

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΚΑΙ
ΚΑΜΨΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (ΕΠΟΞΥ-
ΡΗΤΙΝΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗΣ ΜΕ ΥΑΛΟΪΦΑΣΜΑ)
*A study of Tensile and Flexural Strength of Glass
Fiber Reinforcement Epoxy Composites*



Φοιτητής: Στρατάκης Μάνος
Επιβλέπων καθηγητής: Σαββάκης Κώστας

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	5
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
ABSTRACT.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1. Στοιχεία για τη Δομή των Σύνθετων Πολυμερών	11
1.1 Γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά	11
1.2 Υλικά ενίσχυσης.....	12
1.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκου.....	13
1.2.2 Ινώδη σύνθετα υλικά	14
1.2.3 Δομικά σύνθετα υλικά.....	18
1.3 Τύποι μήτρας	19
1.4 Εποξυ-ρητίνες (epoxy resin).....	21
2. Ιδιότητες Των Σύνθετων Πολυμερών.....	25
2.1 Μηχανικές και άλλες Ιδιότητες	25
2.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες σύνθετου υλικού.....	25
2.1.2 Φυσικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών	33
2.2 Μελέτη αστοχίας σύνθετων υλικών	37
2.2.1 Κατασκευαστικές βλάβες.....	38
2.2.2 Βλάβες κατά την λειτουργία	40
2.3 Μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου	40
2.3.1 Οπτικός έλεγχος.....	41
2.3.2 Τεχνική ηχούς πρόσκρουσης (Audible Sonic Testing-Coin Tapping)....	41
2.3.3 Αυτοματοποιημένη δοκιμή κτύπων (Automated Tap Test)	41
2.3.4 Μέθοδοι ελέγχου με υπερήχους (Ultrasonic testing methods)	41
2.3.5 Ραδιογραφία (Radiography)	43
2.3.6 Θερμογραφία (Thermography)	43
2.3.7 Ραδιογραφία νετρονίων (Neutron Radiography).....	44
2.3.8 Ανιχνευτής υγρασίας (Moisture detector)	44
2.3.9 Τομογραφία λείζερ (Shearography).....	44
2.3.10 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα.....	44
3. Εφαρμογές σύνθετων Πολυμερών	45
3.1 Εφαρμογές σε εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη.....	45
3.2 Διαστημικές εφαρμογές	49
3.3 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία	50

3.4	Εφαρμογές στα αθλητικά είδη	50
3.5	Θαλάσσιες εφαρμογές.....	51
3.6	Έργα υποδομών	51
4.	Παραγωγή και ανακύκλωση σύνθετων πολυμερών.....	52
4.1	Διαδικασία παραγωγής υαλονημάτων	52
4.2	Διαδικασία παραγωγής σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες.....	53
4.2.1	Διαδικασία επίστρωσης καλουπιού	54
4.2.2	Τεχνικές Μορφοποίησης με Καλούπια	56
4.2.3	Χύτευση με μεταφορά ρητίνης (Resin Transfer Molding- RTM)	58
4.2.4	Μορφοποίηση προεμποτισμένης ταινίας (prepreg).	60
4.2.5	Μορφοποίηση με έλξη.....	61
4.2.6	Μορφοποίηση με περιέλιξη ινών (filamentwinding)	62
4.2.7	Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheetmoldingprocess, SMC)	63
4.2.8	Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής	64
4.2.9	Μορφοποίηση Με Εμβάπτιση (Pultrusion).....	65
4.3	Ανακύκλωση σύνθετων πολυμερών.....	66
4.3.1	Τεχνολογίες ανακύκλωσης θερμοσκληρυνόμενων Υλικών	66
5.	Πειραματικό μέρος	69
5.1	Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν	69
5.2	Περιγραφή κατασκευής υλικού	69
5.3	Σχεδίαση και κοπή των δοκιμίων.....	74
5.4	Μέθοδος και μηχανή μετρήσεων	76
6.	Αποτελέσματα και συζήτηση αυτών	78
6.1	Αποτελέσματα.....	78
6.1.1	Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού.....	78
6.1.2	Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων	83
6.2	Συζήτηση των αποτελεσμάτων.....	90
6.2.1	Αποτελέσματα εφελκυσμού.....	90
6.2.2	Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης τριών σημείων	93
6.2.3	Συγκριτική συζήτηση αποτελεσμάτων.....	95
7.	Συμπεράσματα.....	98
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων γεωμετρικών και διασταλτικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων της διασπαρμένης φάσης που επηρεάζει τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών : (α) συγκέντρωση, (β) μέγεθος, (γ) σχήμα, (δ) κατανομή και (ε) προσανατολισμός. [1], σ.639.	11
Σχήμα 1.2: Σχήμα ταξινόμησης των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών [1], σ. 640.....	12
Σχήμα 1.3: Τύποι ενίσχυσης μήτρας	13
Σχήμα 1.4: Ταξινόμηση των ινών γυαλιού και οι φυσικές τους ιδιότητες [5]	15
Σχήμα 1.5: Χημική σύσταση ινών γυαλιού ως ποσοστό βάρους επί τοις εκατό (wt%) [5].....	16
Σχήμα 1.6: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ινών γυαλιού [5]	16
Σχήμα 1.7: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών [6]	21
Σχήμα 1.8: Εποξική ομάδα	22
Σχήμα 1.9: Αντίδραση συμπύκνωσης διφαινόλης Α με επιχλωρυδρίνη, προς σχηματισμό προπολυμερούς εποξικής ρητίνης [9].	23
Σχήμα 1.10: (α) Τρισδιάστατος δακτύλιος οξιρενίου εποξυ-ρητίνης και (b) και σταυροδεσμοί που προκύπτουν από σκληρυμένη εποξική ρητίνη [10].....	24
Σχήμα 1.11: Εποξικές ρητίνες [11].....	24
Σχήμα 2.1: Προφίλ ταχύτητας κατά την κίνηση ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, εκ των οποίων η πάνω κινείται , ενώ η κάτω παραμένει ακίνητη[12]	26
Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση (α) συνεχών και ευθυγραμμισμένων, (β) ασυνεχών και ευθυγραμμισμένων και (γ) ασυνεχών και τυχαία προσανατολισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες [1 σ.649].	28
Σχήμα 2.3: Μεταβολή του μέτρου Ε με τη θερμοκρασία, για άμορφο γραμμικό πολυμερές, διασταυρωμένο και ημι-κρυσταλλικό.[12].....	29
Σχήμα 2.4: Αντοχή σε κάμψη	30
Σχήμα 2.5: (α) Σχηματικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για φαθυρά ινώδη και όλκιμα υλικά μήτρας. Σημειώνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θραύσης και για τα δύο υλικά. (β) Σχηματική καμπύλη τάσης –παραμόρφωσης για ένα ευθυγραμμισμένο σύνθετο με ενίσχυση ίνας που υπόκειται σε μονοαξονική τάση κατά τη διεύθυνση της ευθυγράμμισης. Φαίνονται επίσης και οι καμπύλες για το υλικό ίνας και μήτρας του διαγράμματος (α).	31
Σχήμα 2.6: Μηχανικές ιδιότητες εποξικής ρητίνης ινοπλισμένης με γυαλί[5].	33
Σχήμα 2.7: Πυκνότητα και άλλες ιδιότητες κάποιων σύνθετων υλικών[17].....	34
Σχήμα 2.8: Πυκνότητα και άλλες ιδιότητες διάφορων ρητινών.	34
Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση[18].	37
Σχήμα 2.10: Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης[18].....	38
Σχήμα 2.11: Σύγκριση μη καταστροφικών μεθόδων [19]	44
Σχήμα 3.1: Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος	45
Σχήμα 3.2: Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στην πολεμική αεροπορία[21] ...	46
Σχήμα 3.3: Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στην πολιτική αεροπορία[21].....	47
Σχήμα 3.4: Χρήση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στο AirbusA380 [21]47	
Σχήμα 3.5: Χρήση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στο Boeing 777 [21]48	
Σχήμα 3.6: Εφαρμογές σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στα αθλητικά είδη[21].....	50

Σχήμα 4.1: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού {6}.....	53
Σχήμα 4.2: Υφαντό και τυχαία προσανατολισμένο υαλοϋφασμα	53
Σχήμα 4.3: Επίστρωση καλουπιού με το χέρι (HandLayup).....	54
Σχήμα 4.4: Ψεκασμός καλουπιού (Sprayup).....	54
Σχήμα 4.5: Αντικολλητικές επιστρώσεις.....	55
Σχήμα 4.6: Αυτοματοποιημένη μηχανή επίστρωσης.....	56
Σχήμα 4.7: Μορφοποίηση προ- διαμορφωμένων εξαρτημάτων (Pre- formmolding). 58	
Σχήμα 4.8: Στάδια παραγωγής με τη μέθοδο χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (RTM).	59
Σχήμα 4.9: Παραγωγή προεμπροτισμένης ταινίας (prepreg) με χρήση θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών [1].....	61
Σχήμα 4.10: Μορφοποίηση με έξη.....	62
Σχήμα 4.11: Γενική άποψη διαδικασίας περιέλιξης ινών.	62
Σχήμα 4.12: Σχηματικές αναπαραστάσεις ελικοειδούς, περιφερειακής και πολικής περιέλιξης νήματος.....	63
Σχήμα 4.13: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής εμβάπτισης[22].....	65
Σχήμα 4.14: Τεχνικές ανακύκλωσης Θερμοσκληρυνόμενων Σύνθετων υλικών[24]..	66
Σχήμα 5.1 (α) Ρολό υαλοϋφάσματος (β) Κομμάτι στις διαστάσεις που επιλέξαμε ...	70
Σχήμα 5.2: Επιφάνεια βάσης κατασκευής.....	70
Σχήμα 5.3: Εποξική ρητίνη LF και σκληρυντής HARTERLF1	71
Σχήμα 5.4: Ζυγαριά ακριβείας, ζύγιση των υλικών.....	71
Σχήμα 5.5: Διήθηση μίγματος για την απομάκρυνση φυσαλίδων.....	72
Σχήμα 5.6: Επάλειψη του μίγματος ρητίνης στο υαλοϋφασμα	73
Σχήμα 5.7: Εφαρμογή πίεσης με ρολό.....	73
Σχήμα 5.8: Πλάκα δοκιμίων	74
Σχήμα 5.9: προσανατολισμός κοπής των δοκιμίων	74
Σχήμα 5.10: Σχεδιασμένη πλάκα δοκιμίων	75
Σχήμα 5.11: Κοπή δοκιμίων	75
Σχήμα 5.12: (α) Διάταξη εφελκυσμού (β) Διάταξη κάμψης τριών σημείων	76
Σχήμα 5.13: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής από το πρόγραμμα LabView.	77
Σχήμα 6.1: Τυπικά διαγράμματα φορτίου εφελκυσμού-μεταβολής μήκους για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°	79
Σχήμα 6.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα των δοκιμών εφελκυσμού για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°	80
Σχήμα 6.3: Τυπικά διαγράμματα υπολογισμού κλίσης για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60° ..	81
Σχήμα 6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εφελκυσμού.....	83
Σχήμα 6.5: Τυπικό διάγραμμα φορτίου κάμψης- μετατόπισης για τις γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°	84
Σχήμα 6.6: Κάμψη τριών σημείων. Κοίλανση λόγω κάμψης, ροπή και διάτμηση	85
Σχήμα 6.7: Διάταξη κάμψης τριών σημείων. 1. Κύλινδρος εφαρμογής φορτίου 2. Κύλινδροι στήριξης δοκιμίου b: πλάτος δοκιμίου, h: πάχος δοκιμίου, L: απόσταση στήριξης	85
Σχήμα 6.8: Τυπικά διαγράμματα υπολογισμού της κλίσης για 0°, 30°, 45°,60° από δοκιμασίες κάμψης τριών σημείων.	87
Σχήμα 6.9: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κλίσεων από δοκιμές κάμψης τριών σημείων	88
Σχήμα 6.10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων κάμψης τριών σημείων.	89
Σχήμα 6.11: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δοκιμών εφελκυσμού	90

Σχήμα 6.12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής εφελκυσμού ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού.....	91
Σχήμα 6.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής διαρροής ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού.....	92
Σχήμα 6.14: συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας εφελκυσμού ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού.....	92
Σχήμα 6.15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής κάμψης ως προς τη γωνία κοπής.....	93
Σχήμα 6.16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας κάμψης ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών	93
Σχήμα 6.17: Πλήρες διάγραμμα φορτίου κάμψης- μετατόπισης.....	94
Σχήμα 6.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων Αντοχής	95
Σχήμα 6.19: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων Ελαστικότητας.....	96
Σχήμα 6.20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μείωσης Αντοχής	96
Σχήμα 6.21: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μείωσης ελαστικότητας	97

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αντοχή ενός σύνθετου υλικού, εποξικής ρητίνης ινοπλισμένο με υαλοϋφασμα, σε δοκιμασίες κάμψης τριών σημείων και εφελκυσμού. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με διαφορετικές γωνίες προσανατολισμού των ινών του υαλοϋφάσματος σε σχέση με τον άξονα πραγματοποίησης των δοκιμών.

Για την υλοποίηση των πειραμάτων θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ατζολετάκη για τον χρόνο που αφιέρωσε και την βοήθεια που μου παρείχε στην κατασκευή του σύνθετου υλικού, που έγιναν στο εργαστήριό του στην βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου, με τη συμμετοχή του συναδέλφου μου κ. Προκοπάκη. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κονταξάκη για τον σχεδιασμό και την επίβλεψη κατασκευής των δοκιμών μου, στο Αιολικό Εργαστήριο του Τ.Ε.Ι. Τα δοκίμια κόπηκαν στη βιοτεχνία των Αφών Σπανού, τους οποίους επίσης ευχαριστώ θερμά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κ. Κώστα Σαββάκη, αρχικά που μου ανέθεσε αυτή την εργασία και έπειτα για την καθοδήγηση και την συμπαράστασή του.

ABSTRACT

Fiber reinforced composites are gaining ground in the market day by day, because of their excellent properties that present. For example, composites can achieve great mechanical strength while being lightweight. In the present thesis is studied the flexural strength of glass fiber reinforcement epoxy composites. More specific the tests have been done with different orientation of the fibers. The results have shown that the composite with fiber orientation of 0° has the best properties, like flexural strength, elasticity and tensile strength.

The composite consists of 9 layers of fiberglass (interglass) 60×45 , 3.3 mm width and 290 gr/m^2 . The layers are bonded together with Epoxy Resin LF. After the manufacturing progress the plates stayed in a dry place to mature the bonds between the fiberglass and the epoxy. Then the plates designed properly with the test objects in the right cutting angle ($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$). After this the plates were cut into a cutting wheel to acquire the right dimensions.

The study of the results shows that are consistent with analogous results in the literature.

Epoxy laminates reinforced with glass fibres parallel in one direction (GFR) shows to have in the 0° direction maximum strength and this decreases to 0° and then the phenomenon is reversed. This phenomenon is explained as follows: the gradual change of the orientation angle of the fibers changes the

contribution of the matrix to mechanical strength. In our case, there was reinforcing for both directions 0° and 90° , so the contribution of the matrix seems to play an important role, but the behavior of the material is more complicated.

According to results the strength- cutting angle orientation of the specimens, the tensile and the flexural strength of the composite have the maximum value at the angle 0° . For all other angles, these strengths are reduced as shown in the relevant diagrams.

An analogous picture also shows the elasticity results. The maximum modulus of elasticity for tensile and flexural test was at 0° and for all other angles there was a decrease in the modulus of elasticity.

The flexural and tensile results are consistent and comparable with the results of compression in the same specimens according to a thesis carried at the Material Technology Laboratory.

In chapter 6, the results of our test are shown in detail with diagrams and tables for each angle.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδηγεί και στην εξέλιξη των υλικών και αντίστροφα η εξέλιξη των υλικών οδηγεί στην ανάπτυξη νέων τεχνολογικών εφαρμογών. Έτσι λοιπόν για απαιτητικούς τομείς όπως η αεροδιαστημική, οι υποβρύχιες χρήσεις και οι μεταφορές υπάρχει η ανάγκη παρασκευής υλικών με ασυνήθιστους συνδυασμούς ιδιοτήτων που δεν ικανοποιούνται από τα συμβατικά κράματα μετάλλων, τα κεραμικά και τα πολυμερή υλικά. Για παράδειγμα στην αεροναυπηγική απαιτούνται υλικά ανθεκτικά, που δεν διαβρώνονται εύκολα, είναι ανθεκτικά στην απόξεση και την κρούση, ενώ συγχρόνως να είναι και χαμηλής πυκνότητας. Αυτός θεωρείται πολύ απαιτητικός συνδυασμός ιδιοτήτων αν ληφθεί υπόψη ότι συνήθως τα ανθεκτικά υλικά είναι μεγάλης πυκνότητας και η αύξηση της αντοχής ή της δυσκαμψίας συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση αντοχής σε κρούση. Σε τέτοιου είδους προβλήματα φαίνεται πως τα σύνθετα υλικά μπορούν να προσφέρουν λύσεις καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ευελιξία στο σχεδιασμό και την μορφοποίησή τους. Για τον σχεδιασμό σύνθετων υλικών έχουν συνδυαστεί μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή με διάφορους τρόπους ώστε να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών όπως η δυσκαμψία, η δυσθραυστότητα, η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Όπως είναι φυσικό, λόγω της μεγάλης ποικιλίας ιδιοτήτων που μπορούν να επιδείξουν τα σύνθετα υλικά, υπάρχει και μεγάλο εύρος εφαρμογών τους. Μερικά παραδείγματα είναι:

- στον τομέα των κατασκευών, ως σύνθετα υλικά αποτελούμενα από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Οι συνήθεις τύποι ινών είναι από γυαλί ή αραμίδιο ή άνθρακα.
- στον τομέα των κατασκευαστικών επεμβάσεων, που είναι η πλέον επιτυχή εφαρμογή, αν και πιο περιορισμένη, καλύπτοντας κυρίως αδυναμίες μεμονωμένων στοιχείων[2]
- στην αεροναυπηγική, με ένα πλήθος προϊόντων τα οποία αρχίζουν από τις ειδικές αεροπορικές κόλλες, τις εποξικές ρητίνες, τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα, τις πολυουρεθάνες, τις πολυστερίνες, τα θερμοπλαστικά και καταλήγουν στα ειδικά κεραμικά υλικά [3]
- στη θωράκιση, Μία θωράκιση πρέπει να ικανοποιεί δύο ρόλους, αφενός να παρέχει προστασία και αφετέρου να διατηρεί τη δομή της. Αν το υλικό που χρησιμοποιείται για τη θωράκιση ικανοποιεί και τις δύο λειτουργίες, τότε συνήθως παρέχει προστασία έχοντας μεγάλη αντοχή ώστε να μην μπορεί να διαρραγεί κατά την πρόσκρουση του βλήματος[4].
- σε ανεμογεννήτριες, πυραύλους, κράνη, ρακέτες του τένις και εκατοντάδες άλλες εφαρμογές.

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 αλλά και τον τρόπο καταπόνησης του υλικού.

Τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν τα σύνθετα υλικά είναι το μεγάλο κόστος κατασκευής, αφού απαιτείται εφαρμογή εξελιγμένων τεχνολογιών για την παραγωγή τους και η δυσκολία στην ανακύκλωσή τους.

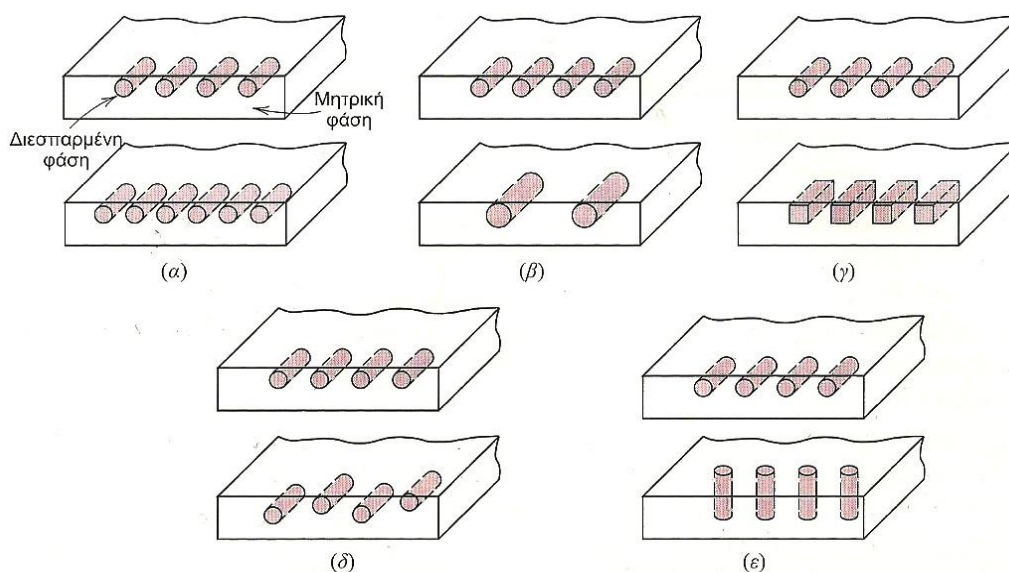
Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε σύνθετο υλικό με μήτρα επόξυ-ρητίνη (epoxyresin) και ενίσχυση με υαλοϋφασμα. Εξετάστηκε η αντοχή σε εφελκυσμό και σε κάμψη τριών σημείων του υλικού σε δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης του υαλοϋφάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.Στοιχεία για τη Δομή των Σύνθετων Πολυμερών

1.1 Γενικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά

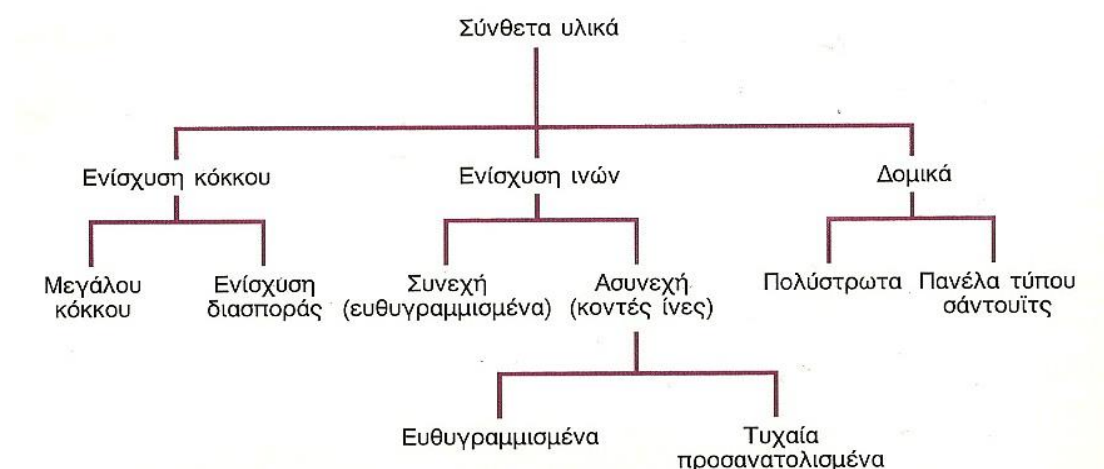
Ως σύνθετο υλικό μπορεί να οριστεί ένα πολυφασικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται τεχνητά. Οι συνιστώσες φάσεις πρέπει να είναι χημικά ανόμοιες και να διαχωρίζονται με μια διακριτή επιφάνεια. Πολλά σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Η μια από αυτές ονομάζεται μήτρα, η οποία είναι συνεχής και περιβάλλει την άλλη φάση η οποία ονομάζεται διασπαρμένη φάση. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συνάρτηση των ιδιοτήτων των επιμέρους φάσεων που το αποτελούν, των σχετικών ποσών και της γεωμετρίας της διασπαρμένης φάσης. Η γεωμετρία της διασπαρμένης φάσης σε αυτό το πλαίσιο σημαίνει το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, την κατανομή και τον προσανατολισμό τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων γεωμετρικών και διασταλτικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων της διασπαρμένης φάσης που επηρεάζει τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών : (α) συγκέντρωση, (β) μέγεθος, (γ) σχήμα, (δ) κατανομή και (ε) προσανατολισμός. [1], σ.639.

Ένας απλός τρόπος για την ταξινόμηση των σύνθετων υλικών αποτελεί ο διαχωρισμός τους σε τρεις κατηγορίες: ενίσχυση κόκκων, ενίσχυση ινών και δομικά σύνθετα υλικά. Επιπλέον υπάρχουν τουλάχιστον δύο υποκατηγορίες

για την κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες. Μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

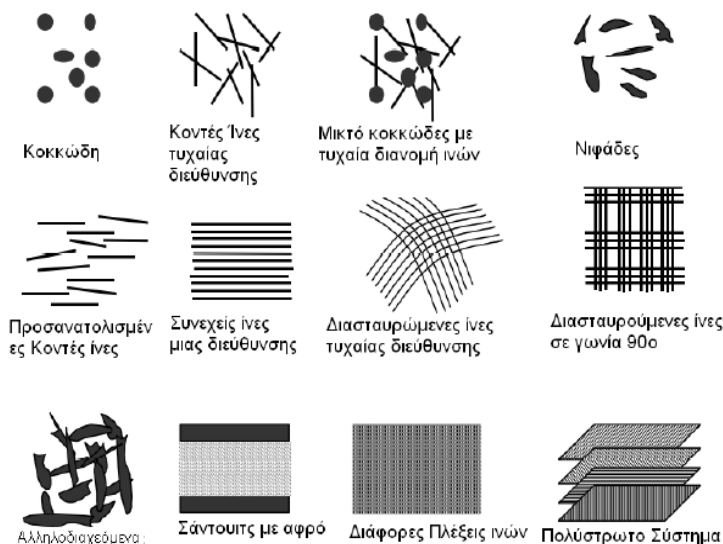


Σχήμα 1.2: Σχήμα ταξινόμησης των διαφόρων ειδών των σύνθετων υλικών [1], σ. 640

Η διασπαρμένη φάση για τα κοκκώδη σύνθετα υλικά (particulates) είναι ίδια σε όλους τους άξονες (οι διαστάσεις των κόκκων είναι περίπου ίδια για όλες τις διευθύνσεις). Για τα ινώδη σύνθετα υλικά (fiberreinforcementmaterials), η διασπαρμένη φάση έχει τη γεωμετρία της ίνας (ο λόγος μήκους της ίνας προς την διάμετρό της είναι μεγάλος). Τα δομικά σύνθετα υλικά είναι συνδυασμοί των σύνθετων και ομογενών υλικών.

1.2 Υλικά ενίσχυσης

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από την μήτρα και το υλικό ενίσχυσης το οποίο εμπεριέχεται στη μήτρα και έχει ως στόχο την ενίσχυσή της, όπως δηλώνει και η ονομασία του. Τα υλικά ενίσχυσης λοιπόν, μπορεί να είναι είτε μέταλλα ή κεραμικά ή και πολυμερή. Η ενίσχυση μπορεί να γίνει με τη μορφή κόκκων, ινών και πολλαπλών στρωμάτων ή και τύπου σάντουιτς. Στις παρακάτω παραγράφους παρατίθενται συνοπτικά όλα τα παραπάνω, ενώ μια οπτική απεικόνιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Τύποι ενίσχυσης μήτρας

1.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκου

Οι δύο υποκατηγορίες αυτού του είδους σύνθετων υλικών είναι τα σύνθετα ενίσχυσης μεγάλων κόκκων και τα σύνθετα ενίσχυσης με διασπορά. Ο όρος «μεγάλων κόκκων» χρησιμοποιείται για να υποδείξει ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κόκκου και μήτρας δε μπορούν να αναλυθούν σε ατομικό και μοριακό επίπεδο και χρησιμοποιείται κατά προτίμηση η μηχανική συνεχούς μέσου. Για τα περισσότερα σύνθετα υλικά αυτού του είδους, η κοκκώδης φάση είναι σκληρότερη και πιο δύσκαμπτη από τη μήτρα. Οι κόκκοι ενίσχυσης τείνουν να εμποδίζουν την κίνηση της μητρικής φάσης στην γεινίαση του καθενός κόκκου. Στην ουσία η μήτρα φέρει ένα μέρος της τάσης που εξασκείται στους κόκκους, οι οποίοι με τη σειρά τους φέρουν ένα μέρος του φορτίου. Ο βαθμός ενίσχυσης ή η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς εξαρτάται από την ισχύ του δεσμού στην διεπιφάνεια μήτρας- κόκκου. Ένα τυπικό παράδειγμα σύνθετου αυτής της κατηγορίας είναι το σκυρόδεμα.

Για ενίσχυση με διασπορά, οι κόκκοι είναι συνήθως πολύ μικρότεροι και έχουν διαμέτρους μεταξύ 10 και 100 nm. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κόκκου και μήτρας οι οποίες επιφέρουν ενίσχυση λαμβάνουν χώρα στο ατομικό και μοριακό επίπεδο. Εδώ η μήτρα φέρει το μεγαλύτερο μέρος του εφαρμοζόμενου φορτίου, οι διεσπαρμένοι κόκκοι εμποδίζουν τη κίνηση των εξαναγκασμών. Με αυτόν τον τρόπο εμποδίζεται η πλαστική παραμόρφωση έτσι ώστε η αντοχή σε διαρροή και σε εφελκυσμό όπως επίσης και η σκληρότητα να βελτιώνονται. Τα μέταλλα και τα κράματα μετάλλων μπορούν να ενισχυθούν και να σκληρυνθούν με την ομοιόμορφο διασπορά λεπτών κόκκων ενός πολύ σκληρού αδρανούς υλικού περιεκτικότητας μερικών εκατοστών κατ' όγκο. Το φαινόμενο ενίσχυση με διασπορά δεν είναι τόσο ισχυρό όπως είναι η σκλήρυνση με κατακρήμνιση, όμως η ενίσχυση μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλες χρονικές

περιόδους διότι οι διασπαρμένοι κόκκοι έχουν επιλεχθεί έτσι ώστε να μην αντιδρούν με τη μητρική φάση.

1.2.2 Ινώδη σύνθετα υλικά

Αυτό το είδος σύνθετων υλικών έχει να παρουσιάσει σπουδαία αποτελέσματα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2 οι ίνες μπορεί να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Για την δεύτερη κατηγορία το μέγεθος των ινών μπορεί να είναι υπερβολικά μικρό και ο προσανατολισμός τους μπορεί να ποικίλει. Οι ίνες χαρακτηρίζονται ως συνεχείς όταν το μήκος τους είναι πολύ μεγαλύτερο από το κρίσιμο μήκος ($l > l_c$) και ειδικότερα όταν $l > 15l_c$. Το κρίσιμο μήκος ίνας εξαρτάται από τη διάμετρο τους (d) τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή τους (σ_f) και την αντοχή δεσμού ίνας – μήτρας (ή της διατμητικής αντοχής της μήτρας τ_c :

$$l_c = \sigma_f \cdot d / 2\tau_c$$

Στα σύνθετα που είναι ενισχυμένα με ίνες το εφαρμοζόμενο φορτίο μεταφέρεται και κατανέμεται μεταξύ των ινών δια μέσου της μητρικής φάσης, η οποία συνήθως πρέπει να επιδέχεται μεγάλο βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης. Σημαντική ενίσχυση είναι δυνατή μόνο εάν ο δεσμός μήτρας-ίνας είναι δυνατός. Με όρους διαμέτρου οι ίνες ταξινομούνται ως βελόνες, ίνες, σύρματα. Επειδή η ενίσχυση διακόπτεται στα άκρα των ινών, η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης εξαρτάται από το μήκος της ίνας. Το μήκος των συνεχόμενων ινών υπερβαίνει σημαντικά αυτή τη κρίσιμη τιμή αν και οι κοντύτερες ίνες είναι ασυνεχείς. Η διάταξη των ινών είναι επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες των συνεχών και ευθυγραμμισμένων σύνθετων είναι εξαιρετικά ανισοτροπικές. Στην διεύθυνση της ευθυγράμμισης η ενίσχυση και η αντοχή είναι μέγιστες, ενώ κάθετα στην ευθυγράμμιση είναι στο κατώτατο σημείο.

Για τα ευθυγραμμισμένα σύνθετα υλικά κοντών ινών είναι εφικτές σημαντικές αντοχές και δυσκαμψίες στη διαμήκη διεύθυνση. Όσον αφορά τα σύνθετα με τυχαία προσανατολισμένες ίνες, οι ιδιότητές τους είναι ιστροπικές, παρόλο που υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης.

1.2.2.1 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (GLASS FIBERS)

Είναι από τους πλέον διαδεδομένους και φθηνούς τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου κ.α. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες φυσικές ιδιότητες φαίνονται στο Σχήμα 1.4 και οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα του Σχήματος 1.6 .

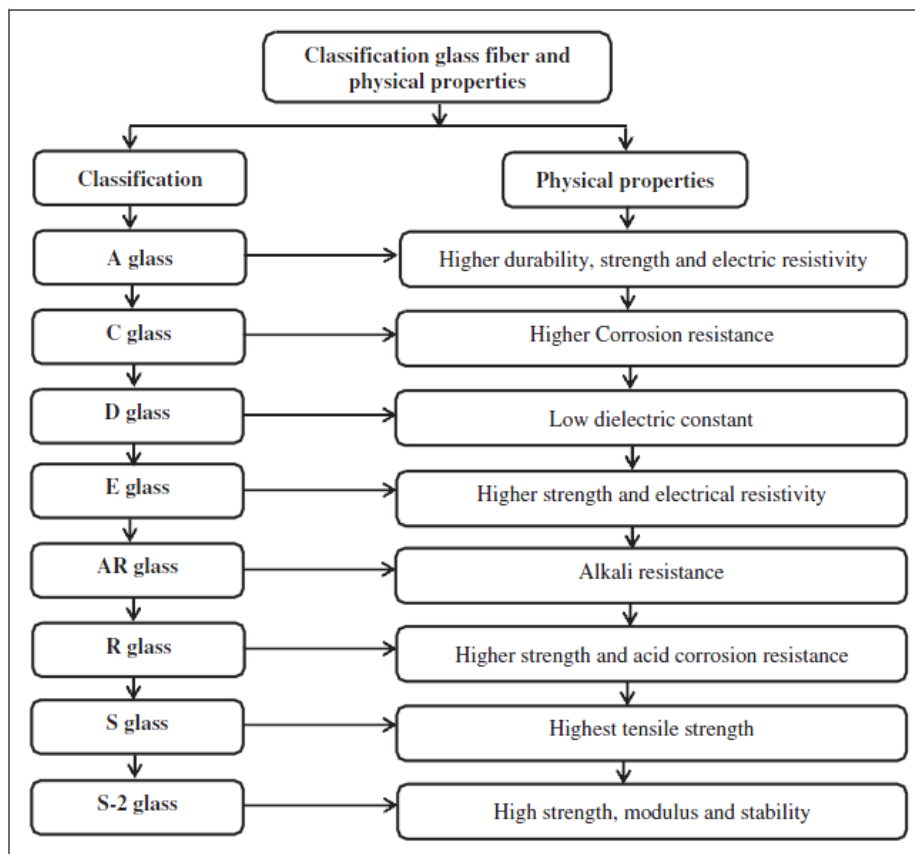
Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα είναι:

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

C-glass(C=corrosion): Παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, αλλά είναι και πολύ ακριβότερες.

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

Η χημική σύσταση των ινών γυαλιού απεικονίζεται στον πίνακα του Σχήματος 1.5.



Σχήμα 1.4: Ταξινόμηση των ινών γυαλιού και οι φυσικές τους ιδιότητες [5]

Type	(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	TiO ₂	B ₂ O ₃	(CaO)	(MgO)	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
E-glass	55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	–
C-glass	64.6	4.1	–	5.0	13.4	3.3	9.6	0.5	–
S-glass	65.0	25.0	–	–	–	10.0	–	–	–
A-glass	67.5	3.5	–	1.5	6.5	4.5	13.5	3.0	–
D-glass	74.0	–	–	22.5	–	–	1.5	2.0	–
R-glass	60.0	24.0	–	–	9.0	6.0	0.5	0.1	–
EGR-glass	61.0	13.0	–	–	22.0	3.0	–	0.5	–
Basalt	52.0	17.2	1.0	–	8.6	5.2	5.0	1.0	5.0

Σχήμα 1.5: Χημική σύσταση ινών γυαλιού ως ποσοστό βάρους επί τοις εκατό (wt%) [5]

Fiber	Density (g/cm ³)	Tensile strength GPa	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁷ /°C)	Poisson's ratio	Refractive index
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8	54	0.2	1.558
C-glass	2.52	3.310	68.9	4.8	63	–	1.533
S ₂ -glass	2.46	4.890	86.9	5.7	16	0.22	1.521
A-glass	2.44	3.310	68.9	4.8	73	–	1.538
D-glass	2.11–2.14	2.415	51.7	4.6	25	–	1.465
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8	33	–	1.546
EGR-glass	2.72	3.445	80.3	4.8	59	–	1.579
AR glass	2.70	3.241	73.1	4.4	65	–	1.562

Σχήμα 1.6: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ινών γυαλιού [5]

Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρό πυρίτιο. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στη μήτρα.

1.2.2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CARBON FIBERS)

Οι ίνες γραφίτη είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Γενικά χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ο βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης του βάρους. 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[6].

1.2.2.3 ΙΝΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ (POLYMER FIBERS)

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και Kevlar. Η αντοχή των νημάτων Nylon και πολυεστέρα δεν ξεπερνά τα 10 Pa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας πλησιάζει τα 1000 Pa. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους[6]:

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

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3), ενώ η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει την δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας. Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 %θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

1.2.2.4 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[6].

1.2.2.5 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 (A) και αλουμίνα (Al_2O_3), ενώ σπανιότερα συναντώνται και ίνες Si_3N_4 , BeO , B_4C και ZrO_2 . Το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτικό υλικό είτε με τη μορφή ινών είτε με τη μορφή φυλλιδίων. Οι ίνες SiC παρουσιάζουν υψηλές τιμές αντοχής και ανώτερες μηχανικές ιδιότητες από τα φυλλίδια[6].

1.2.2.6 ΤΡΙΧΙΤΕΣ (WHISKERS)

Οι τριχίτες είναι νηματικοί μονοκρυστάλλοι 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 μm , 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 ζώνεςσυγκέντρωσης τάσεων. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι τριχίτες είναι από αλουμίνα, γραφίτη, καρβίδιο του πυριτίου, βηρύλλιο και νιτρίδιο του πυριτίου. Η παραγωγή τριχιτών σε βιομηχανική κλίμακα είναι δύσκολη[6].

1.2.2.7 ΙΝΕΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Αρκετά ορυκτά που βρίσκονται σε ινώδη ή φυλλώδη μορφή, μπορούν να αποτελέσουν φθηνό ενισχυτικό υλικό, αλλά χαμηλών προδιαγραφών. Ευρύτερα χρησιμοποιούμενα τέτοια ορυκτά είναι ο αμίαντος και η μαρμαρυγία (mica). Οι ίνες αμιάντου αποτελούνται από 500 περίπου στοιχειώδη ινίδια, διαμέτρου ~ 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 αμίαντος λόγω του χαμηλού του κόστους χρησιμοποιείται ευρύτατα. Οι μαρμαρυγίες ανήκουν στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών, χαρακτηρίζονται από τέλει σχισμό και αποχωρίζονται εύκολα από το πέτρωμα με μορφή φυλλιδίων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως συστατικό ενίσχυσης του συνθέτου υλικού. Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει μέχρι 2500 MPa (τέλεια φυλλίδια), ενώ, λόγω ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι συνήθεις τιμές της αντοχής κυμαίνονται στην περιοχή 700-900 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας των μαρμαρυγιών είναι περίπου 220 GPa και η πυκνότητα τους 2.8 g/cm³[6].

1.2.3 Δομικά σύνθετα υλικά

Έχουν αναφερθεί δύο είδη δομικών σύνθετων: τα πολυστρωματικά (laminates) και οι πλάκες τύπου σάντουιτς. Οι ιδιότητες των πολυστρωματικών (laminates) σύνθετων υλικών είναι σχεδόν ιστροπικές σε ένα δισδιάστατο επίπεδο. Αυτό γίνεται δυνατό με πολλαπλά φύλλα ενός εξαιρετικά ανισότροπου σύνθετου

υλικού τα οποία επικολλούνται το ένα πάνω στο άλλο έτσι ώστε η διεύθυνση υψηλής αντοχής να ποικίλει με κάθε διαδοχική στρώση. Μερικά υλικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την διαστρωμάτωση μπορεί να είναι το βαμβάκι, το χαρτί ή οι πλεγμένες ίνες ή τα πλεγμένα υαλονήματα εμβαπτισμένα σε πλαστική μήτρα.

Οι πλάκες τύπου σάντουιτς συνίσταται από δυο ισχυρές και άκαμπτες όψεις οι οποίες διαχωρίζονται από κάποιο πυρήνα υλικού κατασκευής. Αυτές οι δομές συνδυάζουν σχετικά υψηλές αντοχές και ακαμψίες με χαμηλές πυκνότητες.

1.3 Τύποι μήτρας

Ο ρόλος της μήτρας εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς. Κατά πρώτο λόγο η μήτρα συνδέει τις ίνες και επενεργεί σαν το μέσο μέσα από το οποίο μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση μεταφέρεται και διανέμεται στις ίνες. Ο δεύτερος ρόλος της μήτρας είναι να προστατεύει τις διάφορες ίνες από επιφανειακή βλάβη ως αποτέλεσμα της μηχανικής εκτριβής ή χημικών αντιδράσεων με το περιβάλλον. Τέλος, η μήτρα διαχωρίζει τις ίνες και λόγω της σχετικής μαλακότητας και πλαστικότητάς της, εμποδίζει την διάδοση ψαθυρών ρωγμών από ίνα σε ίνα, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία. Δηλαδή η μήτρα παίζει το ρόλο του εμποδίου στη διάδοση της ρωγμής. Ακόμα και αν μερικές ίνες αστοχήσουν, η συνολική θράση του σύνθετου υλικού δε θα συμβεί μέχρι ένας μεγάλος αριθμός γειτονικών ινών οι οποίες έχουν ήδη αστοχήσει, να σχηματίσουν ένα σύνολο κρίσιμου μεγέθους. Για να ικανοποιεί της παραπάνω προϋποθέσεις η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξηςμεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού καθοριστικός παράγοντας είναι η καλή πρόσφυση ίνας- μήτρας, οι συγκολλητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους πρέπει να είναι υψηλές ώστε να ελαττώσουν την πιθανότητα διέγκυσης ινών.

Με βάση λοιπόν το υλικό που χρησιμοποιείται ως μήτρα έχουν την εξής κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών:

1. Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Σαν υλικό μήτρας μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα μέταλλα, αλλά προτιμώνται συνήθως μέταλλα με χαμηλή πυκνότητα όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο, το νικέλιο ή και κράματα αυτών. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα τους είναι η αυξημένη ολκιμότητα, η βελτίωση ακαμψίας, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, η μειωμένη ευαισθησία στην παρουσία διαλυτών, αλλά και η διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του σύνθετου. Τα βασικότερα μειονεκτήματα αυτού του είδους υλικών είναι η δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, που συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα, η αυξημένη

πυκνότητά τους που οδηγεί σε αύξηση του βάρους της τελικής κατασκευής και τέλος ότι είναι αρκετά δύσκολη η παραγωγή αυτού του σύνθετου που οδηγεί σε αύξηση του κόστους κατασκευής.

2. Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας. Η μήτρα αυτή προέρχεται από θερμική επεξεργασία ανόργανων ενώσεων, π.χ. νιτρίδια, σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 1000 °C. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται η αυξημένη σκληρότητα, η διατήρηση της αντοχής τους ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, η μεγάλη αντοχή τους στη διάβρωση και τη χημική προσβολή. Τα μεγαλύτερα προβλήματα που παρουσιάζονται στη χρήση τους είναι η αστοχία της μήτρας σε μικρότερες παραμορφώσεις από αυτές που μπορεί να λάβει η ίνα και οι μεγάλες διαφορές του συντελεστή γραμμικής διαστολής μεταξύ μήτρας και ίνας, γεγονός που οδηγεί σε φτωχή συνάφεια μεταξύ τους.
3. Σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας. Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος σύνθετων υλικών λόγω μικρότερου κόστους παραγωγής και απλούστερου τρόπου κατασκευής σε σχέση με τα σύνθετα υλικά μεταλλικής και κεραμικής μήτρας. Αυτή η κατηγορία των υλικών έχει τις εξής υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής τους:
 - Θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες: τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, πολυμερίζονται αφού θερμανθούν και η διαδικασία αυτή είναι μη αντιστρεπτή. Δηλαδή, αν το πολυμερές επαναθερμανθεί μετά τον πρώτο κύκλο θέρμανσης, μαλακώνει, αλλά δε γίνεται ρευστό ώστε να μπορεί να επαναμορφοποιηθεί. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται συνήθως σε σύνθετα υλικά που το ζητούμενο είναι οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που έχουν ήδη σκληρύνει είναι τόσο σκληρά όσο το γυαλί. Οι μηχανικές ιδιότητες τους δεν εξαρτώνται πλέον από τη θερμοκρασία, γιατί η χωροταξική δικτύωση των δεσμών τους μπορεί να καταστραφεί πλέον μόνο από χημική αποικοδόμηση. Κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού, δημιουργούνται σταυροδεσμοί¹ μεταξύ των μακρομορίων (crosslinks), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τις προαναφερθείσες ιδιότητες των θερμοσκληρυνόμενων. Συνηθισμένα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι οι εποξικές ρητίνες (EP)(ήεποξυρητίνες, θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενη παράγραφο), οι ακόρεστοι πολυεστέρες (UP), τα πολυιμίδια (PI), οι φαινολοπλάστες (PF), και άλλα.
 - Θερμοπλαστικές πολυμερικές μήτρες: Τα θερμοπλαστικά υλικά έχουν χαμηλό κόστος και είναι εύκολο να επεξεργαστούν και να μορφοποιηθούν με κοινές μεθόδους. Σε αντίθεση με τα θερμοσκληρυνόμενα, με συνδυασμό υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης μαλακώνουν και ρευστοποιούνται με αποτέλεσμα να είναι δυνατόν να

¹Πρόκειται για δομές στις οποίες τα μακρομόρια συνδέονται διαμοριακά μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς.

επαναμορφοποιούνται πολλές φορές, είναι δηλαδή ανακυκλώσιμα. Αυτό οφείλεται στο ότι σε αυτού του είδους τα πολυμερή, οι αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς τύπου VanderWaals και δεν αναπτύσσονται σταυροδεσμοί. Πολύ γνωστά θερμοπλαστικά είναι το πολυβινιλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), ο πολυαμίδιο (NYLON) και άλλα.

- Ελαστομερικές πολυμερικές μήτρες: Τα ελαστομερή είναι μια ενδιάμεση κατάσταση σε σχέση με τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή. Η χαρακτηριστική τους ιδιότητα είναι ότι μπορούν να παραλαμβάνουν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις (300-700% του αρχικού τους μήκους), λόγω του χαμηλού αριθμού σταυροδεσμών, ενώ όταν παύσει να υφίσταται η φόρτιση επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση. Στην κατηγορία των ελαστομερών ανήκουν το φυσικό καουτσούκ (NR), το συνθετικό πολυισοπρένιο (IR) και άλλα [7].

Βασικός παράγοντας για την επιλογή κατάλληλης μήτρας είναι η θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήση του σύνθετου. Μια γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4.



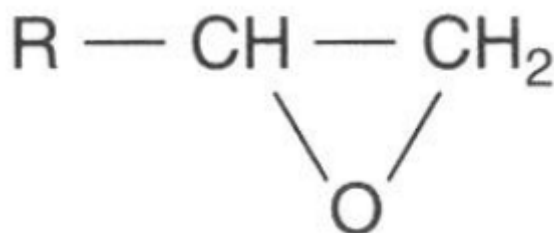
Σχήμα 1.7: Θερμοκρασιακά όρια χρήσης των υλικών [6]

Στη παρούσα πτυχιακή το υλικό που μελετήθηκε πειραματικά είχε ως μήτρα εποξική ρητίνη και γι'αυτό θα επικεντρωθούμε στην περιγραφή των εποξικών ρητινών.

1.4 Εποξυ-ρητίνες (epoxy resin)

Η εποξική ρητίνη είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο αποτελείται από αλυσίδες που φέρουν την ομάδα του εποξειδίου, Σχήμα 1.8. Γενικά, η εποξική ρητίνη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μόριο το οποίο περιέχει ένα τριμελή δακτύλιο, που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα άνθρακα. Ενώ η παρουσία αυτής της λειτουργικής ομάδας καθορίζει ένα άτομο ως εποξειδίο, η μοριακή βάση στην οποία προσκολλάτε η επόξυ-ομάδα μπορεί να διαφέρει ευρέως, προκύπτοντας έτσι πολλών ειδών εποξικές ρητίνες. Η εμπορική επιτυχία των εποξικών οφείλεται εν μέρει στη μεγάλη ποικιλία μοριακών δομών που μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας παρόμοια χημική μέθοδο. Σε συνδιασμό με τη συνετή επιλογή του σκληρυντή και τους κατάλληλους τροποποιητές, οι εποξικές ρητίνες μπορούν να είναι κατάλληλες για πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η βασική διαδικασία παραγωγής ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η διαφορά της μιας επόξυ-ρητίνης με την άλλη. Οι

εποξικές ρητίνες παράγονται από μόρια που περιέχουν έναν ακόρεστο δεσμό άνθρακα-άνθρακα. Υπάρχουν δύο διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για να μετατραπεί ο διπλός αυτός δεσμός σε οξιρένιο (ακόρεστος τριμελής δακτύλιος με ένα οξυγόνο και δύο άνθρακες): 1) Αφυδραλογόνωση ενός ενδιάμεσου αλογονουδρίνης και 2) απευθείας εποξειδωση υπεροξειδίου. Ενώ και οι δύο διαδικασίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εποξυ-ρητινών, η πρώτη μεθοδος είναι πιο διαδεδομένη και χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ποικιλία υλικών.



Σχήμα 1.8: Εποξική ομάδα

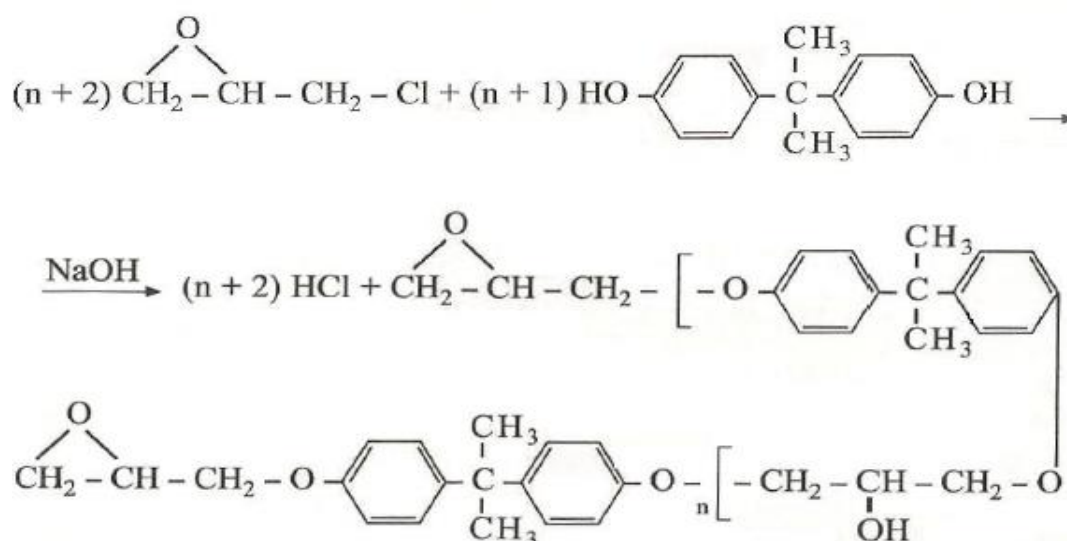
Οι εποξικές ρητίνες μπορεί να είναι στερεές ή ρευστές. Βασικό χαρακτηριστικό της αντίδρασης πολυμερισμού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται στο μίγμα της ρητίνης με τα διάφορα πρόσθετα. Με την έκλυση θερμότητας η αντίδραση πολυμερισμού χαρακτηρίζεται εξώθερμη. Οι στερεές εποξικές ρητίνες παρέχουν σκληρή και αμετάβλητη αντίσταση τριβής και πολύ καλή χημική αντίσταση. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των στερεών εποξειδικών ρητινών σε σχέση με τις υγρές ρητίνες είναι η εύκολη επεξεργασία τους, η μηχανική αντοχή, η υψηλή χημική αντίσταση και το άριστο κολλώδες. Ένας σημαντικός αριθμός εποξειδικών ρητινών είχε ως αποτέλεσμα το γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης και την ευρεία σε έκταση χρήση τους. Οι κυριότερες ιδιότητες των υγρών εποξειδικών ρητινών είναι οι παρακάτω [8]:

- 1) Χαμηλή υδροσκοπικότητα, καλή διαστατική σταθερότητα και ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών. Είναι υγρά με χαμηλό ιξώδες, όπως και τα μίγματά τους με πρόσθετα (πλαστικοποιητές, σκληρυντές), με αποτέλεσμα την εύκολη κατεργασία τους.
- 2) Η επεξεργασία των ρητινών είναι εύκολη και γρήγορη για θερμοκρασίες από 5 °C μέχρι 150 °C και εξαρτάται από την εκλογή του πρόσθετου.
- 3) Υψηλές μηχανικές ιδιότητες που μπορεί να οφείλονται στη μικρή συστολή τους, έτσι μειώνεται η παρουσία τάσεων.
- 4) Άριστη ηλεκτρική μόνωση.
- 5) Υψηλή δύναμη συγκόλλησης. (Στην σύγχρονη τεχνολογία πλαστικών είναι από τις μεγαλύτερες που έχουν παρατηρηθεί). Αυτή

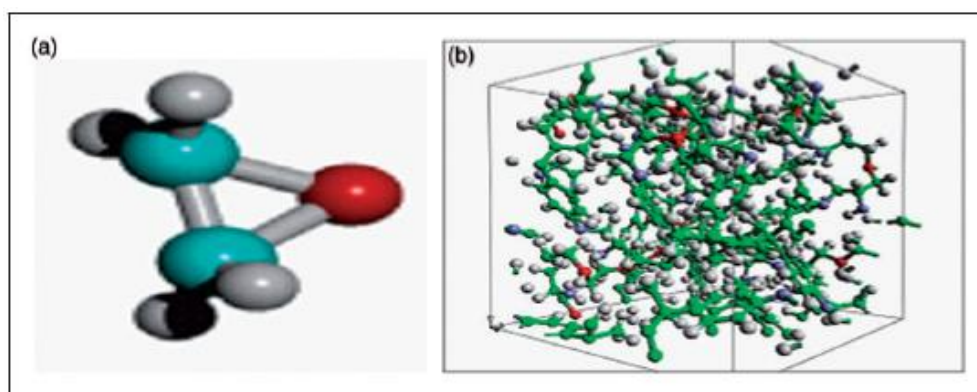
η ιδιότητα αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τις πιο πολλές εφαρμογές.

- 6) Ποικιλία εφαρμογών. Οι βασικές τους ιδιότητες μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής. (Ανάμειξη με κάποιο πρόσθετο της επιλογής μας, χρήση τροποποιητικών και συνθέσεων).
- 7) Καλή χημική αντίσταση που εξαρτάται από το πρόσθετο που χρησιμοποιείται. Συνολικά οι εποξικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα.
- 8) Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους. Αυτή η μικρή συστολή είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εποξικές ρητίνες.

Οι συνηθέστερες εποξικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης (με εξαίρεση μόνο των κυκλοαλιφατικών ρητινών) και διφαινόλης Α, όπου παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α (Σχήμα 1.9). Το προπολυμερές μπορεί να είναι ρευστό ή στερεό, αντιδρώντας όμως με κατάλληλο αντιδραστήριο, τον σκληρυντή (curing agent ή hardener), μετατρέπεται σε άκαμπτο στερεό λόγω του σχηματισμού σταυροδεσμών (crosslinks) ανάμεσα στις μακρομοριακές αλυσίδες. Οι στερεές εποξικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας την δομή των εποξειδικών ρητινών υπό την επίδραση σκληρυντή ή πλαστικοποιητή, με την βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπιών, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα, μέτριου μοριακού βάρους, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο από μόρια μικρού μοριακού βάρους.



Σχήμα 1.9: Αντίδραση συμπύκνωσης διφαινόλης Α με επιχλωρυδρίνη, προς σχηματισμό προπολυμερούς εποξικής ρητίνης [9].



Σχήμα 1.10: (α) Τρισδιάστατος δακτύλιος οξυεπιοξυ-ρητίνης και (β) και σταυροδεσμοί που προκύπτουν από σκληρυμένη εποξική ρητίνη [10]

Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογές, τον απαιτούμενο «χρόνο ζωής σε δοχείο» (potlife), τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Στην πράξη τα διάφορα συστήματα εποξικής ρητίνης – μέσω σκλήρυνσης τροποποιούνται συνήθως με διάφορα πρόσθετα, τα οποία μπορεί να είναι αδρανή ή δραστικά, δηλαδή να αντιδρούν με την εποξυ-ομάδα [8]. Πρόσθετα με ευρεία εφαρμογή είναι τα αραιωτικά και τα πληρωτικά υλικά. Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται μια λίστα από τις πιο κοινές εποξικές ρητίνες.

Chemical class	Form	Functionality(a)	Equivalent weight(b)	Viscosity at 25 °C (77 °F)	
				Pa · s	cP
Diglycidyl ether of bisphenol-A	Liquid	2	174–200	5–20	5,000–20,000
	Solid	2	>500	...	...
Diglycidyl ether of bisphenol-F	Liquid	2	165–190	2–7	2,000–7,000
Phenol novolac	Semisolid	2.2–3.6	170–210	varies	varies
Cresol novolac	Semisolid	2.7–5.4	200–245	varies	varies
Bisphenol-A novolac	Semisolid-solid	...	...	...	...
Dicyclopentadiene novolac	Solid	...	210–280	...	...
Triglycidyl ether of trisphenol-methane	Solid	3	150–170	...	...
Triglycidyl p-aminophenol	Liquid	3	95–115	0.55–5	550–5,000
Tetraglycidyl methylene dianiline	Liquid-semisolid	4	109–134	...	...
3,4 epoxycyclohexylmethyl- 3,4-epoxycyclohexane carboxylate	Liquid	2	131–143	0.25–0.45	250–450

(a) Number of reactive sites per molecule. (b) Weight of resin per unit epoxide.

Σχήμα 1.11: Εποξικές ρητίνες [11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Ιδιότητες Των Σύνθετων Πολυμερών

2.1 Μηχανικές και άλλες Ιδιότητες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συνάρτηση των επιμέρους υλικών που τα αποτελούν, δηλαδή του υλικού της μήτρας και τα υλικά ενίσχυσης, την γεωμετρία και τον προσανατολισμό της ενίσχυσης, την πρόσφυση μήτρας- ενίσχυσης, το ποσοστό συμμετοχής των δύο φάσεων και την τεχνολογία κατασκευής. Για την επιλογή του κατάλληλου υλικού πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρήση για την οποία προορίζεται. Εξετάζοντας λοιπόν τις ιδιότητες του υλικού μπορούμε να αποφανθούμε και για την καταλληλότητά του.

Μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού σώματος είναι εκείνες που προσδιορίζουν αριθμητικά την αντίσταση στη δράση εξωτερικών δυνάμεων, που προσπαθούν να το παραμορφώσουν, δηλαδή να αλλάξουν το σχήμα του και τις διαστάσεις του. Αποτέλεσμα της δράσης αυτών των εξωτερικών δυνάμεων είναι η ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων στα υλικά που ονομάζονται τάσεις.

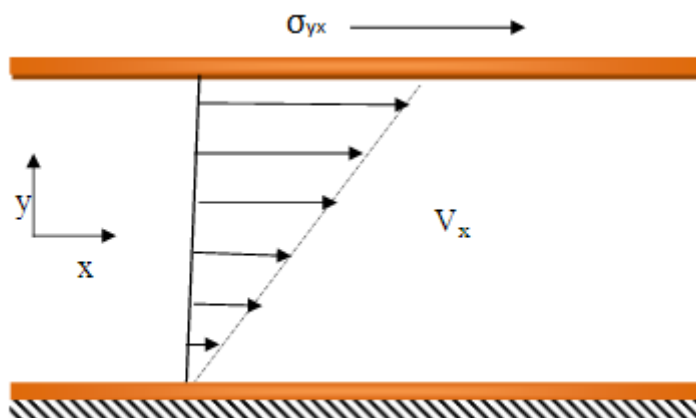
Στις φυσικές ιδιότητες ενός υλικού περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των υλικών που περιγράφουν τη συμπεριφορά του υλικού στις εξωτερικές επιδράσεις, που κατά κανόνα δεν αλλοιώνουν τη χημική τους σύσταση. Τέτοιες ιδιότητες είναι η πυκνότητα και το πορώδες, η απορροφητικότητα, διαπερατότητα και υγροσκοπικότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η θερμική διαστολή και συστολή.

2.1.1 Μηχανικές Ιδιότητες σύνθετου υλικού

2.1.1.1 Ιξωδοελαστικότητα

Η ιξωδοελαστικότητα αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα των πολυμερών. Μαζί με τη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης και το μοριακό βάρος αποτελούν, ίσως, τις σημαντικότερες ιδιότητες των πολυμερών. Γενικά, τα ιδανικά στερεά είναι υλικά που παραμορφώνονται ελαστικά. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, ανακτάται πλήρως όταν αφαιρεθούν οι τάσεις. Αντίθετα, τα ιδανικά ρευστά παραμορφώνονται αναντίστρεπτα. Η ενέργεια, δηλαδή, που απαιτείται για την παραμόρφωση, μεταπίπτει σε θερμική ενέργεια (viscousdissipation) και δεν ανακτάται όταν αφαιρεθούν οι τάσεις. Τα πολυμερή έχουν χαρακτηριστικά ιξωδών υγρών και ελαστικών στερεών, δηλαδή σε ασκούμενη μηχανική τάση παρουσιάζουν τόσο ιξώδη όσο και ελαστική παραμόρφωση. Μόνο μέρος της ενέργειας παραμόρφωσης αποθηκεύεται ως μηχανική ενέργεια, το δε υπόλοιπο χάνεται υπό μορφή θερμότητας λόγω ιξώδους ροής.

Η συμπεριφορά των πολυμερών είναι κάτι ενδιάμεσο μεταξύ της συμπεριφοράς των τέλειων ελαστικών (νόμος Hooke) και της συμπεριφοράς των νευτωνικών ιξωδών υγρών (νόμος Newton)[13]. Ο νόμος ιξώδους του Newton ορίζει το ιξώδες, η , ως τη σταθερά αναλογίας μεταξύ της τάσης σ_{yx} και της κλίσης της ταχύτητας V_x του υγρού κατά την κάθετη κατεύθυνση y .



Σχήμα 2.1: Προφίλ ταχύτητας κατά την κίνηση ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες, εκ των οποίων η πάνω κινείται, ενώ η κάτω παραμένει ακίνητη[12]

- **Νόμος Hooke:** $\sigma = G\gamma$, όπου $\sigma = \eta$ εφαρμοζόμενη τάση, $G =$ μέτρο διάτμησης
- **Νόμος Newton:** $\sigma = \eta \, d\gamma/dt$, όπου $\eta =$ ιξώδες, $\gamma =$ παραμόρφωση

Μια σχέση μεταξύ της τάσης και της παραμόρφωσης ενός γραμμικού ιξωδοελαστικού υλικού, θα μπορούσε να προκύψει με απλό συνδυασμό των δύο αυτών νόμων. Θεωρώντας ότι οι διατμητικές τάσεις είναι προσθετικές, μπορούμε να γράψουμε:

$$\sigma = G\gamma + \eta \, d\gamma/dt, \text{ όπου } \gamma = \text{διατμητική παραμόρφωση.}$$

Ο νόμος Hooke και τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

2.1.1.2 Ελαστικότητα

Ελαστικότητα είναι η ιδιότητα υλικών σωμάτων να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά από άσκηση εξωτερικής τάσης. Ελαστικά είναι τα σώματα στα οποία αποκαθίσταται το αρχικό τους σχήμα όταν μηδενίζεται η τάση που εφαρμόζεται σ' αυτά ενώ πλαστικά είναι τα σώματα που η παραμόρφωση που έχουν δεχτεί παραμένει μόνιμα. Η ελαστικότητα των σωμάτων χαρακτηρίζεται από ένα φυσικό μέγεθος, γνωστό ως μέτρο ελαστικότητας.

Όπως προαναφέρθηκε το αποτέλεσμα της δράσης των εξωτερικών δυνάμεων που προσπαθούν να παραμορφώσουν ένα υλικό οδηγεί στην ανάπτυξη εσωτερικών δυνάμεων, των τάσεων. Τάση σε ένα σημείο του υλικού είναι η

εσωτερική δύναμη που αναπτύσσεται στο σημείο ανά μονάδα επιφάνειας . Διακρίνονται σε :

- ορθές τάσεις, σ (δρουν κάθετα στην επιφάνεια) και είναι είτε εφελκυστικές είτε θλιπτικές
- διατμητικές τάσεις, τ (δρουν εφαπτομενικά στην επιφάνεια).

Αποτέλεσμα των τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα στοιχείο είναι η μεταβολή των διαστάσεών του , δηλαδή η ανάπτυξη παραμορφώσεων που διακρίνονται σε:

- ορθές παραμορφώσεις, ϵ
- διατμητικές παραμορφώσεις, γ

Όταν οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται σε ένα υλικό είναι μικρές και βρίσκονται εντός ορισμένων ορίων, τότε είναι ανάλογες με τις αντίστοιχες τάσεις (γραμμική ελαστικότητα). Για την περίπτωση των ορθών τάσεων (εφελκυσμός – θλίψη), η παραπάνω αναλογία εκφράζεται από το νόμο του Hooke,

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

όπου E το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο του Young), μετριέται σε Pa. Όσο μεγαλύτερο το E τόσο μικρότερη η παραμόρφωση για δεδομένο φορτίο [9].

Για την περίπτωση διατμητικών τάσεων, η παραπάνω αναλογία εκφράζεται ως:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

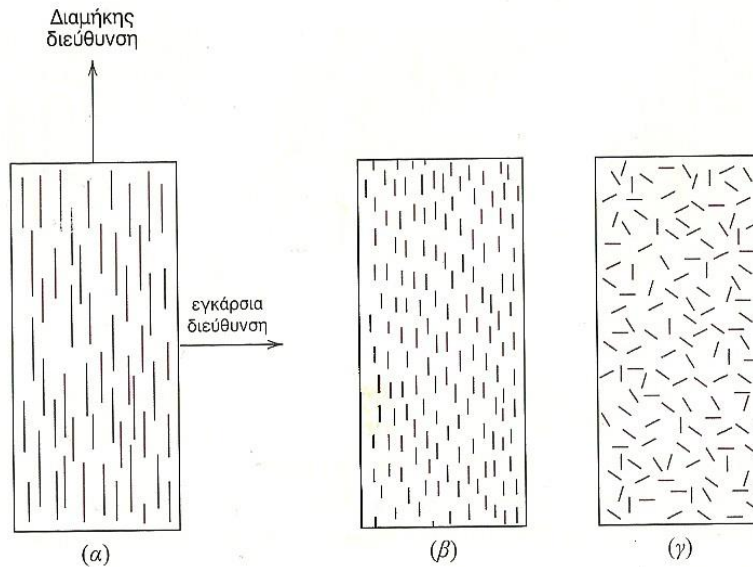
όπου G το μέτρο διάτμησης, σε Pa.

Τα G και E συνδέονται μεταξύ του μέσω του λόγου του Poisson, $\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Τα μέτρα E και G αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες των υλικών στη περίπτωση ομοιογενών (ίδιες ιδιότητες σε κάθε σημείο) και ισότροπων (ίδιες ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση) υλικών. Τα ανισότροπα υλικά χαρακτηρίζονται από περισσότερες από 2 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι δύο διευθύνσεις (διαμήκης και εγκάρσια) καθώς και διαφόρων προσανατολισμών και ειδών ίνες.



Σχήμα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση (α) συνεχών και ευθυγραμμισμένων, (β) ασυνεχών και ευθυγραμμισμένων και (γ) ασυνεχών και τυχαία προσανατολισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες [1 σ.649].

Για διαμήκη φόρτιση σε συνεχή και ευθυγραμμισμένα ινώδη σύνθετα υλικά το μέτρο ελαστικότητας του Young δίνεται από τον κανόνα των μειγμάτων (rule of mixtures) [1,σ.652]:

$$E_C = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$V_m + V_f = 1$$

Όπου:

E_C : μέτρο ελαστικότητας σύνθετου υλικού

E_f : μέτρο ελαστικότητας ινών

V_f : ογκομετρικό ποσοστό ινών

E_m : μέτρο ελαστικότητας μήτρας

V_m : ογκομετρικό ποσοστό μήτρας

Το μέτρο ελαστικότητας (E) κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών μπορεί να ελεγχθεί επιλέγοντας την κατάλληλη περιεκτικότητα της ενίσχυσης για την εφαρμογή.

Αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας για εγκάρσια φόρτιση (E_{CT}) σε συνεχή και ευθυγραμμισμένα ινώδη σύνθετα υλικά, δίνεται από τον τύπο [1,σ.655]:

$$E_{CT} = \frac{E_m \cdot E_f}{(1 - V_f)E_f + V_f E_m}$$

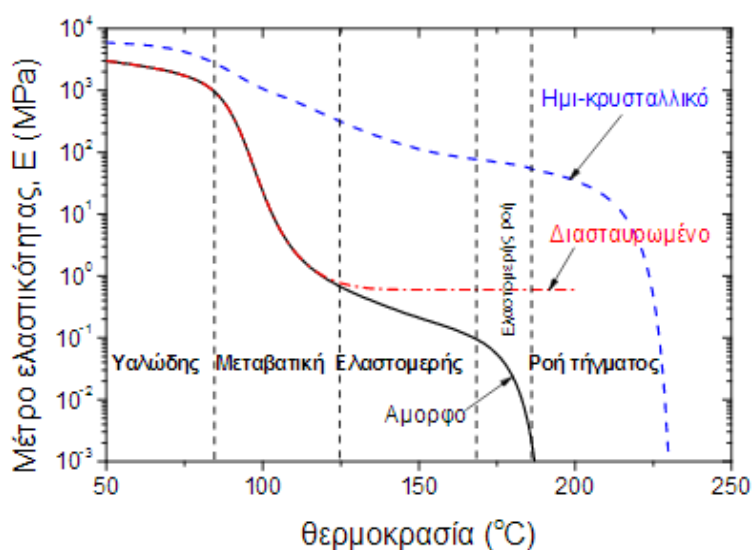
Ενώ για ασυνεχή και τυχαία προσανατολισμένα ινώδη σύνθετα υλικά το μέτρο ελαστικότητας E_{cd} μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έκφραση του κανόνα των μειγμάτων ως εξής:

$$E_{cd} = K \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

Το K είναι η παράμετρος αποτελεσματικότητας της ίνας ο οποίος εξαρτάται από το V_f και τον λόγο E_f / E_m . Φυσικά το μέγεθός του θα είναι μικρότερο τις μονάδας και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,6. Έτσι, για τυχαία προσανατολισμένη ενίσχυση ινών (όπως και με την ευθυγραμμισμένη) το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει σε κάποια αναλογία με τον ογκομετρικό λόγο των ινών.

Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας με τη θερμοκρασία

Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας, E διαφόρων τύπων πολυμερών με τη θερμοκρασία, φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Διακρίνονται 5 περιοχές. Στην πρώτη (υαλώδη) περιοχή, το υλικό είναι σκληρό και εύθρυπτο και αναφέρεται, συνήθως, σε πολυμερή με T_g πολύ μεγαλύτερο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (όπως π.χ. το πολυστερένιο και το PMMA), όπου το μέτρο ελαστικότητας έχει πολύ μεγάλες τιμές έως $3 \cdot 10^9$ Pa. Η δεύτερη περιοχή είναι ουσιαστικά η περιοχή της υαλώδους μετάβασης, το E πέφτει κατά περίπου 3 τάξεις μεγέθους. Η τρίτη είναι η περιοχή της ελαστομερούς κατάστασης, όπου το E εμφανίζει ένα πλατό και το υλικό συμπεριφέρεται ως ελαστομερές. Στη συνέχεια, αν το υλικό είναι διασταυρωμένο, η καμπύλη παραμένει σταθερή και δεν μεταβάλλεται. Αν είναι γραμμικό, ακολουθεί μια δεύτερη πτώση, όπου έχουμε ελαστομερή ροή μέχρι το σημείο τήξης του υλικού. Έπειτα από αυτό υπάρχει η ροή τήγματος. Στα ημι-κρυσταλλικά πολυμερή η μεταβολή από την υαλώδη στην ελαστομερή κατάσταση δεν συνοδεύεται από μεγάλη πτώση του E .

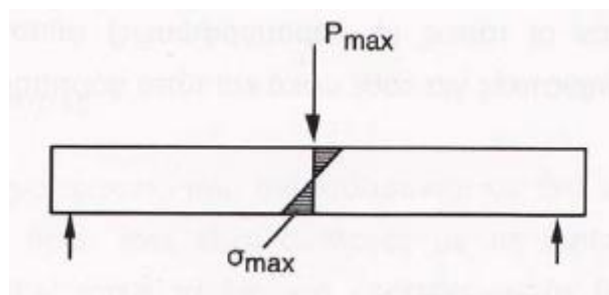


Σχήμα 2.3: Μεταβολή του μέτρου E με τη θερμοκρασία, για άμορφο γραμμικό πολυμερές, διασταυρωμένο και ημι-κρυσταλλικό.[12]

2.1.1.3 Αντοχή

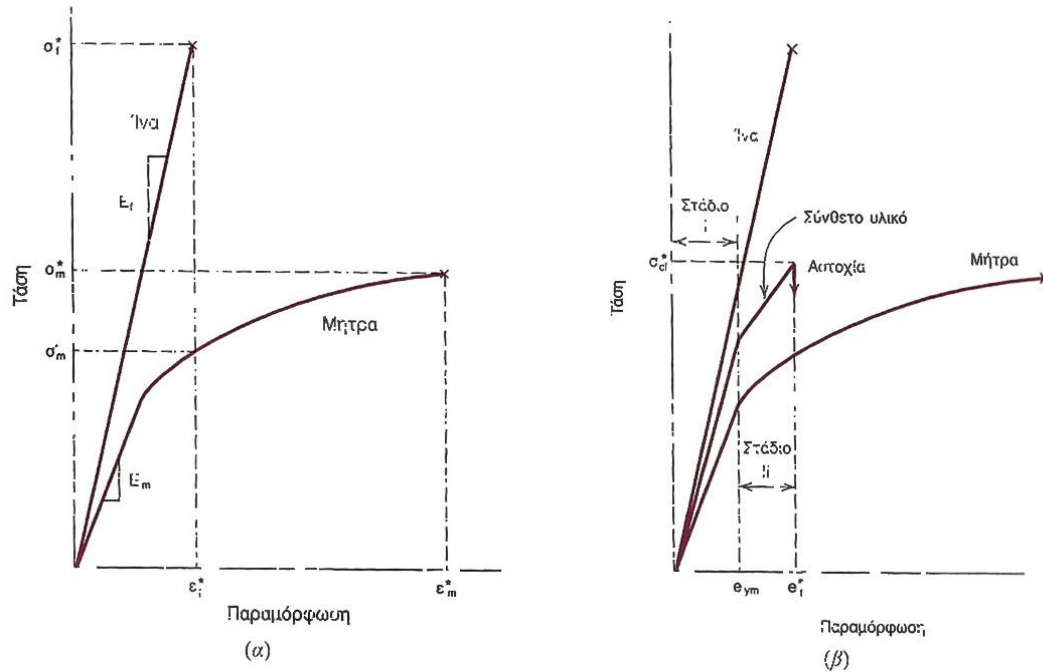
Αντοχή ενός υλικού είναι η ικανότητά του να μεταφέρει φορτία. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την γεωμετρία και τη φύση του υλικού και τον τρόπο φόρτισης. Το υλικό αστοχεί όταν οι τάσεις φθάσουν μερικές οριακές ή κρίσιμες τιμές, χαρακτηριστικές για κάθε υλικό και τύπο φόρτισης. Για περιπτώσεις εφελκυσμού, θλίψης και διάτμησης, η αντοχή ενός υλικού καθορίζεται συνήθως από τη μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσης- παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στις φορτίσεις αυτές.

Ως αντοχή σε κάμψη ορίζεται η μέγιστη εφελκυστική τάση που υπολογίζεται σε δοκίμιο υπό κάμψη, υποθέτοντας γραμμική κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής, κατά τη στιγμή της θραύσης του δοκιμίου, Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Αντοχή σε κάμψη

Στο Σχήμα 2.5α φαίνεται η συμπεριφορά τάσης παραμόρφωσης της ινώδους και μητρικής φάσης ενός συνεχούς και ευθυγραμμισμένου ινώδους σύνθετου υλικού. Σε αυτή τη θεώρηση η ίνα εκλαμβάνεται ως ολοκληρωτικά ψαθυρή και η μητρική φάση ως σχετικά όλκιμη. Επίσης σημειώνονται στο διάγραμμα οι εφελκυστικές αντοχές θραύσης για την ίνα και τη μήτρα, σ_f^* και σ_m^* κατ' ακολουθία και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις θραύσης, ε_f^* και ε_m^* . Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση $\varepsilon_f^* > \varepsilon_m^*$, η οποία είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση. Ένα ινώδες υλικό που αποτελείται από αυτού του είδους τα υλικά ίνας και μήτρας θα παρουσιάζει τη μονοαξονική απόκριση τάσης – παραμόρφωσης η οποία φαίνεται στο Σχήμα 2.5β.



Σχήμα 2.5: (α) Σχηματικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης για ψαθυρά ινώδη και όλκιμα υλικά μήτρας. Σημειώνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θραύσης και για τα δύο υλικά. (β) Σχηματική καμπύλη τάσης –παραμόρφωσης για ένα ευθυγραμμισμένο σύνθετο με ενίσχυση ίνας που υπόκειται σε μονοαξονική τάση κατά τη διεύθυνση της ευθυγράμμισης. Φαίνονται επίσης και οι καμπύλες για το υλικό ίνας και μήτρας του διαγράμματος (α).

Στην περιοχή του αρχικού Σταδίου I τόσο οι ίνες, όσο και η μήτρα παραμορφώνονται ελαστικά. Συνήθως αυτό το τμήμα της καμπύλης είναι γραμμικό. Τυπικά για ένα σύνθετο υλικό αυτού του είδους η μήτρα διαρρέει και παραμορφώνεται πλαστικά (στο ϵ_{ym}) ενώ οι ίνες συνεχίζουν να επιμηκύνονται ελαστικά εφόσον η εφελκυστική αντοχή των ινών είναι σημαντικά υψηλότερη από την τάση διαρροής της μήτρας. Αυτή η διαδικασία συνθέτει το Στάδιο II, όπως σημειώνεται στο διάγραμμα, το οποίο επιδεικνύει γραμμική συμπεριφορά μικρότερης όμως κλίσης σε σχέση με το Στάδιο I. επιπλέον στην μετάβαση από το Στάδιο I στο II το τμήμα του εφαρμοζόμενου φορτίου που φέρεται από τις ίνες αυξάνει. Η αρχή της αστοχίας του σύνθετου υλικού λαμβάνει χώρα όταν οι ίνες αρχίσουν να θραύονται, το οποίο αντιστοιχεί σε μια παραμόρφωση περίπου ϵ_f^* όπως σημειώνεται και στο Σχήμα 2.5β. Η αστοχία του σύνθετου δεν είναι καταστροφική για δύο λόγους. Πρώτον γιατί οι ίνες δεν θραύονται όλες την ίδια στιγμή και δεύτερον μετά την αστοχία της ίνας η μήτρα είναι ακόμα άθικτη εφόσον $\epsilon_f^* > \epsilon_m^*$. Έτσι, αυτές οι θραυσμένες ίνες, οι οποίες είναι κοντύτερες από τις αρχικές, είναι ακόμα εμβαπτισμένες εντός της άθικτης μήτρας και ουσιαστικά είναι ικανές να φέρουν ένα μειωμένο φορτίο καθώς η μήτρα συνεχίζει να παραμορφώνεται ελαστικά.

Αν το σύνθετο υλικό του παραδείγματός μας φορτίζεται στην διαμήκη διεύθυνση, η αντοχή συνήθως ορίζεται ως η μέγιστη τάση του διαγράμματος

τάσης –παραμόρφωσης, Σχήμα 2.5β. Όσον αφορά την εγκάρσια αντοχή σε εφελκυστικά φορτία η αντοχή είναι πάρα πολύ χαμηλή- μερικές φορές μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή της μήτρας. Έτσι στην πραγματικότητα η ενισχυτική δράση των ινών είναι αρνητική. Για παράδειγμα ένα σύνθετο υλικό Kevlar –εποξική ρητίνη έχει εφελκυστική διαμήκη αντοχή 1200MPa, ενώ εγκάρσια εφελκυστική αντοχή 20MPa. Επειδή οι αντοχές των συνεχών και μονοαξονικών ινωδών σύνθετων υλικών είναι άκρως ανισότροπες, αυτού του είδους τα υλικά σχεδιάζονται ώστε να φορτίζονται κατά μήκος της διαμήκου διεύθυνσης –υψηλής αντοχής.

Τα ασυνεχή ευθυγραμμισμένα ινώδη σύνθετα υλικά είναι μικρότερης εφελκυστικής αντοχής από τα αντίστοιχα συνεχή, όμως κερδίζουν έδαφος στην εμπορική αγορά, τεμαχισμένα υαλονήματα, αραμιδικές ίνες και ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Για ασυνεχή και ευθυγραμμισμένα ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία έχουν μια ομοιογενή κατανομή και στα οποία το μήκος ίνας είναι μεγαλύτερο από το κρίσιμο μήκος ίνας l_c , η διαμήκης αντοχή (σ_{cd}^*) δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cd}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_m' (1 - V_f)$$

Όπου το σ_f^* και το σ_m' αντιπροσωπεύουν, αντίστοιχα την αντοχή θραύσης της ίνας και την τάση στη μήτρα όταν το σύνθετο υλικό αστοχεί (Σχήμα 2.5α).

Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο από το κρίσιμο ($l < l_c$), τότε η διαμήκης αντοχή (σ_{cd}^*) δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{cd}^* = \frac{l\tau_c}{d} V_f + \sigma_m' (1 - V_f)$$

Όπου το d είναι η διάμετρος της ίνας και το τ_c είναι το μικρότερο είτε από την αντοχή του δεσμού ίνας-μήτρας ή από την διατμητική αντοχή της μήτρας.

Τέλος, πρέπει να πούμε ότι ιδιότητες όπως η ακαμψία, η σταθερότητα των διαστάσεων και η αντοχή ενός σύνθετου υλικού εξαρτώνται από την ακολουθία τοποθέτησης των στρώσεων. Καθώς ο αριθμός των στρωμάτων των προσανατολισμένων ινών αυξάνεται τόσο και η κατασκευή γίνεται πιο δυνατή. Συνοψίζοντας, η αντοχή σε θλίψη είναι συνήθως μικρότερη από εκείνη του εφελκυσμού. Επίσης, η διατμητική αντοχή σε μονοαξονικά δοκίμια είναι σχετικά χαμηλή καθώς τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει η δύναμη της ρητίνης. Βέβαια με κατάλληλο σχεδιασμό των ινών μέσα στην μήτρα η διατμητική αντοχή μπορεί να παραχθεί από την ενίσχυση.

Στον πίνακα του Σχήματος 2.6 φαίνονται συγκεντρωτικά οι μηχανικές ιδιότητες σύνθετου πολυμερούς εποξικής ρητίνης οπλισμένης με ίνες γυαλιού.

Type of glass fiber	Resin	Curing agent	V _f	Testing Standard	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Impact strength	Interlaminar shear strength (MPa)
Chopped strand	Epoxy (5.1 Vflyash)	Hardener	3,98	ASTM standard	-	-	-	-	-	0,0176(l/mm ²)	-
Woven (biaxial stitch)	epoxy		0,57	ASTM D 2355 (S)	-	-	-	-	-	-	18,2
Randomly oriented	epoxy (10 wt% SiC)		0,5	ASTM D 3029-76 (T)	179,4	6700	-	297,82	-	1,840(j)	18,99
Woven	epoxy (0,5wt% MWCNTs)		0,73	ASTM D 256 (I)	-	-	-	-	-	-	41,46
Unidirectional	epoxy		0,55	ASTM D 2344 (S)	784,98	-	0,032	-	-	-	-
Woven	epoxy (6 wt% joc)		0,6	ASTM D 3039 (T)	311	18610	3,8	-	-	-	-
Woven+(35 wt% shortborosilicate)	epoxy		-	ASTM D 3039 (T)	355	43700	1,65	-	-	-	-

Σχήμα 2.6: Μηχανικές ιδιότητες εποξικής ρητίνης ινοπλισμένης με γυαλί[5].

2.1.2 Φυσικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών

2.1.2.1 Πυκνότητα

Το φυσικό μέγεθος **πυκνότητα** αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ύλης και συμβολίζεται με το γράμμα ρ . Η πυκνότητα εκφράζει τη μάζα του υλικού που περιέχεται σε μία μονάδα όγκου. Ο τύπος της είναι: $\rho = \frac{m}{V}[\text{kg/m}^3]$.

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών, η πυκνότητα του υλικού εξαρτάται από τις επιμέρους πυκνότητες των υλικών της μήτρας και της ίνας. Ωστόσο μπορούμε να πούμε ότι γενικά, τα σύνθετα υλικά, έχουν χαμηλές πυκνότητες, αφού αυτή είναι και μια από τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών που τα καθιστούν δημοφιλή σε πολλές χρήσεις έναντι άλλων υλικών. Για παράδειγμα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι χρήσιμα διότι μπορούν να καλύψουν την ίδια επιφάνεια ζυγίζοντας πολύ λιγότερο, που σημαίνει εξοικονόμηση καυσίμου.

Στον πίνακα του Σχήματος 2.7 φαίνονται ενδεικτικά η πυκνότητα- ρ - το μέτρο ελαστικότητας -E- και η αντοχή σε εφελκυσμό- σ - διάφορων σύνθετων υλικών.

Material	Density - ρ - (10 ³ kg/m ³)	Tensile Modulus - E - (GPa)	Tensile Strength - σ - (GPa)	Specific Modulus - E/ρ -	Specific Strength - σ/ρ -
Short-fiber					
Glass-filled epoxy (35%)	1.9	25	0.3	13.2	0.16
Glass-filled polyester (35%)	2.0	15.7	0.13	7.85	0.065
Glass-filled nylon (35%)	1.6	14.5	0.2	8.95	0.12
Unidirectional					
S-glass epoxy (45%)	1.8	39.5	0.87	21.8	0.48
Carbon epoxy (61%)	1.6	142	1.73	89.3	1.08
Kevlar epoxy (53%)	1.35	63.6	1.1	47.1	0.81

Σχήμα 2.7: Πυκνότητα και άλλες ιδιότητες κάποιων σύνθετων υλικών[17]

Στον πίνακα του Σχήματος 2.8 φαίνονται αντίστοιχες ιδιότητες ρητινών χωρίς την ενίσχυση[11].

Είδος ρητίνης	Πυκνότητα -ρ- (gr/cm ³)	Μέτρο ελαστικότητας -E- (GPa)	Εφελκυστική αντοχή -σ- (MPa)
Εποξική	1.20 - 1.30	1.0 - 4.5	55 - 130
Πολυεστερική	1.10 - 1.46	2.1 - 4.1	35 - 104
Βινυλεστερική	1.12 - 1.32	3.0 - 3.6	73 - 81

Σχήμα 2.8: Πυκνότητα και άλλες ιδιότητες διάφορων ρητινών.

2.1.2.2 Θερμική αγωγιμότητα

Ως θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης που προσδιορίζει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Η Θερμική αγωγιμότητα μετριέται με τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ο οποίος διαφέρει από σώμα σε σώμα. Ως συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ, ενός ομογενούς και ισότροπου υλικού, ορίζεται η σταθερά αναλογίας λ στη σχέση:

$$\dot{q} = -S\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

Όπου, \dot{q} : ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κάθετα στην επιφάνεια S,
x: το πάχος του υλικού και θ: η θερμοκρασία του.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ (Wm⁻¹K⁻¹) εκφράζει τη θερμική ισχύ που διέρχεται μέσα από τις απέναντι πλευρές κύβου από ομοιογενές και ισότροπο υλικό ακμής 1 m, όταν η διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ των επιφανειών αυτών διατηρείται σταθερή και ίση με 1K. Ο συντελεστής λ αποτελεί φυσική ιδιότητα κάθε υλικού και η τιμή του κατ' αρχήν προσδιορίζεται πειραματικά.

Την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ ενός υλικού επηρεάζουν η φύση του υλικού, η δομή του, η θερμοκρασία, ή υγρασία και η πίεση. Για ινώδη σώματα, η θερμική αγωγιμότητα λαμβάνει υψηλότερες τιμές για θερμική αγωγή κατά μήκος των ινών και μικρότερες κάθετα σ' αυτές. Όπως ισχύει για όλες τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών έτσι και η θερμική αγωγιμότητα του υλικού είναι σύνθεση των ιδιοτήτων των επιμέρους υλικών και των συνθηκών παραγωγής του.

2.1.2.3 Θερμική διαστολή

Η θερμική διαστολή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνονται οι διαστάσεις ενός σώματος καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του. Το αντίθετο φαινόμενο, κατά το οποίο ένα σώμα μικραίνει, όταν η θερμοκρασία του μειώνεται ονομάζεται θερμική συστολή. Θερμική διαστολή χαρακτηρίζεται ως γραμμική, επιφανειακή ή κυβική (διαστολή όγκου), ανάλογα με το αν μας ενδιαφέρει η μια, οι δύο ή και οι τρεις διαστάσεις του διαστελλόμενου σώματος.

Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής, α , ορίζεται από την σχέση: $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$ [K^{-1} ή $^{\circ}C^{-1}$], όπου: Δl τελικό μείον αρχικό μήκος, l_0 το αρχικό μήκος και ΔT η θερμοκρασιακή μεταβολή.

Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασιακή περιοχή, ενώ για ορισμένα (ανισότροπα) υλικά εξαρτάται και από την κατεύθυνση.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής, α , της εποξικής ρητίνης ενισχυμένης με ίνες γυαλιού είναι $36 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ και εποξικής ρητίνης, ρητινών χύτευσης και σύνθετων (Epoxy, castresins & compounds, unfilled) είναι $45 - 65 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

2.1.2.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductance) εκφράζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από κάποιο αντικείμενο. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δείχνει την απόκριση του υλικού εάν εφαρμοστεί σε αυτό διαφορά δυναμικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του υλικού τόσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα θα ρεύσει εντός του υλικού. Ανάλογα λοιπόν με την τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας, ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως αγωγός, μονωτής ή ημιαγωγός. Μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας σύμφωνα με το Διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το Σήμενς (Siemens), διεθνές σύμβολο S. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δίνεται αριθμητικά εάν διαιρέσουμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει ένα αντικείμενο (σε amperes) προς την διαφορά δυναμικού/τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του (σε volts). Πρόκειται δηλαδή για ένα μέγεθος αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης.

Η ειδική αγωγιμότητα (electrical conductivity) είναι μέτρο της ευκολίας ή δυσκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα δια μέσω κάποιου υλικού ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του. Συμβολίζεται συνήθως με σ . Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αγωγιμότητας είναι το Siemens ανά μέτρο ($S \cdot m^{-1}$).

Αγωγός είναι κάθε υλικό το οποίο αφήνει τα ηλεκτρικά φορτία να περνούν ελεύθερα από μέσα του.

Μονωτής (ή διηλεκτρικό) είναι κάθε υλικό το οποίο δεν επιτρέπει την ελεύθερη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από το σώμα του. Τέλειοι μονωτές που να απαγορεύουν εντελώς τη διέλευση του ηλεκτρικού φορτίου από μέσα τους δεν υπάρχουν, αλλά μερικά υλικά τις περισσότερες φορές συμπεριφέρονται σαν τέλειοι μονωτές. Μερικοί μονωτές είναι τα πλαστικά και το γυαλί.

Ημιαγωγός είναι κάθε υλικό που επιτρέπει να περνά το ηλεκτρικό φορτίο από μέσα του με κάποιες προϋποθέσεις, όπως αύξηση της θερμοκρασίας ή πρόσπτωση φωτός.

Η ικανότητα των πολυμερών να δρουν σαν ηλεκτρικά μονωτικά υλικά είναι η βάση για τις εφαρμογές τους στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές περιοχές [17].

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, φυσικά, όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα πολυμερή είναι απαραίτητη. Στα πολυμερή σύνθετα υλικά που περιέχουν ειδικούς αγωγίμους πληρωτές, όπως μεταλλική σκόνη ή μεταλλικές ίνες, αιθάλη και ίνες άνθρακα μπορεί να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος ηλεκτρικής αγωγιμότητας, εξαρτώμενο κυρίως από την συγκέντρωση και τον τύπο του αγωγίμου πληρωτή. Σε πολλές εφαρμογές χρειάζονται ομογενή αγωγή σύνθετα υλικά. Για ειδικές απαιτήσεις σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα, έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον υλικά με διαφορετικές λειτουργικές ιδιότητες στην δομή τους. Μια προσέγγιση σε αυτό το ζήτημα είναι η ανάπτυξη ανομοιογενών σύνθετων υλικών, που είναι γνωστά σαν functionally graded materials (FGMs), στα οποία η συγκέντρωση του πληρωτή αλλάζει συνεχώς κατά μήκος μιας κατεύθυνσης. Τα FGMs έχουν πρακτικό ενδιαφέρον επειδή ένα μεγάλο εύρος από φυσικές και/ή χημικές ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν σε ένα δεδομένο υλικό, ενώ απαιτούνται μικρότερες συγκεντρώσεις των πληρωτών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των ισοτροπικών δομών. Υψηλές συγκεντρώσεις του πληρωτή αυξάνουν το κόστος αφού τα υλικά των πληρωτών είναι γενικά ακριβότερα από τα απλά πολυμερή και η επεξεργασία μπορεί να γίνει πιο δύσκολη εξαιτίας της σημαντικής αύξησης στο φαινόμενο ιξώδες [17].

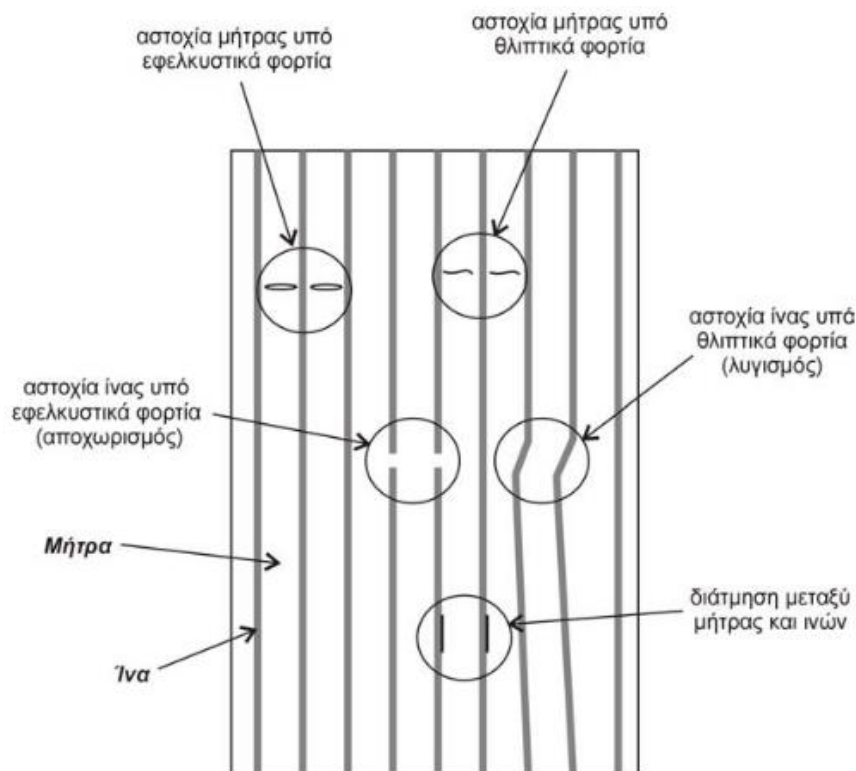
Η εποξική ρητίνη, η οποία αποτελεί και την μήτρα του σύνθετου υλικού που παρασκευάσαμε, είναι εξαιρετικός ηλεκτρικός μονωτής[8].

2.2 Μελέτη αστοχίας σύνθετων υλικών

Ενώ τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται μπορεί να υποστούν ζημιές από μεγάλο αριθμό φυσικών ή ανθρωπογενών αιτιών. Οι πιο σημαντικές βλάβες προκαλούνται από μηχανική πρόσκρουση και μπορεί να μην είναι εμφανείς εξωτερικά. Οι τοπικές αστοχίες αναφέρονται ως «βλάβη» και η ανάπτυξή τους με την αύξηση του φορτίου ή την παρέλευση του χρόνου ως «συσσώρευση βλάβης» [18].

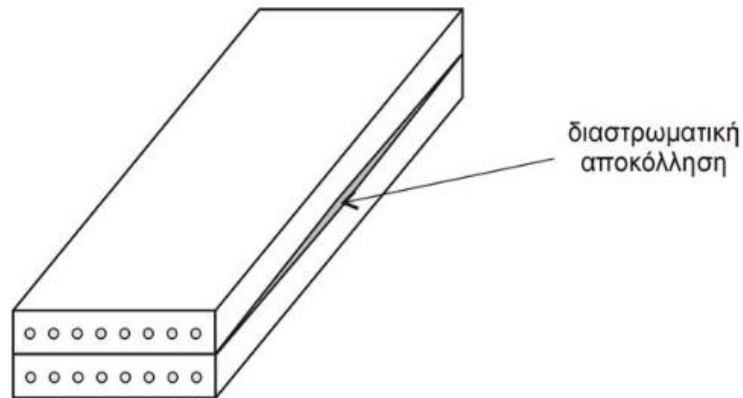
Οι κύριοι μηχανισμοί αστοχίας, σε μικρή κλίμακα, στα ινώδη σύνθετα είναι, Σχήμα 2.9:

- Αστοχία της μήτρας υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία
- Αστοχία των ινών υπό εφελκυστικά φορτία (αποχωρισμός ινών) και θλιπτικά φορτία (λυγισμός ινών)
- Διάτμηση μεταξύ μήτρας και ινών



Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση των μηχανισμών αστοχίας σε μια ινώδη στρώση[18].

Στο επίπεδο πολύστρωματικής πλάκας η αποκόλληση μεταξύ των στρώσεων (διαστρωματική αποκόλληση) είναι η πιο συχνά παρατηρούμενη αστοχία (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10: Σχηματική αναπαράσταση της διαστρωματικής αποκόλλησης[18].

Υπάρχει μεγάλη δυσκολία στη μοντελοποίηση των μηχανισμών αστοχίας στα σύνθετα υλικά, λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν. Ενώ έχουν αναπτυχθεί διάφορα κριτήρια αστοχίας, τα κριτήρια Hashin εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων. Παρόλα αυτά δε θεωρείται σκόπιμο να αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

2.2.1 Κατασκευαστικές βλάβες

Κατασκευαστικά ελαττώματα σύνθετου[19]:

- Αποκόλληση
- Περιοχές φτωχές σε ρητίνη
- Περιοχές πλούσιες σε ρητίνη
- Κυψελίδες, φουσαλίδες αέρα
- Ρυτιδώσεις
- Κενά
- Θερμική αποσύνθεση

Οι κατασκευαστικές βλάβες περιλαμβάνουν ανωμαλίες όπως είναι το πορώδες, οι μικρορρωγμές και αποκολλήσεις που είναι αποτέλεσμα ασυμφωνιών κατά την παραγωγή. Επίσης στις κατασκευαστικές βλάβες περιλαμβάνονται κοψίματα ακμών από ατύχημα, επιφανειακές ραβδώσεις και γρατζουνιές, κατεστραμμένους συνδέσμους, τρύπες και βλάβες από κρούση.

Μπορεί να προκληθεί βλάβη σε διάφορες κλίμακες στο σύνθετο υλικό, που μπορεί να κυμαίνονται από ζημιά στην μήτρα και την ίνα μέχρι σε σπασμένα στοιχεία και αστοχία των προσαρτημάτων που έχουν συνδεθεί ή βιδωθεί. Η έκταση της βλάβης ελέγχει την διάρκεια ζωής του υλικού, την ικανότητά του να φέρει φορτία και είναι κρίσιμη για την ανοχή του.

Σπάσιμο ινών

Το σπάσιμο των ινών είναι πολύ κρίσιμο διότι οι κατασκευές αυτές είναι σχεδιασμένες ώστε οι ίνες να είναι το πρωτεύον υλικό (οι ίνες φέρουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου). Ευτυχώς, η αστοχία της ίνας περιορίζεται σε

μια ζώνη κοντά στο σημείο κρούσης και περιορίζεται από το μέγεθος του αντικειμένου κρούσης και την ενέργεια που φέρει.

Ατέλειες της μήτρας

Ατέλειες στη μήτρα συνήθως προκύπτουν στην διεπιφάνεια ίνας- μήτρας ή στον παράλληλο της μήτρας με τις ίνες. Αυτές οι ατέλειες μπορούν να υποβαθμίσουν ελαφρώς τις ιδιότητες του υλικού, αλλά είναι σπάνια κρίσιμα για την δομή,, εκτός κι αν η υποβάθμιση της μήτρας είναι ευρεία. Η συσσώρευση ρωγμών στη μήτρα μπορεί να προκαλέσει την υποβάθμιση των ιδιοτήτων που εξαρτώνται από τη μήτρα. Σε σύνθετα που είναι σχεδιασμένα να φέρουν τα φορτία με τις ίνες τους, παρατηρείται μόνο μια μικρή μείωση των ιδιοτήτων τους όταν η μήτρα είναι σοβαρά κατεστραμμένη. Οι ρωγμές ή μικρορρωγμές της μήτρας μπορούν να υποβαθμίσουν σημαντικά τις ιδιότητες που εξαρτώνται από τη ρητίνη ή την διεπιφάνεια ρητίνης- ίνας, όπως η διαστρωματική διάτμηση και η δύναμη συμπίεσης. Η μικρορρωγματώσεις μπορεί να έχουν πολύ αρνητικά αποτελέσματα στις ιδιότητες των ρητινών υψηλής θερμοκρασίας. Οι ατέλειες της μήτρας μπορούν να οδηγήσουν σε αποφλοίωση, που είναι ο πιο κρίσιμος τύπος βλάβης.

Αποφλοίωση και αποκόλληση (delaminate&debond)

Οι αποφλοιώσεις σχηματίζονται στην διεπιφάνεια μεταξύ των στρωμάτων. Οι αποφλοιώσεις μπορεί να σχηματιστούν από ρωγμές της μήτρας που αναπτύσσονται στο ενδιάμεσο στρώμα ή από την επίπτωση χαμηλής ενέργειας. Debonds μπορούν επίσης να σχηματιστούν στην παραγωγή λόγω μη συγκόλλησης κατά μήκος της γραμμής πρόσφυσης μεταξύ δύο στοιχείων και να ξεκινήσει η αποκόλληση σε γειτονικές στρώσεις. Κάτω από συνθήκες, αποκολλήσεις και αποδεσμεύσεις μπορούν να αναπτυχθούν όταν το υλικό φορτίζεται κατ' επανάληψη και να προκληθεί καταστροφική αστοχία όταν το πολυστρωματικό μέσο δέχεται φορτία συμπίεσης. Η κρισιμότητα των αποκολλήσεων και των αποδεσμεύσεων εξαρτάται από:

- Τις διαστάσεις
- Τον αριθμό αποκολλήσεων σε συγκεκριμένη θέση
- Την θέση – το πάχος του στρώματος, τη δομή, την εγγύτητα σε ελεύθερες άκρες, τη συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή, γεωμετρικές ασυνέχειες, κλπ.
- Τα φορτία- η συμπεριφορά των αποκολλήσεων και αποδεσμεύσεων εξαρτάται από τον τύπο φόρτισης. Έχουν μικρή επίδραση σε στρώσεις με εφελκυστική φόρτιση. Υπό συμπίεση ή σε διατμητική φόρτιση, τα υποστρώματα που γειτνιάζουν με στοιχεία που έχουν αποκολληθεί ή και αποδεσμευτεί, μπορούν να λυγίσουν και να προκαλέσουν μηχανισμούς αναδιανομής των τάσεων, το οποίο οδηγεί σε δομικές αστοχίες.

Συνδυασμός βλαβών

Γενικά, οι κρούσεις επιφέρουν συνδυασμό βλαβών. Κρούσης μεγάλης ενέργειας, από μεγάλα αντικείμενα (π.χ. πτερύγια τουρμπίνας) μπορούν να οδηγήσουν σε σπασμένα στοιχεία και προσαρτήματα που έχουν αστοχήσει. Η ζημιά που προκύπτει μπορεί να περιλαμβάνει σημαντική αστοχία των ινών, σπάσιμο της μήτρας, αποκόλληση, σπάσιμο των συνδέσμων και αποδέσμευση κάποιων στοιχείων.

Ελαττωματικές τρύπες συνδέσμων

Ακατάλληλη διάνοιξη τρυπών, πρόχειρη εγκατάσταση των συνδέσμων ή απώλεια τους, μπορούν να προκύψουν κατά την κατασκευή. Κατά τη χρήση του υλικού, λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης, μπορεί να προκύψει επιμήκυνση των τρυπών.

2.2.2 Βλάβες κατά την λειτουργία

Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται[19]:

- Υποβάθμιση του περιβάλλοντος
- Βλάβη λόγω κρούσης
- Κόπωση
- Σπασίματα λόγω σημειακής υπερφόρτωσης
- Αποδεσμεύσεις (debonding)
- Αποκολλήσεις (delamination)
- Σπάσιμο των ινών
- Διάβρωση

Πολλές κυψελώδης κατασκευές έχουν λεπτά εξωτερικά φύλλα, όπου έχουν διαπιστωθεί προβλήματα ανθεκτικότητας, τα οποία μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες: μικρή αντίσταση σε κρούση, εισροή υγρών και διάβρωση. Αυτές οι κατασκευές έχουν επαρκή ακαμψία και αντοχή, αλλά χαμηλή αντίσταση σε περιβάλλοντα εργασίας, όπου σέρνονται πάνω τους πράγματα, εργαλεία πέφτουν και το προσωπικό που εργάζεται δεν είναι ενήμερο για την ευθραυστότητα των sandwich. Συνήθως αυτές οι φθορές είναι εύκολο να εντοπιστούν με οπτική επαφή, αλλά πολλές φορές παραβλέπονται ώστε οι εργαζόμενοι να τελειώσουν πιο γρήγορα την εργασία τους. Αυτό οδηγεί σε εισροή υγρών στον πυρήνα του υλικού.

2.3 Μη καταστροφικές μέθοδοι ελέγχου

Είναι πολύ σημαντική η γνώση της αναπτυσσόμενης βλάβης που δημιουργείται στα σύνθετα υλικά, καθώς όπως είπαμε οι μηχανισμοί αστοχίας τους είναι πολύπλοκοι και συχνά η υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους δεν γίνεται αντιληπτή. Η συνεχής παρακολούθηση της βλάβης συνεισφέρει στην ασφάλεια και την αποδοτικότητα του υλικού ή και της κατασκευή γενικότερα. Για να εξυπηρετηθεί αυτή η ανάγκη έχουν αναπτυχθεί διάφορες μη

καταστροφικές μέθοδοι ανίχνευσης της δημιουργούμενης βλάβης. Οι κύριες από αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

2.3.1 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος είναι ο κύριος τρόπος επιθεώρησης όταν το σύνθετο είναι σε λειτουργία. Οι περισσότεροι τύποι βλάβης, όπως καψίματα, λεκέδες, διεισδύσεις, τριβές ή σπασίματα στην επιφάνεια του σύνθετου, είναι ορατοί. Όταν ανιχνευτεί η βλάβη, η περιοχή που έχει επηρεαστεί πρέπει να εξεταστεί πιο προσεκτικά με φακούς, καθρέφτες, μεγεθυντικούς φακούς και μμποροσκόπια². Αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιούνται για να μεγεθύνουν ελαττώματα που αλλιώς δεν είναι εύκολο να δεις και επιτρέπουν οπτική έλεγχο σε σημεία που δεν είναι προσβάσιμα. Ο οπτικός έλεγχος δε μπορεί να εντοπίσει εσωτερικές βλάβες όπως οι αποκολλήσεις και οι αποδεσμεύσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση πιο εξεζητημένων τεχνικών.

2.3.2 Τεχνική ηχούς πρόσκρουσης (Audible Sonic Testing-Coin Tapping)

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί συχνότητες του φάσματος 10-20 Hz. Η χρήση της μεθόδου αυτής από έμπειρο προσωπικό μπορεί να δώσει πολύ ακριβή αποτελέσματα. Η τεχνική αυτή είναι η πιο διαδεδομένη στον εντοπισμό αποκολλήσεων ή και αποδεσμεύσεων. Κατά τη μέθοδο αυτή προκαλείται κρούση στην υπο εξέταση περιοχή, με τη χρήση ενός στερεού κυκλικού δίσκου ή με μια συσκευή που μοιάζει με ελαφρύ σφυράκι και ακούγεται η ανταπόκριση που έχει το σφυρί στην κατασκευή. Οι κρούσεις πρέπει να είναι αλληπαλλήλες και η δοκιμή να γίνεται σε ήσυχο μέρος. Από την διαφορά στον ήχο μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την κατάσταση του υλικού. Η τεχνική αυτή δεν είναι αξιόπιστη για κατασκευές με πάνω από τέσσερα φύλλα.

2.3.3 Αυτοματοποιημένη δοκιμή κτύπων (Automated Tap Test)

Η τεχνική αυτή είναι παρόμοια με την προηγούμενη που γίνεται με το χέρι. Η μόνη διαφορά είναι ότι εδώ χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα αντί για το σφυράκι, η οποία παράγει πολλαπλές κρούσεις ανά σημείο. Η άκρη του κρουστήρα έχει έναν μετατροπέα, ο οποίος καταγράφει τη δύναμη έναντι του χρόνου. Το μέγεθος της δύναμης εξαρτάται από τον κρουστήρα, την ενέργεια κρούσης και τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής.

2.3.4 Μέθοδοι ελέγχου με υπερήχους (Ultra sonic testing methods)

Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη στον εντοπισμό εσωτερικών προβλημάτων που δε μπορούν να ανιχνευθούν με τις προηγούμενες μεθόδους. Υπάρχουν πολλές τεχνικές υπερήχων, που η κάθε μια από αυτές χρησιμοποιεί συχνότητες πάνω από το ακουστικό φάσμα. Ένα ηχητικό κύμα υψηλής συχνότητας (συνήθως μερικά MHz) εισάγεται στο κομμάτι ή υπό κάποια προκαθορισμένη γωνία στην επιφάνεια του κομματιού που εξετάζεται.

²Μποροσκόπιο (borescope): Είναι όργανο που επιτρέπει την εξέταση μιας κατασκευής μέσω μιας μικρής τρύπας.

Ίσως να χρειαστεί να δοκιμαστούν διάφορες διευθύνσεις για να εντοπιστεί η ροή. Το εισερχόμενο κύμα καταγράφεται καθώς ακολουθεί την πορεία του στο μέσο για τυχόν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Τα ηχητικά κύματα έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα κύματα φωτός, όταν το ηχητικό κύμα συναντήσει ένα διακεκομμένο αντικείμενο, το κύμα ή η ενέργειά του είτε απορροφώνται είτε ανακλώνται πίσω στην επιφάνεια. Τα αποτελέσματα αυτά καταγράφονται με τη βοήθεια μετατροπέα και συγκρίνονται με τις μετρήσεις περιοχής που είναι γνωστό ότι είναι υγιής. Για να διευκολυνθεί η σύγκριση, έχουν καθιερωθεί πρότυπα αναφοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται στο καλιμπράρισμα του εξοπλισμού.

Οι τέσσερις πιο κοινές μέθοδοι υπερήχων είναι:

- **Έλεγχος μέσω μετάδοσης υπερήχων (Through Transmission Ultrasonic Inspection).** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί δύο μετατροπείς, ένα στην κάθε πλευρά της περιοχής που εξετάζεται. Το υπερηχητικό σήμα μεταδίδεται από τον έναν μετατροπέα στον άλλο. Η απώλεια της ισχύος του σήματος μετριέται από ένα όργανο, το οποίο δείχνει την απώλεια ως ποσοστό επί τοις εκατό του αρχικού σήματος ή την απώλεια σε decibel. Η απώλεια ισχύος συγκρίνεται με τα πρότυπα αναφοράς. Περιοχές με μεγαλύτερη απώλεια από το πρότυπο αποτελούν περιοχή ελέγχου.
- **Έλεγχος υπερήχων μέσω παλμικής ηχούς (Pulse Echo Ultrasonic Inspection).** Σε αυτή τη μέθοδο μια πηγή δουλεύει ως πομπός και δέκτης, η οποία διεγείρεται από παλμούς υψηλής τάσης. Ο κάθε ηλεκτρικός παλμός ενεργοποιεί των μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική με τη μορφή υπερηχητικού κύματος. Οποιαδήποτε αλλαγή στην κυματομορφή που προκύπτει ή στο χρόνο που κάνει το κύμα να επιστρέψει στον μετατροπέα, μαρτυρά την ύπαρξη ελαττώματος.
- **Έλεγχος υπερηχητικών δεσμών (Ultrasonic Bondtester Inspection).** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί bondtesters, οι οποίοι είναι καθετήρες που έχουν έναν ή δύο μετατροπείς. Οι bondtesters μπορεί να είναι χαμηλών ή υψηλών συχνοτήτων. Αυτοί που είναι υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν αποκολλήσεις και κενά. Δεν μπορούν να εντοπίσουν αποδέσμευση του εξωτερικού στρώματος και του κυψελώδη πυρήνα σε πάνελ sandwich ή το πορώδες. Μπορούν όμως να εντοπίσουν ελαττώματα μέχρι και 1 cm διάμετρο. Οι bondtesters χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούν δύο μετατροπείς και είναι ικανοί να εντοπίσουν αποκολλήσεις, κενά και αποδέσμευση του εξωτερικού στρώματος και του κυψελώδη πυρήνα σε πάνελ sandwich. Αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εντοπίσει πια πλευρά του υλικού είναι κατεστραμμένη και δε μπορεί να εντοπίσει ελαττώματα με μικρότερη διάμετρο από 2,5 cm.

- **Έλεγχος σταδιακής συστοιχίας (Phased Array Inspection).** Αυτή η μέθοδος είναι μια από της πιο πρόσφατες υπερηχητικές μεθόδους. Διέπεται από την ίδια αρχή λειτουργίας με τη μέθοδο Pulse Echo, αλλά χρησιμοποιεί 64 αισθητήρες συγχρόνως, που επιταχύνουν τη διαδικασία κατά πολύ.

2.3.5 Ραδιογραφία (Radiography)

Η ραδιογραφία είναι πολύ χρήσιμη μη καταστροφική μέθοδος καθώς επιτρέπει την θέαση του εσωτερικού του υλικού. Αυτή η μέθοδος πραγματοποιείται με την διέλευση ακτίνων-Χ διαμέσου του υπό εξέταση κομματιού ή της συνδεσμολογίας και την καταγραφή της απορρόφησης των ακτίνων σε ένα φιλμ που είναι ευαίσθητο στις ακτίνες-Χ. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μια οπτικοποίηση των εσωτερικών σχέσεων των επιμέρους αντικειμένων. Καθώς η μέθοδος αυτή καταγράφει διαφορές στη συνολική πυκνότητα μέσω του πάχους, δεν είναι κατάλληλη μέθοδος για την ανίχνευση ελαττωμάτων όπως η αποκόλληση που μπορεί να είναι κατά τη διεύθυνση της ακτίνας, μπορεί όμως να ανιχνεύσει με μεγάλη επιτυχία ελαττώματα που είναι παράλληλα στην κεντρική γραμμή της δέσμης ακτίνων-Χ. Εσωτερικές ανωμαλίες, όπως αποκόλληση στις γωνίες, θρυμματισμένος ή με εμφυσήσεις πυρήνας, νερό στο πυρήνα, κενά και άλλα πολλά, ανιχνεύονται με πολύ μεγάλη αποτελεσματικότητα από τη ραδιογραφία. Τα περισσότερα σύνθετα υλικά είναι σχεδόν διαπερατά από τις ακτίνες-Χ, έτσι πρέπει να χρησιμοποιούνται ακτίνες χαμηλής ενέργειας. Οι διεκπεραιωτές πρέπει πάντα να παίρνουν τις κατάλληλες προφυλάξεις όταν χρησιμοποιούν ακτίνες-Χ και να τηρούν κάποια απόσταση ασφαλείας.

2.3.6 Θερμογραφία (Thermography)

Ο θερμικός έλεγχος περιλαμβάνει όλες τις μεθόδους που χρησιμοποιούν συσκευές ανίχνευσης θερμότητας για τη μέτρηση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στα υπό εξέταση κομμάτια. Η βασική αρχή του θερμικού ελέγχου είναι η μέτρηση ή η χαρτογράφηση των θερμοκρασιών στην επιφάνεια του υλικού, όταν ρέει θερμότητα από, προς ή διαμέσου αυτού. Όλες οι θερμογραφικές τεχνικές βασίζονται στις διαφορές της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ των υγιών περιοχών και αυτών που παρουσιάζουν ανωμαλίες. Κανονικά, μια πηγή θερμότητας χρησιμοποιείται για να αυξήσει την θερμοκρασία στην περιοχή που εξετάζεται, ενώ παρατηρούνται τα θερμοκρασιακά φαινόμενα της επιφάνειας. Επειδή οι υγιείς περιοχές άγουν τη θερμότητα πιο αποτελεσματικά από αυτές που είναι ελαττωματικές, η ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται ή αντανακλάται μαρτυρά την ποιότητα του υλικού. Οι ανωμαλίες που εντοπίζονται με τις θερμικές μεθόδους είναι οι αποδεσμεύσεις, σπασίματα, βλάβες πρόσκρουσης, αραιώσεις στα πάνελ και διείσδυση νερού. Οι εν λόγω μέθοδοι είναι πιο αποτελεσματικές σε λεπτά στρώματα ή σε ελαττώματα κοντά στην επιφάνεια.

2.3.7 Ραδιογραφία νετρονίων (Neutron Radiography)

Η μέθοδος αυτή είναι ικανή να οπτικοποιήσει τα εσωτερικά χαρακτηριστικά ενός δείγματος. Η ραδιογραφία νετρονίων είναι συμπληρωματική τεχνική για τη ραδιογραφία ακτίνων-Χ. Το κύριο πλεονέκτημα της παρούσας μεθόδου είναι η ικανότητα να εμφανίζει ελαφρά στοιχεία, όπως το υδρογόνο που βρίσκεται σε διαβρωμένα προϊόντα και το νερό.

2.3.8 Ανιχνευτής υγρασίας (Moisture detector)

Ο ανιχνευτής υγρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρει νερό σε sandwich με κυψέλες. Η συσκευή αυτή μετράει την απώλεια δύναμης της ραδιοσυχνότητας που οφείλεται στην ύπαρξη νερού. Το Σχήμα 2.11 δείχνει μια σύγκριση των μη καταστροφικών μεθόδων.

Method of Inspection	Type of Defect							
	Disbond	Delamination	Dent	Crack	Hole	Water Ingestion	Overheat and Burns	Lightning Strike
Visual	X (1)	X (1)	X	X	X		X	X
X-Ray	X (1)	X (1)		X (1)		X		
Ultrasonic TTU	X	X						
Ultrasonic pulse echo		X				X		
Ultrasonic bondtester	X	X						
Tap test	X (2)	X (2)						
Infrared thermography	X (3)	X (3)				X		
Dye penetrant				X (4)				
Eddy current				X (4)				
Shearography	X (3)	X (3)						

Notes: (1) For defects that open to the surface
 (2) For thin structure (3 plies or less)
 (3) The procedures for this type of inspection are being developed
 (4) This procedure is not recommended

Σχήμα 2.11: Σύγκριση μη καταστροφικών μεθόδων [19]

2.3.9 Τομογραφία λέιζερ (Shearography)

Μια άλλη γρήγορη μέθοδος είναι η τομογραφία λέιζερ, η οποία εντοπίζει ελαττώματα κάτω από την επιφάνεια με τη μέτρηση της ελάχιστης διαφοράς στην επιφανειακή παραμόρφωση μεταξύ μιας υγιούς περιοχής του σύνθετου και κάποιες άλλης που έχει καταπονηθεί ελαφρώς. Ένα μηχάνημα τομογραφίας εντοπίζει την διαφορά από τη μετατόπιση της φάσης των διαχωρισμένων οπτικών εικόνων που ανακλούν το φως του λέιζερ.

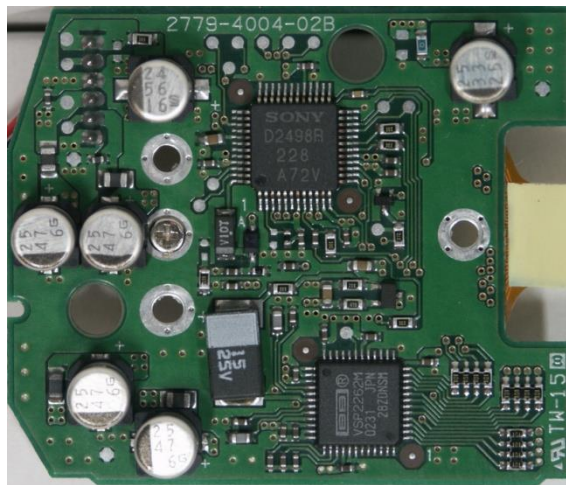
2.3.10 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Ένας ιδανικός τρόπος ΜΚΕ είναι η χρήση του ίδιου του υλικού ως αισθητήρα. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης (ΜΗΑ) είναι μια τέτοια μέθοδος ανίχνευσης κάποιες εσωτερικής βλάβης. Εφαρμόζεται πολύ καλά στην περίπτωση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, αφού η ηλεκτρική αντίσταση συνδέεται άμεσα τόσο με την μηχανική παραμόρφωση όσο και με τη βλάβη. Ωστόσο, στην περίπτωση σύνθετων πολυμερών με ενίσχυση ίνας γυαλιού συνήθως δε μπορεί να βρει εφαρμογή αν καμία φάση του σύνθετου δεν είναι αγωγή (δηλαδή η μήτρα).

Κεφάλαιο 3

3. Εφαρμογές σύνθετων Πολυμερών

Οι εμπορικές και βιομηχανικές χρήσεις των ινοπλισμένων πολυμερών σύνθετων υλικών είναι τόσο ποικίλες που είναι αδύνατον να τις απαριθμήσουμε όλες. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν μόνο οι βασικοί τομείς κατασκευαστικών εφαρμογών, οι οποίοι περιλαμβάνουν την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τα αθλητικά είδη, τη ναυπηγική και τα έργα υποδομών. Τα εν λόγω υλικά χρησιμοποιούνται επίσης στα ηλεκτρονικά (π.χ. σε πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος, Σχήμα 3.1), σε κατασκευές κτιρίων (π.χ. σε δοκούς δαπέδου), σε έπιπλα (π.χ. ελατήρια καρέκλας), στην βιομηχανία ενέργειας (π.χ. σε μετασχηματιστές), στην βιομηχανία πετρελαίου (π.χ. σε υπεράκτιες πλατφόρμες πετρελαίου), στην ιατρική βιομηχανία (π.χ. εμφυτεύματα, πλάκες οστών για σταθεροποίηση κατάγματος) και σε πάρα πολλά βιομηχανικά προϊόντα. Γενικότερα υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των σύνθετων υλικών σε πάρα πολλούς τομείς της μηχανικής αν ληφθούν υπόψη οι μοναδικές φυσικές, μηχανικές και θερμικές τους ιδιότητες[21].



Σχήμα 3.1: Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος

3.1 Εφαρμογές σε εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη

Η κύρια εφαρμογή ινοπλισμένων σύνθετων υλικών είναι σε αεροσκάφη, λόγο ότι η μείωση του βάρους είναι κρίσιμη για τις υψηλότερες ταχύτητες και την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου. Ήδη από το 1969 χρησιμοποιήθηκαν φλούδες εποξικών ρητινών ινοπλισμένων με βόριο στο F-14. Με την εισαγωγή των ινών άνθρακα, την δεκαετία του 1970, οι εποξικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες άνθρακα έγιναν το κύριο υλικό σε πολλά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα φτερά, την άτρακτο και του ουραίου πτερώματος όπως φαίνεται και στον Πίνακα_3. Η δομική ακεραιότητα και ανθεκτικότητα αυτών των πρώιμων υλικών οδήγησε σε μια συνεχώς αυξανόμενη χρήση σύνθετων υλικών στην πολεμική αεροπορία. Για παράδειγμα το αεροσκάφος του AV-8B(Αεροσκάφος

κατακόρυφης/βραχείας αποπροσγειώσης_ Vertical/ shorttake-offandlanding_VSTOL), που εισήχθη το 1982, περιέχει σχεδόν 25% κατά βάρος εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Το μαχητικό αεροσκάφος F-22 περιέχει περίπου 25% κατά βάρος συνθετικά πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, τα άλλα κύρια συστατικά του είναι τιτάνιο (39%) και αλουμίνιο (16%). Ο εξωτερικός φλοιός του B-2 και άλλων αεροσκαφών τύπου STEALTH είναι σχεδόν εξολοκλήρου κατασκευασμένος από σύνθετα πολυμερή ενισχυμένων με ίνες άνθρακα, διότι η τεχνολογία των υλικών αυτών μειώνει την αντανάκλαση των ραντάρ και την θερμική ακτινοβολία. Στο Σχήμα 3.2 φαίνονται κάποιες πρώιμες εφαρμογές των σύνθετων υλικών στην πολεμική αεροπορία.

Early Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Military Aircrafts

Aircraft	Component	Material	Overall Weight Saving Over Metal Component (%)
F-14 (1969)	Skin on the horizontal stabilizer box	Boron fiber-epoxy	19
F-11	Under the wing fairings	Carbon fiber-epoxy	
F-15 (1975)	Fin, rudder, and stabilizer skins	Boron fiber-epoxy	25
F-16 (1977)	Skins on vertical fin box, fin leading edge	Carbon fiber-epoxy	23
F/A-18 (1978)	Wing skins, horizontal and vertical tail boxes; wing and tail control surfaces, etc.	Carbon fiber-epoxy	35
AV-8B (1982)	Wing skins and substructures; forward fuselage; horizontal stabilizer; flaps; ailerons	Carbon fiber-epoxy	25

Source: Adapted from Riggs, J.P., *Mater. Soc.*, 8, 351, 1984.

Σχήμα 3.2: Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στην πολεμική αεροπορία[21]

Οι σύνθετες εφαρμογές στα εμπορικά αεροσκάφη ξεκίνησαν με λίγα επιλεγμένα δευτερεύοντα δομικά στοιχεία, το σύνολο των οποίων ήταν παρασκευασμένα από υψηλής αντοχής εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα (Σχήμα 3.3). Σχεδιάστηκαν και παρήχθησαν στα πλαίσια προγράμματος της NASA Aircraft Energy Efficiency και εγκαταστάθηκαν σε διάφορα αεροσκάφη την περίοδο 1972-1986. Μέχρι το 1987, 350 εξαρτήματα από σύνθετα υλικά τέθηκαν σε λειτουργία σε διάφορα εμπορικά αεροσκάφη και μέσα στα επόμενα χρόνια συσώρευσαν εκατομμύρια ώρες πτήσης. Από επιθεωρήσεις και εκτιμήσεις που έγιναν κατά καιρούς σε αυτά τα υλικά φάνηκε ότι υπέστησαν κάποιες ζημιές που προκλήθηκαν από ατυχήματα στο έδαφος, από ξένα αντικείμενα και αστραπές.

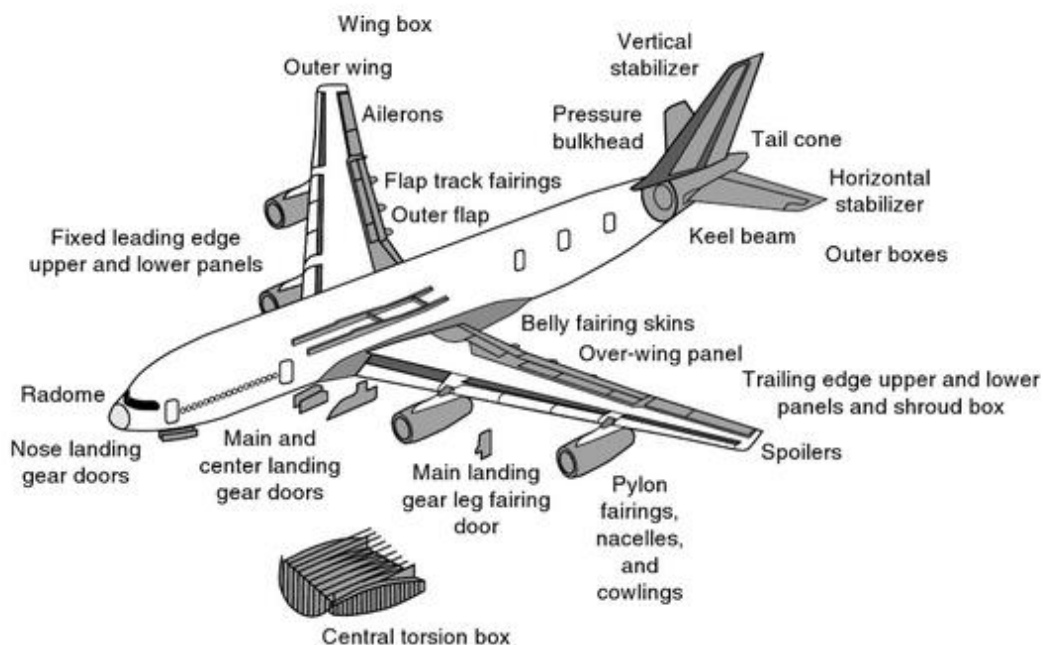
Εκτός από αυτές τις φθορές, δεν υπήρξε υποβιβασμός των ιδιοτήτων από κόπωση ή από έκθεση στο περιβάλλον. Μια καλή συσχέτιση βρέθηκε μεταξύ των επίγειων τεστ και της επίδοσης των σύνθετων μετά από έκθεση τους σε συνθήκες πτήσης.

Η Airbus ήταν η πρώτη εταιρία παραγωγής εμπορικών αεροσκαφών που έκανε εκτεταμένη χρήση των σύνθετων υλικών στο αεροσκάφος A310, το 1987. Τα μέρη από σύνθετα υλικά ζύγιζαν περίπου το 10% του αεροσκάφους και περιλάμβαναν εξαρτήματα από όλη την έκταση του αεροσκάφους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το κατακόρυφο πτερύγιο της ουράς του αεροπλάνου που έχει 8,3 m ύψος και 7,8 m πλάτος ζύγιζε 400kg λιγότερο από το πτερό αλουμινίου που χρησιμοποιούταν παλιότερα. Το A320, που κατασκευάστηκε το 1988, ήταν το πρώτο αεροσκάφος που είχε ουρά εξολοκλήρου κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται η χρήση των σύνθετων υλικών στο AirbusA380, του 2006, όπου περίπου το 25% του βάρους του αποτελείται από σύνθετα.

Early Applications of Fiber-Reinforced Polymers in Commercial Aircrafts

Aircraft	Component	Weight (lb)	Weight Reduction (%)	Comments
<i>Boeing</i>				
727	Elevator face sheets	98	25	10 units installed in 1980
737	Horizontal stabilizer	204	22	
737	Wing spoilers	—	37	Installed in 1973
756	Ailerons, rudders, elevators, fairings, etc.	3340 (total)	31	
<i>McDonnell-Douglas</i>				
DC-10	Upper rudder	67	26	13 units installed in 1976
DC-10	Vertical stabilizer	834	17	
<i>Lockheed</i>				
L-1011	Aileron	107	23	10 units installed in 1981
L-1011	Vertical stabilizer	622	25	

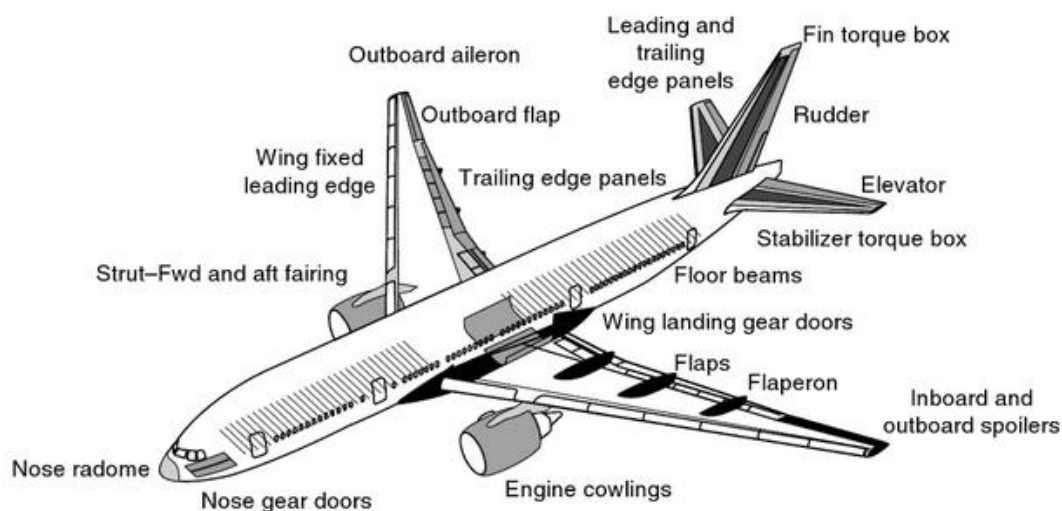
Σχήμα 3.3: Εφαρμογές ινοπλισμένων πολυμερών στην πολιτική αεροπορία[21]



Σχήμα 3.4: Χρήση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στο AirbusA380 [21]

Ξεκινώντας με το Boeing 777, του 1995, η εταιρία Boeing άρχισε να κάνει χρήση των σύνθετων υλικών στην άτρακτο του αεροσκάφους, σε πολλές επιφάνειες του πίνακα ελέγχου, στον κινητήρα και στις δοκούς οροφής της ατράκτου (Σχήμα 3.5). Τα σύνθετα υλικά αποτελούσαν περίπου το 10% του βάρους του αεροσκάφους αυτού. Ενώ το Boeing 787 Dreamliner, αποτελούνταν από 50% κατά βάρος σύνθετα πολυμερή με ενίσχυση ινών άνθρακα, με την εποξική ρητίνη να είναι από τα κύρια συστατικά.

Υπάρχουν μερικά παραδείγματα μικρότερων αεροσκαφών που χρησιμοποιούν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες από σύνθετα υλικά, όπως για παράδειγμα το LearFan 2100, ένα επιχειρηματικό αεροσκάφος του 1983, στο οποίο υπολογίζεται ότι το 70% κατά βάρος αποτελούνταν από εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα και ίνες Kevlar 49. Άλλο παράδειγμα είναι το Voyager, το οποίο ήταν εξολοκλήρου κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά και πραγματοποίησε το 1986, για πρώτη φορά, τον γύρω του κόσμου χωρίς καμία στάση και αυτό γιατί ήταν πολύ ελαφρύ και μπορούσε να μεταφέρει όσα καύσιμα του ήταν απαραίτητα.



Σχήμα 3.5: Χρήση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στο Boeing 777 [21]

Επίσης ενισχυμένα με ίνες πολυμερή χρησιμοποιούνται και σε πολλά στρατιωτικά και εμπορικά ελικόπτερα, με πεδίο χρήσης σχεδόν σε όλα τα κομμάτια του ελικοπτερου. Κομβική χρήση των σύνθετων στα ελικόπτερα είναι στα πτερύγια του ρότορα, όπου χρησιμοποιείται εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες γυαλιού ή άνθρακα. Τα πλεονεκτήματα που έχει αυτή η χρήση είναι: Μικρότερο βάρος, καλύτερα χαρακτηριστικά στις έλικες όσον αφορά τους κραδασμούς, ευελιξία κατασκευής, δηλαδή μπορούν να μορφοποιηθούν κατάλληλα, χωρίς επιπλέον δαπάνες, σε αντίθεση με τα μεταλλικά πτερύγια που έχουν περιορισμούς ως προς το σχήμα.

Ο κύριος λόγος χρήσης των ινο-ενισχυμένων πολυμερών σε αεροσκάφη και ελικόπτερα είναι η μικρότερη πυκνότητα, που οδηγεί σε εξοικονόμηση

καυσίμου και αύξηση του ωφέλιμου φορτίου. Άλλα πλεονεκτήματα χρήσης τους είναι:

Μείωση του αριθμού των συστατικών και των συνδετικών εξαρτημάτων που οδηγεί σε μείωση του κόστους κατασκευής και συναρμολόγησης.

Μεγαλύτερη αντοχή στην καταπόνηση και την διάβρωση, που οδηγεί σε μείωση του κόστους συντήρησης και επισκευής.

Η χρήση πολυμερών ενισχυμένων με ίνες σε στρώσεις, δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού των αεροδυναμικών επιφανειών του αεροσκάφους έτσι ώστε η αντοχή και η ακαμψία να ταιριάζουν με τα πιθανά αεροδυναμικά φορτία που μπορεί να επιβληθούν σε αυτές. Οι βασικότεροι περιορισμοί στην χρήση σύνθετων υλικών εποξικής ρητίνης ενισχυμένα με ίνες άνθρακα είναι το υψηλό τους κόστος, η σχετικά χαμηλή αντοχή σε πρόσκρουση (από χτυπήματα πουλιών, πτώση εργαλείων κλπ.) και η ευαισθησία σε βλάβες από αστραπή. Επίσης όταν χρησιμοποιούνται σε επαφή με αλουμίνιο ή τιτάνιο, μπορούν να προκαλέσουν γαλβανική διάβρωση στα μεταλλικά εξαρτήματα. Η προστασία του μετάλλου απαιτεί την επικάλυψη των σημείων που έρχονται σε επαφή με αντιδιαβρωτική βαφή, που είναι πρόσθετο κόστος.

3.2 Διαστημικές εφαρμογές

Και σε αυτή τη περίπτωση η μείωση του βάρους είναι ο βασικός λόγος χρήσης σύνθετων ενισχυμένων με ίνες σε διαστημικά οχήματα. Εκτός από τα μεγάλα δομικά εξαρτήματα τα σύνθετα πολυμερή με ίνες χρησιμοποιούνται και σε πολλά μικρότερα εξαρτήματα (π.χ. κεραίες). Κύριος λόγος που επιλέγονται για αυτές τις χρήσεις είναι η σταθερότητα των διαστάσεων τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Σύνθετα υλικά εποξικής ρητίνης με ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε τεχνητούς δορυφόρους. Τα πλεονεκτήματα των υλικών αυτών για διαστημικές εφαρμογές είναι: καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι εφικτό να παρασκευαστούν με συντελεστή θερμικής διαστολής κοντά στο μηδέν, μικρή πυκνότητα.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται στην χρήση σύνθετων με εποξικές ρητίνες σε δορυφόρους κοντινής τροχιάς στη Γη, είναι η ευαισθησία τους σε υποβάθμιση λόγω προσρόφησης ατομικού οξυγόνου από την αραιωμένη ατμόσφαιρα της Γης. Το εμπόδιο αυτό μπορεί να ξεπεραστεί αν τα ευαίσθητα μέρη καλυφθούν, για παράδειγμα με πολύ λεπτό αλουμινοχαρτό. Ένα άλλο πρόβλημα στην χρήση των σύνθετων πολυμερών στο διάστημα είναι η εξάχνωση της πολυμερούς μήτρας όταν εκτεθεί στο κενό (οδηγεί σε αλλαγή διαστάσεων) και η ευθραυστότητα λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα σωματίδια (οδηγεί σε σχηματισμό μικρορηγματώσεων).

3.3 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία

Οι εφαρμογές των σύνθετων ινωδών υλικών στην αυτοκινητοβιομηχανία μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: εξαρτήματα αμαξώματος, εξαρτήματα πλαισίου και εξαρτήματα του κινητήρα.

Όπως είδαμε μέχρι τώρα οι μήτρες εποξικής ρητίνης χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην αεροναυπηγική, όμως λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου σκλήρυνσης δεν προτιμάται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μήτρες είναι βινυλεστέρα ή πολυουρεθάνης. Η ενίσχυση της μήτρας επιλέγεται να είναι συνήθως ίνες E-glass, επειδή οι ίνες άνθρακα είναι πολύ πιο ακριβές. Ακόμα και έτσι όμως η συμμετοχή των σύνθετων στο κόστος παραγωγής είναι κρίσιμο, αν λάβουμε υπόψη ότι τα σύγχρονα αυτοκίνητα παρασκευάζονται με ασφάλι με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα που είναι πολύ πιο φθηνό.

Στα μηχανοκίνητα αθλήματα, που είναι το μικρό βάρος του οχήματος προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε μεγάλες, κυρίως, ταχύτητες, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Έτσι κι αλλιώς το κόστος παρασκευής σε αυτές τις περιπτώσεις δεν είναι και το κυριότερο κριτήριο. Σήμερα το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο στα αγωνιστικά αυτοκίνητα είναι η εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Η Formula 1 είναι σχεδόν εξολοκλήρου κατασκευασμένη από αυτό το σύνθετο.

3.4 Εφαρμογές στα αθλητικά είδη

Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή χρησιμοποιούνται εκτενώς στα αθλητικά είδη, από ρακέτες του τένις μέχρι και αθλητικά παπούτσια (Σχήμα 3.6) και έχουν προτιμηθεί από τα παραδοσιακά υλικά, όπως ξύλο, μέταλλα και δέρμα σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών είναι η μείωση του βάρους, η απορρόφηση κραδασμών και η ευελιξία σχεδιασμού.

Tennis rackets
Racket ball rackets
Golf club shafts
Fishing rods
Bicycle frames
Snow and water skis
Ski poles, pole vault poles
Hockey sticks
Baseball bats
Sail boats and kayaks
Oars, paddles
Canoe hulls
Surfboards, snow boards
Arrows
Archery bows
Javelins
Helmets
Exercise equipment
Athletic shoe soles and heels

Σχήμα 3.6: Εφαρμογές σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στα αθλητικά είδη[21].

3.5 Θαλάσσιες εφαρμογές.

Σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται σε πολλά διαφορετικά είδη σκαφών(π.χ. ιστιοφόρα, αλιευτικά σκάφη, βάρκες, σωσίβια και γιότ), ήδη από το 1940 που εισήχθησαν αυτά τα υλικά στην αγορά. Σήμερα, σχεδόν το 90% όλων των σκαφών αναψυχής παρασκευάζονται είτε από πολυεστέρα με ίνες γυαλιού είτε από ρητίνη βινυλεστέρα ενισχυμένη με ίνες γυαλιού. Κάποιες από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών είναι στον σκελετό του πλοίου, στο κατάστρωμα και σε πολλά εσωτερικά εξαρτήματα. Η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή των περισσότερων από αυτά τα εξαρτήματα ονομάζεται χύτευση επαφής (contactmolding). Παρόλο που είναι διαδικασία που απαιτεί εργασία μεγάλης εντάσεως, ο εξοπλισμός είναι χαμηλού κόστους και έτσι η κατασκευή τέτοιων σκαφών είναι εφικτή και για μικρές εταιρείες. Τα τελευταία χρόνια ίνες Kevlar 49 έχουν αντικαταστήσει τις ίνες γυαλιού σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές λόγω καλύτερης αναλογίας αντοχής εφελκυσμού-βάρους και αναλογίας μέτρου ελαστικότητας- βάρους , από αυτές των ινών γυαλιού. Το κύριο πλεονέκτημα και εδώ είναι η μείωση του βάρους, που μεταφράζεται σε υψηλότερες ταχύτητες πλεύσης, καλύτερη επιτάχυνση, ικανότητα ελιγμών και καλύτερη απόδοση καυσίμου. Εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα χρησιμοποιείται κατά κόρον σε αγωνιστικά σκάφη που η μείωση του βάρους τους είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η χρήση σύνθετων υλικών στο πολεμικό ναυτικό έχει ξεκινήσει ήδη από το 1950 και αυξάνεται σταθερά χρόνο με το χρόνο. Σχετικά πρόσφατα το πολεμικό ναυτικό των Η.Π.Α. έθεσε σε λειτουργία ένα πολεμικό σκάφος 24 μέτρων, με το όνομα Stiletto, το οποίο είναι κυρίως κατασκευασμένο από εποξική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Η επιλογή του υλικού αυτού έγινε ώστε να πληροί το σκάφος τις εξής προϋποθέσεις: μικρό βάρος και υψηλή αντοχή καθώς και χαρακτηριστικά τεχνολογίας stealth ώστε να μειώνεται η ανιχνευσιμότητα του από τα ραντάρ.

3.6 Έργα υποδομών

Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν τεράστιες δυνατότητες στην αντικατάσταση του οπλισμένου σκυροδέματος με ασφάλι σε γέφυρες, κτίρια και σε άλλες αστικές υποδομές. Ο κύριος λόγος που επιλέγονται αυτά τα σύνθετα υλικά είναι η αντοχή τους στη διάβρωση, σε αντίθεση με τις ασάλινες ράβδους που χρησιμοποιούνται ως οπλισμός, που σημαίνει μεγαλύτερος χρόνος ζωής του έργου και χαμηλότερα έξοδα συντήρησης. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών σε μεγάλες γέφυρες είναι το μικρό βάρος του υλικού. Μια πρώιμη επίδειξη γέφυρας κυκλοφορίας από σύνθετα υλικά έγινε το 1995 από τα ερευνητικά εργαστήρια του LockheedMartin στο Πάλο Άλτο (PaloAlto) της Καλιφόρνια. Η γέφυρα ήταν μήκους 9 μέτρων και πλάτους 5,4 μέτρων και το υλικό που επιλέχθηκε ήταν πολυεστέρας ενισχυμένος με ίνες E-glass. Τα τελευταία χρόνια ένα πλήθος γεφυρών έχουν κατάστρωμα από σύνθετα υλικά.

Κεφάλαιο 4

4. Παραγωγή και ανακύκλωση σύνθετων πολυμερών

4.1 Διαδικασία παραγωγής υαλονημάτων

Αρχικά παρουσιάζεται η διαδικασία παρασκευής των ινών γυαλιού, οι οποίες μπορεί να υπάρχουν στο εμπόριο ανεξάρτητα από την ύπαρξή τους μέσα σε σύνθετο υλικό. Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (Σχήμα 4.1) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις [6]:

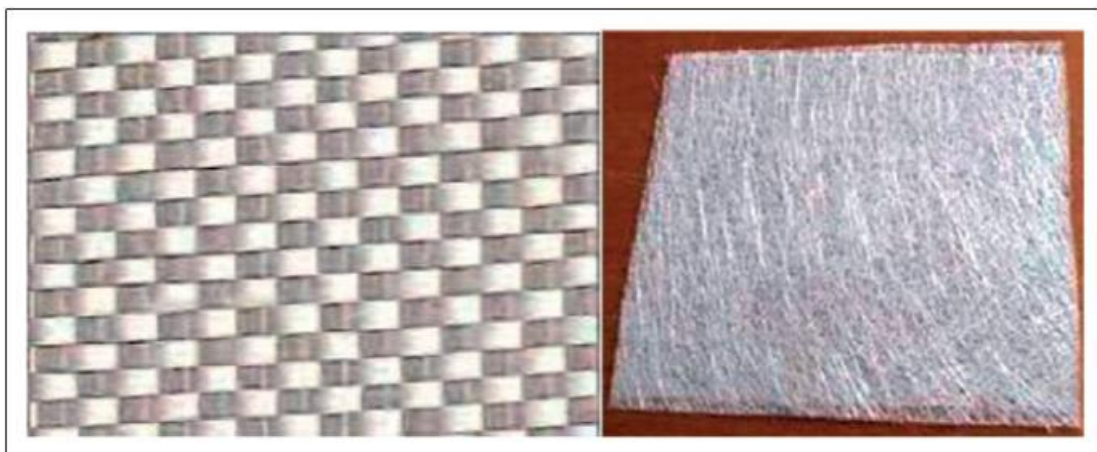
- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2mm).
- Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά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

Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, της πυκνότητάς του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου. Κατά τη διάρκεια παραγωγής των ινών πρέπει να αποφεύγεται η επαφή μεταξύ τους καθώς και με άλλα αντικείμενα γιατί μπορεί να προκληθούν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα.



Σχήμα 4.1: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού {6}.

Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε προσωρινά και συμβατά. Τα προσωρινά πρόσθετα προστατεύουν την ίνα από μείωση της αντοχής της εξαιτίας των τριβών με άλλες ίνες και τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους σε περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης. Επιπλέον, προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία ≥ 340 °C για 15-20 ώρες. Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης-γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων.



Σχήμα 4.2: Υφαντό και τυχαία προσανατολισμένο υαλοϋφασμα

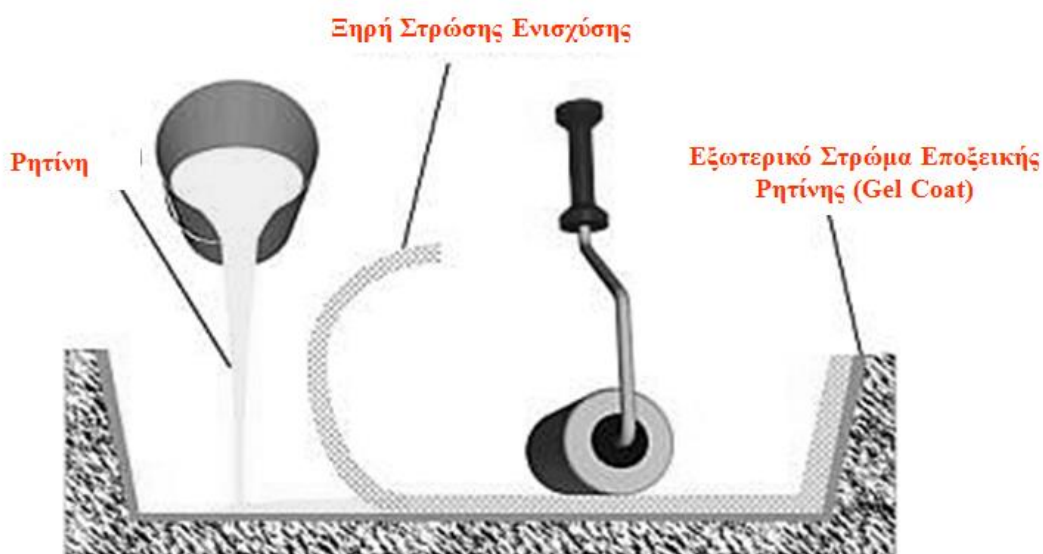
4.2 Διαδικασία παραγωγής σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής ινοπλισμένων σύνθετων υλικών. Η μέθοδος που θα επιλεγεί κάθε φορά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η χρήση για την οποία προορίζεται το υλικό, το υλικό της μήτρας και της

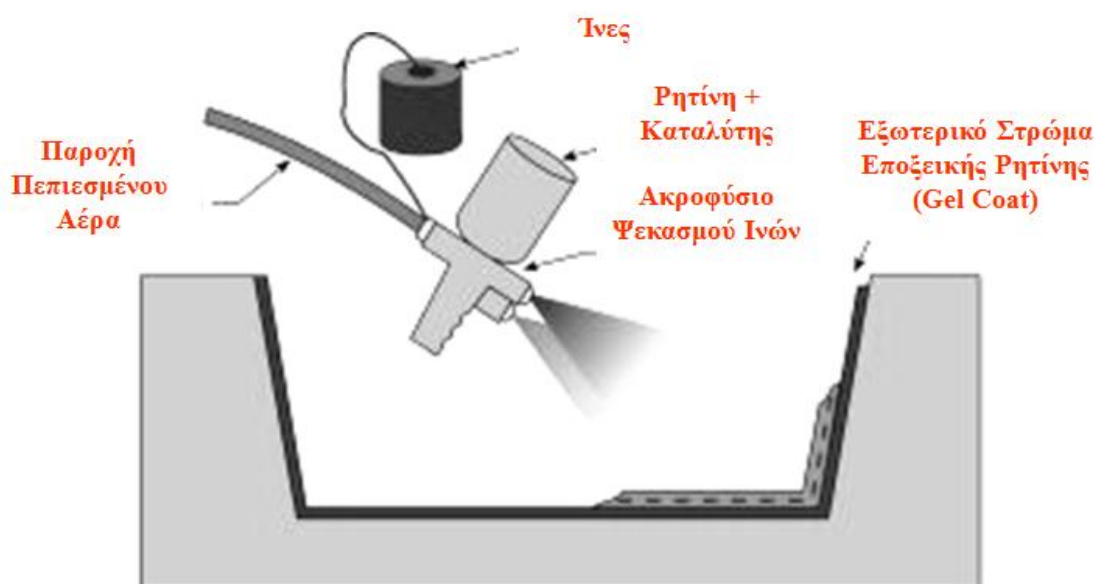
ίνας. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι που αφορούν μήτρα πολυμερούς και ίνες γυαλιού.

4.2.1 Διαδικασία επίστρωσης καλουπιού

Οι κύριοι τύποι επίστρωσης καλουπιού είναι δύο, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Η επίστρωση του καλουπιού με το χέρι (handlayup) και ο ψεκασμός του καλουπιού (sprayup). Οι μέθοδοι της μορφοποίησης με το χέρι αν και έχουν ορισμένα βασικά μειονεκτήματα (μικρός όγκος παραγωγής, εξάρτηση ποιότητας από την ικανότητα του εργάτη κλπ), βρίσκουν αρκετά ευρεία εφαρμογή λόγω της ευελιξίας που προσφέρουν.



Σχήμα 4.3: Επίστρωση καλουπιού με το χέρι (HandLayup).



Σχήμα 4.4: Ψεκασμός καλουπιού (Sprayup).

Η διαδικασία της επίστρωσης με το χέρι απαιτεί αρχικά μια προετοιμασία του καλουπιού στο οποίο θα γίνει η μορφοποίηση. Η προετοιμασία αυτή είναι

απαραίτητη για να μην κολλήσει το κατασκευαζόμενο εξάρτημα επάνω στο καλούπι κατά την μορφοποίηση. Στον πίνακα του Σχήματος 4.5 φαίνονται διάφορα είδη αντικολλητικών επιστρώσεων και τα χαρακτηριστικά τους.

Είδος αντικολλητικού υλικού	Μορφή	Χαρακτηριστικά
Κερί	Ρευστή ή Ημίρρευστη μορφή	Πολύ καλό Γυάλισμα. Καλή μεταφορά Λεπτομερειών. Πολλαπλές χρήσεις
PVA	Υγρό (ψεκάζεται συνήθως)	Υδατοδιαλυτό μιας χρήσης. Παρέχει δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας. Άριστη αντικολλητικότητα
Φθοράνθρακες , Σιλάνια & Σιλικόνες	Υγρό ή Σπρέι	Σχετικά Ακριβό. Μέτριο Γυάλισμα επιφάνειας.
Αντικολλητικά Φίλμ & Χαρτιά	Επικαλυμμένο Χαρτί, Σελοφάν , ή PVA φίλμ	Μιας χρήσης. Απλά σχετικά καλούπια
Εσωτερικής χρήσης Αντικολλητικές ουσίες (Internal Releases)	Υγρό (συνήθως αναμιγνύεται με το gel επικάλυψης)	Άριστο Γυάλισμα. Καλή μεταφορά λεπτομέρειας. Παρέχει δυνατότητα για βάψιμο επιφάνειας. Δεν χρειάζεται επικύρωση του καλουπιού

Σχήμα 4.5: Αντικολλητικές επιστρώσεις

Οι μέθοδοι μορφοποίησης με επίστρωση του καλουπιού είτε με το χέρι είτε με ψεκασμό, που περιγράψαμε παραπάνω έχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη όταν κανείς σκοπεύει να κάνει χρήση των μεθόδων αυτών.

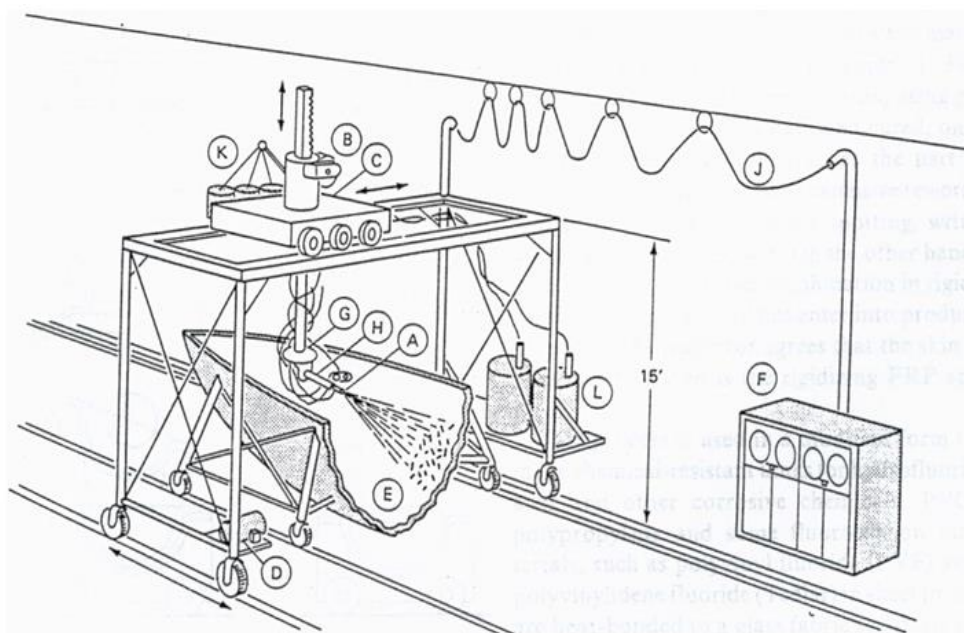
Στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται: η ευελιξία στον σχεδιασμό εξαρτημάτων, η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων και περίπλοκων κομματιών και το χαμηλό κόστος του ελάχιστου εξοπλισμού. Ως καλούπι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οτιδήποτε υλικό με σταθερό σχήμα και η έναρξη παραγωγής γίνεται σχετικά γρήγορα, αφού είναι απλό το στήσιμο του εξοπλισμού. Επιπλέον είναι εύκολες οι σχεδιαστικές αλλαγές και η εκπαίδευση των τεχνιτών είναι απλή. Τέλος, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν εγκλείσματα και ενισχύσεις κατά την μορφοποίηση (ασάλινα νεύρα δυσκαμψίας π.χ).

Ενώ τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι: το σχετικά υψηλό εργασιακό κόστος μορφοποίησης, ο μικρός όγκος παραγωγής, ανομοιομορφία ποιότητας στα προϊόντα καθώς η ποιότητα κατασκευής εξαρτάται από την ικανότητα του τεχνίτη και ο υψηλός συντελεστής απωλειών σε πρώτες ύλες και «ατελή» προϊόντα. Επιπλέον, το τελικό προϊόν έχει μόνον την εξωτερική του επιφάνεια

σε καλή μορφή και απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι πολυμερισμού αφού το καλούπι βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται μια αυτοματοποιημένη μηχανή επίστρωσης.

A= Κεφαλή ψεκασμού B,C,D,H= Σύστημα κίνησης σε 3 άξονες E= Καλούπι
F= Σύστημα Ελέγχου με Η/Υ G= Περιστρεφόμενη Βάση Ψεκασμού
J= Καλώδια Ελέγχου και Ισχύος K= Μίτοι ινών L= Δοχεία ρητίνης



Σχήμα 4.6: Αυτοματοποιημένη μηχανή επίστρωσης

4.2.2 Τεχνικές Μορφοποίησης με Καλούπια

Το κύριο χαρακτηριστικό όλων των μεθόδων μορφοποίησης με καλούπια είναι ότι το φύλο (ή τα φύλλα) του σύνθετου υλικού εξαναγκάζεται να εισέλθει μέσα σε ένα καλούπι για να αποκτήσει την τελική επιθυμητή του μορφή. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει και την εφαρμογή πίεσης, κενού ή κανενός από τα δύο. Είναι επίσης δυνατόν η μορφοποίηση να γίνεται εν θερμώ.

Για θερμοπλαστική μήτρα η διαδικασία μορφοποίησης είναι θέρμανση, διαμόρφωση υπό πίεση, ψύξη υπό πίεση.

Για θερμοσκληρυνόμενη μήτρα η διαδικασία της μορφοποίησης περιλαμβάνει θέρμανση, διαμόρφωση υπό πίεση, curing υπό πίεση (και μετά όπου απαιτείται ψύξη).

4.2.2.1 Είδη Μορφοποίησης με Καλούπι Συναρτήσεως της Εξωτερικής Πίεσης.

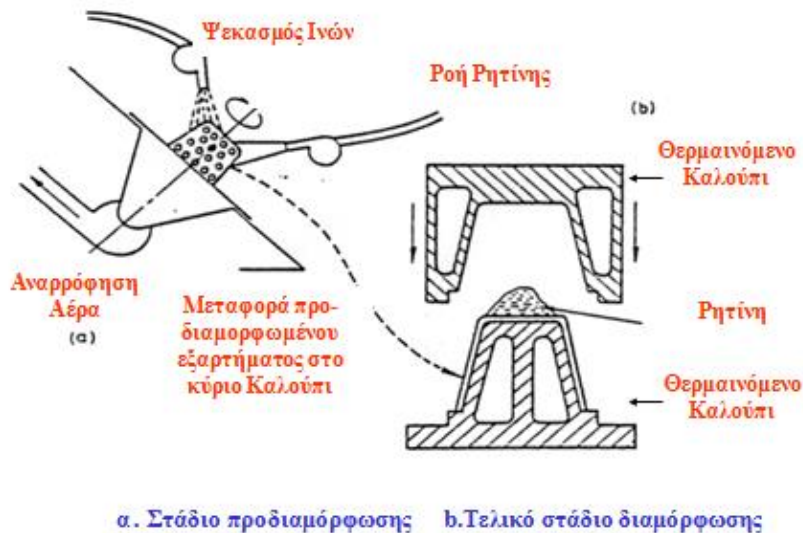
Η πίεση που ασκείται κατά την μορφοποίηση πάνω στο σύνθετο υλικό είναι τριών ειδών. Το σύνθετο υλικό μπορεί να συμπιέζεται μέσω της αμέσου

επαφής του με το άνω μέρος του καλουπιού που κλείνει όπως στις περιπτώσεις της διαμόρφωσης με πρέσσα ή με συμπίεση (compressionmolding). Είναι ακόμη δυνατόν να συμπιέζεται το σύνθετο υλικό μέσω κάποιου αδρανούς αερίου ή και αέρα αμέσως μετά το κλείσιμο του καλουπιού, οπότε η διαδικασία είναι τύπου μορφοποίησης με πίεση (pressureforming). Τέλος υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθεί αρνητική πίεση μέσω δημιουργίας κενού στο καλούπι και έτσι να εξαναγκάζεται το σύνθετο να πάρει την τελική του μορφή (π.χ. μορφοποίηση εν κενώ-vacuumforming).

Είδη μορφοποίησης με καλούπι

- 1. Μορφοποίηση με πρέσα εν ψυχρώ (coldpressmolding).** Το καλούπι είναι μη θερμαινόμενο και το κοίλο μέρος του καλύπτεται με ένα φύλλο μη ενισχυμένου πλαστικού (gelcoat), που εξασφαλίζει την καλή ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας του εξαρτήματος. Στη συνέχεια επιστρώνεται το ύφασμα των ινών πάνω από το gelcoat και ακολουθεί η επίστρωση της ρητίνης πάνω στο ύφασμα. Υψηλή πίεση μορφοποίησης δεν απαιτείται.
- 2. Μορφοποίηση με πρέσα εν θερμώ (hotpressmolding).** Οι τεχνικές είναι δυο και στηρίζονται στην χρήση θερμαινόμενου καλουπιού. Η πρώτη απαιτεί προδιαμόρφωση του συνθέτου και η δεύτερη μορφοποίηση συμπίεσης προεμποτισμένων φύλλων του συνθέτου υλικού.
 - **Μορφοποίηση προ-διαμορφωμένων εξαρτημάτων (Pre-formmolding).** Το στάδιο της προδιαμόρφωσης αρχίζει με τον ψεκασμό των κοντών ινών πάνω σε ένα διάτρητο μεταλλικό εκμαγείο που έχει το τελικό σχήμα του εξαρτήματος (Σχήμα 4.7a). Στο διάτρητο αυτό εκμαγείο γίνεται αναρρόφηση ώστε να μένουν οι ίνες στην θέση τους. Στη συνέχεια ψεκάζεται μικρή ποσότητα ρητίνης πάνω στις ίνες. Αφού ολοκληρωθεί ο ψεκασμός της ρητίνης, το προ-διαμορφωμένο εξάρτημα απομακρύνεται από το εκμαγείο και τοποθετείται σε φούρνο για μερικά λεπτά για να γίνει έτσι η θέρμανση του και η αρχική στερεοποίηση. Είναι δυνατόν αντί για κοντές ίνες στο στάδιο αυτό να χρησιμοποιηθεί και ύφασμα συνεχών ινών.

Η διαδικασία της μορφοποίησης ολοκληρώνεται στο δεύτερο και τελικό στάδιο όπου το προκατασκευασμένο κομμάτι μεταφέρεται σε ένα θερμαινόμενο μικτό καλούπι (Σχήμα 4.7b). Το καλούπι είναι επικαλυμμένο με κάποια αντικολλητική ουσία για την εύκολη απομάκρυνση του εξαρτήματος. Στο επάνω μέρος του εξαρτήματος τοποθετείται ρητίνη, το καλούπι κλείνει και ασκείται πίεση. Τώρα η ρητίνη συμπιέζεται από το καλούπι επικαλύπτει όλη την επιφάνεια του εξαρτήματος.



Σχήμα 4.7: Μορφοποίηση προ- διαμορφωμένων εξαρτημάτων (Pre- formmolding).

- **Η μορφοποίηση με συμπίεση (compressionmolding).** Η διαμόρφωση λαμβάνει χώρα με την ταυτόχρονη θέρμανση και λιώσιμο του πολυμερούς (εάν πρόκειται για θερμοπλαστικό) και την ροή του στα τοιχώματα του καλούπιού. Αρχικά το καλούπι θερμαίνεται στην απαραίτητη για την διαμόρφωση θερμοκρασία. Για θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή αυτή κυμαίνεται από 130-160°C. Κατόπιν τοποθετείται η επιθυμητή ποσότητα φύλλων σύνθετου υλικού στο κάτω μέρος του καλούπιού καλύπτοντας έτσι την επιφάνεια της κοιλότητας του καλούπιού κατά 60-70 % . Μετά κλείνει το καλούπι και εφαρμόζεται εξωτερική πίεση. Η πίεση αυτή αυξάνει με σταθερό ρυθμό έως ότου επιτευχθεί μια προκαθορισμένη που εξαρτάται από την περιεκτικότητα και την μορφή των ινών , την φύση και ρευστότητα της ρητίνης στην θερμοκρασία μορφοποίησης, καθώς και τη γεωμετρία της επιφάνειας του καλούπιού. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι τιμές της πίεσης κυμαίνονται από 1.5-35 MPa.

4.2.3 Χύτευση με μεταφορά ρητίνης (ResinTransferMolding- RTM)

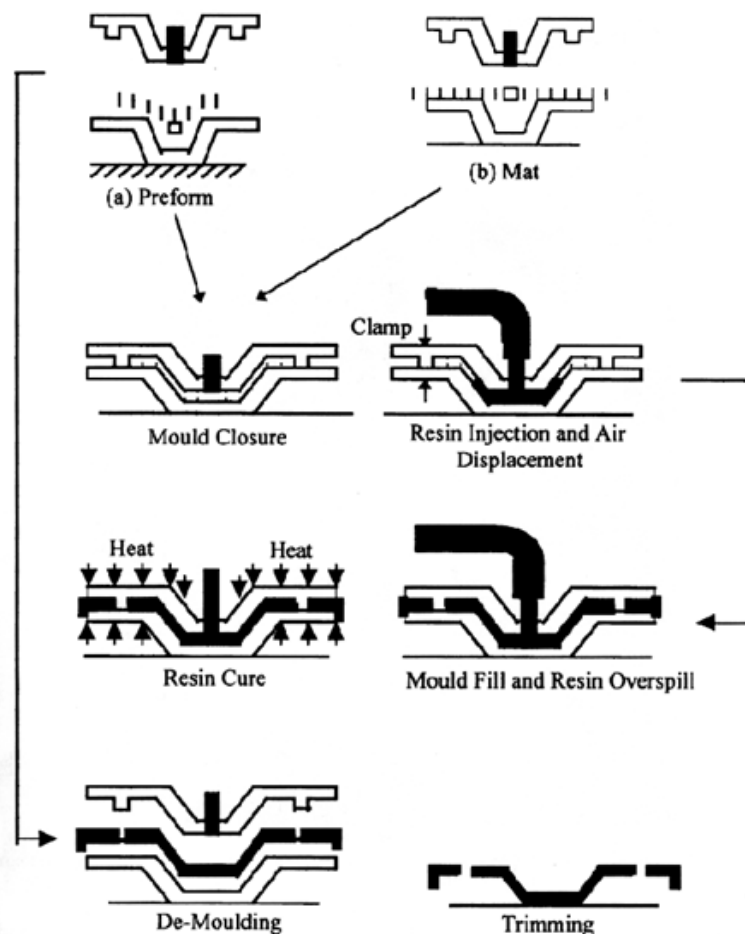
Στη μέθοδο αυτή η ρητίνη βρίσκεται σε κάποιο ξεχωριστό δοχείο και διοχετεύεται υπό πίεση μέσα στο κλειστό καλούπι μέσω αγωγών. Το καλούπι προετοιμάζεται κατάλληλα πριν την μεταφορά της ρητίνης, με την επίστρωση της ενίσχυσης και ενδεχομένως του gelcoat. Η ενίσχυση είναι δυνατόν να αποτελείται από ίνες κάθε είδους και μορφής (διάφοροι τύποι υφασμάτων από συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες). Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα να ψεκάσει η εσωτερική επιφάνεια του καλούπιού με κοντές ίνες οι οποίες συγκρατούνται στη θέση τους με την βοήθεια ειδικής κόλλας.

Είναι δυνατόν να γίνεται προ-ανάμειξη της ρητίνης με τον καταλύτη και τοποθέτηση στο δοχείο από όπου και θα μεταφερθεί στο καλούπι. Η άλλη δυνατότητα είναι να υπάρχουν ξεχωριστά δοχεία ρητίνης και καταλύτη και το μίγμα να μεταφέρεται στο καλούπι αφού προηγηθεί ανάμειξη σε ειδική ζώνη

ανάμειξης. Η πίεση μεταφοράς της ρητίνης στο καλούπι κυμαίνεται από 70 - 700 MPa. Στο καλούπι δημιουργείται κενό για να απομακρυνθεί ο αέρας από αυτό και να εξαλειφθούν έτσι τυχόν ατέλειες μορφοποίησης.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου RTM είναι:

- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού λόγω της χαμηλής πίεσης μορφοποίησης και χαμηλού κόστους πρώτων υλών
- Δυνατότητα μορφοποίησης πολύπλοκων σχημάτων με εξαιρετική ακρίβεια
- Πολύ καλή εξωτερική επιφάνεια σύνθετου
- Ελαχιστοποίηση ατελειών δομής
- Ελαχιστοποίηση δευτερογενών κατεργασιών στο εξάρτημα
- Δυνατότητα ενίσχυσης υλικού με ασάλινα νεύρα δυσκαμψίας
- Κατάλληλη για εξαρτήματα υψηλής τεχνολογίας.



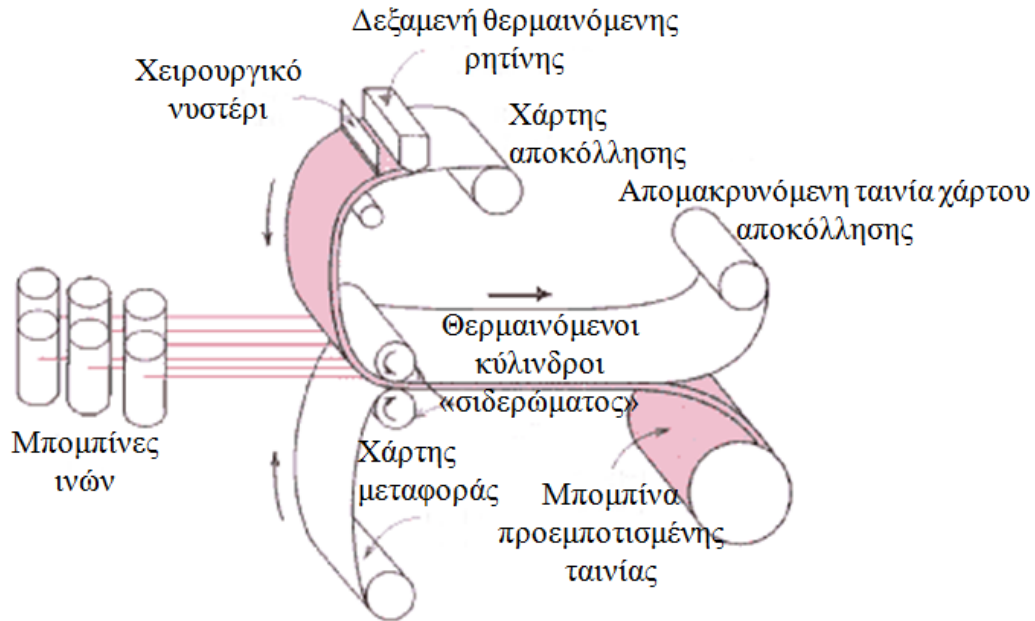
Σχήμα 4.8: Στάδια παραγωγής με τη μέθοδο χύτευσης με μεταφορά ρητίνης (RTM).

4.2.4 Μορφοποίηση προεμποτισμένης ταινίας (prepreg).

Η **προ-εμποτισμένη ταινία (prepreg)** είναι ο όρος που χρησιμοποιεί η βιομηχανία συνθέτων υλικών για μία συνεχή ενισχυτική ίνα προ-εμποτισμένη σε μία πολυμερή ρητίνη η οποία έχει μόνο μερικώς πολυμεριστεί. Αυτό το υλικό παραδίδεται σε μορφή ταινίας στον παραγωγό, ο οποίος κατόπιν μορφοποιεί άμεσα και πολυμερίζει πλήρως το υλικό χωρίς να χρειαστεί να προσθέσει καθόλου ρητίνη. Είναι ο τύπος συνθέτου υλικού που χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για δομικές εφαρμογές.

Η διαδικασία μορφοποίησης προεμποτισμένης ταινίας, η οποία αναπαρίσταται σχηματικά για τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή στο Σχήμα 4.9, ξεκινά με την παράλληλη ευθυγράμμιση σειρών από συνεχείς πλεξούδες ινών οι οποίες είναι περιελιγμένες σε μπομπίνες. Κατόπιν αυτές οι δέσμες ινών τοποθετούνται ενδιάμεσα και συμπιέζονται μεταξύ ταινιών χάρτου αποκόλλησης και μεταφοράς χρησιμοποιώντας θερμαινόμενους κυλίνδρους, μία διαδικασία η οποία ονομάζεται «σιδέρωμα». Ένα «χειρουργικό νυστέρι» απλώνει τη ρητίνη σε μορφή φιλμ ομοιόμορφου πάχους και πλάτους. Το τελικό προϊόν εμποτισμένης ταινίας- δηλαδή η λεπτή ταινία η οποία αποτελείται από συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες εμποτισμένες μέσα σε μία μερικώς πολυμερισμένη ρητίνη- προετοιμάζεται για πακετάρισμα με την περιέλιξή του πάνω σε ένα χαρτονένιο πυρήνα.

Σε θερμοκρασία δωματίου η θερμοσκληρυνόμενη μήτρα υφίσταται αντιδράσεις πολυμερισμού και για αυτό το λόγο η εμποτισμένη ταινία πρέπει να αποθηκεύεται στους 0 °C ή χαμηλότερα. Η πραγματική παραγωγή συνήθως αρχίζει με την «εναπόθεση» -δηλαδή την τοποθέτηση της προεμποτισμένης ταινίας πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού. Συνήθως, ένας αριθμός στρώσεων εναποτίθεται ώστε να παρέχουν το επιθυμητό πάχος. Η διάταξη εναπόθεσης μπορεί να είναι μονοαξονική αλλά συχνά ο προσανατολισμός της ίνας εναλλάσσεται ώστε να παραχθεί ένα σύνθετο υλικό με διασταυρωμένες ή διαγώνιες στρώσεις. Ο τελικός πολυμερισμός επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη εφαρμογή θερμοκρασίας και πίεσης.



Σχήμα 4.9: Παραγωγή προεμποτισμένης ταινίας (prepreg) με χρήση θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών [1].

4.2.5 Μορφοποίηση με έλξη

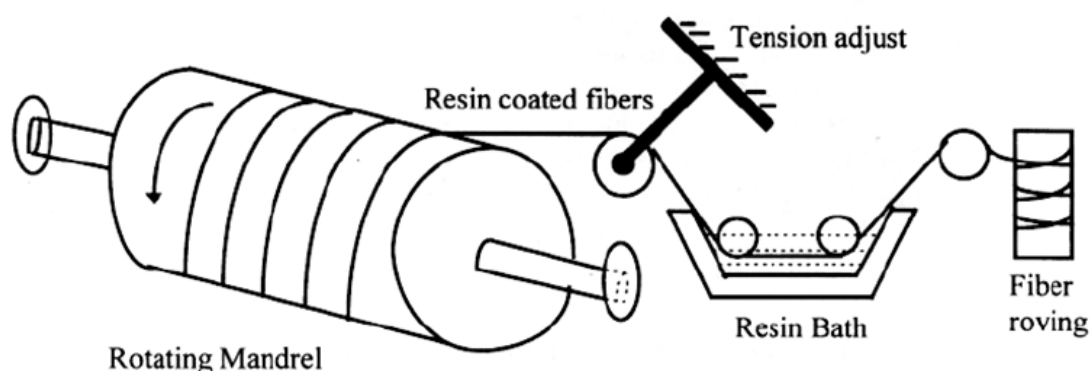
Η μορφοποίηση με έλξη χρησιμοποιείται για την παραγωγή εξαρτημάτων τα οποία έχουν συνεχή μήκη και σταθερό σχήμα διατομής (π.χ. καλάμια, σωλήνες, δοκοί, κλπ.). Με αυτή την τεχνική, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10, συνεχείς πλεξούδες ινών ή δέσμες ινών, πρώτα εμποτίζονται με μία θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Αυτές μετά έλκονται διαμέσου ενός ασάλινου θερμαινόμενου καλουπιού το οποίο έχει μορφοποιηθεί από πριν στο επιθυμητό σχήμα και επίσης εξασφαλίζει την σωστή αναλογία του λόγου ρητίνη/ίνα. Μία συσκευή έλξης τραβάει το σύνθετο υλικό δια μέσου των καλουπιών και επίσης προσδιορίζει έτσι την ταχύτητα παραγωγής. Σωλήνες και κοίλα τμήματα μπορούν να παραχθούν χρησιμοποιώντας κεντρικούς άξονες στήριξης στο καλούπι ή εισάγοντας κοίλους πυρήνες. Η μέθοδος μορφοποίησης με έλξη είναι μια συνεχής διαδικασία η οποία μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής που την καθιστά οικονομικά πολύ αποδοτική. Επιπλέον υπάρχει μεγάλη ποικιλία σχημάτων και δεν υπάρχει κάποιο όριο ως προς το μήκος του παραγόμενου υλικού.



Σχήμα 4.10: Μορφοποίηση με έξη

4.2.6 Μορφοποίηση με περιέλιξη ινών (filamentwinding)

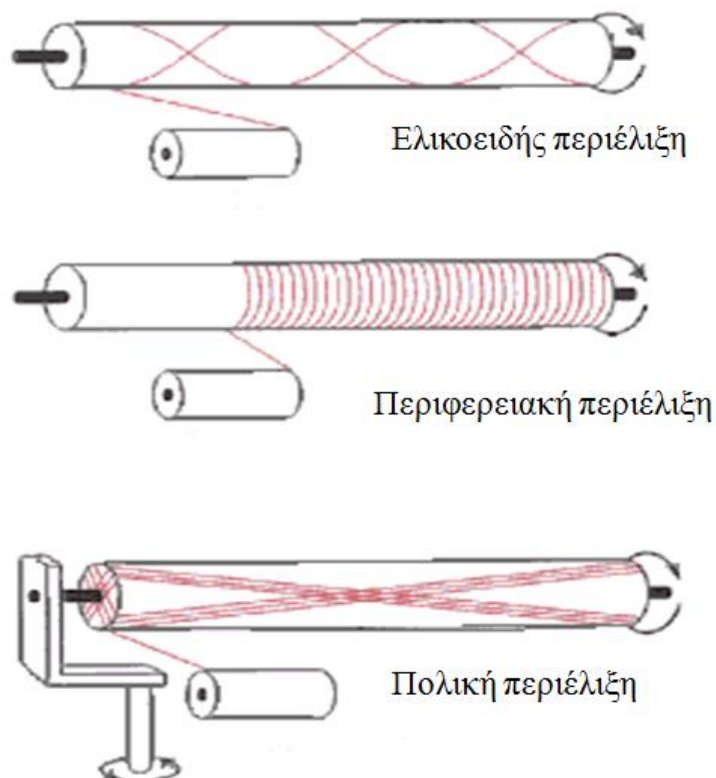
Η μέθοδος της περιέλιξης προσφέρεται για την παραγωγή αξισυμμετρικών σχημάτων όπως δεξαμενών καυσίμου για πυραυλικούς φορείς, δοχείων πίεσης, δεξαμενών αποθήκευσης αερίου κλπ. Η μορφοποίηση με περιέλιξη ινών είναι μία διαδικασία με την οποία συνεχείς ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται επακριβώς σε ένα προκαθορισμένο μοτίβο για να σχηματίσουν ένα κοίλο (συνήθως κυλινδρικό) σχήμα. Οι ίνες είτε σαν ανεξάρτητες πλεξούδες ή σαν δέσμες πρώτα οδηγούνται σε ένα λουτρό ρητίνης και μετά περιελίσσονται συνεχώς πάνω σε ένα κύλινδρο συνήθως χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένες συσκευές περιέλιξης. Μετά την εναπόθεση του κατάλληλου αριθμού στρώσεων, ο πολυμερισμός διεξάγεται είτε σε φούρνο είτε στη θερμοκρασία δωματίου και μετά απομακρύνεται ο κύλινδρος περιέλιξης. Μια γενική άποψη της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Γενική άποψη διαδικασίας περιέλιξης ινών.

Διάφορα μοτίβα περιέλιξης είναι δυνατά (π.χ. περιφερειακά, ελικοειδή και πολικά) ώστε να δώσουν τα επιθυμητά μηχανικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 4.12). Τα εξαρτήματα από περιελιγμένες ίνες έχουν πολύ υψηλούς λόγους αντοχής ως προς το βάρος. Επίσης ένας μεγάλος βαθμός ελέγχου όσον αφορά την ομοιομορφία στην περιέλιξη και τον προσανατολισμό είναι δυνατός

με αυτή την τεχνική. Επιπλέον, όταν η μορφοποίηση αυτοματοποιηθεί, η διαδικασία είναι πάρα πολύ ελκυστική από οικονομικής πλευράς. Συνήθεις κατασκευές από περιελιγμένες ίνες περιλαμβάνουν καλύμματα για μηχανές πυραύλων, γάστρες αποθήκευσης και σωλήνων και τέλος τα δοχεία πίεσης.



Σχήμα 4.12: Σχηματικές αναπαραστάσεις ελικοειδούς, περιφερειακής και πολικής περιέλιξης νήματος.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της περιέλιξης των ινών στο σύνθετο είτε με την ελικοειδή είτε με την πολική περιέλιξη, ολόκληρο το τύμπανο μπαίνει σε κλίβανο για να πολυμεριστεί η ρητίνη. Αφού ολοκληρωθεί και ο πολυμερισμός πρέπει να αφαιρεθεί το τύμπανο που είναι τώρα πια καλυμμένο από το εξάρτημα. Είναι σημαντικό τόσο στην πολική όσο και στην ελικοειδή περιέλιξη οι δυο πόλοι του εξαρτήματος να παραμένουν ανοιχτοί ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του τύμπανου μετά το πέρας της μορφοποίησης. Βέβαια πρέπει και η κατασκευή του τύμπανου να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την εύκολη απομάκρυνσή του π.χ. την τμηματική αφαίρεσή του. Τα τύμπανα της περιέλιξης πρέπει να αντέχουν τις υψηλές θερμοκρασίες του πολυμερισμού και τις τάσεις της περιέλιξης και να είναι άκαμπτα.

4.2.7 Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheetmoldingprocess, SMC)

Πρόκειται για σχετικά νέα τεχνική, με ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης που κινείται σε

λεπτό φιλμ πολυαιθυλενίου. Δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται με όμοιο τρόπο πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich υλικό με πυρήνα τις ενισχυτικές ίνες. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει τυλίσσεται σε ρολούς και αφήνεται να στερεοποιηθεί από 1 έως 4 ημέρες, οπότε και επιτυγχάνεται καλή συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας. Μετά το πέρας της διαμόρφωσης, η πλάκα συνθέτου κόβεται σε επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό μεταλλικό καλούπι, σε θερμοκρασία περίπου 150 °C, όπου εφαρμόζεται υδραυλική πίεση και το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν. Τα προϊόντα της μεθόδου έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια.

4.2.8 Μορφοποιήσεις με διατάξεις συνεχούς παραγωγής

Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι παραγωγής συνθέτων υλικών πλήρως αυτοματοποιημένες, που προσφέρονται όταν οι χρόνοι μορφοποίησης πρέπει να είναι οι ελάχιστοι δυνατοί και ο όγκος παραγωγής μέγιστος. Οι τεχνικές αυτές είναι λίγο έως πολύ γνωστές από την βιομηχανία παραγωγής πλαστικών, με την διαφορά όμως ότι έχουν γίνει οι απαραίτητες αλλαγές και προσαρμογές για την παραγωγή σύνθετων υλικών. Οι τεχνικές αυτές είναι εντελώς αυτόνομες διατάξεις συνεχούς παραγωγής και δεν χρειάζεται επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα παρά μόνον στην τροφοδοσία των πρώτων υλών και στον τελικό ποιοτικό έλεγχο. Χαρακτηρίζονται δε από τη μεγάλη ευελιξία ως προς την ποικιλία των παραγομένων σχημάτων, την μεγάλη ταχύτητα και όγκο παραγωγής. Η ευελιξία στην παραγωγή πηγάζει από το γεγονός ότι και εδώ το βασικό εργαλείο της μορφοποίησης είναι ένα καλούπι που μπορεί να αλλάξει και να προσαρμοστεί κάποιο άλλο.

4.2.8.1 Εξώθηση

Η εξώθηση είναι μια πολύ σημαντική διεργασία μορφοποίησης διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για πολλές άλλες τεχνικές διαμόρφωσης σύνθετων υλικών. Στην εξώθηση το πολυμερές εξαναγκάζεται να περάσει από ένα καλούπι που διαμορφώνει το τελικό του σχήμα. Η διαδικασία συνίσταται στην ομογενοποίηση του υλικού μέσα σε ένα σύστημα κοχλία και στην διαμόρφωσή του σε ειδικό καλούπι.

Η πρώτη υλη που είναι συνήθως κόκκοι πολυμερούς διοχετεύεται μέσω μιας χοάνης στο εσωτερικό της συσκευής εξώθησης. Εκεί με την βοήθεια της συμπίεσης που γίνεται από τον περιστρεφόμενο κοχλία, της θερμότητας που παράγουν εξωτερικά θερμαντικά στοιχεία και της τριβής λόγω βισκώδους ροής επέρχεται η ομογενοποίηση του. Κατόπιν το πολυμερές περνά από ειδικά μηχανικά φίλτρα όπου κατακρατούνται ξένα σώματα και τυχόν μη λειωμένα κομμάτια πλαστικού. Ύστερα διοχετεύεται μέσα από το καλούπι όπου και αποκτά την τελική μορφή του.

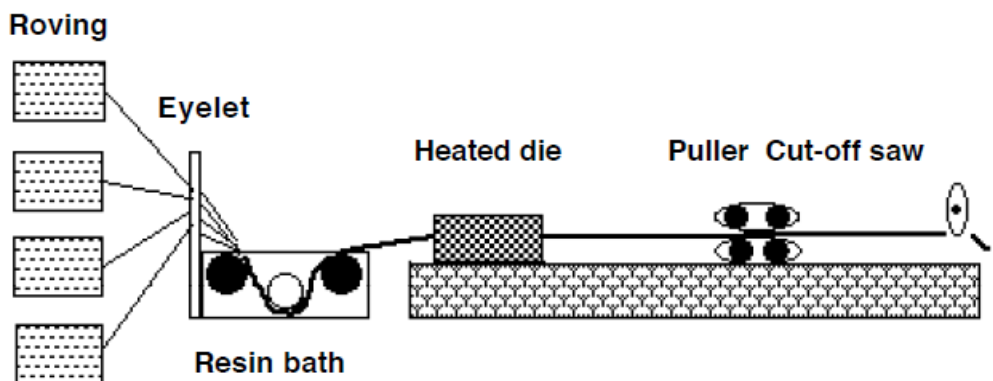
4.2.8.2 Η Μορφοποίηση Με Έγχυση (InjectionMolding)

Είναι η πιο κοινή μέθοδος μορφοποίησης για εξαρτήματα ευρείας καταπόνησης. Με αυτή την τεχνική κατασκευάζονται αντικείμενα όπως κουτιά τηλεοπτικών συσκευών, χτένες, σύριγγες, τηλεφωνικές συσκευές, οδοντόβουρτσες, κάτοπτρα, κράνη, οδοντωτοί τροχοί κλπ. Η τεχνική είναι εμπνευσμένη από την κλασική μεταλλουργία όπου τήγμα μετάλλου εγχύεται σε καλούπια πίεσης.

Η διαδικασία μορφοποίησης είναι απλή. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται σκόνη ή κόκκοι (granules) πολυμερούς (συνήθως θερμοπλαστικού) προενισχυμένου με ίνες ή αναμειγμένου με άλλο πολυμερές ή ελαστομερές. Είναι δυνατόν μάλιστα οι κόκκοι αυτοί να έχουν παραχθεί με εξώθηση στο αρχικό στάδιο. Η τροφοδοσία της πρώτης ύλης γίνεται μέσω μιας χοάνης. Στο εσωτερικό της συσκευής επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση και το λιώσιμο του πολυμερούς. Εν τη συνεχεία το υγρό πλαστικό διοχετεύεται μέσω ενός στομίου σε ένα θερμαινόμενο/ ψυχόμενο καλούπι. Αφού στερεοποιηθεί ύστερα από κάποιο χρόνο το εξάρτημα το καλούπι ανοίγει, το εξάρτημα απομακρύνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

4.2.9 Μορφοποίηση Με Εμβάπτιση (Pultrusion)

Η εμβάπτιση είναι μια βιομηχανοποιημένη διαδικασία για την παραγωγή συνεχών ινών μεγάλου μήκους. Τα απαιτούμενα υλικά είναι το υγρό μίγμα ρητίνης (ρητίνη, πληρωτικό υλικό και ειδικά πρόσθετα) και οι ίνες ενίσχυσης. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον εφελκυσμό των ακατέργαστων υλικών διαμέσου ενός θερμαινόμενου χαλύβδινου καλουπιού, χρησιμοποιώντας μια συσκευή συνεχόμενου εφελκυσμού. Τα ενισχυτικά υλικά έχουν συνεχή μορφή όπως ρολό πλεγμένου υαλοβάμβακα. Καθώς οι ίνες ενίσχυσης έχουν κορεστεί από τον διαποτισμό με το μίγμα της ρητίνης και εφελκύνονται μέσω του καλουπιού, αρχίζει η διαδικασία της σκλήρυνσης της ρητίνης από την θερμότητα του καλουπιού. Έτσι σχηματίζεται ένα άκαμπτο προφίλ που αντιστοιχεί στο σχήμα του καλουπιού. Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζεται σχηματικά μια διάταξη εμβάπτισης.



Σχήμα 4.13: Σχηματική αναπαράσταση μηχανής εμβάπτισης[22]

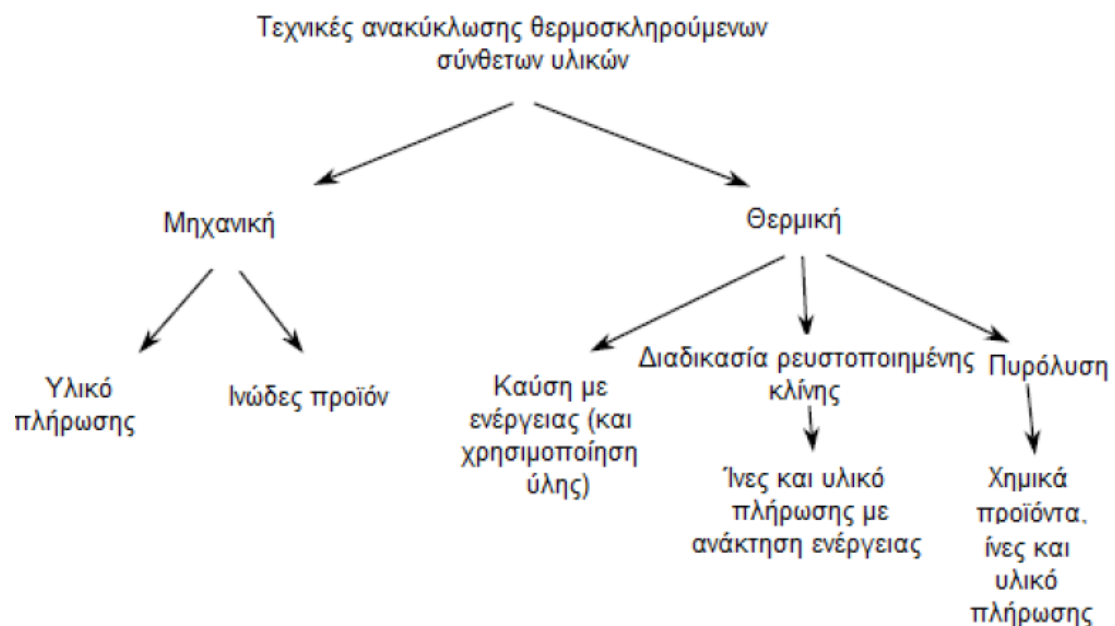
4.3 Ανακύκλωση σύνθετων πολυμερών

Η δυσκολία ανακύκλωσης των σύνθετων πολυμερών είναι το πιο αδύνατο σημείο στην κατά τα άλλα ευρύτατη εφαρμογή τους, λόγω των καλών ιδιοτήτων τους. Ειδικά τα σύνθετα υλικά που έχουν παραχθεί από θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι πολύ δύσκολο να ανακυκλωθούν εξαιτίας των ισχυρών δεσμών που έχουν αναπτυχθεί κατά την θέρμανσή τους. Για πολλά χρόνια τα σύνθετα υλικά διοχετεύονταν σε χωματερές. Όμως με πρόσφατη οδηγία της ΕΕ (οδηγία 99/31/ΕΚ)[16], σε πολλές χώρες της Ευρώπης είναι ήδη παράνομη η υγειονομική ταφή των σύνθετων υλικών. Άλλες οδηγίες της ΕΕ αναφέρονται σε ιδιαίτερες κατηγορίες αποβλήτων, όπως για παράδειγμα η οδηγία «Τέλος του κύκλου ζωής των αυτοκινήτων» (οδηγία 2000/53/ΕΕ), που ορίζει ως ανώτατο όριο που μπορεί να διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής το 5% του βάρους του οχήματος, το 10% μπορεί να χρησιμοποιείται για ανάκτηση ενέργειας, ενώ το 85% πρέπει να επαναχρησιμοποιείται ή να ανακυκλώνεται. Ήδη από το 2007, είναι ευθύνη της κατασκευάστριας εταιρίας ο τρόπος διάθεσης του οχήματος.

Είναι πλέον σαφές ότι οι παραδοσιακοί τρόποι διαχείρισης απορριμμάτων, όπως η υγειονομική ταφή και η καύση τείνουν να εκλείψουν στο μέλλον, ως συνέπεια της θεσμοθέτησης αυστηρότερων κανόνων σχετικά με την ανακύκλωση και των σύνθετων υλικών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι τεχνολογίες ανακύκλωσης σύνθετων υλικών.

4.3.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης θερμοσκληρυνόμενων Υλικών

Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης που έχουν αναπτυχθεί για αυτή τη κατηγορία υλικών είναι ουσιαστικά δύο, η μηχανική λειοτρίβηση και οι θερμικές διεργασίες, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14: Τεχνικές ανακύκλωσης Θερμοσκληρυνόμενων Σύνθετων υλικών[24].

4.3.1.1 Μηχανική ανακύκλωση

Οι **μηχανικές τεχνικές** ανακύκλωσης έχουν διερευνηθεί εκτεταμένα για σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού. Συνήθως, το πρώτο στάδιο είναι η θραύση των υπολειμμάτων σε κομμάτια της τάξης μεγέθους 50-100 mm, ώστε να διευκολυνθεί η απομάκρυνση των μεταλλικών στοιχείων και να μειωθεί ο όγκος των αποβλήτων. Η κύρια φάση μείωσης του όγκου περιλαμβάνει θραύση του υλικού σε μέγεθος μικρότερο από 50mm και ταξινόμηση σε κοκκομετρικά κλάσματα με χρήση κόσκινου. Από τη διαδικασία αυτή προκύπτει ότι τα πιο λεπτομερή κλάσματα είναι εμπλουτισμένα σε πολυμερές και υλικό πλήρωσης, ενώ τα πιο αδρόκοκκα τείνουν να έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα της ινώδους φάσης. Η αξιοποίηση των ανακυκλωμένων υλικών έχει διερευνηθεί και έχουν γίνει αρκετές προτάσεις εφαρμογών. Για παράδειγμα, το υλικό που προκύπτει υπό μορφή σκόνης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του ανθρακικού ασβεστίου πλήρωσης στα BMC και SMC³ σύνθετα, αφού μια μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων της τάξης του 10% είναι ανεκτή. Από την άλλη, η χρήση κλασμάτων με ινώδη φάση ως πληρωτικό υλικό είναι πιο δύσκολη, αφού φαίνεται να παρουσιάζει μειωμένες μηχανικές αντοχές. Από άλλη μελέτη, φαίνεται ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μερικώς ανακυκλωμένες ίνες σε σύνθετα τύπου BMC, αρκεί οι ανακυκλωμένες ίνες να έχουν μεγαλύτερο μήκος από τις αρχικές. Άλλη έρευνα εξετάζει πλήθος εφαρμογών των ανακυκλωμένων θερμοσκληρυνόμενων στην οικοδομική βιομηχανία.

4.3.1.2 Θερμική ανακύκλωση

1. Καύση με Ανάκτηση Ύλης και Ενέργειας

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή έχουν μεγάλη θερμογόνο ισχύ και με την καύση τους μπορεί να παραχθεί ενέργεια. Η θερμογόνο αξία ενός σύνθετου ενισχυμένου με ίνες γυαλιού εξαρτάται από την αναλογία πολυμερούς, αφού οι ίνες και τα συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά πλήρωσης είναι άκαυστα. Προκειμένου να ανακτηθεί κάποια αξία από τα άκαυστα υλικά, γίνεται καύση των απορριμμάτων σε κλίβανους τσιμέντου, αφού οι ίνες γυαλιού και τα μεταλλικά υλικά πλήρωσης περιέχουν μεταλλικά στοιχεία που μπορούν να ενσωματωθούν στο τσιμέντο. Το μόνο μειονέκτημα εντοπίζεται όταν υπάρχει βόριο στις ίνες γυαλιού, γιατί αυξάνει τους χρόνους σκλήρυνσης του τσιμέντου.

2. Ανάκτηση Ινών Με Θερμική Διεργασία Ρευστοποιημένης Κλίνης

Η ίνα ενίσχυσης έχει δυνητικά την μεγαλύτερη αξία σε ότι αφορά την ανάκτηση ύλης από σύνθετα υλικά. Η διαδικασία ανάκτησης ινών γυαλιού (ή άνθρακα) έχει ως εξής: Αρχικά το απόρριμμα θραύεται και τοποθετείται σε ρευστοποιημένη κλίνη με άμμο του πυριτίου. Η άμμος ρευστοποιείται με

³Bulk Molding Compounds (BMC) και Sheet Molding Compounds (SMC) είναι και τα δύο ινοενισχυμένα υλικά, με ίνες γυαλιού διαφόρων μηκών. Τα SMC περιέχουν ελαφρώς μακρύτερες ίνες από τα BMC και έχουν υψηλότερο ποσοστό ινών ενίσχυσης από τα BMC[25].

θερμό αέρα και οι ίνες και το υλικό πλήρωσης αποδεδειγμένα από το σύνθετο και συλλέγονται. Ενώ το πολυμερές υποβάλλεται σε επιπλέον καύση με υψηλότερη θερμοκρασία. Από μετρήσεις φαίνεται ότι οι ανακυκλωμένες ίνες γυαλιού εμφανίζουν 50% μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά διατηρούν την ίδια ακαμψία σε σύγκριση με τις πρωτογενείς ίνες, όταν η διεργασία εκτελείται στους 450 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η μείωση της αντοχής είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Οι πλέον υποσχόμενες εφαρμογές για τις ανακυκλωμένες ίνες είναι αυτές που απαιτούν κοντές ίνες σε μορφή διασποράς[24].

3. Πυρόλυση

Κατά την πυρόλυση η καύσιμη ύλη θερμαίνεται απουσία οξυγόνου. Οι οργανικές ύλες διασπώνται σε ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους (υγρά και αέρια) και παράγεται κατάλοιπο στερεού άνθρακα. Η πυρόλυση προσφέρει την δυνατότητα ανάκτησης ύλης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω χημική επεξεργασία. Η σύνθεση των υγρών και στερεών προϊόντων τα καθιστά ικανά να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή ως χημικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Πειραματικό μέρος

5.1 Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Το υλικό το οποίο μελετούμε στη παρούσα πτυχιακή είναι σύνθετο αποτελούμενο από μήτρα εποξικής ρητίνης (epoxyresin) και ο σπλισμός του είναι ύφασμα γυαλιού (glasswoven) τύπου E-glass.

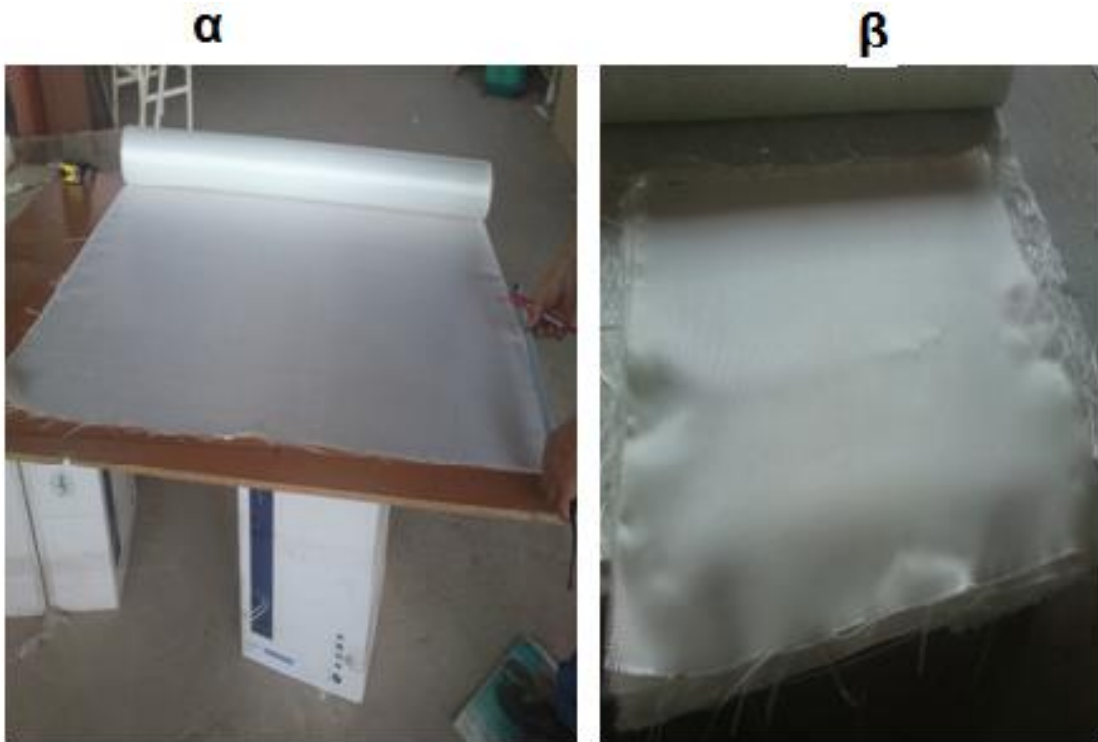
Το σύνθετο υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν τα δοκίμια GFRE (Glass Fiber Reinforced Epoxy) αποτελείται από εννέα (9) στρώσεις υαλοϋφάσματος interglass 60x45, συνολικού πάχους 3,3mm και βάρους 290 g/m². Οι στρώσεις συγκολλούνται μεταξύ τους με epoxyresin (LF), η οποία έχει αναμειχθεί με σκληρυντή (LF1).

5.2 Περιγραφή κατασκευής υλικού

Η κατασκευή του υλικού πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου στο εργαστήριο του κ. Ατζολετάκη, στη βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου, υπό τις οδηγίες του και με τη σημαντική βοήθειά του. Στη κατασκευή του υλικού συμμετείχε και ο συνάδελφός μου, φοιτητής της Μηχανολογίας, Προκοπάκης Γιώργος, ο οποίος χρησιμοποίησε ένα μέρος του υλικού για τις δοκιμές αντοχής σε θλίψη που έκανε στα πλαίσια της πτυχιακής του εργασίας.

Διαδικασία κατασκευής:

1. Από το ρολό του υαλοϋφάσματος κόβουμε τα απαιτούμενα κομμάτια, ίσα με τις διαστάσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε, σημειώνοντας την κύρια διεύθυνση των ινών.



Σχήμα 5.1 (α) Ρολό υαλοϋφάσματος (β) Κομμάτι στις διαστάσεις που επιλέξαμε

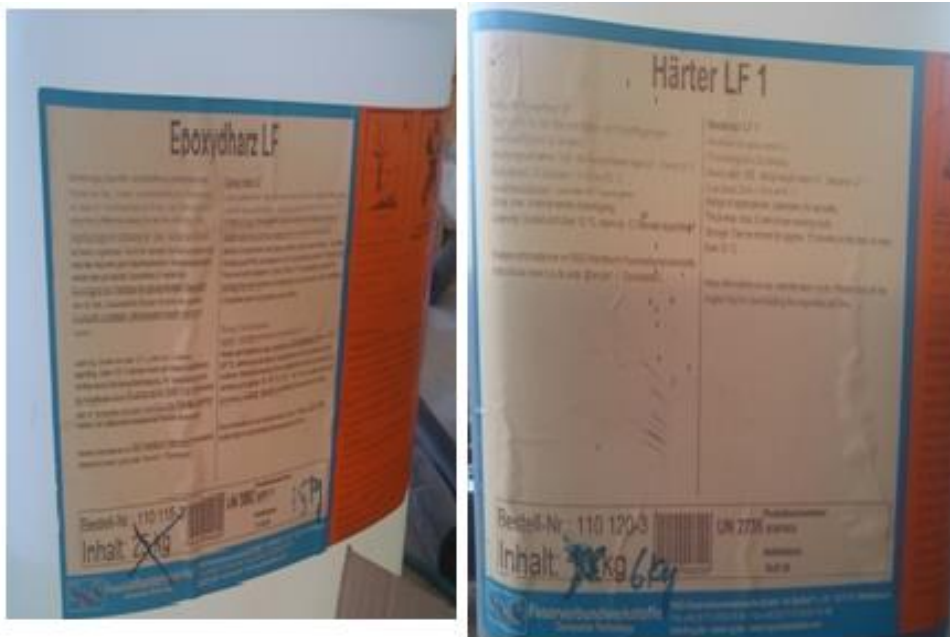
2. Για να αποκτήσει το υλικό μας λεία επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε ως βάση της κατασκευής επιφάνεια μελαμίνης χωρίς ρωγμές και εξογκώματα, διότι η ύπαρξή τους επηρεάζει την μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Πάνω στη βάση που επιλέχθηκε σημαδέψαμε τις διαστάσεις της πλάκας που θα κατασκευάσουμε.



Σχήμα 5.2: Επιφάνεια βάσης κατασκευής

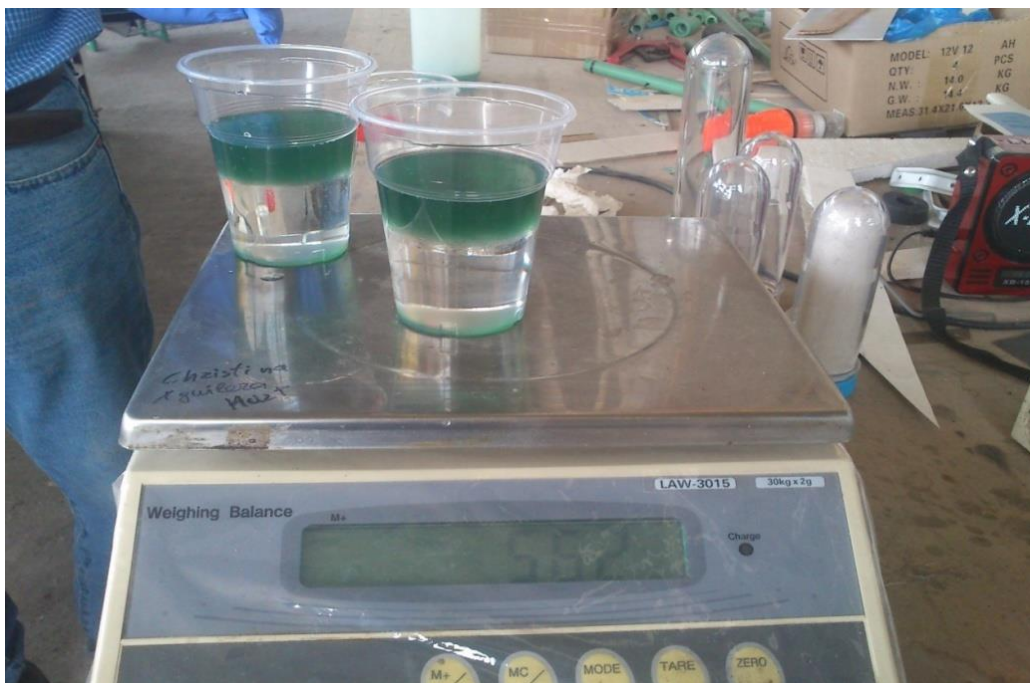
Στην επιφάνεια της βάσης κατασκευής έγινε επάλειψη με κερί, πάνω σε σφουγγάρι, με κυκλικές κινήσεις. Έπειτα το κερί σκουπίστηκε με χαρτί, επίσης με κυκλικές κινήσεις, και στη συνέχεια τοποθετήθηκε αποκολλητικό υγρό πάνω στη βάση με το κερί, ώστε να μην κολλήσει η πλάκα στη μελαμίνη.

3. Προετοιμάστηκε το υλικό της μήτρας με ανάμειξη εποξικής ρητίνης LF (Epoxy Resin) και σκληρυντή HARTER LF1 σε αναλογία βάρους 100/40.



Σχήμα 5.3: Εποξική ρητίνη LF και σκληρυντή HARTER LF1

Οι ποσότητες των υλικών υπολογίστηκαν με ζυγό ακριβείας.



Σχήμα 5.4: Ζυγαριά ακριβείας, ζύγιση των υλικών

Στη συνέχεια έγινε ισχυρή ανάδευση του μίγματος, ώστε να επιτευχθεί ομοιογένεια του υλικού. Μετά την ανάδευση ακολούθησε διήθηση του μίγματος μέσω κατάλληλου πορώδους υφάσματος και μεταφορά του σε άλλο δοχείο για να απομακρυνθούν οι φυσαλίδες. Οι τελευταίες μπορεί να δημιουργήσουν πολύ σημαντική επίπτωση στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού, με τη δημιουργία κενών στη διεπιφάνεια μεταξύ των ινών και του υλικού της ρητίνης.



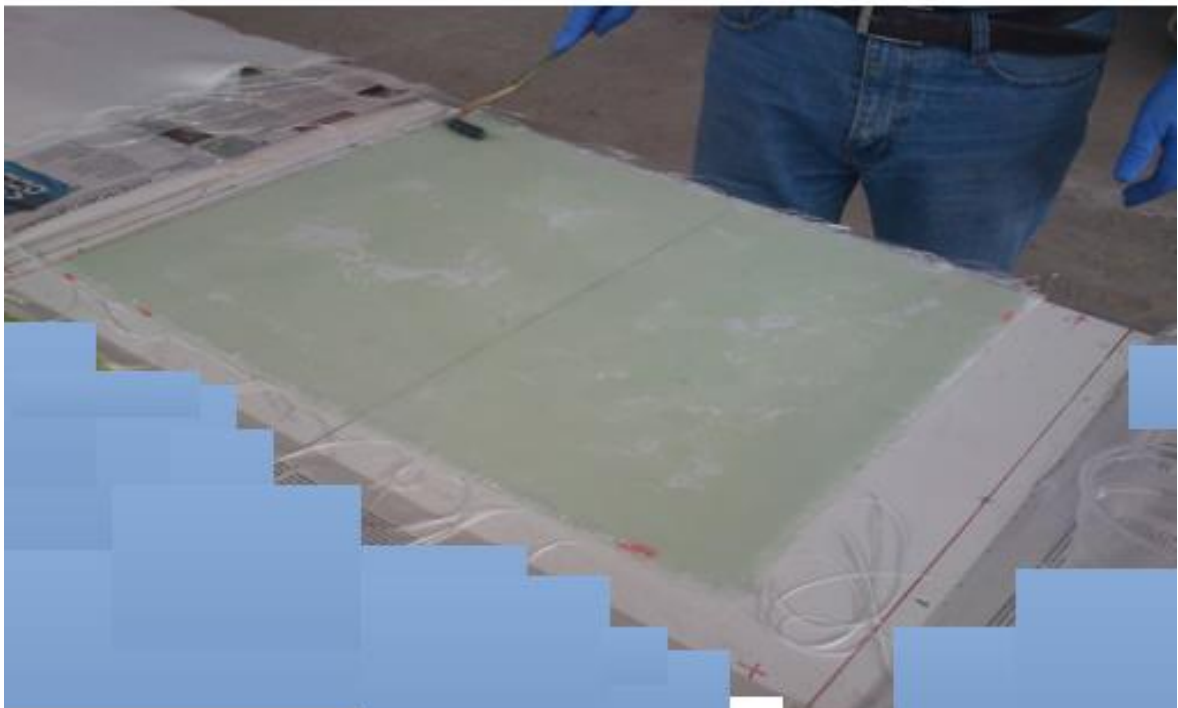
Σχήμα 5.5: Διήθηση μίγματος για την απομάκρυνση φυσαλίδων.

4. Το μίγμα της ρητίνης, μετά την προετοιμασία που περιγράφηκε παραπάνω, εφαρμόζεται στην επιφάνεια του καλουπιού και αρχίζει η επάλειψη του υαλοϋφάσματος με ειδικό βουρτσάκι. Λόγω του χρονικού περιθωρίου μέχρι το κρίσιμο σημείο αύξησης του ιξώδους το υλικό αναμειγνύεται σε δόσεις.



Σχήμα 5.6: Επάλειψη του μίγματος ρητίνης στο υαλούφασμα

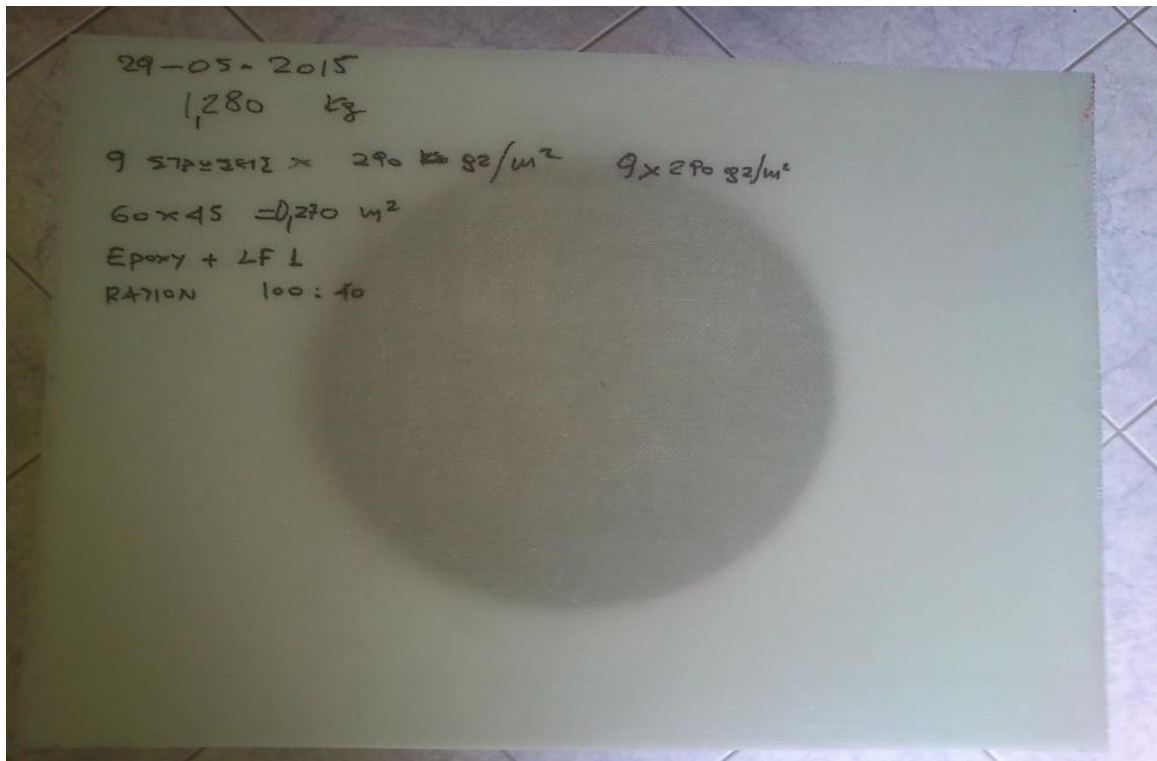
Για την αποφυγή εγκλεισμάτων αέρα ανάμεσα στις στρώσεις του υαλοϋφάσματος, αλλά και την κατάλληλη μεταφορά του μίγματος σε όλη την επιφάνεια εφαρμόζεται τοπική πίεση με τη βοήθεια ρολού.



Σχήμα 5.7; Εφαρμογή πίεσης με ρολό

Μετά την τοποθέτηση και των εννέα στρώσεων, η πλάκα αφέθηκε για 24 ώρες στην επιφάνεια πριν την αποκόλλησή της. Μετά το σύνθετο

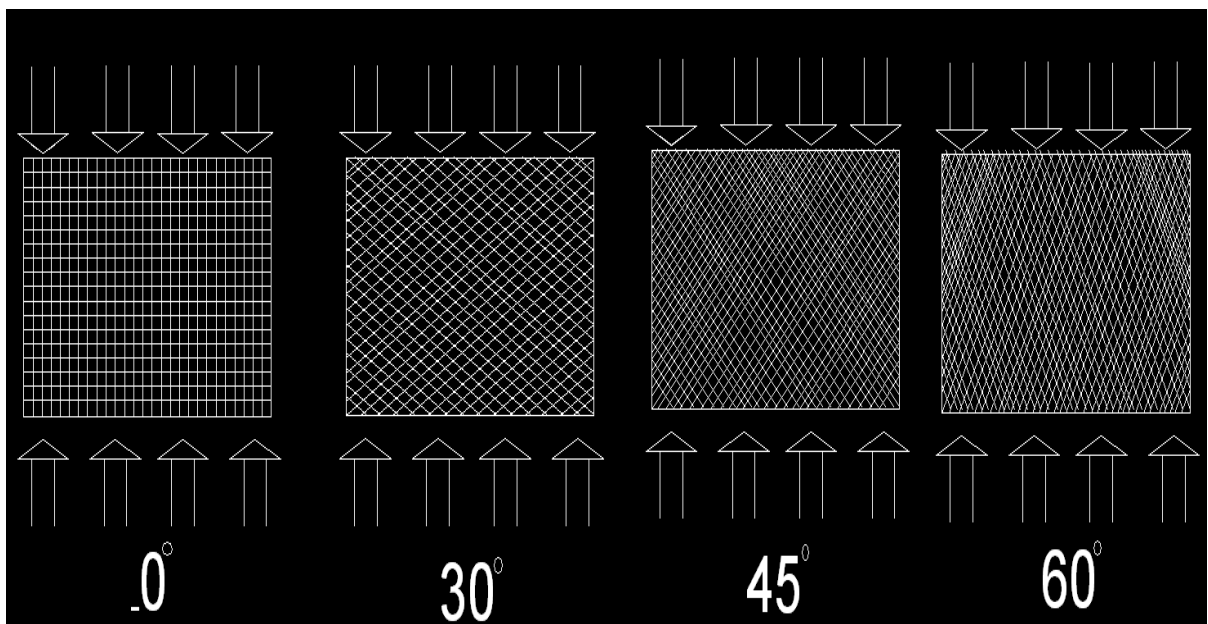
υλικάφέθηκε σε περιβαλλοντικές συνθήκες για μια εβδομάδα για να στεγνώσει και να αποκτήσει τη μέγιστη αντοχή.



Σχήμα 5.8: Πλάκα δοκιμών

5.3 Σχεδίαση και κοπή των δοκιμών

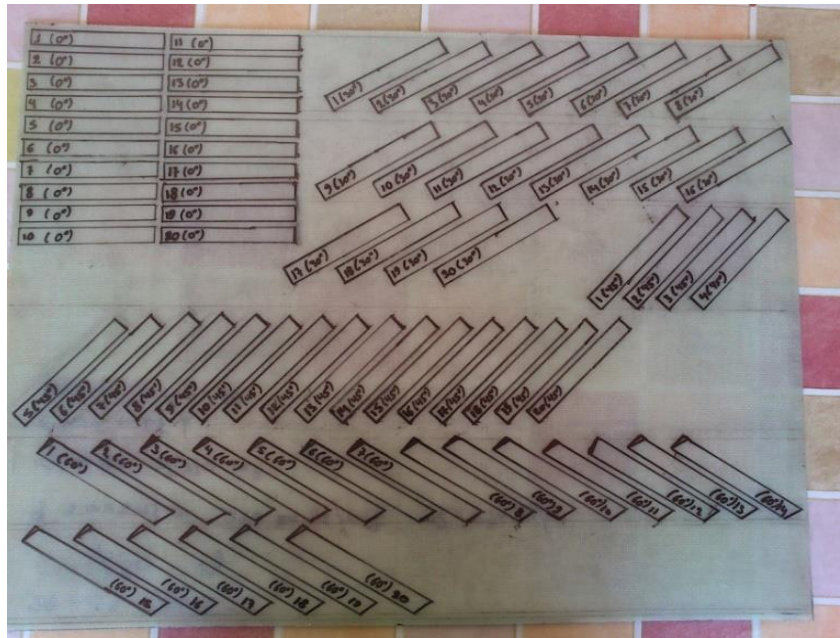
Οι προσανατολισμοί κοπής των δοκιμών που επιλέχθηκαν ήταν σε διευθύνσεις, σε σχέση με τις διευθύνσεις των ινών 0° , 30° , 45° και 60° .



Σχήμα 5.9: προσανατολισμός κοπής των δοκιμών

Σκοπός της επιλογής αυτής ήταν να βγάλουμε συμπεράσματα για την αντοχή και την ελαστικότητα των δοκιμών σε δοκιμασίες κάμψης τριών σημείων και

εφελκυσμού για αυτές τις διαφορετικές διευθύνσεις κοπής. Η σχεδίαση των δοκιμών έγινε με την καθοδήγηση του κ. Κονταξάκη στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας του Τ.Ε.Ι. Οι πλάκες σχεδιάστηκαν στο AutoCAD με την ακριβή μορφή των δοκιμών, καθώς και την ακριβή γωνία κοπής τους. στη συνέχεια η αποτύπωση αυτή μεταφέρθηκε πάνω στη πλάκα του υλικού.



Σχήμα 5.10: Σχεδιασμένη πλάκα δοκιμών

Η κοπή των δοκιμών από την σχεδιασμένη πλάκα έγινε στη βιοτεχνία Αφων Σπανού, με την πολύτιμη και ενεργή βοήθειά τους. Η βιοτεχνία αυτή διαθέτει σύστημα κοπής παρόμοιων υλικών, που είναι κατάλληλο λόγω της υψηλής ταχύτητας κοπής που δεν δημιουργεί εγκοπές στην επιφάνεια, οι οποίες θα επηρέαζαν σημαντικά τα αποτελέσματά μας.



Σχήμα 5.11: Κοπή δοκιμών

Τα δοκίμια μετά την αποκοπή τους ζυγίστηκαν με ζυγό ακριβείας και μετρήθηκαν με παχύμετρο. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν μεν για τη δοκιμασία κάμψης τριών σημείων (flexural test) σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-790 και δε για τη δοκιμασία εφελκυσμού (tensile test) σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-638. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε να γίνει μια παρέκκλιση από την ακριβή μορφή που περιγράφει το πρότυπο ASTM D-638 και η δοκιμασία να γίνει σε δοκίμια με μορφή λωρίδων. Αυτό συνέβη διότι οι διαθέσιμοι τρόποι κοπής ενείχαν τον κίνδυνο δημιουργίας οξειών γωνιών στα σημεία αλλαγής της διατομής που προβλέπει το πρότυπο, γεγονός που πιθανότατα θα οδηγούσε σε λανθασμένη μέτρηση της αντοχής. Είναι γνωστό ότι οι απότομες γωνίες λειτουργούν σαν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και οδηγούν σε πρόωρη αστοχία.

5.4 Μέθοδος και μηχανή μετρήσεων

Για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφελκυσμού-θλίψης του εργαστηρίου Τεχνολογίας Υλικών με κατάλληλη διαμόρφωσή της.



Σχήμα 5.12: (α) Διάταξη εφελκυσμού (β) Διάταξη κάμψης τριών σημείων

Η μηχανή εφελκυσμού αποτελείται από ένα υδραυλικό σύστημα της εταιρίας Schencktrebel. Το εφαρμοζόμενο φορτίο (load) μετριέται με τον αισθητήρα φορτίου (load cell)-τύπου GL6-2B με ευαισθησία ± 1 Kp, ακρίβειας $\pm 0,5\%$ και η μεταβολή μήκους με τον αισθητήρα μήκους (extensometer) τύπου SDP-50C με ακρίβεια $\pm 0,001$ mm και γραμμικότητα 0,2 Ro. Οι δύο αισθητήρες

συνδέονται με κατάλληλη κάρτα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη μεταφορά των δεδομένων μέτρησης φορτίου- μεταβολής μήκους. Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα LabView για την καταγραφή των δεδομένων. Κατά τη διάρκεια του πειράματος εμφανίζεται η εξέλιξη του στην οθόνη του υπολογιστή σε τρία διαγράμματα (Σχήμα 5.13) από το LabView.



Σχήμα 5.13: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής από το πρόγραμμα LabView.

Τα αρχεία καταγράφονται με τη μορφή αρχείων .txtτα οποία μεταφέρονται αρχικά στο excel ώστε να γίνει η κατάλληλη πρώτη επεξεργασία των δεδομένων. Στη συνέχεια μεταφέρονται στο πρόγραμμα OriginPro 8, για τη δημιουργία των διαγραμμάτων Φορτίου (load) σε N- Μεταβολής μήκους (displacement) σε mm.

Κεφάλαιο 6

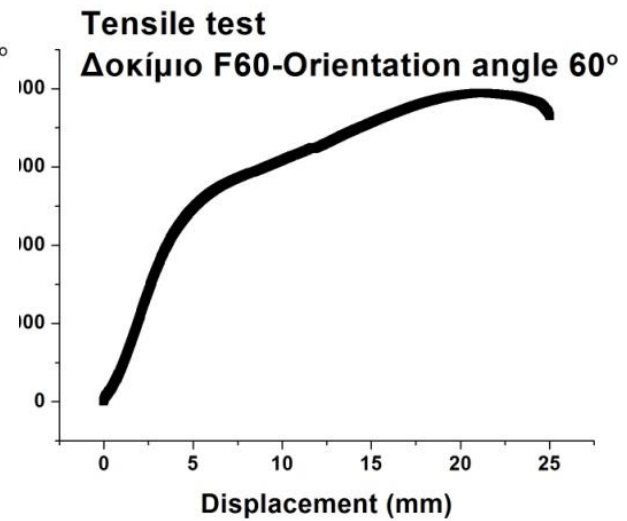
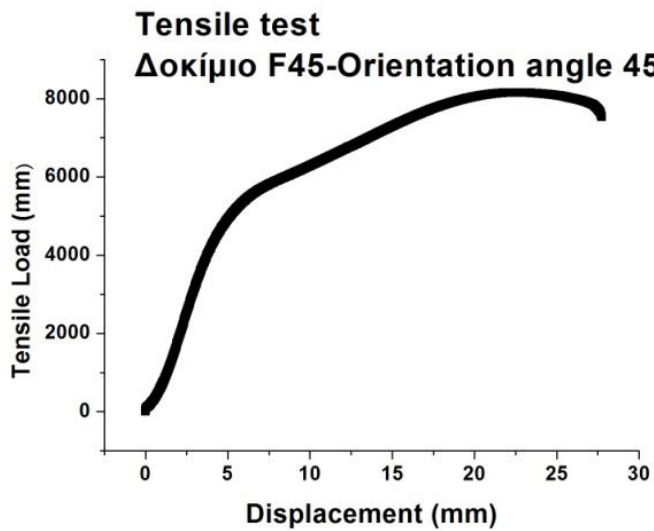
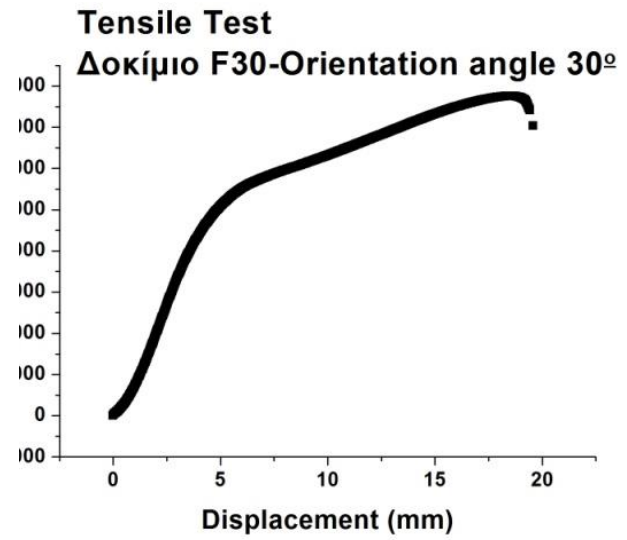
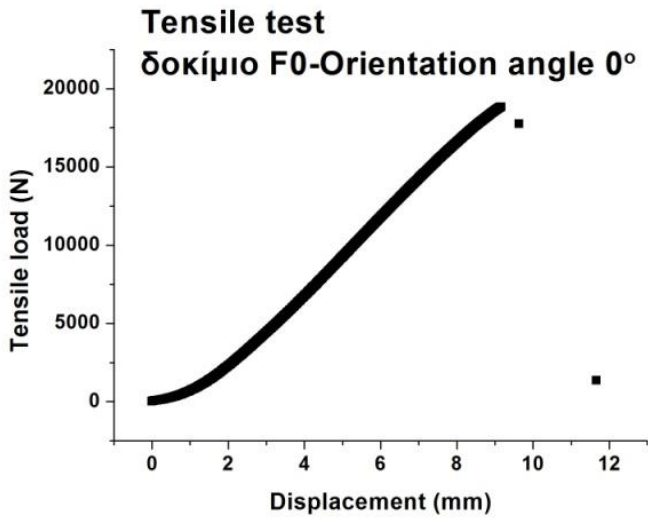
6. Αποτελέσματα– Συζήτηση αποτελεσμάτων

6.1 Αποτελέσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς σε κάμψη τριών σημείων και εφελκυσμό, δοκιμίων σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης ενισχυμένης με υαλοϋφασμα. Βασική επιδίωξη ήταν η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών προσανατολισμών των ινών του υαλοϋφάσματος στη μηχανική φόρτιση. Στο Σχήμα 5.9 του προηγούμενου κεφαλαίου απεικονίζονται γραφικά οι διαφορετικοί προσανατολισμοί των ινών των δοκιμίων που μετρήθηκαν.

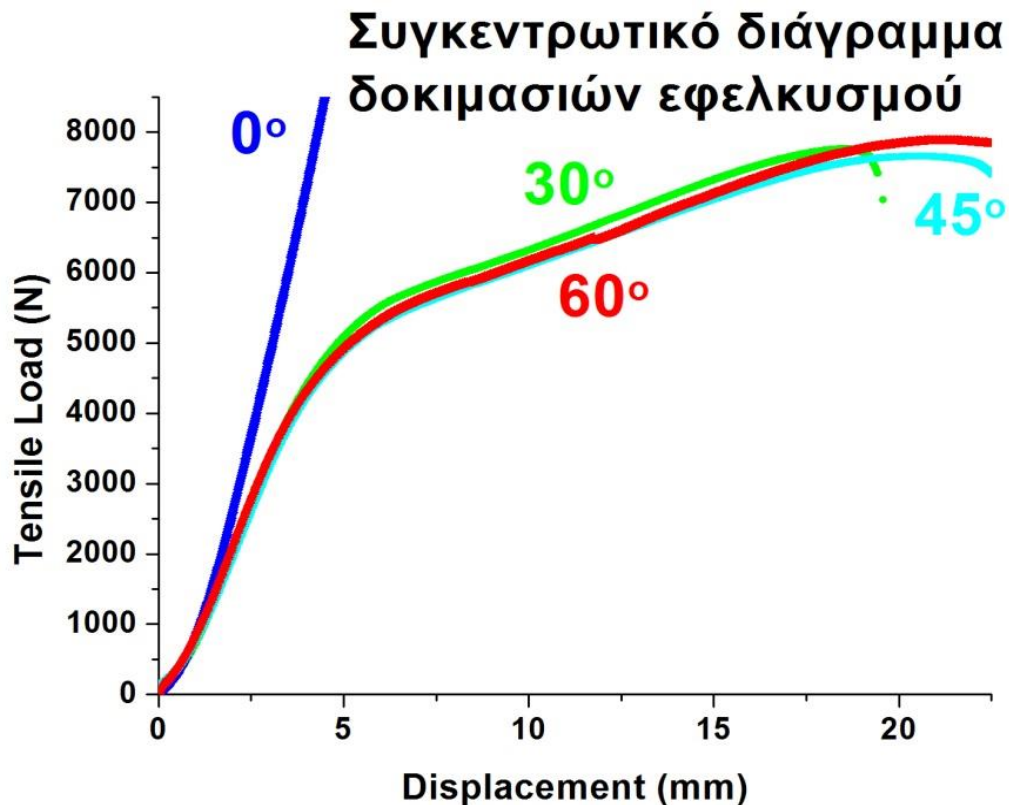
6.1.1 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Όπως προαναφέρθηκε για αυτή τη δοκιμή ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του προτύπου ASTM D-638. Η ταχύτητα εφελκυσμού που έγιναν οι δοκιμές ήταν 6mm/min. Στο Σχήμα 6.1 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά διαγράμματα φορτίου εφελκυσμού-μεταβολής μήκους του δοκιμίου για τις τέσσερις γωνίες προσανατολισμού των ινών.



Σχήμα 6.1: Τυπικά διαγράμματα φορτίου εφελκυσμού-μεταβολής μήκους για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα για όλες τις δοκιμασίες εφελκυσμού.



Σχήμα 6.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα των δοκιμών εφελκυσμού για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.2 καθώς και από τα διαγράμματα του Σχήματος 6.1 φαίνεται ότι τα δοκίμια με προσανατολισμό των ινών 0° ως προς τη διεύθυνση εφελκυσμού δεν παρουσιάζουν πλαστικότητα σε αντίθεση με τα δοκίμια άλλων προσανατολισμών όπου το υλικό εμφανίζει διαρροή, στη συνέχεια πλαστική περιοχή μέχρι τη θραύση. Συνεπώς από το διάγραμμα των 0° προσδιορίζεται μόνο η αντοχή εφελκυσμού (η μέγιστη τάση στην οποία σπάει ψαθυρά το δοκίμιο), ενώ από τα διαγράμματα με τις άλλες γωνίες προσανατολισμού των ινών υπολογίζονται και η αντοχή διαρροής και η αντοχή εφελκυσμού.

- **Υπολογισμός Αντοχής διαρροής για γωνίες 30°, 45°, 60°:**

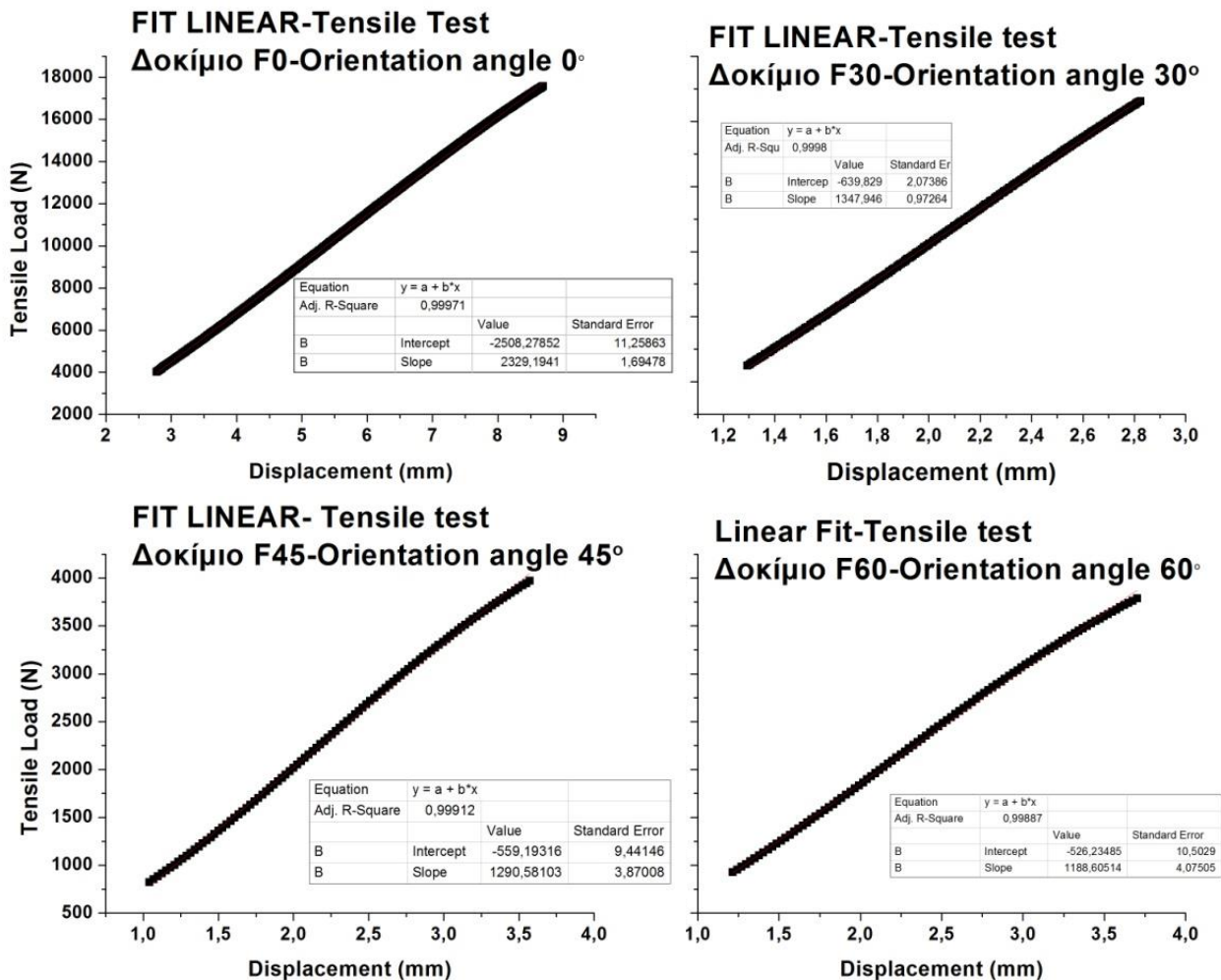
Προσδιορίζω το φορτίο διαρροής από το διάγραμμα και το διαιρώ με τη διατομή του υλικού.

- **Υπολογισμός αντοχής εφελκυσμού:**

Από τα διαγράμματα εφελκυσμού προσδιορίζεται το μέγιστο φορτίο θραύσης του υλικού και το διαιρώ με τη διατομή του υλικού.

Όλα τα διαγράμματα φορτίου- μεταβολής μήκους εμφανίζουν στην αρχή τους, η οποία αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού, ένα ευθύγραμμο τμήμα. Από την κλίση του ευθύγραμμου αυτού τμήματος υπολογίζουμε το

μέτρο ελαστικότητας εφελκυσμού του υλικού (Tensile Modulus of Elasticity). Στο Σχήμα 6.3, φαίνεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα για κάθε γωνία προσανατολισμού, όπου φαίνεται και ο υπολογισμός της κλίσης σε N/mm, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 6.3: Τυπικά διαγράμματα υπολογισμού κλίσης για γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°

- Υπολογισμός Μέτρου Ελαστικότητας

Από το ευθύγραμμο τμήμα του διαγράμματος φορτίου –μεταβολής μήκους υπολογίζεται η κλίση ($F/\Delta L$) με μονάδες N/mm. Η κλίση στο επιλεγμένο τμήμα υπολογίζεται από πρόγραμμα OriginPro 8. Σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής συσχέτισης της ευθείας γραμμής ήταν $\geq 0,99$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.3.

Από τη σχέση $\sigma = E \cdot \epsilon$ έχουμε $\frac{F}{A_0} = E \frac{\Delta l}{l_0} \Rightarrow E = \frac{F}{\Delta l} \cdot \frac{l_0}{A_0}$, όπου :

E= Μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity)

σ = τάση εφελκυσμού (tensile stress)= $\frac{F \text{ (φορτίο)}}{A_0 \text{ (διατομή)}}$

ϵ = παραμόρφωση (strain)= $\frac{\Delta l}{l_0}$

ΔL = μεταβολή μήκους δοκιμίου (displacement)

l_0 = αρχικό μήκος δοκιμίου

A_0 = αρχική διατομή δοκιμίου

$F/\Delta L$ = κλίση

Στον πίνακα του Σχήματος 6.4 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων των διαγραμμάτων, που δημιουργήθηκαν από την επεξεργασία των δεδομένων από τις δοκιμές εφελκυσμού. Για κάθε κατηγορία δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν επτά δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο.

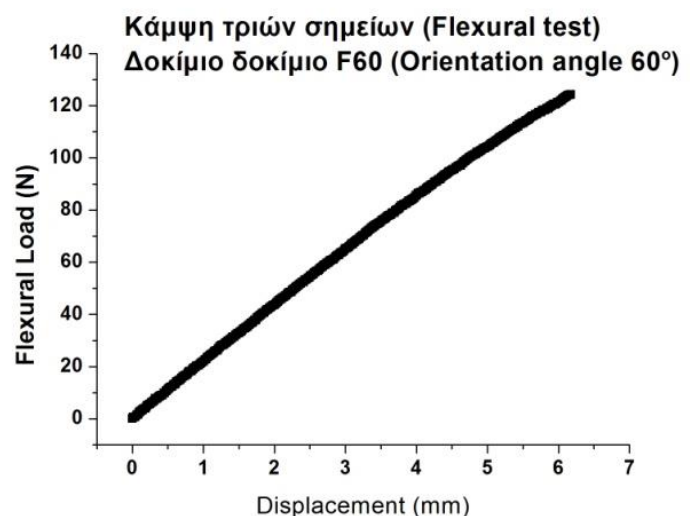
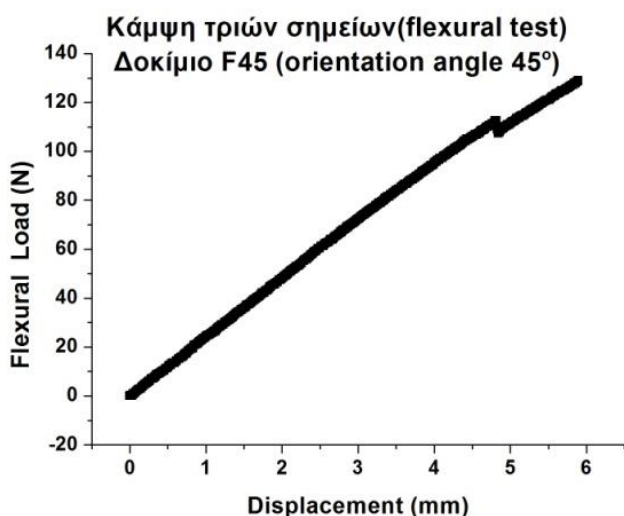
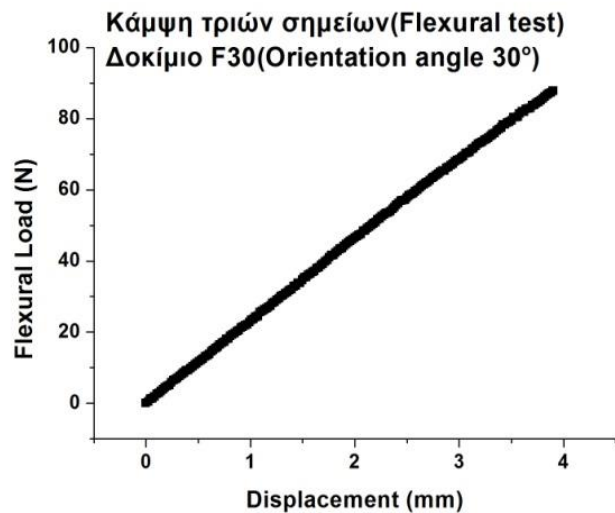
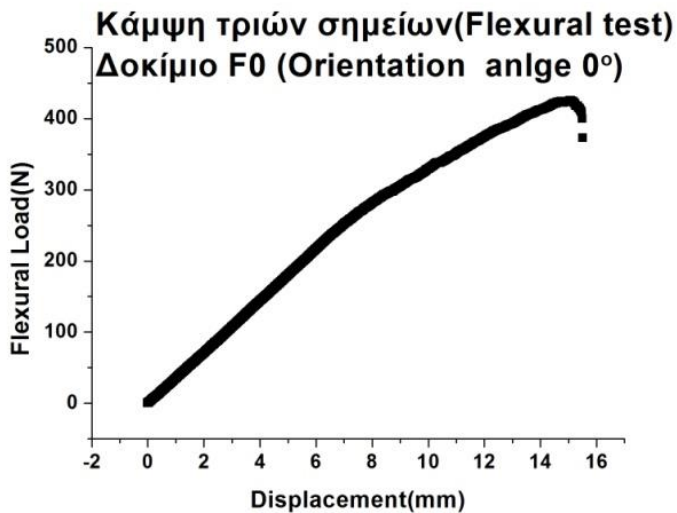
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ-TABLE OF TENSILE RESULTS										
Δοκίμια	Μήκος (mm)	Πάχος (mm)	Πλάτος (mm)	Φορτίο Διαρροής (F _y) Newton	Μεγιστο φορτίο Εφελκυσμού (FTs)- Newton	Slope Κλίση N/mm	Yield strength Αντοχή διαρροής, σ _y , Mpa	Tensile Strength Αντοχή Εφελκυσμού, σ _{TS} , Mpa	Elasticity modulus, Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	
F0-1	125	3	20	*	17998	2334	*	300	4,9	
F0-2	125	3	20	*	17980	2370	*	300	4,9	
F0-3	125	3	20	*	18752	2328	*	313	4,9	
F0-4	125	3	20	*	18273	2286	*	305	4,8	
F0-5	125	3	20	*	18014	2329	*	300	4,9	
F0-6	125	3	20	*	18394	2321	*	307	4,8	
F0-7	125	3	20	*	18425	2380	*	307	5,0	
								304	4,9	
F30-1	125	3	20	5213	7733	1242	87	129	2,59	
F30-2	125	3	20	5139	7450	1259	86	124	2,62	
F30-3	125	3	20	5200	8034	1251	87	134	2,61	
F30-4	125	3	20	5001	7753	1219	83	129	2,54	
F30-5	125	3	20	5193	7650	1245	87	128	2,59	
F30-6	125	3	20	5005	7804	1258	83	130	2,62	
F30-7	125	3	20	5075	7632	1232	85	127	2,57	
							85	129	2,6	
F45-1	125	3	20	4956	8189	1306	83	136	2,7	
F45-2	125	3	20	4900	8050	1266	82	134	2,6	
F45-3	125	3	20	4869	8020	1295	81	134	2,7	
F45-4	125	3	20	4627	8096	1290	77	135	2,7	
F45-5	125	3	20	4604	8140	1278	77	136	2,7	
F45-6	125	3	20	4823	8133	1235	80	136	2,6	
F45-7	125	3	20	4800	7989	1298	80	133	2,7	
							80	132	2,6	
F60-1	125	3	20	4351	7639	1300	73	127	2,71	
F60-2	125	3	20	4337	7519	1274	72	125	2,65	
F60-3	125	3	20	4426	7805	1288	74	130	2,68	
F60-4	125	3	20	4304	7840	1266	72	131	2,68	
F60-5	125	3	20	4281	7826	1280	71	130	2,67	
F60-6	125	3	20	4295	7845	1298	72	131	2,70	
F60-7	125	3	20	4331	7823	1285	72	130	2,68	
							72	129	2,7	

*Τα δοκίμια αυτά δεν παρουσίασαν διαρροή, η συμπεριφορά τους ήταν ψαθυρή

Σχήμα 6.4: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εφελκυσμού

6.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων

Όπως προαναφέρθηκε ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του προτύπου ASTM D-790. Η ταχύτητα εφαρμογής φορτίου ήταν 6mm/min και οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν αυτές που προβλέπονται από το πρότυπο. Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζονται αντιπροσωπευτικά διαγράμματα φορτίου κάμψης- μετατόπισης λόγω κοίλανσης του δοκιμίου, για τις τέσσερις γωνίες προσανατολισμού των ινών.



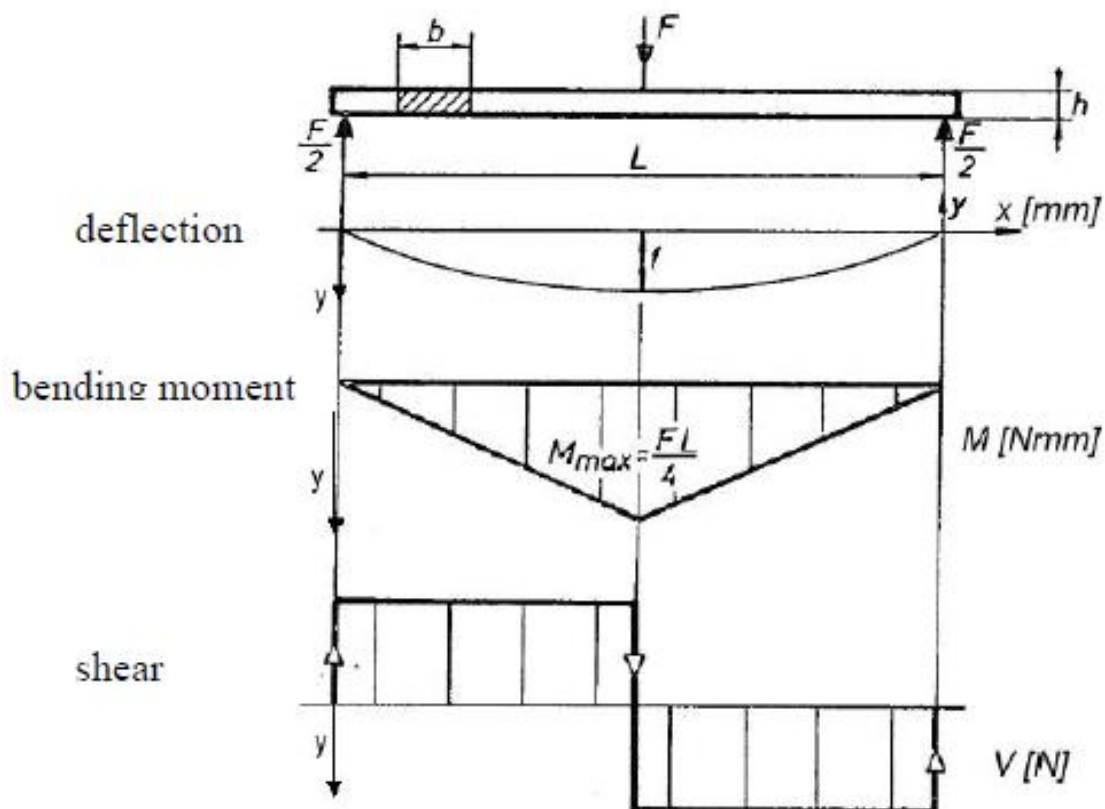
Σχήμα 6.5: Τυπικό διάγραμμα φορτίου κάμψης- μετατόπισης για τις γωνίες 0°, 30°, 45°, 60°

Από το διάγραμμα 6.5 φαίνεται ότι όλα τα δοκίμια έχουν την ίδια συμπεριφορά, με ισχυρότερο (πιο συνεκτικό) το δοκίμιο 0°. Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μια εκτεταμένη γραμμικότητα πριν τη θραύση, η οποία εμφανίζεται ως αποφλοιώση του υλικού.

- **Υπολογισμός Αντοχής κάμψης (flexural (bending)stress)**

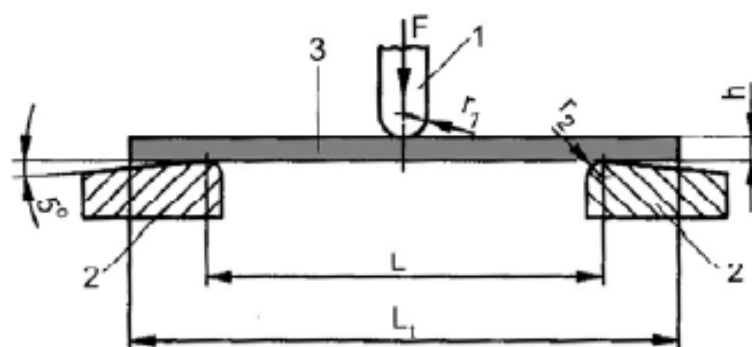
Κατά τη δοκιμασία σε κάμψη το δοκίμιο έχει τυποποιημένη γεωμετρία και στηρίζεται στα άκρα του. Το φορτίο εφαρμόζεται στο κέντρο του δοκιμίου υπό καθορισμένες συνθήκες (ταχύτητα, θερμοκρασία, κλπ). Το φορτίο καταγράφεται κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης κάμψης.

Η αντοχή κάμψης υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο κάμψης πριν τη θραύση του υλικού με την παρακάτω διαδικασία. Στο Σχήμα 6.6 αποτυπώνονται η κοίλανση του υλικού λόγω κάμψης (deflection), η ροπή και η διάτμηση που αναπτύσσονται.



Σχήμα 6.6: Κάμψη τριών σημείων. Κοίλωση λόγω κάμψης, ροπή και διάτμηση

Στο Σχήμα 6.7 αποτυπώνεται η διάταξη τοποθέτησης του δοκιμίου και οι διατάξεις σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D-790.



Standard	Specimen size [mm]			Support distance (L) [mm]	Radii of supports and loading edge [mm]	
	Length L_1	Width b	Thickness h		R_1	R_2
ASTM D790	120	15	10	100	10	10

Σχήμα 6.7: Διάταξη κάμψης τριών σημείων. 1. Κύλινδρος εφαρμογής φορτίου. 2. Κύλινδροι στήριξης δοκιμίου, b : πλάτος δοκιμίου, h : πάχος δοκιμίου, L : απόσταση στήριξης

Ηαντοχή κάμψης (flexural strength) αντιστοιχεί στην τάση θραύσης, που είναι η μέγιστη τάση και υπολογίζεται από την εξίσωση: $\sigma_b = \frac{M}{K}$, όπου M: η μέγιστη ροπή στο δοκίμιο και K: ο συντελεστής διατομής. Η ροπή δίνεται από τη σχέση $M = \frac{F \cdot L}{4}$ και το $K = \frac{b \cdot h^2}{6}$

Από τον συνδυασμό των παρακάτω σχέσεων παίρνουμε την τελική σχέση υπολογισμού της σ_b : $\sigma_b = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} [\text{MPa}]$

Όπου **F= φορτίο θραύσης (N)**

L= απόσταση στήριξης (mm)

b= πλάτος δοκιμίου (mm)

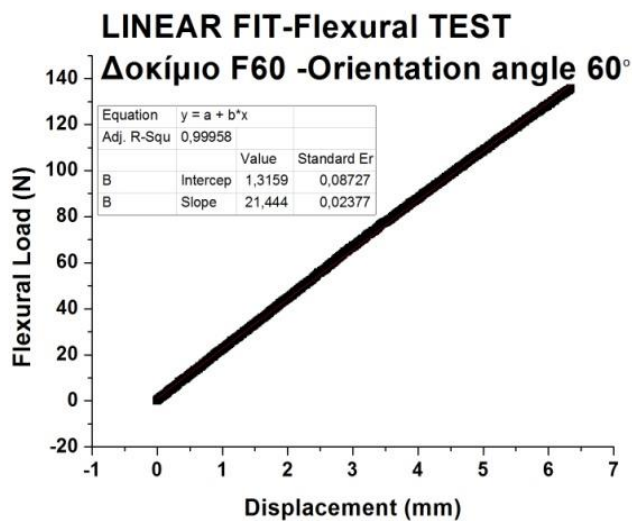
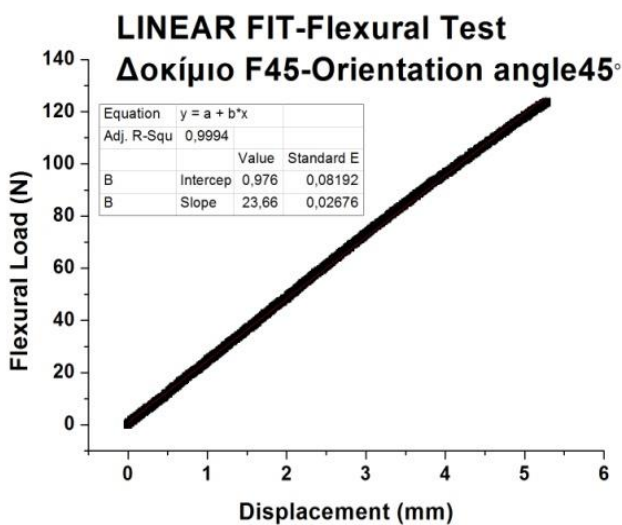
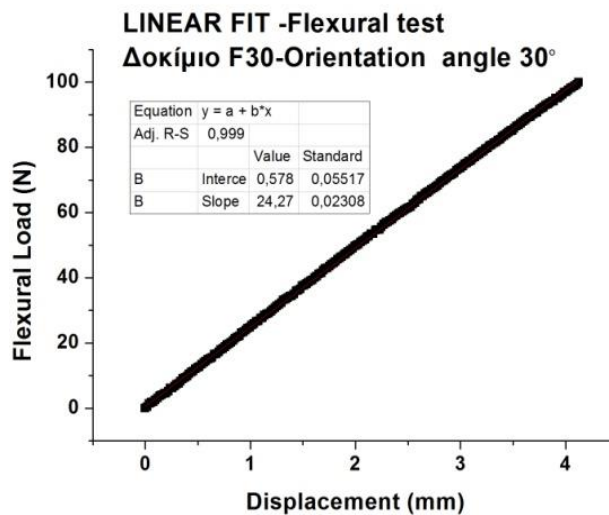
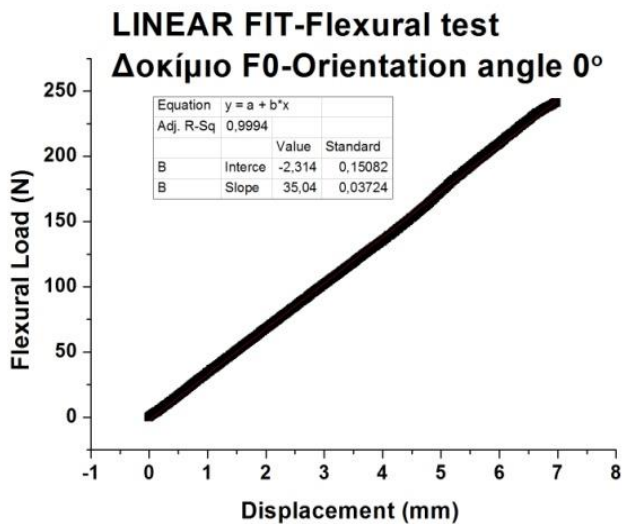
h= πάχος δοκιμίου (mm)

- Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας κάμψης, **E_b**, (flexural modulus of elasticity).

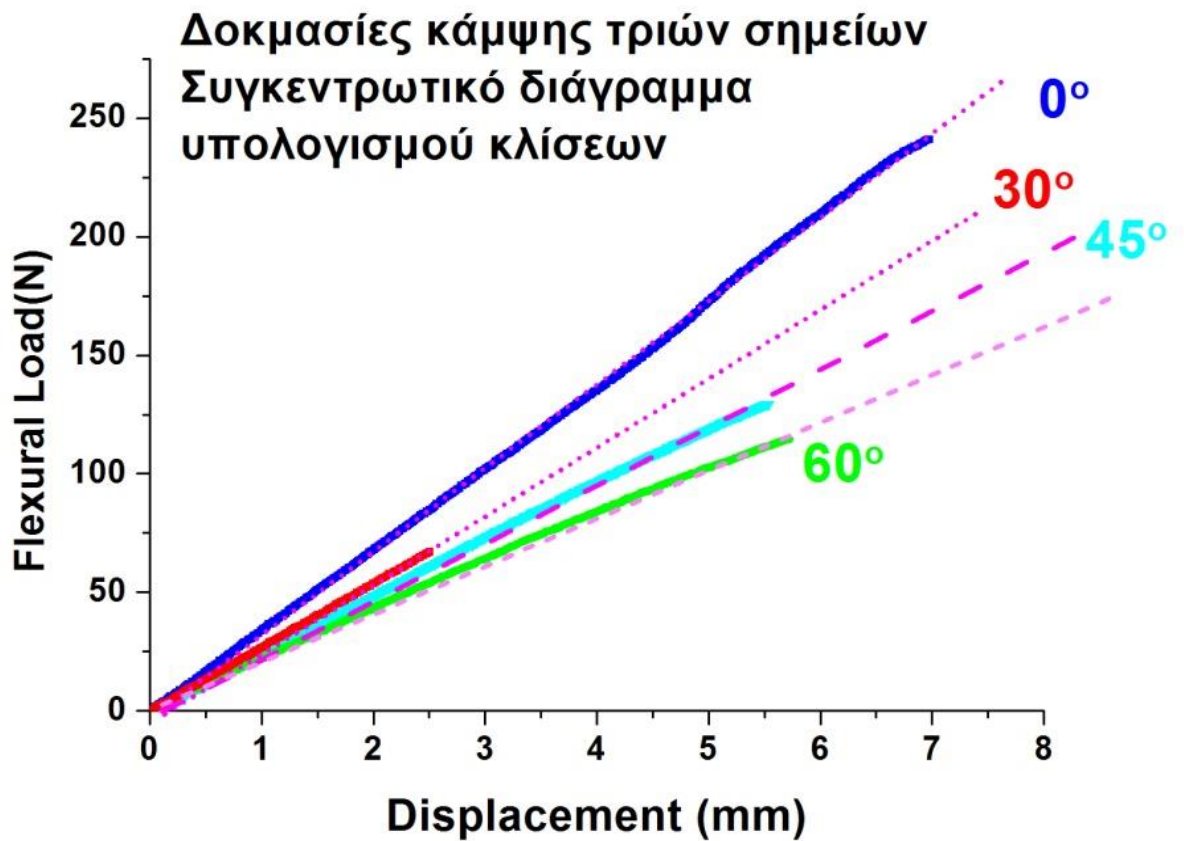
Υπολογίζεται από τη σχέση: $E_b = \frac{1}{4} \frac{L^3}{bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta L} [\text{MPa}]$, όπου $\frac{\Delta F}{\Delta L}$ η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης της δοκιμής κάμψης.

Όλα τα διαγράμματα φορτίου- μετατόπισης εμφανίζουν στην αρχή τους ένα ευθύγραμμο τμήμα το οποίο αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή. Από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας κάμψης **E_b**.

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα υπολογισμού της κλίσης για κάθε γωνία προσανατολισμού. Ενώ στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται συγκριτικά οι κλίσεις και για τις τέσσερις γωνίες.



Σχήμα 6.8: Τυπικά διαγράμματα υπολογισμού της κλίσης για 0°, 30°, 45°,60° από δοκιμασίες κάμψης τριών σημείων.



Σχήμα6.9: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κλίσεων από δοκιμές κάμψης τριών σημείων

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών από όλες τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων δίνονται στον πίνακα του Σχήματος 6.10.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΜΨΗΣ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ- TABLE OF FLEXURAL RESULTS

ΔΟΚΙΜΙΟ	Φορτίο Θραύσης Fb(break) (N)	Αντοχή σε κάμψη (flexural strength) Mpa	Κλίση(Slope) (N/mm)	Ελαστικότητα κάμψης (Flexural modulus)Mpa
F0-1	425		36,3	
F0-2	286*		36	
F0-3	283*		35,8	
F0-4	417		35,1	
F0-5	355		33,5	
F0-6	355		33,5	
F0-7	370		34	
MO	385	59	34,9	1276
F60-1	124		20,4	
F60-2	184*		20,5	
F60-3	115		20,21	
F60-4	120		22,9	
F60-5	135		21,44	
F60-6	118		22	
F60-7	125		20,9	
MO	123	19	21,2	766
F30-1	98		24,3	
F30-2	88		23	
F30-3	80		23,1	
F30-4	76		26,9	
F30-5	97		25,3	
F30-6	93		25,38	
F30-7	90		25,2	
MO	89	14	25	911
F45-1	129		24	
F45-2	153		24,6	
F45-3	190*		25,4	
F45-4	125		24	
F45-5	130		23,9	
F45-6	134		24	
F45-7	131		24,2	
MO	133	20	24,3	886

* τα δοκίμια μετά την ελαστική περιοχή παρουσίασαν διαχωρισμό των στρώσεων(delamination)

* Αντιστοιχεί στο φορτίο θραύσης . Στα ~ 125 N εμφάνιση σημαντικής πλαστική παραμόρφωση χωρίς θραύση έναντι των άλλων δοκιμίων

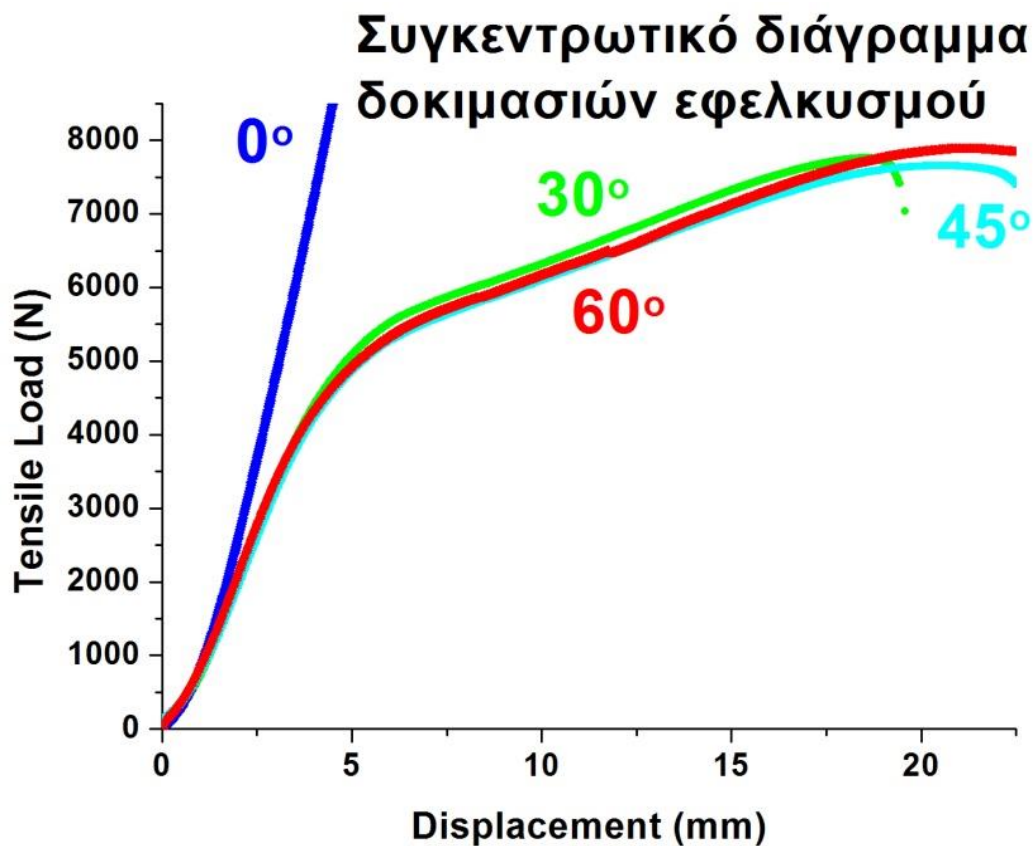
* Αντιστοιχεί στο φορτίο θραύσης . Στα ~ 140N εμφάνιση σημαντικής πλαστική παραμόρφωση χωρίς θραύση έναντι των άλλων δοκιμίων

Σχήμα 6.10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων κάμψης τριών σημείων.

6.2 Συζήτηση των αποτελεσμάτων

6.2.1 Αποτελέσματα εφελκυσμού

Από τις μορφές των διαγραμμάτων όπως αυτές παρουσιάζονται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα του Σχήματος 6.11 προκύπτει ότι στη γωνία προσανατολισμού των ινών 0° , το υλικό είναι ισχυρότερο και δεν παρουσιάζει πλαστική περιοχή, δηλαδή παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό από τα διαγράμματα των 0° υπολογίσαμε μόνο την αντοχή σε εφελκυσμό, αφού η αντοχή διαρροής συμπίπτει με την αντοχή σε εφελκυσμό. Αντίθετα, στους υπόλοιπους προσανατολισμούς $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ τα διαγράμματα εφελκυσμού παρουσίασαν σημαντική πλαστικότητα μετά το όριο διαρροής. Από τα διαγράμματα αυτά υπολογίσαμε και αντοχή διαρροής και αντοχή εφελκυσμού.

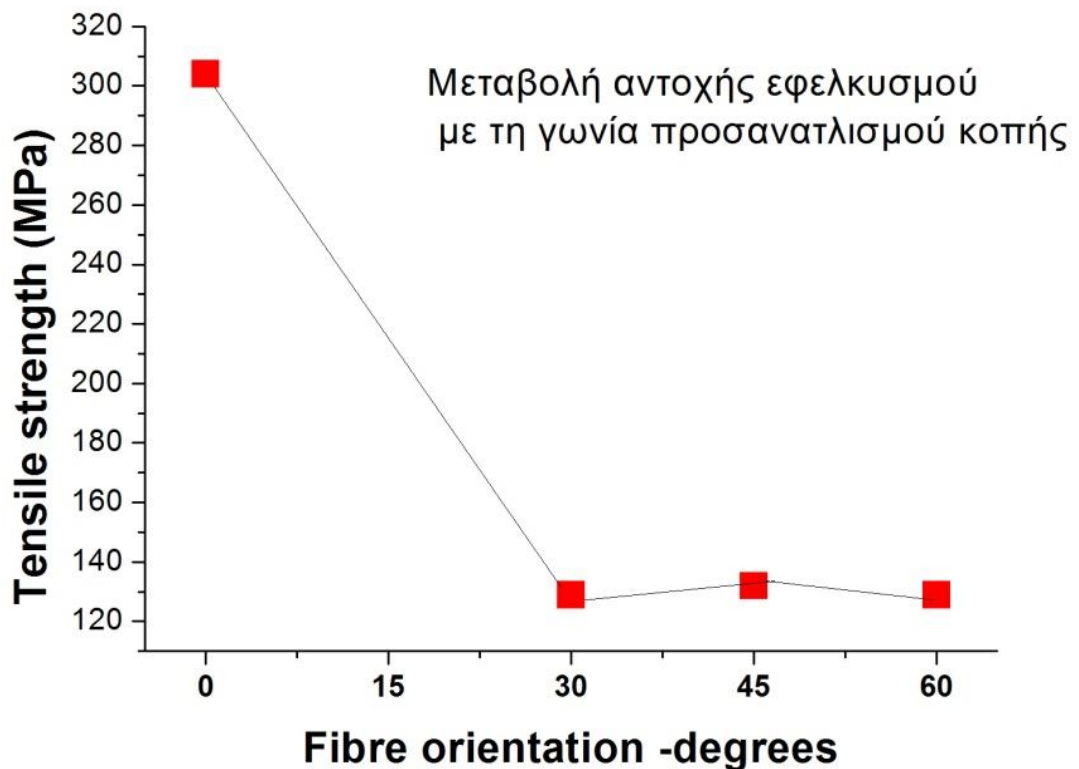


Σχήμα 6.11: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δοκιμών εφελκυσμού

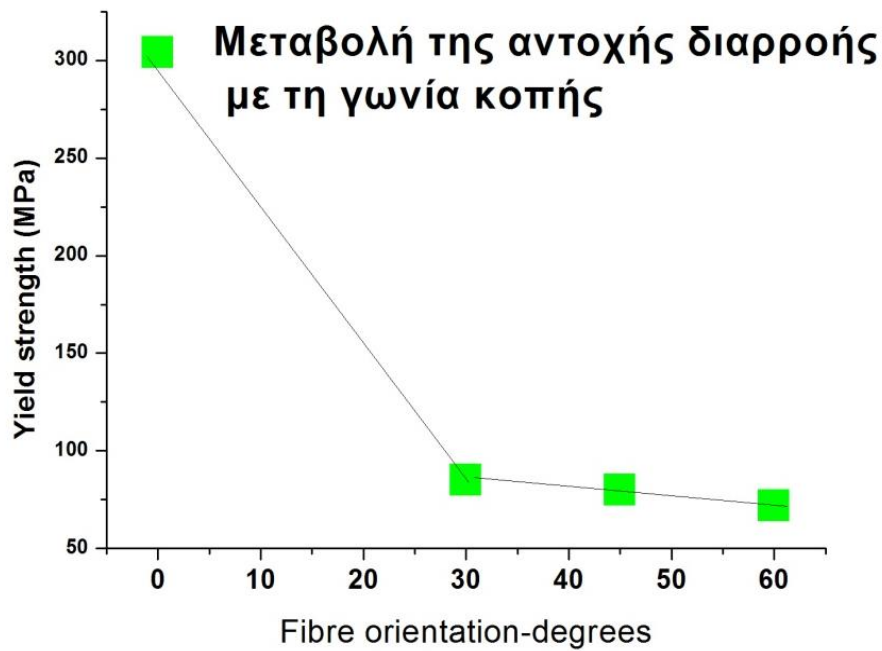
Η σημαντική αυτή διαφοροποίηση οφείλεται στο ότι λόγω αλλαγής του προσανατολισμού, το υλικό της μήτρας (δηλαδή η εποξική ρητίνη) παραλαμβάνει μέρος των φορτίων εφελκυσμού και παραμορφώνεται πλαστικά. Επίσης, λόγω της γωνίας εφελκυσμού σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών, εξασθενεί η συνοχή μεταξύ ινών και μήτρας και το υλικό διαρρέει σε χαμηλότερα φορτία.

Η αντοχή εφελκυσμού στις γωνίες προσανατολισμού των ινών 30°, 45° και 60° είναι περίπου ίδια και μειωμένη σε σχέση με την αντοχή στη γωνία προσανατολισμού 0° κατά 57%.

Η αντοχή διαρροής στις γωνίες προσανατολισμού των ινών 30°, 45° και 60° είναι περίπου ίδια και μειωμένη σε σχέση με τη θεωρητική αντοχή διαρροής στη γωνία προσανατολισμού 0° κατά 80%. (Σχήματα 6.12 και 6.13)

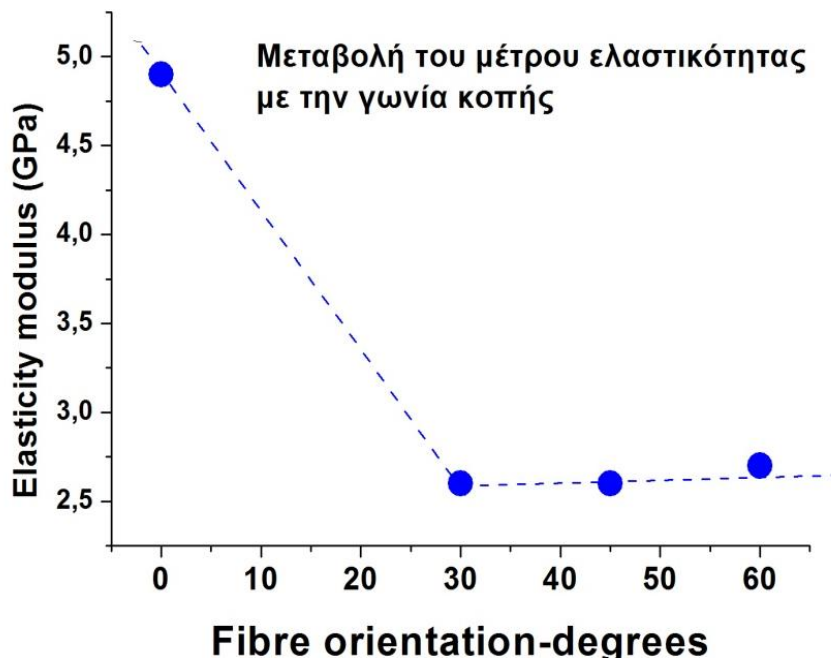


Σχήμα 6.12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής εφελκυσμού ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού



Σχήμα6.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής διαρροής ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού

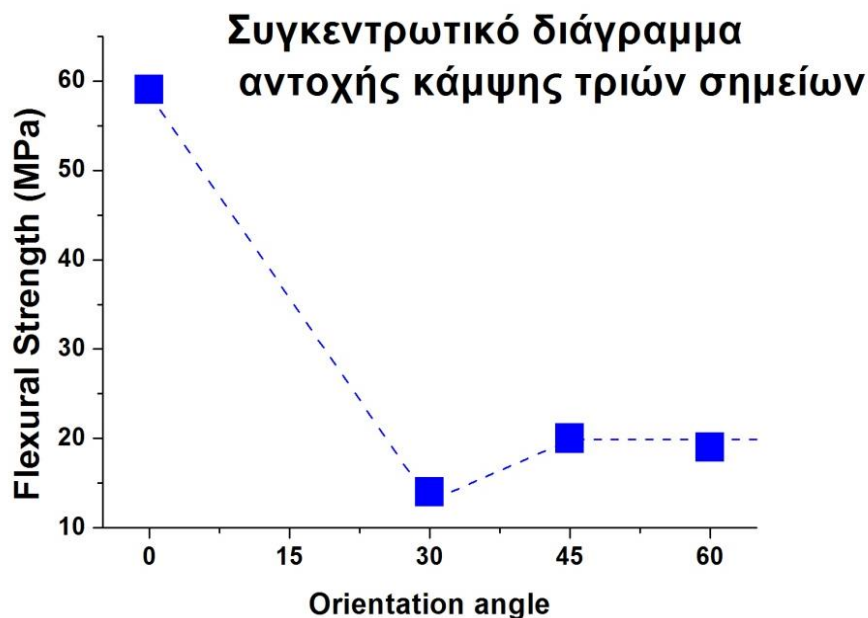
Ανάλογη εικόνα εμφανίζουν και τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας στις γωνίες προσανατολισμού των ινών 30°, 45° και 60° είναι περίπου ίδιο και μειωμένο σε σχέση με τη γωνία προσανατολισμού 0° κατά 45%. Αυτό αποδίδεται στη συμμετοχή του υλικού της μήτρας στην παραλαβή των φορτίων λόγω αλλαγής του προσανατολισμού εφελκυσμού (Σχήμα 6.14).



Σχήμα6.14: συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας εφελκυσμού ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση εφελκυσμού

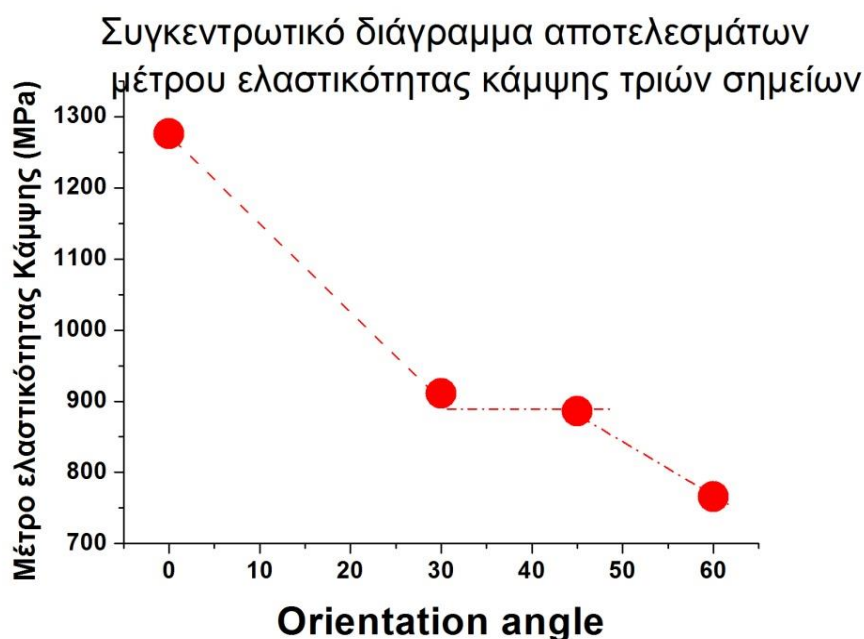
6.2.2 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης τριών σημείων

Τα αποτελέσματα κάμψης τριών σημείων δείχνουν την εξής εικόνα: Η αντοχή κάμψης τριών σημείων στη γωνία προσανατολισμού 30° εμφανίζει μείωση σε σχέση με την αντοχή στη γωνία 0° κατά 76%, ενώ η μείωση στις γωνίες 60° και 45° είναι 68%.



Σχήμα6.15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής κάμψης ως προς τη γωνία κοπής.

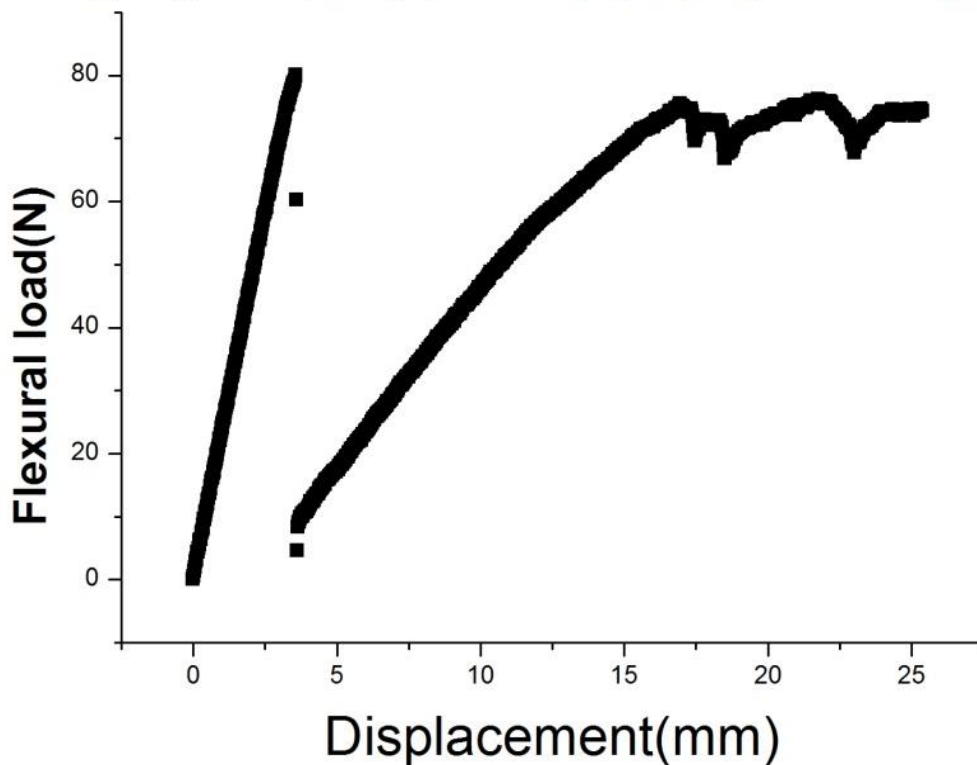
Τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας κάμψης εμφανίζουν μείωση του μέτρου ελαστικότητας κάμψης στις γωνίες 30°,45° και 60° η οποία κυμαίνεται μεταξύ 30-40% (Σχήμα 6.16).



Σχήμα6.16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας κάμψης ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών

Τα δεδομένα των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων πάρθηκαν από τον πρώτο κύκλο του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης που αντιστοιχούσε στην αρχική θραύση του υλικού, όπου το υλικό παρουσίαζε θραύση κάποιων στρωμάτων. Στη συνέχεια, τα υπόλοιπα στρώματα συνεχίζουν να παραμορφώνονται στη νέα διαμορφωμένη κατάσταση των υλικών. Όμως πρακτικό ενδιαφέρον για το υλικό έχει η πρώτη θραύση του και η έναρξη αποδόμησής του. Στο Σχήμα 6.17 δίνεται ένα πλήρες διάγραμμα κάμψης.

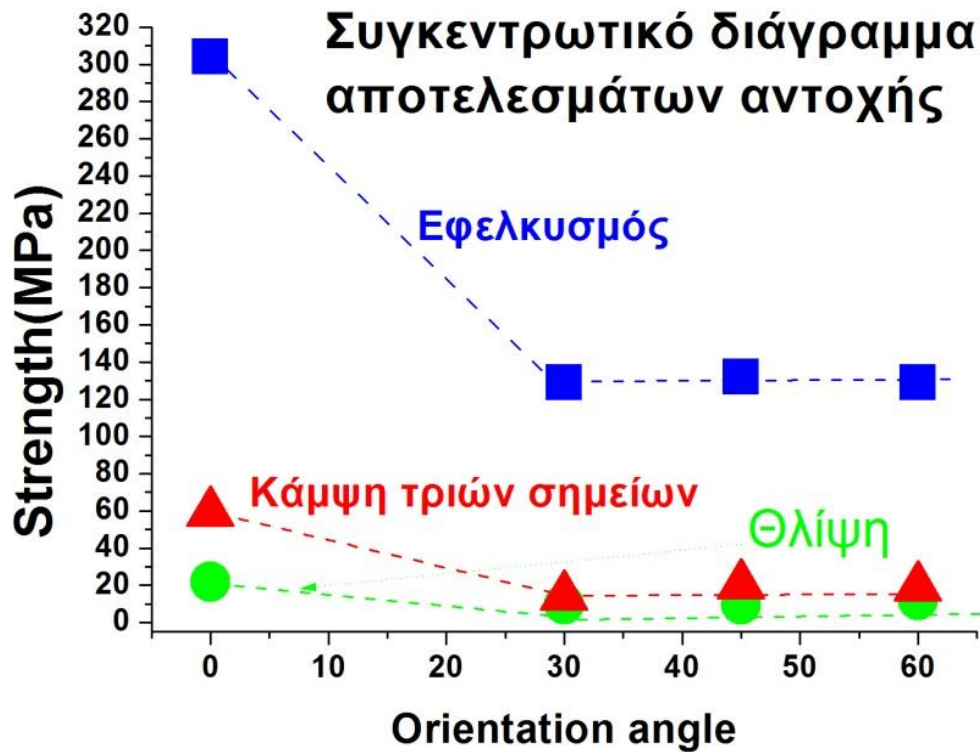
Πλήρες διάγραμμα κάμψης τριών σημείων



Σχήμα 6.17: Πλήρες διάγραμμα φορτίου κάμψης- μετατόπισης

6.2.3 Συγκριτική συζήτηση αποτελεσμάτων

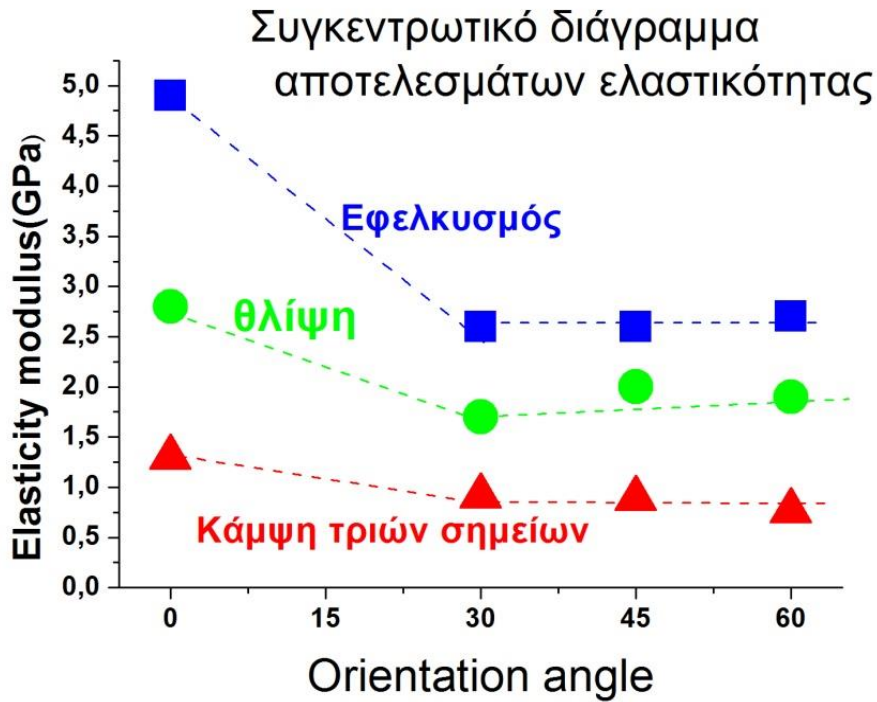
Στο εργαστήριο Τεχνολογίας Υλικών πραγματοποιήθηκε έλεγχος του ίδιου υλικού σε αντοχή σε θλίψη, στα πλαίσια Πτυχιακής εργασίας. Στο Σχήμα 6.18 δίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής του υλικού.



Σχήμα 6.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων Αντοχής

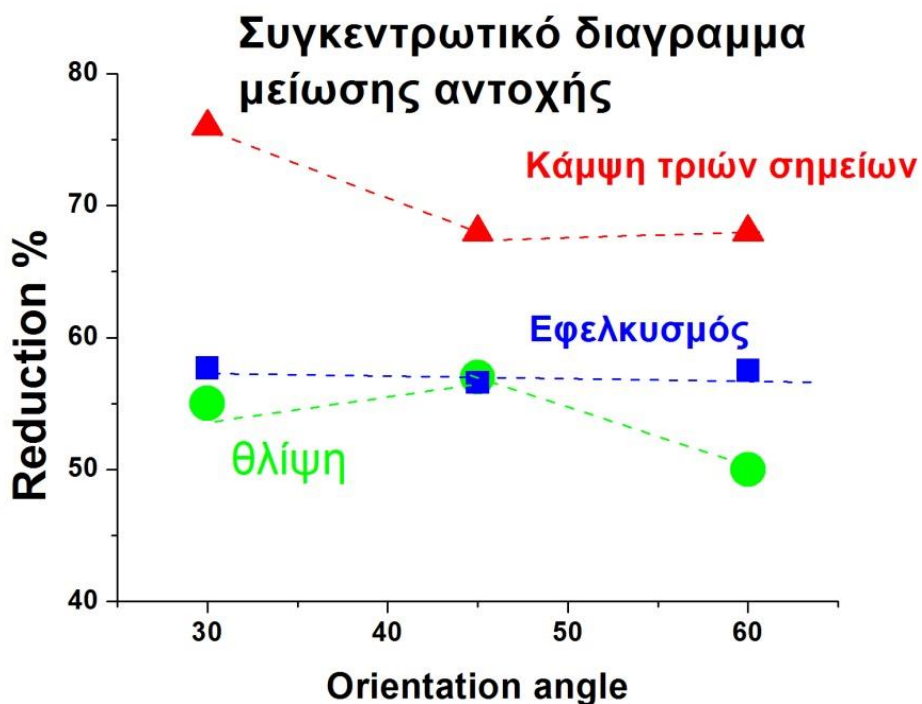
Παρατηρούμε ότι για όλες τις γωνίες η αντοχή εφελκυσμού είναι σημαντικά μεγαλύτερη τόσο από την αντοχή σε θλίψη όσο και από την αντοχή σε κάμψη. Δηλαδή το υλικό μας είναι ισχυρότερο σε εφελκυσμό από ότι στις άλλες δοκιμασίες και μάλιστα ακόμη και η αντοχή διαρροής εφελκυσμού στις γωνίες 30°, 45° και 60° (που είναι της τάξης των 80MPa), είναι σημαντικά μεγαλύτερη από ότι η αντοχή σε θλίψη.

Εξετάζοντας την ελαστικότητα του υλικού στις γωνίες προσανατολισμού των ινών 0°, 30°, 45° και 60°, όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 6.19, το μέτρο ελαστικότητας εφελκυσμού είναι μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας θλίψης. Ενώ σε κάμψη, το υλικό εμφανίζει τη μεγαλύτερη ελαστικότητα (δηλαδή το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας).



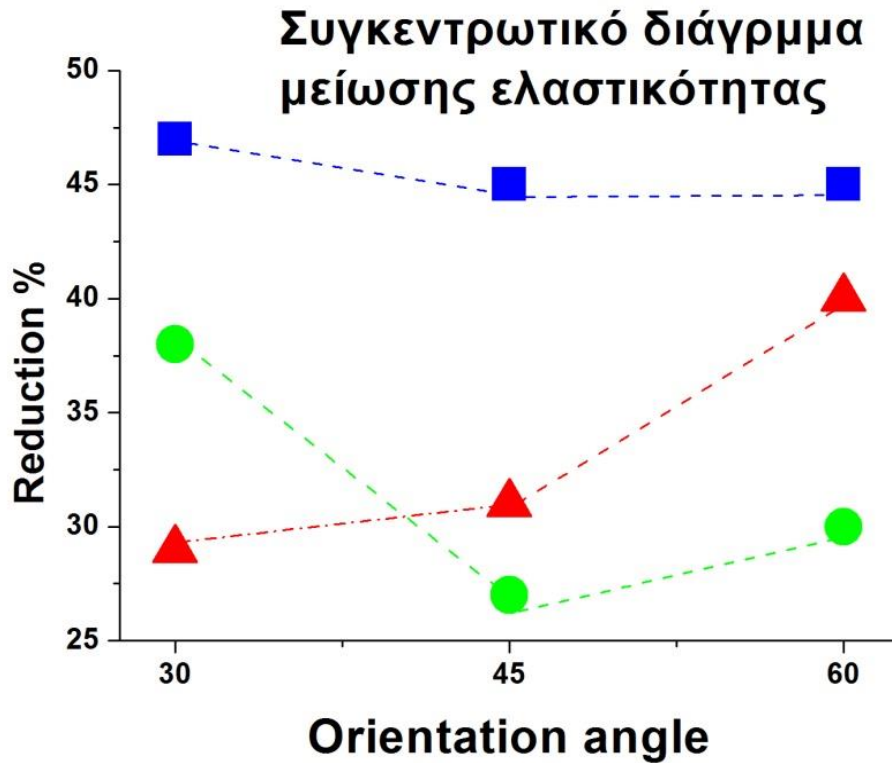
Σχήμα6.19: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων Ελαστικότητας

Στο Σχήμα 6.20 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα μείωσης της αντοχής σε σχέση με την αντοχή στον προσανατολισμό 0°. Μεγαλύτερες μειώσεις αντοχής παρατηρούνται στη δοκιμασία κάμψης. Ενώ οι δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης εμφανίζουν μικρότερες μειώσεις, αλλά του ίδιου μεγέθους.



Σχήμα6.20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μείωσης Αντοχής

Εξετάζοντας το συγκεντρωτικό διάγραμμα (Σχήμα 6.21) μείωσης της ελαστικότητας παρατηρούμε ότι η ελαστικότητα εφελκυσμού παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με την κάμψη και τη θλίψη. Οι μειώσεις σε κάμψη και θλίψη κυμαίνονται μεταξύ 30-40%.



Σχήμα 6.21: Συγκεντρωτικό διάγραμμα μείωσης ελαστικότητας

6.3 Συμπεράσματα

1. Η μελέτη της συνολικής εικόνας των αποτελεσμάτων δείχνει να είναι συμβατή ανάλογα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Τα εροχυπολυστρωματικά υλικά με ενίσχυση παράλληλων ινών (μονοδιευθυντικά εροxyGFR) στη διεύθυνση 0° έχουν τη μέγιστη αντοχή και αυτή βαίνει μειούμενη μέχρι τη γωνία 0° και στη συνέχεια το φαινόμενο αντιστρέφεται. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται ως εξής: η σταδιακή αλλαγή της γωνίας προσανατολισμού των ινών αλλάζει τη συνεισφορά της μήτρας στη μηχανική αντοχή. Στη δική μας περίπτωση υπήρχε ενίσχυση και προς τις δύο διευθύνσεις, οπότε η συνεισφορά της μήτρας φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο, αλλά η συμπεριφορά του υλικού είναι πιο περίπλοκη.
2. Σύμφωνα με τα διαγράμματα Αντοχής –Προσανατολισμού κοπής των δοκιμίων, η αντοχή του σύνθετου στον εφελκυσμό όσο και στην κάμψη έχει τη μέγιστη τιμή στη γωνία 0° . Για όλες τις υπόλοιπες γωνίες, η αντοχές αυτές μειώνονται όπως φαίνεται στα σχετικά διαγράμματα.
3. Ανάλογη εικόνα δείχνουν και τα αποτελέσματα της ελαστικότητας. Το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας είχαμε στις 0° και για όλες τις υπόλοιπες γωνίες παρατηρείται μείωση του μέτρου ελαστικότητας.
4. Τα αποτελέσματα κάμψης και εφελκυσμού είναι συμβατά και συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα θλίψης σε ίδια δοκίμια που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια πτυχιακής εργασίας που έγινε στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Υλικών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] William D. Callister, Jr, **Επιστήμη και τεχνολογία των Υλικών**, 2008 Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- [2] Σ.Η. Δρίτσος, **Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές**, , 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ ΕΤΕΚ Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου 2006, http://library.tee.gr/digital/m2173/m2173_dritsos.pdf
- [3] http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html
- [4] Διονύσης Στεφανάτος, **Σύνθετα υλικά και εφαρμογές αυτών στη θωράκιση**, Ειδικός Επιστήμονας, Στρατιωτική Σχολή Ευελπίδων
- [5] Sathishkumar T.P. et al., **Glass fiber-reinforced polymer composites-A review**, Article in Journal of Reinforced Plastics and Composites, June 2014
- [6] http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf
- [7] Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., **Σύνθετα Υλικά**, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.
- [8] Γκέρου Ε., **Σύνθετα Υλικά Εποξειδικής Ρητίνης-Ινών Άνθρακα-Μεταλλικών Κόνεων Ψευδαργύρου: Κατασκευή, Μηχανικές Και Ηλεκτρικές Ιδιότητες**, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- [9] Μπόγρης Α., **Μελέτη της Μηχανικής συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερών Σύνθετων υλικών μετά από Επαναληπτική κρούση**, Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [10] Naheed Saba, Mohammad Jawaid, Othman Y Allothman, MT Paridah and Azman Hassan, **Recent advances in epoxy resin, natural fiber reinforcement epoxy composites and its applications**, Article in Journal of Reinforced Plastics and Composites, October 2015
- [11] Boyle M.A., Martin C.J., Neuner J.D., **EPOXY RESINS**, Hexcel Corporation
- [12] https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/1368/1/02_chapter_10.pdf
- [13] Παναγιώτου, Κ., **Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών**, 3^η Έκδοση(2006), Εκδόσεις Πήγασος 2000
- [14] Παπαμίχος Ε., Χαραλαμπίδης Ν., **Αντοχή των υλικών**, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2006
- [15] http://www.engineeringtoolbox.com/engineering-materials-properties-d_1225.html

[16] Σιούλα Β., **Μελέτηφθοράς και υποβάθμιση των ιδιοτήτων σύνθετων Πολυμερών**, Πτυχιακή Εργασία-ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ,ΣΤΕΦ., ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ, Ηράκλειο 2011

[17] Φέτσης Ε., **Χαρακτηρισμός Σύνθετων Υλικών Με Συνεχή Ενίσχυση Ινών Άνθρακα Με Διηλεκτρική Φασματοσκοπία Σάρωσης Και Μελέτη Της Συμπεριφοράς Τους Σε Περιβάλλον Υψηλής Τάσης**, Διπλωματική Εργασία, ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, Πάτρα

[18] Τσερπές Κ.Ι. **Προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών σε εφελκυσμό και κόπωση**. Πανεπιστήμιο Πατρών. Διδακτορική διατριβή(2002)

[19] Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας Η.Π.Α., https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_Ch07.pdf

[20] David K., **Nondestructive Inspection Of Composite Structures: Methods And Practice**, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China 25-28 Oct 2008

[21] Mallick P.K., **FIBER-REINFORCED COMPOSITES, Materials, Manufacturing And Design**, 3rd Edition, CRC PRESS, από Google Books

[22] Hatsuo Ishida, **Introduction to Polymer Composite Processing**, NSF Center for Molecular and Microstructure of Composites (CMMC), Cleveland, Ohio

[23] Guide to composites, www.gurit.com

[24] Λύτρας Γ., **Ανακύκλωση Σύνθετων Πολυμερικών Υλικών**, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2013

[25] <http://www.idicomposites.com/smc-bmc-technology.php>