



ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ»**



ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΑΝΔΡΕΟΠΟΥΛΟΣ ΜΙΑΤΙΑΔΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Α. ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. *Αλέξανδρο Καλαράκη* που μας έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσουμε τη πτυχιακή μας εργασία και την εμπιστοσύνη που μας έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης από την Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, τον Καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, *Βασίλη Κωστόπουλο* που μου έδωσε την ευκαιρία να κατασκευάσουμε τα δοκίμια στο Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής, καθώς και τον *Ιωάννη Δαμίγο* Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την πολύτιμη βοήθεια του στην κατασκευή των δοκιμίων. Επίσης από το Ινστιτούτο Επιστήμων Χημικής Μηχανικής και συγκεκριμένα στο εργαστήριο συνθετών και αναδομημένων υλικών, τον Καθηγητή του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών *Κωνσταντίνο Γαλιώτη* για την χρήση του εξοπλισμού του εργαστηρίου, τον *Πετρόπουλο Φαίδων*, Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Πατρών για την βοήθεια του στις μετρήσεις των δοκιμίων, καθώς και του Μεταδιδακτορικό Συνεργάτη, Δρ. *Παναγιώτη Παππά* χωρίς την συνεισφορά και τεχνογνωσία του οποίου δεν θα είχαν υλοποιηθεί οι πειραματικές μετρήσεις και η επεξεργασία των δοκιμίων. Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε και τον ΕΛΕ Β' του Ερευνητικού Ινστιτούτου Δρ. *Βασίλειο Δρακόπουλο* για την πολύτιμη καθοδήγηση του στις μετρήσεις του SEM.

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία διαπραγματεύθηκε η Παρασκευή και μελέτη σύνθετων πολύστρωτων υλικών πολυμερικής ρητίνης με ενίσχυση ινών άνθρακα και η απόκριση τους σε περιβαλλοντική γήρανση.

Αρχικά παρασκευάστηκαν δοκίμια διαφορετικών πλέξεων και έπειτα υπεβλήθησαν σε διαδικασία υποβάθμισης σε συνθήκες περιβαλλοντικής γήρανσης αντίστοιχης έκθεσης 30 μηνών.

Μετά έγινε χαρακτηρισμός των δοκιμίων κάθε πλέξης και υποβάθμισης με χρήση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, εστιάζοντας στην πρόσφυση των ινών με την ρητίνη, πριν και μετά την υποβάθμιση.

Τέλος, διεξήχθησαν πειράματα για την εξαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, για να εξακριβωθεί η προκληθείσα υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών και κυρίως του μέτρου ελαστικότητας.

Οι εργασίες χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: το θεωρητικό όπου περιγράφονται τα Σύνθετα Υλικά και οι εφαρμογές τους και το πειραματικό μέρος, όπου περιγράφεται η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Στο πειραματικό μέρος παρουσιάζονται και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, 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

Μίλτος Ανδρέοπουλος

Χρήστος Αλεξόπουλος

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
Περίληψη.....	iii
Κεφάλαιο 1	1
Σύνθετα υλικά.....	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών	2
1.3 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.....	3
1.3.1 Ίνες.....	4
1.3.2 Μήτρα	16
1.3.3 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών σύνθετων.....	19
1.4 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών.....	22
1.5 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών.....	25
1.5.1 Μηχανικές ιδιότητες	25
1.5.2 Ανάλυση φορτίου μετά από αστοχία.....	25
1.5.3 Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές ή ρωγμές.....	26
1.5.4 Μείωση του αριθμού των τμημάτων της κατασκευής.....	26
1.5.5 Αντίσταση σε διάβρωση	26
1.5.6 Απόσβεση ταλαντώσεων.....	27
1.5.7 Μείωση του βάρους της κατασκευής.....	27
1.5.8 Χαμηλό κόστος κατασκευής.....	27
1.6 Εφαρμογές χρήσης σύνθετων υλικών.....	27
1.6.1 Ναυπηγική.....	27
1.6.2 Κατασκευαστικός τομέας	28
1.6.3 Χερσαίες μεταφορές	28
1.6.4 Ηλεκτρικά είδη.....	28
1.6.5 Δεξαμενές	28
1.6.6 Βιομηχανία αθλητικών ειδών.....	29
1.6.7 Ιατρική	29
1.6.8 Αεροναυπηγική / αεροδιαστημική.....	29
1.7. Ελαστική συμπεριφορά ινωδών σύνθετων υλικών (3)	33
1.7.1 Εισαγωγή	33
1.7.2 Κύριο σύστημα συντεταγμένων.....	34
1.7.3 Ελαστικές ιδιότητες μιας στρώσης με παράλληλες ίνες.....	34
1.8 Εισαγωγή στη μηχανική πολύστρωτων πλακών (3).....	37
1.8.1 Εισαγωγή	37
1.8.2 Γενικευμένος Νόμος του Hooke	38
1.8.3 Υπολογισμός συντελεστών δυσκαμψίας στρώσης σύνθετου υλικού εκτός κύριου συστήματος.....	41
1.8.4 Κωδικοποίηση πολύστρωτων πλακών.....	42

Κεφάλαιο 2	48
Πειραματικό μέρος	48
2.1 Γενικά	48
2.2 Γήρανση σύνθετων υλικών	48
2.2.1 Φυσική Γήρανση.....	49
2.2.2 Χημική Γήρανση.....	49
2.2.3 Μηχανική Γήρανση.....	50
2.2.4 Περιβαλλοντική Γήρανση.....	50
2.3 Γήρανση σύνθετων υλικών σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών	50
2.4 Μηχανισμοί υποβάθμισης σύνθετων υλικών σε θερμοοξειδωτικό περιβάλλον	53
2.5 Μηχανισμοί υποβάθμισης σύνθετων υλικών σε υgroθερμικό περιβάλλον.....	55
2.6 Προετοιμασία δειγμάτων	58
2.7 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	66
2.8 Μέθοδος χαρακτηρισμού.....	73
2.9 Πειραματικά αποτελέσματα.....	74
2.10 Γενικά συμπεράσματα	79
2.11 Προτάσεις για μελλοντική εργασία	80
Βιβλιογραφία	81
Παράρτημα I: Πρότυπο ASTM	82

Κεφάλαιο 1

Σύνθετα υλικά

1.1 Γενικά

Για ένα σύστημα ο όρος "σύνθετο" σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως *σύνθετο υλικό* (compositematerial) (1).

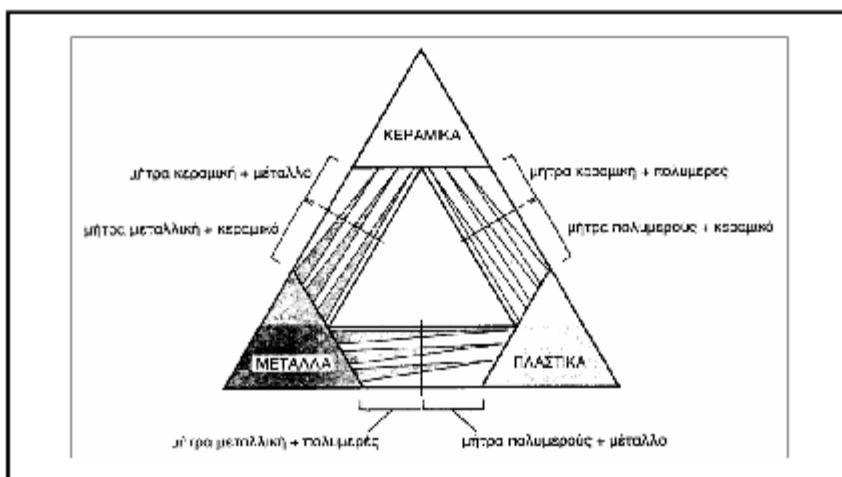
Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %) (1).

Ορισμός (Agarwal-1990): *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Στο Σχήμα1-1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 1-1 Κατηγορίες συνθέτων υλικών [1]

1.2 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων. 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 (2).

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.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 (1000 π.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 τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο 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 Beaeckeland (2).

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγηθείσα 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. (3) 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 10-14 πλαίσιο 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 (1).

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 καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

1.3 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες (1):

- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας. Σύμφωνα με την ταξινόμηση αυτή τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Η ιδιότητα αυτή οδηγεί άμεσα σε ταξινόμηση των πολυδιευθυντικών συνθέτων στις ακόλουθες υπο-ομάδες, βλ. Σχ. 1-2:

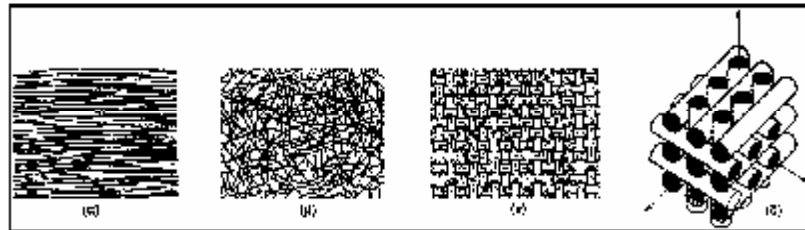
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.

Μία επιπλέον διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:

- *Συνεχείς ή μεγάλοι μήκους ίνες* (continuous fibers), όταν είναι $l/d > 100$.
- *Ασυνεχείς ή κοντές ίνες* (discontinuous fibers), όταν είναι $l/d < 100$.

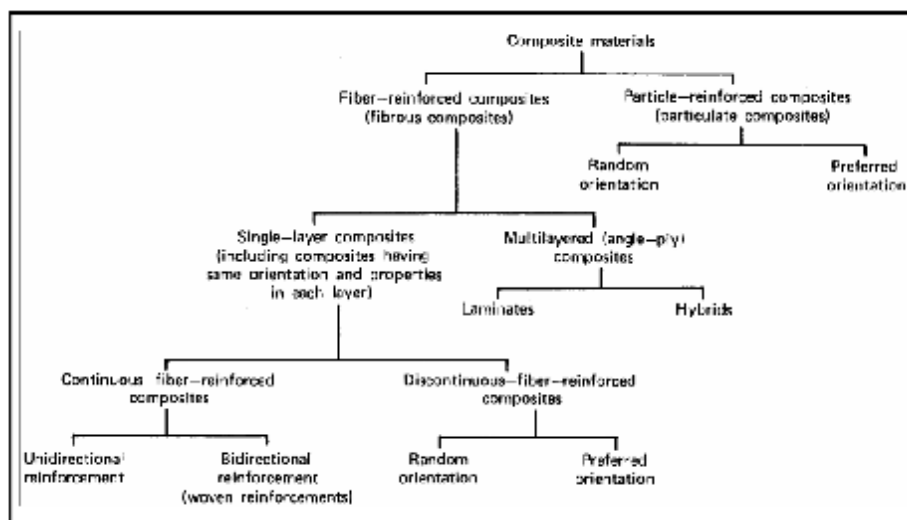
- *Νηματίδια* ή *τριχίτες* (whiskers): Με $d < 1\mu\text{m}$ και $l = 100\mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.



Σχήμα 1-2 Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη. [2]

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχ. 1-3.

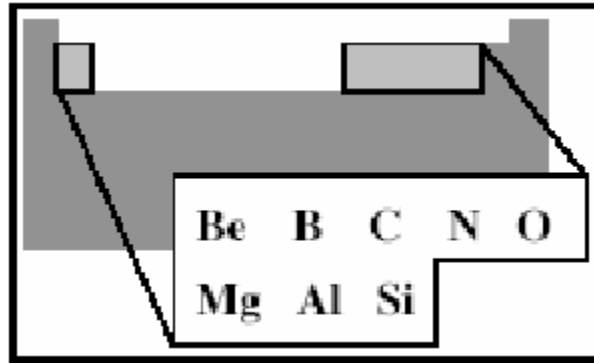


Σχήμα 1- 3 Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών [3]

1.3.1 Ίνες

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 2^η και 3^η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος (Σχ. 1-4) (4).



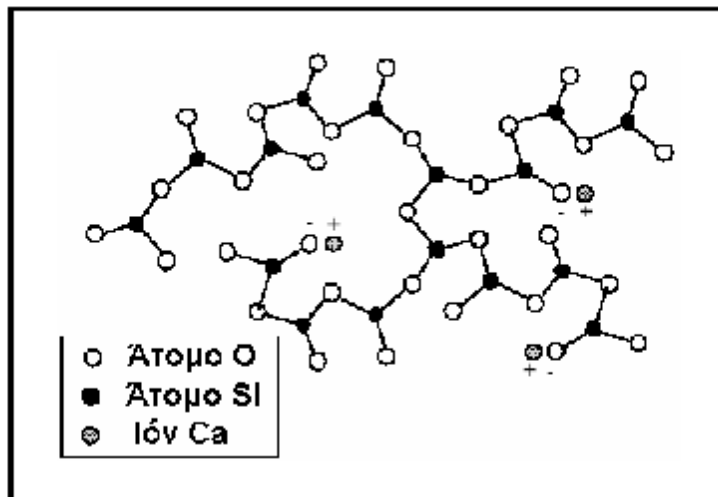
Σχήμα 1- 4 Κατανομή των στοιχείων βάση του περιοδικού πίνακα [4]

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

Ίνες Γυαλιού (GlassFibers)

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 οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά.

Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στο Σχ. 1-5. (1)



Σχήμα- 5 Δομή γυαλιού [1]

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 Πίν.1-1.

Πίνακας 1- 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού. (4)

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

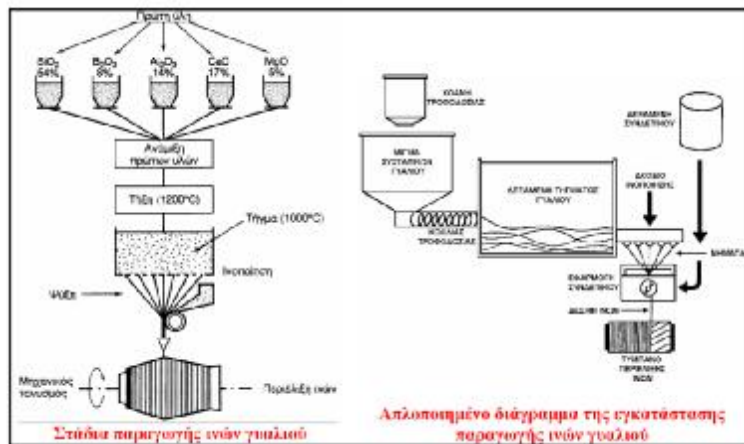
E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλλίτερες 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 SiO₂ (>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% καθαρή πυριτία.

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 εκτριβής (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 (4).

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (Σχ. 1-6) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις (4).



Σχήμα 1- 6 Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού [4]

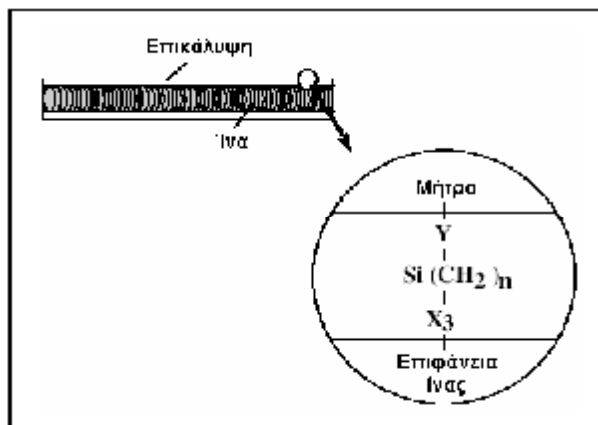
- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά 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 μάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλλίτερη 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).
- Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.

Παρατηρήσεις:

- 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 $> 340^{\circ}\text{C}$ 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 $X_3Si(CH_2)_nY$, όπου Y ομάδα συμβατή προς την πολυμερική μήτρα, X υδρολύσιμη ομάδα στο πυρίτιο και $n=0^3$, η δράση των οποίων περιγράφεται στο Σχ. 1-7. (3)



Σχήμα 1- 7 δράση οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$ [3]

- Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλοήματα 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.

Ινες Άνθρακα (Carbon Fibers)

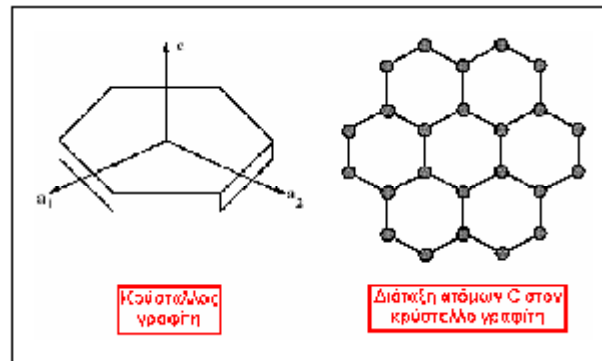
Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Γενικά, όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους, οι χρησιμοποιούμενες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

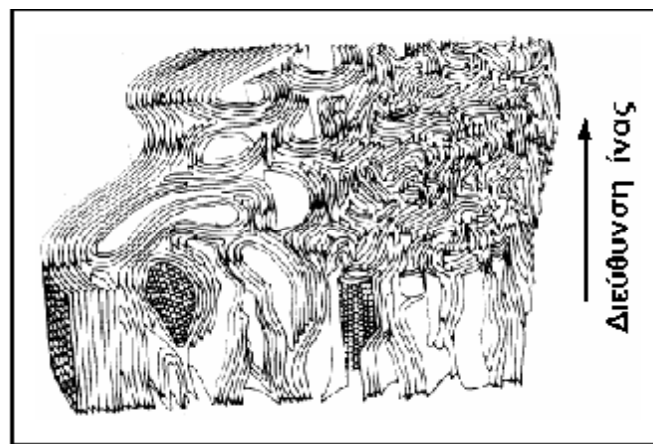
Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. (3)

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 γραφίτη δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. Σχ.1-8. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου VanderWaals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή

τηδιεύθυνση. Τυπική δομή ανθρακονήματος, όπως έχει ληφθεί από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, παρουσιάζεται στο Σχ.1-9 (4).



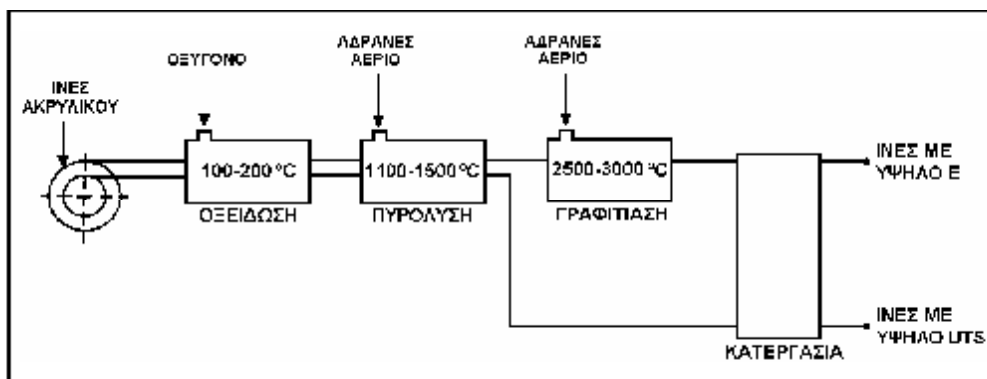
Σχήμα 1- 8 γραφιτικές δομές [4]



Σχήμα 1- 9 Δομή ανθρακονήματος [4]

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μετάξας (rayon) και πίσσα.

Η παραγωγή ινών γραφίτη από ίνες (PAN) πραγματοποιείται σε τρία στάδια (Σχ. 1-10) (3):



Σχήμα 1- 10 Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα [3]

- 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 ανακρυστάλλωση, 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 διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm.
- Στον Πίν. 1-2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ινών άνθρακα που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (οξειδωση και πυρόλυση) και σε τρία στάδια (οξειδωση, πυρόλυση, θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία), αντίστοιχα.

Πίνακας 1- 2 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα (4).

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 ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Παρατηρήσεις:

- 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 γραφιτίασης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτίασης 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.

Ίνες Πολυμερούς (PolymerFibers)

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:

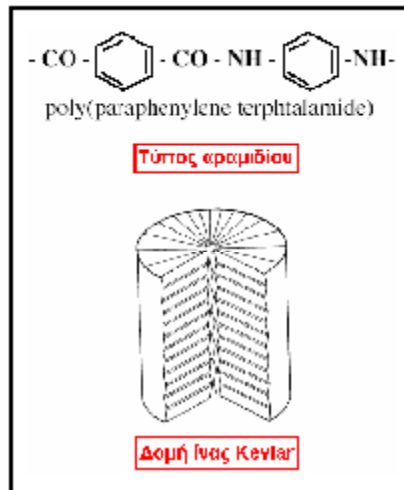
- Kevlar-29: Με μέτρο ελαστικότητας 60 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-49: Με μέτρο ελαστικότητας 120 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa.
- Kevlar-149: Με μέτρο ελαστικότητας 180 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa.

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Στον Πίν.1-3 παρατίθενται οι βασικές ιδιότητες των ινών Kevlar.

Πίνακας 1- 3Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar 29 και Kevlar 49

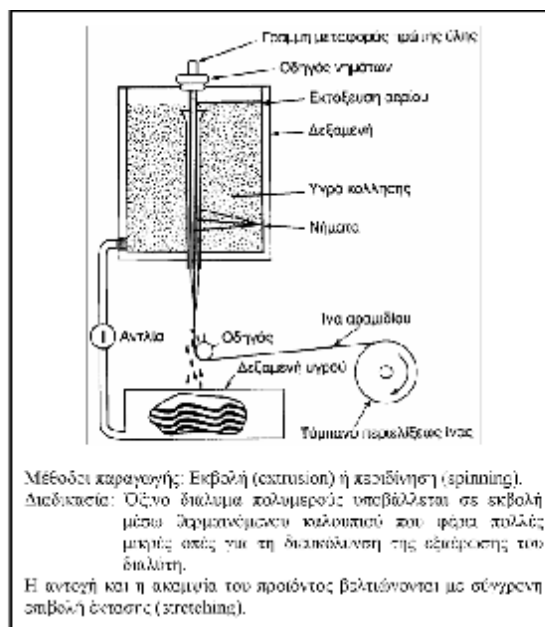
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm^3)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης CC)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας CC)	400	425

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. Σχ. 1-11. 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 (kinkbands).



Σχήμα 1- 11 δομή ινών Kevlar [3]

Στο Σχ. 1-12 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου.



Σχήμα 1- 12 Διάταξη παραγωγής ινών πολυαμιδίου [3]

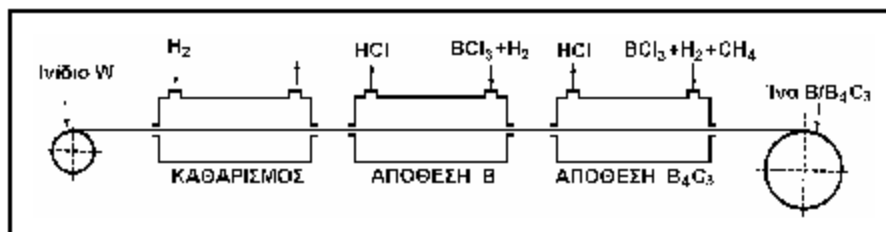
Μεταλλικές Ίνες

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.

Σήμερα χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές για την παραγωγή ινών βορίου:

Ø Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου

Αλογονίδιο του βορίου (συνήθως BCl_3) ανάγεται από υδρογόνο σε έναν κλειστό θάλαμο υψηλής θερμοκρασίας (1100°C) και αποτίθεται σε πολύ λεπτό νήμα βολφραμίου, διαμέτρου 10-15 μm , όπως φαίνεται στο Σχ. 1-13. Η διάμετρος των παραγόμενων ινών με αυτήν την τεχνική κυμαίνεται μεταξύ 100-200 μm , ενώ οι ίνες παρουσιάζουν εξαιρετική δυσκαμψία και μηχανική αντοχή.



Σχήμα 1- 13 Παραγωγή ινών βορίου με αναγωγή αλογονιδίου του βορίου [3]

Ø Απόθεση με τεχνική CVD

Ø

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 ($E = 300-420 \text{ GPa}$, $\text{UTS} = 3000-3700 \text{ MPa}$), 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.

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 αλούμινας (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.

Μέθοδοι Παραγωγής

(α) Με χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα. Οι παραγόμενες ίνες έχουν πυρήνα διαμέτρου 10÷25 μm και εξωτερική διάμετρο 100÷150 μm .

(β) Από πολυμερικές ίνες (Nicalon).

Θέρμανση σε κενό σε θερμοκρασία 850⁰C μετατρέπει την πολυμερική ίνα σε ανόργανο SiC, ενώ θέρμανση σε υψηλότερη θερμοκρασία (>1000⁰C) προκαλεί κρυστάλλωση σε β-SiC. Οι παραγόμενες ίνες έχουν διάμετρο 10-15 μm.

(γ) Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού. Ο φλοιός του ρυζιού περιέχει ~15% κ.β. SO₂. Θέρμανση σε θερμοκρασία 700-900 °C οδηγεί σε υπόλειμμα SO₂ και ελεύθερο άνθρακα. Θέρμανση του υπολείμματος σε θερμοκρασία ~1500 °C και σε περιβάλλον αζώτου ή αμμωνίας οδηγεί στο σχηματισμό SiC. Οι παραγόμενοι τριχίτες έχουν διάμετρο —0.1÷1 μm και μήκος ~50 μm.

Συγκριτικός πίνακας των ιδιοτήτων των ινών που παράγονται από κάθε μέθοδο παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Πίν. 1-4). Γενικά, οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

Πίνακας 1- 4 Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)

Μέθοδος	CVD	Nicalon	Τριχίτες
Ιδιότητα			
Πυκνότητα , ρ (g/cm)	3.3	2.6	-
Αντοχή, UTS (MPa)	3500	2000	7000
Μέτρο ελαστικότητας, E (GPa)	430	180	480
Διάμετρος ίνας, d (μm)	140	15	<1

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400⁰C ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900⁰C λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή.

Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας (Al₂O₃) διαμέτρου 250 μm έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800⁰C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

Τριχίτες (Whiskers)

Οι τριχίτες 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 1μm, 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, βηρυλλία και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιδίων σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη. Στον Πίνακα 1-5 γίνεται σύγκριση των ιδιοτήτων ινών και τριχιδίων από SiC και Al₂O₃.

Πίνακας 1- 5 Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιδών από SiC και Al₂O₃

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC ₁ NA	SiC ₂ ΤΡΙΧΙΤΗΣ	Al ₂ O ₃ 1NA	Al ₂ O ₃ ΤΡΙΧΙΤΗΣ
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm ³)	3.2	3.2	4	4
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης °C	900	1600	800	1300

Ίνες Φυσικών Ορυκτών

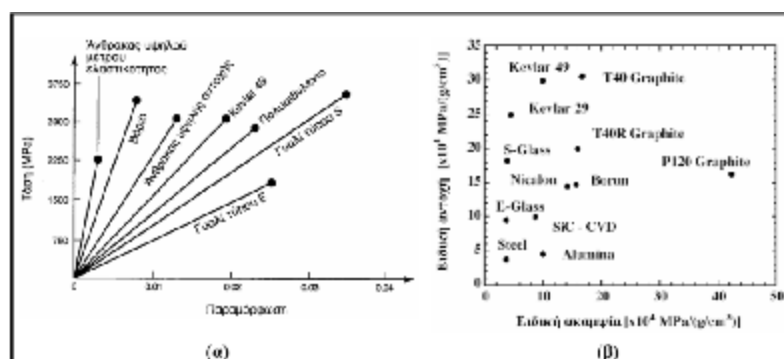
Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία (mica).

Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου —20 μm, και έχουν διάμετρο —10 μm 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 160 GPa, ενώ η μηχανική αντοχή μπορεί να φτάσει μέχρι 5500 GPa. Ο αμιάντος 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 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700-900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm³.

Σύγκριση ενισχυτικών ινών

(α) Ως προς την ειδική αντοχή και ειδική ακαμψία (Σχ. 1-14)



Σχήμα 1- 14 (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες σ-ε, (β) Συσχετισμός ειδική αντοχής και ειδικής ακαμψίας για διάφορα υλικά ενισχυτικών ινών (Πίν. 1-6)

Πίνακας 1- 6 Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών

Ίνα	T _{max} (°C)
Spectra	150
Kevlar	250
Glass	800
SiC	1000
Alumina	1370
Carbon	2000*

* Παρουσία οξυγόνου: T_{πεIX}=500 °C

(γ) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης (Πίν. 1-7)

Πίνακας 1- 7 Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

1.3.2 Μήτρα

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.

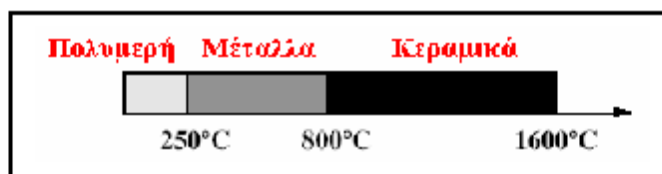
Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

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.
- 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 Σχ. 1-15.



Σχήμα 1- 15 Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών

Τα αντιστοιχισμένα υλικά χαρακτηρίζονται με τις ακόλουθες συντημήσεις: **PMC:** Polymer Matrix Composite
MMC: Metal Matrix Composite
CMC: Ceramic Matrix Composite

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 Vander 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 πολυστερενίου (PS).

Ως ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, 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 τριδιάστατη 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, καλλίτερες 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.

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 (~300⁰C) ενώ οι ανθρακούχες μήτρες οξειδώνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 500⁰C

Σε σχέση με τις οργανικές μήτρες, οι μεταλλικές παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, τα σπουδαιότερα των οποίων φαίνονται στον Πίν. 1-8.

Πίνακας 1- 8 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των οργανικών μητρών).

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none">• Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλλίτερες μηχανικές ιδιότητες.• Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων του συνθέτου σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διευθύνσεις διαφορετικές από αυτές του προσανατολισμού των ινών.• Βελτίωση της ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του συνθέτου.• Μείωση της ευαισθησίας του συνθέτου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του συνθέτου.• Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του συνθέτου για ειδικές εφαρμογές.• Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του συνθέτου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	<ul style="list-style-type: none">• Δημιουργία εύθραυστων μέσο μεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.• Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος της συνολικής κατασκευής.• Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. διάλυση ινών SiO₂ σε μήτρα Al).• Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού των συνθέτων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.• Δύσκολη παραγωγή συνθέτου υλικού και μεγαλύτερο κόστος.

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 θερμοκούς 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.

1.3.3 Επιλογή ινών και μήτρας στην κατασκευή ινωδών 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.

Γεωμετρία ινών

Βασική παράμετρος είναι ο *συντελεστής σχήματος* της ίνας (s) (aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (l) προς την ακτίνα στις 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 (l_c), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση (κρίσιμου μήκους ασυνεχούς ίνας)

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i} \quad (\text{εξ 1.3.1})$$

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

Ποσοστό ινών

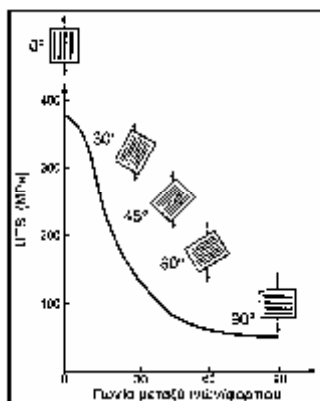
Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με αύξηση της κατ' όγκο αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

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

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 Σχ. 1-16 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 1- 16 Επίδραση του προσανατολισμού των ινών στην αντοχή σε εφελκυσμό συνθέτου υλικού εποξειδικής μήτρας με ίνες E-γυαλιού.

Συνήθως, όμως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.

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 συνθέτου.

Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pullout) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του συνθέτου, 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.

Τελική επιλογή υλικών

Στους Πίν. 1-9 έως 1-11 δίνονται παραδείγματα των συνηθέστερων συνθέτων υλικών οργανικής, μεταλλικής και κεραμικής μήτρας με ενίσχυση διαφόρων τύπων ινών και οι εφαρμογές τους στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Πίνακας 1- 9Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών οργανικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Εποξειδική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπαστούνια 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 1- 10Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών μεταλλικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Al	Borsic	Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.
	AbOs	Έμβολα μηχανών Diesel.
	SiC	Πτερύγια εκτόξευσης βλημάτων.
	Γραφίτη	Ιστοί κεραίων τηλεσκοπίου Hubble.
Κραμάτων Cu	SiC	Υψηλής αντοχής προπέλες σκαφών.
Κράματα Ti και W	SiC& B4N	Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων.

Πίνακας 1- 11Χαρακτηριστικά παραδείγματα συνθέτων υλικών κεραμικής μήτρας

ΜΗΤΡΑ	ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Άνθρακα	Άνθρακα	Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (επιτρεπτή η λειτουργία ως τους 3000 Δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα)
AbOs, SiC, ZrO2, Si ₃ N ₄ και κεραμικά γυαλιά	AbOs& SiC	Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, συστήματα θερμομόνωσης.

1.4 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 συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες: Α. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

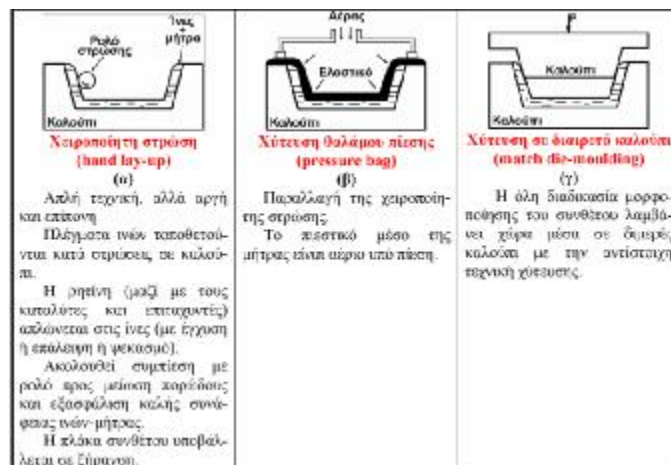
A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ. 1-17)

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
 - Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
 - Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)
- A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ. 1-18 έως 1-20)
- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
 - Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
 - Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας (Σχ. 1-21)

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

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

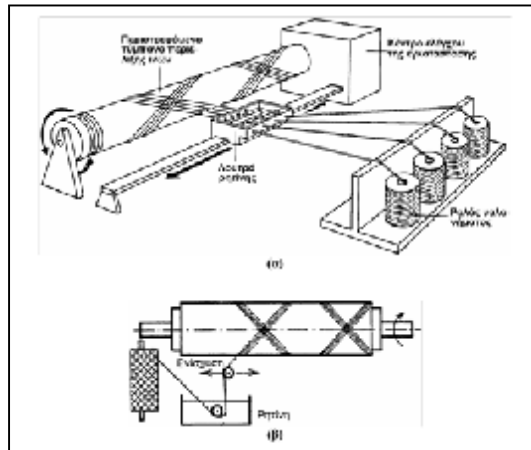


Σχήμα 1- 17 Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

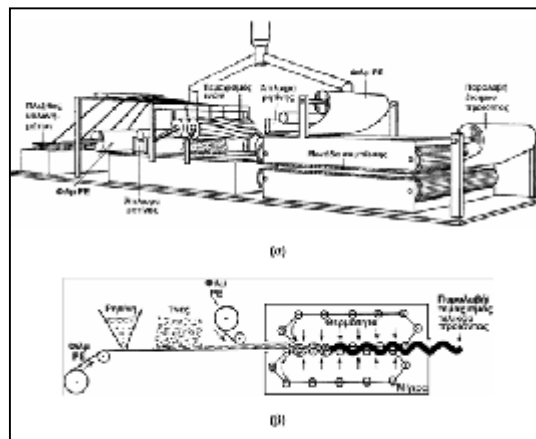
Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

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

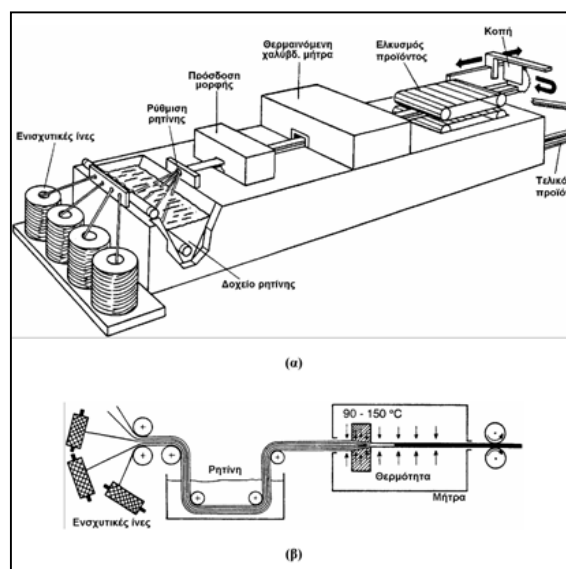
Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



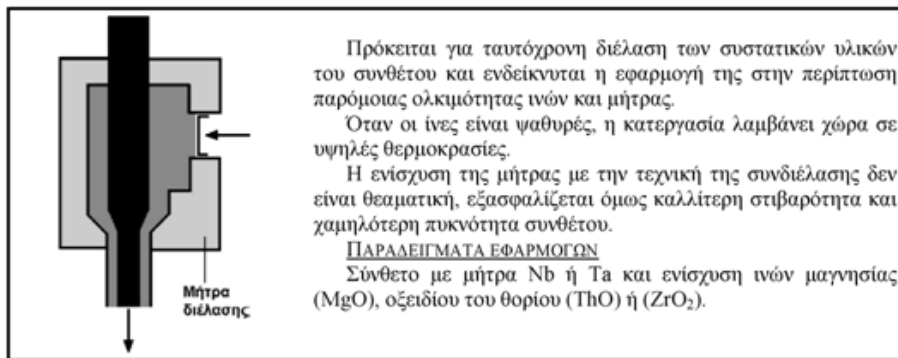
Σχήμα 1- 18 Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding)
 (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



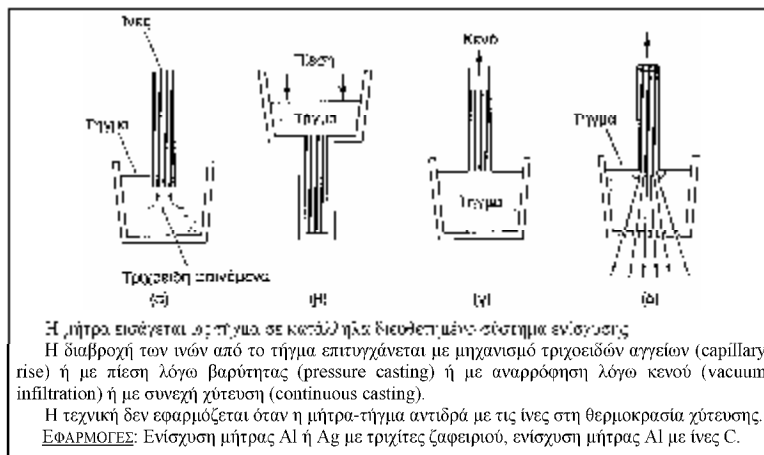
Σχήμα 1- 19 Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
 (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



Σχήμα 1- 20 Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



Σχήμα 1- 21 Συνδιέλαση (co-extrusion)



Σχήμα 1- 22 Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση.



Σχήμα 1- 23 Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

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

Παραδείγματα Εφαρμογών

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 (τρισεδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισεδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

1.5 Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι εκτός από ότι διατηρούν τις ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν, επιπλέον εμφανίζουν και ιδιότητες που κανένα από τα αρχικά υλικά δεν διαθέτει. Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικότερα τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών ως κατασκευαστικών στοιχείων:

1.5.1 Μηχανικές ιδιότητες

Το κυριότερο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι οι βελτιωμένες μηχανικές τους ιδιότητες. Πολλοί τύποι ινών, που από τη φύση τους έχουν σημαντική αντοχή και δυσκαμψία, εντάσσονται στην κατηγορία των προηγμένων ινών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ίνες βορίου (boron, συμβ. B) και γραφίτη (graphite) με τη μορφή πολύ λεπτών νημάτων (filaments) με το βόριο να υπερισχύει του γραφίτη στη διαστρωματική διατμητική αντοχή (interlaminars hear strength) και στην αντοχή σε θλίψη (compressive strength) ιδιαίτερα σε διεύθυνση κάθετη των ινών, ενώ επιτυγχάνει ισχυρότερο δεσμό (bonding) στη διεπιφάνεια (interface) μεταξύ μήτρας και ίνας. Το λεπτό νήμα του βορίου (boron filament) έχει έως έξι φορές μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από το αλουμίνιο και αποτελεί υλικό κατασκευής σύνθετων υλικών που χρησιμοποιείται ευρύτατα σε αεροναυπηγικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές.

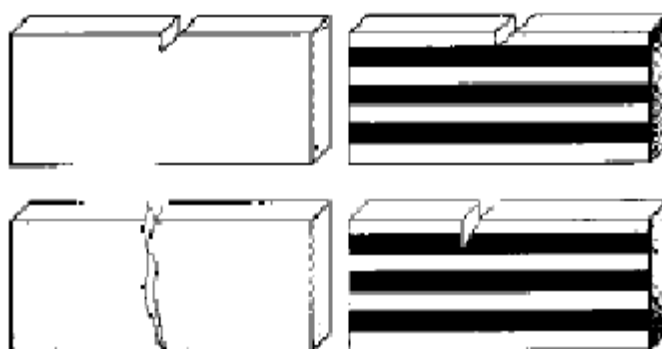
Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το βηρύλλιο (beryllium, συμβ. Be) το οποίο έχει έξι φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία (stiffness) από το αλουμίνιο αλλά λόγω της μικρής αντοχής και της ψαθυρής συμπεριφοράς χρησιμοποιείται μόνο σε κατασκευές όπου αναζητείται υψηλή δυσκαμψία. Αντίθετα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού μίας διευθύνσεως (unidirection alfiber glass) έχουν τέσσερις φορές μεγαλύτερη αντοχή από το αλουμίνιο, αλλά μικρή δυσκαμψία.

1.5.2 Ανάλυση φορτίου μετά από αστοχία

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι τα μεγάλα φορτία που είναι σε θέση να συνεχίσουν να αναλαμβάνουν, μετά από κάποια πιθανή αστοχία τους. Έχει παρατηρηθεί στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP), μετά τη διαρροή τους να εξακολουθούν να αναλαμβάνουν φορτία που φθάνουν μέχρι και το 85% της τάσης αστοχίας τους, ή ακόμα και έως 150% του ορίου διαρροής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αστοχία του υλικού συμβαίνει εσωτερική θραύση των ινών και στη συνέχεια η τάση μεταβιβάζεται σε πολλαπλές κατευθύνσεις μέσα στη μάζα του υλικού.

1.5.3 Μικρή ευαισθησία σε εγκοπές ή ρωγμές

Τα ινώδη σύνθετα υλικά εμφανίζουν μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγκοπών και περιορισμένη διάδοση των αρχικών ρωγμών, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής σε σχέση με αυτήν των μεταλλικών κατασκευών και βελτιώνοντας την αντοχή του υλικού σε κόπωση (fatigue). Οποιαδήποτε επιφανειακή ατέλεια σε ένα ομογενές υλικό που δοκιμάζεται σε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου, μπορεί να γίνει η αιτία έναρξης μίας καταστροφικής ρωγμής. Αντίθετα, μία επιφανειακή ανωμαλία σε ένα σύνθετο διαφασικό, μπορεί να γίνει αιτία έναρξης μίας ρωγμής, που όμως δε θα διαδοθεί καταστροφικά.



Σχήμα 1- 24 Διάδοση μίας ρωγμής σε ένα ομογενές (αριστερά) και διαφασικό σύνθετο υλικό (δεξιά) (2)

Ακόμη στα σύνθετα υλικά, σε περίπτωση διάτρησης λόγω ισχυρής κρούσης, η συγκέντρωση των τάσεων στα ινώδη υλικά είναι σχετικά μικρή και στην περιοχή της διάτρησης δεν παρουσιάζονται φαινόμενα διάδοσης ρωγμών.

1.5.4 Μείωση του αριθμού των τμημάτων της κατασκευής

Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης ινωδών σύνθετων υλικών, είναι η μείωση του αριθμού των τμημάτων μίας κατασκευής. Αυτό συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος παραγωγής και συντήρησης και παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία, πολύ σημαντικό στοιχείο σε κρίσιμες εφαρμογές όπως η αεροναυπηγική.

1.5.5 Αντίσταση σε διάβρωση

Όλες οι μεταλλικές κατασκευές με τη χρήση υποφέρουν από μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό διάβρωσης. Αντίθετα, στα ενισχυμένα σύνθετα πλαστικά δεν παρατηρούνται

φαινόμενα ηλεκτροχημικής διάβρωσης, με εξαίρεση την υποβάθμισή τους λόγω προσβολής σε ηλιακή ακτινοβολία, που μπορεί να ελεγχθεί όμως με κατάλληλη προστασία του υλικού.

1.5.6 Απόσβεση ταλαντώσεων

Τα σύνθετα υλικά και ειδικά τα τύπου sandwich, επιτυγχάνουν μεγάλη απορρόφηση ενέργειας (damping), με αποτέλεσμα να αποσβαίνουν σύντομα μηχανικές ταλαντώσεις. Για τον ίδιο λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά.

1.5.7 Μείωση του βάρους της κατασκευής

Λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων των ινωδών σύνθετων υλικών, μπορούν να κατασκευαστούν υλικά με πολύ μικρότερο βάρος σε σχέση με τη χρήση παραδοσιακών υλικών, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση του βάρους μίας κατασκευής. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής.

1.5.8 Χαμηλό κόστος κατασκευής

Το κόστος μίας κατασκευής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το κόστος υλικού, η μέθοδος κατασκευής, η διαδικασία κατασκευής, η εμπειρία κτλ. Επιπλέον πρέπει να ληφθούν υπόψη τα απόβλητα που παράγονται δηλαδή το υλικό που αφαιρείται κατά την κατεργασία για τη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος. Οι δοκοί και γενικότερα πολλά στοιχεία πλαισίων, διαμορφώνονται με μεγάλες οπές για να επιτυγχάνουν μείωση βάρους. Κατά την παραγωγή από συμβατικά υλικά, τα απόβλητα που παράγονται μπορούν να φτάσουν μέχρι και το 60% κατά βάρος, ενώ είναι σημαντικά μειωμένη στην περίπτωση χρήσης σύνθετων υλικών. Με βάση λοιπόν όλα τα παραπάνω, τα ινώδη σύνθετα υλικά έχουν αποδειχθεί σε πολλές περιπτώσεις φθηνότερα των παραδοσιακών, αφού απαιτούνται συνολικά μικρότερα ποσά ενέργειας για την παραγωγή τους.

1.6 Εφαρμογές χρήσης σύνθετων υλικών

1.6.1 Ναυπηγική

Στον τομέα της ναυπηγικής τα σύνθετα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (glass reinforcement plastics, GRP), έχουν αντικαταστήσει σχεδόν τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η χαμηλή πυκνότητα, η αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής τμημάτων με χύτευση σε καλούπια. Τα υλικά GPR, λόγω του μη μαγνητικού τους χαρακτήρα, χρησιμοποιήθηκαν ακόμη για την κατασκευή ναρκαλιευτικών. Η Μεγάλη Βρετανία

τα χρησιμοποίησε το 1972 για την κατασκευή του ναρκαλιευτικού HMS Wilton μήκους 46m (2).

Σύνθετα υλικά τύπου sandwich χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σκαφών αναψυχής, με αποτέλεσμα μείωση του βάρους τους, αύξηση της ταχύτητάς τους και βελτίωση της συμπεριφοράς τους.

1.6.2 Κατασκευαστικός τομέας

Το μικρό βάρος των σύνθετων υλικών και η αντοχή τους σε διάβρωση, σε συνδυασμό με την δυνατότητα κατασκευής με χύτευση διαφόρων επιφανειών και σχημάτων, οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών σε οικοδομικές κατασκευές. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ευρέως ως ένα δομικό υλικό κατασκευών, είναι σύνθετο υλικό που αποτελείται από ένα μείγμα μεγάλων κόκκων που συγκρατούνται με τη βοήθεια κάποιου συγκολλητικού μέσου στο οποίο και η μήτρα και οι διεσπαρμένες φάσεις είναι κεραμικά υλικά.

Επίσης σύνθετα υλικά GRP στη μορφή επίπεδων ή καμπύλων ημιδιαφανών επιφανειών, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ορόφων ή θόλων σε μεγάλα οικοδομικά συγκροτήματα όπως είναι τα στάδια. Λόγω του μικρού βάρους των σύνθετων υλικών, η κατασκευή οροφών έχει σαν αποτέλεσμα οικονομία στον σχεδιασμό και τη κατασκευή των στοιχείων υποστήριξης των οροφών.

1.6.3 Χερσαίες μεταφορές

Σύνθετα υλικά CFRP σε συνδυασμό με κατασκευές τύπου sandwich στη μορφή ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία για την κατασκευή αμαξωμάτων κυρίως αγωνιστικών, την κατασκευή καμπινών στα φορτηγά, προφυλακτήρων και πολλών άλλων εξαρτημάτων. Επίσης χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αμαξωμάτων αμαξοστοιχιών στους σιδηροδρόμους. Μεγάλη είναι και η εφαρμογή τους σε στρατιωτικά οχήματα, όπου τα αμαξώματα πρέπει να είναι σχεδιασμένα να αντέχουν σε κρούσεις μεγάλης ενέργειας. Το στρατιωτικό όχημα Hummer, είναι κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά .

1.6.4 Ηλεκτρικά είδη

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές ιδιαίτερα εκεί που απαιτείται ηλεκτρική μόνωση, όπως ηλεκτρικοί διακόπτες, ηλεκτρικοί διανομείς, υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα. Ο πιο συνηθισμένος τύπος που χρησιμοποιείται είναι ίνες γυαλιού σε πλαστική μήτρα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος ηλεκτρικά μονωμένα.

1.6.5 Δεξαμενές

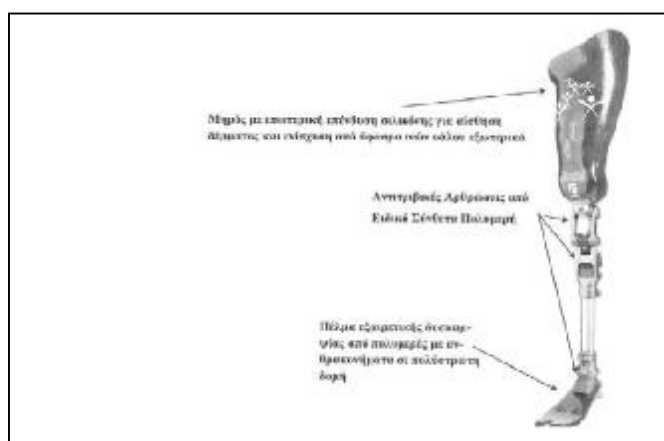
Τα σύνθετα υλικά, κυρίως τα GRP λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους και της αντίστασης σε διάβρωση, χρησιμοποιούνται στην κατασκευή δεξαμενών, αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών ουσιών, σωλήνων για μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενών καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για παραγωγή χημικών ουσιών.

1.6.6 Βιομηχανία αθλητικών ειδών

Η χρήση των σύνθετων υλικών σήμερα επεκτάθηκε στην κατασκευή αθλητικών ειδών όπως είναι πέδιλα σκι, μαστούνια golf, ρακέτες τένις, καλάμια ψαρέματος, πλαίσια ποδηλάτων κτλ.

1.6.7 Ιατρική

Στην προσπάθειά επίλυσης του προβλήματος εξεύρεσης φυσικών μοσχευμάτων, πολλοί επιστήμονες στράφηκαν προς την κατασκευή νέων, μη τοξικών υλικών, που θα είναι κατάλληλα να αντικαταστήσουν τα φυσικά όργανα και ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Η ανάπτυξη των συνθέτων υλικών έδωσε λύσεις στην αναζήτηση αυτήν, με αποτέλεσμα σήμερα να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τεχνητής καρδιάς, τεχνητών βαλβίδων, τεχνητών μελών του σώματος, τεχνητού δέρματος με σκοπό την αντικατάσταση σε περιπτώσεις εγκαυμάτων τρίτου βαθμού. Στην οδοντιατρική, σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται στον τομέα των εμφράξεων και των εμφυτευμάτων.



Σχήμα 1- 25 Τεχνητό μέλος προσθετικής από σύνθετα υλικά (2)

1.6.8 Αεροναυπηγική / αεροδιαστημική

Οι πρώτες χρήσεις των σύγχρονων σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική ήταν πριν από περίπου 30 χρόνια, όταν χρησιμοποιήθηκαν σύνθετα υλικά με ίνες βορίου στο κέλυφος της ουράς των μαχητικών F14 και F15. Ο κύριος λόγος αντικατάστασης του αλουμινίου από προηγμένα σύνθετα υλικά ήταν κυρίως η μείωση του βάρους της κατασκευής. Αρχικά τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο ως δευτερεύουσα

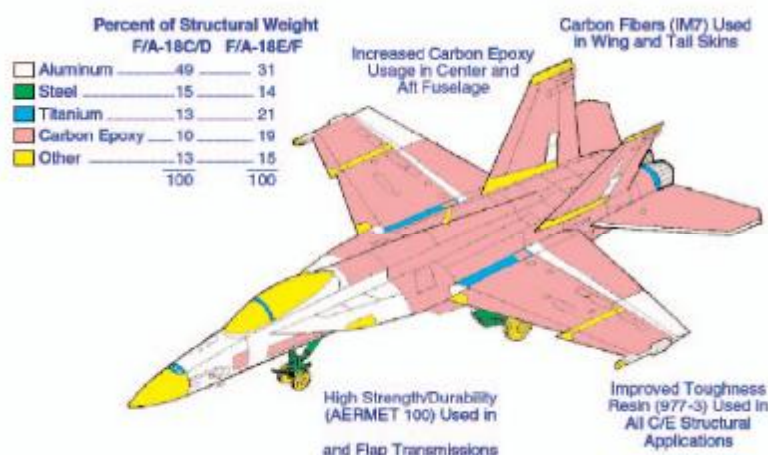
δομή, αλλά καθώς η γνώση και η ανάπτυξη των υλικών βελτιωνόταν, αυξήθηκε η χρήση τους σε κύριες τμήματα του αεροσκάφους όπως τα φτερά και η άτρακτος. Η αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία απορροφάει σήμερα το 75% της συνολικής κατανάλωσης σε προηγμένα υλικά. Ο Πίν. 1-12 παρουσιάζει μερικά από τα αεροσκάφη στα οποία τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ως βασικές δομές στην αεροκατασκευή.

Πίνακας 1- 12 Τύποι αεροσκαφών που χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά (5)

Κατηγορία αεροσκάφους	Χώρα κατασκευής	Τύποι αεροσκαφών
Μαχητικά	ΗΠΑ.	AV-8B, F16, F14, F18, YF23, F22, JSF, UCAV
	Ευρώπη	Harrier GR7, Gripen JAS39, Mirage 2000, Rafael, Eurofighter, Lavi, EADS Mako
	Ρωσία	MIG29, Su Series
Βομβαρδιστικά	ΗΠΑ	B2
Πολιτικά	ΗΠΑ	KC135, C17, 777, 767, MD1 1
	Ευρώπη	A320, A340, A380, Tu204. ATR42, Falcon 900, A300-600
Αεροπλοΐα		Piaggio, Starship, Premier 1
Ελικόπτερα		V22, Eurocopter, Comanche, RAH66, BA609, EH101, Super Lynx 300, S92

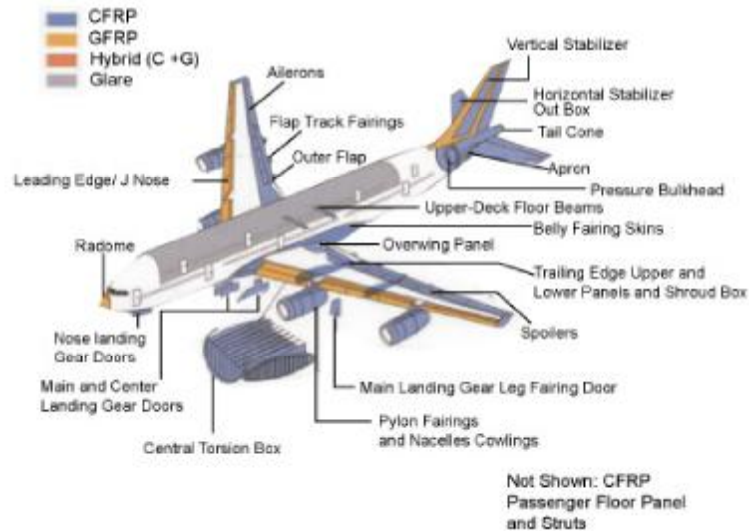
Αρχικά, το ποσοστό βάρους των σύνθετων υλικών ήταν πολύ μικρό, για παράδειγμα περίπου 2% στα F15. Ωστόσο το ποσοστό αυτό αυξήθηκε σημαντικά στο 19% στα F18, και στο 24% στα F22. Το αεροσκάφος καθέτου απογειώσεως AV-8B HarrierGR7 έχει τμήματα πτερυγίων κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά ενώ στο βελτιωμένο GR7A η άτρακτος εξαγωγής (rear fuselage) αποτελείται επίσης από σύνθετα υλικά. Σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στο Eurofighter, στα πτερύγια (wingskins), στην άτρακτο (fuselage), στα χείλη προσβολής (flaperons) και στο πηδάλιο διευσθύνσεως (rudder). Συνολικά περίπου το 40% του βάρους της δομικής κατασκευής του Eurofighter αποτελείται από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα. Άλλα Ευρωπαϊκά μαχητικά έχουν μικρότερα ποσοστά: Το Rafael της εταιρείας Dassault αποτελείται από 26% κατά βάρος από σύνθετα υλικά, ενώ το Gripen της Saab γύρω στο 20-25%. (5)

Το Σχ. 1-26 παρουσιάζει την κατανομή των υλικών που αποτελείται το αεροσκάφος F18E/F. (6) Παρατηρείται η εκτεταμένη χρήση σύνθετων υλικών σε πολλά τμήματα του αεροσκάφους.



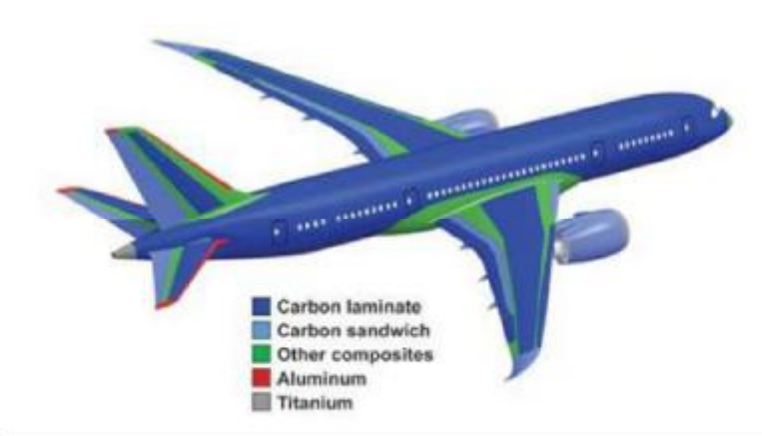
Σχήμα 1- 26 Κατανομή υλικών που αποτελείται το αεροσκάφος F18E/F (6)

Η χρήση σύνθετων υλικών στην πολιτική αεροπορία είναι ιδιαίτερα ελκυστική, λόγω του ότι επιφέρει μειωμένο βάρος ατράκτου, βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου και κατά συνέπεια χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Η πρώτη σημαντική χρήση σύνθετων υλικών σε πολιτικό αεροσκάφος ήταν από την εταιρεία Airbus το 1983 στο πηδάλιο των αεροσκαφών A300 και A310, ενώ λίγο αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και το κάθετο ουραίο περύγιο (vertical tailfin), αντικαθιστώντας μεταλλικά τμήματα, μειώνοντας έτσι το βάρος και το κόστος παραγωγής. Το αεροσκάφος A380 αποτελείται περίπου από 25% κατά βάρος από σύνθετα υλικά, επιτυγχάνοντας μείωση βάρους 15-30% σε σχέση με το καθαρό αλουμίνιο με πολύ καλή αντοχή σε κόπωση. Τα σύνθετα υλικά είναι αποτελούνται κυρίως από σύνθετο πλαστικό ενισχυμένο από ίνες άνθρακα CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) με χρήση κυρίως στο ουραίο τμήμα (tailcone), πηδάλια ύψους, περύγια καμπυλότητας χείλους εκφυγής (flaps), χείλη προσβολής κινητήρων κτλ. Ακόμη χρησιμοποιούνται κράματα αλουμινίου ενισχυμένων με ίνες γυαλιού, γνωστά ως GLARE (Glass Fiber Reinforced Aluminum Alloy), ή GFRP (Glass Reinforced Plastic) κυρίως στα χείλη προσβολής των περύγων (leading edge), στο κάθετο σταθερό ουράς (vertical stabilizer) και κατασκευάζονται από τέσσερα ή περισσότερα φύλλα κράματος αλουμινίου πάχους 0,38 mm και μεμβράνες fiberglass με ρητίνη ως συνδετικό. Το παρουσιάζει τη χρήση σύνθετων υλικών στο αεροσκάφος A380. (7)



Σχήμα 1- 27 Χρήση σύνθετων υλικών στο αεροσκάφος AirbusA380 (7)

Στο ανταγωνιστικό μέτωπο, το αεροσκάφος Boeing 787 Dreamliner κατασκευάζεται με συνολική συνεισφορά των σύνθετων υλικών στην άτρακτο, πτερύγια και ουρά που αγγίζει το 50%!



Σχήμα 1- 28 Χρήση σύνθετων υλικών στο αεροσκάφος Boeing 787 Dreamliner

Σε μικρότερα μεγέθη αεροσκαφών, ορισμένα ελαφρά αεροσκάφη και ανεμόπτερα (gliders) είναι κατασκευασμένα από GRP ενώ γίνεται προσπάθεια κατασκευής ελαφρών αεροσκαφών κατηγορίας jet, εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά.

Στα ελικόπτερα, κατασκευή των πτερών τους από σύνθετα υλικά αυξάνει το χρόνο ζωής και την ταχύτητα πτήσης του ελικοπτερού. Ως παράδειγμα αναφέρεται το παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας του ελικοπτερού Westland Lynx, του οποίου τα φτερά έχουν κατασκευαστεί εξολοκλήρου από σύνθετα υλικά.

Στην αεροδιαστημική, σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή βασικών δομικών τμημάτων διαστημόπλοιων, κεραιών και άλλων διαμορφώσεων. Το όφελος από τη χρήση των σύνθετων υλικών δεν είναι μόνο η εξοικονόμηση βάρους, αλλά και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής που έχουν κατά μήκος των ινών των υλικών που εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα στο σχήμα κατά τη διάρκεια της διαστημικής πτήσης που είναι

εκτεθειμένα σε μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές (από -100°C έως $+100^{\circ}\text{C}$ ανάλογα αν είναι στη σκιά τους σκάφους ή εκτεθειμένα στις ακτίνες του ήλιου).

1.7. Ελαστική συμπεριφορά ινωδών σύνθετων υλικών (3)

1.7.1 Εισαγωγή

Πριν από την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς των ινωδών σύνθετων υλικών, είναι χρήσιμο να περιγραφούν συνοπτικά βασικές έννοιες της αντοχής των υλικών, όπως είναι ο ορισμός της τάσης, της παραμόρφωση και η διατύπωση των βασικών κανόνων υπολογισμού. Μία σύντομη και γενική περιγραφή του αντικειμένου της μηχανικής είναι η μελέτη της απόκρισης της ύλης σε εξωτερικές επιδράσεις (δυνάμεις, θερμοκρασιακές μεταβολές, γεωμετρικές ατέλειες κτλ.). Η απόκριση της ύλης στις εξωτερικές δυνάμεις εξαρτάται από την κατάσταση της ύλης. Από τη σκοπιά αυτή, η μηχανική των στερεών, διαιρείται στη μηχανική των απαραμόρφωτων στερεών σωμάτων και τη μηχανική των παραμορφωτών στερεών σωμάτων. Η μηχανική των παραμορφωτών στερεών σωμάτων, θα εφαρμοστεί για τη μελέτη της συμπεριφοράς των ινωδών σύνθετων υλικών κάτω από την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων.

Σε όλες τις περιπτώσεις, το σώμα ή το υλικό θεωρείται ότι είναι συνεχές. Η έννοια του συνεχούς μέσου αποτελεί μία εξιδανικευμένη κατάσταση, που αποδίδει τη φυσική συμπεριφορά της ύλης σε μέσες τιμές, χωρίς να υπεισέρχεται σε ατομικά και μοριακά φαινόμενα. Η παραδοχή αυτή, διευκολύνει σημαντικά τη μαθηματική διατύπωση της συμπεριφοράς των παραμορφωτών σωμάτων και βοηθά στην επίλυση ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων.

Η περιγραφή των παραμορφωτών σωμάτων περιλαμβάνει και τη μαθηματική θεωρία ελαστικότητας. Στη θεωρία ελαστικότητας η περιγραφή του προβλήματος γίνεται με αυστηρό μαθηματικό τρόπο και για τη λύση του απαιτείται σύμπλεγμα μαθηματικών γνώσεων.

Μία γενική παραδοχή της θεωρίας ελαστικότητας είναι ότι οι παραμορφώσεις του σώματος που εξετάζεται είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με τις διαστάσεις του. Η λέξη παραμόρφωση ορίζει το σύνολο όλων εκείνων των μετατοπίσεων που περιγράφουν την αλλαγή της μορφής του σώματος. Η παραδοχή αυτή είναι πολύ χρήσιμη, διότι έτσι οι εξισώσεις για τη μελέτη της συμπεριφοράς του σώματος καταστρώνονται στο αρχικό μη παραμορφωμένο σώμα.

Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ότι οι επιβαλλόμενες δυνάμεις αυξάνουν πολύ αργά ώστε να θεωρούνται στατικές, σε διάκριση με τις δυναμικές ή κρουστικές δυνάμεις, οι οποίες οδηγούν σε ταλαντώσεις και άλλα δυναμικά φαινόμενα.

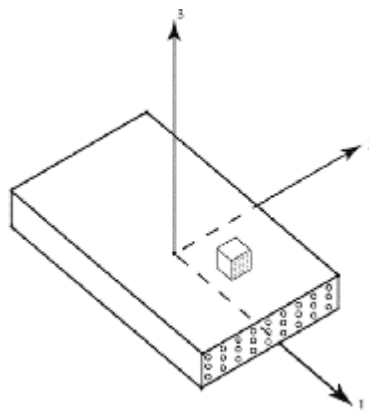
Τέλος το υλικό θεωρείται ότι είναι ομογενές όταν παρουσιάζει σε κάθε σημείο τις ίδιες ιδιότητες, ισότροπο όταν οι ιδιότητές του είναι ίδιες σε όλες τις κατευθύνσεις και γραμμικά ελαστικό όταν η παραμόρφωση μεταβάλλεται ανάλογα με τις εξωτερικές δυνάμεις (ισχύει ο νόμος του Hooke).

1.7.2 Κύριο σύστημα συντεταγμένων

Στο Σχ. 1-29 απεικονίζεται μία στρώση (lamina) ενός πολύστρωτου υλικού με παράλληλες ίνες. Για τη μελέτη του εφαρμόζεται το ακόλουθο ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, του οποίου οι διευθύνσεις λαμβάνονται ως εξής:

1. Ο άξονας 1 είναι παράλληλος με τη διεύθυνση της ίνας.
2. Ο άξονας 2 είναι πάνω στο επίπεδο της στρώσης και κάθετος στις ίνες.
3. Ο άξονας 3 είναι κάθετος στο επίπεδο της στρώσης και επίσης κάθετος στις ίνες.

Η διεύθυνση 1 ονομάζεται επίσης διεύθυνση ίνας (fiber direction), ενώ οι διευθύνσεις 2 και 3 ονομάζονται κάθετες διευθύνσεις (transverse directions). Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θα αναφέρονται πάντα σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 1- 29 Γεωμετρία στρώσης με παράλληλες συνεχείς ίνες και αναπαράσταση των διευθύνσεων του συστήματος συντεταγμένων

1.7.3 Ελαστικές ιδιότητες μιας στρώσης με παράλληλες ίνες

Όταν σε μια στρώση με παράλληλες ίνες, εφαρμόζεται μία εφελκυστική ή θλιπτική τάση, παράλληλα προς τις ίνες, τότε εάν ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας είναι τέλειος, η παραμόρφωση ϵ_1 , που αναπτύσσεται στην μήτρα, είναι η ίδια με την παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην ίνα.

Αν υποθεθεί ότι ίνες και μήτρα συμπεριφέρονται γραμμικά και ελαστικά, οι αντίστοιχες τάσεις που αναπτύσσονται δίνονται προσεγγιστικά από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}\sigma_f &= E_f \epsilon_1 \\ \sigma_m &= E_m \epsilon_1\end{aligned}\quad \text{εξ 1.7. 2}$$

Όπου σ_f , σ_m οι τάσεις που αναπτύσσονται στην ίνα και τη μήτρα αντίστοιχα, E_f , E_m μέτρα ελαστικότητας (μέτρο Young) ίνας και μήτρας, ϵ_1 παραμόρφωση στη διεύθυνση 1

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει, ότι αν $E_f > E_m$ η τάση που αναπτύσσεται στις ίνες θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αναπτύσσεται στην μήτρα. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος κατασκευής των ινωδών συνθέτων υλικών διότι οι ίνες μπορούν και φέρουν και το μεγαλύτερο φορτίο.

Σε ένα σύνθετο υλικό η μέση τάση δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad \text{εξ 1.7. 3}$$

Όπου σ_1 μέση τάση που αναπτύσσεται στη διεύθυνση 1, P συνολικό φορτίο που εφαρμόζεται στο σύνθετο υλικό, A συνολική διατομή του σύνθετου υλικού

Το συνολικό φορτίο του σύνθετου υλικού μοιράζεται στο φορτίο που εφαρμόζεται στην ίνα και τη μήτρα:

$$P = P_f + P_m \quad \text{εξ 1.7. 4}$$

Όπου P_f , P_m : τα φορτία που εφαρμόζονται στις ίνες και τη μήτρα αντίστοιχα. Ακόμα ισχύει:

$$P_f = \sigma_f A_f \quad \text{εξ 1.7. 5}$$

$$P_m = \sigma_m A_m \quad \text{εξ 1.7. 6}$$

Με αντικατάσταση των εξισώσεων προκύπτει ότι:

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

Όπου A_f , A_m : οι διατομές των ινών και της μήτρας αντίστοιχα. εξ 1.7. 7

Για την κύρια διεύθυνση των ινών ισχύει:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad \text{εξ 1.7. 8}$$

Όπου E_1 το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού κατά τη διεύθυνση 1

Με συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει:

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad \text{εξ 1.7. 9}$$

Ορίζονται ως V_f και V_m ο λόγος των διατομών ινών και μήτρας αντίστοιχα προς τη συνολική διατομή του σύνθετου υλικού :

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad \text{εξ 1.7. 10}$$

$$V_m = \frac{A_m}{A} \quad \text{εξ 1.7. 11}$$

Το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού υπολογίζεται:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad \text{εξ 1.7. 12}$$

Με δεδομένο ότι:

$$V_m = 1 - V_f \quad \text{εξ 1.7. 13}$$

Από την οποία προκύπτει:

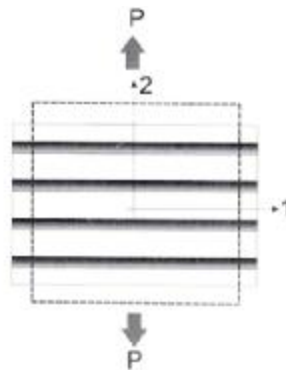
$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad \text{εξ 1.7. 14}$$

Η τελευταία σχέση αναφέρεται συνήθως ως νόμος των φάσεων ή των μιγμάτων.

Η παραπάνω ανάλυση στηρίζεται στην υπόθεση ότι ισχύει η εξίσωση της γραμμικής ελαστικότητας, που όμως δεν είναι αυτό απόλυτα σωστό, διότι η μήτρα και η ίνα έχουν διαφορετικούς λόγους Poisson

($\nu_f \neq \nu_m$) ,με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται επιπρόσθετες τάσεις, που δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη. Ωστόσο, το σφάλμα που γίνεται στον υπολογισμό του με βάση τον νόμο των μιγμάτων είναι μικρότερο του 1 - 2% και έχει αποδειχθεί πειραματικά σε πολλά συστήματα πολυμερικών ινωδών συνθέτων υλικών.

Για τον υπολογισμό του εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας E_2 σε μία στρώση συνθέτου υλικού με παράλληλες ίνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί παρόμοια μεθοδολογία. Το μοντέλο για τον υπολογισμό αυτό παριστάνεται στο Σχ. 1-30.



Σχήμα 1 - 30 Εφελκυσμός ινώδους σύνθετου υλικού κατά τη διεύθυνση 2.

Ένα φορτίο εφαρμόζεται στη διεύθυνση 2 και με την υπόθεση: $\sigma_m = \sigma_f = \sigma_2$, οι αντίστοιχες παραμορφώσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \text{εξ 1.7. 15}$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad \text{εξ 1.7. 16}$$

Επομένως η ε_2 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m \quad \text{εξ 1.7. 17}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_f} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} V_m \quad \text{εξ 1.7. 18}$$

Από τη σχέση ελαστικότητας:

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2 \quad \text{εξ 1.7. 19}$$

Οπότε για όλο το σύνθετο υλικό προκύπτει:

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot (1 - V_f) + E_m \cdot V_f} \quad \text{εξ 1.7. 20}$$

Η πρόβλεψη είναι σε ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο υπάρχει μία απόκλιση που οφείλεται στην υπόθεση της ίδιας τιμής του ιδιουλόγου του Poisson ίνας και μήτρας. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν άλλες θεωρίες που λαμβάνουν υπόψη τους το φαινόμενο Poisson:

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E'_m}{E_f \cdot (1 - V_f) + E'_m \cdot V_f} \quad \text{εξ 1.7. 21}$$

όπου:

$$E'_m = \frac{E_m}{(1 - \nu_m)} \quad \text{εξ 1.7. 22}$$

1.8 Εισαγωγή στη μηχανική πολύστρωτων πλακών (3)

1.8.1 Εισαγωγή

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν κάποιες αναλυτικές και προσεγγιστικές σχέσεις, που δίνουν καλές προσεγγίσεις σε σύνθετα υλικά πολύ μικρού πάχους και μόνο πάνω στο κύριο σύστημα του υλικού, δηλαδή παράλληλα και κάθετα προς τις ίνες. Αυτές οι σχέσεις αναφέρονται στη μικρομηχανική μόνο μίας στρώσης σύνθετου υλικού.

Τις περισσότερες φορές, τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλο πάχος, καθώς αποτελούνται από πολλές στρώσεις συνεχών ινών διαφόρων κατευθύνσεων και ειδών. Απαιτείται λοιπόν μία θεωρία υπολογισμού, που να λαμβάνει υπόψη την ανισότροπη φύση τους και να μπορεί να προβλέψει τις ελαστικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών αυτών

ανεξάρτητα από τη διεύθυνση, το πάχος και το υλικό. Προαπαιτούμενο είναι η πλήρης περιγραφή των ιδιοτήτων του βασικού δομικού στοιχείου, ανεξάρτητα από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων στο υλικό.

Για τη μελέτη της βασικής συμπεριφοράς μίας βασικής στρώσης σύνθετου υλικού, το υλικό θεωρείται συνεχές και ομογενές όπως και στη μηχανική του συνεχούς μέσου, αλλά όχι ισότροπο και δεν ενδιαφέρει η μικροδομή του. Η θεωρία που προβλέπει τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών από συνεχείς ίνες πολλαπλών στρώσεων, ονομάζεται κλασική θεωρία πολύστρωτων πλακών (classical lamination theory) και θα παρουσιαστεί συνοπτικά στα επόμενα κεφάλαια.

1.8.2 Γενικευμένος Νόμος του Hooke

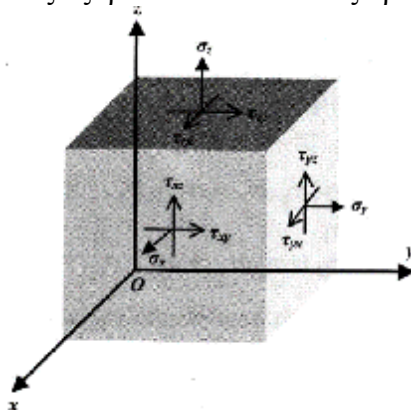
Τα σύνθετα υλικά είναι από τη φύση τους ανισότροπα. Σε μία διάσταση ή στο επίπεδο, η ορθή και διατμητική τάση, σχετίζονται με την ορθή και διατμητική παραμόρφωση³ μέσω των σχέσεων του νόμου του Hooke:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{εξ 1.8. 1}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{G} \boldsymbol{\gamma} \quad \text{εξ 1.8. 2}$$

Ο νόμος του Hooke που ισχύει για τη μονοαξονική εντατική κατάσταση, μπορεί να επεκταθεί και στη γενική εντατική κατάσταση στο χώρο, με την προϋπόθεση ότι ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων και ότι οι παραμορφώσεις είναι μικρές. Για το σκοπό αυτόν θα χρησιμοποιηθεί η αρχή της επαλληλίας που ορίζει ότι αν σε ένα σώμα επιπροσθέσουμε μία εντατική κατάσταση, οι παραμορφώσεις που θα προκύψουν είναι ανεξάρτητες από αυτές που προϋπήρχαν, ώστε η ολική παραμόρφωση να είναι το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους παραμορφώσεων.

Στη γενική εντατική κατάσταση, εμφανίζονται όλες οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στο Σχ. 1-31. Σε ένα τέτοιο σώμα, οι ορθές παραμορφώσεις δεν εξαρτώνται μόνο από τις ορθές τάσεις αλλά και από τις διατμητικές τάσεις, όπως και οι διατμητικές παραμορφώσεις εξαρτώνται και από τις ορθές τάσεις.



Σχήμα 1- 31 Τριαξονική εντατική κατάσταση

$$\sigma_x = A_1 \varepsilon_x + B_1 \varepsilon_y + C_1 \varepsilon_z + D_1 \gamma_{xy} + E_1 \gamma_{xz} + F_1 \gamma_{yz}$$

$$\sigma_y = A_2 \varepsilon_x + B_2 \varepsilon_y + C_2 \varepsilon_z + D_2 \gamma_{xy} + E_2 \gamma_{xz} + F_2 \gamma_{yz}$$

....

$$\tau_{yz} = A_6 \varepsilon_x + B_6 \varepsilon_y + C_6 \varepsilon_z + D_6 \gamma_{xy} + E_6 \gamma_{xz} + F_6 \gamma_{yz} \quad \text{εξ 1.8. 3}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι ένα σύστημα 6 εξισώσεων με 36 σταθερές και σε τανυστική μορφή μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sigma_{ij} = Q_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{με } i,j,k,l = x,y,z \quad \text{εξ 1.8. 4}$$

όπου Q_{ijkl} τανυστής δυσκαμψίας υλικού 4^{ης} τάξεως.

Αντίστροφα μπορεί να εκφραστεί το σύστημα για τις παραμορφώσεις ως εξής:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{με } i,j,k,l = x,y,z \quad \text{εξ 1.8. 5}$$

όπου S_{ijkl} τανυστής ενδώσεως υλικού 4^{ης} τάξεως.

Για λόγους ευχρηστίας για τη μελέτη των σύνθετων υλικών υιοθετείται η παρακάτω σύμβαση για τις τάσεις.

Για τις ορθές τάσεις:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{11} = \sigma_1, \quad \sigma_{yy} = \sigma_{22} = \sigma_2, \quad \sigma_{zz} = \sigma_{33} = \sigma_3 \quad \text{εξ 1.8. 6}$$

Για τις διατμητικές τάσεις

$$\tau_{xy} = \sigma_{xy} = \sigma_{12} = \sigma_6, \quad \tau_{xz} = \sigma_{xz} = \sigma_{13} = \sigma_5, \quad \tau_{yz} = \sigma_{yz} = \sigma_{23} = \sigma_4 \quad \text{εξ 1.8. 7}$$

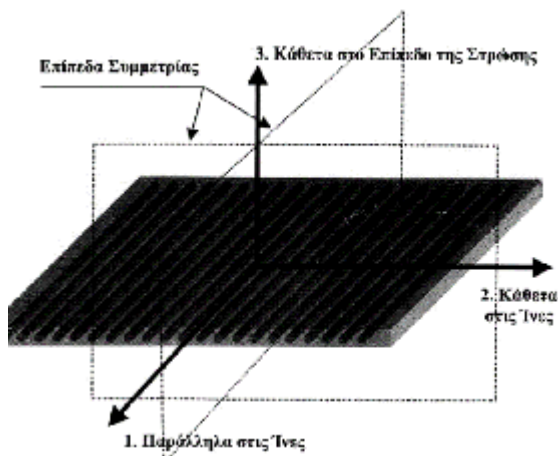
Όμοια σύμβαση υιοθετείται και στο συμβολισμό της παραμόρφωσης. Έτσι ο γενικευμένος νόμος του Hooke γράφεται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 8}$$

Μία στρώση σύνθετου υλικού έχει πολύ μικρό πάχος και έτσι μελετάται η μηχανική της απόκριση σε δύο διαστάσεις, και κάθε στρώση έχει τρία επίπεδο συμμετρίας (Σχ. 1-32).

$$\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = 0 \quad \text{εξ 1.8. 9}$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = 0 \quad \text{εξ 1.8. 10}$$



Σχήμα 1- 32 Κύριο σύστημα σε μία στρώση σύνθετου υλικού και τα επίπεδα συμμετρίας της ορθότροπης στρώσης.

Οπότε για το κύριο σύστημα της στρώσης ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 11}$$

Οι συνιστώσες του ταυνοστή δυσκαμψίας ορίζονται ως εξής:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21} \cdot E_1}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})} \quad \text{εξ 1.8. 12}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{(1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

Όπου E_1 μέτρο ελαστικότητας στρώσης παράλληλα στις ίνες (διεύθυνση 1) και E_2 μέτρο ελαστικότητας στρώσης κάθετα προς τις ίνες (διεύθυνση 2)

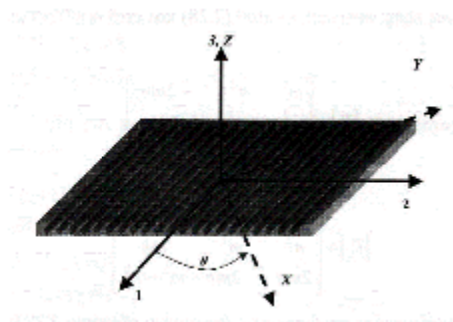
$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} : \text{λόγος Poisson}$$

$$\nu_{21} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} : \text{λόγος Poisson}$$

Με G_{12} μέτρο διάτμησης στο επίπεδο 1-2

1.8.3 Υπολογισμός συντελεστών δυσκαμψίας στρώσης σύνθετου υλικού εκτός κύριου συστήματος

Στις περισσότερες εφαρμογές, τα σύνθετα υλικά φορτίζονται εκτός του κύριου συστήματος συντεταγμένων τους. Σε αυτήν την περίπτωση αλλάζει η μορφή του τανυστή δυσκαμψίας αν τον στρέψουμε ως προς το νέο σύστημα δράσης. Στο Σχ. 1-33 δίνεται το νέο σύστημα συντεταγμένων που έχει περιστραφεί κατά γωνία θ . Οι άξονες 1 και 2 έχουν στραφεί κατά γωνία θ , ενώ ο άξονας 3 δεν στρέφεται παρά μόνο γύρω από τον εαυτό του.



Σχήμα 1- 33 Σύστημα που έχει περιστραφεί κατά γωνία θ .

Από την άλγεβρα τανυστών, στο περιστρεφόμενο σύστημα συντεταγμένων, οι συνιστώσες δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_1][Q][T_2]^{-1} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 13}$$

Όπου $[Q] = [T_1][Q][T_2]^{-1}$ ο νέος τανυστής δυσκαμψίας του υλικού

$$[T_1] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 14}$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ 2 \sin \theta \cos \theta & -2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 15}$$

Το νέο μητρώο δυσκαμψίας στο στραμμένο σύστημα XYZ είναι:

$$[\bar{Q}] = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{sy} \end{bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 16}$$

Οπότε οι συνιστώσες του μητρώου δυσκαμψίας υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} Q_{xx} &= Q_{11} m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) m^2 n^2 + Q_{22} n^4 \\ Q_{xy} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) m^2 n^2 + Q_{12} (m^4 + n^4) \\ Q_{yy} &= Q_{11} n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) m^2 n^2 + Q_{22} m^4 \\ Q_{xs} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) n m^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) n^3 m \\ Q_{ys} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) n^3 m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) n m^3 \\ Q_{ss} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) n^2 m^2 + Q_{66} (n^4 + m^4) \end{aligned} \quad \text{εξ 1.8. 17}$$

Με ακριβώς όμοιο τρόπο μετασχηματίζεται και το μητρώο ενδοτικότητας [S] στο περιστρεμμένο σύστημα συντεταγμένων.

1.8.4 Κωδικοποίηση πολύστρωτων πλακών

Η κωδικοποίηση της πολύστρωτης πλάκας γίνεται σύμφωνα με τον διεθνώς καθιερωμένο κωδικοποιημένο τρόπο περιγραφής συστημάτων πολύστρωτων σύνθετων υλικών. Οι γενικές αρχές του κώδικα είναι οι εξής:

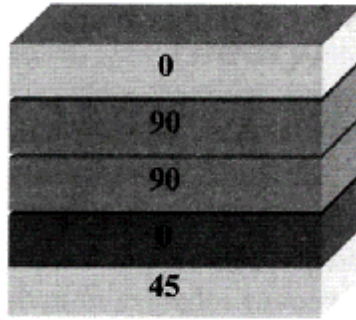
- Κάθε στρώση αναπαρίσταται από το αζιμούθιο (γωνία) των ινών της ως προς τον άξονα 1 της πλάκας (πάχος πλάκας: $z \in [-h/2, h/2]$). Θετικές είναι οι γωνίες αντιωρολογιακά ως προς τον άξονα x της πλάκας.
- Ως δείκτης στη σχέση μπαίνει ο αριθμός που υποδεικνύει τον αριθμό στρώσεων ίδιας γωνίας ινών.
- Γίνεται χρήση της καθέτου (/) ως διαχωριστικού αν αλλάζει η γωνία στρώσης. Η αρίθμηση ξεκινά πάντα από την κάτω επιφάνεια της πλάκας ($z = -h/2$).
- Όλη η διάταξη της πλάκας μπαίνει σε αγκύλες και τοποθετείται ο δείκτης:

"T" αν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι ολοκληρωμένη,

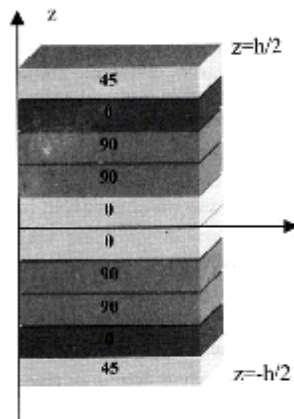
"S" αν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο $z=0$ (symmetric),

"Q" αν η διάταξη εντός των αγκυλών είναι ψευδοσυμμετρική ως προς το επίπεδο $z=0$, δηλαδή οι αντίστοιχες στρώσεις έχουν αντίθετα πρόσημα (quasi-symmetric).

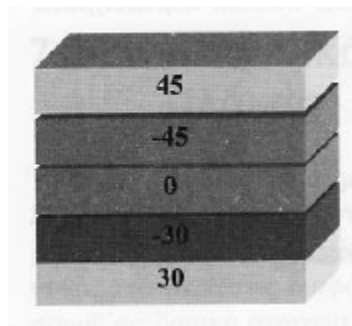
Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω, ακολουθούν κάποια παραδείγματα κωδικοποιημένων πολύστρωτων συστημάτων σύμφωνα με τον παραπάνω κώδικα:



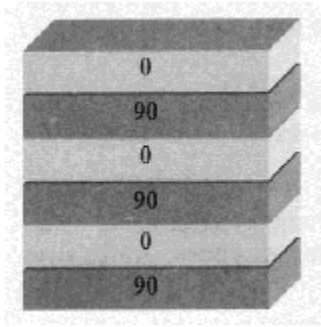
Σχήμα 1- 34 Πολύστρωτη πλάκα με κωδικό: $[45 / 0 / 90_2 / 0]_T$



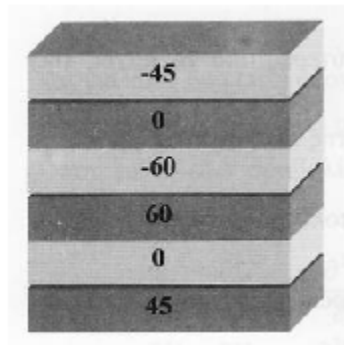
Σχήμα 1- 35 Συμμετρική πολύστρωτη πλάκα με κωδικό: $[45 / 0 / 90_2 / 0]_s$



Σχήμα 1- 36 Πολύστρωτη πλάκα με κωδικό: $[\pm 30 / 0 / -+45 / 0]_s$



Σχήμα 1- 37 Πολύστρωτη πλάκα με επαναλαμβανόμενες ομάδες στρώσεων που συμβολίζεται με κωδικό: $[(90/0)_3]_T$



Σχήμα 1- 38 Ψευδοσυμμετρική πολύστρωτη πλάκα με κωδικό: θεωρία πολύστρωτων πλακών

$[45/0/60]_a$ Κλασική

Για μία τυχαία στρώση (k) ενός πολύστρωτου υλικού, ισχύει ο νόμος του Hooke για το κύριο σύστημα της στρώσης:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix}^{(k)} \quad \text{εξ 1.8. 18}$$

Σε τυχαίο σύστημα ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{sy} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix}^{(k)} \quad \sigma \quad \text{εξ 1.8. 19}$$

Ισχύουν οι ακόλουθες θεωρήσεις:

1. Οι επίπεδες διατομές της πλάκας παραμένουν επίπεδες και απαραμόρφωτες σε κάμψη (Bernoulli).

2. Οι επίπεδες διαστάσεις της πλάκας είναι μεγαλύτερες από το πάχος της: $h \ll \alpha, \beta$
3. Οι μετατοπίσεις u, v, w κατά μήκος των κύριων αξόνων της πλάκας είναι μικρές σε σχέση με το πάχος της: $u, v, w \ll h$
4. Οι παραμορφώσεις της πλάκας στο επίπεδο της είναι πολύ μικρότερες της μονάδας: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z \ll 1$
5. Οι εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις (εκτός επιπέδου xy) θεωρούνται αμελητέες: $\epsilon_{xz} = 0$
6. Οι μετατοπίσεις στο επίπεδο xy είναι γραμμικές συναρτήσεις της μεταβλητής z : $u, v = f(z)$
7. Η παραμόρφωση στη διεύθυνση του πάχους z είναι αμελητέα: $\epsilon_z = 0$
8. Η πλάκα αντιδρά σε εξωτερικά φορτία παράλληλα στο επίπεδό της ή και κάθετα σε αυτό αναπτύσσοντας ορθές και διατμητικές τάσεις κάθετα στη διατομή της, αλλά ποτέ παράλληλα σε αυτήν.

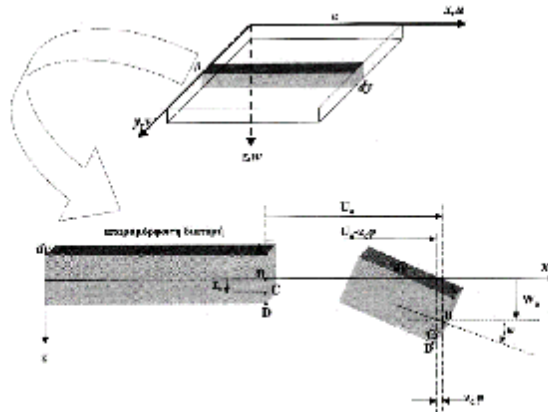
Οι συνεπίπεδες παραμορφώσεις στην πλάκα ορίζονται ως εξής:

$$\epsilon_x^0 = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_y^0 = \frac{\partial v}{\partial y}$$

εξ 1.8. 20

$$\gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$



Σχήμα 1- 39 Πολύστρωτη πλάκα σε έκταση και κάμψη

Έστω η πλάκα του Σχ. 1-39 που υποβάλλεται σε εφελκυστικό φορτίο στη διεύθυνση x που της προκαλεί εκτατική παραμόρφωση U_0 και στη διεύθυνση y με αποτέλεσμα τη V_0 . Επιπλέον η πλάκα υποβάλλεται σε καμπτική παραμόρφωση. Ως συνέπεια υπάρχει αποτέλεσμα τη μετατόπιση και στροφή της στοιχειώδους διατομής $ABCD$. Το σημείο C έχει μετατοπιστεί κατά x, y, z ώστε να ισχύουν τα παρακάτω:

$$U_c = U_0 - z_c \beta$$

εξ 1.8. 21

Όπου β η γωνία στροφής

Για μικρές γωνίες η διατομή παραμένει επίπεδη (Bernoulli):

$$\beta = \frac{\partial W_0}{\partial X} \quad \text{εξ 1.8. 22}$$

Με αντικατάσταση:

$$U = U_0 - Z \frac{\partial W_0}{\partial X} \quad \text{εξ 1.8. 23}$$

$$V = V_0 - Z \frac{\partial W_0}{\partial Y} \quad \text{εξ 1.8. 24}$$

Ακόμη

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U_0}{\partial x} - Z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x^2} = \varepsilon_x^0 + Z k_x \quad \text{εξ 1.8. 25}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial V_0}{\partial y} - Z \frac{\partial^2 W_0}{\partial y^2} = \varepsilon_y^0 + Z k_y$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial U_0}{\partial y} - Z \frac{\partial^2 W_0}{\partial y \partial x} + \frac{\partial V_0}{\partial x} - Z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y} = \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} - 2Z \frac{\partial^2 W_0}{\partial x \partial y} = \\ &= \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} + 2Z k_{xy} \end{aligned} \quad \text{εξ 1.8. 26}$$

Σε μορφή πινάκων γράφεται:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + Z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{εξ 1.8. 27}$$

Οπότε η σχέση τάσεων - παραμόρφωσης παίρνει την μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_s \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xs} \\ Q_{xy} & Q_{yy} & Q_{ys} \\ Q_{sx} & Q_{sy} & Q_{sy} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \mathbf{Z} \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}^{(k)}$$

εξ 1.8. 28

Κεφάλαιο 2

Πειραματικό μέρος

2.1 Γενικά

Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν δοκίμια σύνθετων υλικών με ενίσχυση ρητίνης (μήτρα) με ίνες άνθρακα. Μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια αυτά αμέσως μετά την παρασκευή τους καθώς και αφού αυτά υπέστησαν γήρανση, δηλαδή υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους με διάφορους τρόπους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μια ανάλυση της γήρανσης σύνθετων υλικών και στη συνέχεια περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Εικόνα 2.1: Συσκευή Γήρανσης στο Ερευνητικό Ινστιτούτο

2.2 Γήρανση σύνθετων υλικών

Στις αεροναυπηγικές εφαρμογές οι κατασκευές εκτίθενται σε δριμύς κύκλους περιβαλλοντικών συνθηκών συμπεριλαμβανομένου της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων συνθηκών σε συνδυασμό με μηχανική φόρτιση για μεγάλες χρονικούς περιόδους που προκαλούν υποβάθμιση (degradation) και φθορά (damage) των υλικών.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες τίθεται το ζήτημα της διάρκειας ζωής και της αντοχής των υλικών, κάτι που έχει μεγάλο ενδιαφέρον για την αεροναυπηγική καθώς συνδέεται άρρηκτα με τις λειτουργικές δαπάνες, την ασφάλεια και τη λειτουργία της κατασκευής. Ωστόσο, η μεγάλη διάρκεια έκθεση των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας (PMCs) στις προαναφερθείσες συνθήκες οδηγεί τελικά σε αμετάβλητες αλλαγές στις αρχικές ιδιότητες τους και μειώνει τη διάρκεια ζωής τους. Αυτή λοιπόν η αλλαγή στις ιδιότητες των υλικών με το πέρασ του χρόνου ορίζεται ως διαδικασία γήρανσης (ageing process) και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις τύπους:

1. Φυσική γήρανση (physical ageing)
2. Χημική γήρανση (chemical ageing)
3. Μηχανική γήρανση (mechanical ageing)
4. Περιβαλλοντική γήρανση (weathering)

2.2.1 Φυσική Γήρανση

Γενικά, η μεταβολή των ιδιοτήτων ενός υλικού με την πάροδο του χρόνου καλείται φυσική γήρανση. Η διαδικασία της φυσικής γήρανσης λαμβάνει χώρα στην υαλώδη περιοχή (glassy stage) δηλαδή σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης ($T < T_g$) και σχετίζεται με αλλαγές στον ελεύθερο όγκο, την ενθαλπία και την εντροπία του πολυμερούς. Στην θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης T_g η συχνότητα αλλαγής της μορφολογίας τμημάτων της αλυσίδας μειώνεται δραστικά, εν τούτοις παραμένουν ορισμένες τοπικές μετακινήσεις οι οποίες με το πέρασ του χρόνου επιτρέπουν στις αλυσίδες να πλησιάσουν περισσότερο η μια την άλλη ελαττώνοντας τον μεταξύ τους ελεύθερο όγκο μετατρέποντας έτσι το υλικό σε πιο σκληρό και πιο εύθραυστο.

Αυτές οι αλλαγές στις θερμοδυναμικές ιδιότητες του υλικού συνοδεύονται από αξιοσημείωτες αλλαγές στις μηχανικές του ιδιότητες. Στην πραγματικότητα, ένα πολυμερές που βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία σημαντικά χαμηλότερη από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης υφίσταται μικρή αλλά διαρκή μείωση του όγκου σαν συνέπεια της αναδιάταξης των μακροαλυσίδων κοντά στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Αυτού του είδους η γήρανση μπορεί να είναι θερμοαντιστρεπτή στην περίπτωση των άμορφων θερμοπλαστικών υλικών ή μη αντιστρεπτή στην περίπτωση των θερμοσκληρυνόμενων.

2.2.2 Χημική Γήρανση

Η χημική γήρανση εκφράζεται ως μια μη αντιστρέψιμη αλλαγή στο πολυμερικό δίκτυο όπως είναι η δημιουργία σταυροδεσμών (cross-linking) και το σχίσσιμο των αλυσίδων (chains scission) λόγω της δράσης μηχανισμών χημικής υποβάθμισης. Η υδρόλυση (hydrolysis), η χημική αντίδραση του πολυμερούς με το νερό, και η οξείδωση (oxidation), η χημική αντίδραση του πολυμερούς με το οξυγόνο, είναι οι κύριες μορφές χημικής υποβάθμισης στα υψηλών θερμοκρασιών σύνθετα πολυμερικής μήτρας (HT-PMCs). Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν τα PMCs

χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες κοντά στην θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) μπορεί να συμβεί ταυτόχρονα και φυσική αλλά και χημική γήρανση.

Γενικά, κατά τη διάρκεια της χημικής γήρανσης προκαλούνται σοβαρές αλλαγές στο υλικό και στις μηχανικές του ιδιότητες όπως είναι η απώλεια βάρους και η μείωση της αντίστασης στη δημιουργία ρωγμών (fracture toughness).

2.2.3 Μηχανική Γήρανση

Η διαδικασία της μηχανικής γήρανσης ή μηχανικής φόρτισης αναφέρεται σε αξιοσημείωτες αλλαγές που συμβαίνουν σε μακροσκοπικό επίπεδο στη μηχανική απόδοση των PMCs. Επίσης εκφράζει την αντοχή του υλικού σε επιβαλλόμενα φορτία κατά το χρόνο λειτουργίας του. Οι μηχανισμοί που είναι συνυφασμένοι με τη μηχανική υποβάθμιση είναι: η δημιουργία ρωγμών στη μήτρα (matrix cracking), η υποβάθμιση της διεπιφάνειας (interface degradation), η αποκόλληση στρώσεων (delamination), η ανελαστική παραμόρφωση και η αστοχία της ίνας (inelastic deformation & fiber failure) που έχουν άμεση επίδραση στην αντοχή και στη δυσκαμψία του υλικού. Το φαινόμενο λαμβάνει χώρα είτε σαν ατομικός μηχανισμός υποβάθμισης με την έναρξη καταστροφής του υλικού είτε σαν συνεπακόλουθος μηχανισμός υποβάθμισης αυξάνοντας την ήδη υπάρχουσα καταστροφή που μπορεί να προέρχεται από φυσικό ή χημικό μηχανισμό γήρανσης ή από παράλληλη δράση αυτών των δυο.

2.2.4 Περιβαλλοντική Γήρανση

Πολλά υλικά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν έκθεση σε υπαίθριες συνθήκες. Οποιαδήποτε προκύπτουσα υποβάθμιση καλείται περιβαλλοντική γήρανση (weathering), η οποία μπορεί να είναι στην πραγματικότητα συνδυασμός διαφορετικών διεργασιών. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η φθορά είναι πρωταρχικά αποτέλεσμα οξείδωσης, η οποία αρχίζει από την υπερϊώδη ακτινοβολία του ηλίου. Επίσης, μερικά πολυμερή όπως το νάιλον και η κυτταρίνη είναι ευάλωτα στην απορρόφηση νερού η οποία προκαλεί μείωση στη σκληρότητα και στην δυσκαμψία τους.

Ανάλογα με τον τύπο του υλικού και τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας του οι παραπάνω διαδικασίες γήρανσης μπορούν είτε να συνυπάρχουν είτε να δρα η καθεμία ξεχωριστά για παράδειγμα όταν ένα PMC υλικό εκτίθεται σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος και φορτίου όπως συμβαίνει σε ένα αεροσκάφος (συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών, υγρασίας, οξειδωτικής ατμόσφαιρας σε σύζευξη με μηχανικά φορτία) η συνύπαρξη των προαναφερθέντων διαδικασιών γήρανσης και των αντίστοιχων μηχανισμών υποβάθμισης είναι αναπόφευκτη.

2.3 Γήρανση σύνθετων υλικών σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών

Η διαδικασία γήρανσης που πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες ονομάζεται θερμική (thermal degradation). Γενικώς, η θερμική υποβάθμιση

αναφέρεται σε φυσική και σε χημική διαδικασία γήρανσης που συμβαίνει κατά τη διάρκεια υψηλών θερμοκρασιών. Ανάλογα με τον τύπο της ατμόσφαιρας που επικρατεί και σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες λαμβάνουν χώρα τέσσερις τύποι θερμικής υποβάθμισης:

1. Καθαρά θερμική υποβάθμιση (purely thermal degradation)
2. Θερμοοξειδωτική υποβάθμιση (thermo-oxidative degradation)
3. Υγροθερμική υποβάθμιση (hydro-thermal degradation)
4. Θερμομηχανική υποβάθμιση (thermo-mechanical degradation)

Καθαρά θερμική υποβάθμιση

Σε αυτή τη διαδικασία είναι δυνατές δυο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες κοντά ή ακόμα και πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) σε συνδυασμό με αδρανή ατμόσφαιρα που είναι υπεύθυνες για το σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών των μακροαλυσίδων των πολυμερών οδηγώντας σε υποβάθμιση του υλικού. Αυτή η διαδικασία συμπεριλαμβάνεται στη χημική γήρανση καθώς επηρεάζει την ακεραιότητα του πολυμερικού δικτύου.

Βασικές ενδείξεις αυτού του τύπου υποβάθμισης είναι οι αλλαγές στο βάρος, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης καθώς επίσης και στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες που δεν υπερβαίνουν όμως τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης οπότε δεν παρατηρείται σχίσσιμο των αλυσίδων ή περαιτέρω δημιουργία σταυροδεσμών παρά μόνο αναδιάταξη των μακροαλυσίδων με σκοπό τη διατήρηση της θερμοδυναμικής ισορροπίας, σαν συνέπεια αυτού η διαδικασία περιγράφεται ως φυσική γήρανση.

Θερμοοξειδωτική υποβάθμιση

Οι απαραίτητες συνθήκες για αυτή την διαδικασία είναι οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με οξειδωτική ατμόσφαιρα. Η οξείδωση αποτελεί το πιο σοβαρό πρόβλημα κατά τη χρήση των πολυμερών σε υψηλές θερμοκρασίες, οδηγεί σε μείωση του μοριακού βάρους επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης. Καθώς η θερμοοξείδωση προκαλεί σοβαρές αλλαγές στο πολυμερικό δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως διαδικασία χημικής γήρανσης.

Βασικές ενδείξεις αυτού του τύπου υποβάθμισης είναι η έντονη μείωση του βάρους, η αλλαγή στη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, η μεταβολή στο χρώμα και στη δομή της επιφάνειας του υλικού, η αύξηση στην πυκνότητα των ρωγμών και η μείωση της αντίστασης στη διάδοση της θραύσης.

Υγροθερμική υποβάθμιση

Είναι μια διαδικασία γήρανσης που συμβαίνει σε υγρή ατμόσφαιρα κάτω από υψηλές θερμοκρασίες. Ο βασικός μηχανισμός που οδηγεί στην υποβάθμιση αυτή είναι η υδρόλυση δηλαδή η χημική επίθεση των απορροφημένων μορίων νερού στα μακρομόρια του πολυμερούς. Η υδρόλυση είναι υπεύθυνη για το σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών και λόγω αυτού οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης.

Επίσης διαστατικές αλλαγές π.χ. διόγκωση (swelling), μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και των φυσικών χαρακτηριστικών όπως αύξηση της πυκνότητας των μικρορωγμών (increase of microcracking density) μπορούν να προκληθούν από την απορροφούμενη υγρασία. Με βάση τα προαναφερθέντα η διαδικασία αυτή μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στη χημική γήρανση. Επειδή ο χρόνος έκθεσης του υλικού σε υγροθερμικό περιβάλλον αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την διάχυση της υγρασίας μέσα στο υλικό τα αποτελέσματα της απορροφημένης υγρασίας μπορούν

να ταξινομηθούν σε μακράς και σε βραχείας διάρκειας.

Η μακράς διάρκειας έκθεση του υλικού μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία μικροκενών και να οδηγήσει στη μείωση των εσωτερικών μηχανικών ιδιοτήτων που οφείλεται στην πλαστικοποίηση της μήτρας, ενώ η μικρής διάρκειας έκθεση περιλαμβάνει τη ρωγμάτωση της μήτρας, τον διαχωρισμό των εξωτερικών στρώσεων (outer ply delamination) ή ακόμα και την δημιουργία επιφανειακών φουσκάλων (surface blistering) κατά την απότομη θέρμανση.

Οι παραπάνω τύποι φθοράς οδηγούν σε σημαντικές αλλαγές στο βάρος, στα φυσικά χαρακτηριστικά αυξάνοντας την πυκνότητα των ρωγμών στη μήτρα, καθώς και στις μηχανικές ιδιότητες όπως η μείωση της αντίστασης στη διάδοση της θραύσης και της κόπωσης του υλικού.

Θερμομηχανική υποβάθμιση

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών με μηχανικές τάσεις που οφείλονται σε στατικά ή δυναμικά φορτία. Επίσης, όλοι οι προαναφερθέντες μηχανισμοί υποβάθμισης (ρωγμάτωση της μήτρας, αποστρωμάτωση, αποκόλληση στα όρια της διεπιφάνειας) συνοδευόμενοι από μηχανική γήρανση μπορεί να οδηγήσουν σε θερμομηχανική υποβάθμιση.

Ουσιαστικά η παρουσία υψηλών θερμοκρασιών επιταχύνει τους μηχανισμούς αυτούς αυξάνοντας την ήδη υπάρχουσα βλάβη και προκαλώντας καινούργια ταυτόχρονα.

- Ø Ρωγμές στη μήτρα (matrix cracking): Η ρωγμή στη μήτρα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ζεύγος εσωτερικών επιφανειών σε ένα σύνθετο υλικό, το οποίο μπορεί να διαταράξει την εντατική κατάσταση σε μια περιοχή του υλικού γύρω από τη ρωγμή (π.χ. διαχωρισμός των επιφανειών). Σε συνθήκες καθαρού μηχανικού φορτίου η δημιουργία ρωγμών στη μήτρα των PMCs υλικών συμβαίνει κάτω από επαρκή μηχανική φόρτιση. Η ρωγμή πάντα ακολουθεί το δρόμο του ελάχιστου έργου.

Ø Αποστρωμάτωση(delamination): Είναι ο κύριος τρόπος αστοχίας στα πολύστρωτα υλικά (laminates).Οι εφαρμοσμένες μηχανικές τάσεις και η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζουν την ένταση και το βαθμό της ανάπτυξης του φαινομένου. Τα αποτελέσματα της αποστρωμάτωσης είναι:

α) ο λυγισμός (buckling) των ινών που προέρχεται από αξονικά φορτία ή

λόγω ταλαντώσεων, στο λυγισμό έχω στύλους και είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει ακαριαία και δε γνωρίζουμε πότε και πώς θα συμβεί,

β) η υποβάθμιση της δυσκαμψίας (stiffness degradation)και γ)η μείωση του χρόνου ζωής σε κόπωση.

Ø Αποκόλληση στα όρια της διεπιφάνειας(interfacial debonding): Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας μπορεί να αποκολληθεί εξαιτίας πολλών αιτιών. Ειδικότερα, πρέπει να υπάρχει μια ορθή τάση στις ίνες ή μια διατμητική τάση κατά μήκος των ινών προκειμένου να αστοχήσει ο δεσμός. Αυτές οι τάσεις μπορεί να δημιουργηθούν λόγω θραύσης των ινών ή λόγω ύπαρξης ρωγμής στη μήτρα. Εναλλακτικά, μπορεί να δημιουργηθούν λόγω προϋπάρχουσας ατέλειας στην επιφάνεια των ινών ή λόγω κακού προσανατολισμού της ίνας. Το μήκος της αποκόλλησης εξαρτάται από το χαρακτηριστικό μήκος της ατέλειας, που οφείλεται στην διαδικασία κατασκευής.

Ο καθένας δε εκ των τεσσάρων μηχανισμών μπορεί να δράσει είτε ατομικά στην περίπτωση απομονωμένου περιβάλλοντος (ιδανική περίπτωση) είτε συνεργατικά στην περίπτωση πιο σύνθετων συνθηκών.

2.4 Μηχανισμοί υποβάθμισης σύνθετων υλικών σε θερμοοξειδωτικό περιβάλλον

Οι πιο βασικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την επίδραση θερμοοξειδωτικού περιβάλλοντος είναι οι εξής:

1. Οξείδωση (oxidation)
2. Σχίσσιμο αλυσίδων (chain scission)
3. Θερμικά εισαγόμενες μικρορωγμές (thermal induced microcracking)
4. Δημιουργία επιπλέον σταυροδεσμών (further cross-linking)

Οξείδωση

Είναι μια αλυσωτή αντίδραση μέσω ελευθέρων ριζών. Η αντίδραση αρχίζει συνήθως με την απομάκρυνση ενός υδρογόνου και την προσθήκη στη δημιουργούμενη στο σκελετό της αλυσίδας ελεύθερης ρίζας ενός μορίου οξυγόνου και δημιουργίας μιας ρίζας υπεροξειδίου.

Οι ελεύθερες ρίζες μπορούν είτε να προϋπάρχουν ως αποτέλεσμα κάποιων ακαθαρσιών που έχουν απομείνει από τον πολυμερισμό είτε να εισαχθούν σε ένα υλικό μέσω διαφόρων ερεθισμάτων όπως το φως, η θερμότητα κ.α., η εισαγωγή αυτή

προκαλείται από το σπάσιμο των χημικών δεσμών όταν απορροφούν ενέργεια που υπερβαίνει την ενέργεια του δεσμού των μακρομορίων.

Η υποβάθμιση των πολυμερών μέσω της οξείδωσης είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο που πραγματοποιείται σε δυο διαδοχικές διαδικασίες:

α) διάχυση του οξυγόνου

β) αντίδραση του οξυγόνου με τα μακρομόρια

Εφόσον ο βαθμός διάχυσης του οξυγόνου είναι πιο αργός από την αντίδραση του οξυγόνου με τα μακρομόρια τότε η διάχυση είναι αυτή που καθορίζει το ρυθμό υποβάθμισης. Η αντίδραση της οξείδωσης στο εσωτερικό του πολυμερούς στηρίζεται στη μεταφορά μάζας περιλαμβάνοντας τη διάχυση του οξυγόνου από το εξωτερικό του υλικού στο εσωτερικό και την διάχυση των προϊόντων της οξείδωσης από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του υλικού. Η οξείδωση αρχικά περιορίζεται σε μια επιφανειακή στρώση μέχρι να εμφανιστούν ρωγμές σε αυτή οι οποίες ανοίγουν νέα μονοπάτια για τη διείσδυση του οξυγόνου στο δείγμα με αποτέλεσμα την εκτεταμένη οξείδωση του υλικού.

Η οξείδωση είναι μη θερμικά αντιστρεπτή διαδικασία. Οι χημικές αλλαγές που συμβαίνουν κατά την οξείδωση του πολυμερούς χαρακτηρίζονται από τη μείωση του μοριακού βάρους σαν συνέπεια του σπασίματος των χημικών δεσμών και σαν συνέπεια της απώλειας βάρους που συμβαίνει λόγω της απομάκρυνσης των μικρού μοριακού βάρους πτητικών ουσιών (outgasing).

Κατά την οξείδωση συμβαίνει σχίσιμο των μοριακών αλυσίδων που μειώνει το μοριακό βάρος και αλλάζει την πυκνότητα των σταυροδεσμών στα θερμοσκληρυνόμενα. Η οξείδωση στην επιφάνεια μιας στρώσης συνήθως οδηγεί σε μείωση της τοπικής πυκνότητας και σε απώλεια βάρους τα οποία συνεισφέρουν στη συστολή του οξειδωμένου στρώματος γεννώντας εφελκυστικές τάσεις και πιθανώς ρωγμές.

Καθώς οι ρωγμές διαδίδονται στην επιφάνεια και σε μια ευρύτερη περιοχή, σχηματίζονται νέες οξειδωμένες επιφάνειες γύρω από την κορυφή της ρωγμής.

Γενικά, η οξείδωση επηρεάζει τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης λόγω της μείωσης του μοριακού βάρους και της αλλαγής της πυκνότητας των σταυροδεσμών στα θερμοσκληρυνόμενα.

Σε πειράματα θερμικής γήρανσης σε μονής κατεύθυνσης υβριδικές ράβδους αποτελούμενες από ίνες άνθρακα ως πυρήνα (CF) και ίνες γυαλιού ως κέλυφος (GF) διαπιστώθηκε πως ο βαθμός μείωσης του βάρους του συνθέτου αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού του οξυγόνου στο περιβάλλον, ένδειξη πως η απώλεια βάρους οφείλεται κυρίως στο μηχανισμό της οξείδωσης. Επίσης διαπιστώθηκε πως η οξείδωση της μήτρας είναι υπεύθυνη για την αλλαγή στο μέτρο ελαστικότητας (E) και για την μείωση της ανθεκτικότητας του υλικού.

Μελέτες της περιβαλλοντικής γήρανσης ενός κυανεστέρα (Fiberite 954-2) και μιας θερμοπλαστικής ημικρυσταλλικής ρητίνης (Fiberite ITX) οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η ευθραυστότητα των υλικών αυξάνεται με αύξηση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στο περιβάλλον. Με τη χρήση ηλεκτρονικού

μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η οξειδωση μπορεί να επιφέρει το σχηματισμό μικρορωγμών στο υλικό.

Σχίσσιμο αλυσίδων

Παρατηρείται όταν η θερμική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για την διατήρηση των ομοιοπολικών δεσμών. Τα αποτελέσματα του παραπάνω μηχανισμού είναι η μείωση του μοριακού βάρους και η αλλαγή στην πυκνότητα των σταυροδεσμών του υλικού. Κατά συνέπεια προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης και μείωση του βάρους του υλικού.

Στα συμπεράσματα αυτά κατέληξαν οι ερευνητές από πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης που υλοποίησαν σε σύνθετο υλικό με μήτρα κυανεστέρα και με μονής κατεύθυνσης ίνες άνθρακα.

Θερμικά εισαγόμενες μικρορωγμές

Προκαλούνται κυρίως από την παρουσία των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής ίνας-μήτρας που γεννούν εφελκυστικές τάσεις στη μήτρα. Η παρουσία των παραμενουσών τάσεων από τον πολυμερισμό αυξάνει την τάση του υλικού για μικρορωγμές. Η επιπλέον επιφάνεια που έχει δημιουργηθεί από το σχηματισμό και την ανάπτυξη των ρωγμών μέσα στο σύνθετο οδηγεί στην απώλεια βάρους. Επίσης η παρουσία ρωγμής στη μήτρα μπορεί να οδηγήσει στην αποκόλληση στα όρια της διεπιφάνειας. Όλα τα προαναφερθέντα έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Δημιουργία επιπλέον σταυροδεσμών

Προκαλούνται από την παρουσία υψηλών θερμοκρασιών και οδηγούν στην αύξηση της ψαθυρότητας και συσχετίζονται με αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Στα συμπεράσματα αυτά κατέληξαν οι ερευνητές με χρήση υπολογιστικών μοντέλων που ανέπτυξαν για τη μελέτη των μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων που προέρχονταν από την επιπλέον δημιουργία σταυροδεσμών και την τάση των θερμοσκληρυνόμενων συστημάτων να ψαθυροποιούνται κατά τη διάρκεια θερμικής γήρανσης.

2.5 Μηχανισμοί υποβάθμισης σύνθετων υλικών σε υγροθερμικό περιβάλλον

Οι πιο βασικοί μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα κατά την επίδραση υγροθερμικού περιβάλλοντος είναι οι εξής:

1. Πλαστικοποίηση (plasticization)
2. Υδρόλυση (hydrolysis)
3. Ρωγμάτωση λόγω τάσεων και επιθετικού περιβάλλοντος ESCC (environmental stress corrosion cracking)

4. Ωσμωτική ρωγμάτωση (Osmotic cracking)

Πλαστικοποίηση

Συμβαίνει όταν μόρια νερού μπορούν να εισέλθουν στη δομή να αυξήσουν τις ενδομοριακές αποστάσεις (αύξηση ελεύθερου όγκου) και ως εκ τούτου να μειώσουν την ελκτική δύναμη μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Η πλαστικοποίηση θεωρείται ότι δημιουργεί τριχοειδή φαινόμενα στα σύνθετα πολυμερή. Η πλαστικοποίηση της μήτρας προκαλεί πλαστική παραμόρφωση με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης. Επίσης πρέπει να αναφερθεί πως ο μηχανισμός αυτός είναι αντιστρεπτός.

Πειράματα υδροθερμικής γήρανσης που πραγματοποιήθηκαν στους 25 οC σε πολυεστέρες και βινυλεστέρες με ενίσχυση γυαλιού, έδειξαν ότι η μείωση της αντοχής σε εφελκυσμό ήταν αποτέλεσμα της πλαστικοποίησης της μήτρας.

Υδρόλυση

Είναι η χημική προσβολή από τα απορροφούμενα μόρια νερού στα μακρομόρια του πολυμερούς. Η υδρόλυση είναι υπεύθυνη για το σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ των μακρομορίων όπως επίσης και για το σχηματισμό μορίων μικρού μοριακού βάρους. Οδηγεί σε χημική υποβάθμιση των δεσμών στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, αυξάνει την διαφυγή (leaching out) των εναπομεινουσών εποξειδικών ρητινών και του σκληρυντή που τυχόν έχει μείνει χωρίς να αντιδράσει ύστερα από πολυμερισμό. Λόγω του σπασίματος των δεσμών μεταξύ των μακρομορίων που επιφέρει η υδρόλυση, οδηγεί στη μείωση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης.

Επίσης, κατά τη διάρκεια του μηχανισμού αυτού, παρατηρούνται μεγάλες αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών εξαιτίας των ρωγμών και των φουσκάλων που δημιουργούνται. Οι φουσκάλες είναι ρωγμές που διαδίδονται κυρίως παράλληλα με την επιφάνεια, κάτω από το επίπεδο επίστρωσης (gel-coat). Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως ο μηχανισμός αυτός είναι μη αντιστρεπτός.

Οι ερευνητές που μελέτησαν τις επιπτώσεις της εμβάπτισης σε νερό σε ποικίλες θερμοκρασίες (30-100οC) δύο τύπων πολυεστέρων ενισχυμένων με ίνες γυαλιού και ύστερα από μετρήσεις των βαρών των δοκιμίων, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η απώλεια βάρους οφειλόταν στην εξαγωγή μικρών μορίων αποτέλεσμα της υδρόλυσης που λάμβανε χώρα κοντά στα άκρα των αλυσίδων.

ESCC

Είναι αποτέλεσμα της ψαθυρής θραύσης των ινών που βρίσκονται υπό τάση κάτω από την επιρροή επιθετικού περιβάλλοντος. Οι τάσεις μπορεί να οφείλονται σε παραμένουσες τάσεις από την διαδικασία πολυμερισμού ή από τάσεις που δημιουργούνται λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. υψηλές θερμοκρασίες). Με την παρουσία νερού το ESCC των ινών γυαλιού προκαλείται από υδρόλυση ενισχυόμενη από την ύπαρξη παραμεινουσών τάσεων.

Το νερό επιτίθεται στην επιφάνεια των ινών γυαλιού προωθώντας τη δημιουργία κοιλοτήτων και παράγοντας ελεύθερες ομάδες υδροξειδίων των αλκαλίων

που μπορούν να οδηγήσουν στην υποβάθμιση της δομής του γυαλιού. Το ESCC οδηγεί κυρίως σε υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών.

Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε πολυεστέρες και βινυλεστέρες ενισχυμένους με ίνες γυαλιού παρατηρήθηκε πως οι βινυλεστέρες αποτελούμενοι από δισφαινόλη-Α είναι λιγότερο ευάλωτοι στην υδρόλυση από ότι οι πολυεστέρες αντιστοίχως και στο μηχανισμό ESCC.

Ωσμωτική ρωγμάτωση

Είναι το φαινόμενο της διάδοσης των ρωγμών που οφείλεται στη σταδιακή ανάπτυξη της ωσμωτικής πίεσης μέσα στις μικροφουσκάλες που έχουν προκληθεί από το υγρό περιβάλλον. Αναγκαίες συνθήκες για την έναρξη του μηχανισμού είναι η παρουσία νερού στις ρωγμές και η παρουσία «διαλυμένης ύλης-solute» στις μικρορωγμές.

Ο μηχανισμός της ωσμωτικής ρωγμάτωσης απαρτίζεται από δυο στάδια, την έναρξη και την διάδοση.

- Ø Έναρξη: για να επέλθει η έναρξη πρέπει να έχει προηγηθεί ο μηχανισμός της υδρόλυσης. Τα παράγωγά της είναι μικρά οργανικά μόρια όπως γλυκόλη ή οξέα. Τα τελευταία συσσωρεύονται σε κάποια περιοχή του πολυμερικού δικτύου λόγω χαμηλής διάχυσης (σε σύγκριση με το ρυθμό διάχυσης του νερού και το ρυθμό ανάπτυξής τους). Επειδή είναι αξιοσημείωτα πιο πολικά από το πολυμερές η συγκέντρωσή τους πρέπει να 'ναι μικρή. Ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο εξαρτάται από το βαθμό υδρόλυσης στο σύστημα επέρχεται κορεσμός και υφίσταται διαχωρισμό φάσεων. Αυτή η πληθώρα από οργανικά μόρια είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία μικροθυλάκων. Λόγω της υδροφιλικότητας που παρουσιάζουν επιτρέπουν τη ροή νερού μέσα στις μικροκοιλότητες μέχρι που αυξάνει η ωσμωτική πίεση σε τέτοιο βαθμό που ξεκινά η διάδοση της ωσμωτικής ρωγμάτωσης.
- Ø Διάδοση: το πολυμερικό στρώμα που διαχωρίζει τη ρωγμή από το λουτρό παίζει το ρόλο της ημιπερατής μεμβράνης, η σχέση Van't Hoff περιγράφει τη σταδιακή ανάπτυξη της ωσμωτικής πίεσης Π στην κοιλότητα:

$$\Pi = kT \sum C_i \quad (\text{εξισ. 2.1})$$

Όπου:

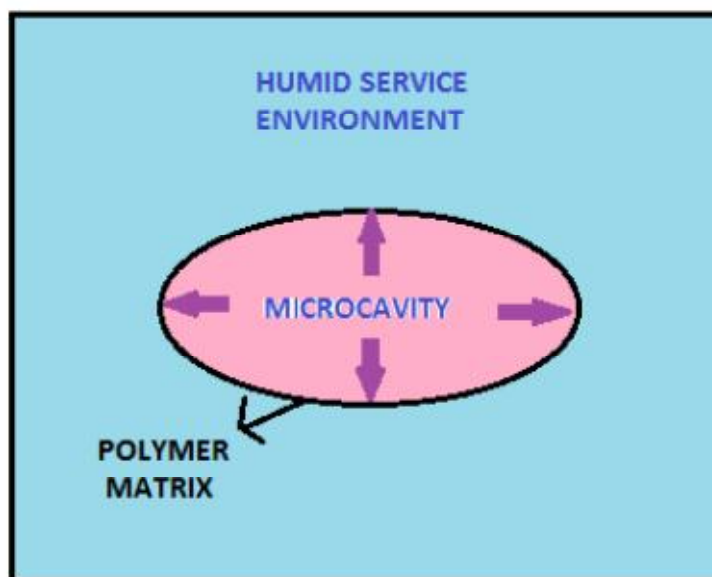
k η σταθερά του Boltzmann

T η θερμοκρασία

C_i η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στην κοιλότητα

Στην περίπτωση που η ωσμωτική πίεση Π γίνει υψηλότερη από την κρίσιμη τιμή της ανθεκτικότητας του πολυμερούς πραγματοποιείται η διάδοση της ρωγμής.

Στο Σχήμα 2.1 δίνεται μια γενική εικόνα για την διαδικασία της ωσμωτικής ρωγμάτωσης.



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση ωσμωτικής ρωγμάτωσης.

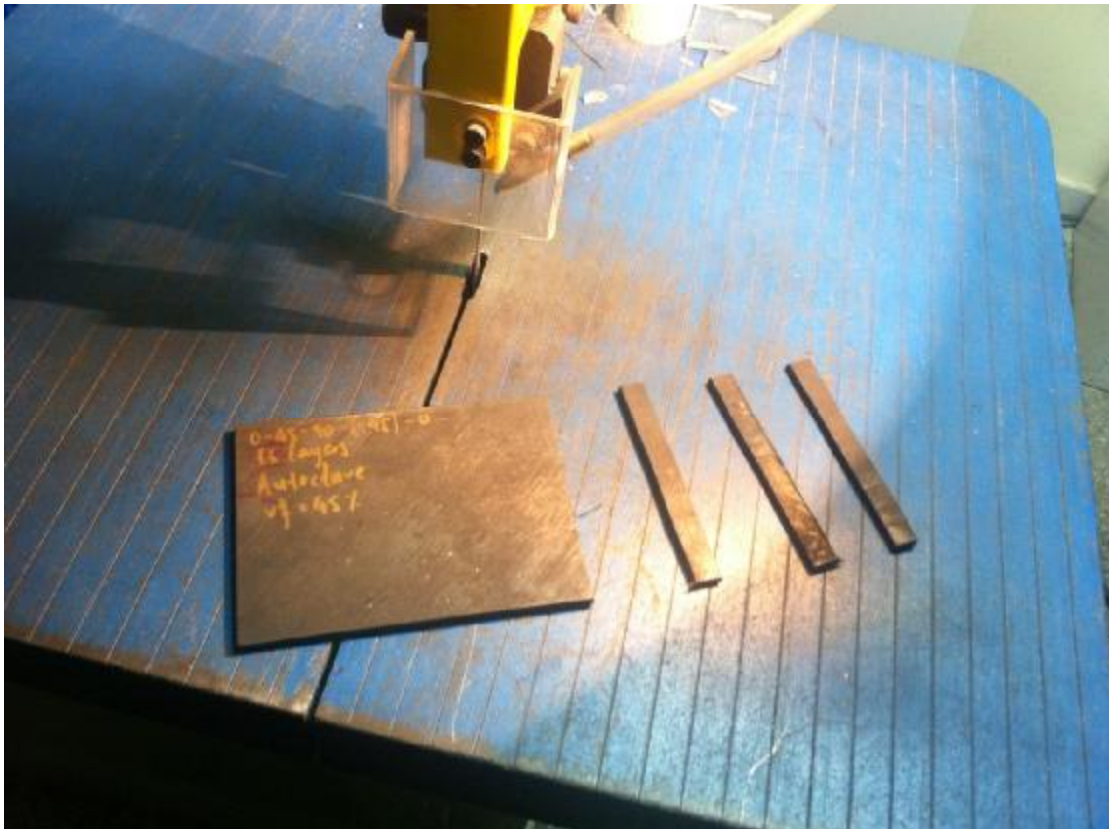
Σε πειράματα υγροθερμικής γήρανσης που πραγματοποιήθηκαν σε δυο είδη πολυεστερικής ρητίνης διαπιστώθηκαν τα παραπάνω καθώς επίσης και ότι η ωσμωτική ρωγμάτωση ευθύνεται για την απώλεια βάρους που επέρχεται στο υλικό.

2.6 Προετοιμασία δειγμάτων

Μετά την κατασκευή των δοκιμίων, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους με ηλεκτρονικό παχύμετρο. Όλα τα μήκη εξ ορισμού είναι ίδια σύμφωνα με το πρότυπο STM, που έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενη ενότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο STM ως μήκος ορίζεται η απόσταση των κέντρων των δύο κάτω άκρων (σφαιρικής διατομής) της εφελκυστικής μηχανής που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα εφελκυσμού, η οποία απόσταση μετρήθηκε $L=40,87\text{mm}$.

Το πάχος, από δοκίμιο σε δοκίμιο παρουσιάζει μία διακύμανση από 3,9mm έως 4,6mm, παρόλα αυτά σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά δεν μεταβαλλόταν αρκετά, οπότε και θεωρήθηκε ως σταθερή τιμή.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, το πλάτος μετρήθηκε ως μέσος όρος τριών σημείων κατά μήκος του δοκιμίου και στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος τους. Σύμφωνα με τους παρακάτω πίνακες, μία τέτοια προσέγγιση κρίθηκε αναγκαία μιας και σε κάθε δοκίμιο το πλάτος παρουσιάζει μια διακύμανση που δεν μπορεί να ληφθεί ως αμελητέα.



Σχήμα 2.2 Διάφορα δείγματα.

Κάτωθι περιλαμβάνονται όλες οι διαστάσεις που μετρήθηκαν, τόσο για τα αρχικά δοκίμια, όσο και για τα υποβαθμισμένα δοκίμια για 6 εβδομάδες, σε συνθήκες εργαστηριακής και έντονης γήρανσης που αντιστοιχούν σε υποβάθμιση 28 μηνών φυσικής γήρανσης.

Πίνακας 2.1

πλεξη 90°	Στήλη1	μήκος (mm)	πάχος (mm)	πλάτος α (mm)	πλάτος β (mm)	πλάτος γ (mm)	μ.ο. πλατών (mm)
	δοκίμιο 1	40,87	4,46	11,11	11,03	11	11,04666667
	δοκίμιο 2	40,87	4,59	11,79	11,82	12,15	11,92
	δοκίμιο 3	40,87	4,45	12,74	12,88	12,62	12,74666667
	δοκίμιο 4	40,87	4,4	10,47	10,61	10,78	10,62

Στον πίνακα **2.1** παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για την πλέξη **90**. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 2.2

πλέξη 45°						
Στήλη1	μήκος	πάχος	πλάτος α	πλάτος β	πλάτος γ	μ.ο. πλατών
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
δοκίμιο 1	40,87	4,26	10,38	10,29	10,24	10,30333333
δοκίμιο 2	40,87	4,2	10,53	10,61	10,51	10,55
δοκίμιο 3	40,87	4,19	12,02	12,03	11,98	12,01
δοκίμιο 4	40,87	4,19	9,23	9,24	9,16	9,21

Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για την πλέξη 45. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.

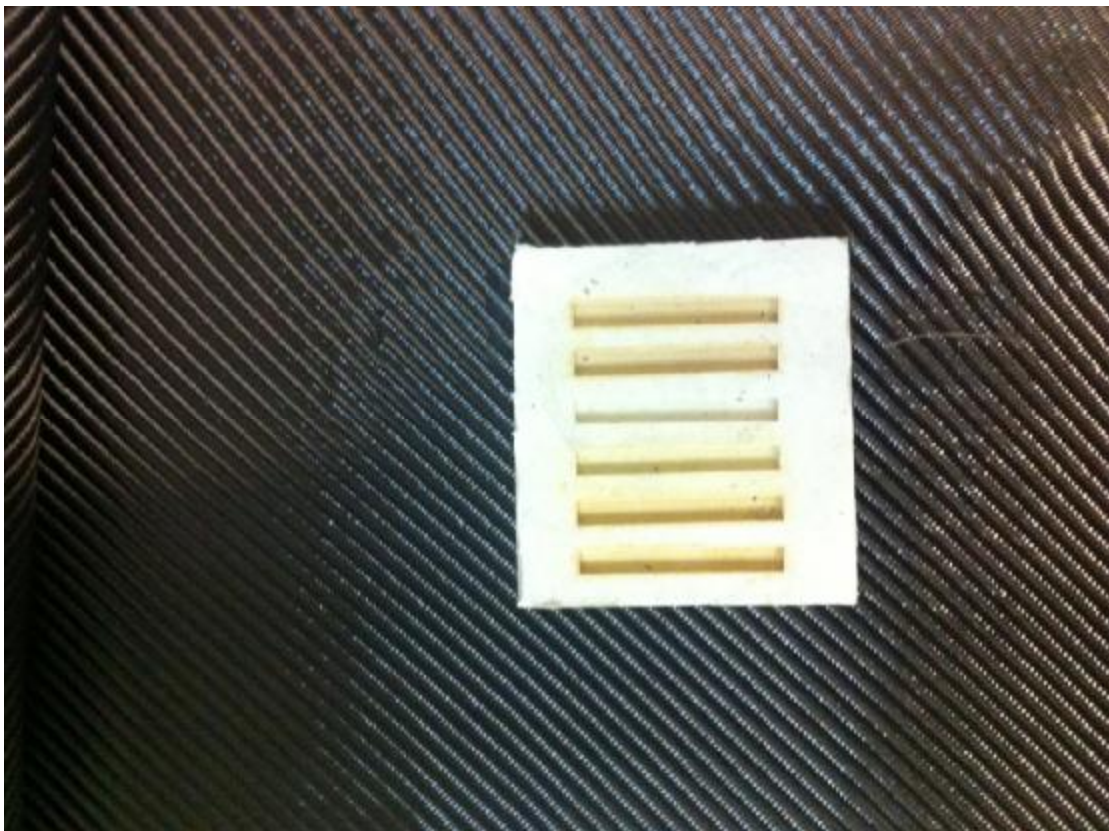
Πίνακας 2.3

Μήτρα						
Στήλη1	μήκος	πάχος	πλάτος α	πλάτος β	πλάτος γ	μ.ο. πλατών
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
δοκίμιο 1	40,87	3,9	10,4	10,42	10,52	10,44666667
δοκίμιο 2	40,87	3,93	10,32	10,25	10,24	10,27
δοκίμιο 3	40,87	3,91	10,7	10,53	10,58	10,60333333

Στον πίνακα 2.3 παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για τη μήτρα. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 2.3 Διάφορα δείγματα.



Σχήμα 2.4 Καλούπια.

Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας με τις διαστάσεις των υποβαθμισμένων δοκιμίων. Μία αρχική παρατήρηση είναι πως μετά την υποβάθμιση τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν μεταβολή στις διαστάσεις τους, σε σχέση με τα αρχικά δοκίμια. Επίσης διατηρείται μία ελαφρά κατανομή διαστάσεων, της τάξης των μερικών δεκάτων του χιλιοστού, απόλυτα φυσιολογική και αναμενόμενη των μεθόδων κατασκευής που επιλέχθηκαν.

Πίνακας 2.4

υποβαθμισμένη πλέξη 90°						
Στήλη1	μήκος	πάχος	πλάτος α	πλάτος β	πλάτος γ	μ.ο. πλατών
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
δοκίμιο 1	40,87	4,54	11,2	10,5	11,04	10,91333333
δοκίμιο 2	40,87	4,52	10,74	10,92	10,16	10,60666667
δοκίμιο 3	40,87	4,52	10,6	10,28	10,78	10,55333333
δοκίμιο 4	40,87	4,5	11,7	11,58	11,5	11,59333333

Στον πίνακα 2.4 παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των υποβαθμισμένων δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για την πλέξη 90. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 2.5

υποβαθμισμένη πλέξη 45°						
Στήλη1	μήκος	πάχος	πλάτος α	πλάτος β	πλάτος γ	μ.ο. πλατών
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
δοκίμιο 1	40,87	4,28	9,9	9,78	9,74	9,80666667
δοκίμιο 2	40,87	4,2	9,52	8	7,76	8,42666667
δοκίμιο 3	40,87	4,24	10,2	9,8	9,84	9,94666667
δοκίμιο 4	40,87	4,2	7,1	7,36	6,74	7,06666667

Στον πίνακα 2.5 παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των υποβαθμισμένων δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για την πλέξη 45. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 2.6

υποβαθμισμένη μήτρα						
Στήλη1	μήκος	πάχος	πλάτος α	πλάτος β	πλάτος γ	μ.ο. πλατών
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
δοκίμιο 1	40,87	4,1	10,98	10,9	10,5	10,79333333
δοκίμιο 2	40,87	4	10,5	10,8	10,9	10,73333333
δοκίμιο 3	40,87	3,96	9,74	10,4	10,2	10,11333333

Στον πίνακα 2.6 παρατίθενται το μήκος, το πάχος και το πλάτος των υποβαθμισμένων δοκιμίων καθώς και ο μέσος όρος αυτών για τη μήτρα. Το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σημεία για αποφυγή τυχόν ασυμμετριών που θα επηρεάσουν την πορεία της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 2.5 Διαδικασία κοκκοποίησης ρητίνης στο Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής



Σχήμα 2.6 Πλέξεις δοκιμίων στο Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής



Σχήμα 2.7 Κοπή δειγμάτων στο μηχανουργείο του Ερευνητικού Ινστιτούτου



Σχήμα 2.8 Ο κλίβανος που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής

2.7 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Η πειραματική διάταξη SEM (σχήμα 2.*) είναι ένας τύπος μικροσκοπίου ηλεκτρονίων με το οποίο απεικονίζεται η επιφάνεια δειγμάτων. Η επιφάνεια του δοκιμίου σαρώνεται με μια δέσμη ηλεκτρονίων και η ανακλώμενη (ή οπισθοσκεδαζόμενη) δέσμη ηλεκτρονίων συλλέγεται και ύστερα εμφανίζεται με τον ίδιο ρυθμό σάρωσης σε ένα σωλήνα καθοδικών ακτίνων (παρόμοιο με αυτόν της οθόνης της τηλεόρασης).



Σχήμα 2.9 Διάταξη SEM του Ερευνητικού Ινστιτούτου

Η εικόνα που εμφανίζεται στην οθόνη αναπαριστά τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω καθώς υπάρχει η δυνατότητα φωτογράφησής της. Από το SEM προκύπτουν εικόνες υψηλής ευκρίνειας των επιφανειών των δειγμάτων αποκαλύπτοντας λεπτομέρειες μεγέθους μικρότερου του 1 με 5 nm. Επιπλέον, λόγω της περιορισμένης σε εύρος επιβαλλόμενης δέσμης ηλεκτρονίων, τα μικρογραφήματα SEM έχουν μεγάλο βάθος το οποίο παράγει μια χαρακτηριστική τρισδιάστατη εμφάνιση, χρήσιμη για το χαρακτηρισμό της επιφάνειας ενός δείγματος. Μπορεί να επιτύχει μεγέθυνσή από 10 έως 500.000 φορές.



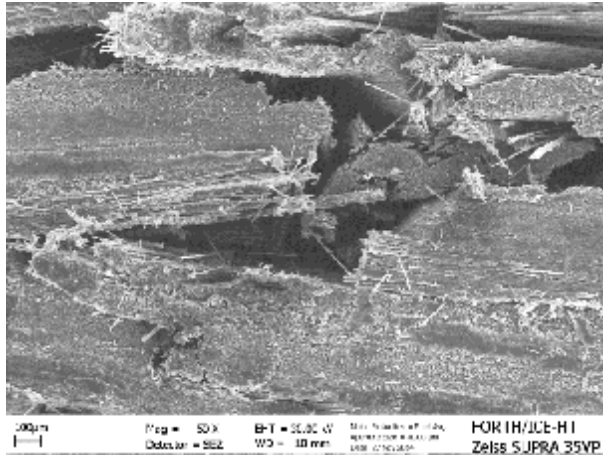
Σχήμα 2.10. Επιχρύσωση δοκιμίων



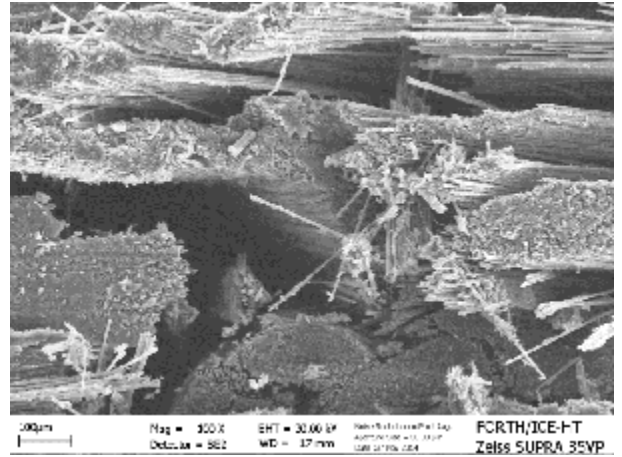
Σχήμα 2.11. Επιχρυσωμένα δοκίμια

Σημαντική προϋπόθεση για τη λειτουργία του SEM αποτελεί η ηλεκτρικά αγώγιμη επιφάνεια. Για το λόγο αυτό κατά την εξέταση μη αγώγιμων υλικών επιβάλλεται κατά την προετοιμασία των δειγμάτων η εναπόθεση ενός πολύ λεπτού

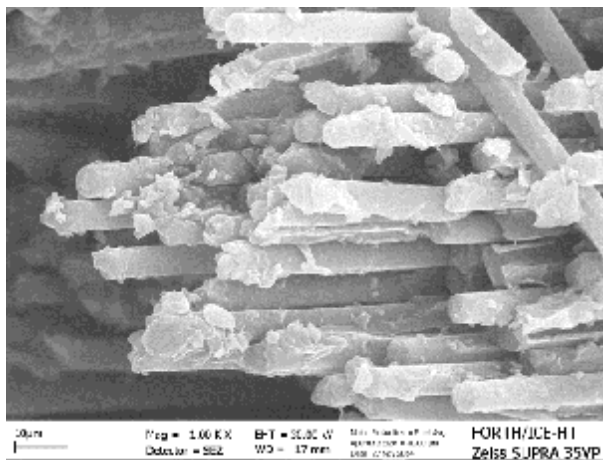
μεταλλικού επιχρίσματος. Η διαφορά τους με τα άλλα μικροσκόπια έγκειται στο γεγονός ότι έχουν την δυνατότητα να εστιάσουν σε μία συγκεκριμένη περιοχή του δείγματος και να προβούν σε λεπτομερή ανάλυση ενώ οι άλλοι τύποι μικροσκοπίων περιορίζονται στην απεικόνιση του δείγματος.



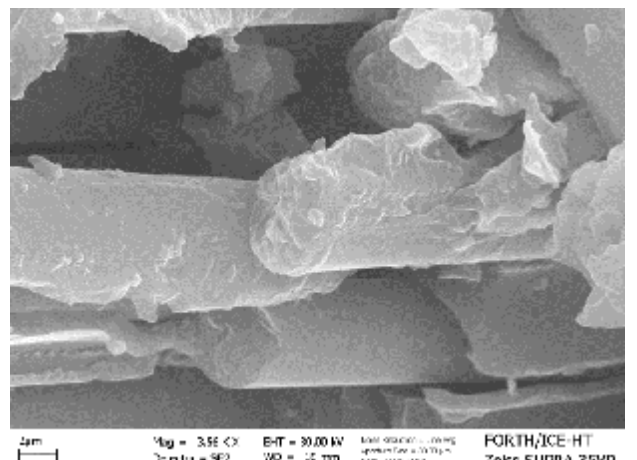
(α)



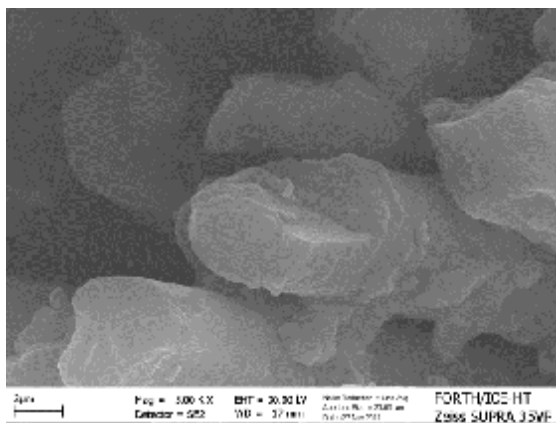
(β)



(γ)

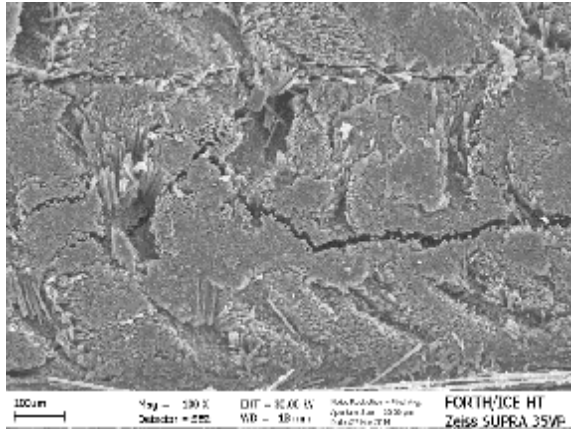


(δ)

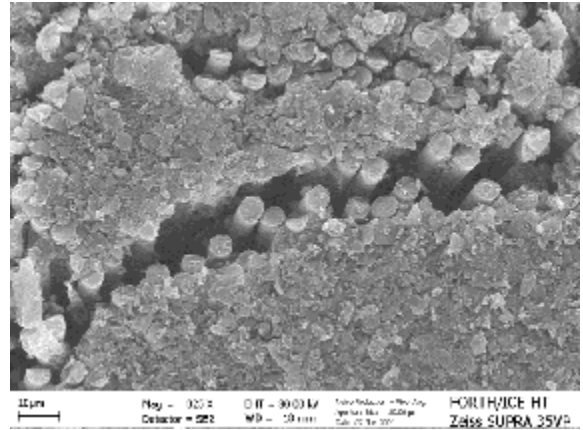


(ε)

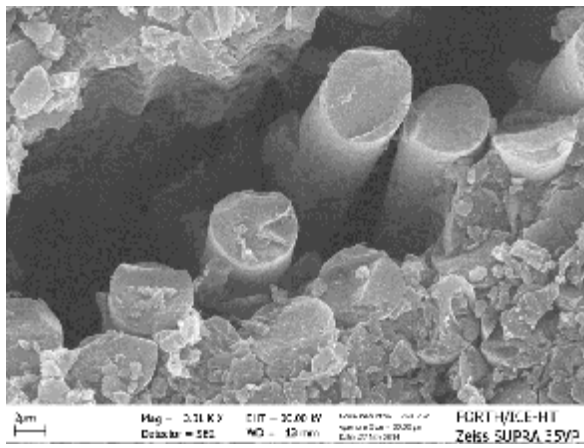
Εικόνες από SEM για πλέξη (κανονική) 90° για μεγεθύνσεις (α)50X(β)100X(γ)1000X(δ)3560X(ε)5000X



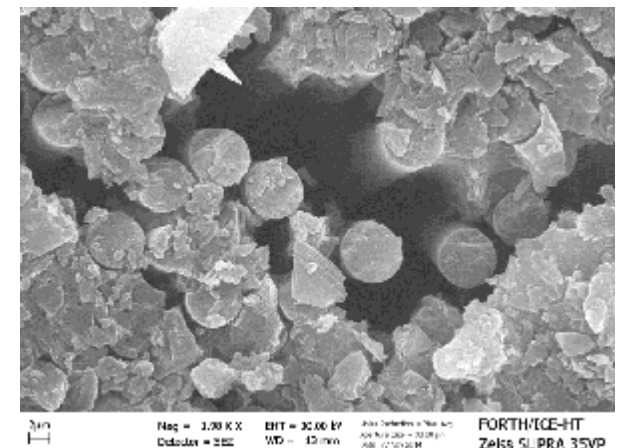
(α)



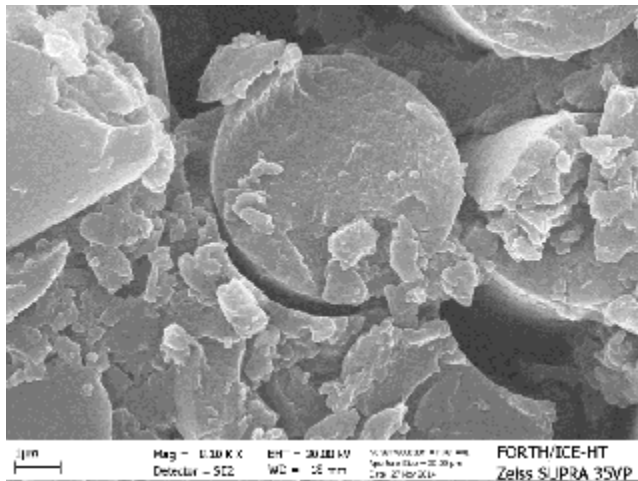
(β)



(γ)

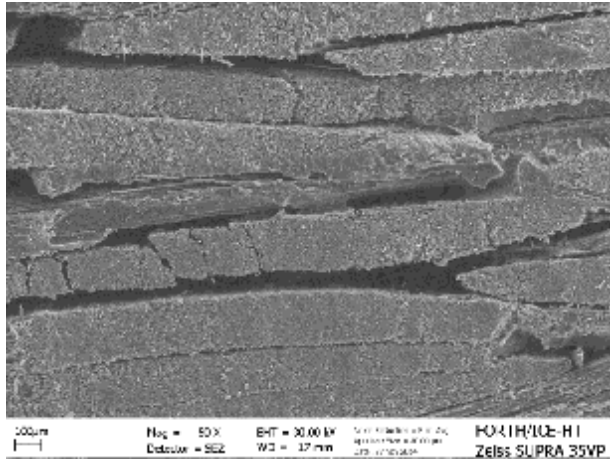


(δ)

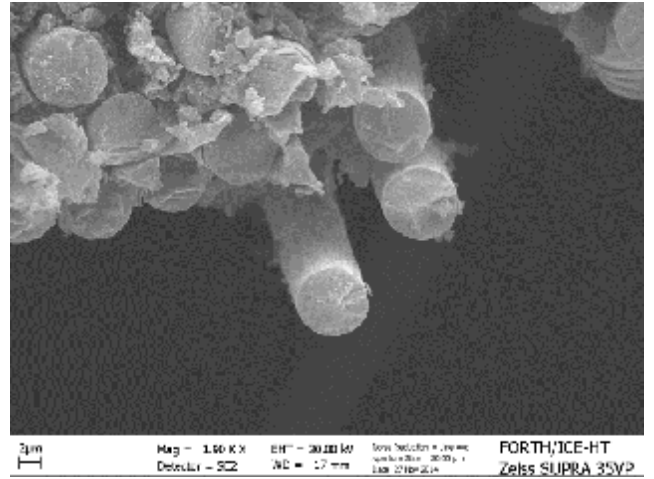


(ε)

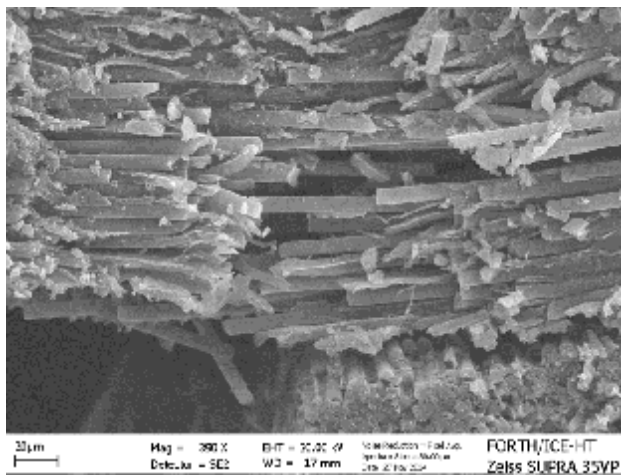
Εικόνες από SEM για πλέξη (υποβαθμισμένη) 90° για μεγεθύνσεις (α)100X(β)825X(γ)3010X(δ)1980X(ε)8100X



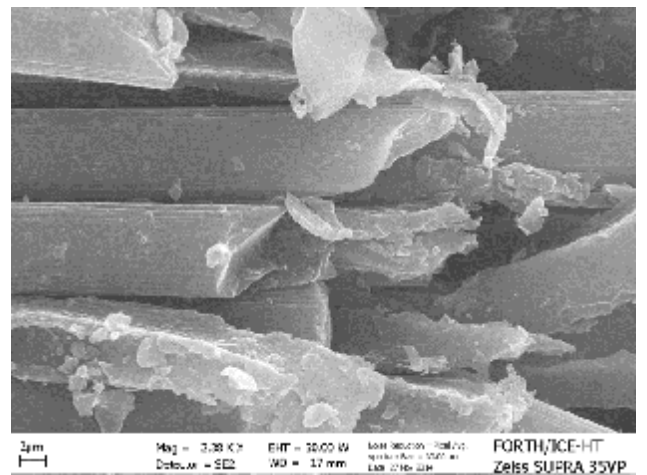
(α)



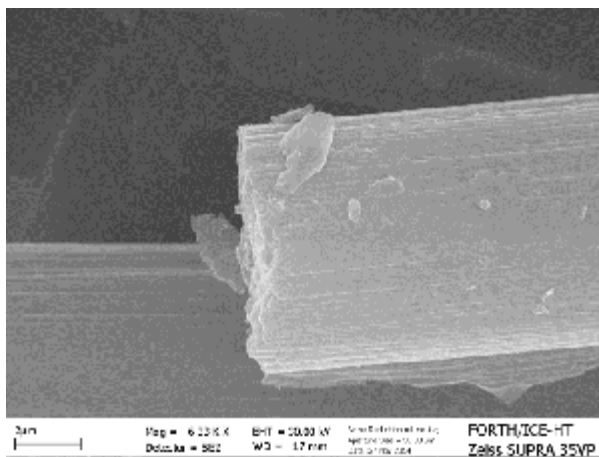
(β)



(γ)

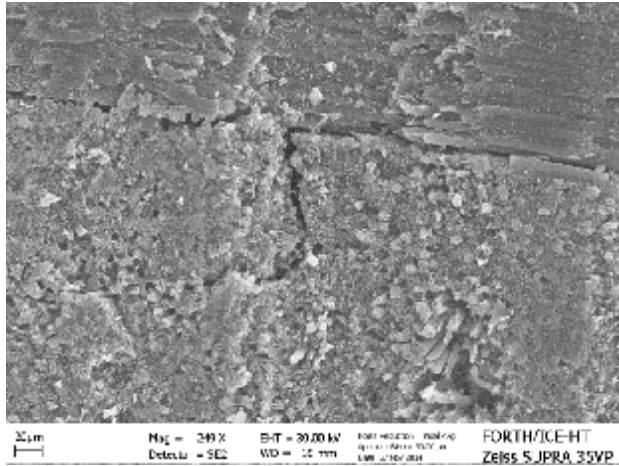


(δ)

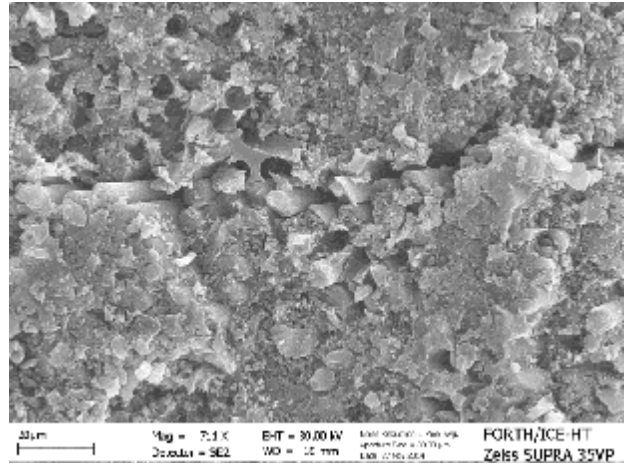


(ε)

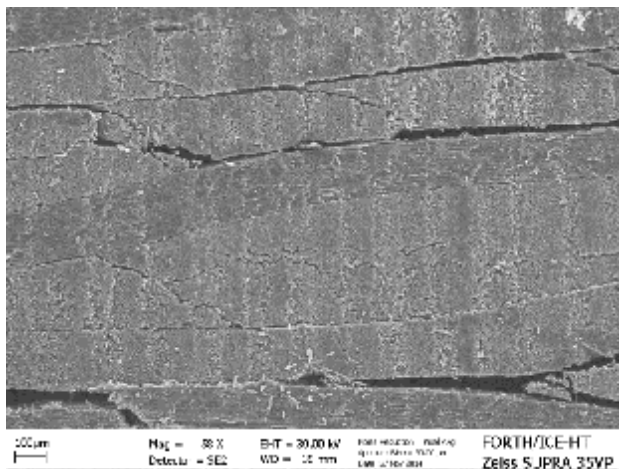
Εικόνες από SEM για πλέξη (κανονική)45° για μεγεθύνσεις (α)50X(β)1900X(γ)390X(δ)2380X(ε)6330X



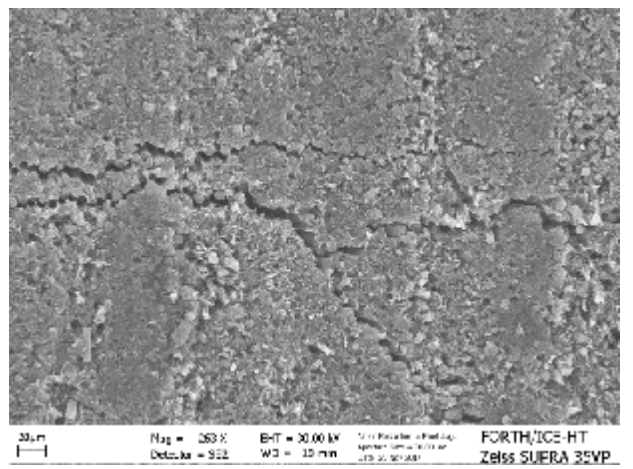
(α)



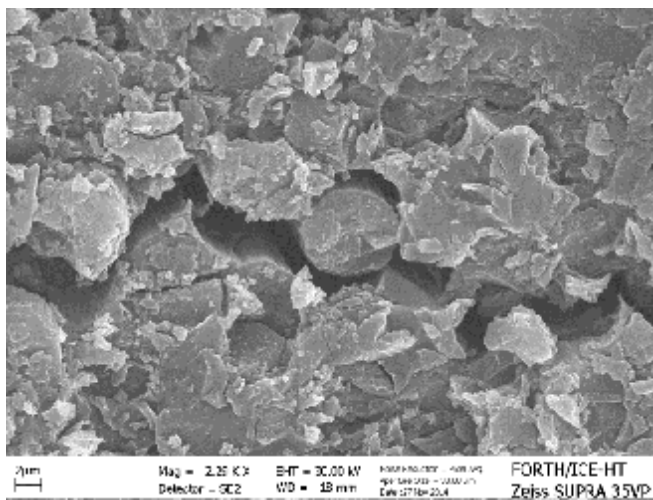
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Εικόνες από SEM για πλέξη (υποβαθμισμένη) 45° για μεγεθύνσεις (α)249X(β)711X(γ)58X(δ)263X(ε)2290X

2.8 Μέθοδος χαρακτηρισμού

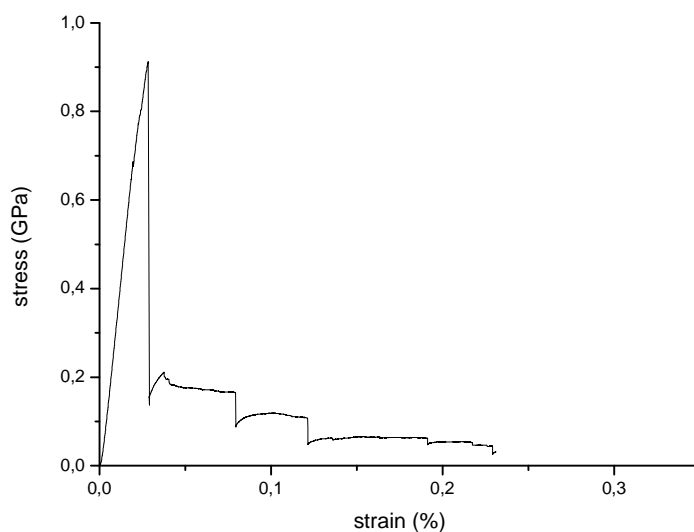
Η μέθοδος χαρακτηρισμού που χρησιμοποιήθηκε μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών γήρανσης ήταν η κάμψη τριών σημείων. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιείται προκειμένου να προσδιοριστεί η διαστρωματική αντοχή ενός σύνθετου υλικού σε διάτμηση. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας που έχουν ως ενίσχυση συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες με την προϋπόθεση πως οι ελαστικές τους ιδιότητες ισορροπούν και είναι συμμετρικές ως προς τον διαμήκη άξονα της δοκού.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των εσωτερικών διαστρωματικών τάσεων και της διαφορετικότητας των τρόπων αστοχίας που μπορούν να παρατηρηθούν στο δοκίμιο, δεν είναι ιδιαίτερα πιθανό να συσχετιστεί η αντοχή του συγκεκριμένου δοκιμίου με κάποια άλλη ιδιότητα του υλικού.

Ωστόσο, η αστοχία του υλικού επέρχεται κυρίως λόγω αστοχίας της μήτρας. Ενώ δηλαδή πρόκειται για πείραμα κάμψης το δοκίμιο λόγω των μικρών διαστάσεων που έχει αστοχεί λόγω διατμητικών τάσεων και όχι καμπτικών. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι τα αποτελέσματα του πειράματος είναι επαναλαμβανόμενα για δοκίμια με συγκεκριμένη γεωμετρία και συγκεκριμένο σύστημα υλικού.

Η διαστρωματική αντοχή σε διάτμηση που προσδιορίζεται από το πείραμα αυτό είναι χρήσιμη για τον έλεγχο της ποιότητας του υλικού. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη προγραμμάτων σχετικά με τις διαστρωματικές τάσεις. Η αντοχή που προσδιορίζεται δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο σχεδιασμού, μπορεί όμως να αξιοποιηθεί ως κριτήριο στη σύγκριση πειραματικών διαδικασιών και αποτελεσμάτων σύνθετων υλικών υπό τον όρο ότι αστοχούν με τον ίδιο κατά προσέγγιση τρόπο.

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος καταγράφεται η μετατόπιση της αρπάγης της πειραματικής διάταξης που είναι ίση με την μετατόπιση του δοκιμίου, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου. Μετά από επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει για κάθε δοκίμιο, διάγραμμα τάσης / παραμόρφωσης. Από το διάγραμμα αυτό, προσδιορίζεται η μέγιστη τάση και παραμόρφωση στο σημείο θραύσης της πρώτης στρώσης, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας. Επίσης απεικονίζονται και οι διαδοχικές θραύσεις των επόμενων στρώσεων που συνεχίζουν να φέρουν τάσεις, αν και αισθητά μικρότερες σε τιμή.

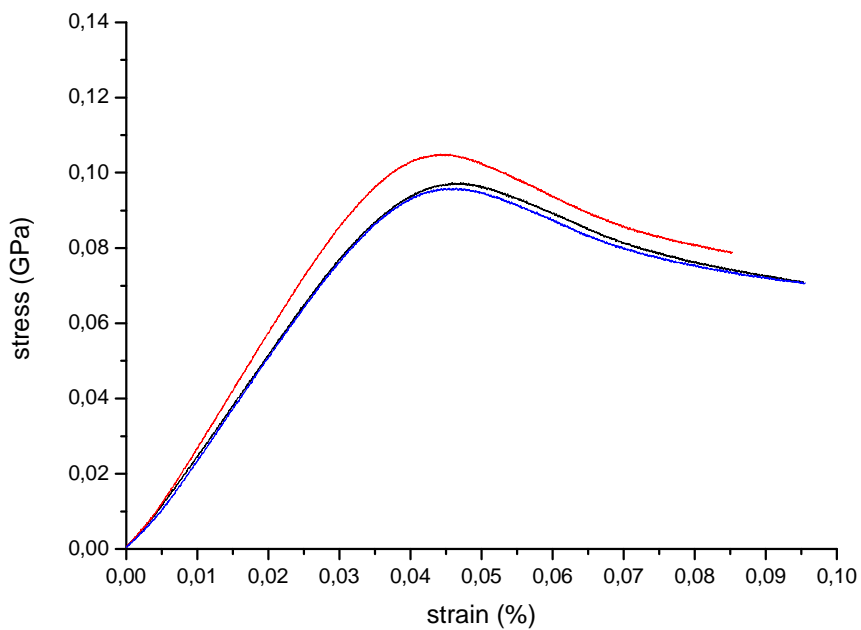


Σχήμα 2.9 Τυπικό διάγραμμα τάσης/παραμόρφωσης πολύστρωτου, όπου είναι εμφανή τόσο η μέγιστη τάση, όπου αστοχεί η πρώτη στρώση όσο και οι τάσεις που αστοχούν οι επόμενες στρώσεις.

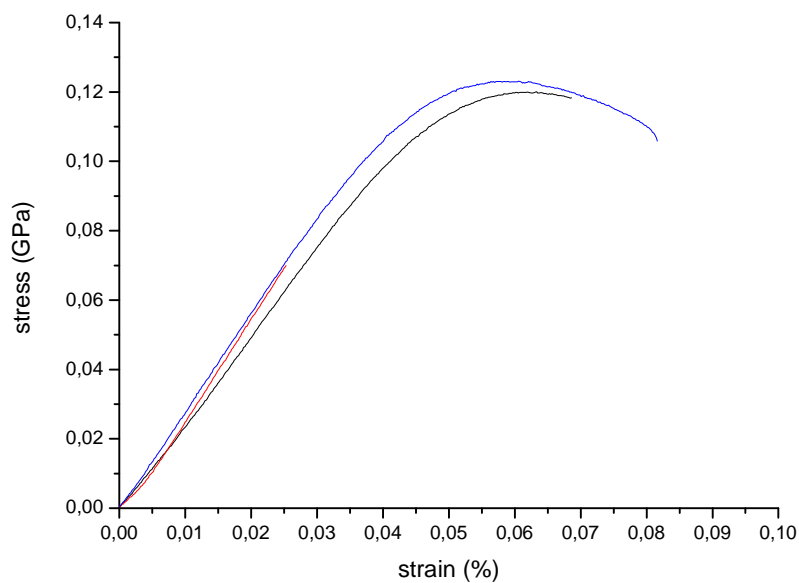
2.9 Πειραματικά αποτελέσματα

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι καμπύλες παραμόρφωσης-τάσης για τρία διαφορετικά δείγματα ρητίνης καθώς και για δύο τετράδες δειγμάτων σύνθετων υλικών, η μία φτιαγμένη σε πλέξη 45ο και η άλλη σε πλέξη 90ο. Για όλα τα δείγματα παρουσιάζονται αποτελέσματα που πάρθηκαν με και χωρίς γήρανση.

Είναι φανερό ότι τα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη αντοχή από τη ρητίνη. Επίσης όπως είναι φυσικό η γήρανση επηρεάζει δυσμενώς τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

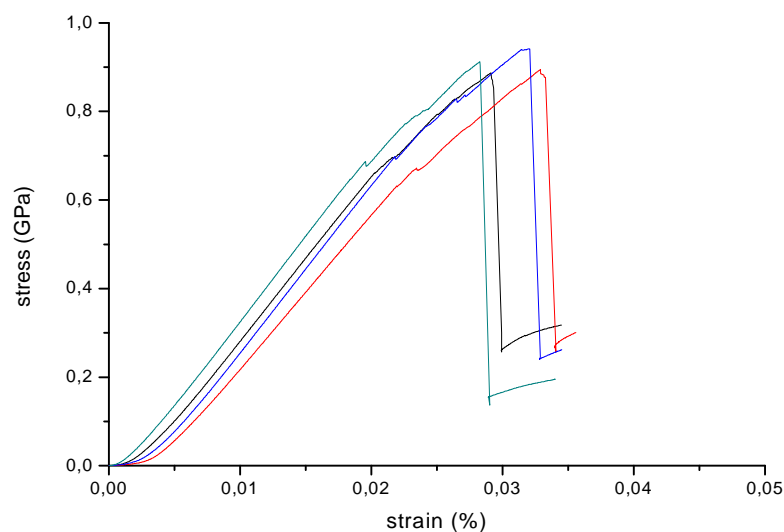


Σχήμα 2.10 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τρία διαφορετικά δείγματα ρητίνης.

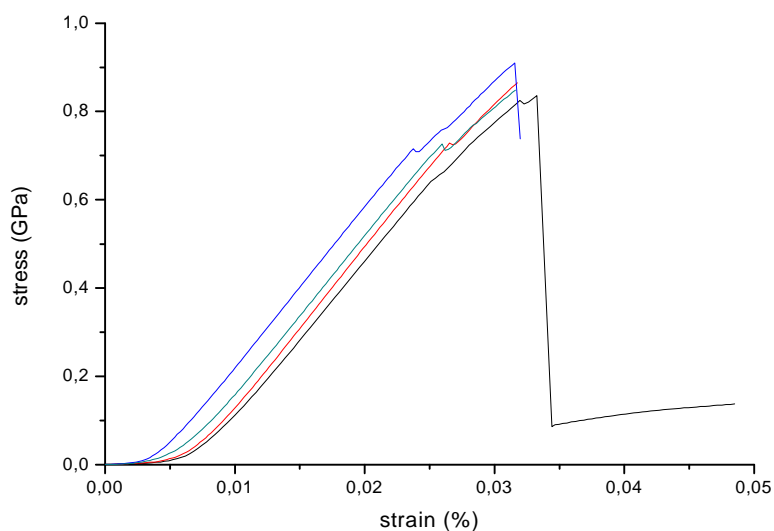


Σχήμα 2.11 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τρία διαφορετικά δείγματα γηρασμένης ρητίνης.

Παραπάνω παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης ρητίνης και ρητίνης υποβληθείσας σε γήρανση. Παρατηρούμε ότι η γήρανση επιδρά καταλυτικά στις μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης καθιστώντας την πιο ψαθηρή. Η ευλυγισία που συναντήσαμε στη μη γηρασμένη ρητίνη μηδενίστηκε ύστερα από τη γήρανση.

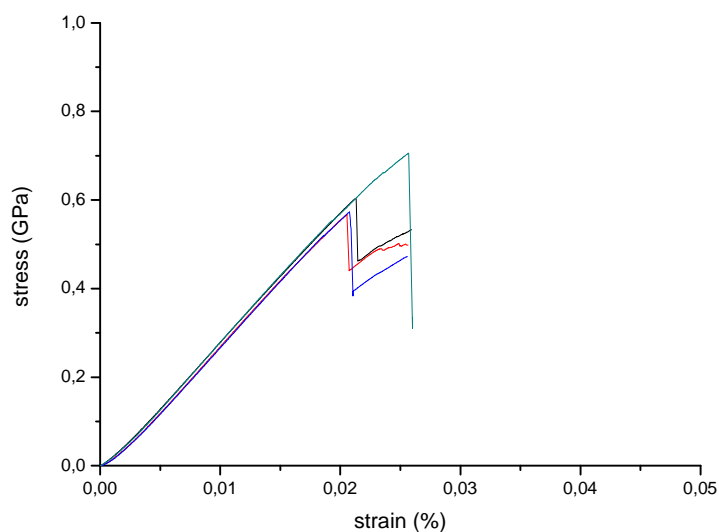


Σχήμα 2.12 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τέσσερα διαφορετικά δείγματα πλέξης 90°

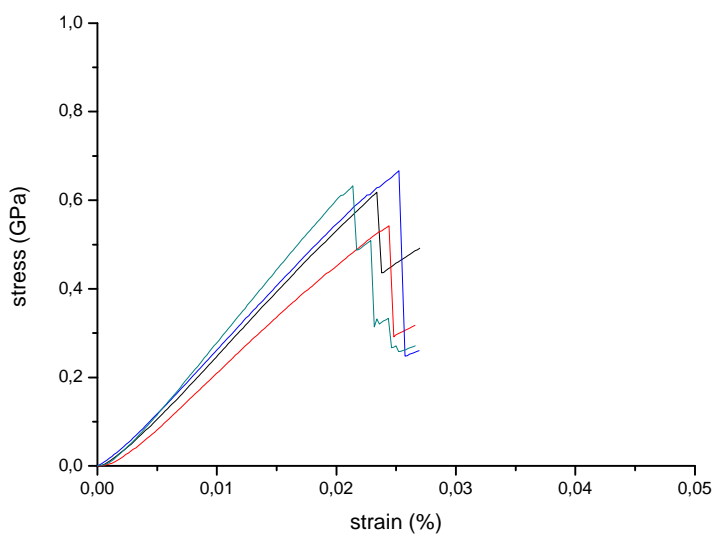


Σχήμα 2.13 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τέσσερα διαφορετικά δείγματα γηρασμένης πλέξης 90°

Στα δύο τελευταία διαγράμματα παρατηρούμε πως δεν έχουμε σημαντική μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Ιδιαίτερα εστίασαμε την προσοχή μας στα γηρασμένα δοκίμια που προς έκπληξή μας δεν παρουσίασαν αισθητή μείωση στις τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.14 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τέσσερα διαφορετικά δείγματα πλέξης 45°



Σχήμα 2.15 Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης για τέσσερα διαφορετικά δείγματα γηρασμένης πλέξης 45°

Στα διαγράμματα 2.14-2.15 παρατηρούμε πως δεν έχουμε σημαντική μεταβολή στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Ιδιαίτερα εστίασαμε την προσοχή μας στα γηρασμένα δοκίμια που προς έκπληξή μας δεν παρουσίασαν αισθητή μείωση στις τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης.

Πίνακας 2.7: Μέγιστη παραμόρφωση (%)

δοκίμιο	τιμή 1	τιμή 2	τιμή 3	τιμή 4	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	σχετικό σφάλμα
90	2.90	3.28	3.20	2.82	3.05	0.224	7.351
45	2.12	2.05	2.07	2.56	2.20	0.242	10.991
μήτρα	4.57	4.44	4.64	-	4.55	0.101	2.230
90 aged	3.32	3.54	3.15	3.35	3.34	0.160	4.784
45 aged	2.34	2.43	2.52	2.13	2.36	0.167	7.093
μήτρα aged	6.17	2.53	5.87	-	4.86	2.020	41.603

Σε αυτόν τον πίνακα τοποθετήθηκαν οι μέγιστες παραμορφώσεις όλων των δοκιμών γηρασμένων και μη. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το σχετικό σφάλμα αυτών των μετρήσεων, σύμφωνα με τους τύπους του STM.

Πίνακας 2.8: Μέγιστη Τάση (GPa)

δοκίμιο	τιμή 1	τιμή 2	τιμή 3	τιμή 4	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	σχετικό σφάλμα
90	0.886	0.894	0.941	0.911	0.9080	0.02434	2.6811
45	0.603	0.566	0.573	0.705	0.6118	0.06420	10.4952
Μήτρα	0.097	0.104	0.095	-	0.0987	0.004726	4.7897
90 aged	0.835	0.958	0.910	0.896	0.8998	0.05068	5.6324
45 aged	0.618	0.542	0.666	0.632	0.6145	0.05237	8.5219
μήτρα aged	0.119	0.0699	0.123	-	0.1040	0.02957	28.4421

Στον παραπάνω πίνακα τοποθετήθηκαν οι μέγιστες τάσεις όλων των δοκιμών γηρασμένων και μη. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το σχετικό σφάλμα αυτών των μετρήσεων, σύμφωνα με τους τύπους του STM.

Πίνακας 2.9: Μέτρο ελαστικότητας (GPa)

Δοκίμιο	τιμή 1	τιμή 2	τιμή 3	τιμή 4	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	σχετικό σφάλμα
90	30.3565	23.8443	27.3691	34.4366	29.0016	4.4958	15.5020
45	29.4221	29.0750	29.1477	29.6992	29.3360	0.2845	0.9700
Μήτρα	2.6191	2.9520	2.62461	-	2.7319	0.1906	6.9769
90 aged	29.5801	27.2044	32.2916	28.5593	29.4088	2.1541	7.3248
45 aged	27.8661	24.1900	28.2256	31.6119	27.9734	3.0347	10.8486
μήτρα aged	1.9302	2.9485	2.89309	-	2.5906	0.5726	22.1033

Στον παραπάνω πίνακα τοποθετήθηκε το μέτρο ελαστικότητας όλων των δοκιμίων γηρασμένων και μη. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και το σχετικό σφάλμα αυτών των μετρήσεων, σύμφωνα με τους τύπους του STM.

Πίνακας 2.10: Υποβάθμιση Υλικών

Υποβάθμιση %	μέτρου ελαστικότητας	μέγιστης τάσης	μέγιστης παραμόρφωσης
Ρητίνη	5.17	0.53	6.59
90	1.4	0.99	9.05
45	4.64	0.44	7.04

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε συγκεντρωτικά την % υποβάθμιση του μέτρου ελαστικότητας μέγιστης τάσης και μέγιστης παραμόρφωσης. Οι τιμές αφορούν τη ρητίνη, την πλέξη 90 και την πλέξη 45. Οι τιμές προέκυψαν από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\text{Normal} - \text{aged}}{\text{Normal}} \times 100\%$$

2.10 Γενικά συμπεράσματα

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, είναι δυνατόν να διεξαχθούν αρκετά συμπεράσματα για την υποβάθμιση των δοκιμίων, μετά από περιβαλλοντική γήρανση.

Και για τις δύο πλέξεις, παρατηρείται ελάχιστη μείωση στη μέγιστη τάση, μικρότερη του 1%, οπότε ουσιαστικά δεν μεταβάλλεται η μέγιστη τάση, παρόλη την

υποβάθμιση. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό αποτέλεσμα που συνηγορεί στην χρήση υλικών αντίστοιχα των παρασκευασμένων στον σχεδιασμό πολλών εφαρμογών που απαιτείται αμετάβλητη μέγιστη τάση.

Η επιπλέον παραμόρφωση ανάλογα των εφαρμογών μπορεί να είναι αποτρεπτική ή και ωφέλιμη. Σε πολλές εφαρμογές επί παραδείγματι, η ικανότητα του υλικού να φέρει τάσεις πέρα των τάσεων που έχει σχεδιαστεί να αντέχει, με επακόλουθο την επιπλέον παραμόρφωση του, είναι κρίσιμη.

Δε μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα μόνο συμπέρασμα για τη χρήση των πολύστρωτων υλικών.

Όσον αφορά την πλέξη 90° παρατηρείται ότι έχει μεγάλη αντοχή σε κάθετες δυνάμεις και καταπονήσεις. Η αντοχή αυτή μειώνεται όταν έχουμε δυνάμεις από πολλαπλές κατευθύνσεις.

Η πλέξη 45° ενδείκνυται για επιφάνειες που δέχονται δυνάμεις και καταπονήσεις από πολλαπλά σημεία.

Στον πίνακα Μέγιστης τάσης φαίνεται πως η πλέξη αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στις μηχανικές ιδιότητες. Ενδεικτικό παράδειγμα είναι ότι απόπλεξη σε πλέξη παρατηρούμε μια διαφορά στην τάση έως και 300MPa.

Επίσης συμπεραίνεται ότι η αστοχία των υλικών οφείλεται περισσότερο σε αδυναμία της ρητίνης και όχι των ινών άνθρακα. Αυτό το φαινόμενο γίνεται εντονότερο κατά τη γήρανση όπου η ρητίνη χάνει ολοένα και περισσότερο μηχανικές ιδιότητες. Οι εικόνες από το SEM είναι κατατοπιστικότερες σχετικά με το τι συμβαίνει στις εσωτερικές επιφάνειες των δοκιμίων.

Τέλος, σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας παρατηρείται, ανάλογα των πλέξεων μείωση του μέτρου ελαστικότητας από 1,4% για την πλέξη των 90, μέχρι 4,64% για την πλέξη των 45. Είναι μία ταπείνωση της τιμής του μέτρου ελαστικότητας, που δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Εν τούτοις, δεν καθίσταται αποτρεπτική ως μείωση, αν συνυπολογιστεί το γεγονός πως το μέτρο ελαστικότητας της ρητίνης είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη του συνθέτου υλικού, οπότε η διαφορά που προκύπτει, εξακολουθεί να είναι μία τάξη μέγεθος μεγαλύτερη της αρχικής.

2.11 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Κλείνοντας, για την διεξαγωγή ακόμη πιο ασφαλών συμπερασμάτων, η παρούσα μελέτη θα μπορούσε μελλοντικά να εμπλουτιστεί και με μεγαλύτερης διάρκειας υποβάθμιση, αλλά και διαφορετικού τύπου υποβαθμίσεις καθώς και να μελετηθούν δοκίμια με διαφορετικές πλέξεις, που συναντώνται σε πλειάδα εφαρμογών και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Βιβλιογραφία

1. **Jr., Callister D. William.** *Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών.* s.l. : Τζιολα, 2008.
2. **Αντρέας, Δημαρογκώνας.** *Η Ιστορία της τεχνολογίας I και II.* s.l. : Μακεδονικές Εκδόσεις, 2008.
3. **Γ., Παπανικολάου.** *Συνθετα Υλικά.* s.l. : Κλειδάριθμος, 2007.
4. **Committee, ASM International Handbook.** *Metals Handbook Vomule 21.* 2001.
5. **Adam, Quilter.** *Composites in Aerospace Applications.* s.l. : ESDU International.
6. **Deo R.B., Starnes J. H. Holzwarth R.C.** *Low Cost Composite Materials and Structures for Aircraft Applications.* 2001.
7. **Association, Federal Aviation.** Airport Technology, Research and Development Branch. <http://www.airporttech.tc.faa.gov>. [Ηλεκτρονικό] 2010.



Designation: D7264/D7264M – 07

Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D7264/D7264M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method determines the flexural stiffness and strength properties of polymer matrix composites.

1.1.1 *Procedure A*—A three-point loading system utilizing center loading on a simply supported beam.

1.1.2 *Procedure B*—A four-point loading system utilizing two load points equally spaced from their adjacent support points, with a distance between load points of one-half of the support span.

Note: 1—Unlike Test Method D6272, which allows loading at both one-third and one-half of the support span, in order to standardize geometry and simplify calculations this standard permits loading at only one-half the support span.

1.2 For comparison purposes, tests may be conducted according to either test procedure, provided that the same procedure is used for all tests, since the two procedures generally give slightly different property values.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials

D2344/D2344M Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
D3878 Terminology for Composite Materials

D5229/D5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

D5687/D5687M Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation

D6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending

D6856 Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E18 Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials

E122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With Specified Precision, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

E177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods

E456 Terminology Relating to Quality and Statistics

E1309 Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases

E1434 Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases

2.2 Other Documents:

ANSI Y14.5-1999 Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric³

ANSI B46.1-1995 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D3878 defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology E6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E456 and Practice E177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D3878 shall have precedence over the other documents.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 1, 2007. Published April 2007. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2006 as D7264/D7264M – 06. DOI: 10.1520/D7264_D7264M-07.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, http://www.ansi.org.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 flexural strength, n —the maximum stress at the outer surface of a flexure test specimen corresponding to the peak applied force prior to flexural failure.

3.2.2 flexural modulus, n —the ratio of stress range to corresponding strain range for a test specimen loaded in flexure.

3.3 Symbols:

- b = specimen width
- CV = sample coefficient of variation, in percent
- E_f^{chord} = flexural chord modulus of elasticity
- E_f^{secant} = flexural secant modulus of elasticity
- h = specimen thickness
- L = support span
- m = slope of the secant of the load-deflection curve
- n = number of specimens
- P = applied force
- s_{n-1} = sample standard deviation
- \bar{x} = measured or derived property
- \bar{x} = sample mean
- δ = mid-span deflection of the specimen
- ϵ = strain at the outer surface at mid-span of the specimen
- σ = stress at the outer surface at mid-span of the specimen

4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section, supported as a beam, is deflected at a constant rate as follows:

4.1.1 Procedure A—The bar rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1).

4.1.2 Procedure B—The bar rests on two supports and is loaded at two points (by means of two loading noses), each an equal distance from the adjacent support point. The distance between the loading noses (that is, the load span) is one-half of the support span (see Fig. 2).

4.2 Force applied to the specimen and resulting specimen deflection at the center of span are measured and recorded until the failure occurs on either one of the outer surfaces, or the deformation reaches some pre-determined value.

4.3 The major difference between four-point and three-point loading configurations is the location of maximum bending moment and maximum flexural stress. With the four-point configuration the bending moment is constant between the central force application members. Consequently, the maximum flexural stress is uniform between the central force application members. In the three-point configuration, the maximum flexural stress is located directly under the center

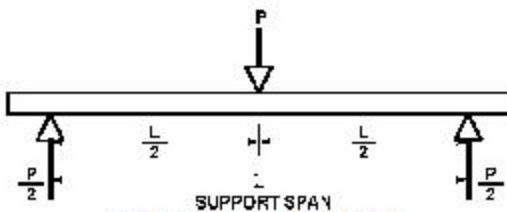


FIG. 1 Procedure A—Loading Diagram

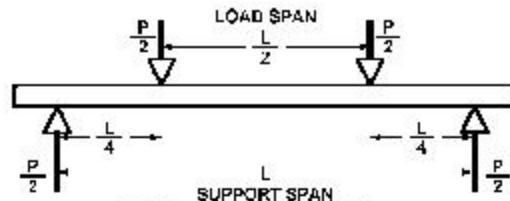


FIG. 2 Procedure B—Loading Diagram

force application member. Another difference between the three-point and four-point configurations is the presence of resultant vertical shear force in the three-point configuration everywhere in the beam except right under the mid-point force application member whereas in the four-point configuration, the area between the central force application members has no resultant vertical shear force. The distance between the outer support members is the same as in the equivalent three-point configuration.

4.4 The test geometry is chosen to limit out-of-plane shear deformations and avoid the type of short beam failure modes that are interrogated in Test Method D2344/D2344M.

5. Significance and Use

5.1 This test method determines the flexural properties (including strength, stiffness, and load/deflection behavior) of polymer matrix composite materials under the conditions defined. Procedure A is used for three-point loading and Procedure B is used for four-point loading. This test method was developed for optimum use with continuous-fiber-reinforced polymer matrix composites and differs in several respects from other flexure methods, including the use of a standard span-to-thickness ratio of 32:1 versus the 16:1 ratio used by Test Methods D790 (a plastics-focused method covering three-point flexure) and D6272 (a plastics-focused method covering four-point flexure).

5.2 This test method is intended to interrogate long-beam strength in contrast to the short-beam strength evaluated by Test Method D2344/D2344M.

5.3 Flexural properties determined by these procedures can be used for quality control and specification purposes, and may find design applications.

5.4 These procedures can be useful in the evaluation of multiple environmental conditions to determine which are design drivers and may require further testing.

5.5 These procedures may also be used to determine flexural properties of structures.

6. Interferences

6.1 Flexural properties may vary depending on which surface of the specimen is in compression, as no laminate is perfectly symmetric (even when full symmetry is intended); such differences will shift the neutral axis and will be further affected by even modest asymmetry in the laminate. Flexural properties may also vary with specimen thickness, conditioning and/or testing environments, and rate of straining. When evaluating several datasets these parameters should be equivalent for all data in the comparison.

6.2 For multidirectional laminates with a small or moderate number of laminae, flexural modulus and flexural strength may be affected by the ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with extensional modulus, which is not stacking-sequence dependent.

6.3 The calculation of the flexural properties in Section 13 of this standard is based on beam theory, while the specimens in general may be described as plates. The differences may in some cases be significant, particularly for laminates containing a large number of plies in the $\pm 45^\circ$ direction. The deviations from beam theory decrease with decreasing width.

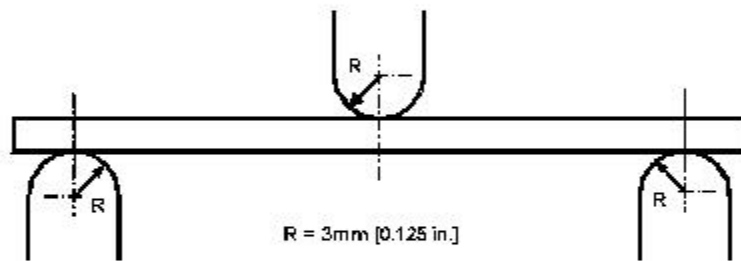
6.4 Loading noses may be fixed, rotatable or rolling. Typically, for testing composites, fixed or rotatable loading noses are used. The type of loading nose can affect results, since non-rolling paired supports on either the tension or compression side of the specimen introduce slight longitudinal forces and resisting moments on the beam, which superpose with the intended loading. The type of supports used is to be reported as described in Section 14. The loading noses should also uniformly contact the specimen across its width. Lack of

uniform contact can affect flexural properties by initiating damage by crushing and by non-uniformly loading the beam. Formulas used in this standard assume a uniform line loading at the specimen supports across the entire specimen width; deviations from this type of loading is beyond the scope of this standard.

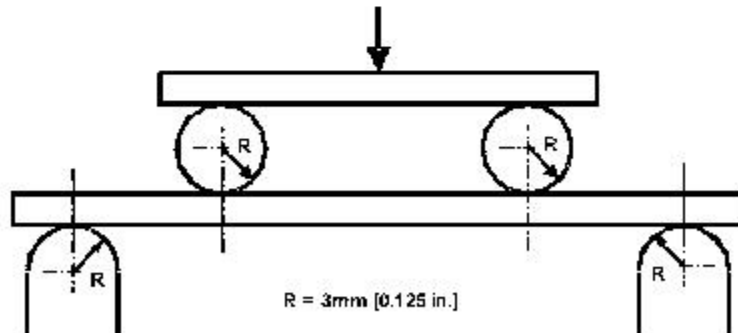
7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—Properly calibrated, which can be operated at a constant rate of crosshead motion, and in which the error in the force application system shall not exceed $\pm 1\%$ of the full scale. The force indicating mechanism shall be essentially free of inertia lag at the crosshead rate used. Inertia lag shall not exceed 1% of the measured force. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E4.

7.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical contact surfaces of radius 3.00 mm [0.125 in.] as shown in Fig. 3, with a hardness of 60 to 62 HRC, as specified in Test Methods E18, and shall have finely



Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose



Four-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Rolling Loading Noses
 FIG. 3 Example Loading Nose and Supports for Procedures A (top) and B (bottom)

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Tue Dec 6 05:04:49 EST 2011 3
 Downloaded/printed by
 Christos Koinizoglou (INASCO+Hellas) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

ground surfaces free of indentation and burrs with all sharp edges relieved. Loading noses and supports may be arranged in a fixed, rotatable or rolling arrangement. Typically, with composites, rotatable or fixed arrangements are used.

7.3 Micrometers—For width and thickness measurements the micrometers shall use a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball-interface on an irregular surface such as the bag side of a laminate, and a flat anvil interface on machined edges or very smooth tooled surfaces. A micrometer or caliper with flat anvil faces shall be used to measure the length of the specimen. The accuracy of the instrument(s) shall be suitable for reading to within 1 % or better of the specimen dimensions. For typical section geometries, an instrument with an accuracy of ± 0.02 mm [± 0.001 in.] is desirable for thickness and width measurement, while an instrument with an accuracy of ± 0.1 mm [± 0.004 in.] is adequate for length measurement.

7.4 Deflection Measurement—Specimen deflection at the common center of the loading span shall be measured by a properly calibrated device having an accuracy of ± 1 % or better of the expected maximum displacement. The device shall automatically and continuously record the deflection during the test.

7.5 Conditioning Chamber—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 1^\circ\text{C}$ [$\pm 2^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 3 % relative humidity, as outlined in Test Method D5229/D5229M. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.6 Environmental Test Chamber—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the test specimen at the required temperature

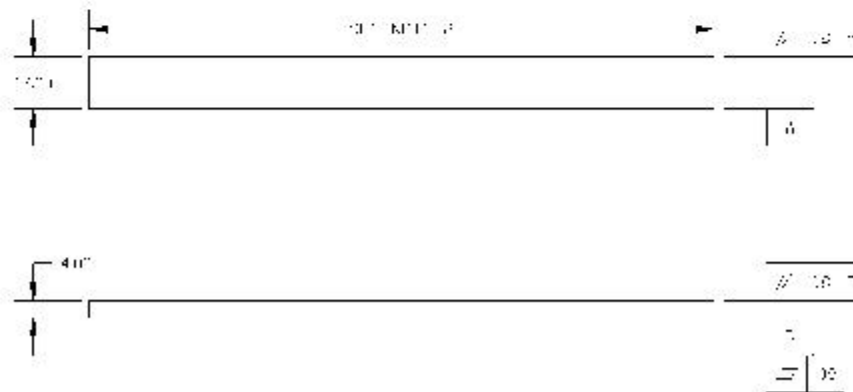
within $\pm 3^\circ\text{C}$ [$\pm 5^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 5 % relative humidity.

8. Test Specimens

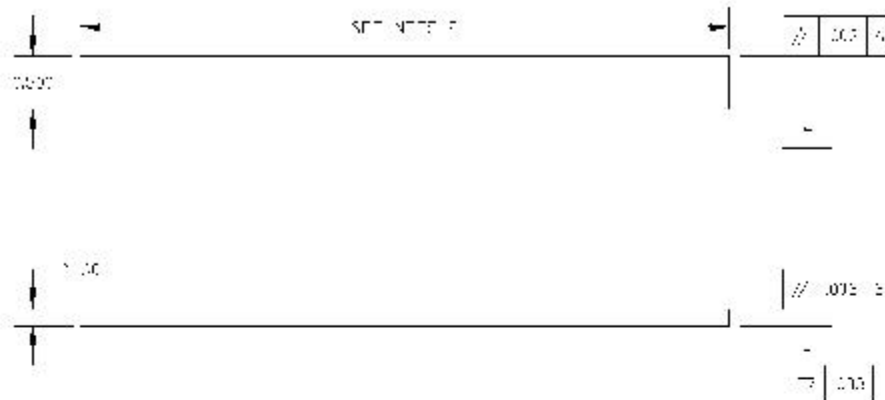
8.1 Specimen Preparation—Guide D5687/D5687M provides recommended specimen preparation practices and should be followed when practical.

8.2 Specimen Size is chosen such that the flexural properties are determined accurately from the tests. For flexural strength, the standard support span-to-thickness ratio is chosen such that failure occurs at the outer surface of the specimens, due only to the bending moment (see Notes 2 and 3). The standard span-to-thickness ratio is 32:1, the standard specimen thickness is 4 mm [0.16 in.], and the standard specimen width is 13 mm [0.5 in.] with the specimen length being about 20 % longer than the support span. See Figs. 4 and 5 for a drawing of the standard test specimen in SI and inch-pound units, respectively. For fabric-reinforced textile composite materials, the width of the specimen shall be at least two unit cells, as defined in Guide D6856. If the standard specimen thickness cannot be obtained in a given material system, an alternate specimen thickness shall be used while maintaining the support span-to-thickness ratio [32:1] and specimen width. Optional support span-to-thickness ratios of 16:1, 20:1, 40:1, and 60:1 may also be used provided it is so noted in the report. Also, the data obtained from a test using one support span-to-thickness ratio may not be compared with the data from another test using a different support span-to-thickness ratio.

8.2.1 Shear deformations can significantly reduce the apparent modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low support span-to-thickness ratios. For this reason, a high support span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.



NOTE 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.
 NOTE 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.
FIG. 4 Standard Flexural Test Specimen Drawing (SI)



NOTE 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.
 NOTE 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.
FIG. 5 Standard Flexural Test Specimen Drawing (inch-Pound)

NOTE 2—A support span-to-thickness ratio of less than 32:1 may be acceptable for obtaining the desired flexural failure mode when the ratio of the lower of the compressive and tensile strength to out-of-plane shear strength is less than 8, but the support span-to-thickness ratio must be increased for composite laminates having relatively low out-of-plane shear strength and relatively high in-plane tensile or compressive strength parallel to the support span.

NOTE 3—While laminate stacking sequence is not limited by this test method, significant deviations from a lay-up of nominal balance and symmetry may induce unusual test behaviors and a shift in the neutral axis.

9. Number of Test Specimens

9.1 Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data the procedures outlined in Practice E122 should be consulted. Report the method of sampling.

10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method D5229/D5229M; however, if the test requester does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

NOTE 4—The term *moisture*, as used in Test Method D5229/D5229M, includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

10.2 The pre-test specimen conditioning process, to include specified environmental exposure levels and resulting moisture content, shall be reported with the data.

10.3 If there is no explicit conditioning process, the conditioning process shall be reported as “unconditioned” and the moisture content as “unknown.”

11. Procedure

11.1 Condition the specimens as required. Store the specimens in the conditioned environment until test time.

11.2 Following final specimen machining and any conditioning but before testing, measure and record the specimen width and thickness at the specimen mid-section, and the specimen length, to the specified accuracy.

11.3 Measure the span accurately to the nearest 0.1 mm [0.004 in.] for spans less than 63 mm [2.5 in.] and the nearest 0.3 mm [0.012 in.] for spans greater than or equal to 63 mm [2.5 in.]. Use the measured span for all calculations. See Annex A1 for information on the determination of and setting of the span.

11.4 *Speed of Testing*—Set the speed of testing at a rate of crosshead movement of 1.0 mm/min [0.05 in./min] for a specimen with standard dimensions. For specimens with dimensions that vary greatly from the standard dimensions, a crosshead rate that will give a similar rate of straining at the outer surface can be obtained via the method outlined in Test Methods D790 for Procedure A and Test Method D6272 for Procedure B.

11.5 Align the loading nose(s) and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel. For Procedure A, the loading nose shall be midway between the supports. For Procedure B, the load span shall be one-half of the support span and symmetrically placed between the supports. The parallelism may be checked by means of plates with parallel grooves into which the loading nose(s) and supports will fit when properly aligned. Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading noses and supports. See Annex A1 for setting and measuring span.

11.6 Apply the force to the specimen at the specified crosshead rate. Measure and record force-deflection data at a

h = thickness of beam, mm [in.].

Note 7.—The limitations defined for Eq 1 in Note 6 apply also to Eq 2.

13.3 *Flexural Strength*—The flexural strength is equal to the maximum stress at the outer surface corresponding to the peak applied force prior to failure. (for multidirectional laminates, see Note 6). It is calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the peak applied force.

13.4 *Flexural Stress at a Given Strain*—The maximum flexural stress at any given strain may be calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the applied force read from the force-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for multidirectional laminates, see Note 6). Equations for calculating strains from the measured deflection are given in 13.5 and 13.6.

13.5 *Maximum Strain, Procedure A*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (3)$$

where:

ϵ = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
 δ = mid-span deflection, mm [in.],
 L = support span, mm [in.], and
 h = thickness of beam, mm [in.].

13.6 *Maximum Strain, Procedure B*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{4.368\delta h}{L^2} \quad (4)$$

where:

δ = mid-span deflection, mm [in.],
 ϵ = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.],
 L = support span, mm [in.], and
 h = thickness of beam, mm [in.].

13.7 Flexural Modulus of Elasticity:

13.7.1 *Flexural Chord Modulus of Elasticity*—The flexural chord modulus of elasticity is the ratio of stress range and corresponding strain range. For calculation of flexural chord modulus, the recommended strain range is 0.002 with a start point of 0.001 and an end point 0.003. If the data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Calculate the flexural chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 5 (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8).

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

where:

E_f^{chord} = flexural chord modulus of elasticity, MPa [psi],
 $\Delta\sigma$ = difference in flexural stress between the two selected strain points, MPa [psi], and
 $\Delta\epsilon$ = difference between the two selected strain points (nominally 0.002).

13.7.1.1 Report the chord modulus of elasticity in MPa [psi] for the strain range 0.001 to 0.003. If a different strain range is used in the calculations, also report the strain range used.

Note 8.—Shear deformation can seriously reduce the apparent flexural modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low span-to-thickness ratios.⁹ For this reason, a high span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.

13.7.2 *Flexural Secant Modulus of Elasticity*—The flexural secant modulus of elasticity is the ratio of stress to corresponding strain at any given point on the stress-strain curve. The flexural secant modulus is same as the flexural chord modulus in which the initial strain point is zero. It shall be expressed in MPa [psi]. It is calculated as follows (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8):

13.7.2.1 *For Procedure A:*

$$E_f^{secant} = \frac{L^2 m}{4bh^3} \quad (6)$$

where:

E_f^{secant} = flexural secant modulus of elasticity, MPa [psi],
 L = support span, mm [in.],
 b = width of beam, mm [in.],
 h = thickness of beam, mm [in.] and
 m = slope of the secant of the force-deflection curve.

13.7.2.2 *For Procedure B:*

$$E_f^{secant} = \frac{0.17L^2 m}{bh^3} \quad (7)$$

where E_f^{secant} , m , L , b , and h are the same as for Eq 6.

13.7.3 Chord modulus of elasticity shall be reported although other definitions of moduli may also be used. However, when other definitions of moduli are used, it should be clearly indicated in the report.

13.8 *Statistics*—For each series of tests calculate the average value, standard deviation, and coefficient of variation for each property determined:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (8)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{n-1}}$$

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}}$$

where:

\bar{x} = average value or sample mean,
 x_i = value of single measured or derived property,
 n = number of specimens,
 s_{n-1} = estimated standard deviation,
 CV = coefficient of variation in percentage.

⁹ For discussion of these effects, see Zweben C., Smith, W. S., and Wardle, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 228-262.

14. Report

14.1 The information reported for this test method includes material identification and mechanical testing data. These data shall be reported in accordance with Guides E1309 and E1434. At a minimum, the following should be reported:

14.1.1 The revision level or date of issue of the test method used.

14.1.2 The date(s) and location(s) of the testing.

14.1.3 The name(s) of the test operator(s).

14.1.4 The test Procedure used (A or B).

14.1.5 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

14.1.6 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from the manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

14.1.7 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

14.1.8 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

14.1.9 If requested, report density, reinforcement volume fraction, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test data.

14.1.10 Average ply thickness of the material.

14.1.11 Results of any nondestructive evaluation tests.

14.1.12 Method of preparing the test specimens, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, and specimen cutting method.

14.1.13 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

14.1.14 Type of test machine, grips, jaws, alignment data, and data acquisition sampling rate and equipment type.

14.1.15 Dimensions of each specimen to at least three significant figures, including specimen width, thickness, and overall length.

14.1.16 Conditioning parameters and results, and the procedure used if other than that specified in this test method.

14.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

14.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

14.1.19 Number of specimens tested.

14.1.20 Load-span length, support-span length, and support span-to-thickness ratio.

14.1.21 Loading and support nose type and dimensions.

14.1.22 Speed of testing.

14.1.23 Transducer placement on the specimen, transducer type, and calibration data for each transducer used.

14.1.24 Force-deflection curves for each specimen. Note method and offset value if toe compensation was applied to force-deflection curve.

14.1.25 Tabulated data of flexural stress versus strain for each specimen.

14.1.26 Individual flexural strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load prior to failure.

14.1.27 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.28 Strain range used for the flexural chord modulus of elasticity determination.

14.1.29 Individual values of flexural chord modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.30 If an alternate definition of flexural modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

14.1.31 Individual values of the alternate (see above) flexural modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.32 Individual maximum flexural stresses, and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test in which the failure load was less than the maximum load before failure.

14.1.33 For flexural modulus only tests: maximum load applied, strain at maximum applied load, and calculated flexural modulus of elasticity (E_f).

14.1.34 Individual maximum flexural strains and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test that was truncated to 2% strain.

14.1.35 Failure mode and location of failure for each specimen.

15. Precision and Bias

15.1 *Precision*—The data required for the development of precision is not currently available for this test method.

15.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

16. Keywords

16.1 fiber-reinforced composites; flexural properties; stiffness; strength

A1. MEASURING AND SETTING SPAN

A1.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of flexural stress, flexural modulus and strain, and the loading noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of results when using adjustable span fixtures.

A1.2 Measurement of Span:

A1.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in calculation of results.

A1.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A1.1 and A1.2).

A1.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm [0.004 in.], measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

A1.3 Setting the Span and Alignment of Loading Nose(s)—To ensure a constant day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose(s), simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A1.3.

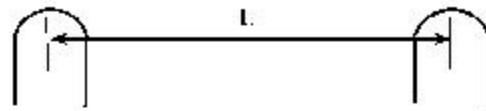


FIG. A1.1 Markings on Fixed Specimen Supports

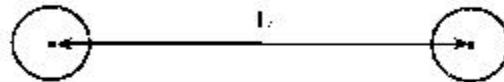


FIG. A1.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

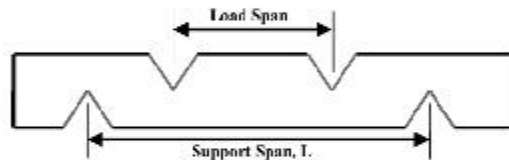


FIG. A1.3 Fixture Used to Align Loading Noses and Supports

A2. TOE COMPENSATION

A2.1 In a typical force-deflection curve (see Fig. A2.1) there is a toe region, AC, which does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a take-up of slack and alignment, or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as flexural modulus, and deflection at failure, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the deflection, or extension axis.

A2.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A2.1), a continuation of the linear (CD) region is constructed through the zero axis. This intersection (B) is the corrected zero deflection point from which all deflections must be measured. The slope can be determined by dividing the change in force between any two points along the line CD (or its extension) by the change in deflection at the same two points (measured from Point B, defined as zero-deflection).

A2.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A2.2), the same kind of toe correction of zero-deflection point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H'. This is extended to intersect the deflection axis at Point B', the corrected zero-deflection point. Using Point B' as zero deflection, the force at any point (G') on the curve can be divided by the deflection at that point to obtain a flexural chord modulus (slope of Line B'G').

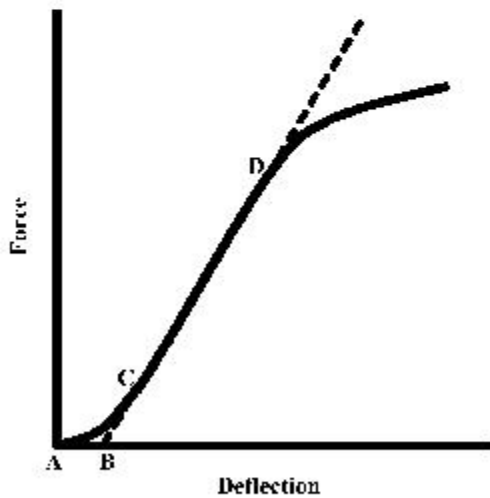


FIG. A2.1 Material with a Hookean Region

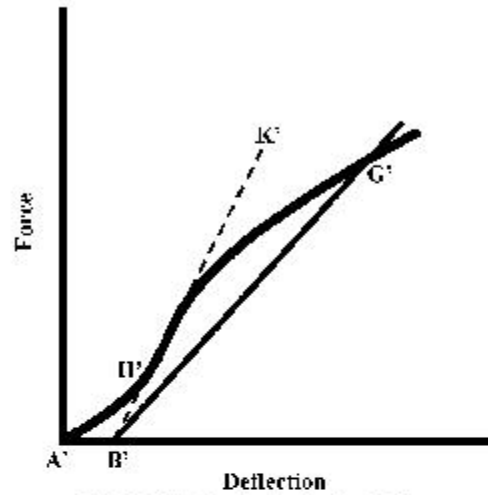


FIG. A2.2 Material without a Hookean Region



D7264/D7264M – 07

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2950, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).