

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΦΘΟΡΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗ  
ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ  
ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ : ΣΙΟΥΛΑ ΒΑΣΙΛΙΚΗ  
ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ : ΣΑΒΒΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ



ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2011

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Τ.Ε.Ι Κρήτης και μελετά την υποβάθμιση των ιδιοτήτων των σύνθετων πολυμερών. Η πτυχιακή αυτή εργασία ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2011 με βιβλιογραφική ανασκόπηση των σύνθετων υλικών, συνεχίστηκε με την πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα στις αρχές Σεπτεμβρίου 2011 και ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2011 με την μελέτη των στοιχείων που μας έδωσε το πείραμα του θερμικού σοκ.

Η Εργασία χωρίζεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο μελετήσαμε τα σύνθετα υλικά όσον αφορά την αστοχία τους , τις ιδιότητες τους , την ταξινόμηση τους. Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε βιβλιογραφική ανασκόπηση της επίδρασης των διαφόρων παραγόντων στη δομή και τις ιδιότητες των σύνθετων εποξικών πολυμερών. Τέλος ακολούθησε το πειραματικό μέρος που έγινε στο εργαστήριο Τεχνολογίας υλικών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον εισηγητή της πτυχιακής μου κύριο Κώστα Σαββάκη για την παροχή βιβλιογραφίας αλλά και για τη συνεχή βοήθεια που μου παρείχε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	2
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	3
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	5
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	7
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	8
1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	11
1.2 ΥΛΙΚΑ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΙΝΕΣ	12
1.2.1 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GLASS FIBERS)	14
1.2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON FIBERS)	15
1.2.3 ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (POLYMER FIBERS)	16
1.2.4 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	17
1.2.5 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ	18
1.2.6 ΤΡΙΧΙΤΕΣ (WHISKERS)	18
1.2.7 ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ	19
1.2.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	19
1.3 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	20
1.3.1 ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	21
1.3.2 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	22
1.3.3 ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	23
1.3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ (CURING)	23
1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24
1.4.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ( <i>Density</i> )	25
1.4.2 ΑΝΤΟΧΗ ( <i>Strenght</i> )	25
1.4.3 ΑΝΤΟΧΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	25
1.4.4 ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΕΩΣ (ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ)	27
1.4.5 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	28
1.4.6 ΑΚΑΜΨΙΑ - ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ( <i>Stiffness</i> )	28
1.4.7 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ( <i>Coefficient of thermal expansion</i> )	29
1.4.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ( <i>Electrical conductivity</i> )	29
1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	30
1.5.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ	31
1.5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	31
1.5.3 ΣΠΑΣΙΜΟ ΤΩΝ ΙΝΩΝ	31
1.5.4 ΜΙΚΡΟΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ	32
1.5.5 ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	32
1.5.6 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ – ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ	32
1.5.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	32
1.6 ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	34
1.6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	34
1.6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	35
1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ	43

<b>2.1.1</b>	<b>ΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ</b>	<b>43</b>
<b>2.1.2</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΟΚ</b>	<b>45</b>
<b>2.1.3</b>	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΟΚ</b>	<b>45</b>
<b>2.2</b>	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ</b>	<b>48</b>
<b>2.3</b>	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ</b>	<b>48</b>
<b>2.4</b>	<b>ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ UV ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ</b>	<b>51</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>		
<b>3.1</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΕΠΟΞΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.</b>	<b>53</b>
<b>3.2</b>	<b>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ</b>	<b>55</b>
<b>3.3</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ</b>	<b>58</b>
<b>3.4</b>	<b>ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>62</b>
<b>3.5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>69</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>70</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών.	10
Σχήμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας σύνθετου υλικού	10
Σχήμα 1.3: Τρόποι ενίσχυσης με συνεχείς ίνες	10
Σχήμα 1.4: Είδη σύνθετων πολυμερών, ανάλογα με την ενίσχυση.	11
Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ιστορικής εξέλιξης των υλικών.	12
Σχήμα 1.6: Τύποι διάταξης ινών: α) Μονοδιευθυντικές ίνες, β) Ίνες τυχαίου προσανατολισμού, γ) Ίνες με πλέξη ύφανσης και δ) Ίνες σε τρισσορθογώνια διάταξη.	13
Σχήμα 1.7: Πίνακας 1 – Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών	14
Σχήμα 1.8 : Διαδικασία παραγωγής ινών γυαλιού.	14
Σχήμα 1.9: Σύγκριση ενισχύσεων ως προς το εύρος κόστους	15
Σχήμα 1.10: Διαγραμμα ροής παραγωγής ανθρακονημάτων από (α) PAN (Πολυακρυλονιτρίλιο) (β) Πίσσα.	16
Σχήμα 1.11: Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.	16
Σχήμα 1.12: Πίνακας 3 – Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών Kevlar.	17
Σχήμα 1.12(a): Επαναλαμβανόμενη χημική δομή της ίνας Kevlar.	17
Σχήμα 1.13: Πίνακας 4 – Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές)	18
Σχήμα 1.14: Πίνακας 5 – Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιδίων από SiC & Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19
Σχήμα 1.15: Σύγκριση ως προς την ειδική αντοχή και ακαμψία.	19
Σχήμα 1.16: Πίνακας 6 – Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών	20
Σχήμα 1.17: Πίνακας 7 – Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών.	20
Σχήμα 1.18: Σύγκριση ρητινών.	21
Σχήμα 1.19: Χημική αντίδραση παραγωγής μακρομορίου εποξικής ρητίνης.	22
Σχήμα 1.20: Διασταυρωμένη δομή εποξικής ρητίνης με διαμίνη.	22
Σχήμα 1.21: Διαγράμματα αντοχής εφελκυσμού.	26
Σχήμα 1.22: Διαγράμματα αντοχής εφελκυσμού.	27
Σχήμα 1.23: Μηχανικές ιδιότητες ρητινών.	29
Σχήμα 1.24: Σύγκριση τυπικών ιδιοτήτων μεταξύ σκυροδέματος, χάλυβα και εποξικής ρητίνης.	30
Σχήμα 1.25: Ιεραρχία ανάλυσης της δομής πολυστρωματικού σύνθετου υλικού.	31
Σχήμα 1.26: Επίδραση Κόκκων στο μέτωπο της ρωγμής.	33
Σχήμα 1.27: Διάδοση ρωγμής γύρω από την επιφάνεια σφαιριδίου.	33
Σχήμα 1.28: Βασικοί τρόποι αστοχίας	34
Σχήμα 1.29: Hand Lay-up	35
Σχήμα 1.30: Spray-up	35
Σχήμα 1.31: Vacuum-Bag Molding	36
Σχήμα 1.32: Pressure-Bag Molding	36
Σχήμα 1.33: Autoclave Molding	36
Σχήμα 1.34: Closed-mold	36
Σχήμα 1.35: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία	37
Σχήμα 1.36: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική	39
Σχήμα 1.36α: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική	39
Σχήμα 1.36β: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική	40
Σχήμα 1.36γ: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική	40
Σχήμα 1.36δ: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική	41
Σχήμα 1.37: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.	41
Σχήμα 1.38: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στον κατασκευαστικό τομέα.	42
Σχήμα 2.1: Ρηγάτωση πολυμερούς μήτρας ( Polymeric matrix cracking)	44
Σχήμα 2.2: Απώλεια βάρους λόγω θέρμανσης	44
Σχήμα 2.3: Αποκόλληση στρώσεων (Delaminating)	45
Σχήμα 2.4: Οι εναλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία του αεροσκάφους αποτελούν ένα είδος θερμικού σοκ	45

<b>Σχήμα 2.5:</b> Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας	47
<b>Σχήμα 2.6:</b> Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας	47
<b>Σχήμα 2.7:</b> Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας	47
<b>Σχήμα 2.8:</b> Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για εποξικό υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, χωρίς να έχει υποστεί υδροθερμική κατεργασία	50
<b>Σχήμα 2.9:</b> Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για εποξικό υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα με προσρόφηση υγρασίας 2,6% κ.β	50
<b>Σχήμα 2.10:</b> Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μετά από την έκθεση εποξικού σύνθετου υλικού σε UV ακτινοβολία	52
<b>Σχήμα 3.1:</b> Παρασκευή μείγματος σκληρυντή κόλλας.	54
<b>Σχήμα 3.2:</b> Χρήση ζυγαριάς.	54
<b>Σχήμα 3.3:</b> Τοποθέτηση μείγματος.	54
<b>Σχήμα 3.4:</b> Επάληψη μείγματος υαλουφάσματος	54
<b>Σχήμα 3.5:</b> Επάληψη μείγματος ξανά για καλύτερη απορρόφηση του από το ύφασμα αλλά και για την αποφυγή εγκλεισμάτων αέρα.	54
<b>Σχήμα 3.6:</b> Προετοιμασία των δοκιμίων	55
<b>Σχήμα 3.7:</b> Φούρνος θέρμανσης των δοκιμίων	55
<b>Σχήμα 3.8:</b> Δοκίμια εντός του Φούρνου	56
<b>Σχήμα 3.9:</b> Dwear υγρού αζώτου	56
<b>Σχήμα 3.10:</b> Υδραυλική πρέσα εφελκυσμού-θλίψεως	57
<b>Σχήμα 3.11:</b> Δοκίμια μετά την θραύση	57
<b>Σχήμα 3.12:</b> Δοκίμια χωρίς θερμική κατεργασία	58
<b>Σχήμα 3.13:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N <sub>2</sub> για 30 λεπτά	59
<b>Σχήμα 3.14:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N <sub>2</sub> για 60 λεπτά	59
<b>Σχήμα 3.15:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N <sub>2</sub> για 120 λεπτά	59
<b>Σχήμα 3.16:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 60 λεπτά	60
<b>Σχήμα 3.17:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 120 λεπτά.	60
<b>Σχήμα 3.18:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 180 λεπτά	60
<b>Σχήμα 3.19:</b> Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα εφελκυσμού (φορτίου-επιμήκυνσης)	61
<b>Σχήμα 3.20:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N <sub>2</sub> για 15, 30, 45 λεπτά για ταχύτητα 1mm/min (βιβλιογραφία 20)	62
<b>Σχήμα 3.21:</b> Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N <sub>2</sub> για 15, 30, 45 λεπτά για ταχύτητα 500mm/min(βιβλιογραφία 20)	62
<b>Σχήμα 3.22:</b> Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub> (για ταχύτητα 1mm/min(βιβλιογραφία 20)	63
<b>Σχήμα 3.23:</b> Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub> (για ταχύτητα 500mm/min) (βιβλιογραφία 20)	63
<b>Σχήμα 3.24:</b> Μεταβολή αντοχής εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub> .	64
<b>Σχήμα 3.25:</b> Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub> .	65
<b>Σχήμα 3.26:</b> Αντοχής εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και στιγμιαίας εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub> .	66
<b>Σχήμα 3.27:</b> Μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και στιγμιαίας εμβάπτισης σε υγρό N <sub>2</sub>	67
<b>Σχήμα 3.28:</b> Συγκριτική παρουσίαση μεταβολής αντοχής	67
<b>Σχήμα 3.29:</b> Συγκριτική παρουσίαση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας	68

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα πολυμερή υλικά αποτελούν σήμερα μια σπουδαία κατηγορία μηχανολογικών κατασκευαστικών υλικών. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ευελιξία στο σχεδιασμό και την μορφοποίηση τους.

Τα σύνθετα πολυμερή χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης των κατασκευών με τα υλικά αυτά αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο για τους μηχανικούς για την αντιμετώπιση πάσης φύσεως κατασκευαστικών ατελειών και βλαβών. Αποδεικνύει λοιπόν την εξελικτική πορεία της τεχνολογίας που προχωρά με την ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή τους και έχει να επιδείξει πραγματικά εντυπωσιακή πορεία. Η εφαρμογή των πλαστικών εδώ και 30 περίπου χρόνια είναι γεγονός και προσφέρει ακόμη και σήμερα σημαντικά κατασκευαστικά πλεονεκτήματα για ανθεκτικές κατασκευές.

Η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών καθορίζεται από τη συνεργασία των φάσεων της δομής του (interface). Την πολυμερή φάση (μήτρα) και τη φάση της ενίσχυσης. Παρατηρείται ότι η συνεργασία αυτή που σχετίζεται με τη συνεκτικότητα της δομής και τη μεταφορά των φορτίων καταπόνησης του υλικού επηρεάζεται σημαντικά από την επίδραση διαφόρων εξωτερικών παραμέτρων που σχετίζονται με την έκθεση του υλικού στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η πραγματοποίηση δοκιμών σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες, για να δώσουν αποτελέσματα που να είναι χρήσιμα για τη βελτίωση των υλικών, μπορεί να είναι τόσο μακροχρόνιες, ώστε η χρησιμότητα τους να έχει μικρή πρακτική αξία. Για το σκοπό αυτό η φθορά και η υποβάθμιση των ιδιοτήτων των σύνθετων πολυμερών υλικών μελετάτε σε πιο δραστικές συνθήκες, από αυτές που συνήθως συναντά το υλικό κατά την έκθεση του στο περιβάλλον χρησιμοποίησης του και τα αποτελέσματα αυτά αποτιμούνται κατάλληλα και συχνά προεκβάλλονται στο χρόνο (extrapolated) και συνεκτιμούνται με τα δεδομένα πρόωρης αστοχίας.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της φθοράς και υποβάθμισης ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με μήτρα εποξικής ρητίνης (epoxy resin). Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας σε συνεργασία με το εργαστήριο Τεχνολογία υλικών. Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί η υποβάθμιση ιδιοτήτων υπό την επίδραση των παραγόντων όπως:

- Επίδραση θερμικού σοκ
- Επίδραση μικροκυμάτων
- Επίδραση UV ακτινοβολίας
- Επίδραση υδροθερμικής γήρανσης

Στο τέλος της εργασίας θα παρατεθεί το πείραμα έκθεσης του υλικού σε θερμικό σοκ τα αποτελέσματα που προέκυψαν και η συζήτηση των αποτελεσμάτων. Οι δοκιμασίες και οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο Τεχνολογίας υλικών.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Σύνθετα υλικά ορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μηχανολογία και γενικότερα στις κατασκευές και αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες οι οποίες παραμένουν διαχωρισμένες σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η ανισοτροπία η οποία τους δίνει τεράστιες δυνατότητες κατά το σχεδιασμό. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και σε κατασκευές υψηλής τεχνολογίας.

Κάνοντας μια σύντομη ανασκόπηση στο παρελθόν βλέπουμε ότι τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άχυρο και λάσπη συνδυασμένα με τούβλα για την κατασκευή κτιρίων ενώ στον 21 αιώνα τα πιο σύγχρονα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους όπως π.χ ο υψηλός δείκτης αντοχής /βάρους.

Όπως προαναφέρθηκε τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά τα οποία ανήκουν σε δύο κατηγορίες ,στα υλικά μήτρας και τις ενισχύσεις. Το υλικό της μήτρας περιβάλλει και συγκρατεί τις ενισχύσεις διατηρώντας τη θέση τους, ενώ το υλικό ενίσχυσης συνεισφέρει στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητές τους για την ενίσχυση της μήτρας. Η συνεργασία των δύο υλικών (μήτρας και ενίσχυσης) προσδίδει στο τελικό υλικό ιδιότητες, οι οποίες παρότι παράγονται από συγκεκριμένα υλικά δεν ταιριάζουν σε κανένα από αυτά. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται. Σύμφωνα με το είδος της ενίσχυσης μπορούμε να πούμε πως υπάρχουν σύνθετα με:

- ✓ Μακριές – συνεχείς ίνες μέσα στη μήτρα οι οποίες μπορεί να είναι παράλληλα – προσανατολισμένες ή τυχαίου προσανατολισμού.
- ✓ Μικρού μήκους ίνες και πάλι προσανατολισμένες ή τυχαία διασκορπισμένες μέσα στη μήτρα.
- ✓ Κόκκους όπως σφαιρίδια, επίπεδα, ελλειψοειδή, κενά κ.α.
- ✓ Διασπορές που είναι σαν τους κόκκους αλλά έχουν διάμετρο μικρότερη των  $10^{-8}$  m.
- ✓ Στρωματώδεις δομές.
- ✓ Δίκτυα συνεχών ινών (υφάνσιμη ενίσχυση).
- ✓ Πολλές φάσεις, δηλαδή μια μήτρα και εγκλείσματα περισσότερων του ενός είδους υλικά.

Με κριτήριο ταξινόμησης το είδος του υλικού της μήτρας έχουμε τα εξής είδη σύνθετων υλικών:

- Πολυμερικής Μήτρας
- Μεταλλικής Μήτρας
- Κεραμικής Μήτρας



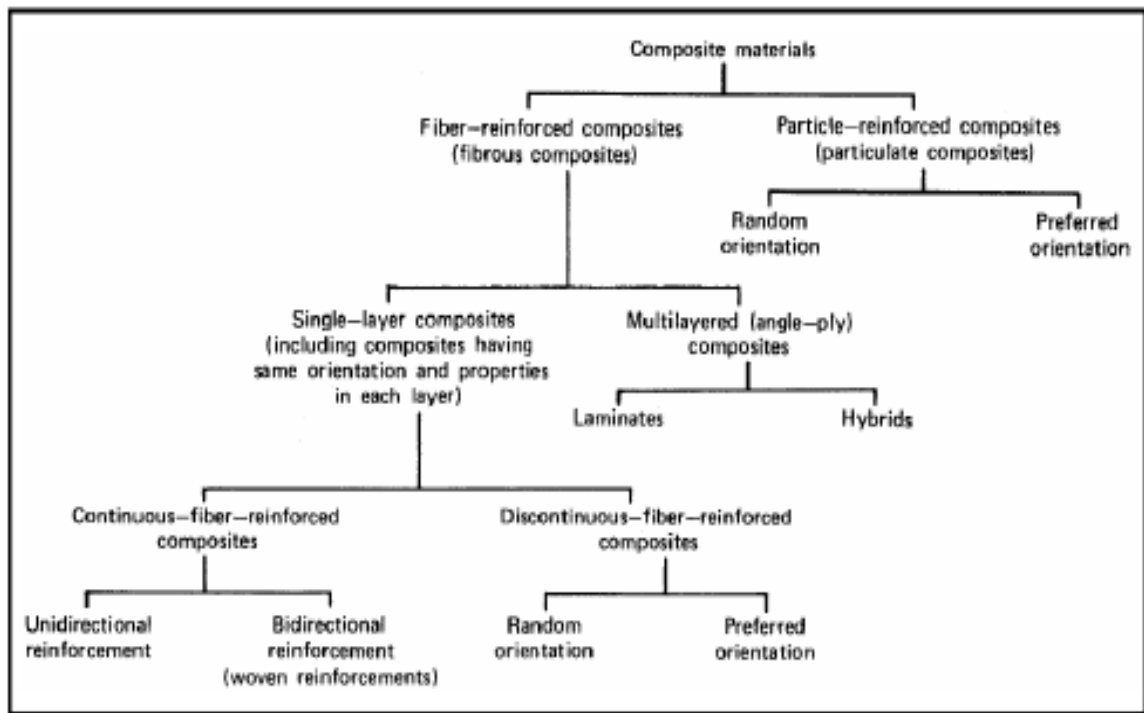
Οι ιδιότητες και η δομή τόσο της ενίσχυσης όσο και της μήτρας αποτελούν τις κύριες συνιστώσες που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός σύνθετου υλικού. Τα σύνθετα συνήθως μορφοποιούνται εξ αρχής στο τελικό σχήμα. Το υλικό της μήτρας μπορεί να διοχετευθεί στο καλούπι πριν ή μετά την τοποθέτηση των ενισχύσεων, ενώ η διαδικασία που ακολουθεί τη χύτευση διαφέρει από υλικό σε υλικό (πολυμερισμός, απλή στερεοποίηση κ.α). Γενικά η μεθοδολογία κατασκευής των σύνθετων υλικών διαφέρει ανάλογα με το είδος της μήτρας και της ενίσχυσης. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει και η απαιτούμενη ποσότητα υλικού που θα κατασκευαστεί, καθώς και η αναλογία βάρους μήτρας / ενίσχυσης. Στόχος συνήθως, είναι η αύξηση του ποσοστού των ενισχύσεων στο τελικό υλικό. Έτσι υπάρχουν μέθοδοι που παράγουν αναλογία 60-40% (υλικό μήτρας - ενίσχυση), όπως η κοινή επιστρωμάτωση και άλλες που παράγουν τελικό προϊόν με αναλογία 40-60% όπως η έγχυση σε περιβάλλον κενού (vacuum injection molding). Γενικά οι ενισχύσεις και το υλικό της μήτρας συνδυάζονται, επεξεργάζονται και υποβάλλονται στη διαδικασία μορφοποίησης, μετά την οποία το τεμάχιο έχει το τελικό του σχήμα. Για μια θερμοσκληραινόμενη πολυμερική ρητίνη η διαδικασία διασταύρωσης (cross linking) είναι μια αντίδραση η οποία ξεκινά είτε με τη θέρμανση είτε με τη προσθήκη σκληρυντή( χημικού αντιδραστήριου) είτε με το συνδυασμό και των δύο διαδικασιών. Για μία θερμοπλαστική πολυμερική μήτρα η διαδικασία μορφοποίησης είναι απλή στερεοποίηση. Για μια μεταλλική μήτρα η συσσωμάτωση γίνεται σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξης. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών, όπως η μορφοποίηση σε περιβάλλον κενού, η μορφοποίηση υπό πίεση κ.α.

Πλεονεκτήματα σύνθετων υλικών :

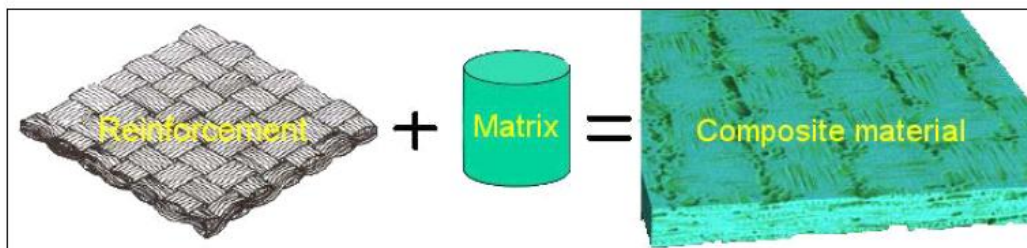
- ❖ Μεγάλη ειδική στερεότητα
- ❖ Μεγάλη ειδική ακαμψία
- ❖ Μικρό βάρος
- ❖ Μεγάλη αντοχή
- ❖ Μεγάλη αντίσταση διάβρωσης
- ❖ Μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής
- ❖ Μεγάλο λόγο αντοχής – βάρους
- ❖ Μικρό κόστος παραγωγής και διάθεσης

Μειονεκτήματα σύνθετων υλικών:

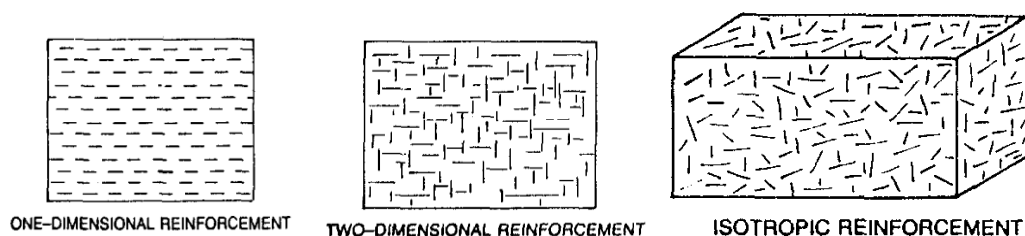
- ❖ Σημαντικός ερπυσμός της μήτρας
- ❖ Η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά
- ❖ Η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.)
- ❖ Το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος



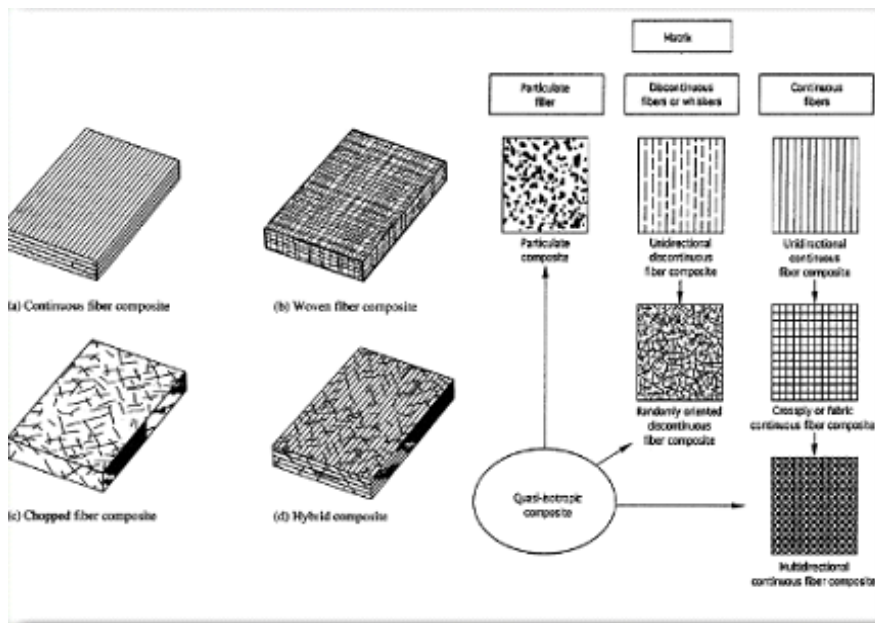
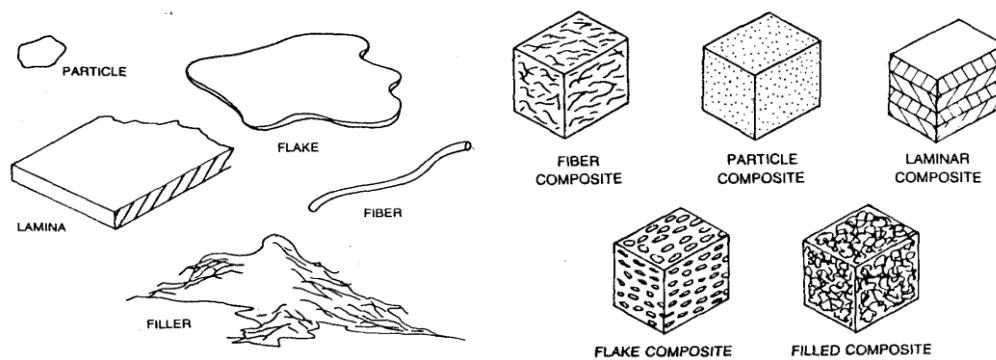
Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών.



Σχήμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση δημιουργίας σύνθετου υλικού.



Σχήμα 1.3: Τρόποι ενίσχυσης με συνεχείς ίνες.



Σχήμα 1.4: Είδη σύνθετων πολυμερών, ανάλογα με την ενίσχυση.

### 1.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται 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. Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού όπως προαναφέραμε στην εισαγωγή, 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.

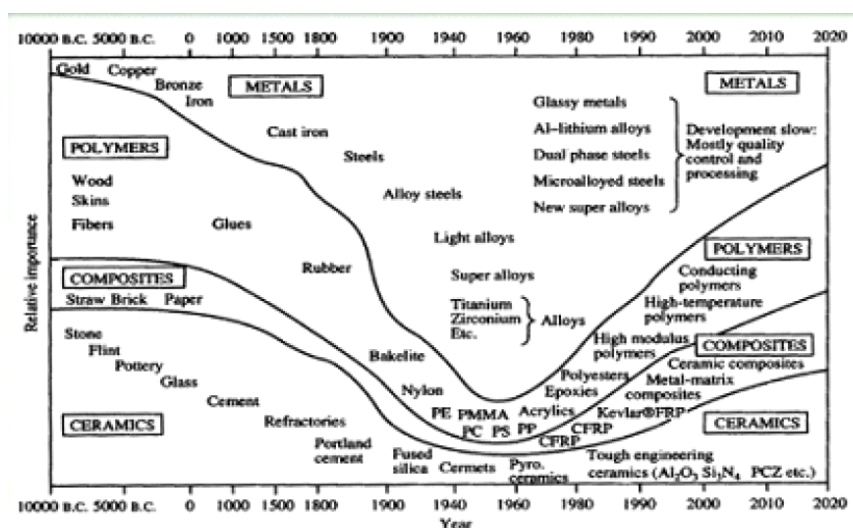
Στη Μεσοποταμία (1000 π.Χ.) εφαρμόστηκε η τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων με σκοπό τον περιορισμό της επιφανειακής φθοράς, ενώ, κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για 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 σύγχρονο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και πρόκειται για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Beaeckeland.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών υπήρξε ραγδαία. 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 όπως θα δούμε και σε παρακάτω κεφάλαιο.

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.



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα ιστορικής εξέλιξης των υλικών.

## 1.2 ΥΛΙΚΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ - ΙΝΕΣ

Μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που χαρακτηρίζει ένα σύνθετο υλικό είναι το κλάσμα του όγκου των ινών. Η κατανομή του ενισχυτικού υλικού καθορίζει την ομοιογένεια και την ομοιομορφία του υλικού. Όσο περισσότερο ανομοιόμορφη είναι η κατανομή του ενισχυτικού, τόσο πιο ετερογενές γίνεται το υλικό και τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα αστοχίας στις ασθενέστερες περιοχές. Η ανισοτροπία του σύνθετου υλικού επηρεάζεται από την γεωμετρία και τον προσανατολισμό των ινών. Για περιπτώσεις χαμηλής ή μέτριας απόδοσης του σύνθετου υλικού, το ενισχυτικό υλικό συνήθως εμφανίζεται με τη μορφή ινών μικρού μήκους προσδίδοντας κάποια σκληρότητα αλλά μόνο

τοπική ενδυνάμωση του υλικού. Σε περιπτώσεις υψηλής απόδοσης σύνθετων υλικών οι συνεχόμενες ίνες της ενίσχυσης είναι ο σκελετός του υλικού που καθορίζει την σκληρότητα και την αντοχή στη διεύθυνση των ινών. Ο ρόλος της μήτρας στην οποία θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω είναι να παρέχει προστασία και υποστήριξη στις ευαίσθητες ίνες και τοπική μεταφορά τάσης από την μία ίνα στην άλλη.

Οι ίνες κατατάσσονται ανάλογα με την προέλευση τους σε :

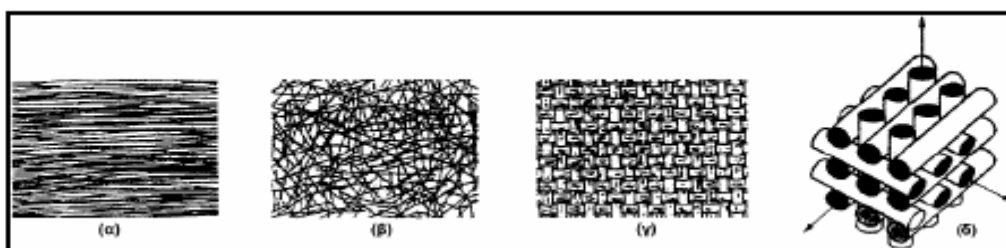
- Οργανικές
- Σύνθετες
- Μεταλλικές

Η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών των ενισχυμένων με συνεχείς, μακριές και παράλληλες ίνες, εξαρτάται από την ικανότητα της συνάφειας που αναπτύσσεται μεταξύ τους, να μεταφέρει τα εξωτερικά φορτία. Η καλύτερη πάντως, εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των ινών γίνεται όταν αυτές είναι τοποθετημένες παράλληλα στη διεύθυνση του φορτίου. Καθοριστικό ρόλο, τέλος, στην εν γένει συμπεριφορά του σύνθετου υλικού παίζει και η διαδικασία παραγωγής του.

Οι ίνες ανάλογα με το μήκος τους κατατάσσονται σε :

- Συνεχόμενες (έχουν μεγάλο μήκος και εκτείνονται σε όλη τη μάζα του σύνθετου υλικού)
- Μη συνεχόμενες (έχουν μήκος πολύ μικρότερο από το μήκος του σύνθετου υλικού)

Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη εξέταση των ενισχυτικών ινών.



**Σχήμα 1.6:** Τύποι διάταξης ινών: α) Μονοδιευθυντικές ίνες, β) Ίνες τυχαίου προσανατολισμού, γ) Ίνες με πλέξη ύφανσης και δ) Ίνες σε τρισσορθογώνια διάταξη.

## 1.2.1 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GLASS FIBERS)

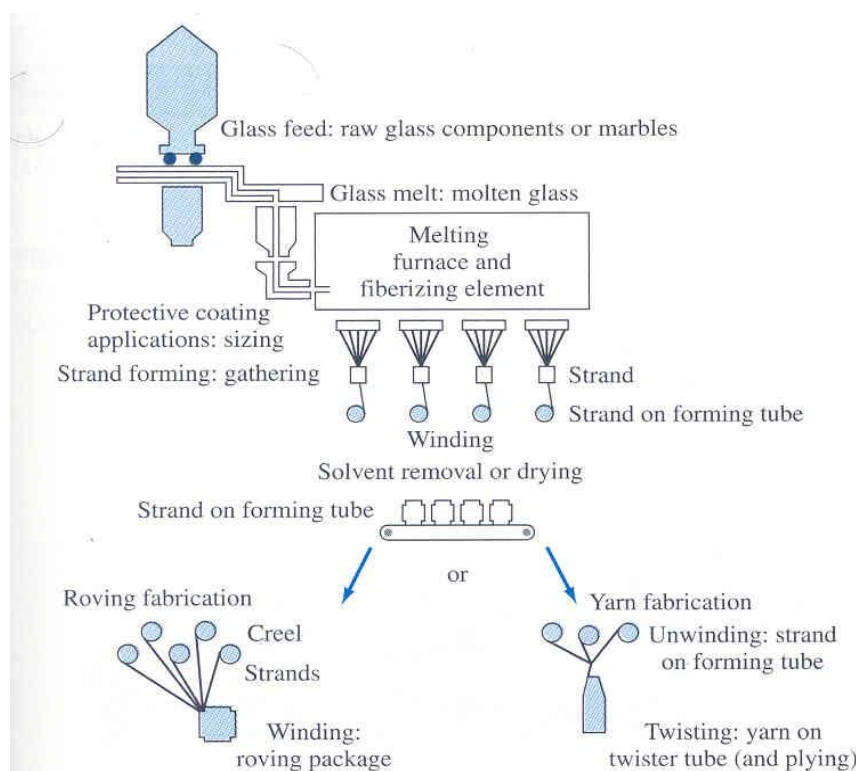
Οι ίνες γυαλιού είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.ά. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίν.1

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1:** Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO <sub>2</sub> καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO <sub>2</sub>	54	60	65	>99,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sup>3</sup> )	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

**Σχήμα 1.7:** Πίνακας 1 – Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών.

References: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)



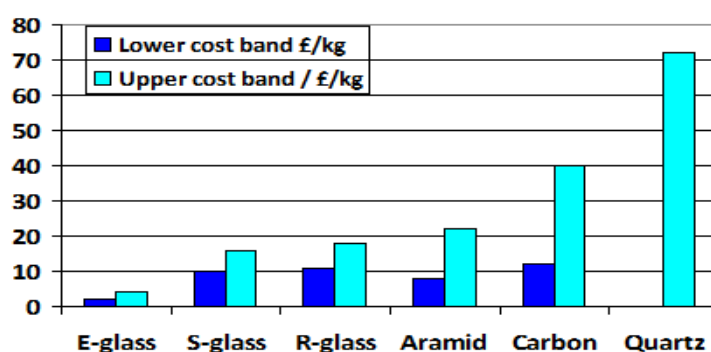
**Σχήμα 1.8 :** Διαδικασία παραγωγής ινών γυαλιού.

References: M.M. Schwartz, "Composite Materials Handbook" McGraw-Hill, 1984, pp. 2-24

- ❖ E-glass (E=electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία.
- ❖ C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.
- ❖ S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματά τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους στις φθορές.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σύγκριση ως προς το εύρος κόστους των διαφόρων τύπων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ινών για την ενίσχυση σύνθετων πολυμερών



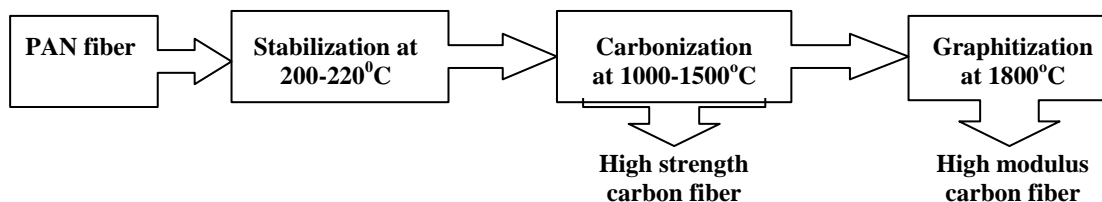
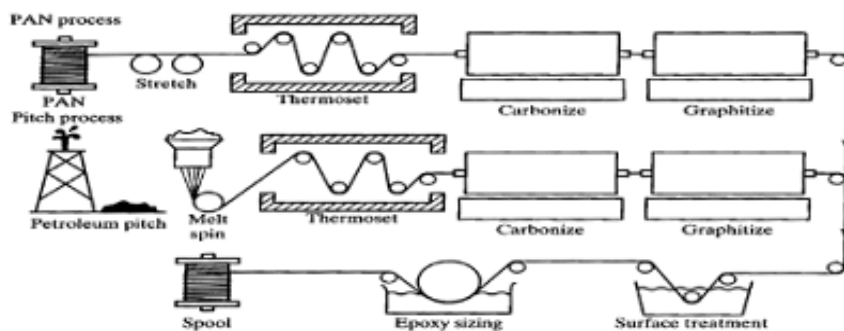
**Σχήμα 1.9:** Σύγκριση ενισχύσεων ως προς το εύρος κόστους.

### **1.2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON FIBERS)**

Οι ίνες γραφίτη έχουν την υψηλότερη αντοχή και το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Χρησιμοποιούνται 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.

Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλινών στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.





**Σχήμα 1.10:** Διαγραμμα ροής παραγωγής ανθρακονημάτων από (α) PAN (Πολυακριλονιτρίλιο) (β) Πίσσα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2:** Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.

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

**Σχήμα 1.11:** Πίνακας 2 – Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

References: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

### **1.2.3 ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (POLYMER FIBERS)**

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Κevlar. Η αντοχή τους δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. 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 Κevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

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

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

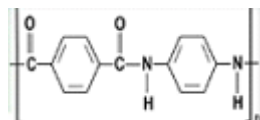
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar**

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

**Σχήμα 1.12: Πίνακας 3 – Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών Kevlar.**

**References:** [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας.



**Σχήμα 1.12(a): Επαναλαμβανόμενη χημική δομή της ίνας Kevlar**

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, στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, ενώ στη θλίψη, σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

### **1.2.4 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΙΝΕΣ**

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:

1. Αναγωγή από αλογονίδιο του βορίου
2. Απόθεση με τεχνική CVD

## 1.2.5 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, στιβαρότητα και θερμική ευστάθεια. Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κεραμικές ίνες είναι οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλουμίνας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BeO, B<sub>4</sub>C και ZrO<sub>2</sub>. 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. Γενικά οι μέθοδοι παρασκευής κεραμικών ινών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές.

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

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

**Σχήμα 1.13: Πίνακας 4 – Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων ινών SiC (μέσες τιμές).**

**References:** [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

Το SiC παρουσιάζει σταθερή μηχανική αντοχή ως τους 1400°C ωστόσο η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρήσης του, περιορίζεται στους 900°C λόγω της σημαντικής δραστηριότητάς του πάνω από τη θερμοκρασία αυτή. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλουμίνας (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) διαμέτρου 250  $\mu$ m έχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Λόγω της ισχυρής φύσεως των χημικών δεσμών, η σταθερότητα των μηχανικών τους ιδιοτήτων διατηρείται ως τους 800°C. Οι μονοκρυσταλλικές ίνες αλούμινας είναι εξαιρετικά ευαίσθητες έναντι επιφανειακής φθοράς που οδηγεί ταχύτατα σε αστοχία.

## 1.2.6 ΤΡΙΧΙΤΕΣ (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 1 $\mu$ m, ενώ το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά και παρουσιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλει 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 τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη.

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

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

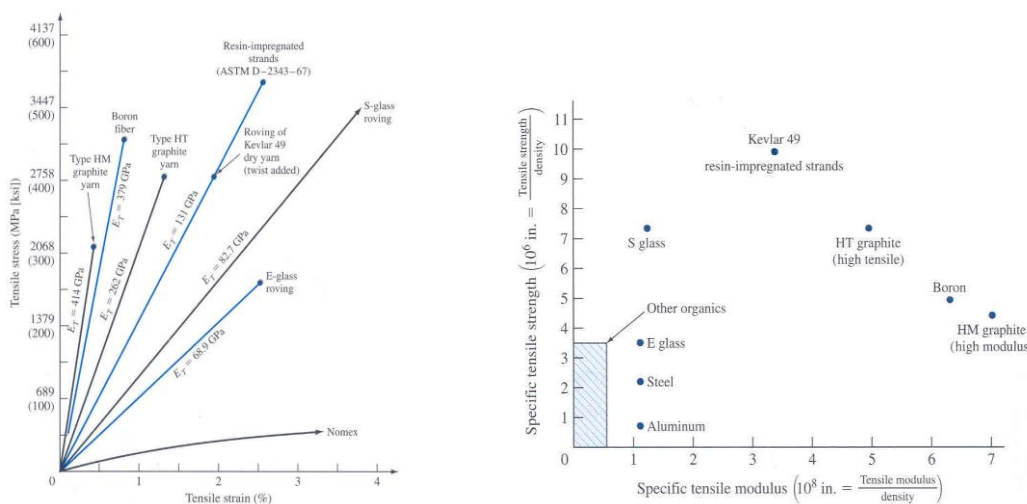
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	SiC <sub>INA</sub>	SiC <sub>ΤΡΙΧΙΤΗΣ</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>INA</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sub>ΤΡΙΧΙΤΗΣ</sub>
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	480	840	500	755
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2300	21000	2000	19500
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	3,2	3,2	4,0	4,0
Μέγιστη θερμοκρασία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

**Σχήμα 1.14:** Πίνακας 5 – Συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων και τριχιτών από SiC & Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.  
References: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

## 1.2.7 ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθινό ενισχυτικό υλικό, αλλά ταυτόχρονα χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμιάντος και η μαρμαρυγία. Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~20 nm, 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

## 1.2.8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ



**Σχήμα 1.15:** Σύγκριση ως προς την ειδική αντοχή και ακαμψία.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών

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

\* Παρουσία οξυγόνου:  $T_{\max}=500$  °C

**Σχήμα 1.16:** Πίνακας 6 – Σύγκριση θερμικής ευστάθειας ινών.

References: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

### ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών

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

**Σχήμα 1.17:** Πίνακας 7 – Σύγκριση παραμόρφωσης θραύσης ινών.

References: [http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)

## **1.3 ΜΗΤΡΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Η μήτρα αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των ινών. Παρέχει το μέσο δια του οποίου κατανέμεται το φορτίο στις ίνες χωρίς αυτές να αυτοθραύονται και ταυτόχρονα, συνεισφέρει στην ανθεκτικότητα και στην ηλεκτρική μόνωση του σύνθετου υλικού. Προκειμένου να αναπτυχθεί ισχυρή μηχανική και χημική σύνδεση μεταξύ ινών και μήτρας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ τους. Επιπλέον πρέπει να υπάρχει χημική συμβατότητα έτσι ώστε να μη λάβουν χώρα ανεπιθύμητες αντιδράσεις κατά τη σύνδεσή τους. Όταν μια ίνα σπάσει, το φορτίο από την πλευρά της σπασμένης ίνας μεταβιβάζεται στην αμέσως επόμενη από αυτή παραπλήσια ίνα. Ο μηχανισμός μετάδοσης του φορτίου είναι η διατμητική τάση εντός της μήτρας. Η μήτρα έχει χαμηλότερη πυκνότητα, ακαμψία και στερεότητα από ένα υλικό ενισχυμένο με ίνες αλλά ο συνδυασμός της μήτρας και των ινών παράγει ένα υλικό με μεγάλη στερεότητα και ακαμψία, ενώ συγχρόνως το όλο σύνολο έχει μικρότερη πυκνότητα. Ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως μήτρες για την παραγωγή σύνθετων υλικών ινών. Οι ρητίνες από τη φύση τους είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους ασθενέστερες από τις ίνες στις οποίες εμποτίζονται. Είναι περισσότερο

ευπαθείς στη θερμότητα και στην πυρκαγιά και γενικά εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στους χημικούς διαλύτες, τα οξέα, τις βάσεις και το νερό σε σχέση με τις ίνες. Όλα τα είδη των ρητινών παρουσιάζουν επίσης σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά δομικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών δεν θα μπορούσαν να υπάρξουν χωρίς τις ρητίνες, καθώς αυτές είναι που μεταφέρουν τα φορτία και κατανέμουν τις τάσεις στις ίνες κάθε στρώσης του πολυμερούς. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουν στο ινοπλισμένο πολυμερές να συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ομογενές υλικό.

Η μεγάλη διάρκεια ζωής που χαρακτηρίζει τις μήτρες πολυμερών σχετίζεται με την προοδευτική αλλαγή των φυσικών τους ιδιοτήτων, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο του χρόνου και τη φόρτιση. Η προένταση των σύνθετων υλικών μπορεί να έχει εξαιρετικά σημαντική επίδραση στη διάρκεια ζωής της μήτρας πολυμερούς. Η διάρρηξη λόγω ερπυσμού που αποτελεί τυπική μορφή αστοχίας των ινοπλισμένων πολυμερών οφείλεται στην ιξωδοπλαστική συμπεριφορά της μήτρας από πολυμερές και όχι στις ίνες. Οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή σύνθετων υλικών για την επισκευή και ενίσχυση κατασκευών είναι οι εποξικές, οι πολυεστερικές και οι βινυλεστερικές. Οι σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες των τριών αυτών κατηγοριών ρητινών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

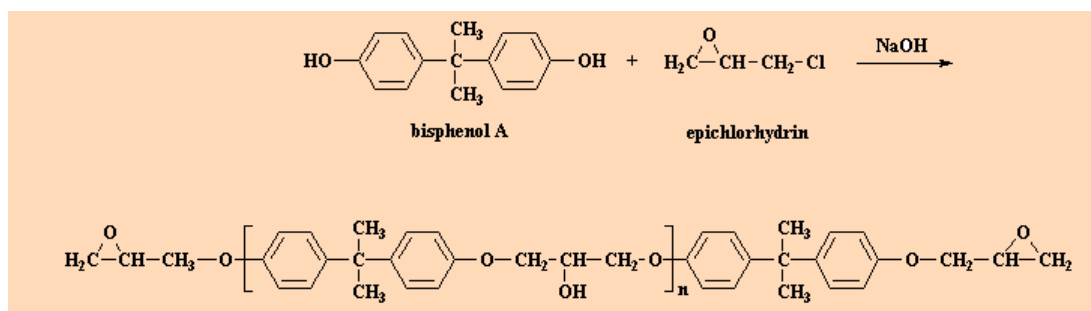
Είδος ρητίνης	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Επιμήκυνση θραύσης (%)	Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )
Εποξική	55-130	2.0-4.5	4.0-14.0	1.2-1.30
Πολυεστερική	35-104	2.1-4.1	<5.0	1.10-1.46
Βινυλεστερική	73-81	3.0-3.6	3.5-5.5	1.12-1.32

**Σχήμα 1.18: Σύγκριση ρητινών.**

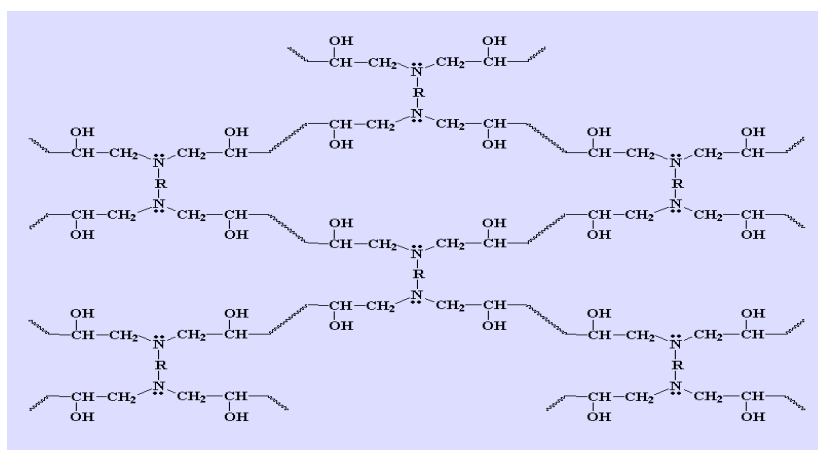
### **1.3.1 ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

Η εποξική χημεία, όπως την ξέρουμε σήμερα, στο χώρο της ναυτιλιακής και βιομηχανικής προστασίας, αναγνωρίστηκε ταυτόχρονα από τον Ελβετό P. Castan και τον Αμερικανό S. Greenlee. Οι δύο χημικοί υπέβαλλαν αιτήσεις για διάφορες ευρεσιτεχνίες στα τέλη της δεκαετίας του '30. Ο πρώτος τύπος εποξικής ρητίνης κυκλοφόρησε στο εμπόριο από την εταιρεία Ciba το 1946. Η εποξική ρητίνη έγινε το κορυφαίο προϊόν που χρησιμοποιείται σε ναυτιλιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι εποξικές ρητίνες θεωρούνται γενικά οι καλύτερες μήτρες για χρήση σε ινοπλισμένα πολυμερή λόγω της μεγάλης αντοχής, συγκολλητικής ικανότητας, ανθεκτικότητας σε κόπωση και χημική διάβρωση, καθώς και της χαμηλής συστολής ξηράνσεως που παρουσιάζουν. Όπως συμβαίνει και με τα άλλα είδη ρητινών, οι εποξικές ιδιότητες ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τη ρητίνη βάσης και τις χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους. Ο συντελεστής ιξώδους των εποξικών ρητινών είναι γενικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συντελεστή τόσο των πολυεστερικών όσο και των βινυλεστερικών ρητινών. Χρειάζονται επίσης περισσότερο χρόνο για να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις δύο άλλες κατηγορίες ρητινών. Η εποξική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε για την Παρασκευή του

σύνθετου υλικού που υποβλήθηκε σε δοκιμασία στην πτυχιακή αυτή ήταν προϊόν συμπολυμερισμού της Bisphenol A με Επιχλωριδρίνη (σχήμα 1.19). Η διασταύρωση (crosslinking) ή σκλήρυνση της ρητίνης έγινε με διαμίνη (σκληρυντής) (σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.19: Χημική αντίδραση παραγωγής μακρομορίου εποξικής ρητίνης.



Σχήμα 1.20: Διασταυρωμένη δομή εποξικής ρητίνης με διαμίνη.

### **1.3.2 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

Οι ρητίνες αυτές αποτελούν τον κύριο όγκο των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Πρόκειται για ακόρεστους πολυεστέρες που παράγονται από την αντίδραση γλυκόλης, είτε σε διβασικά οξέα είτε σε ανυδρίδες. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των συστατικών της στοιχείων, οι ιδιότητες των πολυεστερικών ρητινών μπορούν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τις. Η χημική αντίδραση σε την οποία παράγονται οι πολυεστέρες είναι σημαντικά εξώθερμη. Για το λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση τις ποσότητας τις μάζας των αντιδρώντων. Εάν η μάζα είναι μεγάλη το φύλλο πολυεστέρα μπορεί να αναφλεγεί ή να ρηγματωθεί. Αντίθετα εάν η μάζα είναι μικρή η θερμότητα που εκλύεται δεν επαρκεί για την ολοκλήρωση τις αντίδρασης. Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν μέτρια ανθεκτικότητα τις διαλύτες και τα οξέα, ενώ είναι ευπαθείς τις βάσεις και στο νερό υψηλής θερμοκρασίας. Είναι γενικά λιγότερο ανθεκτικοί σε κόπωση συγκριτικά με τις εποξικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η παραμόρφωση θραύσης είναι κατά κανόνα τις τάξης του 1%. Ωστόσο, το κυριότερο



μειονέκτημα των πολυεστερικών ρητινών για χρήση σε κατασκευές που κατοικούνται είναι η δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης.

### **1.3.3 ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ**

Πρόκειται για υβριδικές ρητίνες που παράγονται με αλυσιδωτές αντιδράσεις τις εποξικού πολυμερούς με ακρυλικές ή μεθακρυλικές ενώσεις. Λόγω της παρουσίας του εποξικού πολυμερούς, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι περισσότερο εύκαμπτες, σκληρότερες, πιο ανθεκτικές σε κόπωση και λιγότερο χημικά ενεργές σε σχέση με τις πολυεστερικές. Οι υδροξυλικές ενώσεις που περιέχονται στο εποξικό πολυμερές σχηματίζουν δεσμούς υδρογόνου με αντίστοιχες ενώσεις στην επιφάνεια των ινών υάλου. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται σημαντικά η σύνδεση της ρητίνης με τις ίνες, αν και δεν φτάνει στο επίπεδο της συγκολλησιμότητας των εποξικών ρητινών. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη απώλεια όγκου των βινυλεστερικών ρητινών λόγω συστολής ξηράνσεως. Αντιθέτως, οι βινυλεστερικές ρητίνες δεν έχουν τόσο υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα σε κόπωση όσο οι εποξικές. Λόγω της χημικής της σύστασης, αντιμετωπίζουν τις το ίδιο πρόβλημα δυσσομίας με τις πολυεστερικές ρητίνες. Η συστολή ξηράνσεως είναι γενικά της τάξης του 5 με 10%. Το κόστος της είναι συνήθως μεταξύ του κόστους των εποξικών και των πολυεστερικών ρητινών.

### **1.3.4 ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΠΟΞΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ (CURING)**

Η θερμική επεξεργασία των ρητινών – γνωστή και ως curing – είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Σε ένα τέτοιο τρισδιάστατο δίκτυο, τις τελικές ιδιότητες καθορίζουν το πλήθος των διασταυρώσεων με δεσμούς και το μήκος των μακρομοριακών αλυσίδων. Η θερμική επεξεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας συμβαίνουν οι χημικές αντιδράσεις συνήθως περιλαμβάνει (ανάλογα με το είδος των συστατικών) διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης με ελεγχόμενο ρυθμό και επιβολή πίεσης ή/και κενού αέρος. Μετά από τη διαδικασία αυτή, μπορεί να ακολουθεί επιπλέον θερμική κατεργασία υψηλής θερμοκρασίας (post curing) για ορισμένο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι ιδιότητες του υλικού.

Η θερμική κατεργασία των ρητινών εξελίσσεται σε ένα κοινό φούρνο, όπου διασφαλίζονται οι απαιτούμενες συνθήκες, είτε η ρητίνη είναι αρχικά σε υγρή μορφή, είτε σε μορφή φύλλων προ-πολυμερισμένης ρητίνης. Η θερμική κατεργασία που θα επιλεγεί θα πρέπει να έχει προφίλ τέτοιο, ώστε να επιτρέπει τον πολυμερισμό της ρητίνης σε όλο τον όγκο της, να βελτιστοποιεί τη διάρκεια του πολυμερισμού και να απομακρύνει τα αέρια που εκλύονται κατά τη διεργασία. Πολύ μεγάλη σημασία έχει ο ρυθμός ανόδου και πτώσης της θερμοκρασίας, καθώς και το θερμοκρασιακό εύρος της κατεργασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του curing, τόσο υψηλότερη τιμή έχει η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ( $T_g$ ) της μήτρας.

Ένα μεγάλο πρόβλημα της θερμικής κατεργασίας είναι η εμφάνιση πόρων στο εσωτερικό του συνθέτου υλικού που προέρχονται από τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα κατά την παρασκευή του. Οι θερμοσκληρυνόμενες εποξικές ρητίνες σε σύγκριση με τις θερμοπλαστικές μήτρες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες που δεν εξαρτώνται τόσο από τη

θερμοκρασία και παρουσιάζουν υψηλότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης( $T_g$ ).

Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα είναι το χαμηλό ιξώδες που παρουσιάζουν σε ορισμένο εύρος θερμοκρασιών κατά τη θερμική κατεργασία, με αποτέλεσμα να ρέουν εύκολα δια μέσου της φάσης ενισχυσης και να επιτυγχάνεται πολύ καλή πρόσφυση με αυτή. Ένα από τα μειονεκτήματά τις είναι ο μεγάλος συντελεστής θερμικής διαστολής, εξαιτίας του οποίου αναπτύσσονται θερμικές τάσεις στο σύνθετο υλικό. Οι νεότερες βελτιωμένες εποξικές ρητίνες παρουσιάζουν πολύ μικρό θερμικό συντελεστή, αλλά έχουν αρκετά υψηλότερο κόστος. Τέλος ένα ακόμη μειονέκτημα είναι ότι δεν ανακυκλώνονται, γεγονός που έχει αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον.

## **1.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Όλα τα υλικά όταν βρίσκουν εφαρμογή στην καθημερινή ζωή υπόκεινται σε διάφορες φορτίσεις. Γι' αυτό το λόγο είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις μηχανικές ιδιότητές της. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών αντανάκλα τη σχέση μεταξύ του εφαρμοζόμενου φορτίου ή δύναμης και της απόκρισής της ή αλλιώς παραμόρφωσης. Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες είναι η αντοχή, η παραμόρφωση, το μέτρο ελαστικότητας, η πυκνότητα η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα κλπ.

Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών εξακριβώνονται εκτελώντας στο εργαστήριο προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα, που προσομοιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις συνθήκες λειτουργίας. Στις παραμέτρους που πρέπει να εξετάζονται περιλαμβάνονται η φύση του εφαρμοζόμενου φορτίου και η διάρκειά του, καθώς τις και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι πιθανόν το φορτίο να είναι εφελκυστικό, θλιπτικό, ή διατμητικό και το μέγεθός του να παραμένει σταθερό με το χρόνο, ή να μεταβάλλεται συνεχώς. Ο χρόνος εφαρμογής μπορεί να είναι ένα μόνο κλάσμα του δευτερολέπτου ή να εκτείνεται σε μια περίοδο πολλών ετών. Ακόμα και η θερμοκρασία που επικρατεί κατά τη λειτουργική ζωή του υλικού μπορεί να αποδειχθεί σημαντικός παράγοντας. Όπως προαναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στις ενισχύσεις έχουν ως συστατικά στοιχεία τις ίνες υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας διατεταγμένες με προδιαγεγραμμένο τρόπο μέσα σε μήτρα, πολυμερικής κατά κανόνα προέλευσης. Η μήτρα και οι ίνες, ενώ διατηρούν τα επιμέρους μηχανικά τους χαρακτηριστικά, συνδυαζόμενα παράγουν σύνθετα στοιχεία με ενδιαφέρουσες και ιδιαίτερα αξιοποιήσιμες από το μηχανικό ιδιότητες.

Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων υλικών με ίνες σε μία κυρίως διεύθυνση, μπορούν να εκτιμηθούν μέσω της σχέσης που είναι γνωστή και ως κανόνας ανάμιξης (rule of mixtures):

$$E_f \approx E_{fib} V_{fib} + E_m V_m \approx E_{fib} V_{fib} \\ \sigma_f \approx \sigma_{fib} V_{fib} + \sigma_m V_m \approx \sigma_{fib} V_{fib}$$

όπου:

$E_f$  : μέτρο ελαστικότητας συνθέτου υλικού παράλληλα τις ίνες

$E_{fib}$  : μέτρο ελαστικότητας ινών

$E_m$  : μέτρο ελαστικότητας μήτρας

$V_{fib}$  : ογκομετρικό ποσοστό ινών

$V_m$  : ογκομετρικό ποσοστό μήτρας =  $1 - V_{fib}$

$f_f$  : εφελκυστική αντοχή συνθέτου υλικού παράλληλα τις ίνες

$f_{fib}$  : εφελκυστική αντοχή ινών

$f_m$  : εφελκυστική αντοχή μήτρας

### **1.4.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (Density)**

Σε σύγκριση με το χάλυβα και το σκυρόδεμα τα σύνθετα υλικά έχουν σχεδόν υποπενταπλάσια πυκνότητα. Για παράδειγμα ο άνθρακας έχει πυκνότητα  $1,6/cm^3$  ενώ ο χάλυβας  $7,9/cm^3$  και το σκυρόδεμα  $2,4/cm^3$ . Αυτό το χαρακτηριστικό οδηγεί σε πολύ υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία αλλά έχει και μεγάλη επίπτωση στην μείωση του κόστους μεταφοράς διακίνησης και κατασκευής.

### **1.4.2 ANTOXH (Strength)**

Τα όρια εφελκυσμού των σύνθετων υλικών κυμαίνονται πιο κοντά σε αυτά του μαλακού χάλυβα παρά σε prestressing χάλυβα. Ενώ κανονικά η θλιπτική αντοχή του χάλυβα είναι ταυτόσημη με την αντοχή σε εφελκυσμό η αντοχή σε θλίψη είναι συνήθως μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού. Ωστόσο η αντοχή των εμπορικών σύνθετων υλικών είναι τεράστια σε σχέση με εκείνη των συμβατικών κατασκευαστικών υλικών. Σε καταστάσεις όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και θλιπτικές δυνάμεις πολύτιμα θεωρούνται στοιχεία όπως η αντοχή και η κάμψη για αυτό και τα σύνθετα υλικά προσφέρουν ισχυρά κίνητρα για χρήση. Η διατμητική αντοχή όλων των μονής κατεύθυνσης ελασμάτων είναι σχετικά χαμηλή δεδομένου ότι η παράμετρος αυτή ελέγχεται κυρίως από τη δύναμη τις ρητίνης στα σύνθετα υλικά. Ωστόσο ένα έλασμα που αποτελείται από πολλαπλές ίνες μπορεί να σχεδιαστεί με συγκεκριμένο προσανατολισμό που να ταιριάζει με τη μέγιστη διατμητική τάση. Σε μια τέτοια περίπτωση η διατμητική αντοχή παρέχεται από τις ίνες οι οποίες δρουν αντί για τη ρητίνη.

### **1.4.3 ANTOXH ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ**

Η αντοχή εφελκυσμού είναι ένα σημαντικό πρόβλημα κατά το σχεδιασμό των στρώσεων σύνθετων υλικών (lamina design) και είναι συχνά η αιτία αστοχίας. Είναι φανερό ότι η αντοχή εφελκυσμού θα είναι μικρότερη από την αντοχή εφελκυσμού τις μήτρας επειδή το φορτίο που αναλαμβάνεται μόνο από τη μήτρα με μειωμένη τη διατομή λόγω των ινών και επειδή οι ίνες εισάγουν σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Το θέμα περιπλέκεται ακόμη περισσότερο λόγω παρουσίας εσωτερικών τάσεων και παραμορφώσεων μεταξύ ινών και μήτρας.

Τις εξαρτάται από πόσο καλή διεπιφανειακή σύνδεση υπάρχει μεταξύ ινών και μήτρας. Λόγω κατανομής φορτίων για τις ίνες και τη μήτρα έχουμε:

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_p (1 - V_f) \quad (1)$$

Το τι θα συμβεί εξαρτάται από το κλάσμα όγκου των ινών και από αν η παραμόρφωση θραύσης τις ίνας  $\epsilon_f$  είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την παραμόρφωση θραύσης τις μήτρας  $\epsilon_p$ .

Αν  $\epsilon_f > \epsilon_p$  και το  $V_f$  είναι μεγάλο οι ίνες παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο φορτίο μέχρι

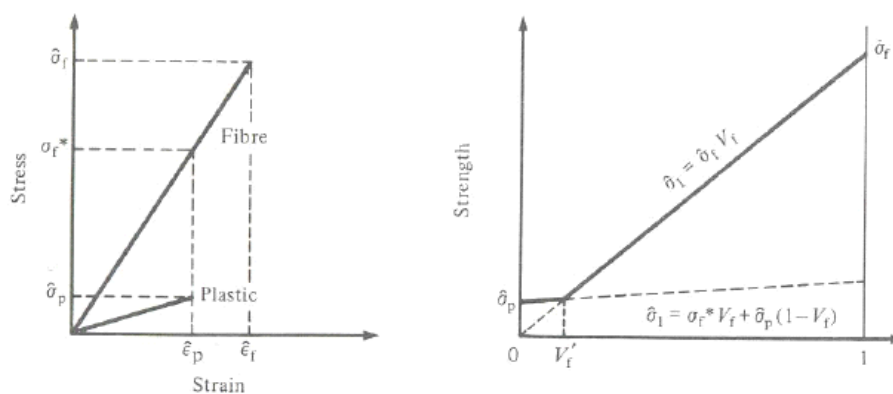
$$\sigma_1 = \sigma_f V_f \quad (2)$$

Σε πολύ μικρό  $V_f$ , όταν η μήτρα θραύεται το φορτίο περνά τις ίνες. Η πλήρης θραύση του στρώματος ακολουθεί επειδή η ποσότητας των ινών δεν μπορεί να παραλάβει όλο το φορτίο οπότε ισχύει η σχέση:

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_f^* V_f + \bar{\sigma}_p (1 - V_f) \quad (3)$$

Το κλάσμα όγκου  $V_f$  των ινών όπου η αστοχία καθορίζεται σε ίδιο βαθμό από τη μήτρα και τις ίνες προκύπτει με εξίσωση των σχέσεων (2) και (3) και προσδιορίζεται από τη σχέση (4)

$$V_f' = \frac{\sigma_p}{\bar{\sigma}_f - \sigma_f^* + \bar{\sigma}_p} \quad (4)$$



Longitudinal tensile strength of lamina when fibre fracture strain is greater than that of the matrix

**Σχήμα 1.21:** Διαγράμματα αντοχής εφελκυσμού.

Αν  $\bar{\epsilon}_p > \bar{\epsilon}_f$  για μεγάλο  $V_f$  μόλις οι ίνες σπάσουν το πολυμερές δεν μπορεί να παραλάβει το επιπλέον φορτίο και θραύεται οπότε και ισχύει η σχέση (5)

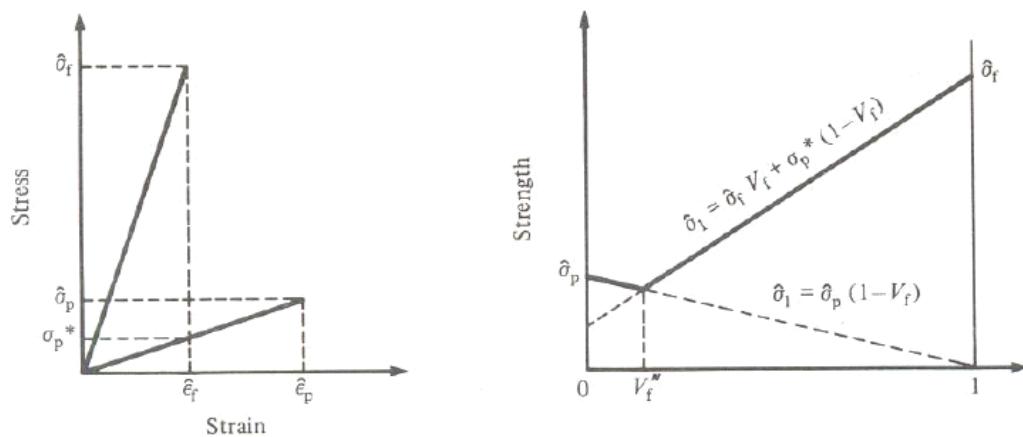
$$\bar{\sigma}_f = \bar{\sigma}_f V_f + \sigma_p^* (1 - V_f) \quad (5)$$

Αν  $\bar{\varepsilon}_p > \bar{\varepsilon}_f$  για πολύ μικρό  $V_f$ , όταν οι ίνες σπάσουν το πολυμερές μπορεί ακόμη να μεταφέρει επιπλέον φορτίο μέχρι τη θραύση του που θα συμβεί σύμφωνα με τη σχέση (6)

$$\bar{\sigma}_1 = \bar{\sigma}_p(1 - V_f) \quad (6)$$

Το κλάσμα όγκου των ινών  $V_f''$  όπου η αστοχία καθορίζεται σε ίδιο βαθμό από τη μήτρα και τις ίνες προκύπτει με εξίσωση των σχέσεων (5) και (6) και προσδιορίζεται από τη σχέση (7)

$$V_f'' = \frac{\bar{\sigma}_p - \sigma_p^*}{\bar{\sigma}_f - \sigma_p^* + \bar{\sigma}_p} \quad (7)$$



Longitudinal tensile strength of lamina when fibre fracture strain is less than that of the matrix

**Σχήμα 1.22:** Διαγράμματα αντοχής εφελκυσμού.

### **1.4.4 ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΕΩΣ (ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ)**

Οι στρώσεις των σύνθετων υλικών μπορεί να αστοχήσουν με διάφορους τρόπους ανάλογα με το σύστημα που χρησιμοποιείται. Σε τάσεις συμπίεσης κατά μήκος των ινών τα μοντέλα θεωρούν τις ίνες σαν στηρίγματα συγκρατούμενες κατά μήκος τους από μια εύκαμπτη μήτρα. Η συμφωνία μεταξύ θεωρίας και πειραματικών αποτελεσμάτων δεν είναι καλή και αυτό γιατί η διεύθυνση των ινών μέσα στη μήτρα δεν είναι ιδανική. Σε τάσεις συμπίεσης κάθετα προς τη διεύθυνση των ινών η αστοχία γίνεται με διάτμηση της μήτρας.

### 1.4.5 ANTOXH ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η αντοχή διάτμησης εντός του στρώματος σύνθετου ορθοτροπικού υλικού καθορίζεται από την αντοχή διάτμησης της μήτρας επειδή η αστοχία του πλαστικού μπορεί να συμβεί με διάτμηση της μήτρας χωρίς την συμμετοχή των ινών.

### 1.4.6 ΑΚΑΜΨΙΑ - ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ (Stiffness)

Πολλές δημοσιεύσεις έχουν γίνει για την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τη μεταβολή της κατ' όγκου περιεκτικότητας του σύνθετου σε κόκκους, του μεγέθους των κόκκων και της πρόσφυσης μεταξύ κόκκων και μήτρας. Οι Moloney και Kausch έκαναν πειράματα το 1986 σε δοκίμια με μήτρα από εποξική ρητίνη και εγλείσματα από κόκκους πυριτίου, αλουμινίου και χαλαζία. Τα πειράματα τους έδειξαν μια αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου με την αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας σε κόκκους.

Η ακαμψία των σύνθετων υλικών συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε ίνες μέσα στο υλικό αλλά και τον προσανατολισμό τους. Το γυαλί έχει γενικά χαμηλότερη ακαμψία από τον άνθρακα. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι ότι τα υλικά που παρουσιάζουν το φαινόμενο γραμμικής ή σχεδόν γραμμικής τάσης – παραμόρφωσης σε όλο τους το φορτίο μεταφέρουν ένα φάσμα πράγμα που σημαίνει ότι η δυσκαμψία δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η συμπεριφορά είναι σημαντικά διαφορετική από εκείνη του χάλυβα. Για παραμόρφωση τους στρώματος κατά τη διεύθυνση των ινών η ιδανική σύνδεση των δύο υλικών (ινών και μήτρας) συνεπάγεται:

$$\epsilon_1 = \epsilon_p = \epsilon_f$$

Από τον κανόνα των μιγμάτων έχουμε:

$$E_1 = E_p V_p + E_f V_f$$

Ο κανόνας των μιγμάτων λειτουργεί αρκετά καλά στην πράξη: Αν  $E_p \ll E_f$  όπως την πράξη συμβαίνει η ελαστικότητα  $E_1$  η ελαστικότητα καθορίζεται από τις ίνες εκτός και αν το κλάσμα του όγκου  $V_f$  είναι πολύ μικρό. Για παραμόρφωση κάθετα προς τη διεύθυνση των ινών η τάση στη μήτρα και τις ίνες είναι ίδια οπότε έχουμε

$$\sigma_2 = E_2 \epsilon_2 = E_p \epsilon_p = E_f \epsilon_f \quad \epsilon_f \epsilon_2 = \epsilon_p V_p + \epsilon_f V_f$$

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτει:

$$(1/E_2) = (V_f / E_f) + (V_p / E_p)$$

### **1.4.7 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (Coefficient of thermal expansion)**

Σε αντίθεση με τα δομικά υλικά που η μηχανική συμπεριφορά είναι των υλικών είναι γνωστή πολλά σύνθετα υλικά (μονής κατεύθυνσης ινών) συρρικνώνονται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα ο άνθρακας και το αραμίδιο έχει αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής ενώ το γυαλί θετικό. Παρόλο που οι ρητίνες διαστέλλονται θερμικά ο άνθρακας και το αραμίδιο αντιστέκονται στην θερμική διαστολή. Το μέγεθος της θερμικής συρρίκνωσης του άνθρακα και της θερμικής διαστολής των εποξικών ρητινών είναι περίπου ίδιο ώστε να αλληλοεξουδετερωθούν και έτσι να οδηγήσουν σε ένα συνολικό μηδενισμό του συντελεστή θερμικής διαστολής.

### **1.4.8 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (Electrical conductivity)**

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών επηρεάζεται από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υψηλή υγρασία και η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να περιορίσει τη χρησιμότητα των πολυμερών σύνθετων υλικών και να αλλάξει σημαντικά την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα.

Οι φυσικοί στο Πανεπιστήμιο του Λουξεμβούργου έχουν αναπτύξει μια νέα μέθοδο για τη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των πολυμερών σύνθετων υλικών. Με την εισαγωγή πρόσθετων σε πολυμερή σύνθετα υλικά, μπορεί να επιτευχθούν ευνοϊκές ιδιότητες. Για παράδειγμα, αναπτύσσονται ευνοϊκότερες ηλεκτρικές ιδιότητες όταν ενισχυθούν με νανοσωλήνες άνθρακα. Τέτοιου είδους σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται για να κάνουν τις ηλιακές κυψελίδες πιο αποτελεσματικές.

<i>Είδος ρητίνης</i>	<b>Εφελκυστική αντοχή (MPa)</b>	<b>Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)</b>	<b>Επιμήκυνση θραύσης (%)</b>	<b>Πυκνότητα (gr/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Εποξειδική</b>	<b>55-130</b>	<b>1.0-4.5</b>	<b>4.0-14.0</b>	<b>1.20-1.30</b>
<b>Πολυεστερική</b>	<b>35 - 104</b>	<b>2.1-4.1</b>	<b>&lt;5.0</b>	<b>1.10-1.46</b>
<b>Βινυλεστερική</b>	<b>73-81</b>	<b>3.0-3.6</b>	<b>3.5-5.5</b>	<b>1.12-1.32</b>

**Σχήμα 1.23: Μηχανικές ιδιότητες ρητινών.**



Ιδιότητα (σε 20 °C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0,5 - 20	20 - 50	205
Μέτρο διάτμησης (GPa)	0,2 - 8	8 - 21	80
Λόγος Poisson	0,3 - 0,4	0,2	0,3
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Διατμητική αντοχή (MPa)	10 - 30	2 - 5	150 - 400
Θλιπτική αντοχή (MPa)	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0,5 - 5	0,015	20 - 25
Ενέργεια θραύσης κατά προσέγγιση (Jm <sup>-2</sup> )	200 - 1000	100	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> /°C)	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Υδατοαπορροφητικότητα 7 ημ. 25°C (% κ.β.)	0,1 - 3	5	0
Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (°C)	50 - 80	-	-

**Σχήμα 1.24:** Σύγκριση τυπικών ιδιοτήτων μεταξύ σκυροδέματος, χάλυβα και εποξεικής ρητίνης.

## **1.5 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **1.5.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ**

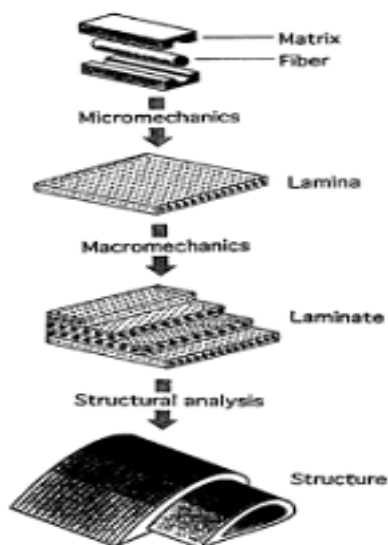
Η μελέτη των οριακών ιδιοτήτων των κατασκευαστικών υλικών κάτω από σύνθετες καταπονήσεις αποτελεί δυσεπίλυτο και ταυτόχρονα ένα μεγάλο διαχρονικό πρόβλημα για διάφορες επιστημονικές κοινότητες.

Η κύρια αιτία που οδηγεί σε αστοχία ένα υλικό εκτός από τη φθορά και τη διάβρωση είναι η παραμόρφωση με την οποία μεταβάλλεται το σχήμα ενός υλικού και αφορά κυρίως τις μηχανικές αστοχίες με τις οποίες θα ασχοληθούμε και εμείς σε αυτή την εργασία. Ένα είδος μηχανικής αστοχίας το οποίο θα αναφερθούμε και παρακάτω είναι η αποκόλληση, η οποία εμφανίζεται στις επιφάνειες των προηγμένων υλικών. Σαν αποτέλεσμα, όταν τα υλικά αυτά βρεθούν κάτω από κρίσιμο συνδυασμό εντατικών καταστάσεων να εγείρεται η διάρρηξη του δεσμού πρόσφυσης και κατά συνέπεια να αποτελούν εστίες εκκίνησης ρωγμών.

## 1.5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Υπάρχουν κάποιες τεχνικές στα εργαστήρια μελετών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη των βιομηχανισμών των ρωγμών και τη διερεύνηση της αστοχίας των υλικών. Στα σύνθετα υλικά οι κύριες αιτίες της αστοχίας των υλικών είναι:

- Σπάσιμο των ινών
- Αποκόλληση (δηλαδή διαχωρισμός των ινών και της μήτρας)
- Μικρορωγμές στη πολυμερή μήτρα
- Αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών



**Σχήμα 1.25:** Ιεραρχία ανάλυσης της δομής πολυστρωματικού σύνθετου υλικού.

Οι τρόποι αστοχίας των σύνθετων υλικών μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικούς τύπους:

- ✓ Αστοχία εντός του στρώματος (Interlaminar).
- ✓ Αστοχία μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων (Intralaminar).
- ✓ Αστοχία που διατρέχει το μέγιστο μέρος ή το σύνολο των στρωμάτων (Translaminar).

## 1.5.3 ΣΠΑΣΙΜΟ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

Αρχικά οι ίνες μπροστά στην ρωγμή είναι ανέπαφες. Εάν καταπονηθούν σημαντικά κοντά στην άκρη της ρωγμής οι ίνες θα σπάσουν. Αμέσως πίσω από τη ρωγμή οι ίνες θα βγούν έξω από τη μήτρα. Η πίεση κοντά στην άκρη της ρωγμής μπορεί να ωθήσει τις ίνες και να ξεκολλήσουν από τη μήτρα πριν σπάσουν. Σε μεταλλικά υποστρώματα η πλαστική παραμόρφωση απαιτεί σημαντική ενέργεια και έτσι είναι πραγματικά πάρα πολύ δύσκολο να επιτευχθεί

#### **1.5.4 ΜΙΚΡΟΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ**

Οι μικρορωγμές της μήτρας είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο το οποίο υποβαθμίζει τις θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού συμπεριλαμβανομένου και των αλλαγών που υφίσταται σε όλες τις παραμέτρους αποτελεσματικές μονάδες του (πχ λόγος του poisson και συντελεστές θερμικής διαστολής). Μια ακόμα αρνητική επίπτωση των μικρορωγμών είναι η θραύση των ινών οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν οδούς για την είσοδο των διαβρωτικών υγρών μέσα στο υλικό.

#### **1.5.6 ΑΠΟΦΛΟΙΩΣΗ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Η αποφλοιώση πολυστρωματικών υλικών βρίσκεται στην κορυφή των χειρότερων καταστάσεων για ένα σύνθετο υλικό γιατί μπορεί να υποβαθμίσει τόσο πολύ τις ιδιότητες του ώστε να το καταστήσει χωρίς καμία χρησιμότητα για τις εφαρμογές που προορίζεται. Ο δειπιφανειακός διαχωρισμός που προκαλείται από την αποκόλληση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρο λυγισμό, κραδασμούς, διείδυση της υγρασίας, δυσκαμψία.

#### **1.5.7 ΟΡΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ - ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ**

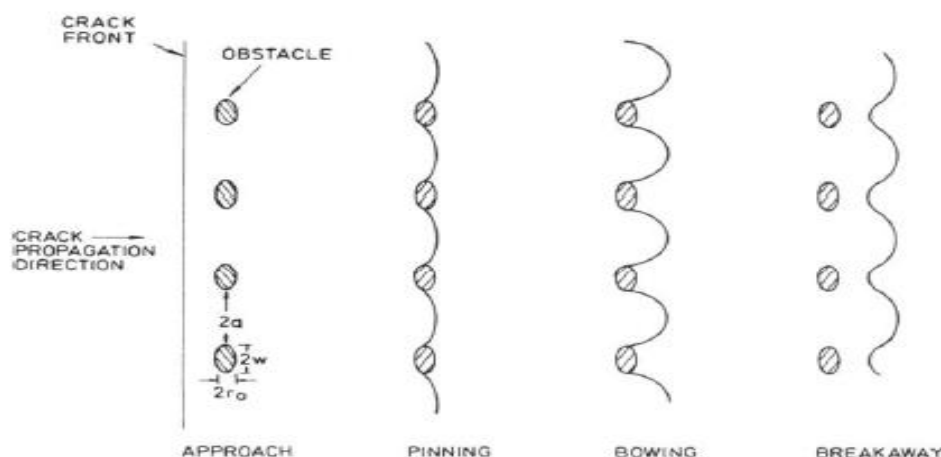
Η αποκόλληση οφείλεται στην ανάπτυξη σημαντικών διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια υποστρώματος και οφείλεται κυρίως στη μικρή διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Οι τάσεις αυτές δεν μπορούν να μεταβιβαστούν από το ένα υλικό στο άλλο με αποτέλεσμα την αστοχία του δομικού στοιχείου. Η αστοχία αυτή είναι ψαθυρής μορφής. Η μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει το σύνθετο υλικό εξαρτάται από το μήκος αγκύρωσης και τη μέση διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μεταξύ δύο στρώσεων σύνθετου υλικού ή μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Στην πρώτη περίπτωση, η αντοχή της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της ρητίνης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να μεταβιβασθεί ανά μονάδα διεπιφάνειας εξαρτάται από τη διατμητική αντοχή της εξισωτικής στρώσης με το δομικό στοιχείο. Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μορφές αποκόλλησης οι οποίες είναι:

- Αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή
- Διατμητική αστοχία του υποβάθρου

#### **1.5.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

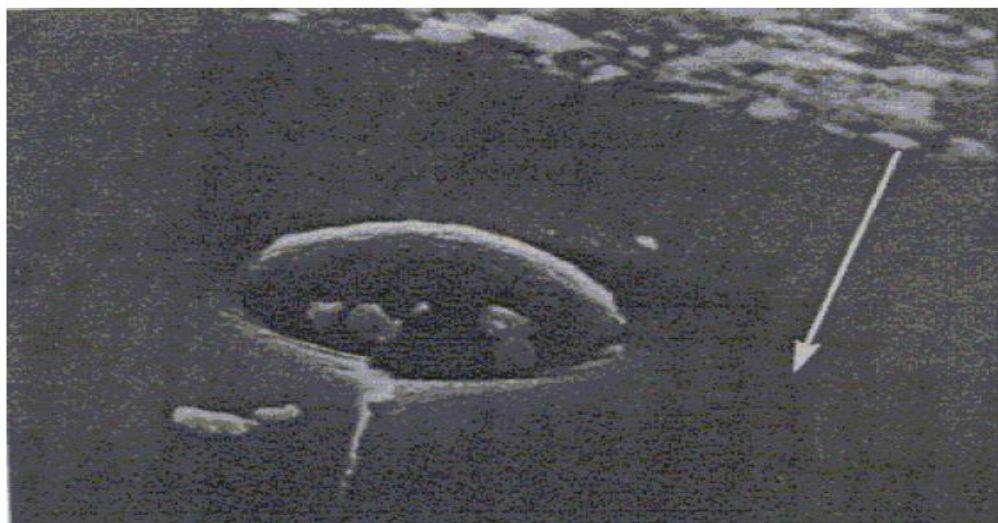
Τα κυριότερα μεγέθη που εξετάζονται για τη διάδοση μιας ρωγμής μέσα στο σύνθετο υλικό είναι η ενέργεια θραύσης καθώς και ο συντελεστής έντασης τάσεων. Τα μεγέθη αυτά δεν είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία των ρωγμών παρά μόνο για την διάδοσή τους. Στις εποξικές και πολυεστερικές ρητίνες η

ενέργεια θραύσης και η αντίσταση στη διάδοση των ρωγμών είναι σε σχέση με άλλα υλικά σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Με την προσθήκη κόκκων λοιπόν σε αυτές τις μήτρες η αντίσταση τους στη διάδοση των ρωγμών αρχίζει και αυξάνεται. Αιτία των αυξήσεων αυτών είναι ότι οι κόκκοι παρεμβαίνουν στο μέτωπο της ρωγμής και δυσκολεύουν την διάδοση της όπως επίσης και η απορρόφηση ενέργειας από τα εγκλείσματα. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε παραστατικά πως επιδρά μια σειρά κόκκων στο μέτωπο της ρωγμής :



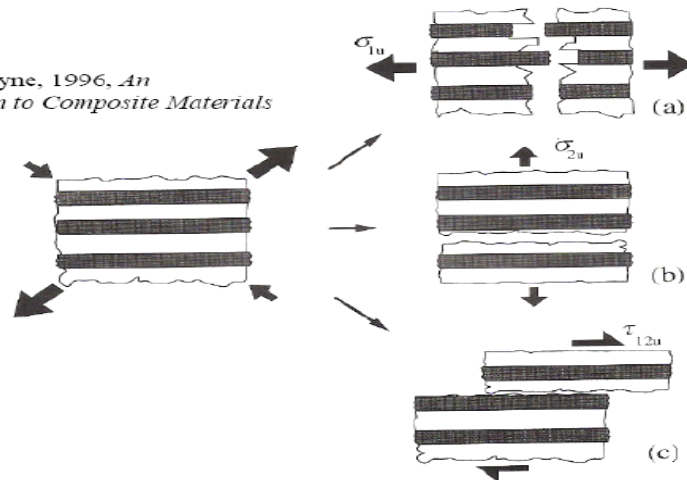
**Σχήμα 1.26:** Επίδραση Κόκκων στο μέτωπο της ρωγμής.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε τρία βασικά στάδια. Αρχικά το μέτωπο της ρωγμής συναντά τους κόκκους οι οποίοι δημιουργούν ισχυρές επιφάνειες και ακινητοποιούν τη ρωγμή στα σημεία εκείνα που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια του κόκκου. Έτσι η ρωγμή σταματά να κινείται. Στο δεύτερο στάδιο η ρωγμή αρχίζει να καμπυλώνεται ανάμεσα στους κόκκους και προσπαθεί να "τυλίξει" την επιφάνεια κάθε κόκκου. Στο τρίτο στάδιο η ρωγμή έχει καμπυλωθεί τόσο ώστε να έχουμε το σχηματισμό ενός νέου μετώπου πίσω από την σειρά των κόκκων.



**Σχήμα 1.27:** Διάδοση ρωγμής γύρω από την επιφάνεια σφαιριδίου.

Hull and Clyne, 1996, *An Introduction to Composite Materials*



Σχήμα 1.28: Βασικοί τρόποι αστοχίας.

## **1.6 ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

Ο σκοπός των μεθόδων ελέγχου είναι να επιβεβαιώνει πως όλα τα στάδια κατασκευής με σύνθετα υλικά εκτελούνται με σωστό τρόπο. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής λοιπόν θα πρέπει να γίνονται οι εξής έλεγχοι:

- Έλεγχος (εξακρίβωση) της σωστής εφαρμογής των σύνθετων υλικών (εφαρμογή στην ορθή κατεύθυνση με ευθυγραμμισμένες ίνες – απόκλιση ευθυγραμμίας μεγαλύτερη από 8cm/m πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη – ορθή αναλογία ινών ρητίνης, ορθή ανάμειξη και επάλειψη επιφάνειας με εποξική ρητίνη).
- Έλεγχος (επιβεβαίωση) των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού (ίνες και ρητίνη) σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3039 – δοκιμή εφελκυσμού (δοκιμή στο εργαστήριο).
- Έλεγχος (επιβεβαίωση) της ομαλής τελικής επιφάνειας και της συνέχειας των συνθέτων υλικών μετά την εφαρμογή τους.
- Έλεγχος (επιβεβαίωση) της ενδεδειγμένης εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας σύνθετου υλικού – σκυροδέματος).

### **1.6.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ**

Ο έλεγχος της διεπιφάνειας μπορεί να γίνει είτε με χρήση ελάχιστα καταστροφικών δοκιμών είτε με τη χρήση μη καταστροφικών δοκιμών (Non Destructive Testing (NDT)). Η χρήση των μη καταστροφικών δοκιμών ενδείκνυται σε κρίσιμες περιοχές μελών στις οποίες δεν θέλουμε καμία φθορά του σύνθετου υλικού.

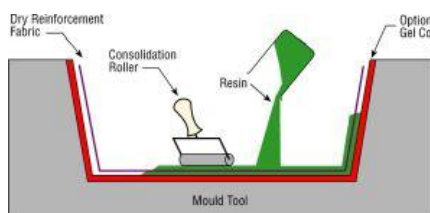
Ελάχιστα καταστροφικές δοκιμές ενδείκνυνται για προσδιορισμό της αντοχής της διεπιφάνειας (pull-off test). Μη καταστροφικές δοκιμές (NDT) για τον προσδιορισμό των κενών (μέθοδος υπερήχων, μέθοδος υπέρυθρης φωτογράφισης, απλή ακουστική μέθοδος

### **1.6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

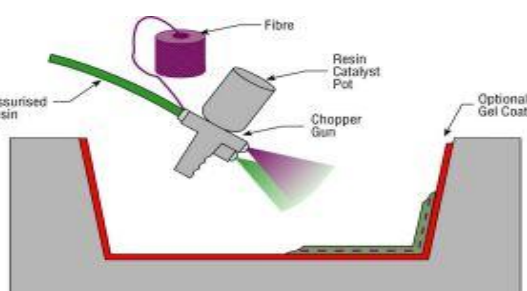
Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα προκειμένου τα σύνθετα υλικά να γίνουν πιο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά και για να διασφαλιστεί η ποιότητα τους θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις μεθόδους παραγωγής. Οι κυριότερες παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay-Up).
- Επίστρωση με ψεκασμό (Spray-Up).
- Μορφοποίηση με συμπίεση εν ψυχρώ (Cold Press Molding).
- Μορφοποίηση με συμπίεση εν θερμώ (Hot Press Molding).
- Μορφοποίηση χύτευση με συμπίεση (Compression Molding).
- Μορφοποίηση με έγχυση ρητίνης (Resin Injection).
- Μορφοποίηση με θέρμανση σε κενό (Vacuum Thermoforming).
- Μορφοποίηση με θέρμανση κάτω υπό πίεση (Pressure Thermoforming).
- Μορφοποίηση σε θάλαμο κενού (Vacuum Bag Molding Process).
- Μορφοποίηση σε αυτόκλειστο (autoclave Molding Process).
- Μορφοποίηση με περιστροφική χύτευση (Rotational Molding).

Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε μια διαγραμματική παρουσίαση μερικών μεθόδων μορφοποίησης σύνθετων πολυμερών υλικών.

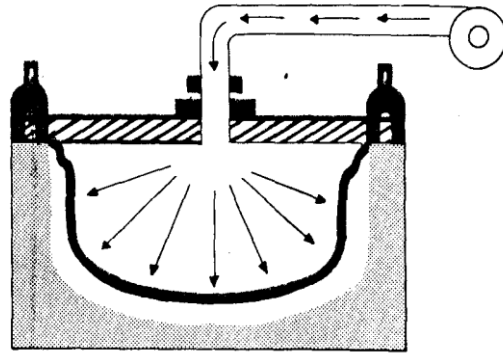
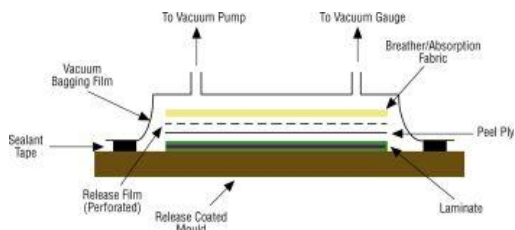


**Σχήμα 1.29:** Hand Lay-up.



**Σχήμα 1.30:** Spray-up

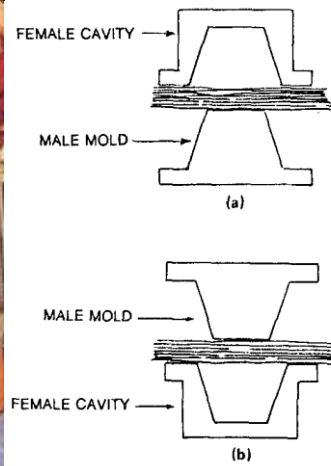




Σχήμα 1.31: *Vacuum-Bag Molding*. Σχήμα 1.32: *Pressure-Bag Molding*.



Σχήμα 1.33: *Autoclave Molding*.

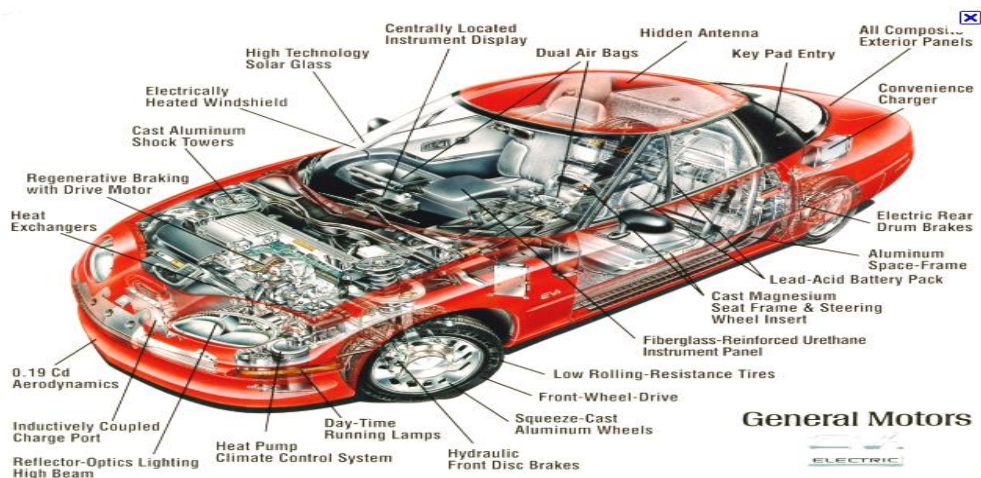


Σχήμα 1.34: *Closed-mold*.



## 1.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Όπως ήδη αναφέραμε αρχικά τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνταν σε δευτερευούσης σημασίας κατασκευές έως την δεκαετία του 60' από όπου σιγά σιγά επεκτάθηκαν σε πρωτεύουσας σημασίας κατασκευαστικά στοιχεία κυρίως σεναυπηγικές, αεροναυπηγικές, αεροδιαστημικές εφαρμογές, αυτοκινητοβιομηχανία, μέσα μεταφοράς κ.ά. Η μείωση του κόστους ανάπτυξης σχεδίασης και παραγωγής των σύνθετων υλικών και φυσικά η απόκτηση γνώσης και εμπειρίας για την συμπεριφορά τους οδήγησε στην επέκταση των εφαρμογών τους. Σήμερα τομείς όπως η αεροναυπηγική, η οικοδομική, οι αυτοκινητοβιομηχανίες, οι βιομηχανίες ειδών αναψυχής χρησιμοποιούν σε μεγάλη κλίμακα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες. Ακόμη και πλαστικά ενισχυμένα με κόκκους άλλων ισχυρότερων υλικών ή μετάλλων (κοκκώδη υλικά) έχουν αυξανόμενη χρήση στη βιομηχανία. Τα σύνθετα πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρέως στις αυτοκινητοβιομηχανίες. Η βελτιωμένη απόδοση τους οφείλεται στην πυκνότητα των υλικών και τη χαμηλή αποδοτικότητα καυσίμου. Οι πρόσφατες καινοτομίες στον τομέα των προηγμένων σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία έχει οδηγήσει στη χρήση του άνθρακα, πλαστικό ενισχυμένο με ίνες (CFRP). Η γνωστή σε όλους μας Φόρμουλα 1 η οποία συμπεριλαμβάνει αγωνιστικά αυτοκίνητα στις αρχές της δεκαετίας του '90 είχε σασί (chassis) τα οποία είναι χτισμένα με πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα.

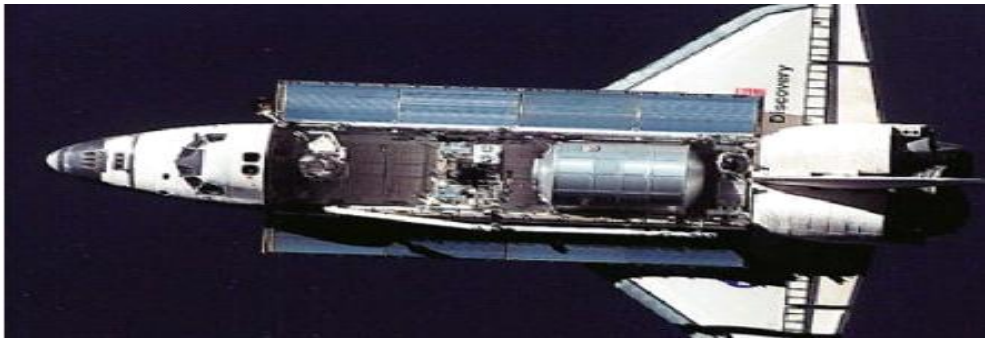


**Σχήμα 1.35:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Μια θερμοπλαστική ολεφίνη ενισχυμένη με μικρό ποσοστό πρόσθετου υλικού (2,5%) όπως η άργιλος χρησιμοποιήθηκε από την General Motors το 2002. Τώρα θεωρείται ότι το σύνθετο πολυμερές μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πιθανό υλικό στα διάφορα οχήματα για τα εξωτερικά και εσωτερικά μέρη όπως οι βάσεις-φωλιές καθρεφτών, οι λαβές θυρών κλπ. Επίσης τα σύνθετα πολυμερή έχουν χρησιμοποιηθεί και σαν επιστρώματα ή χρωστικές ουσίες. Το Plano Colors ή οι νανοχρωστικές που γίνονται από τους αργίλους και τις οργανικές χρωστικές ουσίες θεωρούνται ως πιθανά ευνοϊκά για το περιβάλλον υποκατάστατα των χρωστικών του τοξικού καδμίου (Cd) και του παλλαδίου (Pd). Επιπλέον η αξιοπρόσεκτη ηλεκτροχημική συμπεριφορά των πολυμερών

που συνδέονται με μεταλλεύματα αργίλου προσελκύουν τις πιθανές εφαρμογές όπως τα τροποποιημένα ηλεκτρόδια, βιοαισθητήρες, μπαταρίες στερεάς κατάστασης, έξυπνα παράθυρα και άλλες ηλεκτροχημικές συσκευές.

Πηγαίνοντας τώρα στην αεροδιαστημική βλέπουμε και εκεί εκτεταμένη χρήση των σύνθετων πολυμερών καθότι έχουν παραστεί ανάγκες για την χρησιμοποίηση ελαφρύτερων υλικών όπου αυτό σημαίνει είτε την μεγαλύτερη δυνατότητα μεταφοράς φορτίου είτε τη βασική μείωση του κόστους λειτουργίας για το ίδιο το μεταφερόμενο φορτίο. Ένα καλό παράδειγμα του πόσο μπορούν να συντελέσουν τα σύνθετα στην εξοικονόμηση βάρους οπότε και στο κόστος γενικότερα είναι η περίπτωση της κατασκευής δορυφόρων όπου το κόστος της εκτόξευσης μπορεί να υπερβαίνει το κόστος του σχεδιασμού αλλά και όλης της κατασκευής του. Έτσι λοιπόν τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή αραμιδίου πλαστικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διαστημόπλοιων και δορυφόρων για την κατασκευή στηριγμάτων ηλιακών κυψελίδων, δεξαμενών αποθήκευσης προωθητικών αερίων, καθώς και για την κατασκευή κορμών μηχανής αλλά και κινούμενων τμημάτων μηχανής. Εκτός από τη μείωση του βάρους στις κατασκευές, τα υλικά αυτά με τον πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα διαστάσεων στις κατασκευές. Η κατασκευή κεραιών καθώς και φίλτρων ή στηριγμάτων τηλεσκοπίων, στηρίζεται τώρα στα υλικά αυτά. Τα εξαρτήματα αυτά εκτίθενται σε θερμοκρασίες που ποικίλουν και αποτελούν τον απαραίτητο εξοπλισμό για ένα διαστημόπλοιο.



**Σχήμα 1.36:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική.

Στα μαχητικά αεροσκάφη τα σύνθετα υλικά προσφέρουν εξαιρετικές ιδιότητες. Σε αεροσκάφη της πολιτικής αεροπορίας τα σύνθετα χρησιμοποιήθηκαν πρωταρχικά για τη μείωση του βάρους στα εσωτερικά τους τμήματα όπως στο δάπεδο του αεροσκάφους, στις πόρτες αποσκευών και στην όλη εσωτερική επίπλωση. Ένα καλό παράδειγμα της χρησιμότητάς τους είναι το Airbus320 στο οποίο χρησιμοποιούνται σύνθετα εποξικής ρητίνης/ινών άνθρακα τόσο στα πτερύγια όσο και στο ουραίο πτερύγιο, εξοικονομώντας συνολικά πάνω από 800 Kg, σε σχέση πάντα με την παραδοσιακή κατασκευή από ειδικά κράματα αλουμινίου.

## Composites in Aerospace

**Composites in use in space/military aircraft since late 1960s.**



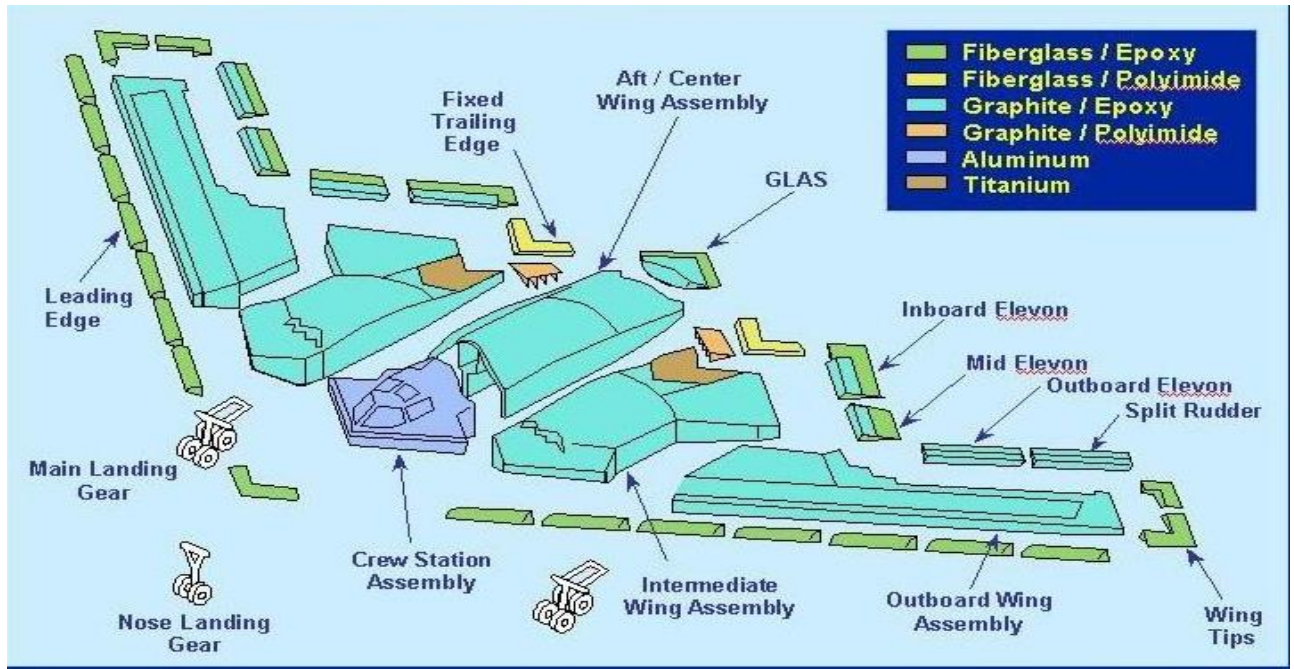
*B2 Bomber*



*RAH 66 Comanche Helicopter*

**Σχήμα 1.36α:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική.





Σχήμα 1.36β: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική.

## Application - Aerospace

Composites being increasingly used in commercial aircraft




- Toughened Graphite
- Graphite
- Hybrid
- Fiberglass

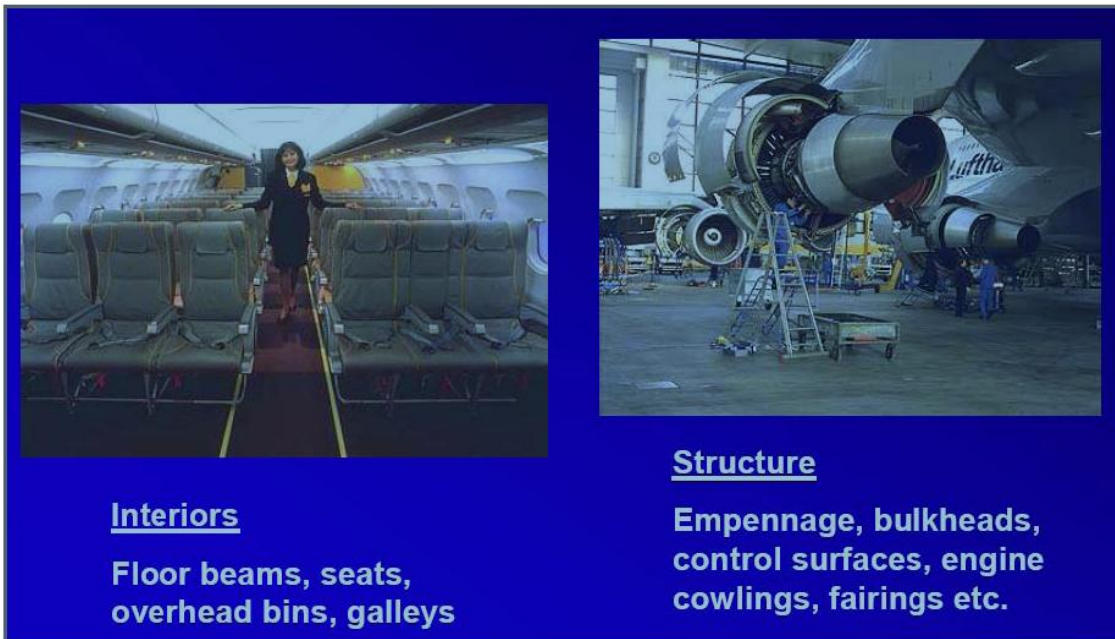


**Boeing 777**

**50% κατά βρος  
Σύνθετα πολυμερή**



Σχήμα 1.36γ: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική.



### Interiors

Floor beams, seats, overhead bins, galleys

### Structure

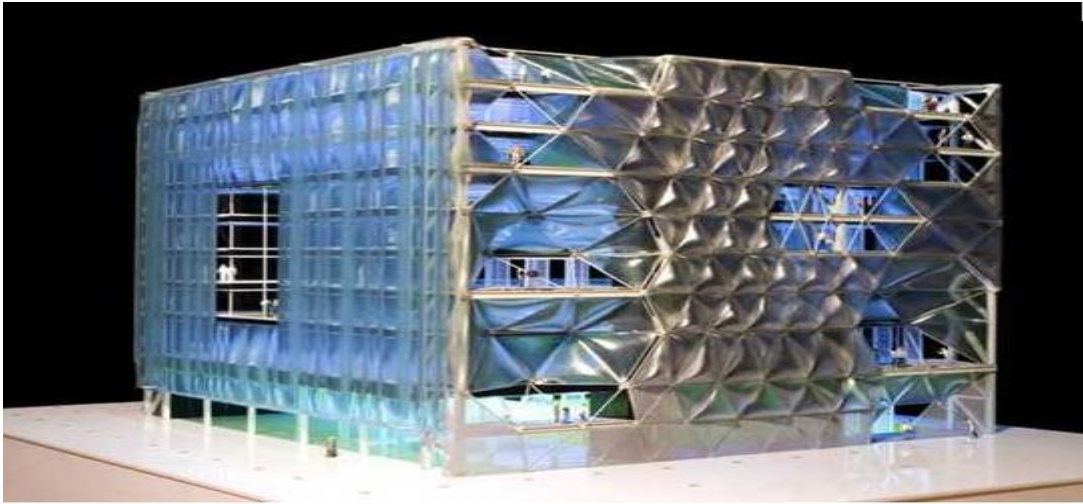
Empennage, bulkheads, control surfaces, engine cowlings, fairings etc.

**Σχήμα 1.36δ:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στην αεροδιαστημική.

Τέλος υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές σύνθετων υλικών σε κατασκευές. Πολλά δομικά στοιχεία (πχ Κανάλια ,I-δοκοί κλπ) που χρησιμοποιούνται στα κτίρια μπορεί κατασκευάζονται από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες με τη μέθοδο *putrusion*. Η αντίσταση στη διάβρωση και η ηλεκτρική και θερμική μόνωση προστίθενται στα επιπλέον πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών.



**Σχήμα 1.37:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



**Σχήμα 1.38:** Εφαρμογές σύνθετων υλικών στον κατασκευαστικό τομέα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ***Βιβλιογραφική ανασκόπηση επίδρασης διαφόρων παραγόντων στη δομή και τις ιδιότητες των σύνθετων εποξικών πολυμερών***

#### **2.1 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ**

Το θερμικό σοκ (thermal shock) περιλαμβάνει κύκλους μεταβολής της θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο συγκεκριμένες θερμοκρασίες χωρίς να είναι απαραίτητο να υπάρχει καθορισμένη περιοδικότητα στους κύκλους μεταβολής. Πιο συγκεκριμένα αναφερόμαστε σε απότομη πρόσθεση ή αφαίρεση θερμότητας προς το υλικό που υπόκειται σε θερμικό σοκ.

Με το θερμικό σοκ παρατηρούμε τις ιδιότητες των υλικών να επηρεάζονται λόγω των απότομων μεταβολών. Η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητο να είναι ανάμεσα σε συμμετρικές θερμοκρασίες ως προς τους 0° C, ούτε να είναι η μία θετική και η άλλη αρνητική. Όταν περάσει το υλικό το ίδιο χρονικό διάστημα και στις δύο θερμοκρασίες θεωρείται ένας κύκλος.

#### **2.1.1 ΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ**

Στα σύνθετα υλικά, το θερμικό σοκ προκαλεί διάφορες αιτίες υποβάθμισης των ιδιοτήτων τους. Μια από τις αιτίες είναι η *ανάπτυξη μικρορωγμών* μέσα στο υλικό, που οδηγεί μέχρι και στην αστοχία του. Η ανάπτυξη των μικρορωγμών οφείλεται στην εναλλαγή θερμοκρασίας και στις θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται στη δομή του υλικού. Η ρηγμάτωση της μήτρας (matrix cracking) είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος αστοχίας των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες.

Μια ακόμα αιτία υποβάθμισης είναι η *θερμική οξείδωση*. Αυτή η αιτία οδηγεί σε σπάσιμο των μακρομοριακών αλυσίδων ή στη δημιουργία ελεύθερων ριζών και ψαθυροποιεί το πολυμερές με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

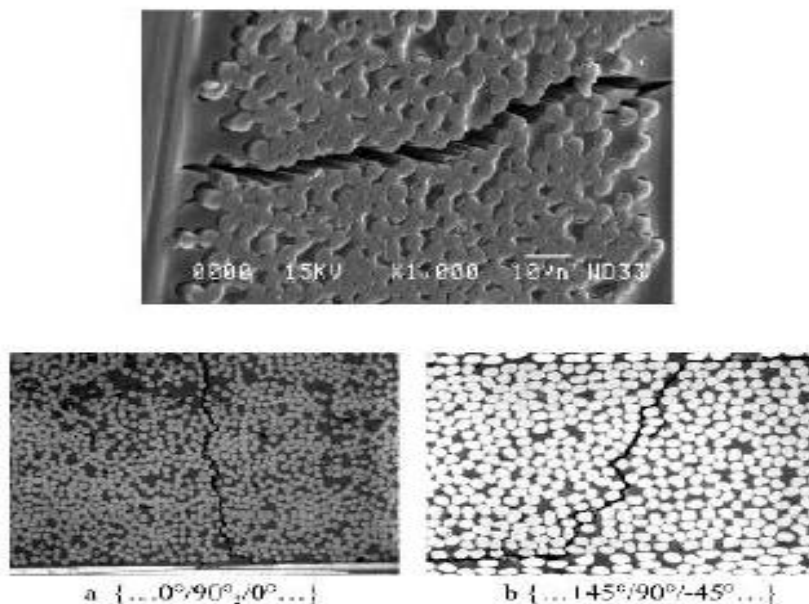
Η *απώλεια βάρους* που συνεπάγεται απώλεια μάζας και αλλαγή των διαστάσεων του σύνθετου υλικού είναι και αυτή μια αιτία υποβάθμισης που μπορεί να επηρεάσει όλη την κατασκευή. Επίσης κάνει τη μήτρα πιο ψαθυρή και συνεπώς είναι πιο εύκολη η δημιουργία μικρορωγμών. Η μεταβολή ωστόσο του βάρους δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

Άλλη αιτία είναι η αποκόλληση στρώσεων (delamination) σε πολύστρωματικά τα σύνθετα υλικά. Όταν δύο πλάκες δεν είναι ενωμένες μπορούν να διασταλούν ή να συσταθούν ελεύθερα χωρίς περιορισμούς. Όταν είναι όμως άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, διαστέλλονται ή συστέλλονται μαζί με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θερμικές τάσεις. Αυτές οι τάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αποκόλληση στρώσεων (delamination) ή αποφλοιώση του υλικού.

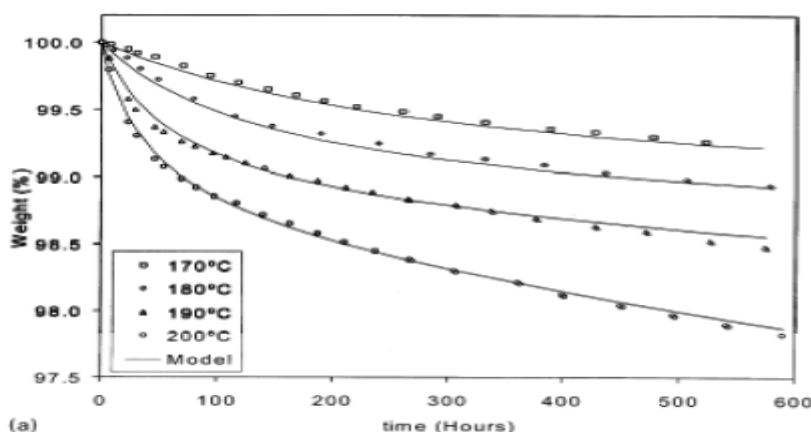
Επίσης έχουμε την αποκόλληση ίνας – μήτρας κατά την οποία έχουμε κατά μήκος της ίνας συστολή και κατά τον εγκάρσιο άξονα έχουμε διαστολή με αποτέλεσμα η ίνα να φουσκώνει και να αποκολλάται από την μήτρα.



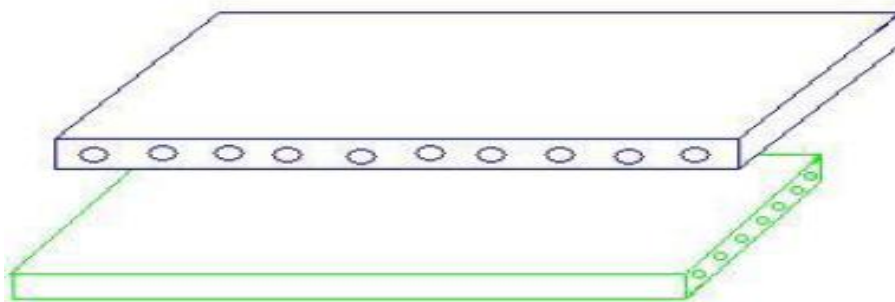
Τέλος το περιβάλλον και η διεπιφάνεια (μήτρας-ίνας) επηρεάζουν τα αποτελέσματα του θερμικού σοκ. Η επίδραση της διεπιφάνειας δεν έχει προσδιοριστεί πλήρως καθώς το εύρος και η δομή της ποικίλει από υλικό σε υλικό. Το περιβάλλον στο οποίο γίνεται το θερμικό σοκ επηρεάζει τη διάδοση και την πυκνότητα των ρωγμών. Πειράματα που έγιναν σε σύνθετο υλικό εποξικής μήτρας και ινών άνθρακα στο κενό, σε άζωτο, σε ατμοσφαιρικό αέρα και σε οξυγόνο έδωσαν διαφορετικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2.1: Ρηγμάτωση πολυμερούς μήτρας ( Polymeric matrix cracking).



Σχήμα 2.2: Απώλεια βάρους λόγω θέρμανσης.



**Σχήμα 2.3:** Αποκόλληση στρώσεων (Delaminating).

### **2.1.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΟΚ**

Ένα απλό παράδειγμα θερμικού σοκ είναι αυτό που δέχονται τα αεροπλάνα κατά τη διάρκεια της προσγείωσης της απογείωσης και της πτήσης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των τριβών και του διαφορετικού υψόμετρου που βρίσκεται το αεροσκάφος. Η εξωτερική θερμοκρασία ενός αεροσκάφους μεταβάλλεται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.4:** Οι εναλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία του αεροσκάφους αποτελούν ένα είδος θερμικού σοκ.

### **2.1.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΟΚ**

Ο διαφορετικός συντελεστής της θερμικής διαστολής μεταξύ ινών και μήτρας σε ένα σύνθετο μπορεί να οδηγήσει σε θερμική καταπόνηση στη διεπιφάνεια ινών και μήτρας και είναι μία από τις κυριότερες αιτίες θερμικού σοκ. Οι ίνες έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από ότι έχει η πολυμερής μήτρα. Για το λόγο αυτό σε ακραίες θερμοκρασίες μπορεί να επέλθει διεπιφανειακή αποκόλληση. Το θερμικό σοκ παράγει επίσης, μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μέσα στο σύνθετο υλικό. Η ψύξη από την υψηλή θερμοκρασία στη χαμηλή θερμοκρασία γενικά παράγει τάσεις εφελκυσμού στην επιφάνεια και τάσεις συμπίεσης στο εσωτερικό.

Η προδιάθεση στην αποκόλληση στρωμάτων είναι μία από τις εγγενείς αδυναμίες του υλικού. Επίσης είναι ευπαθή σε θραύση. Η συνάφεια (διασύνδεση) ινών και μήτρας θεωρείται μια κρίσιμη πτυχή των σύνθετων πολυμερών. Στο σημείο διεπαφής αναπτύσσονται μηχανικές τάσεις μεταξύ της ενίσχυσης και μήτρας λόγω διαφορετικού συντελεστή διαστολής. Στη περιοχή της διεπαφής μπορεί να λάβουν χώρα και χημικές αντιδράσεις και να εξασθενίσουν ακόμη περισσότερο τη συνάφεια των δύο υλικών.

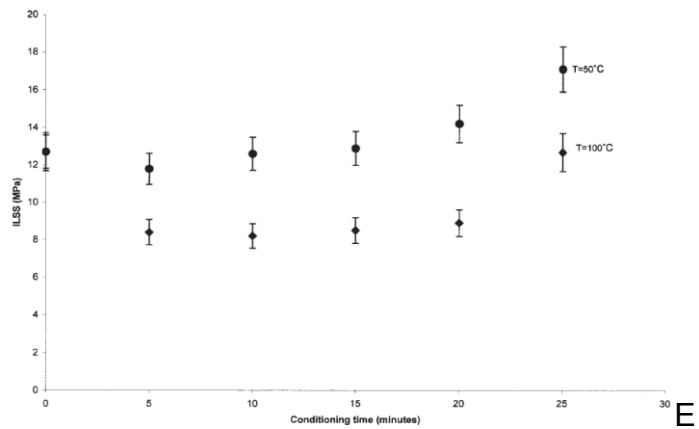
Η μήτρα μετά τη σκλήρυνση και την ψύξη υπόκειται σε τριαξονική πίεση. Η διαφορά μεταξύ του συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ ινών και μήτρας είναι ο πιο σημαντικός λόγος για τις παραμένουσες εσωτερικές τάσεις στα σύνθετα πολυμερή. Μία πρόσφατη πειραματική μελέτη έδειξε ότι οι θερμικές εσωτερικές τάσεις σε σύστημα γυαλί – εποξικής ρητίνης μειώνουν σημαντικά τη μέγιστη αντοχή του εξαρτήματος.

Η διερεύνηση της θερμικής γήρανσης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της εκτεταμένης χρήσης των υλικών σε δομικές εφαρμογές. Σε ερευνητική εργασία που έγινε στο “*Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology*”, στην Ινδία χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από εποξική ρητίνη ενισχυμένα με ίνες γυαλιού τυχαίου προσανατολισμού( LY 556 με σκληρυντή HY 951) .Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 50 °C. Η ώρα που εκτέθηκαν ήταν ( 5 , 10, 15, 20 , 25 min). Τα δείγματα βυθίστηκαν αμέσως σε παγωμένο νερό μετά την ολοκλήρωση του χρόνου θέρμανσης τους. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε επίσης σε (100, 150, 200, 250 °C) για ίδιους χρόνους θέρμανσης. Μετά έγινε δοκιμασία κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το πρότυπο (D2344 – 84). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σχεδόν αμέσως μετά την ψύξη. Οι τιμές ILSS υπολογίστηκαν ως εξής:

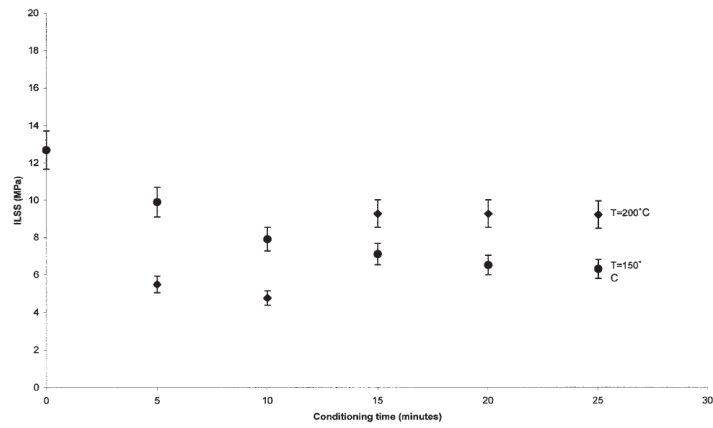
$$\text{ILSS} = 0.75p/bt$$

Όπου :  $p$  = Μέγιστο φορτίο,  $b$  = Πλάτος δείγματος,  $t$  = Πάχος δείγματος

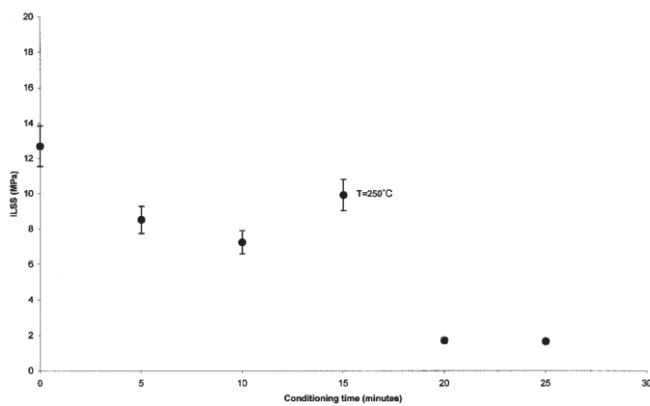
Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2.5) από τα οποία προκύπτουν τα εξής. Η επίδραση του θερμικού σοκ προκαλεί εν γένει μείωση ILSS που οφείλεται στο ότι το θερμικό σοκ ευνοεί τη αποκόλληση των στρωμάτων του υλικού (delaminating). Στις θερμοκρασίες 50 και 100 °C και στους μικρούς χρόνους θέρμανσης η μείωση αυτή είναι σημαντική ενώ στους μεγάλους χρόνους η αύξηση που παρατηρείται αποδίδεται στη παραπέρα διασταύρωση και σκλήρυνση της μήτρας. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες 150-200 °C η μείωση της ILSS είναι σημαντική (Σχήμα 2.6) και αυτό αποδίδεται στην πιθανή διάσπαση δεσμών στην εξασθένηση της συνάφειας ,και θερμική γήρανση και υποβάθμιση του υλικού ως αποτέλεσμα παρατεταμένης θέρμανσης σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και θερμικού σοκ. Τα φαινόμενα και οι επιπτώσεις αυτές είναι ποιο εμφανείς στη θερμοκρασία των 250 °C (Σχήμα 2.7).



**Σχήμα 2.5:** Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 2.6:** Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 2.7:** Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και της θερμοκρασίας.

## **2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ**

Η θερμική δράση των μικροκυμάτων ανακαλύφθηκε τυχαία το 1945 από τον Percy Spencer αυτοδίδακτο μηχανικό. Ο παραδοσιακός τρόπος σκλήρυνσης των σύνθετων υλικών όπως οι εποξικές ρητίνες γίνεται συνήθως με θέρμανση. Η σκλήρυνση σε υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνει τη διαδικασία διασταύρωσης της ρητίνης δηλαδή ευνοεί την αντίδραση μεταξύ ρητίνης και σκληρυντή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου σκλήρυνσης. Είναι γνωστό ότι η κάθε αντίδραση έχει μια ταχύτητα πραγματοποίησης. Η παραπέρα θέρμανση σε υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλεί διάσπαση των μακρομορίων και υποβαθμίζει την ποιότητα και την αντοχή της σκληρυμένης μήτρας που προκύπτει.

Ένας εναλλακτικός τρόπος σκλήρυνσης των θερμοσκληραινόμενων πλαστικών είναι η χρησιμοποίηση μικροκυμάτων. Με τη θέρμανση με μικροκύματα επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ταχύτητας σκλήρυνσης ( του βαθμού διασταύρωσης) της μήτρας με παράλληλη αύξηση του σημείου υάλου Tg. Τα πολυμερή χρησιμοποιούνται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες του Tg. Συνεπώς με την χρήση των μικροκυμάτων για τη σκλήρυνση των σύνθετων υλικών διευρύνεται η περιοχή θερμοκρασιών χρησιμοποίησης τους και μειώνεται σημαντικά ο χρόνος σκλήρυνσης. Σε βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων με σύνθετα όπου στις γραμμές παραγωγής αντικαταστάθηκε η μέθοδος με παραδοσιακή θέρμανση με θέρμανση με μικροκύματα παρατηρήθηκε , «μπλοκάρισμα» στη διαδικασία παραγωγής λόγω συντόμευσης του χρόνου σκλήρυνσης του υλικού.

Πέραν όμως των πλεονεκτημάτων της χρήσης των μικροκυμάτων έναντι της κλασικής θερμικής μεθόδου που αναφέρθηκαν παραπάνω ,έρευνες έχουν δείξει ότι συχνά τα υλικά που παράγονται με χρήση μικροκυμάτων έχουν μειωμένη αντοχή και σε σχέση με αυτά που παράγονται με την παραδοσιακή μέθοδο θέρμανσης . Αυτό αποδίδεται στη μειωμένη συνάφεια του υλικού μεταξύ ινών – μήτρας. Δηλαδή η χρήση των μικροκυμάτων δεν φαίνεται να παράγει υλικά με βελτιωμένη διεπιφάνεια λόγω της ετερογένειας του υλικού και της διαφορετικής συμπεριφοράς της μήτρας και των ινών στα μικροκύματα. Συνεπώς υπάρχει ένα σημαντικό πεδίο διερεύνησης στο τομέα αυτό.

## **2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ**

Τα σύνθετα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν σε περιβάλλον με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το σημείο υάλου Tg παρουσίασαν μια σημαντική υποβάθμιση των φυσικών τους ιδιοτήτων. Η επίδραση της θερμοκρασίας οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υγρασία. Οι συνέπειες της συνδυασμένης επίδρασης υγρασίας και της θερμοκρασίας μπορούν να προξενήσουν σημαντικές μεταβολές τόσο στην θερμοκρασία υάλου, όσο και στην σκληρότητα επηρεάζοντας παράλληλα και την αντοχή των πολυστρωματικών υλικών. Η υγρασία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή των δεσμών μεταξύ ινών και μήτρας. Ένα πολυμερές σύνθετο υλικό είναι πολύ συνηθισμένο να βρεθεί σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών και αυξημένης υγρασίας καθώς οι εφαρμογές τους είναι σε δομικά τμήματα αεροσκαφών η άλλων απαιτητικών κατασκευών. Για το λόγο αυτό ένας μεγάλος αριθμός πειραματικών μετρήσεων έχουν γίνει με σκοπό να καταδείξουν ότι οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες

των σύνθετων υλικών μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά κατά τη διάρκεια υδροθερμικής γήρανσης επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του σύνθετου υλικού.

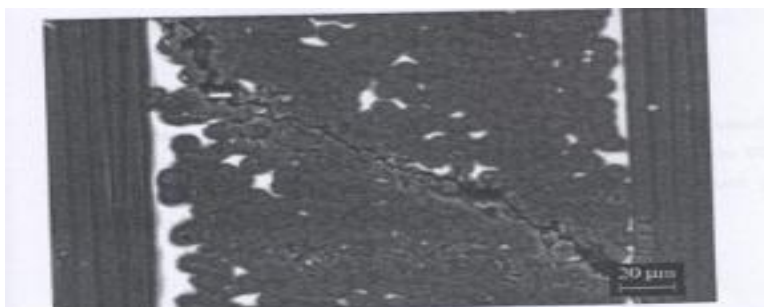
Η μέτρηση της θερμοκρασίας μετάπτωσης στην υάλωδη κατάσταση  $T_g$  στα σύνθετα υλικά με θερμοσκληραινόμενες ρητίνες είναι πολύ σημαντική, επειδή καθορίζει την θερμοκρασία αλλά και τις εκάστοτε εφαρμογές τους. Για πρακτικές εφαρμογές οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως σε θερμοκρασίες μικρότερες του  $T_g$ . Όταν το υλικό εκτεθεί σε περιβάλλον υδροθερμικής γήρανσης το σημείο υάλου  $T_g$  ελαττώνεται και επομένως η θερμοκρασία λειτουργίας του υλικού μεταβάλλεται.

Εξακριβώνοντας λοιπόν τον μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για τη μεταβολή του  $T_g$  είναι δυνατόν να προβλέψουμε την ελάττωση του  $T_g$  υπό την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών.

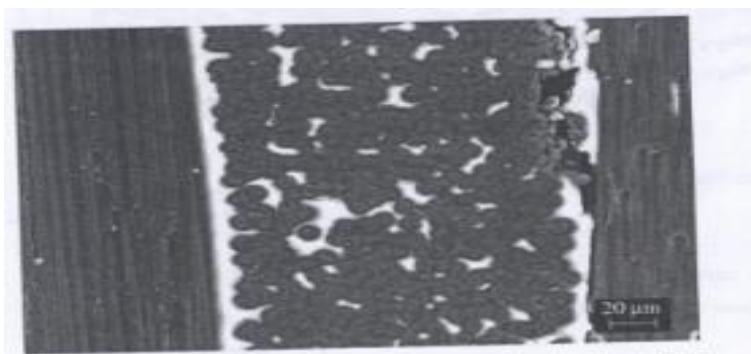
Η παρουσία υγρασίας μέσα σε ένα σύνθετο πολυμερές μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της μήτρας. Δυο πιθανοί μηχανισμοί που έχουν προταθεί, για την ερμηνεία των συνεπειών της υγρασίας είναι : η πλαστικοποίηση της μήτρας και ο εκφυλισμός της διεπιφάνειας ινών-μήτρας.

Ο τρόπος με τον οποίο τα σύνθετα υλικά προσροφούν υγρασία εξαρτάται από παράγοντες όπως : η θερμοκρασία, ο όγκος των ινών, ο προσανατολισμός των ινών, η φύση των ινών (διαπερατότητα, πολικότητα, πυκνότητα), το εμβαδό της εκτεθειμένης επιφάνειας, η διάχυση της υγρασίας στο υλικό και τυχόν επικάλυψη επιφάνειας. Η διείσδυση (εισρόφηση) της υγρασίας σε ένα σύνθετο υλικό οφείλεται στο φαινόμενο της διάχυσης. Αυτός ο μηχανισμός περιλαμβάνει την άμεση διάχυση του νερού μέσα στη μήτρα και ως ένα πολύ μικρότερο βαθμό μέσα στις ίνες. Οι δευτερεύοντες μηχανισμοί είναι τα τριχοειδή φαινόμενα και η μεταφορά διαμέσου μικρορωγμών και κενών.

Η μεταφορά της υγρασίας από μικρορωγμές και κενά έχει ως αποτέλεσμα την ροή και την αποθήκευση του νερού μέσα στις μικρορωγμές και στις άλλες μορφές μικροατελειών. Η συνάφεια της διεπιφάνειας καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό τόσο από την επιφάνεια επαφής ανάμεσα στις ίνες και στην μήτρα όσο και από το βαθμό της σύμφυσης στα σημεία επαφής. Επίσης καθορίζει πόση από την εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να μεταφερθεί στις ίνες. Αν και πολύ ερευνητές έχουν μελετήσει εποξικά συστήματα ελάχιστη προσοχή έχει δοθεί στους δεσμούς στη διεπιφάνεια μεταξύ ινών και της μήτρας. Αυτοί οι δεσμοί είναι πολύ σημαντικοί καθώς είναι υπεύθυνοι για την κατανομή των κενών και των πόρων στην διεπιφάνεια των ινών, πράγμα το οποίο μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την προσρόφηση υγρασίας, σύμφωνα με τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συχνά η αυξομείωση στο  $T_g$  εξηγείται από ανομοιογένειες οι οποίες σχετίζονται με την προετοιμασία του υλικού.



**Σχήμα 2.8:** Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για εποξικό υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, χωρίς να έχει υποστεί υδροθερμική κατεργασία.



**Σχήμα 2.9:** Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για εποξικό υλικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα με προσρόφηση υγρασίας 2,6% κ.β.

Στο εργαστήριο τεχνολογίας υλικών του ΤΕΙ Κρήτης έχουν γίνει πειράματα έλεγχου επίδρασης υδροθερμικής κατεργασίας σε εποξικά υλικά ενισχυμένα με υαλούφασμα δηλαδή σε υλικά που έχουν ίδια κατασκευή(υλικό μήτρας και ενίσχυση) με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και στην εργασία αυτή για τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Τα πειράματα αυτά αποτέλεσαν το αντικείμενο πτυχιακών εργασιών. Τα αποτελέσματα των δοκιμασιών υδροθερμικής κατεργασίας μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω συμπεράσματα :

- ✓ Η προσρόφηση της υγρασίας στο υλικό δεν ακολουθεί τον νόμο του Fick για το λόγο ότι παρατηρήθηκε ότι η διαγραμματική απεικόνιση των παραμέτρων  $M_a$  και  $M_g$  ως προς  $t^{1/2}$  αποκλίνει από την γραμμικότητα μετά από 25 ώρες υδροθερμικής κατεργασίας. Αυτό αποδίδεται στη διάλυση του υλικού της μήτρας στο νερό. Συνεπώς οι παράμετροι  $M_a$  και  $M_g$  δεν καταγράφουν μόνο την προσρόφηση της υγρασίας με τη διαδικασία της διάχυσης όπως προβλέπει ο νόμος του Fick αλλά εμπεριέχουν και μια συνιστώσα υγρασίας ,η οποία αντικαθιστά στην δομή του υλικού την ποσότητα που διαλύεται.
- ✓ Η μείωση της ελαστικότητας και της αντοχής εφελκυσμού είναι σημαντική μετά από 100 ώρες υδροθερμικής κατεργασίας. Παρατηρούμε ότι η ελαστικότητα είναι πιο ευαίσθητη στην υδροθερμική κατεργασία και αυτό αποδίδεται στη μείωση της συνάφειας μεταξύ των δύο φάσεων του υλικού λόγω διάλυσης ποσότητας της μήτρας.



- ✓ Επίσης η μείωση της ελαστικότητας και αντοχής του εφελκυσμού αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο υδροθερμικής κατεργασίας και στην περιοχή 0-100 ώρες.
- ✓ Η συσχέτιση των παραμέτρων με την μείωση της αντοχής και της ελαστικότητας δείχνει μια γραμμική συσχέτιση στην περιοχή των χρόνων υδροθερμικής κατεργασίας.
- ✓ Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και σε μετρήσεις που έγιναν ύστερα από υδροθερμική κατεργασία σε μεγάλους χρόνους δηλαδή από 100-1000 ώρες.

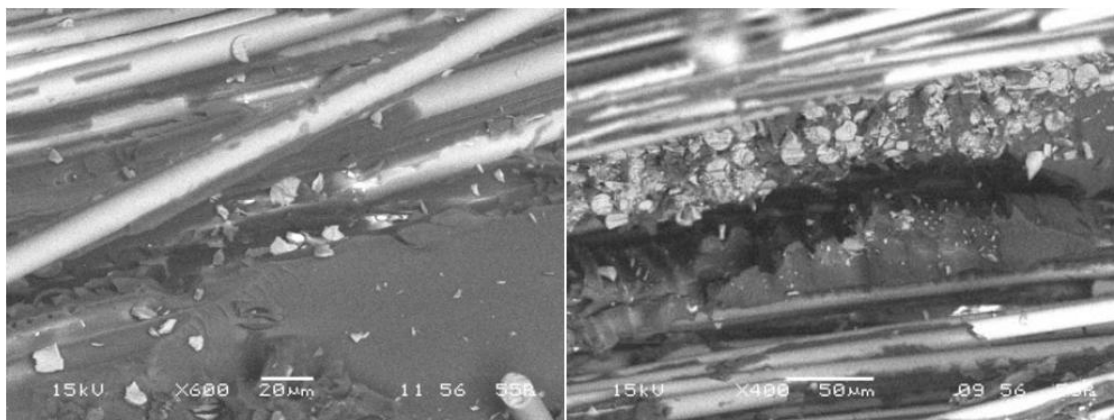
## **2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ UV ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Η ακτινοβολία UV αποτελεί τον σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα του χρόνου ζωής ενός σύνθετου υλικού ιδιαίτερα όταν αυτό χρησιμοποιείται σε εκτεθειμένες στον ήλιο επιφάνειες. Με την επίδραση της UV ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα φυσικές και χημικές μεταβολές στη δομή του υλικού με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του. Ο προσδιορισμός του χρόνου ζωής ενός υλικού που εκτίθεται σε πραγματικές συνθήκες έχει ιδιαίτερη σημασία, ώστε να ικανοποιούνται τα απαιτούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά του στην πράξη. Από την άλλη μεριά προκειμένου να έχει κανείς έγκαιρα αντίστοιχες πληροφορίες, απαιτούνται κατάλληλοι έλεγχοι επιταχυνόμενης «γήρανσης», προσομοιάζοντας την μακρόχρονη επίδραση του περιβάλλοντος και ειδικότερα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι κάτω από τη ζώνη των 400 nm. Η ενέργεια που παρέχεται από τα φωτόνια της UV ακτινοβολίας είναι στην περιοχή διάσπασης των δεσμών του πολυμερούς η οποία είναι συνήθως μεταξύ 290 και 460 kJ / mole. Έτσι, η χημική δομή του πολυμερούς μεταβάλλεται λόγω από φωτο-οξειδωτικών αντιδράσεων που προκαλούνται από την απορρόφηση των UV φωτονίων. Τα περισσότερα πολυμερή που απορροφούν την ηλιακή UV ακτινοβολία, η οποία τους προκαλεί φωτολυτικές, φώτο-οξειδωτικές ή, και Θέρμο-οξειδωτικές αντιδράσεις που μπορεί να υποβαθμίσουν το πολυμερές. Πολυμερής μήτρα στα σύνθετα υλικά είναι επιρρεπής σε στις αντιδράσεις αυτές και λόγω της συμβολής της στον τον καθορισμό ιδιοτήτων επηρεάζονται οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Η υποβάθμιση των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών μπορεί να κυμαίνεται από απλό αποχρωματισμό μέχρι σημαντική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Στα περισσότερα σύνθετα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους προστίθενται στη δομή τους φωτο-σταθεροποιητές για την πρόληψη ή μείωση της ζημίας από την έκθεση τους στην UV ακτινοβολία.

Οι Φώτο-οξειδωτικές αντιδράσεις προκαλούν διάσπαση των μακρομοριακών αλυσίδων και / ή διασταυρώσεις μεταξύ αυτών (crosslinking). Διάσπαση των μακρομοριακών αλυσίδων μειώνει το μοριακό βάρος του πολυμερούς, ενώ η διασταύρωση (crosslinking) προκαλεί ψαθυροποίηση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία μικρορηγματώσεων.

Αν το πολυμερές απορροφά μήκη κύματος στην περιοχή του ορατού οι , τα Φώτο-οξειδωτικές αντιδράσεις μπορεί να προκαλέσουν την παραγωγή έγχρωμων χημικών ουσιών, που οι οποίες οδηγούν σε αλλαγή χρώματος του υλικού. Σύμφωνα με αποτελέσματα επίδρασης UV ακτινοβολίας σε σύνθετα υλικά από εποξικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες παρατηρείται μετάπτωση του υλικών από την όλκιμη συμπεριφορά στη ψαθυρή συμπεριφορά δηλαδή ψαθυροποίηση τους ως αποτέλεσμα της δόσης. Η ειδική δυσθραυστότητα και η αντοχή εφελκυσμού των υλικών αυτών φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά από το μέγεθος της δόσης UV ακτινοβολίας που δέχονται. Αυτό αποδίδεται στη διάσπαση των μακρομορίων της ρητίνης . Η διάσπαση αυτή ανιχνεύτηκε και καταγράφηκε με ειδικές φασματοσκοπικές μεθόδους. Επίσης έχουν παρατηρηθεί επιφανειακή οξείδωση και δημιουργία μικρορωγμών οι οποίες αναπτύσσονται στη δομή και αποτελούν την απαρχή αστοχίας των υλικών. Έχει παρατηρηθεί μείωση της αντοχής εφελκυσμού μέχρι 40% και μείωσης του ειδικού συντελεστή δυσθραυστότητας μέχρι 60% μετά την έκθεση του υλικού σε UV ακτινοβολία μέσα σε ειδικό θάλαμο. Η σκληρότητα και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού παρουσίασαν αύξηση μετά από έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία για 1000h αλλά δεν παρουσίασαν σημαντική μεταβολή μετά από 1000-4000h έκθεση στην ίδια ένταση ακτινοβολίας.



**Σχήμα 2.10:** Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου μετά από την έκθεση εποξικού σύνθετου υλικού σε UV ακτινοβολία.

- (α) Στην πρώτη φωτογραφία φαίνεται η αποκόλληση ινών από τη μήτρα  
(β) Στη δεύτερη φωτογραφία φαίνεται η εκτεταμένη αλλαγή της επιφανειακής δομής και πιθανή δημιουργία μικρορηγματώσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΕΠΟΞΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.

Η κατασκευή του υλικού μας έγινε από τους πρώην φοιτητές της Μηχανολογίας Δημόπουλο Κυριάκο και Χέλμη Λεωνίδα υπό την καθοδήγηση του κ Κονταξάκη Επίκουρου καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων και του κ. Ατζολετάκη Αγαπητού, στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας του ΤΕΙ Κρήτης

**Η διαδικασία είχε ως εξής :**

- Επάλειψη κεριού στον εργασιακό πάγκο για να μην παραμείνει ρητίνη μετά το τέλος της παρασκευής του υλικού.
- Στη συνέχεια έγινε κοπή του υαλο-υφάσματος στις επιθυμητές διαστάσεις
- Έπειτα παρασκευάστηκε η εποξική ρητίνη χρησιμοποιώντας τις σωστές αναλογίες σκληρυντή και κόλλας. Για την ακρίβεια έγινε ανάμιξη δύο ρητινών :
- Epoxy Resin L με σκληρυντή Harter EPH 161 σε αναλογία σκληρυντή / ρητίνης 25/100 (ο κατασκευαστής ενημερώνει ότι ο μέγιστος χρόνος χρήσης είναι 200 min σε περιβάλλον 20° C.)
- Epoxy Resin LF με σκληρυντή LF1 σε αναλογία σκληρυντή / ρητίνης 45/100 (ο κατασκευαστής ενημερώνει ότι ο μέγιστος χρόνος χρήσης είναι 40 min σε περιβάλλον 25° C, χρόνος πολύ περιορισμένος αποδεδειγμένα και στη πράξη αφού τα ρολό από αφρολέξ που χρησιμοποιήθηκαν στο χρόνο αυτό είχαν γίνει πλέον ακατάλληλα αφού ήταν σκληρά σαν πέτρα)
- Με ρολό από αφρολέξ τοποθετήθηκε η πρώτη στρώση υαλο – υφάσματος και έγινε πολύ καλή επάλειψη με εποξική ρητίνη. Η ποσότητα ρητίνης δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη αλλιώς απομακρύνεται με το ρολό.
- Έπειτα τοποθετήθηκε η δεύτερη στρώση και έγινε και πάλι πολύ καλή επάλειψη ρητίνης με τα ρολό. Για την αντιμετώπιση των εγκλεισμάτων αέρα ανάμεσα στις στρώσεις χρησιμοποιήθηκε πιστόλι θερμού αέρα ταυτόχρονα με την επάλειψη. Επίσης ασκήθηκε μεγαλύτερη πίεση κατά την επάλειψη για την απομάκρυνση του αέρα. Επαναλήφθηκε η διαδικασία αυτή για όλες τις στρώσεις.
- Τέλος το υλικό αφέθηκε να στεγνώσει για δύο ημέρες ώστε να ακολουθήσει η κοπή του σε δοκίμια.
- Τα δοκίμια κόπηκαν σε διαστάσεις (2cm x 20cm).



**Σχήμα 3.1:** Παρασκευή μείγματος σκληρυντή Κόλλας.



**Σχήμα 3.2:** Χρήση ζυγαριάς.



**Σχήμα 3.3:** Τοποθέτηση μείγματος.



**Σχήμα 3.4:** Επάλειψη μείγματος υαλουφάσματος.



**Σχήμα 3.5:** Επάλειψη μείγματος ξανά για καλύτερη απορρόφηση του από το ύφασμα αλλά και για την αποφυγή εγκλεισμάτων αέρα.

### 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Το πείραμα μας έλαβε χώρα στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών του Γενικού Τμήματος Θετικών Επιστημών. Αρχικά τα δοκίμια μας τυχαία αριθμήθηκαν χωρίστηκαν και δέθηκαν με σύρματα ώστε να είναι εύκολη η διαχείρισή τους κατά τη διαδικασία του πειράματος, ως εξής :

- Μία ομάδα των 6 δοκιμίων τα οποία δεν υποβλήθηκαν σε καμία διαδικασία
- Σε τρεις ομάδες των 6 δοκιμίων οι οποίες υποβλήθηκαν σε εμβάπτιση σε υγρό άζωτο N<sub>2</sub> για 30, 60 και 120 min αντίστοιχα.
- Σε τρεις ομάδες των 6 δοκιμίων οι οποίες υποβλήθηκαν σε θέρμανση στους 75 °C για 60, 120 και 180 min αντίστοιχα



*Σχήμα 3.6: Προετοιμασία των δοκιμίων.*

Στη συνέχεια έγινε προθέρμανση του φούρνου στους 75 °C και τοποθετήθηκαν τρεις ομάδες των 6 δοκιμίων για 60, 120 και 180 min αντίστοιχα.



*Σχήμα 3.7: Φούρνος θέρμανσης των δοκιμίων.*





**Σχήμα 3.8:** Δοκίμια εντός του Φούρνου.

Κάθε ομάδα των 6 δοκιμίων κατά την έξοδο της από το φούρνο εμβαπτίζονται σε υγρό  $N_2$ . Οι τρεις ομάδες των 6 δοκιμίων υποβλήθηκαν σε εμβάπτιση σε υγρό άζωτο  $N_2$  για 30, 60 και 120 min.



**Σχήμα 3.9:** Dwear υγρού αζώτου.

Τέλος τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στη υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου για να μετρηθεί η αντοχή τους σε εφελκυσμό. Εκεί αφού καταγράψαμε το πλάτος και το πάχος τους τα τοποθετήσαμε ένα – ένα στις σιαγώνες της πρέσας προσεκτικά και ενεργοποιούσαμε ταυτόχρονα με την πρέσα το πρόγραμμα lab view στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η υδραυλική πρέσα για την καταγραφή των δεδομένων.



**Σχήμα 3.10:** Υδραυλική πρέσα εφελκυσμού-θλίψεως.



**Σχήμα 3.11:** Δοκίμια μετά την θραύση.



### 3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Οι παρακάτω πίνακες προέκυψαν από τα δεδομένα του ηλεκτρονικού υπολογιστή κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Βλέπουμε λοιπόν το πλάτος και το πάχος το οποίο μετρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος με ψηφιακό παχύμετρο και την διατομή του υλικού η οποία προέκυψε από τον πολλαπλασιασμό του πάχους με το πλάτος και την μετατροπή του σε m<sup>2</sup>. Η αντοχή που μας δίνει το σύστημα σε N μετατρέπεται σε τάση (Gra) με βάση τη σχέση:

$$\sigma = \frac{F(N)}{A(\text{διατομή}, \text{m}^2)}$$

Το Μέτρο ελαστικότητας E (Gra) υπολογίζεται από τη κλίση με βάση τη σχέση:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(F/A)}{(dl/l)} = (\text{κλίση}) \frac{l}{dl} \quad N/m^2$$

ΧΩΡΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m <sup>2</sup> )	(N)	(Gra)	(N/mm)	(Gra)
1	20	1,6	0,000032	11352	3,548E+02	2068	9,92E+00
2	20	1,6	0,000032	10651	3,328E+02	2045	9,81E+00
3	20	1,6	0,000032	10667	3,333E+02	2015	9,67E+00
4	20	1,6	0,000032	9783	3,057E+02	2019	9,69E+00
5	20	1,6	0,000032	10993	3,435E+02	2030	9,74E+00
6	20	1,6	0,000032	9223	2,882E+02	2030	9,74E+00
7	20	1,6	0,000032	11093	3,467E+02	2004	9,61E+00
8	20	1,6	0,000032	11312	3,535E+02	2030	9,74E+00
				10634	3,125E+02	2030	9,721E+00

**Σχήμα 3.12:** Δοκίμια χωρίς θερμική κατεργασία.

ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N <sub>2</sub> ΓΙΑ 30 min							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m <sup>2</sup> )	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
N30-1	20,0	1,6	3,200E-05	10800	3,375E+02	2014	9,66E+00
N30-2	20,0	1,6	3,200E-05	11968	3,740E+02	2070	9,93E+00
N30-3	20,0	1,6	3,200E-05	11960	3,738E+02	2075	9,95E+00
N30-4	20,0	1,6	3,200E-05	11989	3,747E+02	2107	1,01E+01
N30-5	20,0	1,6	3,200E-05	12220	3,819E+02	2108	1,01E+01
					3,761E+02	2,090E+03	1,003E+01

**Σχήμα 3.13:** Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> για 30 λεπτά.

ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N <sub>2</sub> ΓΙΑ 60 min							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m <sup>2</sup> )	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
N60-1	20,0	1,6	3,200E-05	10280	3,213E+02	2043	9,80E+00
N60-2	20,0	1,6	3,200E-05	12224	3,820E+02	2169	1,04E+01
N60-3	20,0	1,6	3,200E-05	12785	3,995E+02	2162	1,04E+01
N60-4	20,0	1,6	3,200E-05	12160	3,800E+02	2168	1,04E+01
N60-5	20,0	1,6	3,200E-05	12454	3,892E+02	2154	1,03E+01
					3,877E+02		1,03E+01

**Σχήμα 3.14:** Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> για 60 λεπτά.

ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N <sub>2</sub> ΓΙΑ 120 min							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m <sup>2</sup> )	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
N120-1	20,0	1,6	3,200E-05	7991	2,497E+02	2211	1,06E+01
N120-2	20,0	1,6	3,200E-05	8956	2,799E+02	2191	1,05E+01
					2,648E+02		1,06E+01

**Σχήμα 3.15:** Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> για 120 λεπτά.

ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΟΥΣ 75 °C, 60 min ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N2							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m2)	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
ΘΣ60-1	20,0	1,6	3,200E-05	12194	3,811E+02	2117	1,02E+01
ΘΣ60-2	20,0	1,6	3,200E-05	12587	3,933E+02	2145	1,03E+01
ΘΣ60-3	20,0	1,6	3,200E-05	11655	3,642E+02	2105	1,01E+01
ΘΣ60-4	20,0	1,6	3,200E-05	12086	3,777E+02	2081	9,98E+00
ΘΣ60-5	20,0	1,6	3,200E-05	12062	3,769E+02	2153	1,03E+01
					3,787E+02		1,018E+01

**Σχήμα 3.16:** Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 60 λεπτά.

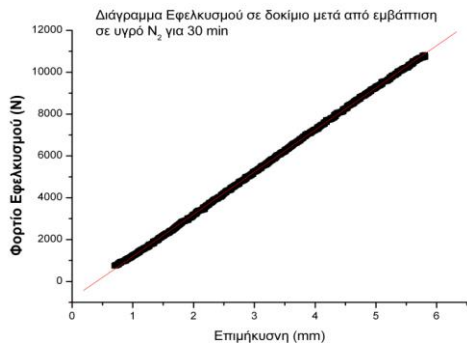
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΟΥΣ 75 °C, 120 min ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N2							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m2)	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
ΘΣ120-1	20,0	1,6	3,200E-05	11295	3,530E+02	2220	1,07E+01
ΘΣ120-2	20,0	1,6	3,200E-05	12869	4,022E+02	2118	1,02E+01
ΘΣ120-3	20,0	1,6	3,200E-05	10189	3,184E+02	2117	1,02E+01
ΘΣ120-4	20,0	1,6	3,200E-05	11348	3,546E+02	2029	9,73E+00
ΘΣ120-5	20,0	1,6	3,200E-05	11541	3,607E+02	2030	9,74E+00
ΘΣ120-6	20,0	1,6	3,200E-05	12258	3,831E+02	2039	9,78E+00
					3,802E+02		1,02E+01

**Σχήμα 3.17:** Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 120 λεπτά.

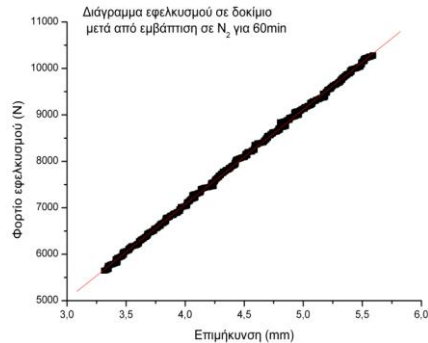
ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΟΥΣ 75 °C, 180 min ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ ΥΓΡΟ N2							
αριθμος δοκιμίου	ΠΛΑΤΟΣ	ΠΑΧΟΣ	Διατομή	Αντοχή	Αντοχή	Κλίση	Μέτρο Ελαστικότητας
Μονάδες	(mm)	(mm)	(m2)	(N)	(Mpa)	(N/mm)	(Gra)
ΘΣ180-1	20,0	1,6	3,200E-05	12315	3,848E+02	2154	1,03E+01
ΘΣ180-2	20,0	1,6	3,200E-05	11315	3,536E+02	2079	9,97E+00
ΘΣ180-3	20,0	1,6	3,200E-05	12414	3,879E+02	2099	1,01E+01
					3,86E+02		1,020E+01

**Σχήμα 3.18:** Δοκίμια που έχουν υποστεί θέρμανση στο φούρνο για 180 λεπτά.

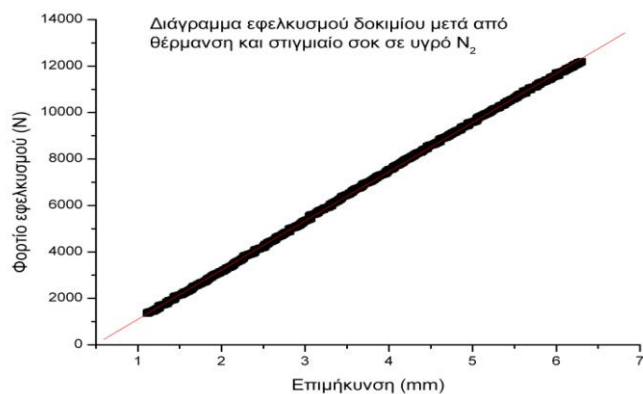
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται μερικά διαγράμματα εφελκυσμού όπως αυτά προέκυψαν από τα δεδομένα που πήραμε από τη μηχανική εφελκυσμού και απεικονίστηκαν με χρήση του προγράμματος origin.



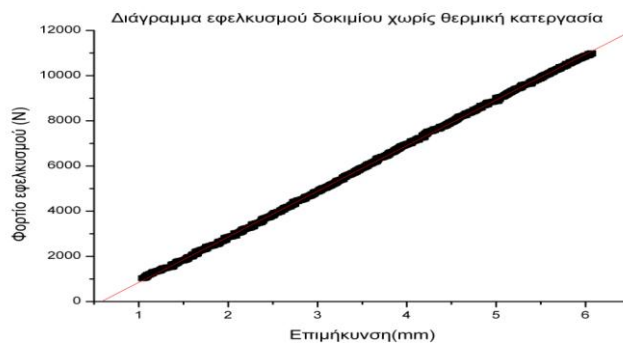
Graph 1



Graph 2



Graph 3



Graph 4

**Σχήμα 3.19:** Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα εφελκυσμού (φορτίου-επιμήκυνσης)

### 3.4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ενός πειράματος (βιβλιογραφία 20) κάμψης τριών σημείων στα σύνθετα υλικά από εποξύ - ρητίνη ενισχυμένα με ίνες γυαλιού βλέπουμε αύξηση της αντοχής ILSS (ILSS = 0.75 max load θραύσης/διατομή) σε σχέση με την τιμή χωρίς θερμική κατεργασία και στη συνέχεια την μείωση της. Στους παρακάτω πίνακες καταγράφεται η σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με την ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου.

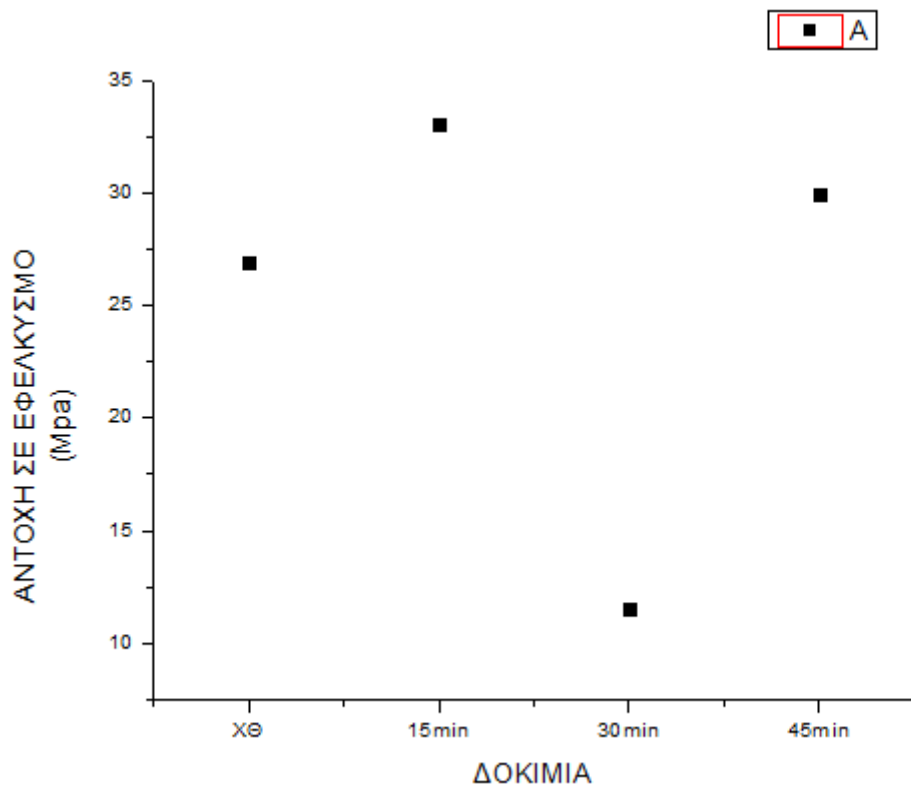
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΧΡΟΝΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΧΩΡΙΣΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ			26,9
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	15 min	1mm/min	33,1
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	30 min	1mm/min	11,5
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	45 min	1mm/min	30

**Σχήμα 3.20:** Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> για 15, 30, 45 λεπτά για ταχύτητα 1mm/min (βιβλιογραφία 20).

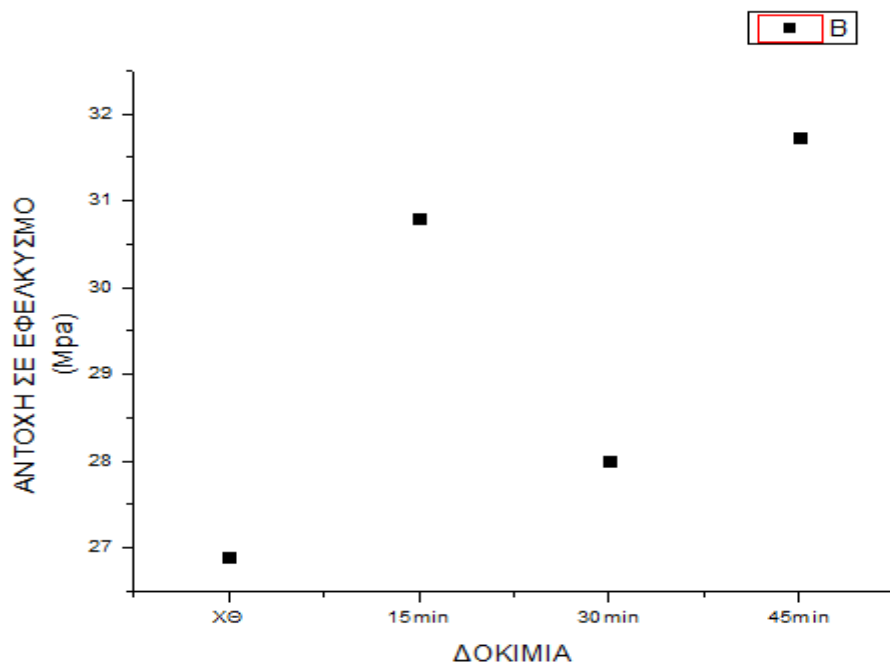
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΧΡΟΝΟΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΧΩΡΙΣΘΕΡΜΙΚΟ ΣΟΚ			26.9
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	15 min	500mm/min	30,8
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	30 min	500mm/min	28
ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ ΣΕ N2	45 min	500mm/min	31,74

**Σχήμα 3.21:** Δοκίμια που έχουν υποστεί εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> για 15, 30, 45 λεπτά για ταχύτητα 500mm/min (βιβλιογραφία 20).

Η επίδραση του υγρού N<sub>2</sub> αποδόθηκε στην παραπάνω εργασία στην σκλήρυνση της φάσης της μήτρας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα μακρομόρια «παγώνουν» λόγω της ακαμψίας και συνεισφέρουν στην αύξηση της αντοχής.

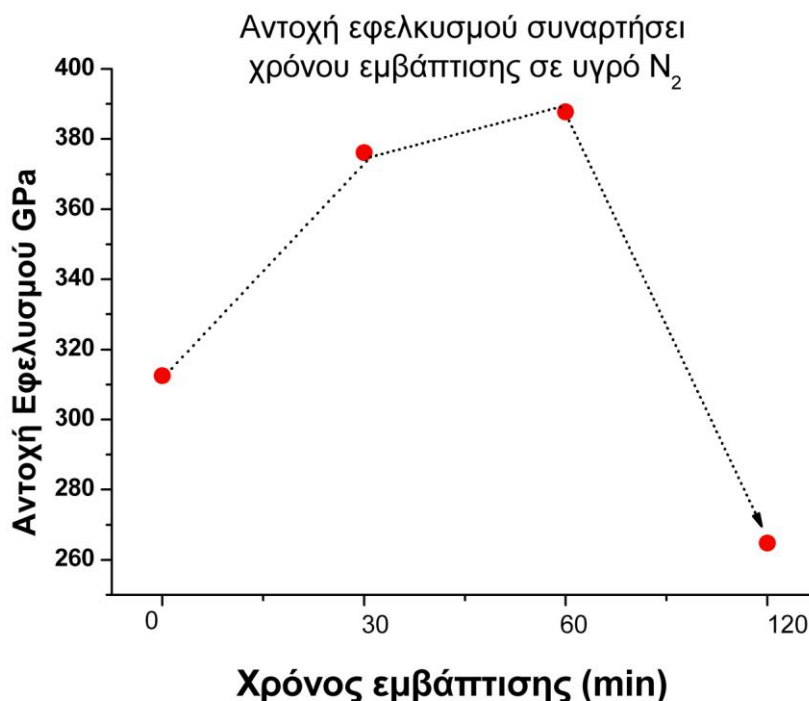


**Σχήμα 3.22:** Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό  $N_2$  (για ταχύτητα 1mm/min) (βιβλιογραφία 20)



**Σχήμα 3.23:** Μεταβολή ILSS συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό  $N_2$  (για ταχύτητα 500mm/min) (βιβλιογραφία 20)

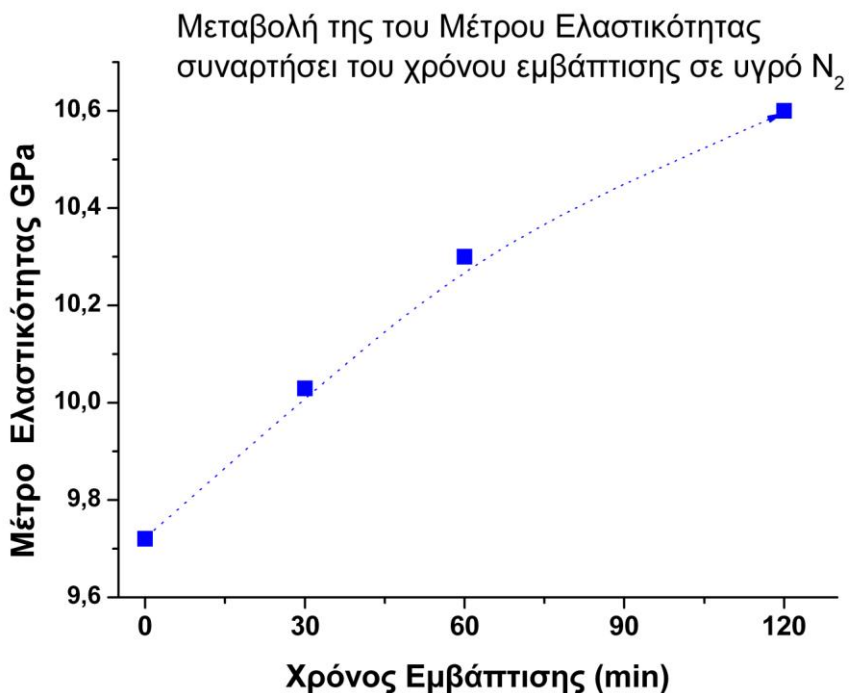
Τα αποτελέσματα της εργασίας μου δείχνουν να είναι συμβατά με τα παραπάνω ευρήματα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί βλέπουμε ότι τα δοκίμια που ψύχθηκαν σε υγρό  $N_2$  για 30, 60 min παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής εφελκυσμού ενώ στα 120 min παρατηρείται απότομη μείωση της αντοχής.



**Σχήμα 3.24:** Μεταβολή αντοχής εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό  $N_2$ .

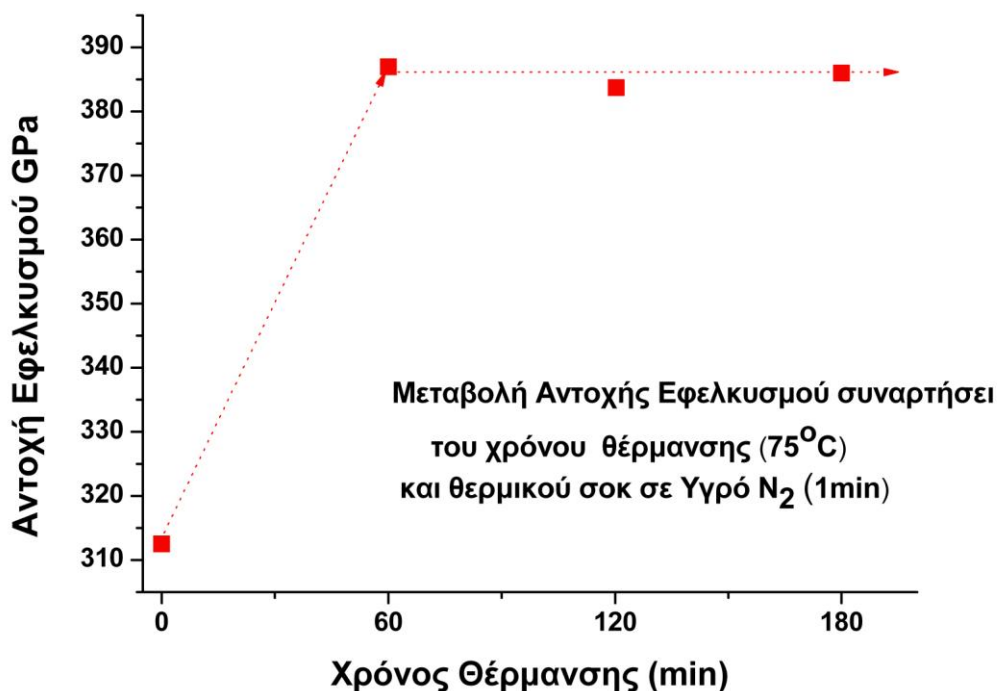
Είναι γνωστό ότι οι ίνες έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τη μήτρα ως ανεξάρτητα υλικά. Λόγω ψύξης η ενίσχυση (ίνες γυαλιού) μέσα στην ανισότροπη δομή του σύνθετου υλικού τείνουν να συρρικνωθούν περισσότερο από την εποξική μήτρα λόγω της παρατεταμένης ψύξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται στη δομή μικρορηγματώσεις που οδηγούν στη μείωση της αντοχής. Τα αποτελέσματα φαίνονται να είναι συμβατά με αυτά που προαναφέραμε στη βιβλιογραφία. Παράλληλα μέσω του πειράματος του εφελκυσμού προσδιορίστηκε και το μέτρο ελαστικότητας σε όλες τις περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω:





**Σχήμα 3.25:** Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε υγρό N<sub>2</sub>.

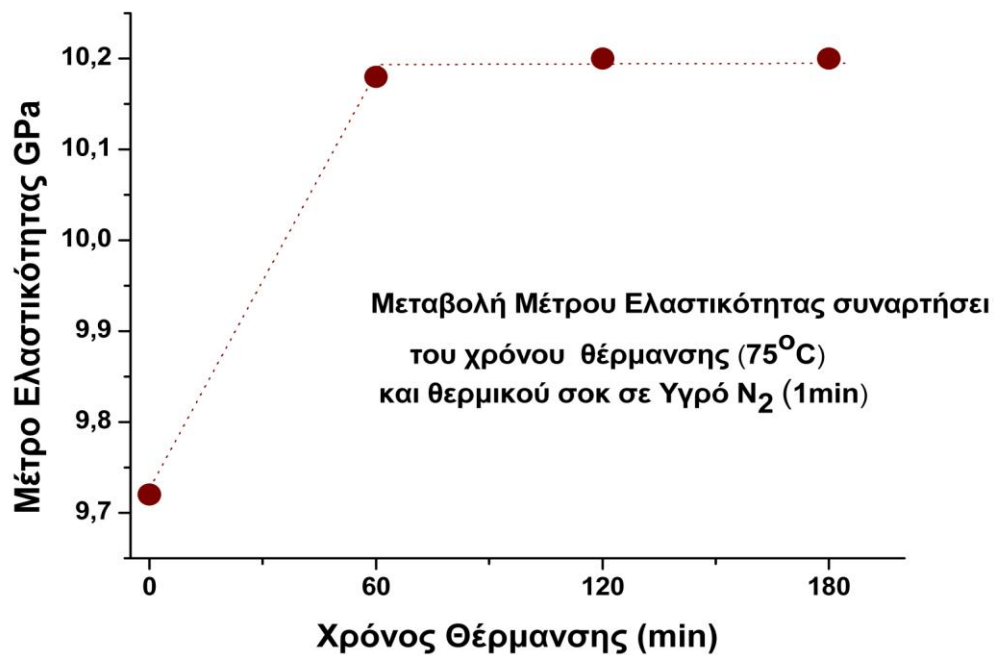
Παρατηρείται μια αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς θερμική κατεργασία. Όμως δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή κατά την ψύξη σε υγρό N<sub>2</sub> μεταξύ 30min και 120min. Αυτό αποδεικνύει το γεγονός ότι η ακαμψία (ελαστικότητα) τόσο της μήτρας όσο και των ινών γυαλιού δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Το μέτρο ελαστικότητας αποτυπώνει μακροσκοπικά την ακαμψία των υλικών. Το δεύτερο μέρος των πειραμάτων της εργασίας όπως ήδη περιγράψαμε στην πειραματική διαδικασία αφορούν τον έλεγχο του ίδιου υλικού μετά από θέρμανση στους 75°C για το χρονικό διάστημα 60, 120, 180 min, για απότομη (στιγμιαία) ψύξη των δοκιμίων σε υγρό άζωτο N<sub>2</sub> και στη συνέχεια επαναφορά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



**Σχήμα 3.26:** Αντοχής εφελκυσμού συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και στιγμιαίας εμβάπτισης σε υγρό N<sub>2</sub>.

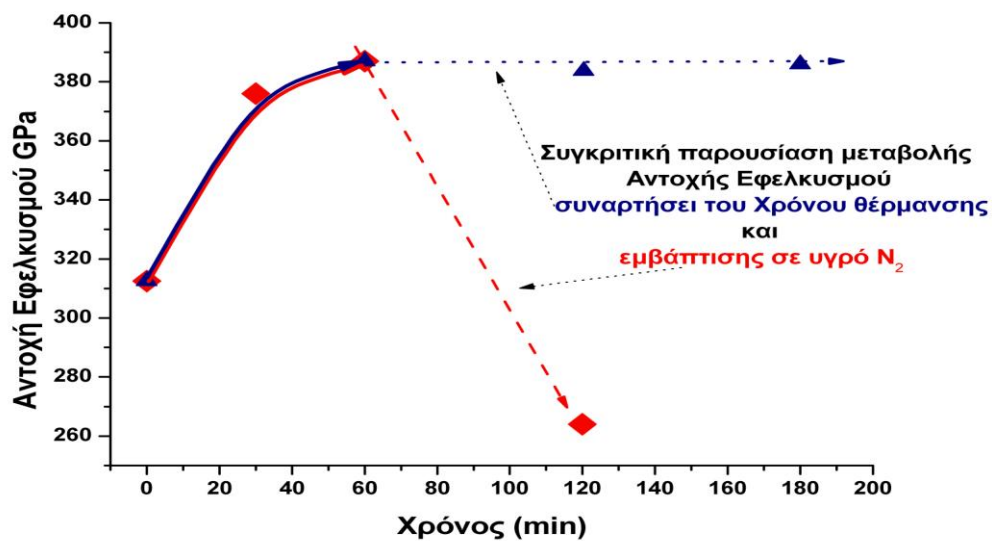
Στο σχήμα 3.26 παρατηρείται αύξηση της αντοχής αλλά δεν φαίνεται η αύξηση αυτή να έχει αυξητική τάση με την άνοδο της θερμοκρασίας από 60 – 180 min. Η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην σκλήρυνση ή ολοκλήρωση σκλήρυνσης της εποξικής μήτρας. Συνεπώς με την θέρμανση στους 75°C για 60 min φαίνεται να ολοκληρώνεται η σκλήρυνση αφού με την αύξηση της θέρμανσης στα 180 min δεν δείχνει να επηρεάζεται η μηχανική αντοχή του υλικού. Επίσης είναι αξιοσημείωτο ότι το θερμικό σοκ δεν φαίνεται να επηρεάζει το υλικό αφού η αντοχή που λαμβάνει μετά από θέρμανση για 60min δεν μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ των χρόνων 60 και 180 min.

Ανάλογη είναι και η συμπεριφορά της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



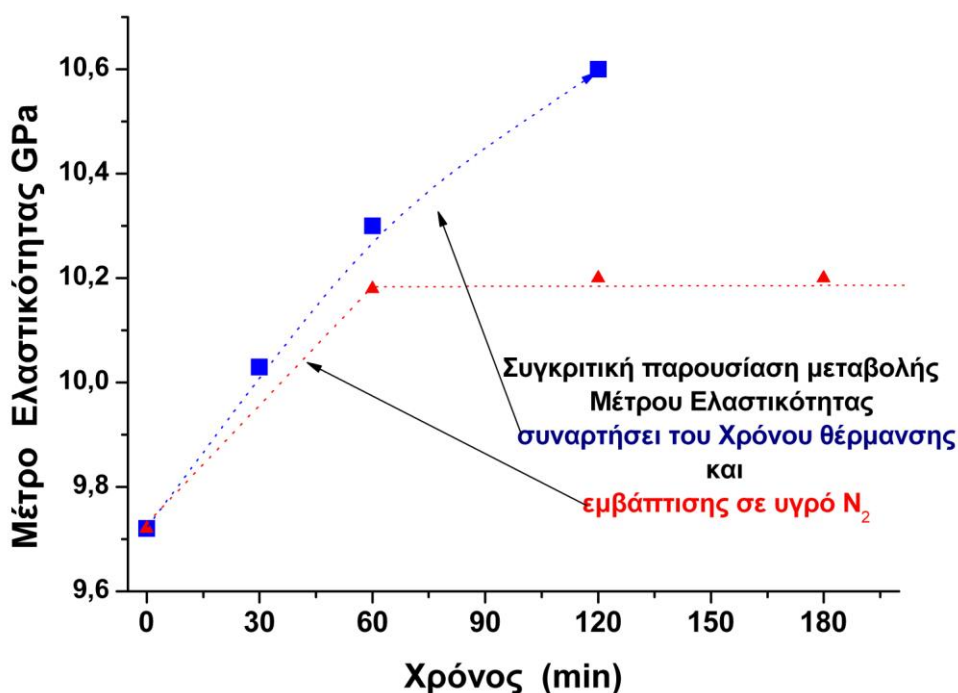
**Σχήμα 3.27:** Μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης και στιγμιαίας εμβάπτισης σε υγρό N<sub>2</sub>

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.27 γίνεται συγκριτική παρουσίαση της μεταβολής της αντοχής για τις δύο διαφορετικές δοκιμασίες που υποβλήθηκε το υλικό.



**Σχήμα 3.28:** Συγκριτική παρουσίαση μεταβολής αντοχής

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της αντοχής και για τις δύο δοκιμασίες είναι ίδια μέχρι τα 60 min και ανέρχεται σε 24% σε σχέση με την αντοχή του υλικού χωρίς θερμική κατεργασία. Αυτή η αύξηση της αντοχής παραμένει στο υλικό μετά τη παράταση της θέρμανσης του μέχρι τα 180 min, ενώ αντίθετα η παρατεταμένη παραμονή του υλικού σε υγρό N<sub>2</sub> προκαλεί μείωση της αρχικής αντοχής του κατά 16%. Στο διάγραμμα του σχήματος 3.29 γίνεται συγκριτική παρουσίαση της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας για τις δύο διαφορετικές δοκιμασίες που υποβλήθηκε το υλικό.



Σχήμα 3.29: Συγκριτική παρουσίαση μεταβολής μέτρου ελαστικότητας

Παρατηρούμε ότι η εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> ανζψωτο ύστερα από 120 min προκαλεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας ~10%, ενώ η θέρμανση με στιγμιαίο θερμικό σοκ προκαλεί μικρή αύξηση του μέτρου ελαστικότητας της τάξεως του 5%. Δηλαδή με την εμβάπτιση σε υγρό N<sub>2</sub> το υλικό γίνεται πιο ψαθυρό. Από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι η αντοχή εφελκυσμού του υλικού επηρεάζεται περισσότερο και είναι πιο ευαίσθητη στις δοκιμασίες που έγιναν.

### **3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

- Βλέπουμε ότι τα δοκίμια που ψύχθηκαν σε υγρό N<sub>2</sub> για 30, 60 min παρουσιάζουν αύξηση της αντοχής εφελκυσμού ενώ στα 120 min παρατηρείται απότομη μείωση της αντοχής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται στη δομή μικρορηγματώσεις που οδηγούν στη μείωση της αντοχής.
- Η ακαμψία τόσο της μήτρας όσο και των ινών γυαλιού δεν μεταβάλλεται σημαντικά.
- Στο δεύτερο πείραμα παρατηρείται αύξηση της αντοχής αλλά δεν φαίνεται η αύξηση αυτή να έχει αυξητική τάση με την άνοδο της θερμοκρασίας από 60 – 180 min.
- Το μέτρο ελαστικότητας στο δεύτερο πείραμα μεταβάλλεται ουσιαστικά σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς θερμική κατεργασία.
- Φαίνεται ενδιαφέρον να ελεγχθούν υλικά με κάμψη τριών σημείων και να συγκριθούν με τα αποτελέσματα μας. Το πάχος του υλικού που είχαμε στη διάθεση μας δεν επέτρεπε τη δοκιμασία λόγω του πολύ μικρού απαιτούμενου φορτίου θραύσης.
- Για να είναι κατάλληλο το υλικό να ελέγθη σε κάμψη τριών σημείων πρέπει να αποτελείται από πολλά στρώματα και το πάχος να είναι η 6 – 8 mm για να μπορεί να γίνει η μέτρηση με αξιοπιστία με τη πρέσα που διαθέτει το εργαστήριο τεχνολογίας υλικών.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. <http://www.matter.org.uk/matscicdrom/manual/co.html>
2. [ftp://ftp.rta.nato.int/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-069\(II\)/MP-069\(II\)-\(SM1\)-16.pdf](ftp://ftp.rta.nato.int/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-069(II)/MP-069(II)-(SM1)-16.pdf)
3. R. Gibson "Principles of composites materials" McGraw Hill
4. Κώστας Ε. Σαββάκης, Διαλέξεις μαθήματος «Κατασκευαστικές τεχνολογίες & τεχνολογία πλαστικών»
5. B. Agarwal ,L Broutman "Analysiw and Performanse of fibers composites" John Wiley and Sons,Inc
6. W. Callister"Επιστήμη και Τεχνολογία των υλικών» Εκδόσεις Τζιόλα (Μετάφραση)
7. Καρδαχάκης Ιωάννης, (Πτυχιακή εργασία του Τ.Ε.Ι ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΣΤΕΦ 2008) Μελέτη επίδρασης υδροθερμικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες εποξυ – σύνθετου υλικού οπλισμένου με ίνες γυαλιού GRRP.
8. Δημόπουλος Κυριάκος, Λεωνίδας Χέλμης, (Πτυχιακή εργασία Τ.Ε.Ι ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΣΤΕΦ 2008) Μελέτη επίδρασης υδροθερμικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες εποξυ – σύνθετου υλικού οπλισμένου με ίνες γυαλιού.
9. Δ. Σέγκου ((Πτυχιακή εργασία Τ.Ε.Ι ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΣΤΕΦ 1992) Προηγμένα σύνθετα υλικά
10. <http://atmae.org/jit/Articles/balzer061608.pdf>
11. [http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4961/1/aravanisd\\_pol\\_yesters.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4961/1/aravanisd_pol_yesters.pdf)
12. <http://hecesc2003.civ.uth.gr/dom01.htm>
13. [http://www.hofstra.edu/pdf/tec\\_nyscate\\_polymers.pdf](http://www.hofstra.edu/pdf/tec_nyscate_polymers.pdf)
14. <http://www.lib.ucdavis.edu/dept/pse/resources/fulltext/HDBK17-5.pdf>
15. Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές (2006) Σ.Η Δρίτσος τμήμα Πολιτικών μηχανικών πανεπιστημίου Πατρών
16. Σταθερότητα έναντι της UV ακτινοβολίας μορφοποιημένων ακόρεστων πολυεστέρων (2011) Δημήτριος Κ Αραβανής Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο
17. Journal of industrial technology vol 24 Number 3 (2008) Significant effect of microwave curing on tensile strength of carbon fiber composites By Dr. Brian B. Balzer and Dr. Jeff McNabb
18. Effect of Thermal Shock on Interlaminar Strength of Thermally Aged Glass Fiber-Reinforced Epoxy Composites (2005) Bankim Chandra Ray Department of Metallurgical and Materials Engineering, National Institute of Technology, India.
19. Papanicolaou GC, Michalopoulou MV, Anifantis NK. Thermal stresses in fibrous composites incorporating hybrid interphase regions. Compos Sci Technol 2002;62(14):1881–94.
20. K Shilpa (Thesis)
21. Department of Metallurgical and Materials Engineering
22. National Institute of Technology Rourkela
23. Οδηγός Origin Pro 8.0 Μια ολοκληρωμένη λύση γραφικής αναπαράστασης δεδομένων