σε μεγάλο ποσοστό, καθώς και η ευκολία επιθεώρησης και συναρμολόγησης, ενώ παρατηρείται ταυτόχρονα σημαντική αύξηση στην αξιοπιστία της κατασκευής. Ενώ ο βασικός λόγος συνένωσης είναι ο δομικός, η διαδικασία αυτή μπορεί να εξασφαλίσει θερμική ή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μονωτική λειτουργία καθώς και να επιτελέσει τον ρόλο αποσβεστήρα διαφόρων δονήσεων .

Η συνένωση μεταλλικών υλικών έχει αναπτυχθεί στον μέγιστο βαθμό και περιλαμβάνει την χρήση ήλων, διάτρησης οπών (βίδα - παξιμάδι) και συγκόλλησης. Όμως στην περίπτωση των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες, έχει χρησιμοποιηθεί μόνο συγκόλληση με κάποιο ενδιάμεσο στρώμα κόλλας ή οι κλασικοί τρόποι μηχανικής σύνδεσης (ήλοι ή βίδες). Έχει ωστόσο παρατηρηθεί κάποια επιτυχία στην συγκόλληση μέσω τήξης και επαναφοράς σε αρχική κατάσταση θερμοπλαστικών πολυμερών μητρών στην διεπιφάνεια τους καθώς επίσης η συγκόλληση με Laser και η συνένωση με μέθοδο ανάμιξης με τριβή (friction stir welding).

Εν κατακλείδι η επιλογή συγκόλλησης έναντι της κλασσικής μηχανικής σύνδεσης των υλικών προτιμάται τα τελευταία χρόνια. Κατά την σύνδεση υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί εκ των οποίων ο βασικότερος είναι ότι η διάνοιξη οπών καταστρέφει την αλληλουχία των ινών ενίσχυσης ενώ οι οπές πρέπει να βρίσκονται σε προκαθορισμένες θέσεις κάτι που οδηγεί και σε ένα βασικό δομικό πρόβλημα : την συγκέντρωση τάσεων στα όρια της οπής που οδηγεί και στην αστοχία του υλικού.

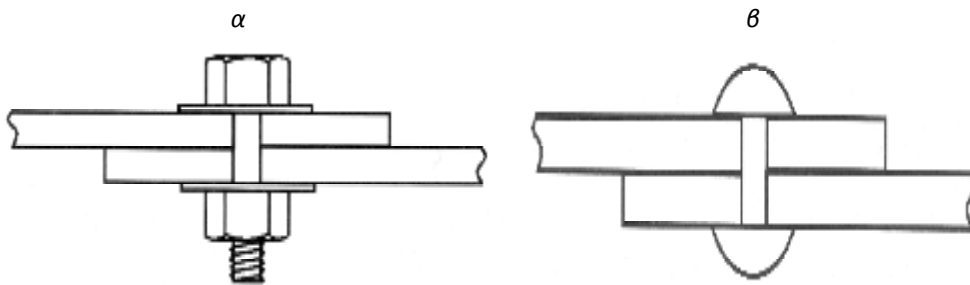
Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα της χρήσης συγκολλητικών μέσων σε πολλές κατασκευές είναι απαραίτητη και η χρήση συνδέσμων για να είναι εφικτή η πρόσβαση σε ενδότερα τμήματα της κατασκευής. Κλασσικό παράδειγμα είναι στην αεροναυπηγική όπου απαιτείται ο έλεγχος ηλεκτρονικών υποσυστημάτων στην άτρακτο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουν λεπτομερώς όλοι οι τρόποι σύνδεσης .

### 4.2 Μηχανική συνένωση υλικών

Η βασική μέθοδος μηχανικής σύνδεσης επιτυγχάνεται μέσω της διάνοιξης οπών σε δύο υλικά τα οποία πρόκειται να συνενωθούν, όπως για παράδειγμα φύλλα σύνθετου υλικού, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένας μηχανικός σύνδεσμος κατά περίπτωση, που τοποθετείται στην οπή και τα περισφίγγει. Ανάλογα με το είδος σύνδεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί :

- Ø συνδυασμός **κοχλία-περικοχλίου**
- Ø βίδες οι οποίες λειτουργούν μέσω της αλληλεπίδρασης των νημάτων και των υλικών που πρόκειται να συγκολληθούν
- Ø ήλοι οι οποίοι απλώς σφυρηλατούνται

Επειδή ακριβώς οι παραπάνω μέθοδοι (Σχήμα 37) δεν εξαρτώνται σημαντικά από τη φύση της διεπιφάνειας των υπό σύνδεση υλικών απαιτείται ελάχιστη ή καθόλου επιφανειακή κατεργασία. Η μόνη εξαρτησιακή σχέση των επιμέρους υλικών επικεντρώνεται στην αντοχή τους στο σημείο σύνδεσης. Για παράδειγμα αν τα υλικά υποβάλλονται σε θλιπτικά φορτία, κοχλίες και περικόχλια μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω φορτίσεις που θα παραμόρφωναν μόνιμα τα υλικά. Από την άλλη πλευρά αν τα υλικά δεν έχουν αυξημένη αντοχή σε διάτμηση οι κοχλίες μπορεί να αστοχήσουν.



**Σχήμα 37:** Μηχανική σύνδεση συνθέτων υλικών με κοχλία (α) και ήλο (β)

Η διάνοιξη σπών μπορεί να προκαλέσει αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων των σύνθετων υλικών. Για την αποφυγή αυτής της αστοχίας κατά την διάνοιξη πρέπει να υπάρχει σωστή υποστήριξη του υλικού ενώ πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν ο τύπος του συνθέτου που κατεργάζεται. Για παράδειγμα το Kevlar, ο υαλοβάμβακας και τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα τα οποία συμπεριφέρονται τελείως διαφορετικά και απαιτούνται διαφορετικές διαμορφώσεις στην μηχανή). Για την αποφυγή αστοχίας στην περιοχή της οπής μπορεί ο σχεδιασμός του συνθέτου να μεταβάλλεται ώστε να περιλαμβάνει μεγαλύτερο αριθμό στρώσεων ή να περιλαμβάνει στρώσεις οι οποίες σχηματίζουν διαφορετική γωνία μεταξύ των ινών τους στο σημείο που θα γίνουν οι οπές. Ένας επιπλέον τρόπος ενίσχυσης στην ευπαθή περιοχή γύρω από την οπή είναι μέσω της χρήσης μη σύνθετων υλικών όπως μέταλλο.

Οι κοχλίες και οι ήλοι, δημιουργούν σημειακά φορτία στα σημεία επαφής που οδηγούν σε αστοχία. Η σημειακή αστοχία μπορεί να αποτραπεί με τις ίδιες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την προστασία από τα διάφορα άλλα είδη αστοχίας. Επομένως η επιλογή ήλων ή κοχλιών προκύπτει από το αν το υλικό μπορεί να αντεπεξέλθει στις δυνάμεις που του ασκούνται από τον τρόπο σύνδεσης ή αν είναι εφικτή η ενίσχυση του υλικού στο κρίσιμο σημείο σύνδεσης .

Βασικό μειονέκτημα των συνδέσεων είναι η μικρή αντίσταση σε εφελκυστικές δυνάμεις κάτι που οδηγεί σε θραύση του υλικού στο σημείο της οπής. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται ήλοι σε πυκνή διάταξη που έχει όμως σαν



αποτέλεσμα την συνολική αύξηση του βάρους της κατασκευής κάτι το οποίο αποτελεί το βασικό πρόβλημα στην αεροναυπηγική. Η προσπάθεια ελάττωσης του βάρους επικεντρώνεται στην χρήση συνδέσμων μετάλλων χαμηλότερου ειδικού βάρους όπως αλουμίνιο ή τιτάνιο που αυξάνουν όμως το κόστος κατασκευής. Αντί για την επιλογή πιο ακριβών υλικών γίνεται επίσης μια έρευνα για κατασκευή συνδέσμων από σύνθετο υλικό που βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο.

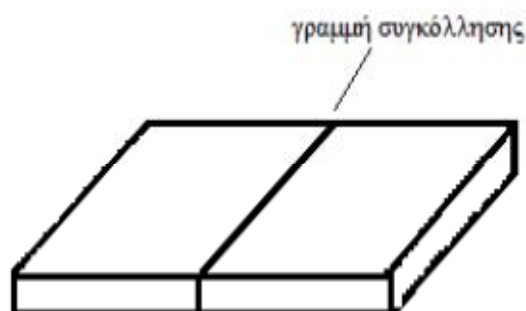
Παρόλα τα διάφορα μειονεκτήματα του τρόπου σύνδεσης μέσω μηχανικών συνδέσμων, η μέθοδος αυτή δεν παύει να αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τρόπο σύνδεσης. Είναι μια μορφή σύνδεσης που έχει δοκιμαστεί με επιτυχία μέχρι τώρα δείχνοντας τεράστια αξιοπιστία, απλότητα κατασκευής και ευκολία επιθεώρησης. Τέλος οι μηχανικοί σύνδεσμοι σπάνια φτάνουν το επιτρεπτό όριο θερμοκρασιακής λειτουργίας του συνθέτου υλικού και έτσι τα όρια αντοχής εξαρτώνται από το σύνθετο υλικό αυτό καθ' αυτό.

### 4.3 Συνένωση Υλικών με συγκόλληση

#### 4.3.1 Μετωπική συγκόλληση (butt welding)

Η σύνδεση των κατασκευαστικών στοιχείων με κόλλα είναι ο πιο κοινός τρόπος για τη συγκόλληση ενός συνθέτου υλικού. Η μέθοδος της μετωπικής συγκόλλησης είναι εκείνη κατά την οποία δύο στοιχεία συγκολλούνται με απλή μετωπική επαφή. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τον απλούστερο τρόπο συνένωσης υλικών και προϋποθέτει οι επιφάνειες συγκόλλησης να είναι στις ίδιες διαστάσεις (μήκος και πλάτος)

Το βασικό μειονέκτημα της μετωπικής συγκόλλησης είναι ότι στηρίζεται αποκλειστικά και μόνο στο συγκολλητικό μέσο στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται κάποιο είδος ενίσχυσης. Επίσης σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως

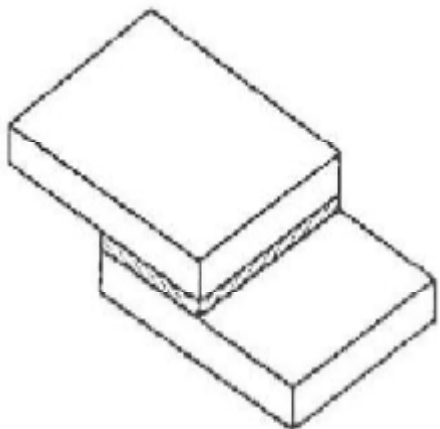


Σχήμα 38: Μετωπική συγκόλληση

οι επιφάνειες των υλικών, λόγω προηγούμενης κατεργασίας τους, δεν είναι λείες με αποτέλεσμα τη δημιουργία κόκκων στο εσωτερικό του συγκολλητικού μέσου και κατ' επέκταση τη μείωση της αντοχής αυτού. (Σχήμα 38)

#### 4.3.2 Συγκόλληση με επικάλυψη

Σε αυτήν τη μέθοδο, γίνεται επικάλυψη της επιφάνειας του ενός στοιχείου με κόλλα και στη συνέχεια τοποθετείται το άλλο στοιχείο. Με την εφαρμογή πίεσης τα κομμάτια συγκρατούνται ενωμένα μέχρι τον πολυμερισμό της κόλλας. Υπάρχουν πολλοί τύποι συγκόλλησης με κόλλα, μερικοί εκ των οποίων περιγράφονται παρακάτω.



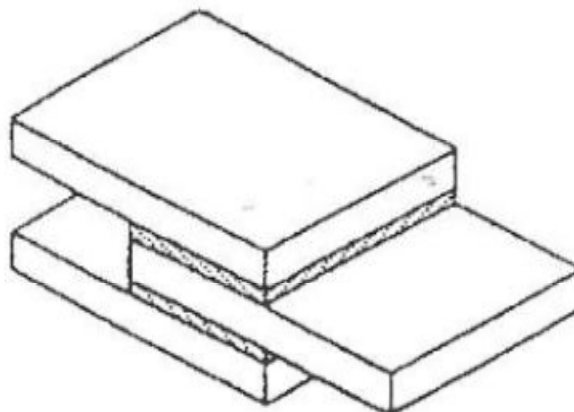
#### 4.3.3 Συγκολλήσεις ενός στρώματος (single lap joint)

Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος συγκόλλησης. Στον τύπο αυτό εμφανίζονται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων στα ελεύθερα άκρα της κόλλησης, ενώ το κέντρο της μεταφέρει πολύ μικρό φορτίο. Όταν χρησιμοποιούνται γωνίες ή καμπυλότητες κατά την κόλληση, ο τύπος αυτός παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά. (Σχ.39)

Σχήμα 39: Συγκόλληση ενός στρώματος

#### 4.3.4 Συγκολλήσεις διπλού στρώματος (double lap joint)

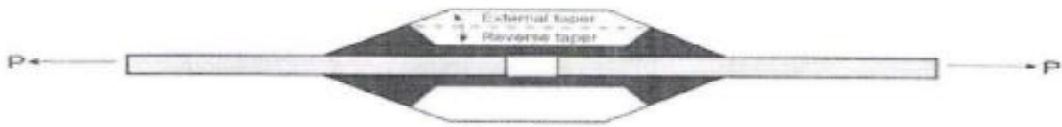
Ο τύπος αυτός ελαττώνει τις καμπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια συγκόλλησης και χρησιμοποιείται πολύ συχνά. (Σχήμα 40)



Σχήμα 40: Συγκόλληση διπλού στρώματος

#### 4.3.5 Συγκολλήσεις με πρόσθεση κομματιού (strap joint)

Βασίζονται στην ίδια αρχή με τις συγκολλήσεις διπλού στρώματος αλλά με κατάλληλη σχεδίαση παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από αυτές. (Σχήμα 41)



**Σχήμα 41:** Συγκόλληση με πρόσθεση κομματιού

#### 4.3.6 Σκαλωτές συγκολλήσεις (stepped lap joints)

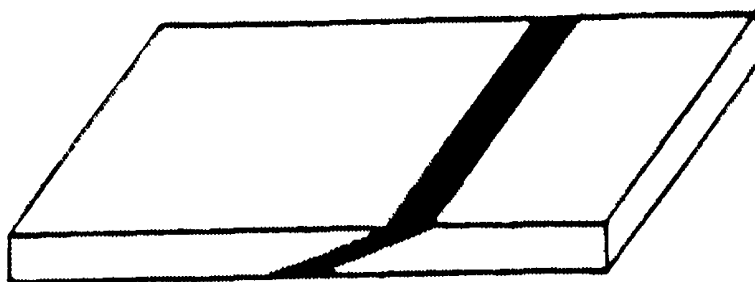
Είναι πολύ δύσκολο να γίνουν λόγω των κατεργασιών που απαιτούνται και φυσικά δεν εφαρμόζονται σε λεπτές πλάκες, ωστόσο παρουσιάζουν πολύ καλή κατανομή τάσεων και μεγάλο συντελεστή αντοχής / βάρους. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται για να βελτιώσει τη διατμητική αντοχή εκεί που οι πλάκες έχουν πολύ μεγάλο πάχος. Ωστόσο η διαστρωμάτωση στρώσεων με διαφορετικές διευθύνσεις δημιουργεί μεγάλα προβλήματα γιατί μπορεί στην επιφάνεια της συγκόλλησης οι ίνες να μην βρίσκονται παράλληλα στην φόρτιση. (Σχήμα 42)



**Σχήμα 42:** Σκαλωτή συγκόλληση

#### 4.3.7 Λοξές συγκολλήσεις (scarf joints)

Είναι παρόμοιες με τις σκαλωτές καθώς έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αλλά προτιμούνται λόγω της ευκολίας κατασκευής τους. (Σχήμα 43)



**Σχήμα 43:** Λοξή συγκόλληση



#### **4.3.8 Συγκόλληση με επαγωγή (induction weldingg)**

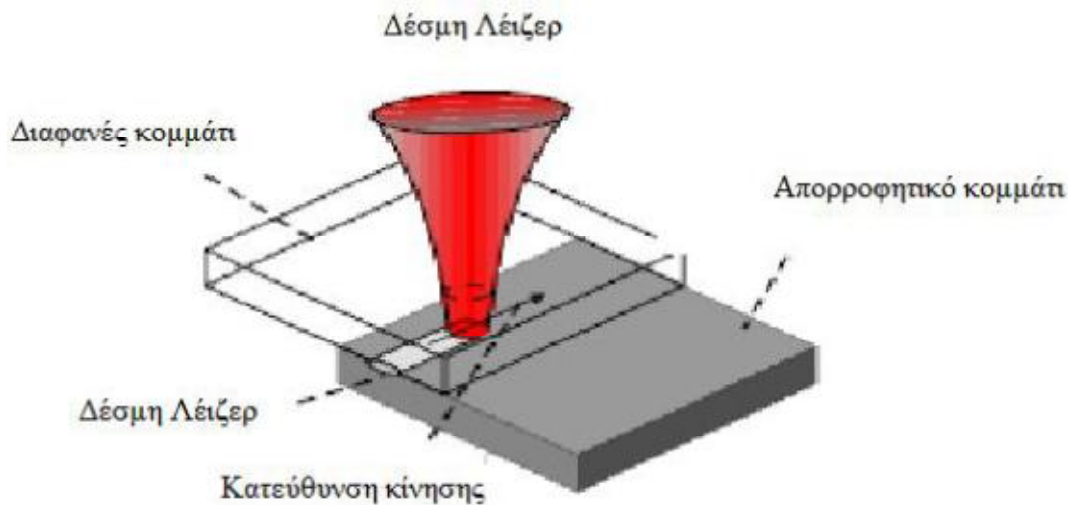
Για την συγκόλληση με επαγωγή γίνεται χρήση μιας σκόνης που έχει την δυνατότητα να μαγνητίζεται και είναι συνήθως από το ίδιο θερμοπλαστικό υλικό με αυτό που πρόκειται να συγκολληθεί. Η σκόνη τοποθετείται μεταξύ των επιφανειών των στοιχείων που θα συγκολληθούν και στην συνέχεια εφαρμόζεται ένα υψηλής συχνότητας μαγνητικό πεδίο το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την θέρμανση των κόκκων της σκόνης. Καθώς οι κόκκοι φτάνουν σε θερμοκρασία τήξης τους επιτυγχάνεται η συγκόλληση των στοιχείων.

#### **4.3.9 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (resistance welding)**

Κατά την συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, τα δύο στοιχεία που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται μεταξύ δύο ρολών που χρησιμοποιούνται για την εξάσκηση της απαραίτητης πίεσης καθώς και για την προώθηση των στοιχείων. Έτσι τα στοιχεία περνούν ανάμεσα από δύο αντιστάσεις από τις οποίες διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, που προκαλεί την θέρμανση του υλικού. Καθώς αυτό φτάνει στη θερμοκρασία τήξης του επιτυγχάνεται η συγκόλληση των στοιχείων.

#### **4.3.10 Συγκόλληση Υλικών με Laser**

Με σκοπό την δημιουργία ολοκληρωμένων δομών (integral structures) και κατ' επέκταση την μείωση του κόστους παραγωγής, η διεργασία της συγκόλλησης στοιχείων από σύνθετο υλικό με ακτίνα Λείζερ έχει συγκεντρώσει τα τελευταία χρόνια μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Επιπρόσθετα, η τεχνική της συγκόλλησης με λέιζερ εφαρμόζεται σε ερευνητικό στάδιο και στα σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης, αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές τεχνικές συνένωσης με ήλους ή με εποξειδικές κόλλες. Για την συγκόλληση των υλικών με λέιζερ χρησιμοποιείται η τεχνική διαπεραστικής εκπομπής της ακτίνας (through-transmission), σε αντίθεση με τα μέταλλα στα οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Η διεργασία αυτή βασίζεται στη ένωση δύο πολυμερών με τη προσθήκη θερμότητας μέσω της ακτίνας Λείζερ. Η ακτίνα Λείζερ διεισδύει στο διαφανές άνω κομμάτι και προσπίπτει στο απορροφητικό κομμάτι που βρίσκεται στο κάτω μέρος. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας πίεση, τα δύο κομμάτια συγκρατούνται μέχρι να ενωθούν πλήρως.



**Σχήμα 44:** Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής διαπεραστικής εκπομπής ακτίνας Λείζερ

Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι ο μεγάλος ρυθμός παραγωγής που μπορεί να επιτευχθεί και το γεγονός ότι η πηγή της θερμότητας δεν έρχεται σε επαφή με το υλικό με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μια «καθαρή» και η καλής ποιότητας συγκόλληση. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος εξοπλισμού που απαιτείται και το ότι η απαιτούμενη τεχνογνωσία δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, με αποτέλεσμα να είναι η τεχνική ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Ακόμα, όπως και στη συγκόλληση με κόλλες, πριν τη συγκόλληση απαιτείται προετοιμασία των επιφανειών, που αυξάνει τον συνολικό χρόνο της διεργασίας, ενώ η σύνδεση είναι μόνιμη και δεν μπορεί να γίνει αποσυναρμολόγηση.

#### 4.4 Κατηγορίες κολλών

Όταν η συνένωση υλικών γίνεται μέσω συγκόλλησης δεν υπάρχουν ουσιαστικοί περιορισμοί ως προς το τι θα συγκολληθεί. Η επιλογή της εκάστοτε κόλλας που θα χρησιμοποιηθεί προσδιορίζεται συνήθως από το σύνθετο υλικό που συγκολλείται, τον μηχανισμό ή την κατασκευή στην οποία θα είναι λειτουργικό τμήμα και φυσικά τις περιβαλλοντικές συνθήκες που θα επικρατούν καθώς και το κόστος.

Η βασική κατηγοριοποίηση των κολλών σε:

- Δομικές κόλλες.
- Θερμοπλαστικές κόλλες.
- Κόλλες ενεργοποιούμενες από την σχετική αναπτυσσόμενη πίεση ανάμεσα σε συγκολλητικό μέσο και υλικό.
- Υδατοδιαλυτές κόλλες.
- Κόλλες επιβελτιωμένες κάτω από την επίδραση ακτινοβολίας.

Από τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν πιο ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή έχουν οι δομικές κόλλες που είναι και ο κυριότερος τρόπος σύνδεσης σύνθετων υλικών.

Αποτελούνται κυρίως από πολυμερή όπως εποξειδικές ρητίνες, πολυουρεθάνη, ακρυλικές ρητίνες, πολυαμιδικές ρητίνες και σιλικόνες.

Οι εποξειδικές ρητίνες είναι διαθέσιμες σε δύο μορφές. Στην πρώτη περίπτωση σαν μίγμα ρητίνης και σκληρυντικού για πολυμερισμό σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς πίεση ή σαν σκέτη ρητίνη για πολυμερισμό σε αυξημένη θερμοκρασία της τάξεως των 180°C όπου ο χρόνος πολυμερισμού είναι μεγάλος. Στην δεύτερη περίπτωση μπορούμε να αυξήσουμε την αντοχή της ρητίνης χρησιμοποιώντας σκληρυντικό ενώ ταυτόχρονα ο χρόνος μειώνεται (20 λεπτά για θερμοκρασία 145°C και πίεση 0,7bar). Οι ρητίνες αυτές έχουν προσμίξεις φαινόλης και πολυαμιδίων, οι οποίες πολυμερίζονται σε 60min και θερμοκρασία 130°C έως 175°C .

Οι κόλλες από πολυαμιδικές ρητίνες οι οποίες πολυμερίζονται σε θερμοκρασία από 250°C έως 400°C. Για να επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή τους είναι απαραίτητη κάποια διεργασία μετά τον πολυμερισμό (post-curing) και έχουν θερμοκρασία λειτουργίας από 290°C έως 400°C.

Οι σιλικόνες οι οποίες έχουν εξαιρετική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά σχετική χαμηλή αντοχή. Για το λόγο αυτό ενώνονται με άλλους τύπους ρητίνης με σκοπό να αποκτήσουν υψηλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα μίγμα εποξειδικής ρητίνης με σιλικόνη έχει μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας 340°C και μπορεί να αντέξει μέχρι 510°C σε προσωρινή έκθεση.

#### **4.5 Διαδικασία Συγκόλλησης Υλικών**

Όπως αναφέρθηκε καταλυτικό ρόλο στην επιλογή κόλλας παίζει το περιβάλλον συνεχούς λειτουργίας της κατασκευής. Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάζουν τη συγκόλληση είναι το μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, η ανάπτυξη υγρασίας, η παρουσία στοιχείων που μπορεί να δράσουν σαν διαλύτες και φυσικά η επίδραση της υπέρυθρης ακτινοβολίας στην χημική σύσταση της κόλλας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συνυπολογίζονται μέσα στο προβλεπόμενο προσδόκιμο χρόνο ζωής της κατασκευής καθώς και στα φορτία στα οποία θα υπόκειται .

Η επιλογή ακόμη γίνεται και με κριτήριο την απαιτούμενη προετοιμασία πριν τη συγκόλληση. Ενώ όλες οι συγκολλήσεις απαιτούν σχολαστική προετοιμασία των διεπιφανειών, ορισμένα συγκολλητικά μέσα απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες για να είναι επιτυχής η συγκόλληση. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μικροδομή της κόλλας μπορεί να επιτρέπει κάποιες ανοχές στον σχεδιασμό των υλικών που πρόκειται να ενωθούν. Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της συγκόλλησης ποικίλει ανάλογα με την σύσταση της εκάστοτε κόλλας. Τέλος, είναι σύνηθες κατά την δημιουργία μιας συγκόλλησης να απαιτείται μια αρχική σύσφιξη μέχρι να θεωρηθεί ότι η συγκόλληση έχει επιτύχει τις συγκεκριμένες μηχανικές ιδιότητες .

Η ισχύς της συγκόλλησης προϋποθέτει ότι θα υπάρχει μία ομοιόμορφη και ισοπαχή γραμμική συγκόλληση ανάμεσα στα συγκολλούμενα υλικά. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ύγρανση (wetting). Η ύγρανση βελτιστοποιείται αν υπάρχει χημική συμβατότητα και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχολαστικό καθαρισμό των υλικών προς συγκόλληση. Η συγκόλληση μπορεί να βελτιστοποιηθεί σε ορισμένα υλικά αν υπάρχει ένας βαθμός μηχανικής σύνδεσης μεταξύ της κόλλας και ανωμαλιών που μπορεί να φέρουν τα υλικά στην επιφάνεια κόλλησης. Για αυτό τον λόγο πολλές φορές αντί να υπάρξει προετοιμασία των επιφανειών, δημιουργείται μια τράχυνση που έχει αποδειχτεί ότι αυξάνει την συνολική αντοχή. Έπειτα πρέπει να υπάρχει ένας σχολαστικός καθαρισμός που θα απομακρύνει όλα τα λάδια και τα

απορρίμματα. Η διαδικασία του καθαρισμού είναι πολυσύνθετη και χρονοβόρα. Ανάλογα με την φύση του υλικού μπορεί να απαιτείται απομάκρυνση στρωμάτων οξειδίων, επιλογή αμμοβολής, επιφανειακή κατεργασία με χρήση πλάσματος ή γενικά περίπλοκες διεργασίες που δεν ανήκουν στο αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι ώστε να τοποθετηθεί η κόλλα στα προς συγκόλληση υλικά. Ορισμένες κόλλες βρίσκονται σε υγρή μορφή πριν την εφαρμογή και επαλείφονται μέσω δοσομετρικών αντλιών σε μια ή και στις δύο επιφάνειες. Ωστόσο σε περίπτωση υπερβολικής χρήσης κόλλας είναι εφικτό να απομακρυνθεί πριν τη συγκόλληση αλλά κυρίως σε συγκολλήσεις που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στην περιοχή που τοποθετείται η κόλλα και ο έλεγχος ποιότητας δεν είναι αυστηρός. Πάραυτα η σωστή ποσότητα κόλλας είναι ζωτικής σημασίας για την σωστή και αποτελεσματική συνένωση των υλικών. Έτσι πολλές κόλλες παράγονται σε φιλμ συγκεκριμένων διαστάσεων και απλά τοποθετούνται στο κατάλληλο σημείο. Μπορεί ακόμη να έχουν την μορφή αλοιφής ή απλά να είναι στερεές ή σε σκόνη. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η άσκηση θερμικών φορτίων και η σύσφιξη των υλικών.

Μετά την εφαρμογή του φιλμ κόλλας τα υλικά προς κόλληση ευθυγραμμίζονται και συγκρατούνται στην απαραίτητη διεύθυνση μέχρι τη στερεοποίηση της κόλλας μέσω κατάλληλων συνδέσεων. Ορισμένες προδιαγραφές επιτάσσουν και την εφαρμογή των συνδέσεων για ένα χρονικό διάστημα μετά το σημείο όπου θεωρητικά η ισχύς του δεσμού έχει ισχυροποιηθεί. Ορισμένες κόλλες κυρίως αυτές που ανήκουν στην κατηγορία των δομικών στερεοποιούνται μέσω θερμικής κατεργασίας ενώ άλλες απαιτούν την εξάτμιση διαλυτικών ή την παρουσία περιβάλλοντος αυξημένης συγκέντρωσης υγρασίας.

#### **4.6 Ταυτόχρονη χρήση μηχανικών τρόπων σύνδεσης και συγκόλλησης**

Υπάρχουν περιπτώσεις στην βιομηχανία που απαιτείται τόσο το ένα όσο και το άλλο είδος συνένωσης δύο υλικών. Για παράδειγμα αν δυο υλικά συνδέονται με ήλους και παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή ενώ απαιτείται και ένα προστατευτικό φιλμ που θα σφράγιζε την σύνδεση έναντι διάβρωσης λόγω πιθανών περιβαλλοντικών συνθηκών, γίνεται εφαρμογή των δύο μεθόδων ταυτόχρονα. Ο τρόπος αυτός βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μια πρώτη γρήγορη και πιο πρόχειρη βέβαια συναρμογή μέχρι την στιγμή που θα τοποθετηθούν μόνιμοι μηχανικοί συνδετήρες. Τέλος σε ορισμένες εφαρμογές το βασικό πρόβλημα της συγκέντρωσης τάσεων λόγω μηχανικής σύνδεσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί καθώς μοιράζονται οι δυνάμεις σε μεγαλύτερη περιοχή λόγω ύπαρξης συγκολλητικού μέσου.

#### **4.7 Συνένωση υλικών με τη μέθοδο ανάμιξης με τριβή (friction stir welding)**

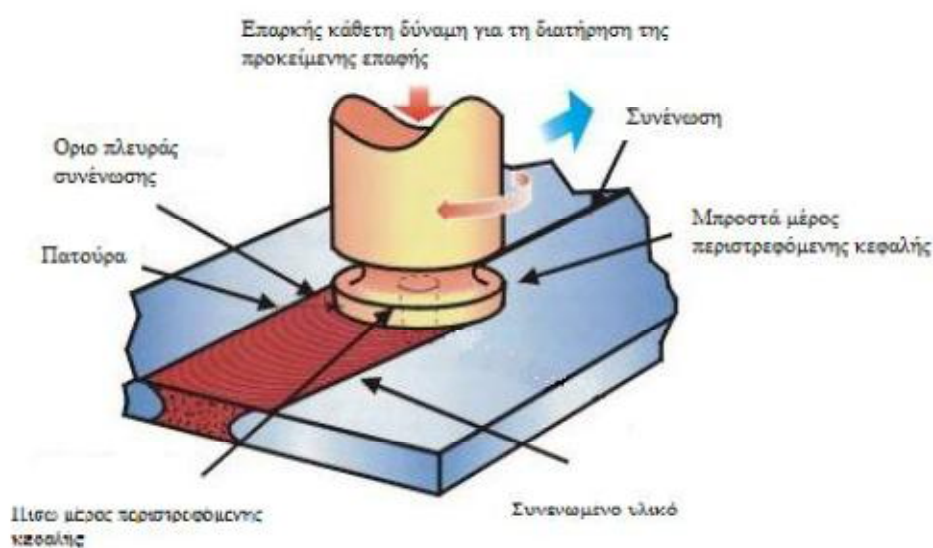
Η συνένωση υλικών με τη μέθοδο ανάμιξης με τριβή αποτελεί μια διεργασία ψυχρής συνένωσης και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου οι αρχικές ιδιότητες των υλικών θα πρέπει να παραμείνουν όσο το δυνατό αμετάβλητες. Πρόκειται για μια από τις πιο σύγχρονες μεθόδους συνένωσης υλικών και αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε αλουμίνιο. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή αντοχή με

ταυτόχρονη μείωση διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων. Παράγονται προϊόντα υψηλής ισχύος συνένωσης, τα οποία προκύπτουν από δύσκολα σε συνένωση υλικά, χωρίς όμως την παρουσία τοξικών αερίων ή επικίνδυνων στερεών αποβλήτων.

#### 4.7.1 Διαδικασία συνένωσης

Αρχικά τα κομμάτια που προορίζονται για συνένωση τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο και κατάλληλη εργαλειομηχανή κατά μήκος της επιφάνειας συνένωσης. Η διάταξη αποτελείται από μία κυλινδρική περιστρεφόμενη κεφαλή η οποία περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα και μετακινείται με σταθερό ρυθμό κατά μήκος της γραμμής συνένωσης. Τα κομμάτια θα πρέπει να συγκρατούνται ισχυρά καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας με τρόπο τέτοιο ώστε να περιορίζονται οι απωθητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται. Κατά την προώθηση του εργαλείου έχουμε θερμότητα λόγω τριβής μεταξύ της ανθεκτικής σε φθορά κεφαλής του εργαλείου και των κομματιών προς συνένωση. Η θερμότητα αυτή σε συνδυασμό με τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω ανάδευσης των δυο υλικών, οδηγεί στη ρευστοποίηση των υλικών χωρίς όμως αυτά να ακουμπήσουν το σημείο τήξης τους. Με την προώθηση λοιπόν της κεφαλής του εργαλείου τα υλικά προς συνένωση οδηγούνται σε πλαστικές παραμορφώσεις καθώς πραγματοποιείται η ανάδευση αυτών.

Συνοψίζοντας, η συνένωση προκύπτει μέσω των πλαστικών παραμορφώσεων των δυο υλικών σε στερεά κατάσταση, στην οποία περιλαμβάνεται και η αποκρυστάλλωση του υλικού.



Σχήμα 45: Συνένωση υλικών με τη μέθοδο ανάμιξης με τριβή

### Πλεονεκτήματα

- Αυξημένη ασφάλεια λόγω απουσίας αερίων και λιωμένων αποβλήτων.
- Περιορισμός των αναλώσιμων κεφαλών.
- Μία κεφαλή κατασκευασμένη από σκληρυνόμενο χάλυβα H13 μπορεί να συνενώσει πάνω από 1000 μέτρα επιφάνειας υλικών.
- Οι μηχανές κατεργασίας μπορούν εύκολα να αυτοματοποιηθούν και κατ' επέκταση απαιτούν μικρότερη διάρκεια συναρμολόγησης και εκπαίδευσης προσωπικού.
- Μπορεί να λειτουργήσει εγκάρσια ή οριζόντια.
- Η επιφάνεια συνένωσης παρουσιάζει πολύ μικρό πάχος περιορίζοντας έτσι την ανάγκη για περαιτέρω επιφανειακή κατεργασία μετά τη συνένωση.

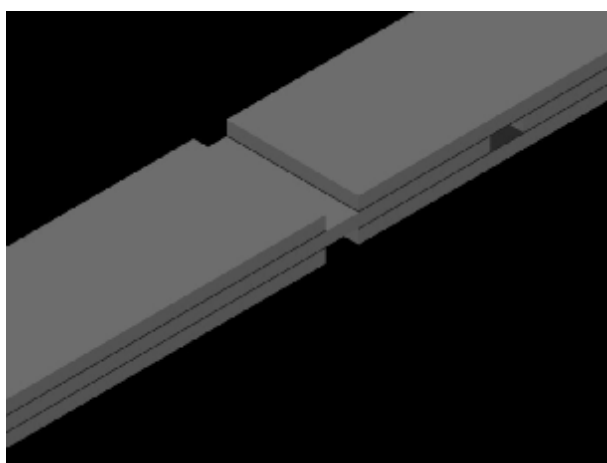
### Μειονεκτήματα

- Δημιουργία οπής στα υλικά κατά την απόσυρση της κεφαλής.
- Μικρή ευελιξία κατά τη διαδικασία ανάμειξης σε ότι αφορά την εναλλαγή του πάχους συνένωσης και μη ευθυγραμμισμένων συνενώσεων.
- Μικρή ταχύτητα προώθησης κεφαλής σε σχέση με μεθόδους που οδηγούν τα υλικά προς συνένωση στο σημείο τήξης τους.

## 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 5.1 Περιγραφή δοκιμίων

Το υλικό των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη των πειραμάτων στην παρούσα πειραματική μελέτη, είναι ένα υψηλών επιδόσεων πολυστρωτο θερμοσκληρυνόμενο σύνθετο υλικό (AS4/8552) εποξειδικής μήτρας τύπου Hexcel 8552 ενισχυμένο με ίνες άνθρακα κατηγορίας AS4 . Τα δοκίμια που παρελήφθησαν ήταν ήδη συγκολλημένα με εποξική κόλλα και χωρισμένα σε δοκίμια αναφοράς και σε αυτά που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία και διεργασίες γήρανσης (Thermal treatment, Wet aging).



*Σχήμα 46: Απεικόνιση δοκιμίου σε περιβάλλον Autocad*

Βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί ο τρόπος με τον οποίο έχει πραγματοποιηθεί η συγκόλληση. Πρόκειται για συγκόλληση διπλού στρώματος (double lap joint) που ελαττώνει τις καμπτικές και εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια συγκόλλησης.



**Σχήμα 47:** συγκόλληση διπλού στρώματος **Σχήμα 48:** συγκόλληση διπλού στρώματος

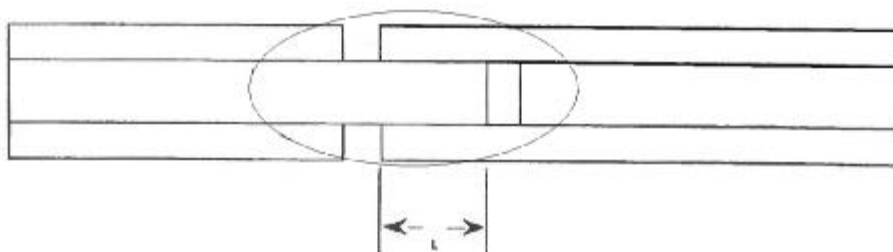
Οι αρχικές διαστάσεις των δοκιμίων είναι προκαθορισμένες και ίδιες σε κάθε περίπτωση και λαμβάνονται πριν από οποιαδήποτε πειραματική διαδικασία. Οι μετρηθείσες διαστάσεις είναι οι εξής

Μήκος  $Z$ : 200 mm

Πλάτος  $W$ : 25,10 mm

Πάχος  $d$ : 8,70 mm

Μήκος επικάλυψης  $L$  (overlap length) :12.5 mm



**Σχήμα 49:** Μήκος επικάλυψης  $L$

Σημαντικό είναι να επισημανθεί πως κατά μήκος του δοκιμίου παρουσιάζεται μια απόκλιση στις διαστάσεις του, της τάξης των 0,5 mm. Για το λόγο αυτό λαμβάνουμε ενδεικτικές τιμές μήκους και πλάτους σε τρία διαφορετικά σημεία του δοκιμίου και στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέση τιμή, λαμβάνοντας με αυτό τον τρόπο πιο ακριβείς μετρήσεις.



(α)



(β)



*Σχήμα 50: υπολογισμός πλάτους ( $w$ ) ( $\alpha$ ) πάχους ( $d$ ) ( $\beta$ ) με ηλεκτρονικό παχύμετρο*

## 5.2 Κατηγοριοποίηση Δοκιμίων

Σύμφωνα με την κόλλα συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε και το πάχος αυτής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα δοκίμια αποτελούνται από ανθρακωνημάτινα ελάσματα (CFRP) , με ενδιάμεσο συγκολλητικό στρώμα σε δύο διαφορετικά πάχη (thicknesses) και δύο διαφορετικά είδη κόλλας.

Epibond 1590-A/B	LMB
Πάχος I: 0, 5 mm	Πάχος I: 0, 5 mm
Πάχος II: 1, 5 mm	Πάχος II: 1, 5 mm

*Πίνακας 10: Κατηγοριοποίηση δοκιμίων*

**Epibond 1590-A/B:** Είναι μια εποξική κόλλα δυο στοιχείων, σχεδιασμένη έτσι ώστε να λειτουργεί σε θερμοκρασιακό εύρος μέχρι 350° F (177° C), και να συνενώνει μεταλλικά , σύνθετα ή ομοειδή υλικά .Είναι επιτυχώς χρησιμοποιημένη στην αεροναυπηγική και κατάλληλη για χρήση σε επιφάνειες που σε συνθήκες λειτουργίας είναι κάθετες μεταξύ τους ή έχουν οριζόντιο προσανατολισμό. Η κόλλα αυτή έχει χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα σε πειραματικές διαδικασίες και θα αποτελέσει την κόλλα αναφοράς (**Reference**) , σύμφωνα με την οποία θα γίνει η σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς σε σχέση με τη νέα κόλλα LMB που τείνει να βελτιώσει τις ιδιότητες της κόλλας αναφοράς.

**LMB:** Είναι μια κόλλα δύο συστατικών με μεγαλύτερη ρευστότητα που σχεδιάστηκε έτσι ώστε να περιορίσει ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η κόλλα αναφοράς Epibond 1590 όπως η μειωμένη χημική αντίδραση με το περιβάλλον και η μεγαλύτερη αντοχή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας .

Αποτελεί τη νέα επιλογή στην συγκόλληση των CFRP laminates και σκοπός είναι να ερευνηθεί και να συγκριθεί η συμπεριφορά συγκόλλησής της σε σχέση με την κόλλα αναφοράς.

Σύμφωνα με την προεργασία στην επιφάνεια των δοκιμίων χωρίζονται σε :

**Δοκίμια αναφοράς (Static coupons):** Δοκίμια τα οποία έχουν δημιουργηθεί κατά την συγκόλληση δύο ανθρακωνημάτων ελασμάτων, με κάποιο από τα παραπάνω είδη κόλλας, τα οποία δεν έχουν υποστεί καμία κατεργασία σχετικά με την επιφάνεια κόλλησης. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής τους είναι έτοιμα για να μελετηθούν και να αξιολογηθούν πειραματικά.

**Δοκίμια θερμικά επεξεργασμένα (Thermal coupons):** Δοκίμια τα οποία έχουν δημιουργηθεί κατά την συγκόλληση δύο ανθρακωνημάτων ελασμάτων, με κάποιο από τα παραπάνω είδη κόλλας, χωρίς να έχουν υποστεί καμία κατεργασία σχετικά με την διεπιφάνεια κόλλησης. Έχουν υποστεί όμως θερμική κατεργασία στην επιφάνεια τους και πιο συγκεκριμένα εισήχθησαν σε περιβάλλον  $- 50^{\circ} \text{C}$  και στη συνέχεια θερμάνθηκαν έως τους  $90^{\circ} \text{C}$  ,με βήμα πρόσδοσης θερμότητας  $10^{\circ} \text{C}/\text{min}$ ,για 1000 κύκλους φόρτισης

**Δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση (Wet coupons):** Δοκίμια τα οποία έχουν δημιουργηθεί κατά την συγκόλληση δύο ανθρακωνημάτων ελασμάτων, με κάποιο από τα παραπάνω είδη κόλλας, χωρίς να έχουν υποστεί καμία κατεργασία σχετικά με την διεπιφάνεια κόλλησης. Στην περίπτωση αυτή τα δοκίμια υπέστησαν γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 85% , σε θερμοκρασία  $70^{\circ} \text{C}$  . Η διαδικασία ολοκληρώθηκε όταν παρατηρήθηκε αύξηση του βάρους του δοκιμίου κατά 1,5% περίπου , το οποίο είναι και η μέγιστη εφικτή τιμή που μπορούσε να επιτευχθεί. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν για αυτό τον λόγο σε διάλυμα ύδατος για τουλάχιστον 4000 ώρες.

### Κόλλα αναφοράς : Reference

Δείγματα I		Δείγματα II	
Πάχος 1 (0,5)		Πάχος 2 (1,5)	
Εφελκυσμός			
DLS.REF.STATIC	I.1	DLS.REF.STATIC	II.1
DLS.REF.STATIC	I.2	DLS.REF.STATIC	II.2
DLS.REF.STATIC	I.3	DLS.REF.STATIC	II.3
DLS.REF.STATIC	I.4	DLS.REF.STATIC	II.4
DLS.REF.STATIC	I.5	DLS.REF.STATIC	II.5



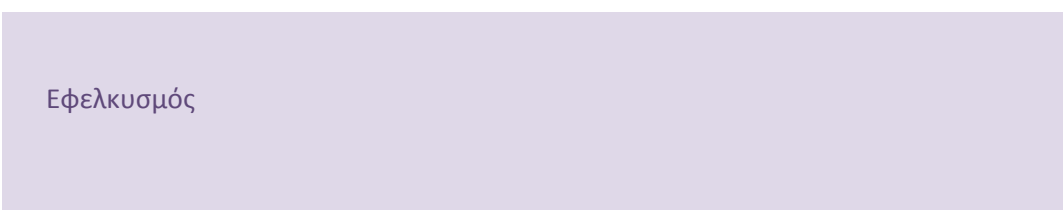
DLS.REF.Thermal	I.1	DLS.REF.Thermal	II.1
DLS.REF.Thermal	I.2	DLS.REF.Thermal	II.2
DLS.REF.Thermal	I.3	DLS.REF.Thermal	II.3
DLS.REF.Thermal	I.4	DLS.REF.Thermal	II.4
DLS.REF.Thermal	I.5	DLS.REF.Thermal	II.5



DLS.REF.Wet	I.1	DLS.REF.Wet	II.1
DLS.REF.Wet	I.2	DLS.REF.Wet	II.2
DLS.REF.Wet	I.3	DLS.REF.Wet	II.3
DLS.REF.Wet	I.4	DLS.REF.Wet	II.4
DLS.REF.Wet	I.5	DLS.REF.Wet	II.5

**Κόλλα : LMB**

<b>Δείγματα III</b>	<b>Δείγματα IV</b>
<b>Πάχος 1 (0,5)</b>	<b>Πάχος 2 (1,5)</b>



Εφελκυσμός

DLS.LMB.STATIC	III.1	DLS.LMB.STATIC	IV.1
DLS.LMB.STATIC	III.2	DLS.LMB.STATIC	IV.2
DLS.LMB.STATIC	III.3	DLS.LMB.STATIC	IV.3
DLS.LMB.STATIC	III.4	DLS.LMB.STATIC	IV.4
DLS.LMB.STATIC	III.5	DLS.LMB.STATIC	IV.5

DLS.LMB.Thermal	III.1	DLS.LMB.Thermal	IV.1
DLS.LMB.Thermal	III.2	DLS.LMB.Thermal	IV.2
DLS.LMB.Thermal	III.3	DLS.LMB.Thermal	IV.3
DLS.LMB.Thermal	III.4	DLS.LMB.Thermal	IV.4
DLS.LMB.Thermal	III.5	DLS.LMB.Thermal	IV.5
DLS.LMB.Wet	III.1	DLS.LMB.Wet	IV.1
DLS.LMB.Wet	III.2	DLS.LMB.Wet	IV.2
DLS.LMB.Wet	III.3	DLS.LMB.Wet	IV.3
DLS.LMB.Wet	III.4	DLS.LMB.Wet	IV.4
DLS.LMB.Wet	III.5	DLS.LMB.Wet	IV.5

### 5.3 Κωδικοποίηση δοκιμών

Στην επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου αναγράφεται η παραπάνω κωδικοποίηση, από τον κατασκευαστή.



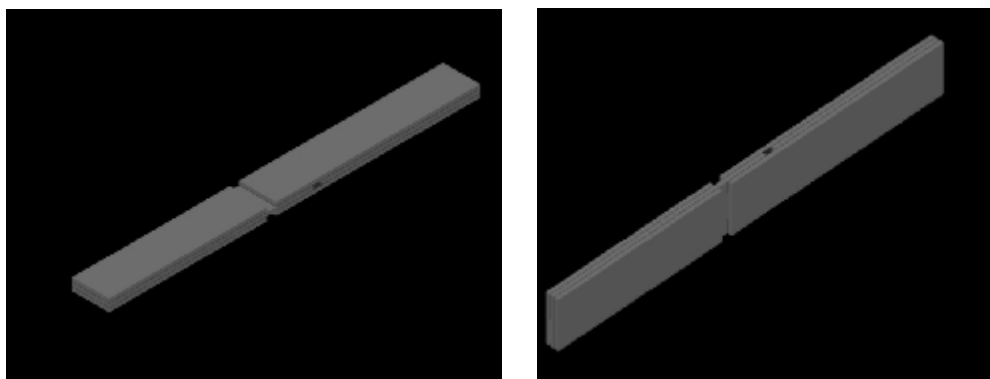
Σχήμα 51: Κωδικοποίηση Thermal δοκιμών

Η κωδικοποίηση αυτή διατηρείται καθ' όλες τις πειραματικές διαδικασίες, τόσο στην ηλεκτρονική καταγραφή των πειραμάτων όσο και στην αρχειοθέτησή τους σε διαφάνειες με τα αναγραφόμενα χαρακτηριστικά τους. Επομένως και το κάθε δοκίμιο συμπληρώνεται ένα δελτίο καταγραφής μετρήσεων-δοκιμών η οποία περιλαμβάνει αναλυτικά :

- κωδικό του αντικειμένου (ταυτότητα δοκιμίου)
- είδος ελέγχου/δοκιμής
- πρότυπα/προδιαγραφή ελέγχου
- συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν
- τεχνικά χαρακτηριστικά ελέγχου όπως οι αρχικές διαστάσεις (πλάτος και πάχος), το μήκος επικάλυψης ( $L_{\text{overlap}}$ )
- ρυθμό μετατόπισης δοκιμής σε mm/min

Αφού τα δοκίμια μετρηθούν και ταξινομηθούν κατάλληλα, τοποθετούνται σε ειδικό χώρο του εργαστηρίου που διατηρούνται πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί η απεικόνιση των δοκιμίων σχεδιασμένων σε περιβάλλον AutoCad, σε τρισδιάστατη μορφή.



*Σχήμα 52: Απεικόνιση δοκιμίου σε περιβάλλον Autocad*

#### 5.4 Πειραματική Διάταξη

Σκοπός της παρούσας πειραματικής μελέτης, που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ΑΙΤΜ (Airbus Industrie Test Methods) 1-0019, είναι να προσδιοριστεί η μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στο σημείο συγκόλλησης διπλού στρώματος (double lap joint) στο οποίο ασκείται μια διατμητική δύναμη παράλληλη με τον άξονα του εκάστοτε δοκιμίου.

Το φορτίο ασκείται συνεχόμενα μέχρι να παρατηρηθεί αστοχία στην περιοχή επικάλυψης ενώ η δύναμη διάτμησης καθορίζεται με βάση την προδιαγραφή ΑΙΤΜ 1-0019.

Για την υλοποίηση της πτυχιακής αυτής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές διαδικασίες εφελκυσμού σε μία σερβοϋδραυλική μηχανή γενικών δοκιμών MTS μέγιστου φορτίου 250 KN (Σχήμα 53), η οποία λειτουργεί σύμφωνα με το πρότυπο ISO7500-1 στο πανεπιστήμιο Πατρών στο εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής των Υλικών. Η συγκεκριμένη μηχανή είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο καταγράφονται τα δεδομένα του κάθε πειράματος όπως φορτίο, μετατόπιση, κύκλοι φόρτισης κ.α.



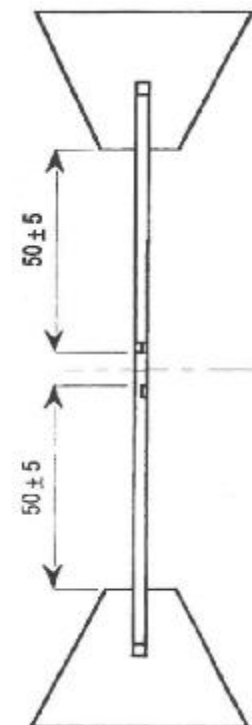
*Σχήμα 53: Μηχανή γενικών δοκιμών MTS*

Προκειμένου να μπορέσουν να κατανεμηθούν οι τάσεις σωστά στο δοκίμιο, έπρεπε αυτό με την τοποθέτησή του στη μηχανή να ευθυγραμμιστεί πλήρως και ο άξονας του δοκιμίου να συμπίπτει με τον άξονα εφελκυσμού που ακολουθούν οι αρπάγες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό έγινε με πολύ μεγάλη προσοχή και ακριβείς μετρήσεις όπως επίσης και με τη βοήθεια ενός οδηγού που κατασκευάστηκε γι' αυτόν ακριβώς το λόγο.



*Σχήμα 54: Τοποθέτηση δοκιμίου στη μηχανή*    *Σχήμα 55: Οδηγός ευθυγράμμισης*

Σε ότι αφορά την τοποθέτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στην προδιαγραφή. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε οπή του σημείου επικάλυψης να απέχει περίπου 50 mm από την εκάστοτε αρπάγη όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

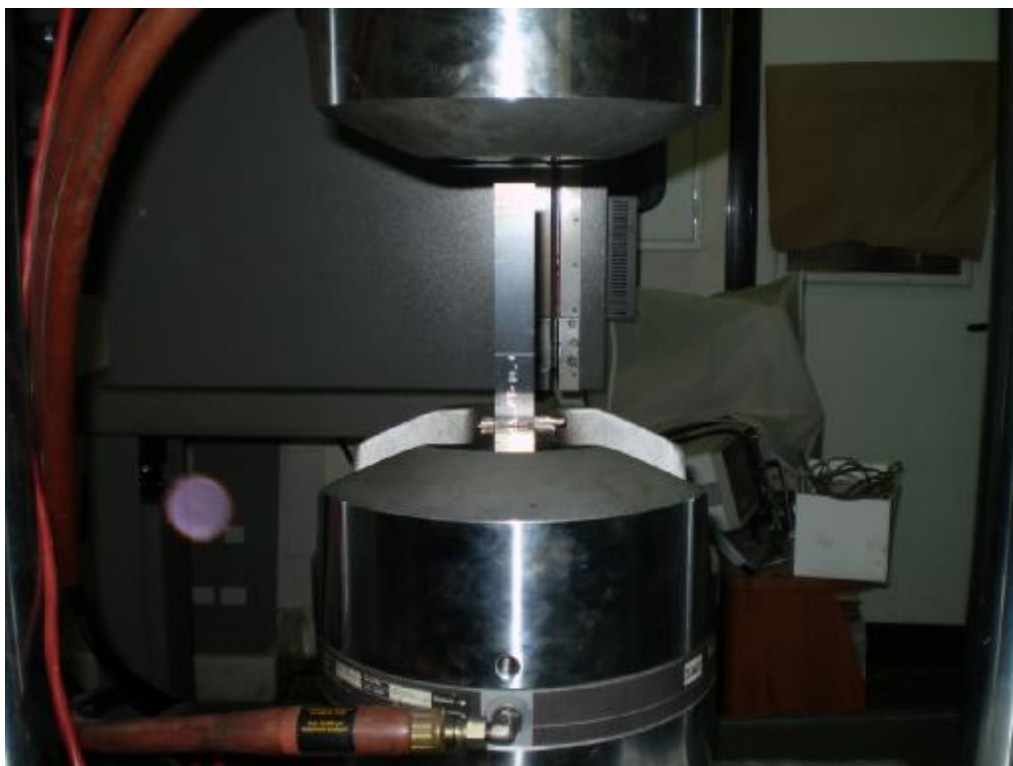


*Σχήμα 56: Τοποθέτηση δοκιμίου*

### 5.5 Μηχανική Συμπεριφορά σε Διάτμηση

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 60 πειράματα εφελκυσμού με σκοπό να ερευνηθεί η συμπεριφορά της συγκόλλησης κάτω από ψευδο-στατικά φορτία υπό διαφορετικές συνθήκες . Πιο συγκεκριμένα έλαβαν χώρα 20 δοκιμές για την κάθε κατηγορία δοκιμίων (static, thermal, wet) κατηγοριοποιημένα σύμφωνα με την κόλλα συγκόλλησης και το πάχος αυτής όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν στη μηχανή γενικών δοκιμών MTS 250 KN και ο ρυθμός μετατόπισης της αρπάγης ήταν 3 mm/min βάση της προδιαγραφής AITM 1-0019.

Αφού έγινε η τοποθέτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παρουσιάζονται αρχικά φορτία, προχωρήσαμε στην εκτέλεση των πειραμάτων μας. Με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή και το κατάλληλο λειτουργικό πρόγραμμα έγινε η καταγραφή της κάθε δοκιμής η οποία περιείχε για κάθε ένα εκατοστό του δευτερολέπτου μέτρηση της μετατόπισης και του επιβαλλόμενου φορτίου μέχρι να παρατηρηθεί αστοχία του δοκιμίου όπου και τερματιζόταν το πείραμα. Στη συνέχεια ακολούθησε η αποτίμηση των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια διαγραμμάτων, ακολουθώντας συγκεκριμένη διαδικασία όπως αυτή παρουσιάζεται στην ενότητα που ακολουθεί.



*Σχήμα 57: Τοποθέτηση δοκιμίου στη μηχανή γενικών δοκιμών MTS*



## **6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ**

Στην πειραματική αυτή διαδικασία θα γίνει ο καθορισμός της μέγιστης διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται στο σημείο διπλής επικάλυψης του κάθε δοκιμίου σύμφωνα με τη μαθηματική σχέση που δίνεται από την προδιαγραφή :

$$\tau = \frac{F}{2*L*W} \text{ [MPa]}$$

Όπου

$\tau$  : η μέγιστη διατμητική τάση στο σημείο διπλής επικάλυψης, σε MPa

F : το μέγιστο φορτίο κατά τη διάρκεια του πειράματος, σε N

L : το μήκος επικάλυψης, σε mm

W : το πάχος επικάλυψης, σε mm

Εκτός από τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής δύναμης θα γίνει η διαγραμματική απεικόνιση δύναμης-μετατόπισης ενδεικτικά για κάθε κατηγορία δοκιμίων καθώς και ο έλεγχος των επιφανειών υπό διατμητικά φορτία σε σχέση με το πρότυπο ποιότητας ISO010065.

### **6.1 Δοκίμια αναφοράς (static coupons)**

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται για κάθε κατηγορία δοκιμίων ο υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής τάσης σύμφωνα με την παραπάνω μαθηματική σχέση. Υπολογίζεται επίσης μια μέση τιμή της τάσης αυτής και της μέγιστης δύναμης για το σύνολο των δοκιμίων που μελετήθηκαν πειραματικά στην κατηγορία αυτή. Όπως παρατηρούμε έχει διατηρηθεί η κωδικοποίηση των δοκιμίων ενώ το μήκος και το πάχος του σημείου διπλής επικάλυψης μετρήθηκαν πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Κόλλα Συγκόλλησης : Eribond

**Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T (MPa)
DLS.REF.STATIC .I.1	18,24	18240	12,05	25,13	30,11725
DLS.REF.STATIC .I.2	18,02	18020	12,14	25,16	29,4982
DLS.REF.STATIC .I.3	18,7	18700	11,99	25,18	30,96968
DLS.REF.STATIC .I.4	17,711	17711	12,22	25,12	28,84843
Μέση τιμή	<b>18,13</b>	18130			<b>29,85839</b>

*Πίνακας 11 : Eribond, πάχος 1*

**Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.REF.STATIC.II.2	15,85	15850	12,6	25,12	25,03855
DLS.REF.STATIC.II.3	14,97	14970	12,75	25,15	23,3423
DLS.REF.STATIC.II.4	15,98	15980	12,96	25,14	24,52316
DLS.REF.STATIC.II.5	17,01	17010	12,97	25,15	26,07332
Μέση τιμή	<b>15,915</b>	15915			<b>22,8827</b>

*Πίνακας 12 : Eribond, πάχος 2*

### Κόλλα Συγκόλλησης : LMB

#### **Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	L <sub>overlap</sub> (mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.STATIC.III.1	12,6	12600	12,41	25,1	20,2253
DLS.LMB.STATIC.III.2	14,61	14610	12,16	25,09	23,94341
DLS.LMB.STATIC.III.3	13,75	13750	12,3	25,1	22,26865
DLS.LMB.STATIC.III.4	13,4	13400	12,15	25,18	21,89993
Μέση τιμή	<b>13,575</b>	13575			<b>22,08432</b>

***Πίνακας 13 : LMB, πάχος 1***

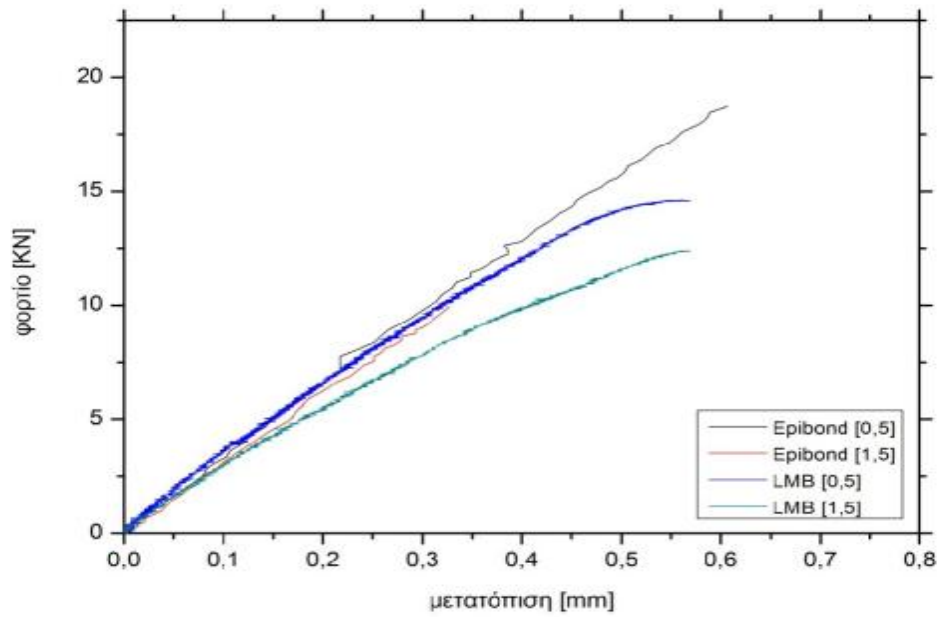
#### **Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	L <sub>overlap</sub> (mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.STATIC.IV.1	12,5	12500	12,5	25,07	19,94416
DLS.LMB.STATIC.IV.2	12,41	12410	12,59	25,12	19,61988
DLS.LMB.STATIC.IV.3	14,11	14110	12,59	25,14	22,28979
DLS.LMB.STATIC.IV.4	13,81	13810	12,61	25,14	21,78128
Μέση τιμή	<b>13,155</b>	13155			<b>20,90878</b>

***Πίνακας 14 : LMB, πάχος 2***

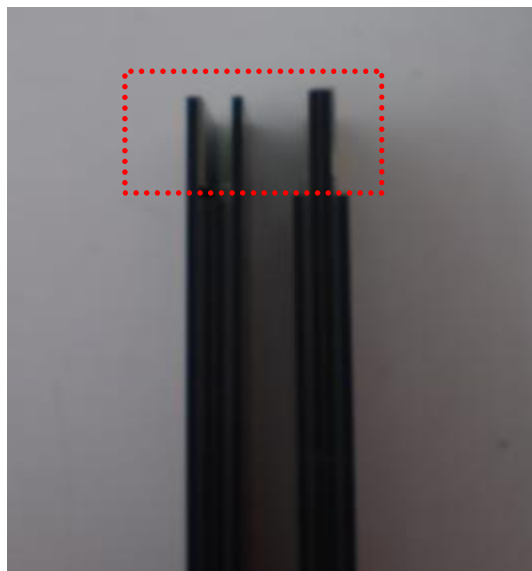
Όπως παρατηρούμε από τους παραπάνω πίνακες, η κατηγορία δοκιμίων που συγκολλήθηκε με την κόλλα αναφοράς EpiBond 1590 σε πάχος 1 (0,5) παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή αφού τα φορτία κάτω από τα οποία αστοχούν τα δοκίμια της κατηγορίας αυτής είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στις υπόλοιπες κατηγορίες. Όσα δοκίμια αστόχησαν αλλά όχι κάτω από διατμητικές τάσεις, δε συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς μας σύμφωνα με την προδιαγραφή.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης για κάθε κατηγορία κόλλας πάχους, χρησιμοποιώντας ένα δοκίμιο ενδεικτικά. Το πιο πάνω συμπέρασμα είναι εύκολα διακριτό και σε αυτή την περίπτωση.



*Διάγραμμα 1 : Γραφική απεικόνιση φορτίου-μετατόπισης για κάθε κατηγορία κόλλας-πάχους*

Στις φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα δοκίμιο που δεν έχει υποστεί επεξεργασία, μετά από τη διατμητική αστοχία που παρατηρείται στο σημείο διπλής επικάλυψης. Όπως φαίνεται η θραύση είναι ψαθυρή και αφορά την αστοχία της κόλλας στο συγκεκριμένο τρόπο συνένωσης υλικών (double lap joint).



*Σχήμα 58: Επιφάνεια θραύσης μετά τη διατμητική αστοχία*

## 6.2 Δοκίμια θερμικά επεξεργασμένα (*thermal coupons*)

Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής τάσης σε δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία.

Όπως παρατηρούμε στην περίπτωση αυτή, η κατηγορία των δοκιμίων που το πάχος συγκόλλησης είναι πάχος 1 (0.5mm), παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τα αντίστοιχα με το πάχος συγκόλλησης 2 (1,5mm). Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε πως η μέση τιμή της μέγιστης διατμητικής τάσης στη περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση η κόλλα αναφοράς Eribond, για το πάχος 1 είναι 26,44866 MPa σε σχέση με το πάχος 2 που είναι 18,63099 MPa. Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση της κόλλας LMB, στην οποία τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με πάχος 1 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα αντίστοιχα με πάχος 2.

### Κόλλα Συγκόλλησης : Eribond

#### **Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	<b>T(Mpa)</b>
DLS.REF.THERMAL.I.2	14,105	14105	12,27	25,06	22,93599
DLS.REF.THERMAL.I.3	17,562	17562	12,32	25,08	28,4188
DLS.REF.THERMAL.I.4	16,796	16796	12,22	25,08	27,40168
DLS.REF.THERMAL.I.5	16,919	16919	12,47	25,09	27,03819
Μέση τιμή	<b>16,8575</b>	16857,5			<b>26,44866</b>

**Πίνακας 15 : Eribond, πάχος 1**

#### **Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	<b>T(Mpa)</b>
DLS.REF.THERMAL.II.1	12,626	12626	12,5	25,08	20,13716
DLS.REF.THERMAL.II.2	11,966	11966	12,4	25,11	19,21545
DLS.REF.THERMAL.II.3	12,929	12929	12,52	25,12	20,55469
DLS.REF.THERMAL.II.4	10,167	10167	12,39	25,11	16,33973
DLS.REF.THERMAL.II.5	10,423	10423	12,28	25,1	16,90794
Μέση τιμή	<b>11,966</b>	11966			<b>18,63099</b>

**Πίνακας 16 : Eribond, πάχος 2**

Κόλλα Συγκόλλησης : LMB

**Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.THERMAL.III.1	13,084	13084	11,97	25,1	21,77422
DLS.LMB.THERMAL.III.2	13,838	13838	11,9	25,05	23,21072
DLS.LMB.THERMAL.III.3	12,952	12952	11,96	25,08	21,58978
DLS.LMB.THERMAL.III.4	12,749	12749	11,99	25,07	21,20668
DLS.LMB.THERMAL.III.5	16,564	16564	11,99	25,08	27,54156
Μέση τιμή	<b>13,084</b>	13084			<b>23,06459</b>

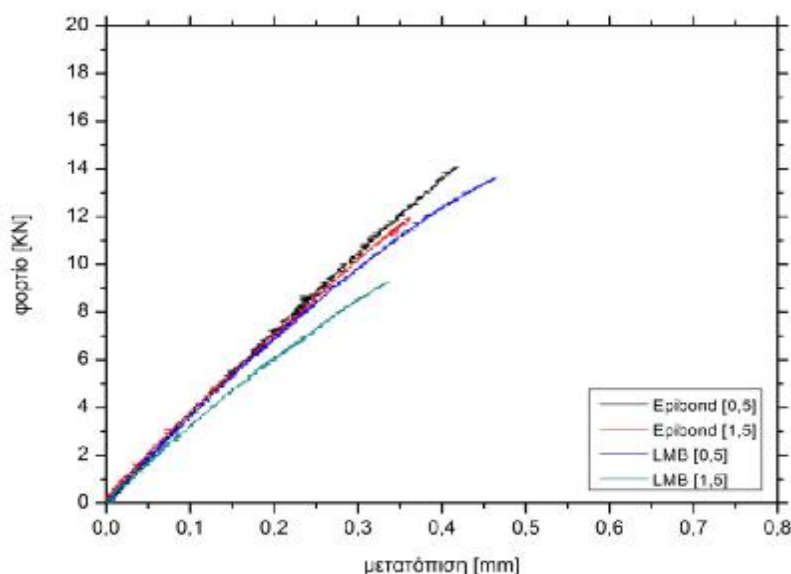
**Πίνακας 17 : LMB, πάχος 1**

**Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.THERMAL.IV.1	7,443	7443	11,33	25,05	13,11235
DLS.LMB.THERMAL.IV.2	9,277	9277	11,69	25,11	15,80216
DLS.LMB.THERMAL.IV.3	9,762	9762	11,63	25,11	16,71408
DLS.LMB.THERMAL.IV.4	3,474	3474	11,88	25,1	5,825184
DLS.LMB.THERMAL.IV.5	2,951	2951	11,66	25,06	5,04963
Μέση τιμή	<b>7,443</b>	7443			<b>11,30068</b>

**Πίνακας 18 : LMB, πάχος 2**

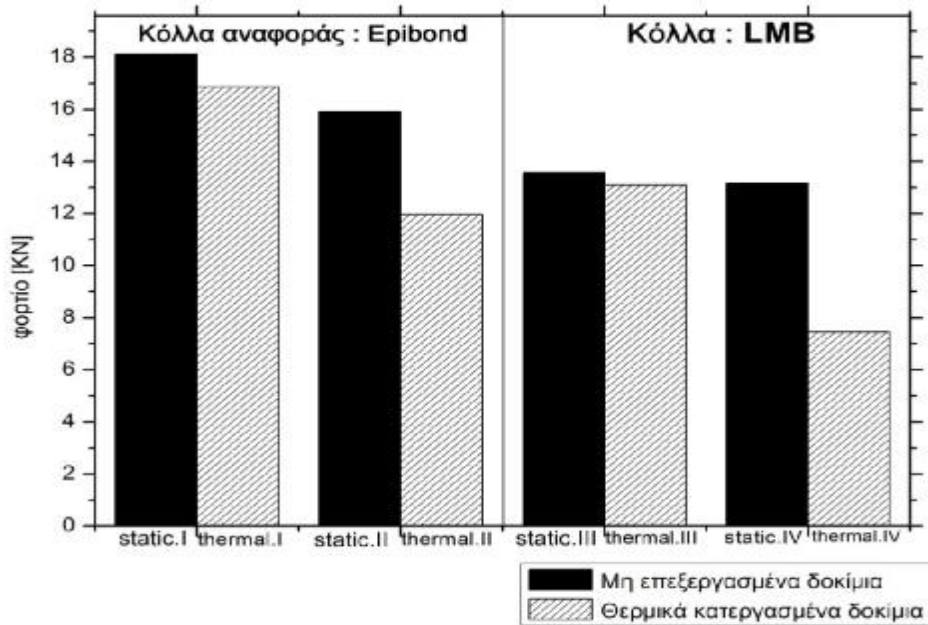
Στο διάγραμμα φορτίου -μετατόπισης που ακολουθεί απεικονίζεται ενδεικτικά ένα δοκίμιο, θερμικά επεξεργασμένο, από κάθε κατηγορία κόλλας-πάχους. Η συγκόλληση που πραγματοποιήθηκε με την κόλλα αναφοράς Epibond και πάχος 1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντοχή ενώ η συμπεριφορά των δοκιμίων που συγκολλήθηκαν με πάχος κόλλας 0,5 mm είναι εμφανώς καλύτερη από αυτά που συγκολλήθηκαν με πάχος 1,5 mm τόσο κατά τη χρήση της κόλλας αναφοράς όσο κατά τη χρήση της LMB κόλλας, όπως διαπιστώθηκε και από τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής τάσης



*Διάγραμμα 2 : Γραφική απεικόνιση φορτίου-μετατόπισης για κάθε κατηγορία κόλλας-πάχους*

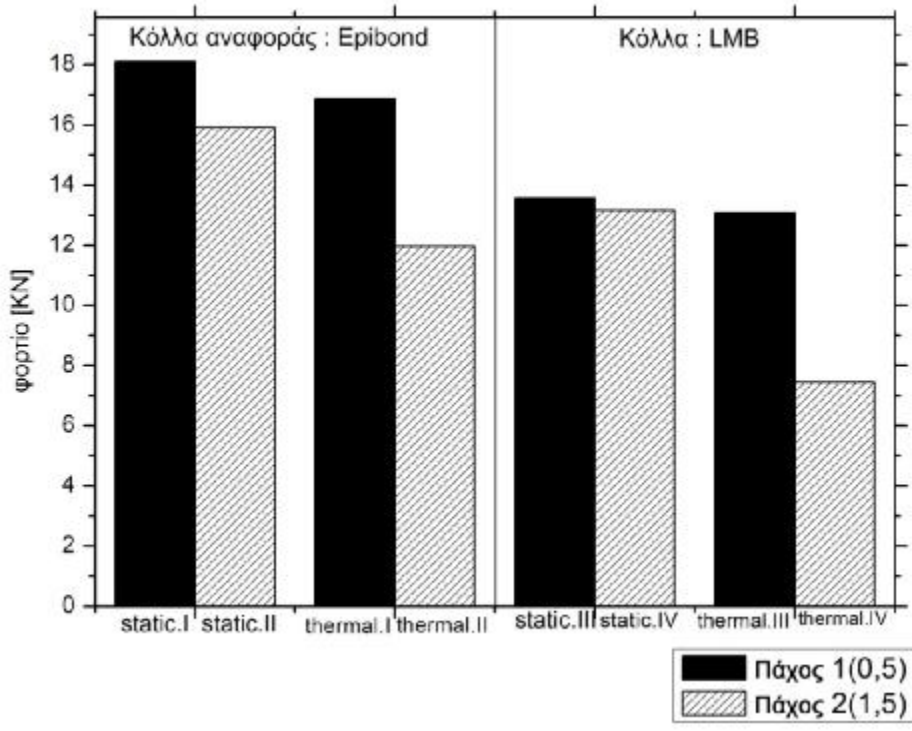
### **6.3 Σύγκριση δοκιμίων αναφοράς και δοκιμίων θερμικά επεξεργασμένων**

Στα διαγράμματα που ακολουθούν, πραγματοποιείται η σύγκριση των μη επεξεργασμένων και των θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων σε σχέση με την επιφανειακή επεξεργασία (διάγραμμα) και το πάχος συγκόλλησης (διάγραμμα) αυτών. Απεικονίζεται το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο στο οποίο παρατηρείται διατμητική αστοχία κατά τη διάρκεια του πειράματος και η αντίστοιχες κατηγορίες.



*Γράφημα 1 : Σύγκριση δοκιμών αναφοράς και δοκιμών θερμικά επεξεργασμένων*

Όπως διαφαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, τα μη επιφανειακά επεξεργασμένα δοκίμια (static) παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κάτω από διατμητικά φορτία σε σχέση με τα θερμικά κατεργασμένα (thermal) στο σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.



*Γράφημα 2 : Σύγκριση δοκιμών αναφοράς και δοκιμών θερμικά επεξεργασμένων*



Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με πάχος κόλλας 0,5mm είναι εμφανώς καλύτερα από τα αντίστοιχα συγκολλημένα με πάχος 1,5 mm, τόσο στην κατηγορία των μη επεξεργασμένων όσο και σε αυτή των θερμικά επεξεργασμένων δοκιμίων. Με λίγα λόγια το λεπτό στρώμα συγκόλλησης ενδείκνυται και στις δύο κατηγορίες.

#### 6.4 Δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας (wet coupons)

Υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής τάσης

##### Κόλλα Συγκόλλησης : Epibond

##### **Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.REF.WET.I.1	12	11842	12,6	25,09	18,7294
DLS.REF.WET.I.2	8,6825	8682,5	12,34	25,06	14,03843
DLS.REF.WET.I.3	7,1531	7153,1	12,32	25,11	11,56131
DLS.REF.WET.I.4	11,198	11198	12,4	25,1	17,98933
DLS.REF.WET.I.5	8,4228	8422,8	12,25	25,13	13,68037
Μέση τιμή	<b>9</b>				<b>15,19977</b>

*Πίνακας 19 : Epibond, πάχος 1*

##### **Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.REF.WET.II.1	9,1683	9168,3	12,44	25,14	14,65795
DLS.REF.WET.II.2	7,5	7500	12,68	25,12	11,77314
DLS.REF.WET.II.3	3,45	3450	12,46	25,13	5,509074
DLS.REF.WET.II.4	2,9313	2931,3	12,47	25,16	4,671466
DLS.REF.WET.II.5	2,713	2713	12,49	25,15	4,318365
Μέση τιμή	<b>5,15252</b>				<b>8,185999</b>

*Πίνακας 20 : Epibond, πάχος 2*

Κόλλα Συγκόλλησης : LMB

**Πάχος 1 (0,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.WET.III.1	3,9651	3965,1	12,25	24,97	6,48141
DLS.LMB.WET.III.2	3,6594	3659,4	12,3	25,14	5,917108
DLS.LMB.WET.III.4	1,588	1588	12,15	25,15	2,598401
Μέση τιμή	3,070833				2,999384

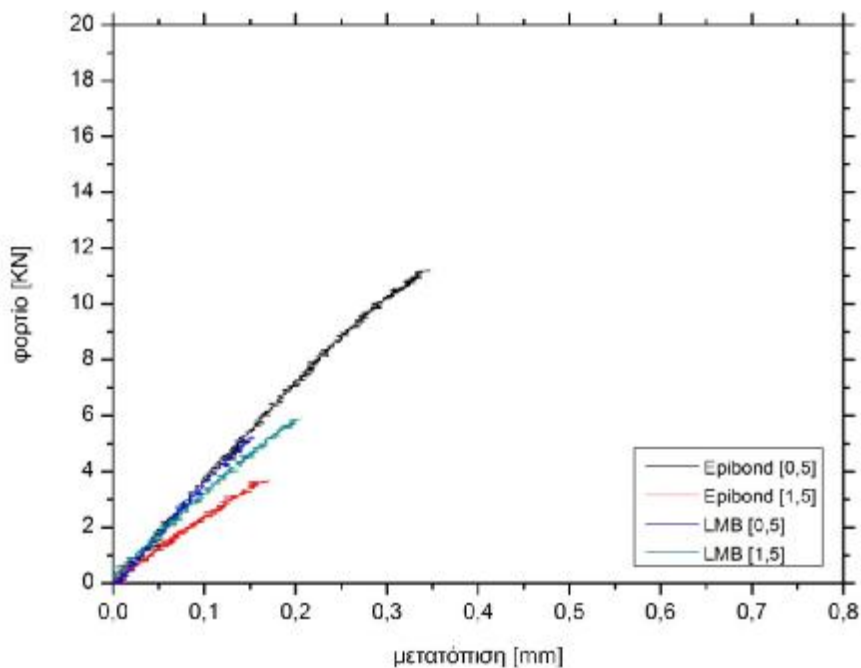
*Πίνακας 21 : LMB, πάχος 1*

**Πάχος 2 (1,5)**

coupon	F(KN)	F(N)	Loverlap(mm)	W(mm)	T(Mpa)
DLS.LMB.IV.1	4,2262	4226,2	12,11	25,13	6,94358
DLS.LMB.IV.2	2,3763	2376,3	11,99	25,14	3,941729
DLS.LMB.IV.3	6,88	6880	12,09	25,12	11,32694
DLS.LMB.IV.4	5,845	5845	12,06	25,09	9,65843
DLS.LMB.IV.5	9,3138	9313,8	12,35	25,13	15,00505
Μέση τιμή	5,72826				9,375146

*Πίνακας 22: LMB, πάχος 2*

Από τους παραπάνω πίνακες που υπολογίζεται η μέγιστη διατμητική τάση αλλά και από το ενδεικτικό διάγραμμα που ακολουθεί στη συνέχεια, εύκολα παρατηρούμε πως τα δοκίμια που ανήκουν στην κατηγορία αυτή παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από αυτά που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία και ακόμα μικρότερη από τα δοκίμια αναφοράς αφού οι διατμητικές τάσεις στις προηγούμενες κατηγορίες είναι σχεδόν οι διπλάσιες για κάθε περίπτωση κατ' αντιστοιχία. Παρόλα αυτά βλέπουμε πως το μικρό πάχος κόλλας υπερτερεί του μεγαλύτερου ακριβώς όπως συνέβη και στις προηγούμενες κατηγορίες δοκιμίων.



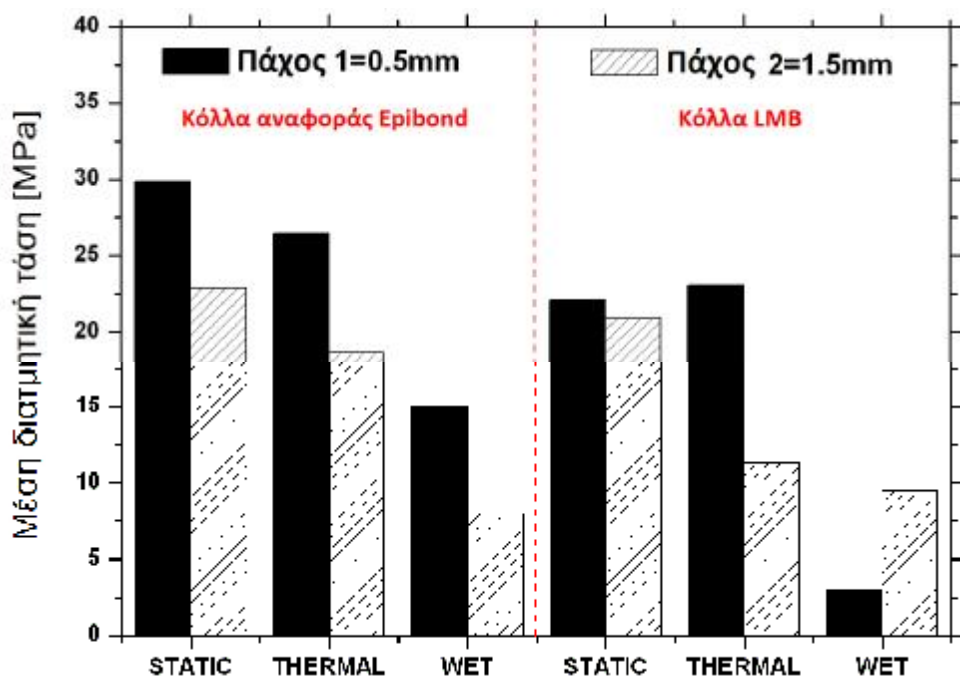
*Διάγραμμα 3 : Γραφική απεικόνιση φορτίου-μετατόπισης για κάθε κατηγορία κόλλας-πάχους*

Οι επιφάνειες θραύσης και ο τρόπος αστοχίας στην περιοχή επικάλυψης ακολουθούν παρόμοια μορφή και στις τρεις περιπτώσεις δοκιμίων όπως παρατηρούμε στην παρακάτω φωτογραφία. Κατά την αστοχία του δοκιμίου στη περιοχή επικάλυψης, η κόλλα αποκολλάται ομοιόμορφα και παρατηρείται ψαθυρή θραύση.



*Σχήμα 59: Επιφάνεια θραύσης μετά τη διαμητική αστοχία*

Συγκριτικό διάγραμμα για τα πειράματα εφελκυσμού στις τρεις κατηγορίες δοκιμίων



*Γράφημα 3 : Σύγκριση δοκιμίων για τις δοκιμές εφελκυσμού στις τρεις κατηγορίες δοκιμίων*

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τη μέση μέγιστη διατμητική τάση σε σχέση με τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες δοκιμίων που μελετήθηκαν πειραματικά. Εύκολα παρατηρούμε πως σε όσα δοκίμια το πάχος συγκόλλησης είναι 0,5 mm η διατμητική αστοχία επέρχεται σε μεγαλύτερες τάσεις απ' ότι στα δοκίμια που το πάχος συγκόλλησης είναι 1,5 mm. Η διαπίστωση αυτή όμως δεν επαληθεύεται για την κατηγορία δοκιμίων που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας και έχουν συγκολληθεί με κόλλα LMB, όπου στο πάχος 2(1,5 mm) βλέπουμε μεγαλύτερη αντοχή.

Άλλη μία παρατήρηση που μπορεί να επισημανθεί, είναι πως η κατηγορία των δοκιμίων αναφοράς είναι σε γενικές γραμμές ανώτερη από τις άλλες δύο κατηγορίες στις οποίες τα δοκίμια έχουν υποστεί κατεργασίες, σε ότι αφορά την κόλλα συγκόλλησης αλλά και το πάχος αυτής.

Δεν μπορούμε να παραλείψουμε χωρίς να σχολιάσουμε τη μεγάλη διαφορά στη διατμητική αντοχή που παρουσιάζουν τα δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας. Είναι έντονα εμφανές πως τα δοκίμια αναφοράς και τα θερμικά κατεργασμένα υπερτερούν σε μεγάλο βαθμό έναντι αυτών και η αστοχία τους επέρχεται μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

## **7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ**

Από τους πίνακες 11, 12, 13, 14 καθώς και από το διάγραμμα 1 στο οποίο απεικονίζονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για κάθε κατηγορία κόλλας-πάχους δοκιμίων που δεν έχουν υποστεί καμία επεξεργασία στην επιφάνειά τους παρατηρούμε πως η κατηγορία δοκιμίων που συγκολλήθηκε με την κόλλα αναφοράς Eribond 1590 σε πάχος 1 (0,5) παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή αφού τα φορτία κάτω από τα οποία αστοχούν τα δοκίμια της κατηγορίας αυτής είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στις υπόλοιπες κατηγορίες.

Στους πίνακες 15, 16, 17,18 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της μέγιστης διατμητικής τάσης σε δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατηγορία.

Όπως παρατηρούμε στην περίπτωση αυτή, η κατηγορία των δοκιμίων που το πάχος συγκόλλησης είναι πάχος 1 (0.5mm), παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τα αντίστοιχα με το πάχος συγκόλλησης 2 (1,5mm). Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε πως η μέση τιμή της μέγιστης διατμητικής τάσης στη περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκόλληση η κόλλα αναφοράς Eribond, για το πάχος 1 είναι 26,44866 MPa σε σχέση με το πάχος 2 που είναι 18,63099 MPa. Το ίδιο παρατηρείται και στην περίπτωση της κόλλας LMB, στην οποία τα δοκίμια που συγκολλήθηκαν με πάχος 1 παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από τα αντίστοιχα με πάχος 2.

Όπως διαφαίνεται από τα διαγράμματα 1 και 2, τα μη επιφανειακά επεξεργασμένα δοκίμια (static) παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κάτω από διατμητικά φορτία σε σχέση με τα θερμικά κατεργασμένα (thermal) στο σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Τα δοκίμια που έχουν συγκολληθεί με πάχος κόλλας 0,5mm είναι εμφανώς καλύτερα από τα αντίστοιχα συγκολλημένα με πάχος 1,5 mm, τόσο στην κατηγορία των μη επεξεργασμένων όσο και σε αυτή των θερμικά επεξεργασμένων δοκιμίων. Με λίγα λόγια το λεπτό στρώμα συγκόλλησης ενδείκνυται και στις δύο κατηγορίες.

Από τους πίνακες 19, 20, 21, 22 που υπολογίζεται η μέγιστη διατμητική τάση αλλά και από το ενδεικτικό διάγραμμα 3, εύκολα παρατηρούμε πως τα δοκίμια που ανήκουν στην κατηγορία αυτή παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από αυτά που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία και ακόμα μικρότερη από τα δοκίμια αναφοράς αφού οι διατμητικές τάσεις στις προηγούμενες κατηγορίες είναι σχεδόν οι διπλάσιες για κάθε περίπτωση κατ' αντιστοιχία. Παρόλα αυτά βλέπουμε πως το μικρό πάχος κόλλας υπερτερεί του μεγαλύτερου ακριβώς όπως συνέβη και στις προηγούμενες κατηγορίες δοκιμίων.

Στο γράφημα 3 απεικονίζεται η μέση μέγιστη διατμητική τάση σε σχέση με τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες δοκιμίων που μελετήθηκαν πειραματικά. Εύκολα παρατηρούμε πως σε όσα δοκίμια το πάχος συγκόλλησης είναι 0,5 mm η διατμητική αστοχία επέρχεται σε μεγαλύτερες τάσεις απ' ό τι στα δοκίμια που το πάχος συγκόλλησης είναι 1,5 mm. Η διαπίστωση αυτή όμως δεν επαληθεύεται για την κατηγορία δοκιμίων που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας και έχουν συγκολληθεί με κόλλα LMB, όπου στο πάχος 2(1,5 mm) βλέπουμε μεγαλύτερη αντοχή.

Η κατηγορία των δοκιμίων αναφοράς είναι σε γενικές γραμμές ανώτερη από τις άλλες δύο κατηγορίες στις οποίες τα δοκίμια έχουν υποστεί κατεργασίες, σε ότι αφορά την κόλλα συγκόλλησης αλλά και το πάχος αυτής.

Παρατηρούμε επίσης μεγάλη διαφορά στη διατμητική αντοχή που παρουσιάζουν τα δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας. Είναι έντονα εμφανές πως τα δοκίμια αναφοράς και τα θερμικά κατεργασμένα υπερτερούν σε μεγάλο βαθμό έναντι αυτών και η αστοχία τους επέρχεται μετά από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά - Δημήτρης Ι. Παντελής 2008
- [2] Τεχνολογία Πολυμερών Γιώργος Καραγιαννίδης 2009
- [3] [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1\\_Polimeri\\_Genika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polimeri_Genika.pdf)
- [4] <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/5-WELD.pdf>
- [5] [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)
- [6] [http://www.redstar.gr/Foto\\_red/Other/Compozit.html](http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html)
- [7] <http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/8%20MH%20METALLIKA%20YLIKAw.pdf>