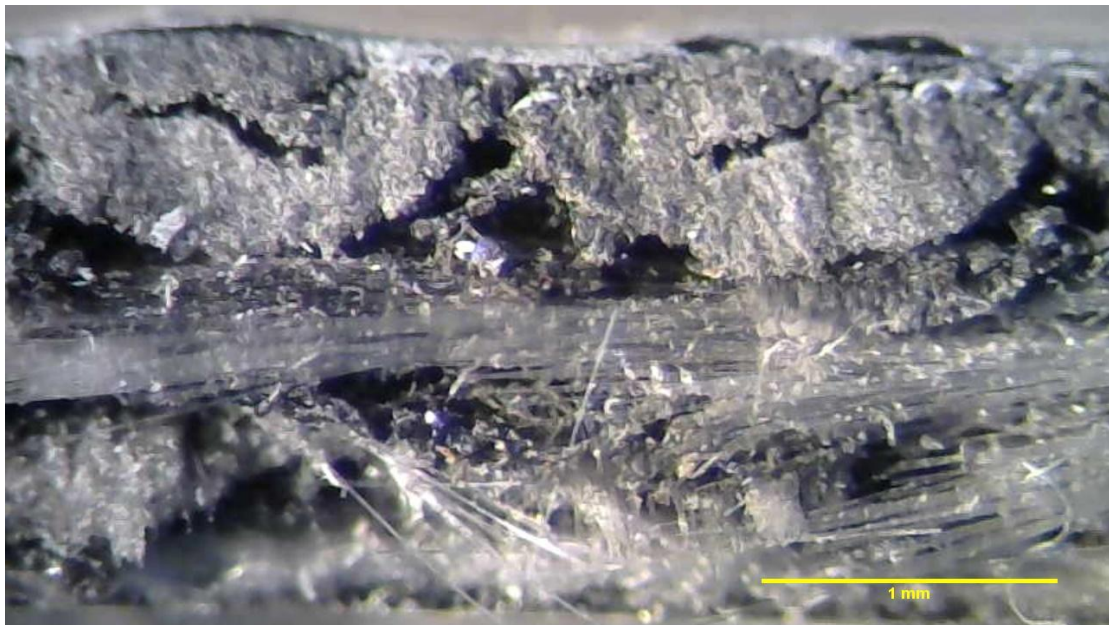




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΓΡΑΦΕΝΙΚΩΝ ΝΑΝΟΠΡΟΣΘΗΚΩΝ
ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΟ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ
ΕΠΟΞΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ / ΥΑΛΟΪΦΑΣΜΑΤΟΣ**



ΤΖΩΡΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Επίδραση γραφενικών νανοπροσθηκών σε σύνθετο
πολυστρωματικό υλικό εποξικής ρητίνης / υαλοϋφάσματος**

**Effect of graphene nanoplatelets fillers on laminated
epoxy/glass-fabric composites**

ΤΖΩΡΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πέραν της προσωπικής προσπάθειας που καταβλήθηκε, η διαμόρφωση και η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την συμβολή ορισμένων ανθρώπων που με στήριξαν κατά την εκπόνησή της.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Διευθυντής του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την τιμή που μου έκανε δίνοντας μου την ευκαιρία να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του, καθώς και για τις συμβουλές του σχετικά με την εκλογή κατάλληλου θέματος διπλωματικής εργασίας.

Ταυτόχρονα, οφείλω βαθύτατες ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη για όλο τον χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η συνεχής καθοδήγησή του, η υπομονή και το πνεύμα συνεργασίας του από την αρχή μέχρι το τέλος αποτελούν αναμφίβολα στοιχεία έμπνευσης και για την μετέπειτα επαγγελματική σταδιοδρομία μου. Η υποστήριξή του σε θέματα τεχνικά και επιστημονικά ήταν κρίσιμης σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών, και συγκεκριμένα τον κ. Νικόλαο Μελισσά και τον κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη, για τη βοήθεια τους στον χώρο και με τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου. Επιπλέον, σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τους συμφοιτητές μου Κωνσταντίνο Ζουφιάκο και Κωνσταντίνο Σόφρα για την υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να αναφέρω πως η φοίτησή μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τη στήριξη της οικογένειάς μου. Θα ήθελα να

ευχαριστήσω και να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία στη μητέρα μου Βάντα και τον πατέρα μου Γεώργιο, για τη συμπαράσταση και την πίστη που έθρεφαν στο πρόσωπό μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι σήμερα. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον ξάδερφό μου Βασίλειο Σασιρμάζ, απόφοιτος Χημικός Μηχανικός του Ε.Μ.Π. για την καθοδήγηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε κατά την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Αγαπητοί μου φίλοι Άρη, Αλέξη, Αλέξανδρε, Γιάννη, Γιώργο, Μπογκντάν, Νίκο, Πάνο, Σπύρο και Χρύσανθε, σας είμαι ευγνώμων για την αγάπη και τη στήριξή σας σε όλες τις επιλογές μου.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016
Γεώργιος Τζωρτζόπουλος

Περίληψη

Τα νανοσύνθετα υλικά ή αναλυτικότερα τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με νανοϋλικά, προσελκύουν ολοένα και περισσότερο το επιστημονικό, αλλά και το βιομηχανικό ενδιαφέρον. Τα νανοσωματίδια που χρησιμοποιούνται ως προσθήκες στα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη επιφάνεια επαφής επηρεάζοντας έτσι τη φυσική και χημική συμπεριφορά του νανοσύνθετου υλικού. Τα τελευταία χρόνια, μάλιστα, η εμφάνιση των πολυμερικών συνθέτων νανοϋλικών έχει οδηγήσει σε πολλές τεχνολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές στην αντικατάσταση των μετάλλων, γεγονός που οφείλεται, μεταξύ άλλων, στην ευκολία παραγωγής τους και στο συνδυασμό χαμηλού βάρους με υψηλές μηχανικές ιδιότητες.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης νανοδομών γραφενίου (graphene nanoplatelets – GNPs) σε σύνθετο πολυστρωματικό υλικό εποξικής μήτρας με ενίσχυση υαλοϋφάσματος.

Τα απαραίτητα πολυστρωματικά δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο της χειροκίνητης στρώσης (Hand Lay-Up), ενώ η ενσωμάτωση των νανοδομών γραφενίου πραγματοποιήθηκε κατά την προετοιμασία του εποξικού συστήματος με ανάδευση σε θερμοκρασία δωματίου.

Συνολικά παρασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμίων με τέσσερις στρώσεις και διαφορετικές περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου (GNPs). Πρόκειται για δοκίμια εποξικής μήτρας με ενίσχυση πλεκτού υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, σε διάταξη προσανατολισμού ινών $[45/-45]_2$ και $[45/0]_{\text{antisymmetric}}$, καθώς και με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος (unidirectional) με προσανατολισμό στρώσεων $[0/90]_2$. Και στους τρεις τύπους δοκιμίων παρασκευάστηκαν δείγματα αναφοράς χωρίς την προσθήκη νανοδομών γραφενίου, που αποτέλεσαν το μέτρο σύγκρισης για την επίδραση των νανοδομών στη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Στόχος ήταν η εξαγωγή δοκιμίων κατάλληλων διαστάσεων και ποιότητας για να υποβληθούν σε μετρήσεις εφελκυσμού και κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D3039/D3039M και ASTM D790-03, αντίστοιχα. Στην περίπτωση ενίσχυσης υφάσματος τύπου Twill 2x2 η περιεκτικότητα σε γραφένιο έφτασε μέχρι το 20% κατά βάρος της χρησιμοποιούμενης ρητίνης (εποξική μήτρα), ενώ στην περίπτωση της μονοδιευθυντικής ενίσχυσης η περιεκτικότητα έφτασε μέχρι το 30% (w.t.). Τα άνω

όρια των περιεκτικοτήτων διαμορφώθηκαν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των υφασμάτων, καθώς και από τις εκ των υστέρων μετρήσεις που έδειξαν υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων από ένα ποσοστό πρόσμιξης και άνω, σε τέτοιο βαθμό μάλιστα που το προκύπτον πολυστρωματικό υλικό εμφάνισε χειρότερες επιδόσεις ακόμη και από τα δοκίμια αναφοράς που δεν περιείχαν νανοδομές γραφενίου. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, αναλόγως της περιεκτικότητας σε GNPs παρατηρήθηκε από ελάχιστη έως ικανή επίδραση του γραφενίου στις μηχανικές επιδόσεις του υλικού.

Τέλος, μελετήθηκε και η επίδραση της δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing) πάνω στις μηχανικές ιδιότητες των πολυστρωματικών δοκιμίων με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη $[0/90]_2$, καθότι αυτή επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της πολυμερικής (εποξικής) μήτρας. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν δοκίμια με περιεκτικότητα 2% w.t. GNPs και αφού αφέθηκαν για σκλήρυνση σε συνθήκες δωματίου (25°C) για επτά ημέρες τοποθετήθηκαν σε εργαστηριακό κλίβανο για 2, 4, 6 και 24 ώρες στους 50°C και 100°C, αντίστοιχα, και τέλος υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D790-03. Η δευτερογενής θερμική θεραπεία στους 100°C βελτίωσε την αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων πιο έντονα από ότι στους 50°C

Abstract

Composite materials reinforced with nanoparticles or just nanocomposites are increasingly attracting interest of the scientific community and the industrial world. Nanoparticles used as fillers in composite materials exhibit a large contact surface affecting the physical and chemical properties of the composite. Over the last years, the appearance of polymer nanocomposites has led to the replacement of metals in many technological and structural applications, mainly due to ease of production and the combination of low weight with great mechanical properties.

This project is investigating the effect of graphene nanoplatelets fillers on laminated epoxy matrix reinforced with glass-fabric composites.

The test specimens were produced through Hand Lay-Up method. The graphene nanoplatelets (GNPs) were incorporated into the liquid resin during epoxy system preparation by stirring in room temperature.

Three different laminated specimen series with four layers and various percentage w.t. additions of graphene nanoplatelets (GNPs) were prepared for the needs of this project. Epoxy matrices were reinforced with woven glass-fabric of Twill 2x2 weave in ply orientations $[45/-45]_2$ and $[45/0]_{\text{antisymmetric}}$, also well as with unidirectional glass-fabric of ply orientation $[0/90]_2$. For each laminated series were also prepared reference specimens with no GNPs additions, in order to compare the GNPs effect on the nanocomposite behavior. The produced specimens had to be of specific dimensions and quality for the purpose of conducting tensile and three point bending tests in compliance with ASTM D3039/D3039M and ASTM D790-03 standards, respectively. The GNPs additions of the Twill 2x2 reinforced series got to 20% w.t. of the used resin (epoxy matrix) and in the case of unidirectional reinforcement the GNPs additions got to 30%. The upper additions limits were determined by the fabrics structural characteristics, as well as by the tests themselves that showed degradation of mechanical properties above a specific additions value, in such extent that the resulted specimen exhibited lower mechanical properties even than the reference specimens with no GNPs additions. The rest of the specimens

exhibited improved mechanical properties of the composite material, according to the additions level.

The effect of thermal curing on mechanical properties was also investigated in the case of the unidirectional glass-fabric reinforced composites with $[0/90]_2$ ply orientation, as the curing process affects the properties of the polymer (epoxy) matrix. Specifically, specimens with addition of 2% w.t. GNPs were produced and after being dried out (curing at room temperature for seven days) they were put in an oven for 2, 4, 6 and 24 hours at 50°C and 100°C. The cured specimens were tested in compliance with the ASTM D790-03 three-point bending standard. The 100°C cure cycle showed greater improvement in the flexural strength of the composites than the 50°C cure cycle.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εικόνες – Σχήματα – Πίνακες	1
-----------------------------------	---

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Κεφάλαιο: Σύνθετα υλικά.....	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών	9
1.2.1 Μονοστρωματικό σύνθετο (lamina)	11
1.2.2 Πολυστρωματικό σύνθετο (laminata).....	11
1.3 Τρόποι παρασκευής σύνθετων υλικών με ενίσχυση ιών.....	13
2. Κεφάλαιο: Σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας.....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Οργανικές μήτρες (πολυμερικές ρητίνες).....	17
2.2.1 Ιδιότητες ρητινών	18
2.2.2 Τύποι ρητινών	20
2.2.2.1 Ελαστομερείς.....	21
2.2.2.2 Θερμοπλαστικές	22
2.2.2.3 Θερμοσκληρυνόμενες.....	23
2.2.2.3.1 Πολυεστέρες.....	24
2.2.2.3.2 Βινυλεστέρες	25
2.2.2.3.3 Φαινολικές ρητίνες	26
2.2.2.3.4 Εποξυδικές ή εποξικές ρητίνες.....	26
2.2.3 Τρόποι βελτίωσης συμπεριφοράς σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας	29
2.2.3.1 Πρόσθετα εγκλείσματα	29
2.2.3.2 Θερμική θεραπεία (curing)	30
3. Κεφάλαιο: Εσωτερική ενίσχυση με ίνες.....	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 Δομή Υλικού	33
3.3 Πλεκτά υφάσματα.....	36
3.3.1 Γεωμετρικό μοντέλο υφάσματος του Pierce	37
3.3.2 Μέθοδοι ύφανσης.....	38
3.3.3 Εισαγωγή στην κινηματική πλεκτών υφασμάτων.....	39
3.4 Τύποι ιών για ενίσχυση σύνθετου υλικού	40
3.4.1 Ίνες γυαλιού	40
3.4.1.1 Ιδιότητες ιών γυαλιού	41
3.4.1.2 Δομή ιών γυαλιού.....	41
3.4.1.3 Τύποι ιών γυαλιού	42
3.4.1.4 Παραγωγή ιών γυαλιού.....	43
3.4.2 Ίνες άνθρακα (carbon fibers).....	45
3.4.2.1 Ιδιότητες ιών άνθρακα	46
3.4.2.2 Παραγωγή ιών άνθρακα.....	47
3.4.3 Ίνες πολυμερούς.....	49
3.4.3.1 Παραγωγή ιών	51
3.4.3.2 Είδη πολυμερικών ιών.....	52
3.4.3.2.1 Αρωματικά πολυαμίδια (αραμίδια).....	52

3.4.3.2.2	Ίνες από υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE)	53
3.4.3.2.3	Ίνες PBO.....	54
4.	Κεφάλαιο: Νανοϋλικά	56
4.1	Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία	56
4.2	Νανοσύνθετα υλικά	56
4.3	Γραφένιο.....	58
4.3.1	Ο άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του	58
4.3.2	Γενικά χαρακτηριστικά γραφενίου	58
4.3.3	Ιδιότητες γραφενίου.....	60
4.3.4	Εφαρμογές γραφενίου	62
4.3.5	Νανοδομές γραφενίου (Πολυστρωματικό γραφένιο, graphene nanoplatelets - GNPs) 62	
4.3.5.1	Ιδιότητες πολυστρωματικού γραφενίου (GNPs).....	63
4.3.5.2	Μέθοδοι παρασκευής νανοδομών γραφενίου.....	64
5.	Κεφάλαιο: Μηχανική σύνθετων υλικών.....	65
5.1	Εισαγωγή στη μηχανική συνθέτων υλικών	65
5.2	Βασική ορολογία πολυστρωματικών συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες.....	67
5.2.1	Μονοστρωματικά σύνθετα (lamina)	67
5.2.2	Πολυστρωματικά σύνθετα (laminate).....	69
5.2.3	Κατηγορίες και σημειολογία συνθέτων ενισχυμένων με ίνες.....	70
5.3	Θεωρία στρωματοποίησης (lamination theory)	72
5.3.1	Παραδοχές της θεωρίας.....	73
5.3.2	Παραμορφώσεις της πολυστρωματικής δομής (laminate strains).....	74
5.3.3	Δυνάμεις και ροπές του πολυστρωματικού συνθέτου	74
5.3.4	Συντελεστές στα μητρώα δυσκαμψίας	77
5.3.5	Παραμόρφωση και καμπυλότητα του μέσου επιπέδου	80
5.3.6	Παραμορφώσεις και τάσεις της στρώσης λόγω φορτίου.....	81

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.	Κεφάλαιο: Πειραματική διαδικασία	84
6.1	Πρότυπο εφελκυσμού ASTM D3039/D3039M.....	84
6.2	Πρότυπο κάμψης τριών σημείων ASTM D790-03.....	85
6.3	Πρέσα μετρήσεων Instron 4482.....	86
7.	Κεφάλαιο: Παρασκευή πολυστρωματικών δοκιμίων	87
7.1	Υλικά και εξοπλισμός	87
7.1.1	Μέτρα ασφαλείας	87
7.1.2	Τύποι υαλοϋφάσματος	89
7.1.3	Σύστημα ρητίνης	93
7.1.4	Γραφενικές νανοπροσθήκες (GNPs).....	94
7.2	Μέθοδος παρασκευής	95
7.2.1	Δομή πολυστρωματικού συνθέτου και γεωμετρία.....	97
7.2.2	Διαδικασία εμποτισμού και παρασκευή	98
7.2.2.1	Προετοιμασία ρητίνης.....	98
7.2.2.2	Εμποτισμός.....	99
7.2.3	Ποιότητα εμποτισμού	100
7.2.3.1	Οπτικός έλεγχος	100
7.2.3.2	Ποιοτικός έλεγχος	103

7.2.4	Παρασκευή δοκιμών θερμικής θεραπείας (curing).....	103
8.	Κεφάλαιο: Αποτελέσματα δοκιμών	105
8.1	Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού.....	105
8.1.1	Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45]....	107
8.1.2	Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμα σε διάταξη [0/90/0/90].....	109
8.1.3	Μέτρα ελαστικότητας πειραματικών δοκιμών.....	112
8.2	Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων	114
8.2.1	Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45]....	115
8.2.2	Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 [45/-45/45/-45]	116
8.2.3	Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμ [0/90/0/90]	118
8.3	Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κατόπιν θερμικής θεραπείας.....	121
8.3.1	Συγκριτικά διαγράμματα διάρκειας θερμικής θεραπείας.....	121
8.3.2	Συγκριτικά διαγράμματα θερμοκρασίας θερμικής θεραπείας	122
8.3.3	Επίδραση της θερμικής θεραπείας στην αντοχή σε κάμψη	124
8.4	Μικροσκοπικός έλεγχος δοκιμών	126
9.	Κεφάλαιο: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	141
9.1	Σύνοψη συμπερασμάτων από πειράματα.....	141
9.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	144
10	. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	146

ΕΙΚΟΝΕΣ – ΣΧΗΜΑΤΑ – ΠΙΝΑΚΕΣ

Εικόνες

Εικόνα 1. Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) σε τρισσορθογώνια πλέξη. [3]	9
Εικόνα 2. Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών. [1].....	10
Εικόνα 3. Βασικά δομικά στοιχεία συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες. [4]	12
Εικόνα 4. Χύτευση σε διαιρετό καλούπι. [3]	14
Εικόνα 5. Περιέλιξη νήματος (α) και (β) [1].....	15
Εικόνα 6. Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (α) και (β). [1].....	16
Εικόνα 7. Μορφοποίηση με εμβάπτιση (α) και (β). [1].....	16
Εικόνα 8. Οι τρεις βασικοί σχηματισμοί των πολυμερών: γραμμικό (α), διακλαδισμένο (β) και δικτυωτό (γ). [5]	21
Εικόνα 9. Γραφική απεικόνιση αλυσίδας μορίων ελαστομερών υλικών.	22
Εικόνα 10. Δημιουργία σταυροδεσμών.	23
Εικόνα 11. Αλυσίδα μορίων θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού (α) και η αποδόμησή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (β).....	24
Εικόνα 12. Μοριακή αλυσίδα πολυεστέρα. [6].....	24
Εικόνα 13. Μοριακή αλυσίδα βινυλεστέρα. [6]	25
Εικόνα 14. Εξιδανικευμένη χημική δομή ενός απλού εποξειδίου (οξειδίο αιθυλενίου). [6]	26
Εικόνα 15. Μοριακή αλυσίδα εποξικής ρητίνης [6]	27
Εικόνα 16. Εποξική ομάδα (α) και αντίδραση συμπίκνωσης διφαινόλης Α με επιχλωρυδρίνη προς σχηματισμό προπολυμερούς εποξικής ρητίνης (β). [2]	28
Εικόνα 17. Διαστασιολογικές κλίμακες πολυμερών: (α) μοριακές αλυσίδες, (β) ίνες, (γ) νήματα και (δ) υφάσματα. [7]	34
Εικόνα 18. Απεικόνιση υφάσματος ενίσχυσης. Κατά τη διεύθυνση της ούγκιας (selvage) αναπτύσσονται τα στημόνια (warp), ενώ κάθετα στην ούγκια αναπτύσσονται τα υφάδια (weft). [7] ..	36
Εικόνα 19. Παραδείγματα του γεωμετρικού μοντέλου του Pierce για πλεκτά υφάσματα απλής (plain) ύφανσης με δισ-διευθυντική (Bi-Directional) και μονοδιευθυντική (UniDirectional) πτύχωση. [8]	37
Εικόνα 20. Μεγεθυμένη άποψη υφάσματος απλής ύφανσης με μονοδιευθυντική πτύχωση και συνεχής ίνες νημάτων. [7].....	38
Εικόνα 21. Μέθοδοι ύφανσης πλέξης: απλή ύφανση (α), πλέξη καλαθιού 2x2 (β) και πλέξη καλαθιού 4x4 (γ). Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα στημόνια και κίτρινο τα υφάδια. [7]	38
Εικόνα 22. Δομή γυαλιού (α) [1] και απόψεις (β) ασυνεχών ινών και υφασμάτων γυαλιού.	41
Εικόνα 23. Δομή πλέγματος γυαλιού. [1].....	42
Εικόνα 24. Στάδια παραγωγής ινών γυαλιού (α) και απλοποιημένο διάγραμμα εγκατάστασης παραγωγής ινών γυαλιού (β). [1].....	44
Εικόνα 25. Απεικόνιση επικάλυψης ίνας γυαλιού. [1].....	45
Εικόνα 26. Κρύσταλλος γραφίτη και διάταξη ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο γραφίτη (α) [1] και άποψη ανθρακονημάτων (β).	46
Εικόνα 27. Διάφορες διατάξεις επιπέδων στρώσεων κατά τη διατομή ίνας ανθρακονήματος.	47
Εικόνα 28. Διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα. [1]	48
Εικόνα 29. Μέθοδοι ινοποίησης για την παραγωγή ινών πολυμερών. [7]	51
Εικόνα 30. Μοριακή αλυσίδα ίνας Kevlar 49 (α και γ) και δομή ίνας Kevlar (β). [1]	53
Εικόνα 31. Επαναλαμβανόμενος μοριακός τύπος ινών Spectra (α) και απεικόνιση ινών Spectra (β) ..	54
Εικόνα 32. Άποψη ινών PBO (α) και μοριακή αλυσίδα ινών PBO (β).....	55

Εικόνα 33. Απεικόνιση άνθρακα.	58
Εικόνα 34. Δισδιάστατη δομή γραφενίου. Μπορεί να πακεταριστεί σε δομή 0D φουλερενίου, να τυλιχθεί σε δομή 1D νανοσωλήνων ή να δημιουργήσει στοιβάδες για την 3D δομή του γραφίτη. [17]	59
Εικόνα 35. Σκόνη νανοδομών γραφενίου.	64
Εικόνα 36. Μηχανική συμπεριφορά διαφόρων υλικών. [5]	66
Εικόνα 37. Δύο στοιχειώδης τύπου μονοστρωματικών συνθέτων (laminae). [5]	67
Εικόνα 38. Επίδραση σπασμένης ίνας στη μήτρα και κατανομή τάσεων στην ίνα. [5]	68
Εικόνα 39. Διαδοχικές στρώσεις πολυστρωματικού συνθέτου με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων. [5].....	69
Εικόνα 40. Τύποι πολυστρωματικών συνθέτων υλικών: μονοδιευθυντικό πολυστρωματικό (a), πολυστρωματικό με αντίθετες γωνίες στρώσεων (b) και πολυστρωματικό με διασταυρούμενες στρώσεις (c). [4]	71
Εικόνα 41. Γεωμετρία πολυστρωματικού συνθέτου. [4]	73
Εικόνα 42. Καμπτικά και στρεπτικά φορτία που εφαρμόζονται στο μέσο επίπεδο μιας πολυστρωματικής διάταξης.	75
Εικόνα 43. Συμμετρική πολυστρωματική διάταξη για την οποία $[B] = [0]$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη επιμήκυνσης - καμπτικών φορτίων. [4]	78
Εικόνα 44. Ισορροπημένη πολυστρωματική διάταξη για την οποία $A_{16} = A_{26} = 0$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη επιμήκυνσης - διάτμησης.	79
Εικόνα 45. Πολυστρωματική διάταξη για την οποία $D_{16} = D_{26} = 0$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη καμπτικών – στρεπτικών φορτίων. [4].....	79
Εικόνα 46. Κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων σε μια πολυστρωματική διάταξη. Πολυστρωματικό σύνθετο υλικό (a), κατανομή παραμορφώσεων (b), κατανομή τάσεων (c) και οι προκύπτουσες ορθές δυνάμεις και καμπτικές ροπές (d). [4]	82
Εικόνα 47. Μηχανή μετρήσεων INSTRON 4482 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της [30].	86
Εικόνα 48. Απόψεις από την εκτύλιξη του ρολού του υαλοϋφάσματος ενίσχυσης και από την παρασκευή των σύνθετων υλικών.	87
Εικόνα 49. Εξοπλισμός ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των συνθέτων υλικών: μάσκα μισού προσώπου για προστασία αναπνοής με φίλτρα ABEK(2) και P(3) (πάνω) και προστατευτικά γυαλιά (κάτω) (a), προστατευτικά γάντια (b) και χιτώνιο εργασίας (c).	88
Εικόνα 50. Απόψεις υαλοϋφασμάτων Twill 2x2 (a) και Unidirectional (b) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων.	89
Εικόνα 51. Ακριβείς διαστάσεις πλέξης μονοδιευθυντικής ενίσχυσης (a και b) και Twill 2x2 (c, d και e) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων.	89
Εικόνα 52. Μικροσκοπικές απεικονίσεις διατομής δοκιμίου με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs: μεγέθυνση x5 για τον υπολογισμό εμβαδού διατομής νήματος (πάνω) και x50 για την καταμέτρηση ινιδίων σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 50 μm εντός του νήματος (κάτω).....	92
Εικόνα 53. Μικροσκοπικές απεικονίσεις διατομής δοκιμίου με ενίσχυση unidirectional [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs: μεγέθυνση x5 για τον υπολογισμό εμβαδού διατομής νήματος (πάνω) και x50 για την καταμέτρηση ινιδίων σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 50 μm εντός του νήματος (κάτω).....	92
Εικόνα 54. Εποξική ρητίνη δύο συστατικών που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή των δοκιμίων. [31]	93
Εικόνα 55 Οι γραφενικές νανοπροσθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων. ..	94
Εικόνα 56. Μικροσκοπική απεικόνιση γραφενίου (μεγέθυνση x5). [14].....	94
Εικόνα 57. Ειδικό κερί για καλούπια (a) που χρησιμοποιήθηκε για την επικάλυψη των πάγκων εργασίας και ηλεκτρονική ζυγαριά (b) για την προετοιμασία του μίγματος ρητίνης.	95
Εικόνα 58. Απεικόνιση σύνθετων υλικών έπειτα από σκλήρυνση σε συνθήκες δωματίου για επτά ημέρες.	96

Εικόνα 59. Κόφτης ελασμάτων (a) για την κοπή των σύνθετων υλικών στις επιθυμητές διαστάσεις δοκιμών και τριβείο (b) για την λείανση των επιφανειών των (προς παρατήρηση σε μικροσκόπιο) δοκιμών.	96
Εικόνα 60. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των σύνθετων υλικών. Ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο και μύτη ανάδευσης (a) για την ανάδευση του συστήματος ρητίνης και ρολά για τον εμποτισμό των υφασμάτων με ρητίνη (b).	99
Εικόνα 61. Γραφική απεικόνιση της πολυστρωματικής διάταξης με μονοδιευθυντική ενίσχυση σε διάταξη [0/90/0/90].	100
Εικόνα 62. Πίσω όψη εμποτισμένου υαλοϋφάσματος. Οι περιοχές σε κύκλους αφορούν σημεία του συνθέτου υλικού με χαρακτηριστικά ανεπαρκή εμποτισμό. Η περιοχή μέσα στο παραλληλόγραμμο είναι κατάλληλη για την εξαγωγή δοκιμίου μετρήσεων.	101
Εικόνα 63. Άποψη δοκιμίου με μονοδιευθυντική ενίσχυση και 2% GNP (wt) από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5). Κενό στην πλέξη λόγω ανεπαρκούς ποσότητας ρητίνης.	102
Εικόνα 64. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) πίσω όψης ανεπαρκώς εμποτισμένου δοκιμίου με μονοδιευθυντική ενίσχυση και 2% GNPs.	102
Εικόνα 65. Ο εργαστηριακός κλίβανος (αριστερά) που χρησιμοποιήθηκε για τη θερμική θεραπεία δοκιμών (δεξιά) με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη στρώσεων [0/90/0/90] και 2% wt GNPs.	104
Εικόνα 66. Θραύση δοκιμίου με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 10% w.t. GNPs. Χαρακτηριστική για την πλέξη μορφή «χελιδονοουράς» στην περιοχή θραύσης.	106
Εικόνα 67. Θραύση δοκιμίων με μονοδιευθυντική ενίσχυση διάταξης [0/90/0/90] με 0% (πάνω) και 10% w.t. GNPs (κάτω). Αστοχία κατά μήκος των μονοδιευθυντικών ινών, χαρακτηριστική αστοχία της συγκεκριμένης πλέξης.	106
Εικόνα 68. Προοδευτικές απόψεις από πείραμα κάμψης.	114
Εικόνα 69. Άποψη προφίλ δοκιμίου μονοδιευθυντικής ενίσχυσης και 5% w.t. GNPs, κατόπιν κάμψης.	114
Εικόνα 70. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των δοκιμών: Στερεοσκόπιο (a) και οπτικό μικροσκόπιο (b) για την παρατήρηση της μορφολογίας των συνθέτων υλικών, της διασποράς των εγκλεισμάτων και την ποιότητα εμποτισμού.	126
Εικόνα 71. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού χωρίς νανοπροσθήκες με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45]. Πορώδες στη μήτρα του υλικού και ορατές στρώσεις υφασμάτων.	129
Εικόνα 72. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs. Πορώδες στο σύνθετο υλικό.	129
Εικόνα 73. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs. Ορατό πορώδες (κατά μήκος τομή).	130
Εικόνα 74. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) εγκάρσιας διατομής συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.	130
Εικόνα 75. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.	131
Εικόνα 76. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.	131
Εικόνα 77. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.	132
Εικόνα 78. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.	132
Εικόνα 79. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs κατόπιν καμπτικής καταπόνησης.	133

Εικόνα 80. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.....	133
Εικόνα 81. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs κατόπιν καμπτικής καταπόνησης.....	134
Εικόνα 82. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x0.63) συνθέτου υλικού χωρίς νανοδομές με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45]. Αποχρωματισμός μετά από καταπόνηση.	134
Εικόνα 83. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x2) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs κατόπιν καταπόνησης. Παραμόρφωση πλέξης.....	135
Εικόνα 84. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x2.5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση διάταξης [0/90/0/90] και 4% w.t. GNPs. Ρωγματώσεις στο εσωτερικό των ινών.....	135
Εικόνα 85. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.	136
Εικόνα 86. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs. Είναι εμφανής η ομοιόμορφη διασπορά των νανοδομών γραφενίου. Παρατηρούνται αραιά συσσωματώματα.	136
Εικόνα 87. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs. Είναι εμφανής η ομοιόμορφη διασπορά των νανοδομών γραφενίου. Παρατηρούνται αραιά συσσωματώματα.	137
Εικόνα 88. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.....	137
Εικόνα 89. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.	138
Εικόνα 90. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.....	138
Εικόνα 91. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.	139
Εικόνα 92. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.....	139
Εικόνα 93. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.....	140
Εικόνα 94. Μέθοδοι διασποράς και αποφυλλοποίησης εγκλεισμάτων: Three Rolls Mill (a) και συσκευή λουτρού με υπερήχους (b).....	145
Εικόνα 95. Εστίαση από AFM (atomic force microscope) σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 22μm διατομής συνθέτου υλικού εποξικής μήτρας εμπλουτισμένης με τροποποιημένες γραφενικές νανοδομές (3% w.t.).	145

Σχήματα

Σχήμα 1. Τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης ρητινών. [6]	18
Σχήμα 2. Συγκριτικό διάγραμμα αντοχής σε εφελκυσμό διάφορων ενισχυτικών ινών (a) και συγκριτικό διάγραμμα των συστατικών μερών του συνθέτου, καθώς και του συνθέτου που απαρτίζουν (b). [6]	19
Σχήμα 3. Τυπικός κύκλος θερμικής θεραπείας εποξικής ρητίνης. [5]	31
Σχήμα 4. Συγκριτικό διάγραμμα αντοχής σε εφελκυσμό διάφορων ινών ενίσχυσης. [5]	49
Σχήμα 5. Τέσσερις κατηγορίες μηχανικής συμπεριφοράς συνθέτων με βάση τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης. Γραμμική ελαστική συμπεριφορά (a), ελαστική – πλήρως πλαστική συμπεριφορά (b), ελαστική – πλαστική συμπεριφορά (c) και βισκοελαστική (d). [5]	69
Σχήμα 6. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/0/0/-45] από 0% έως 20% wt GNPs.....	107

Σχήμα 7. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.....	108
Σχήμα 8. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).	108
Σχήμα 10. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] από 0% έως 5% wt GNPs.....	110
Σχήμα 11. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] από 0% έως 30% wt GNPs.....	110
Σχήμα 12. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.	111
Σχήμα 13. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης/μείωσης της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).	111
Σχήμα 17. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.	115
Σχήμα 18. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών ενίσχυσης Twill 2x2 [45/0/0/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).	116
Σχήμα 19. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/-45/45/-45] από 0% έως 3% wt GNPs.	117
Σχήμα 20. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/-45/45/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.....	117
Σχήμα 21. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών ενίσχυσης Twill 2x2 [45/-45/45/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).....	118
Σχήμα 22. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] από 0% έως 5% wt GNPs.	119
Σχήμα 23. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] από 0% έως 30% wt GNPs.	119
Σχήμα 24. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.	120
Σχήμα 25. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης/μείωσης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).	120
Σχήμα 26. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50°C για 2, 4, 6 και 24 ώρες.....	121
Σχήμα 27. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 100°C για 2, 4, 6 και 24 ώρες.....	122
Σχήμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50°C και 100°C για 2 ώρες.....	122
Σχήμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50oC και 100oC για 4 ώρες.....	123
Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50oC και 100oC για 6 ώρες.....	123
Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50oC και 100oC για 24 ώρες.....	124
Σχήμα 32. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και με 2% GNPs (wt) αναλόγως της θερμοκρασίας και της διάρκειας της θερμικής θεραπείας.....	125
Σχήμα 33. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και με 2% GNPs (wt) σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο που δεν υποβλήθηκε σε θερμική θεραπεία.....	125

Πίνακες

Πίνακας 1. Σύγκριση αντοχής σε εφελκυσμό και μέτρων ελαστικότητας μετάλλων και συνθέτων 10	10
Πίνακας 2. Εφαρμογές συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών..... 21	21
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά ινών γυαλιού. [1]..... 43	43
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας. 48	48
Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών ενίσχυσης. [8]..... 50	50
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά μεγέθη υαλοϋφασμάτων για την παρασκευή των δοκιμίων..... 91	91

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Κεφάλαιο: Σύνθετα υλικά

1.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά υπάρχουν στη ζωή του ανθρώπου από αρχαιοτάτων χρόνων. Υλικά όπως ξύλο, πέτρα, πηλός και κόκκαλα χρησιμοποιήθηκαν ευρύτατα από τον άνθρωπο, ο οποίος σύντομα άρχισε να τα ενισχύει με πρόσθετα συστατικά.

Για παράδειγμα, οι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν ήδη το 5.000 π.Χ. την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχυρων με σκοπό τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτυσσόταν κατά την ξήρανση του πηλού. Αντίστοιχα κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Στην σύγχρονη εποχή ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύνθετο υλικό είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου ο οπλισμός αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό του δομικού υλικού. Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, κοινώς γνωστό ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. [1]

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, όπως η δυσκαμψία, η δυσθραυστότητα, η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες ή η χημική αντοχή. Πρόκειται για υλικά πολυφασικά που παράγονται με σύνθεση δύο ή περισσότερων, μη διαλυτών μεταξύ τους, υλικών προκειμένου να προκύψει ένα νέο σύνθετο υλικό με βέλτιστες ιδιότητες, διαφορετικές από αυτές των συστατικών του. Η συνεχής φάση ονομάζεται μήτρα (matrix) και η ασυνεχής φάση ονομάζεται συστατικό ενίσχυσης ή έγκλεισμα (filler). Η μήτρα είναι χαμηλής πυκνότητας υλικό και σκοπός της είναι η μεταφορά των ασκούμενων φορτίων στο υλικό ενίσχυσης, το οποίο παραλαμβάνει και προσδίδει στο σύνθετο τις νέες βελτιωμένες ιδιότητες. [2]

Τα σύνθετα υλικά που αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελούνται από ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής εμποτισμένες με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη. Οι συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται είναι από

γυαλί ή αραμίδιο ή άνθρακα. Τυπικά χαρακτηρίζονται από χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλή αντοχή σε διάβρωση.

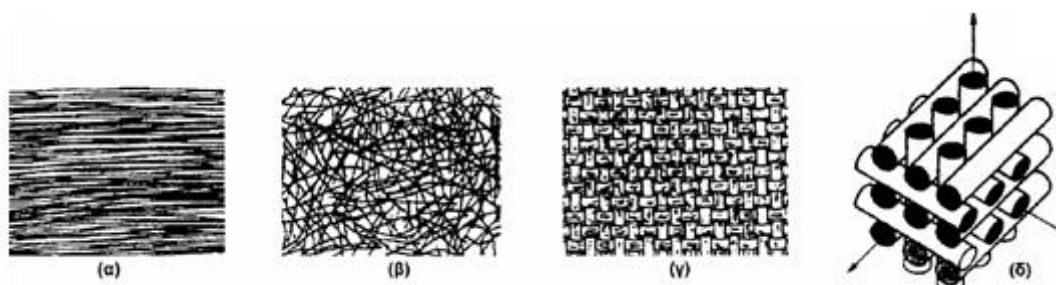
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης τα σύνθετα κατατάσσονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- ✓ Ινώδη σύνθετα (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας
- ✓ Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- ✓ Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση διασκορπισμένων σωματιδίων στο υλικό της μήτρας.
- ✓ Συνδυασμός μερικών ή όλων των παραπάνω τύπων.

Τα ινώδη σύνθετα διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα, σε:

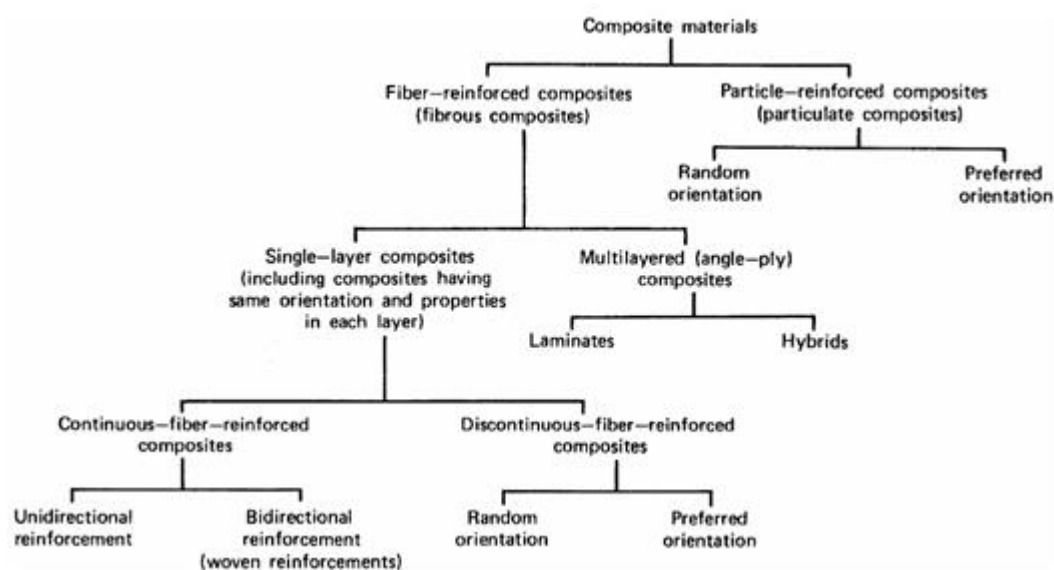
- ✓ Μονοδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- ✓ Πολυδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις και χωρίζονται στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:
 1. Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
 2. Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
 3. Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.



Εικόνα 1. Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) σε τρισσορθογώνια πλέξη. [3]

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

- ✓ Συνεχής ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $l/d \geq 100$.
- ✓ Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $l/d \leq 100$.
- ✓ Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers), όταν $d < 1 \mu\text{m}$ και $l \approx 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού). [1, 3]



Εικόνα 2. Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών. [1]

Υλικό	Πυκνότητα (g/cm ³)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας (10 ² GPa)
Χάλυβας	7.80	1.03	2.10
Κράμα αλουμινίου	2.80	0.47	0.75
Κράμα τιτανίου	4.50	0.96	1.14
Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού	2.00	1.06	0.40
Σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων II/εποξικής μήτρας	1.45	1.50	1.40
Σύνθετα υλικά ανθρακονημάτων I/εποξικής μήτρας	1.60	1.07	2.40
Σύνθετα οργανικών ινών/εποξικής μήτρας	1.40	1.40	0.80
Σύνθετα ινών βορίου/εποξικής μήτρας	2.10	1.38	2.10
Σύνθετα ινών βορίου/μήτρα αλουμινίου	2.65	1.00	2.00

Πίνακας 1. Σύγκριση αντοχής σε εφελκυσμό και μέτρων ελαστικότητας ορισμένων μετάλλων και συνθέτων υλικών.

1.2.1 Μονοστρωματικό σύνθετο (lamina)

Η κατασκευή μιας σύνθετης δομής ξεκινά από την εναπόθεση ενός μεγάλου αριθμού ινών μέσα σε μια λεπτή στρώση ρητίνης προκειμένου να σχηματιστεί ένα λεπτό μονοστρωματικό φύλλο (lamina, ply). Τα συνηθισμένα πάχη αυτών των φύλλων κυμαίνονται από 0,1 mm έως 1 mm. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται συνεχείς ίνες στην κατασκευή ενός μονοστρωματικού φύλλου, οι ίνες μπορούν να τοποθετηθούν, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, είτε με μονοδιευθυντικό προσανατολισμό (όλες οι ίνες ακολουθούν την ίδια διεύθυνση είτε με πολυδιευθυντικό προσανατολισμό.

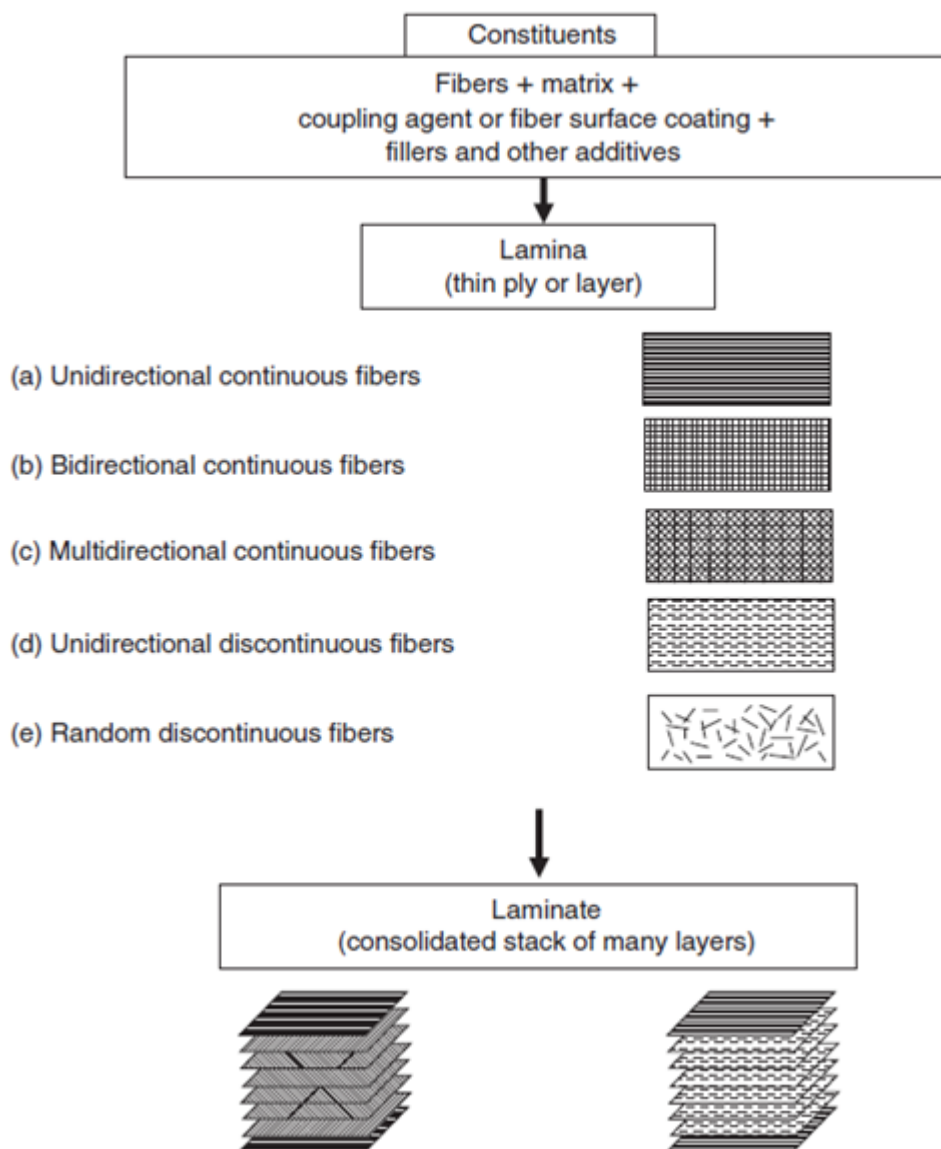
Σε ένα μονοστρωματικό σύνθετο, το σύνθετο υλικό εμφανίζει την υψηλότερη αντοχή και το μέγιστο μέτρο ελαστικότητας σε διεύθυνση παράλληλη με αυτή των ινών. Όπως αναμένεται, στην εγκάρσια διεύθυνση η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα χαμηλά. Σε ένα μονοστρωματικό υλικό όπου έχουν χρησιμοποιηθεί δισ-διευθυντικές ίνες, τα χαρακτηριστικά μεγέθη μπορούν να ποικίλουν αναλόγως του αριθμού των ινών που έχουν χρησιμοποιηθεί προς την κατά μήκος ή εγκάρσια διεύθυνση.

Ένα μονοστρωματικό σύνθετο μπορεί να κατασκευαστεί και με την εναπόθεση ασυνεχών ινών μέσα στη μήτρα του υλικού. Οι ασυνεχείς ίνες μπορούν και αυτές να τοποθετηθούν είτε με μονοδιευθυντικό προσανατολισμό είτε με τυχαίο. Τα ενισχυμένα με ασυνεχείς ίνες σύνθετα υλικά εμφανίζουν χαμηλότερη αντοχή και μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τα σύνθετα με ενίσχυση συνεχών ινών. Ωστόσο, με τον τυχαίο προσανατολισμό των ινών επιτυγχάνεται, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, το σύνθετο να έχει ίδιες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις στο επίπεδο του μονοστρωματικού φύλλου. [4]

1.2.2 Πολυστρωματικό σύνθετο (laminata)

Εφόσον οι απαιτήσεις από το σύνθετο υλικό είναι μεγαλύτερες τότε στοιβάζονται περισσότερα μονοστρωματικά φύλλα, το ένα πάνω από το άλλο, με συγκεκριμένη αλληλουχία στρώσεων, σχηματίζοντας ένα πολυστρωματικό σύνθετο (laminata). Οι στρώσεις του σύνθετου υλικού μπορεί να διαθέτουν όλες τον ίδιο προσανατολισμό ή και διαφορετικούς μεταξύ τους. Επίσης, σε ένα πολυστρωματικό

σύνθετο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικές ίνες σε κάθε στρώση δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύνθετο υλικό. Κατά κανόνα πάντως, ακόμα και στα υβριδικά πολυστρωματικά σύνθετα χρησιμοποιείται το ίδιο υλικό μήτρας σε όλες τις στρώσεις, προκειμένου ο δεσμός μεταξύ των στρώσεων να είναι κοινός καθ' όλο το ύψος του υλικού. [5]



Εικόνα 3. Βασικά δομικά στοιχεία συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες. [4]

1.3 Τρόποι παρασκευής σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών

Συνήθως, η μορφοποίηση σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών περιλαμβάνει τρία στάδια: την παραγωγή των ινών, τη διάταξη – διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα και, τέλος, την εισαγωγή των ινών μέσα στη μήτρα.

Το πρώτο στάδιο έχει παρουσιαστεί παραπάνω. Κατά το δεύτερο στάδιο, οι λεπτές ίνες που έχουν παραχθεί από το πρώτο στάδιο, ομαδοποιημένες ανά εκατοντάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες, σχηματίζουν με ή χωρίς περιστροφή ενισχυτικά νήματα ή πλεξίδες (yarn, tow ή roving).

Οι συνεχείς ίνες, μεγάλου μήκους, μπορούν να προστεθούν είτε ως ενισχυτικές στρώσεις διαφόρων προσανατολισμών (mats) είτε ως δισδιάστατες ή τρισδιάστατες πλέξεις. Η παραγωγή σύνθετων υλικών με μονοδιευθυντικές ίνες επιβάλλει την εκ των προτέρων διευθέτηση των ινών σε ταινίες με πάχος μιας ίνας και με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των ινών.

Οι ίνες με μήκος μικρότερο από ένα 1cm αναμειγνύονται με το υλικό της μήτρας. Το εύπλαστο μίγμα ινών μήτρας μορφοποιείται με κλασσικές τεχνικές όπως η χύτευση και ο ψεκασμός. Προφανώς, σε αυτήν την περίπτωση η ενίσχυση του σύνθετου έχει τυχαίο προσανατολισμό. [1, 3]

Παρακάτω ακολουθούν συνήθεις μέθοδοι παρασκευής συνθέτου υλικού οργανικής μήτρας:

A) Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετων υλικών

- **Χειροκίνητη στρώση (hand lay-up)**

Πρόκειται για την απλούστερη τεχνική παραγωγής ενός σύνθετου, αλλά ταυτόχρονα είναι αργή και επίπονη. Οι ίνες με μορφή πλεγμάτων τοποθετούνται στο καλούπι σε στρώσεις. Η πολυμερική ρητίνη, αφού αναμειχθεί με τους κατάλληλους καταλύτες και επιταχυντές, απλώνεται πάνω στην ενίσχυση με απλή έγχυση, επάλειψη ή ψεκασμό. Στη συνέχεια, η ελεύθερη επιφάνεια του σύνθετου υφίσταται συμπίεση με ρολό, ώστε να επιτευχθεί καλή επαφή ινών – μήτρας και να εξαλειφθεί

το πορώδες. Σε περίπτωση πολυστρωματικών σύνθετων υλικών, επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία. Τέλος, ακολουθεί ξήρανση της ρητίνης. [1, 3]

- **Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)**

Αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου, με τη διαφορά πως για την καλύτερη στρώση της οργανικής μήτρας χρησιμοποιείται αέριο υπό πίεση. Ακολουθεί και πάλι ξήρανση. [1, 3]

- **Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)**

Η μορφοποίηση πραγματοποιείται με το κλείσιμο ενός διαιρετού καλούπιού.



Εικόνα 4. Χύτευση σε διαιρετό καλούπι. [3]

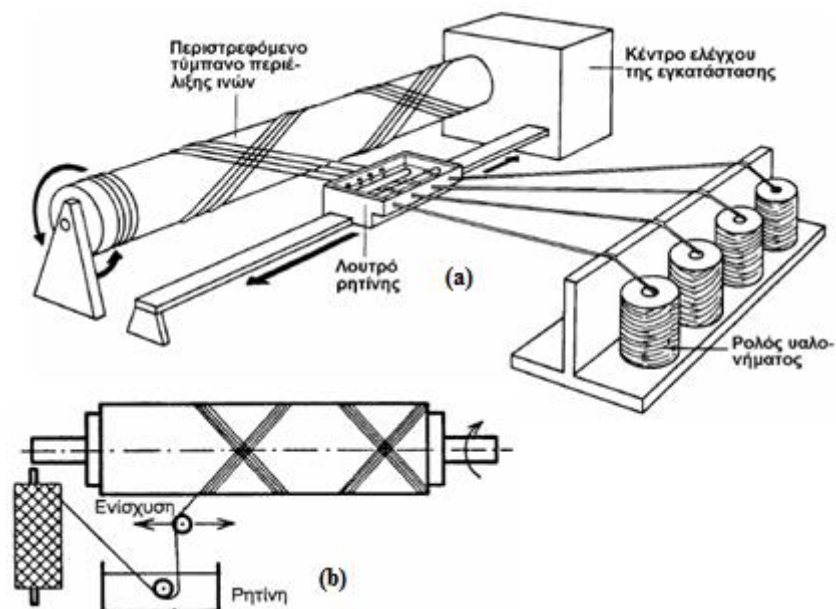
B) Συνεχής μορφοποίηση σύνθετων υλικών

Με τις συγκεκριμένες μεθόδους μπορεί να ληφθεί σύνθετο υλικό απλής γεωμετρίας και μεγάλου μήκους (νήμα, μπάρα, σωλήνας, πλάκα, φύλλο).

- **Περιέλιξη νήματος (filament winding)**

Αποτελεί σημαντική τεχνική για την παραγωγή κοίλων κυλίνδρων, υψηλών προδιαγραφών. Αφού οι ενισχυτικές ίνες εμβαπτιστούν σε λουτρό ρητίνης, περιτυλίγονται σε καλούπι επιθυμητού σχήματος. Ακολουθεί ξήρανση στον αέρα ή σε κλίβανο.

Ο ισχυρός προσανατολισμός της ενίσχυσης δίνει κελύφη σύνθετων υλικών, με υψηλή μηχανική αντοχή. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται στην κατασκευή δεξαμεμών καυσίμων και χημικών, αγωγών υψηλών πιέσεων κλπ. [1, 3]

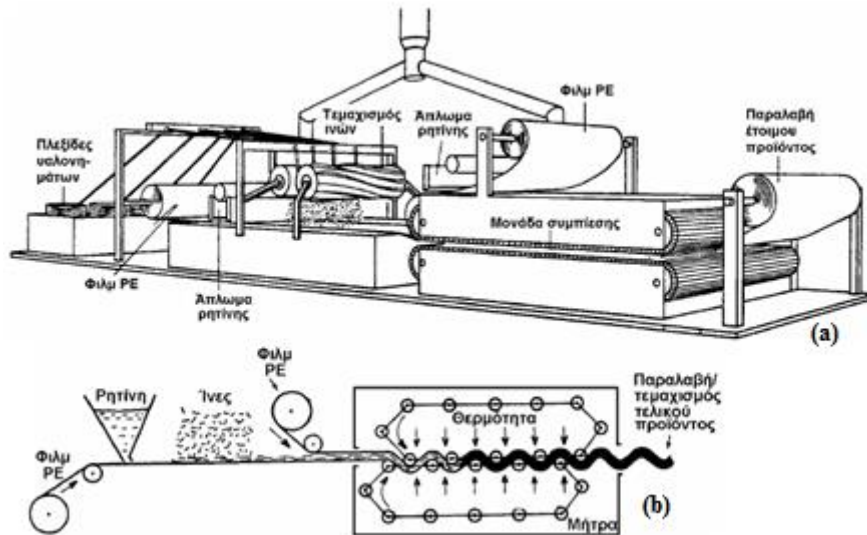


Εικόνα 5. Περιέλιξη νήματος (α) και (β) [1]

- **Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)**

Συγκριτικά με τις παραπάνω, πρόκειται για μια νέα τεχνική με μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα προϊόντα αυτής της τεχνικής έχουν μεγάλες διαστάσεις και υψηλή ομοιογένεια ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες.

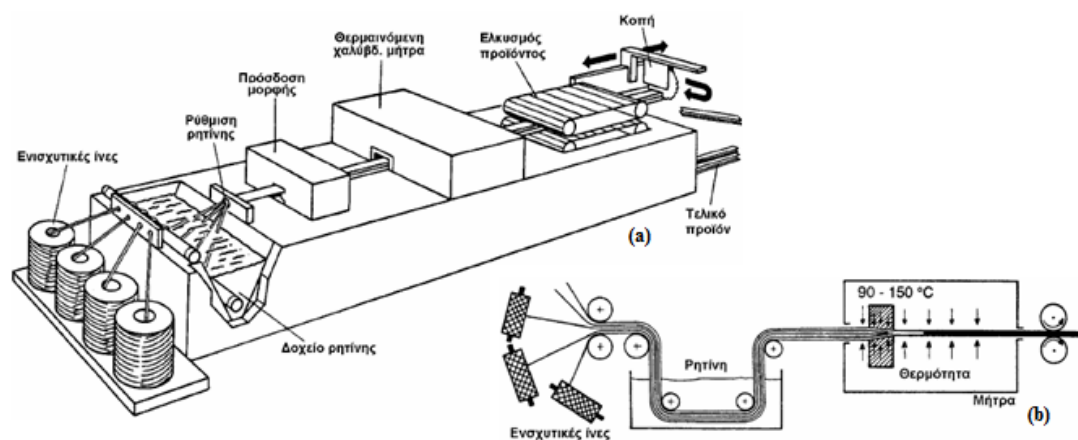
Συνεχείς ίνες γυαλιού τεμαχίζονται σε ίνες μικρού μήκους (5 cm) και αποτίθενται απευθείας σε στρώμα ρητίνης, το οποίο κινείται σε υμένιο πολυαιθυλενίου. Ένα δεύτερο στρώμα ρητίνης αποτίθεται πάνω στο πρώτο, δημιουργώντας έτσι ένα sandwich, μέσα στο οποίο έχουν εγκλωβιστεί οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού. Το σύνθετο τυλίγεται σε ρολά και αφήνεται να ωριμάσει από μία έως τέσσερις ημέρες, ώστε να επιτευχθεί καλή συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας. Το έλασμα του σύνθετου κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και γεωμετρία και τοποθετείται σε θερμό καλούπι (149°C). Με την εφαρμογή υδραυλικής πίεσης, το αρχικό έλασμα μορφοποιείται σε τελικό προϊόν. [1, 3]



Εικόνα 6. Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (α) και (β). [1]

- **Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)**

Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται σταθερή διατομή, όπως είναι οι σωλήνες, δοκοί, αγωγοί κλπ. Κατά τρόπο συνεχή, ίνες μεγάλου μήκους, διευθετημένες παράλληλα μεταξύ τους, εμβαπτίζονται σε λουτρό ρητίνης και οδηγούνται σε θερμαινόμενη μήτρα από χάλυβα, η οποία καθορίζει και τη διατομή του τελικού προϊόντος. Τα προϊόντα αυτής της τεχνικής μορφοποίησης έχουν υψηλή μηχανική αντοχή παράλληλα στον επιμήκη άξονα του προϊόντος, λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ινών και του ισχυρού προσανατολισμού τους. [1, 3]



Εικόνα 7. Μορφοποίηση με εμβάπτιση (α) και (β). [1]

2. Κεφάλαιο: Σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας

2.1 Εισαγωγή

Στα σύνθετα υλικά η μήτρα αποτελεί τη συνδετική ύλη μεταξύ των κόκκων ή των ινών της ενίσχυσης και ο ρόλος της είναι καθοριστικό, καθότι επιτελεί μια σειρά από σημαντικές λειτουργίες. Αυτή μπορεί να οργανική (από πολυμερές), μεταλλική ή κεραμική. Αρχικά μεταβιβάζει τα μηχανικά φορτία που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς το μέσο ενίσχυσης και διατηρεί τις ίνες της ενίσχυσης σε κατάλληλο προσανατολισμό. Παράλληλα, προστατεύει την επιφάνεια ενίσχυσης από το περιβάλλον και από άλλους παράγοντες, όπως η υγρασία, η θερμότητα, η χημική προβολή, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ανθεκτικότητα, ηλεκτρική μόνωση στο σύνθετο υλικό και ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από την θραύση των ινών. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία, σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του υλικού και, τέλος, συμβατότητα με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Συνήθως, το υλικό της μήτρας έχει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες. Καθοριστικός παράγοντας είναι και η ικανή πρόσφυση ίνας – μήτρας. Η επιλογή κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χρήσης του σύνθετου και από τις παραμέτρους της παραγωγικής διαδικασίας για την κατασκευή του συνθέτου, κριτήρια που απορρέουν από τις ιδιότητες της μήτρας. [1, 2]

2.2 Οργανικές μήτρες (πολυμερικές ρητίνες)

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως μήτρα στα σύνθετα υλικά αναφέρονται συχνά ως ρητίνες. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η πολυμερική μήτρα

καταλαμβάνει το 30% - 40% του συνολικού όγκου του σύνθετου υλικού. Οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης χρησιμοποιείται στην κατασκευή ενός σύνθετου υλικού, πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- ✓ Καλές μηχανικές ιδιότητες
- ✓ Καλή πρόσφυση πάνω στις ίνες της ενίσχυσης
- ✓ Υψηλή δυσθραυστότητα
- ✓ Καλή αντίσταση σε περιβαλλοντικές προσβολές

2.2.1 Ιδιότητες ρητινών

- **Μηχανικές ιδιότητες ρητινών**

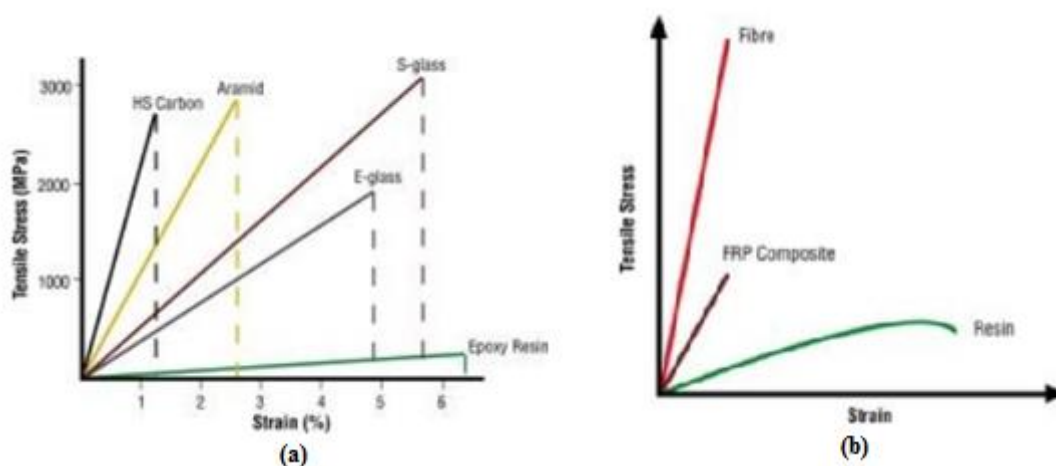
Παρακάτω ακολουθεί μια τυπική καμπύλη τάσης / παραμόρφωσης ενός πρότυπου συστήματος ρητίνης. Η καμπύλη αποκαλύπτει υψηλή αντοχή, υψηλή στιβαρότητα (φαίνεται από την κλίση της ελαστικής περιοχής) και υψηλό όριο θραύσης. Αυτό σημαίνει πως η ρητίνη είναι αρχικά δύσκαμπτη και ταυτόχρονα δεν μπορεί υποστεί ψαθυρή θραύση.



Σχήμα 1. Τυπικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης ρητινών. [6]

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως όταν ασκείται φορτίο σε ένα σύνθετο υλικό, προκειμένου να επιτευχθούν οι υψηλότερες δυνατές μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου, η ρητίνη πρέπει να επιδέχεται παραμόρφωση τουλάχιστον ίση με εκείνη της ίνας ενίσχυσης. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω

διάγραμμα, όπου απεικονίζονται οι παραμορφώσεις θραύσης για ίνες τύπου E-glass, S-glass, αραμιδίου και υψηλής αντοχής ανθρακονήματα (σκέτων, όχι σε σύνθετο υλικό), καθώς μιας ευρέως χρησιμοποιούμενης ρητίνης. Όπως φαίνεται παρακάτω, η ίνα από S-glass, με επιμήκυνση θραύσης 5,3%, πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με μια ρητίνη που φτάνει τουλάχιστον την ίδια τιμή μέγιστης παραμόρφωσης πριν τη θραύση, προκειμένου το σύνθετο υλικό να αποδώσει τις βέλτιστες εφελκυστικές του ιδιότητες.



Σχήμα 2. Συγκριτικό διάγραμμα αντοχής σε εφελκυσμό διάφορων ενισχυτικών ινών (a) και συγκριτικό διάγραμμα των συστατικών μερών του συνθέτου, καθώς και του συνθέτου που απαρτίζουν (b). [6]

- **Συγκολλητικές ιδιότητες του συστήματος ρητίνης**

Σε οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης απαιτείται υψηλή συγκολλησιμότητα μεταξύ ρητίνης και ενισχυτικών ινών, ώστε το φορτίο να μεταφέρεται αποδοτικά και να αποτρέπεται η έναρξη ρωγμών ή η αποκόλληση ρητίνης και ίνας.

- **Δυσθραυστότητα του συστήματος ρητίνης**

Η δυσθραυστότητα αποτελεί ένα μέτρο για την αντίσταση του υλικού στη διάδοση ρωγμών. Ωστόσο, στα σύνθετα υλικά αυτό είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά, η καμπύλη τάσης / παραμόρφωσης του συστήματος ρητίνης από μόνο του παρέχει μια ένδειξη για την αντοχή του υλικού. Σε γενικές γραμμές, όσο περισσότερο παραμορφώνεται η ρητίνη προτού επέλθει θραύση, τόσο πιο ανθεκτικό και με μεγαλύτερη αντίσταση στη διάδοση ρωγμών θα είναι το σύνθετο

υλικό. Αντίθετα, ένα σύστημα ρητίνης με μικρή παραμόρφωση θραύσης τείνει να προσδώσει ψαθυρά χαρακτηριστικά σε ένα σύνθετο υλικό, όπου οι ρωγμές διαδίδονται γρήγορα. Είναι πολύ σημαντικό, αυτή η ιδιότητα να ταιριάζει με την επιμήκυνση θραύσης της ενισχυτικής ίνας.

- **Περιβάλλον**

Ιδιότητες, όπως η καλή αντίσταση στο περιβάλλον, το νερό και άλλες ουσίες, αντοχή σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φορτίσεων είναι υψηλής σημασίας για οποιοδήποτε σύστημα ρητίνης.

- **Θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g)**

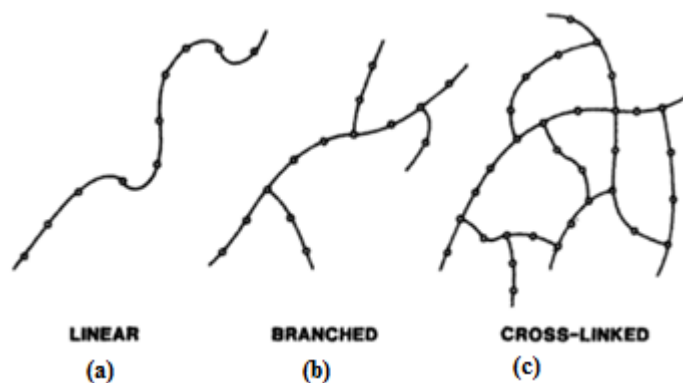
Κατά κανόνα, η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) της πολυμερικής μήτρας είναι κρίσιμης σημασίας για το σύνθετο υλικό. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης καθορίζει τη μετάβαση από μια μαλακή και ελαστική φάση σε μια πιο δύσκαμπτη ή υαλώδη κατάσταση του πολυμερούς. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της υαλώδους μετάβασης, το πολυμερές παραμένει δύσκαμπτο και μια κατάλληλη μήτρα για να μεταφέρει τα στις ίνες της ενίσχυσης, παρέχοντας στήριξη κατά του λυγισμού των ινών και διατηρώντας την κατάλληλη διεύθυνση των ινών. Σε λειτουργία του σύνθετου άνω της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης, η μήτρα γίνεται μαλακή και δεν μπορεί πλέον να συμβάλλει θετικά στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.
[6]

2.2.2 Τύποι ρητινών

Τα πολυμερή συναντώνται σε τουλάχιστον τρεις βασικούς σχηματισμούς: γραμμικά (linear), διακλαδισμένα (branched) και δικτυωτά (cross-linked). Ένα γραμμικό πολυμερές (π.χ. πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, πολυαμίδιο κλπ.), αποτελείται από μια μοναδική αλυσίδα μονομερών. Το διακλαδισμένο πολυμερές (π.χ. συμπολυμερές αιθυλενίου – εξένιου) αποτελείται από μια κύρια αλυσίδα μονομερών στην από την οποία εξέρχουν μικρότερες αλυσίδες σχηματίζοντας

διακλαδώσεις, δισδιάστατης δομής. Τέλος, το δικτυωτό πολυμερές (π.χ. φορμοφαινόλη, πολυεστέρες, πολυεποξειδικές ενώσεις, πολυουρεθάνες κλπ.) αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων αλυσίδων, όπου η δικτυωτή δομή εκτείνεται τις περισσότερες φορές σε τρεις διαστάσεις. Τα γραμμικά πολυμερή μπορούν μέσω γεφύρωσης να αποκτήσουν δικτυωτή δομή.

Ανάλογα με το είδος του πολυμερούς που χρησιμοποιείται ως υλικό μήτρας του συνθέτου, οι οργανικές μήτρες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: ελαστομερείς, θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες. [1, 3, 5]



Εικόνα 8. Οι τρεις βασικοί σχηματισμοί των πολυμερών: γραμμικό (a), διακλαδισμένο (b) και δικτυωτό (c). [5]

Μήτρα	Ίνες	Εφαρμογές
Εποξική	Kevlar	Αεροναυπηγική και ναυπηγική βιομηχανία. Βιομηχανία αθλητικών ειδών (ρακέτες τένις, μπαστούνια golf, είδη τοξοβολίας, καλάμια ψαρέματος).
Πολυεστερική	Γραφίτη	Αεροναυπηγική και αυτοκινητοβιομηχανία. Μέρη αεροσκαφών, πλοιαρίων και αυτοκινήτων, μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση.
Πολυμερική	Γυαλιού	Αθλητικός εξοπλισμός

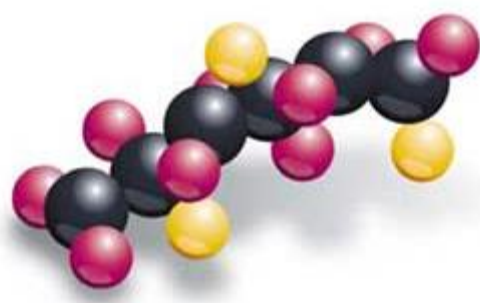
Πίνακας 2. Εφαρμογές συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών.

2.2.2.1 Ελαστομερείς

Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες τυχαίου προσανατολισμού. Διαθέτουν χαμηλή δυσκαμψία με αποτέλεσμα όταν υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα μετά την άρση του εξωτερικού φορτίου που τις προκάλεσε.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα ελαστομερών αποτελούν το ελαστικό κόμμι, το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το πολυχλωροπρένιο και οι σιλικόνες. Το

καουτσούκ βρίσκει την κυριότερη εφαρμογή του στα λάστιχα των αυτοκινήτων. Το συγκεκριμένο υλικό δεν επανέρχεται πλήρως στις αρχικές του διαστάσεις μετά την αποφόρτιση, γιατί τα μακρομόρια έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση. Για να αποφευχθεί η πλαστική παραμόρφωση πραγματοποιείται βουλκανισμός, όπου το καουτσούκ θερμαίνεται με θείο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ των μορίων, ενισχύοντας κατά αυτόν τον τρόπο τη δομή του ελαστικού. Με αυτήν τη διαδικασία το ελαστομερές γίνεται πιο σκληρό και ανθεκτικό και λιγότερο ευαίσθητο σε θερμοκρασιακές μεταβολές. [3, 6]



Εικόνα 9. Γραφική απεικόνιση αλυσίδας μορίων ελαστομερών υλικών.

2.2.2.2 Θερμοπλαστικές

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες χαρακτηρίζονται από την ιδιότητά τους να μπορούν να λιώνουν όταν θερμαίνονται και να στερεοποιούνται όταν ψύχονται. Αυτό τους δίνει, μεταξύ άλλων, τη δυνατότητα επισκευής τους εάν αστοχήσουν κατά τη λειτουργία τους.

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες αποτελούνται κυρίως από γραμμικά μόρια που συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς Van der Waals και το χαρακτηριστικό τους είναι πως όταν θερμανθούν μαλακώνουν και γίνονται εύκαμπτες και σε υψηλότερες θερμοκρασίες ρέουν. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαλάρωσης των μοριακών δεσμών. Αν θερμανθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από εκείνη της υαλώδους μετάβασης (T_g) και στη συνέχεια ψυχθούν, τότε μετατρέπονται πάλι σε στερεά έχοντας επανακτήσει εν μέρει τις ιδιοτητές τους. Η διαδικασία είναι αντιστρεπτή, αλλά με συνεχή επανάληψη των κύκλων θέρμανσης – ψύξης εμφανίζεται σταδιακή υποβάθμιση των ιδιοτήτων του πολυμερούς. Αντίθετα από τις

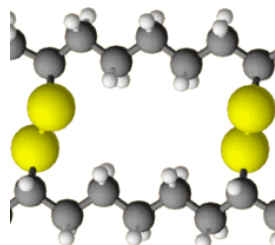
θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, στις θερμοπλαστικές δεν αναπτύσσονται σταυροδεσμοί.

Οι ιδιότητές τους, όπως η δυσκαμψία και η αντίσταση σε χημική διάβρωση, οφείλονται στις ιδιότητες των μονομερών που απαρτίζουν τις αλυσίδες και του υψηλού μοριακού βάρους. Ορισμένα από τα πιο διαδεδομένα θερμοπλαστικά σε εφαρμογές ευρείας και βιομηχανικής χρήσης είναι το πολυαιθυλένιο (PE), το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS) και τα πολυαμίδια (Nylon). [3, 6]

2.2.2.3 Θερμοσκληρυνόμενες

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες αποτελούν την πιο κοινή επιλογή ως σύστημα μήτρας για σύνθετα υλικά, καθώς, μεταξύ άλλων, προσφέρουν χαμηλή ταχύτητα ροής τήγματος (ιξώδης σύντηξη, low melt viscosity), καλό εμποτισμό ινών και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες κατεργασίας.

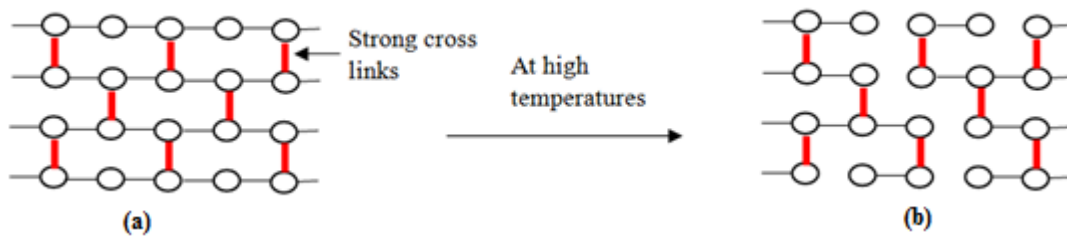
Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των μοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, οι ρευστές ρητίνες αναμιγνύονται με τους κατάλληλους σκληρυντές και μετατρέπονται σε σκληρά, άκαμπτα, ψαθυρά στερεά μέσω του μηχανισμού σταυροδεσμών (crosslinking) κατά αναντίστροφο τρόπο. Οι σταυροδεσμοί έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού τρισδιάστατου δικτύου μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται κατά το στάδιο μορφοποίησης του σύνθετου υλικού.



Εικόνα 10. Δημιουργία σταυροδεσμών.

Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από τις μοριακές μονάδες που σχηματίζουν το τρισδιάστατο πλέγμα αλυσίδων, το μήκος των αλυσίδων και την πυκνότητα των

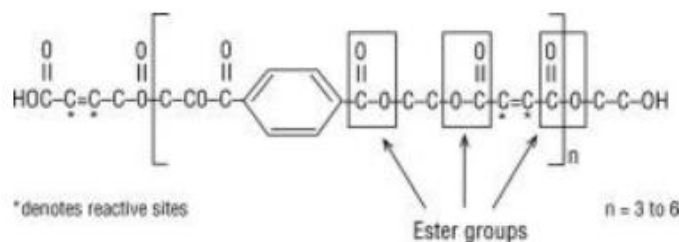
σταυροδεσμών, η οποία καθορίζεται από τη μέθοδο κατασκευής και ειδικά τη διαδικασία θερμικής κατεργασίας (curing). Η περαιτέρω θέρμανσή τους δεν οδηγεί στην τήξη τους. Διατηρούν το σχήμα τους έως ότου ξεκινήσουν να αποδομούνται (thermal degradation) σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Παρακάτω ακολουθεί παρουσίαση ορισμένων συνήθων θερμοσκληρυνόμενων ρητινών που χρησιμοποιούνται ως υλικό μήτρας στα σύνθετα υλικά. [3, 6]



Εικόνα 11. Αλυσίδα μορίων θερμοσκληρυνόμενου πλαστικού (a) και η αποδόμησή τους σε υψηλές θερμοκρασίες (b).

2.2.2.3.1 Πολυεστέρες

Χρησιμοποιούνται κυρίως για σύνθετα υλικά ενισχυμένα με υαλονήματα και στη ναυπηγική, είναι εύκολες στη χρήση και διατίθενται σε εξαιρετικά χαμηλό κόστος. Ωστόσο, παρέχουν μέτριες μηχανικές ιδιότητες, υψηλές εκπομπές στυρενίου σε ανοιχτό καλούπι, υψηλός δείκτης συρρίκνωσης και χαμηλό κύκλος ζωής. Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι του πολυμερή ακόρεστου τύπου. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η εξιδανικευμένη χημική δομή ενός τυπικού πολυεστέρα. Αξίζουν προσοχής, οι θέσεις των ομάδων εστέρων (CO – O – C) και των αντιδρώντων πλευρών (C* = C*) στη μοριακή αλυσίδα.

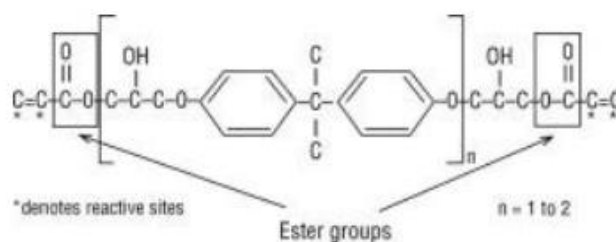


Εικόνα 12. Μοριακή αλυσίδα πολυεστέρα. [6]

Συνήθως διατίθενται σε ένα διάλυμα που αποτελείται από πολυεστέρα σε ένα μονομερές, συνήθως στυρένιο. Η προσθήκη στυρενίου σε ποσοστό μέχρι και 50% σε αυτές τις ρητίνες, τις καθιστά πιο εύκολες στο χειρισμό αφού μειώνεται το ιξώδες τους. Επίσης, το στυρένιο ευθύνεται για τη κρίσιμης σημασίας δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ των μορίων του πολυεστέρα.

2.2.2.3.2 Βινυλεστέρες

Η μοριακή δομή των βινυλεστέρων μοιάζει με των πολυεστέρων. Η σημαντική διαφορά τους εντοπίζεται στο γεγονός πως τα αντιδρώντα τμήματά τους τοποθετούνται αποκλειστικά στο άκρο της μοριακής αλυσίδας. Έτσι ολόκληρο το μήκος της μοριακής αλυσίδας μπορεί να απορροφήσει φορτία και αυτό καθιστά τους βινυλεστέρες πιο ανθεκτικούς από τους πολυεστέρες. Επίσης, το μόριο του βινυλεστέρα διαθέτει λιγότερες ομάδες εστέρων. Οι ομάδες των εστέρων είναι ευαίσθητες στην προσβολή από νερό μέσω υδρόλυσης, πράγμα που σημαίνει πως οι βινυλεστέρες διαθέτουν μεγαλύτερη αντίσταση σε νερό και πολλές άλλες χημικές ουσίες. Στην παρακάτω εικόνα ακολουθεί μια εξιδανικευμένη χημική δομή ενός τυπικού βινυλεστέρα. Αξίζουν προσοχής, οι θέσεις των ομάδων εστέρα και των αντιδρώντων τμημάτων (C* - C*) στην μοριακή αλυσίδα.



Εικόνα 13. Μοριακή αλυσίδα βινυλεστέρα. [6]

Υψηλή αντίσταση σε χημική προσβολή, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους πολυεστέρες. Ωστόσο, απαιτείται θερμική μετεπεξεργασία για καλές μηχανικές

ιδιότητες, έχουν υψηλό ποσοστό στυρενίου, υψηλότερο κόστος από τους πολυεστέρες και υψηλό δείκτη συρρίκνωσης.

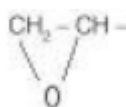
2.2.2.3.3 Φαινολικές ρητίνες

Χαρακτηρίζονται από χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, η εφαρμογή τους συχνά συνοδεύεται από πολλά διάκενα και επιφανειακών ατελειών λόγω της γρήγορης στερεοποίησής τους, αλλά η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400° C, πράγμα που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή θερμική αντοχή. Επίσης οι φαινόλες διατηρούν ικανοποιητικά τις ιδιότητές τους ακόμα σε ιδιαίτερα αυξημένες θερμοκρασίες.

2.2.2.3.4 Εποξυδικές ή εποξικές ρητίνες

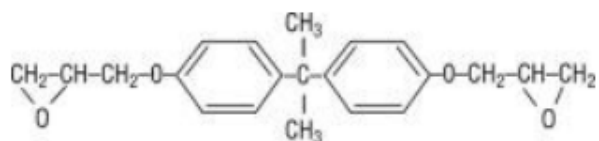
Χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική και σε λοιπές εμπορικές εφαρμογές, οι οποίες αφορούν κυρίως την κατασκευή σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (CFRP) και ίνες υάλου.

Εξασφαλίζουν καλύτερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες και αντοχή στην υγρασία από τους πολυεστέρες και τους βινυλεστέρες. Διαθέτουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας περίπου τους 200° C, έχουν χαμηλό συντελεστή συρρίκνωσης, ανθεκτικές σε μεγάλους κύκλους φορτίσεων. Είναι πιο ακριβές από τις εστερικές ρητίνες, χρειάζονται προσοχή στη δοσολογία των δύο συστατικών τους. Ο όρος «εποξικό» αναφέρεται σε μια χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου συνδεδεμένου με δύο άτομα άνθρακα που είναι ήδη συνδεδεμένα με κάποιο τρόπο. Η πιο απλή μορφή αποτελείται από μια κυκλική δομή τριών μερών, καλούμενη «Α-εποxy». Η εξιδανικευμένη δομή φαίνεται παρακάτω και είναι το πιο εύκολα αναγνωρίσιμο χαρακτηριστικό οποιουδήποτε εποξικού μορίου.



Εικόνα 14. Εξιδανικευμένη χημική δομή ενός απλού εποξειδίου (οξειδίο αιθυλενίου). [6]

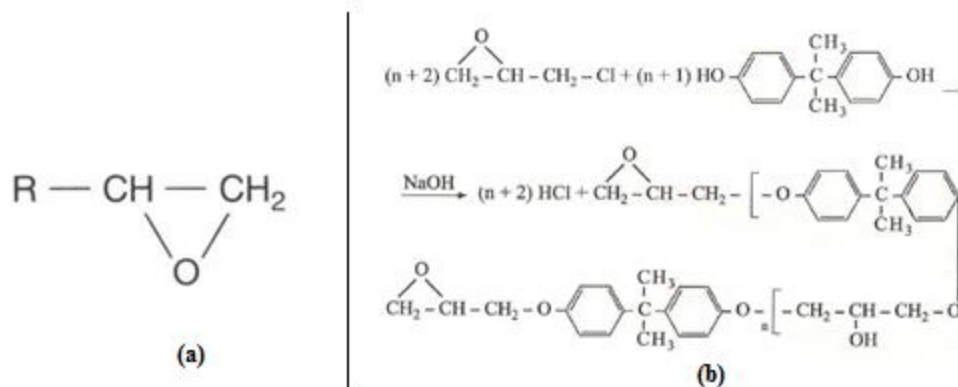
Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά των εποξικών ρητινών είναι ο χαμηλός συντελεστής συρρίκνωσης τους κατά την μορφοποίησή τους, πράγμα που μειώνει τις εσωτερικές τάσεις και την αποκάλυψη του αποτυπώματος των ινών ενίσχυσης του σύνθετου υλικού. Οι εποξικές ρητίνες σχηματίζονται από μια μακριά μοριακή αλυσίδα, όμοια με των βινυλεστέρων με τα αντιδρώντα τμήματα στα άκρα. Ωστόσο, αυτά τα αντιδρώντα τμήματα δεν σχηματίζονται από ομάδες εστέρων, αλλά από ομάδες εποξειδίων. Η απουσία των εστέρων έχει ως αποτέλεσμα ιδιαίτερα καλή αντίσταση στο νερό. Παράλληλα, το εποξικό μόριο περιέχει δύο κυκλικές ομάδες (ring groups) στο κέντρο του, οι οποίες είναι ικανές να απορροφήσουν τόσο μηχανικά όσο και θερμικά φορτία πολύ καλύτερα από τις γραμμικές ομάδες. Αυτός είναι και ο λόγος που οι εποξικές ρητίνες εξασφαλίζουν τόσο υψηλή στιβαρότητα, και αντοχή σε μηχανικά και θερμικά φορτία. Παρακάτω ακολουθεί η εικόνα μιας εξιδανικευμένης χημικής δομής ενός τυπικού εποξειδίου. Αξίζει προσοχής, η απουσία εστερικών ομάδων μέσα στη μοριακή αλυσίδα. [4, 6]



Εικόνα 15. Μοριακή αλυσίδα εποξικής ρητίνης [6]

- **Μηχανισμός πολυμερισμού**

Η εποξική ρητίνη είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο αποτελείται από αλυσίδες που περιέχουν τουλάχιστον δύο ομάδες εποξειδίου. Τα προπολυμερή (μονομερή) των πιο συνηθισμένων εποξικών ρητινών παράγονται από την αντίδραση συμπύκνωσης της διφαινόλης Α [2,2'-δι(4-υδροξυφαινύλο)-προπάνιο] και της επιγλωρυδρίνης.



Εικόνα 16. Εποξική ομάδα (α) και αντίδραση συμπίκνωσης διφαινόλης Α με επιχλωρυδρίνη προς σχηματισμό προπολυμερούς εποξικής ρητίνης (β). [2]

Το προπολυμερές μπορεί να είναι ρευστό ή στερεό και όταν πολυμεριστεί με κατάλληλο αντιδραστήριο (σκληρυντής), μετατρέπεται σε ένα άκαμπτο στερεό λόγω του σχηματισμού σταυροδεσμών ανάμεσα στις μακρομοριακές αλυσίδες. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ισχυρού τρισδιάστατου δικτύου, το οποίο περιορίζει την κινητικότητα των μακρομορίων. Η παραπάνω διαδικασία λαμβάνει χώρα πρακτικά σε οποιαδήποτε θερμοκρασία από 5°C έως 150°C.

- **Σκληρυντές εποξικού συστήματος**

Οι εποξικές ρητίνες πολυμερίζονται από διάφορους σκληρυντές, όπως οι διαμίνες, οι διανυδρίτες του τετρακαρβονικού οξέος κλπ. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς. Η ποσότητα του σκληρυντή επηρεάζει ως ένα βαθμό την ταχύτητα πολυμερισμού και το πλήθος των σταυροδεσμών που σχηματίζονται. Ο πολυμερισμός μπορεί να επηρεαστεί από την θερμοκρασία και διαρκεί από μερικά λεπτά έως και ώρες. [2, 4, 6]

- **Ιδιότητες εποξικών ρητινών / εποξικών συστημάτων**

Οι εποξικές ρητίνες χαρακτηρίζονται από άριστη χημική αντίσταση και αντίσταση σε φωτιά. Επίσης, η χημική σύνθεσή τους, με την παρουσία των πολικών υδροξυλομάδων και των αιθερομάδων, προσφέρει άριστη πρόσφυση μεταξύ μήτρας και ίνας σε σχέση με άλλες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Σε αυτήν την ιδιότητα

οφείλεται το γεγονός πως τα σύνθετα υλικά με εποξικά συστήματα δύο συστατικών εμφανίζουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και υψηλή δυσκαμψία. Άλλο ένα πλεονέκτημα των εποξικών ρητινών είναι ο χαμηλός βαθμός συρρίκνωσης τους κατά τη διάρκεια και μετά τη διαδικασία του πολυμερισμού. Η συρρίκνωση συμβαίνει λόγω της επαναδιάταξης και επαναπροσανατολισμού των μορίων της ρητίνης, κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού της ρητίνης με τον σκληρυντή. Ενώ, οι συνήθεις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες συρρικνώνονται κατά 8% μετά το πέρας του πολυμερισμού, οι εποξικές συρρικνώνονται μόλις κατά 2%. Εκτός από τη διατήρηση της σταθερότητας των διαστάσεων, ο χαμηλός βαθμός συρρίκνωσης του τελικού προϊόντος λειτουργεί ευεργετικά για τη μείωση εσωτερικών τάσεων μέσα στο υλικό, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. [2, 4]

2.2.3 Τρόποι βελτίωσης συμπεριφοράς σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας

2.2.3.1 Πρόσθετα εγκλείσματα

Τα βασικά συστατικά ενός ινώδους σύνθετου υλικού (fiber-reinforced composite material) είναι, όπως έχει αναφερθεί εκτενώς παραπάνω, είναι οι ίνες και η μήτρα που δρα ως συνδετική ύλη για τις ίνες. Άλλα συστατικά που συναντώνται στα σύνθετα υλικά είναι συνδετικά υλικά (coupling agents), υλικά επένδυσης/επικαλύψεις (coatings) και εγκλείσματα (fillers). Τα συνδετικά υλικά και οι επικαλύψεις εφαρμόζονται πάνω στις ίνες προκειμένου να βελτιωθούν η ποιότητα εμποτισμού τους από τη ρητίνη της μήτρας και η συνάφεια στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Εξασφαλίζοντας καλό εμποτισμό και ισχυρή σύνδεση ανάμεσα στα συστατικά του σύνθετου βελτιώνεται η μεταφορά τάσεων φορτίου μεταξύ των ινών και της μήτρας. Άλλωστε, η κακή συνάφεια μεταξύ των συστατικών του σύνθετου οδηγεί στην εκρίζωση (pull out) των ινών από τη μήτρα και κατά συνέπεια στην αστοχία του σύνθετου υλικού. Προσθέτοντας ορισμένη ποσότητα εγκλεισμάτων (fillers) στη ρητίνη της μήτρας μπορούν να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι εγκλεισμάτων μπορούν, μεταξύ άλλων, να αυξήσουν το ιξώδες της ρητίνης, να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά ροής της ρητίνης,

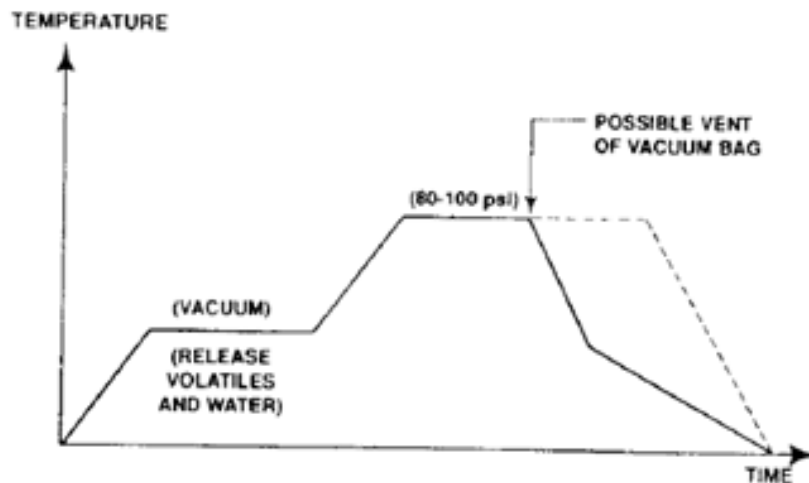
να μειώσουν το βαθμό συρρίκνωσης της ρητίνης αφού ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός και η σκλήρυνσή της ή να αυξήσουν την επιφανειακή σκληρότητα. [3, 4, 35]

2.2.3.2 Θερμική θεραπεία (curing)

Ο όρος της θερμικής επεξεργασίας αναφέρεται στη διαδικασία στερεοποίησης του πολυμερούς της μήτρας μήτρα. Για θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, που αποτελούν μέρος του αντικειμένου της παρούσας εργασίας, συνήθως προστίθεται θερμότητα ως καταλύτης για να επιταχύνει τον πολυμερισμό. Σε γενικές γραμμές, ισχύει πως όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της θερμικής θεραπείας, τόσο μειώνεται ο χρόνος της θεραπείας (χωρίς να καεί το υλικό βέβαια). Η θερμότητα απαιτείται για τους εξής λόγους:

- ✓ Ορισμένοι καταλύτες και σκληρυντές δεν αντιδρούν κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία.
- ✓ Απαιτείται κινητικότητα μορίων για την επαφή αντιδρώντων χημικών ομάδων.
- ✓ Η θερμότητα απομακρύνει τα αέρια αντίδρασης (volatiles) και την υγρασία (διαφορετικά αναπτύσσονται κενά). Αξίζει να σημειωθεί, πως τα αέρια αντίδρασης δεν απομακρύνονται όταν ασκείται ταυτόχρονα πίεση.
- ✓ Η ρητίνη ρέει πιο εύκολα επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή πάνω στο επίπεδο του σύνθετου. Για τη μείωση του πάχους των ινών (debulk) και του συστήματος ρητίνης, καθώς και για την απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης απαιτείται άσκηση πίεσης.

Ένας τυπικός κύκλος θερμικής θεραπείας (curing cycle) σε διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, όπου η τάξη μεγέθους του χρόνου είναι μερικές ώρες και της θερμοκρασίας εκατοντάδων βαθμών Κελσίου. Ο κύκλος θερμικής θεραπείας ξεκινά με μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας υπό συνθήκες κενού, έτσι ώστε να μπορούν να απομακρυνθούν τα αέρια και οι υδρατμοί από το σύνθετο. Έπειτα, ακολουθεί ξανά σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τη μέγιστη θερμοκρασία της θερμικής θεραπείας, η οποία διατηρείται σταθερή για ορισμένες ώρες προκειμένου να μπορέσουν να δημιουργηθούν σταυροδεσμοί και ταυτόχρονα με άσκηση πίεσης να συμπιεστεί το πάχος του στρωματικού σύνθετου.



Σχήμα 3. Τυπικός κύκλος θερμικής θεραπείας εποξικής ρητίνης. [5]

Η αρχική δομή ενός πολυστρωματικού σύνθετου (laminates) είναι μεμονωμένα μονοστρωματικά φύλλα (lamina), στοιβαγμένα το ένα πάνω από το άλλο (μερικώς ξηρανσμένα για να μειωθεί η ροή της ρητίνης κατά τη διάρκεια της θεραπείας της πολυστρωματικής διάταξης). Η ρητίνη βρίσκεται σε ημι-στερεή κατάσταση με αμελητέα αντοχή και στιβαρότητα. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά, εκκινεί η δημιουργία σταυροδεσμών, η οποία γίνεται πιο έντονη όταν επιτευχθεί η θερμοκρασία γελοποίησης (gel temperature). Η τελευταία είναι η θερμοκρασία κατά την οποία το ιξώδες γίνεται τόσο υψηλό ώστε δεν πραγματοποιείται πλέον καμία περαιτέρω αλλαγή διαστάσεων. Η σταδιακή δημιουργία σταυροδεσμών προκαλεί στερεοποίηση, αλλά η υψηλή θερμοκρασία κάνει το υλικό πιο μαλακό, μειώνοντας τη στιβαρότητα. Στην υψηλότερη θερμοκρασία του κύκλου, εφόσον τηρηθούν ο προβλεπόμενος κύκλος θερμικής θεραπείας και οι χρόνοι διατήρησης των θερμοκρασιών, η δημιουργία των σταυροδεσμών βρίσκεται κοντά στην ολοκλήρωσή της. Η ρητίνη έχει πλέον στερεοποιηθεί, αλλά παραμένει εύκαμπτη λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Έπειτα η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου σε ένα χρονικό διάστημα περίπου μιας ώρας, προκειμένου να αποφευχθούν θερμικά σοκ. Η άσκηση πίεσης μπορεί να σταματήσει γρήγορα. Εφόσον πραγματοποιηθεί ύστερη θερμική θεραπεία (post curing), δεν δημιουργούνται επιπλέον σταυροδεσμοί, εκτός κι αν κατά τον προηγούμενο κύκλο ξεπεράστηκε η μέγιστη θερμοκρασία και διατηρήθηκε αυξημένη για περισσότερο από μια ώρα. [5, 6].

Οι ιδιότητες μιας εποξικής ρητίνης που έχει υποστεί θερμική θεραπεία εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την πυκνότητα των σταυροδεσμών (η απόσταση μεταξύ των σταυροδεσμών). Σε γενικές γραμμές, το μέτρο ελαστικότητας, η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης (T_g) και η θερμική σταθερότητα (thermal stability), καθώς και η χημική αντίσταση βελτιώνεται με την αύξηση της πυκνότητας των σταυροδεσμών, αλλά ωστόσο η παραμόρφωση θραύσης και η δυσθραυστότητα μειώνονται. Οι παράγοντες που καθορίζουν την πυκνότητα των σταυροδεσμών είναι η χημική δομή της αρχικά υγρής ρητίνης (π.χ. αριθμός εποξειδικών ομάδων ανά μόριο και η απόσταση μεταξύ των εποξειδικών ομάδων). [4, 6]

3. Κεφάλαιο: Εσωτερική ενίσχυση με ίνες

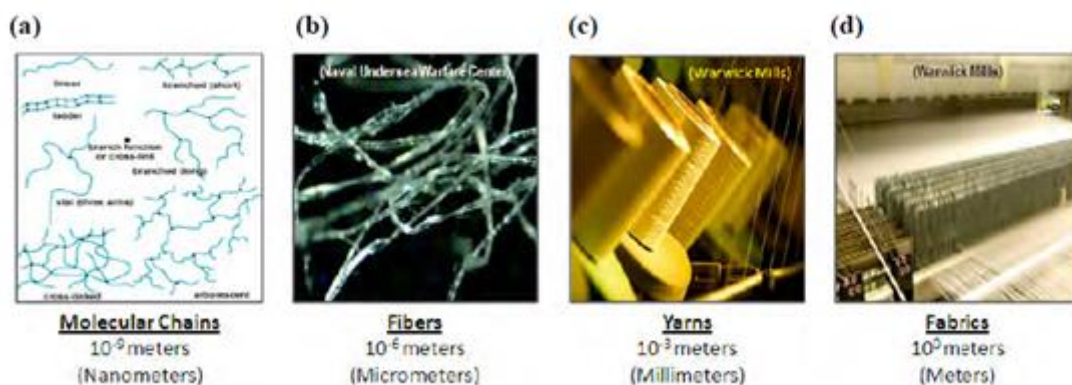
3.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος της ενίσχυσης σε ένα σύνθετο υλικό είναι κατά κύριο λόγο η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του συστήματος ρητίνης που χρησιμοποιείται. Διαφορετικοί τύποι ινών έχουν διαφορετικές ιδιότητες και κατά συνέπεια επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Στις περισσότερες εφαρμογές, οι ίνες της ενίσχυσης πρέπει να έχουν διαταχθεί σε κάποιο είδος πλέγματος, κοινώς γνωστού ως ύφασμα, ώστε να είναι δυνατός ο χειρισμός τους κατά τη διαδικασία παρασκευής του σύνθετου υλικού. Οι διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης και διάταξης των ινών σε μορφή ενιαίου υφάσματος οδηγούν σε πολλούς διαφορετικούς τύπους υφασμάτων, ο καθένας με τα δικά του χαρακτηριστικά.

3.2 Δομή Υλικού

Συναντάται η εξής ιεράρχηση: Ξεκινώντας από το μοριακό επίπεδο παράγεται ένα μονάχα ινίδιο. Πολλαπλά ινίδια τυλίγονται σε δεσμίδες για να σχηματίσουν ένα νήμα (ή ίνα), τα νήματα υφαίνονται για να σχηματίσουν μια στρώση υφάσματος και, τέλος, στρώσεις υφάσματος στοιβάζονται και ενώνονται για να σχηματίσουν ένα πολυστρωματικό σύνθετο. Ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες του συνόλου δεν προκύπτουν από τις επιμέρους ιδιότητες των μερών του πολυστρωματικού συνθέτου. Οι ιδιότητες των ινών δεν μεταφράζονται απευθείας σε ιδιότητες των νημάτων, οι ιδιότητες των νημάτων δεν μεταφράζονται απευθείας σε ιδιότητες του υφάσματος

και, αντίστοιχα, οι ιδιότητες μια στρώσης υφάσματος δεν μεταφράζονται απευθείας σε αυτές μιας πολυστρωματικής διάταξης υφασμάτων.



Εικόνα 17. Διαστασιολογικές κλίμακες πολυμερών: (a) μοριακές αλυσίδες, (b) ίνες, (c) νήματα και (d) υφάσματα. [7]

- **Μόρια πολυμερούς**

Για λόγους ευκολίας, η μικρότερη κλίμακα θεωρείται το μοριακό επίπεδο με μονάδες διάστασης σε nanometers (10^{-9} μέτρα). Η μοριακή δομή των πολυμερών υλικών περιγράφει τα δομικά στοιχεία τους, τα οποία είναι υπεύθυνα για τα χαρακτηριστικά απόδοσης των ινών, όπως αντοχή, σκληρότητα, δυσθραυστότητα, περιβαλλοντολογικές και χημικές αντιστάσεις και θερμοκρασία τήξης. Αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται απευθείας από τη χωρική διάταξη και την ακεραιότητα των χημικών δεσμών που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία πολυμερισμού, κατά την οποία μονομερή μόρια ενώνονται για να σχηματίσουν πολυμερικές αλυσίδες μορίων.

- **Ινίδια**

Στη συνέχεια της ιεραρχίας είναι η κλίμακα του ινιδίου (fiber, filament), όπου οι διαμέτροι των ινιδίων μετρούνται συχνά σε μονάδες micrometers (10^{-6} meters). Τα βάρη των ινιδίων κατηγοριοποιούνται με βάση το denier, το οποίο είναι η γραμμική πυκνότητα που ορίζεται ως «το βάρος σε γραμμάρια μιας ίνας (ή νήματος) μήκους 9.000 μέτρων». Η αντοχή σε εφελκυσμό ενός ινιδίου ορίζεται ως «η αντοχή σε δύναμη σε γραμμάρια ανά denier (gpd). Σε γενικές γραμμές η αντοχή αυξάνει με την αύξηση της διαμέτρου του ινιδίου. Η δυσθραυστότητα ενός ινιδίου περιγράφεται από το μέτρο ελαστικότητάς της E. Το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από δοκιμή

αντοχής σε εφελκυσμό ενός ινιδίου (ή ίνας) και έχει μονάδες μέτρησης δύναμης σε γραμμάρια ανά denier. Υπολογίζεται από την αρχική κλίση της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης σε εφελκυσμό. Πολλές ίνες από πολυμερές εμφανίζουν βισκοελαστική συμπεριφορά (συνδυάζουν ελαστικά και ιξώδη χαρακτηριστικά) σε τέτοιο βαθμό που η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζονται από τις τιμές φόρτισης, δηλαδή αυτά τα χαρακτηριστικά αυξάνουν καθώς αυξάνουν οι τιμές παραμόρφωσης. Η επιμήκυνση θραύσης (elongation at break) είναι η επιμήκυνση ενός ινιδίου (ή ίνας) κατά τη δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό τη στιγμή της θραύσης. Αυτή η επιμήκυνση υπολογίζεται ως ποσοστό του αρχικού μήκους της ίνας πριν τη δοκιμή. Επιπλέον χρήσιμες ιδιότητες για εφαρμογές ευαίσθητες στο βάρος είναι η ειδική αντοχή και τα ειδικά επιμέρους μέτρα. Αυτά προκύπτουν διαιρώντας τις τιμές της αντοχής και του μέτρου με την πυκνότητα των ινών. Αμφότερες οι ειδικές τιμές έχουν μονάδες μέτρησης μήκους. Η ειδική αντοχή εμφανίζεται στη βιβλιογραφία και ως «μήκος θραύσης», το οποίο είναι ισοδύναμο του μήκους της ίνας που απαιτείται για να σπάσει από το ίδιο βάρος της όταν κρέμεται κάθετα. Ειδική βαρύτητα είναι ο λόγος της πυκνότητας του υλικού προς την πυκνότητα του νερού. Οι ίνες επιπλέον στο νερό αν η ειδική βαρύτητά τους είναι μικρότερη της μονάδας.

Είναι προφανές πως τα ινίδια αποτελούν το κύριο συστατικό σε ένα σύνθετο ενισχυμένο με ίνες, καθώς αυτές καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου ενός σύνθετου υλικού ενισχυμένου με ίνες και παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου που ασκείται στο σύνθετο υλικό. Η κατάλληλη επιλογή του τύπου της ίνας, του μήκους της και του προσανατολισμού της μέσα στο σύνθετο είναι πολύ σημαντική, καθώς επηρεάζουν τις ακόλουθες ιδιότητες του σύνθετου:

- ✓ Πυκνότητα
- ✓ Αντοχή σε εφελκυσμό/θλίψη και μέτρο ελαστικότητας
- ✓ Τον μηχανισμό θραύσης
- ✓ Ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
- ✓ Κόστος

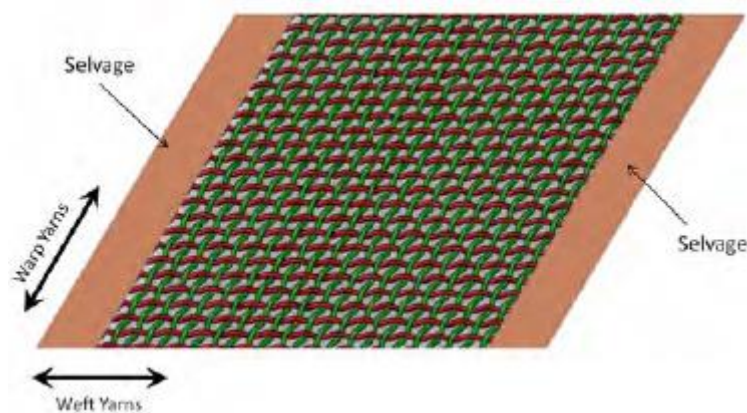
• Ίνες (νήματα)

Η παραγωγή των σημερινών πλεκτών ενισχύσεων απαιτεί την παραγωγή δεσμίδων αποτελούμενων από δεκάδες μέχρι εκατοντάδες συνεχόμενων ινών για τη δημιουργία ενός μόνο νήματος με διαστάσεις διατομής μετρημένες σε χιλιοστά (10^{-3}

meters). Ο αριθμός των ινιδίων σε ένα νήμα ονομάζεται «αριθμός ινιδίων» (filament count). Στα νήματα κατασκευασμένα από συνεχείς ίνες, οι ίνες βρίσκονται σε μια ευθυγραμμισμένη διάταξη ή σε μια ελαφρώς ελικοειδή διάταξη και μαζεύονται σε καρούλια ή μπομπίνες. Η ελικοειδής διάταξη των ινών προκύπτει από την πρόσθεση συστροφής στη μέθοδο παραγωγής. Η συστροφή είναι ένας μηχανισμός που μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντοχή σε εφελκυσμό των συρραμμένων (ασυνεχών) νημάτων. Παρ' όλα αυτά, η συστροφή χρησιμοποιείται μόνο ελάχιστα στα νήματα συνεχών ινών για τη βελτίωση του χειρισμού τους κατά τη φάση της ύφανσης, καθώς έτσι περιορίζονται οι πλευρικές κινήσεις των ανεξάρτητων ινών. Η συστροφή μετράται μέσω του αριθμού περιστροφών ανά μονάδα μήκους του νήματος. Τα νήματα κατηγοριοποιούνται πιο συχνά βάσει του denier, αντί του αριθμού ινών. [4, 7]

3.3 Πλεκτά υφάσματα

Μια μοναδική στρώση πλεκτού υφάσματος διαθέτει χαρακτηριστικές διαστάσεις μήκους και πλάτους (τάξη μεγέθους σε μέτρα) και για απλή ύφανση σχηματίζεται συνυφαίνοντας νήματα δύο κύριων οικογενειών, που προσδιορίζονται ως «warp» (στημόνι) και «weft» (υφάδι), σε ορθές γωνίες μεταξύ τους όπως φαίνεται παρακάτω.



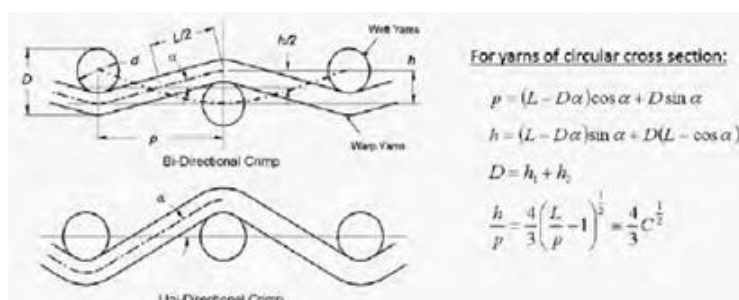
Εικόνα 18. Απεικόνιση υφάσματος ενίσχυσης. Κατά τη διεύθυνση της ούγκιας (selvage) αναπτύσσονται τα στημόνια (warp), ενώ κάθετα στην ούγκια αναπτύσσονται τα υφάδια (weft). [7]

Τα νήματα κάθε οικογένειας περνούν πάνω και κάτω από τα νήματα της άλλης οικογένειας με περιοδικό τρόπο. Τα πλεκτά υφάσματα αναφέρονται ως «πτυχωτά υφάσματα» (crimped), καθώς τα νήματα μιας κατεύθυνσης κάμπτονται γύρω από τα διασταυρωμένα γειτονικά νήματα. Τα νήματα «warp» (στημόνια) τρέχουν παράλληλα με την ούγια του υφάσματος (τα άκρα του υφάσματος) και είναι σχεδόν απεριόριστα στο μήκος τους. Τα νήματα «weft» (υφάδια) διατρέχουν το ύφασμα κατά το πλάτος του.

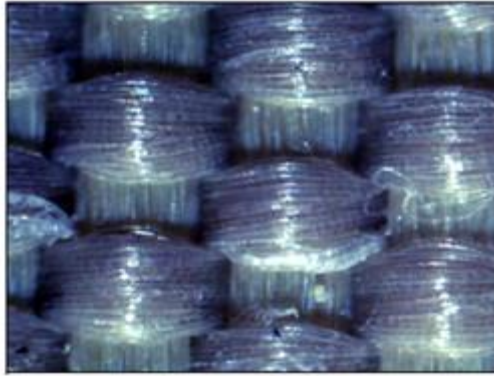
3.3.1 Γεωμετρικό μοντέλο υφάσματος του Pierce

Οι κυματισμοί, που αναφέρονται και ως πτυχώσεις, φαίνονται στο γεωμετρικό μοντέλο υφάσματος του Pierce στην περίπτωση απλής ύφανσης. Το γεωμετρικό μοντέλο του Pierce συσχετίζει τις παραμέτρους του υφάσματος καθώς συνδέονται ανά δύο οι οικογένειες των νημάτων. Το ύψος της πτύχωσης h σχετίζεται με τη γωνία πτύχωσης α και το μήκος του νήματος L , όπως μετράται μεταξύ των νημάτων και το άθροισμα των διαμέτρων των ινών στις περιοχές που διασταυρώνονται από τις εξισώσεις που έχουν διατυπωθεί από τους Hearle, Grosberg και Backer. Η πτύχωση, συμβολισμένη ως C , είναι το μέτρο του κυματισμού που εμφανίζεται σε ένα νήμα όταν υφαινεται σε μορφή υφάσματος όπως φαίνεται παρακάτω. Πρόκειται για μια γεωμετρική ιδιότητα της ύφανσης λόγω της μορφής της πλέξης που επιλέχθηκε. Η πτύχωση προκύπτει από τη μέτρηση του μήκους του νήματος στην υφασμένη κατάσταση, L_{fabric} , και του μήκους του ίδιου νήματος αφού έχει αφαιρεθεί από το ύφασμα και ισιωθεί, L_{yarn} , και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο ως ποσοστό:

$$C = \frac{L_{yarn} - L_{fabric}}{L_{fabric}}$$



Εικόνα 19. Παραδείγματα του γεωμετρικού μοντέλου του Pierce για πλεκτά υφάσματα απλής (plain) ύφανσης με δισ-διευθυντική (Bi-Directional) και μονοδιευθυντική (Uni-Directional) πτύχωση. [8]



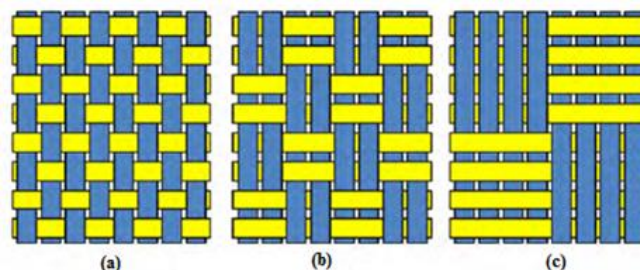
Εικόνα 20. Μεγεθυμένη άποψη υφάσματος απλής ύφανσης με μονοδιευθυντική πτύχωση και συνεχής ίνες νημάτων. [7]

Συχνά, η πτύχωση είναι πιο έντονη για τα «warp» νήματα από ότι στα «weft» νήματα, εξαιτίας των διαφορών στις εφαρμοζόμενες τάσεις των νημάτων κατά την ύφανση. [7, 8]

3.3.2 Μέθοδοι ύφανσης

Η κατηγορία των υφασμένων υφασμάτων περιλαμβάνει πληθώρα μεθόδων ύφανσης, όπως η απλή, το καλάθι, η διαγωνίως ραβδωτή, σατέν, πλεξούδα, leno και η τριαξονική ύφανση.

Η μορφή της ύφανσης του υφάσματος περιγράφεται περαιτέρω από τις διαστάσεις της διατομής του νήματος, τον αριθμό των «warp» νημάτων ανά μονάδα πλάτους του υφάσματος, τον αριθμό των «weft» νημάτων ανά μονάδα μήκους του υφάσματος και το συντελεστή κάλυψης, συνιστώσες που επηρεάζουν το επίπεδο απορρόφησης της ενέργειας.



Εικόνα 21. Μέθοδοι ύφανσης πλέξης: απλή ύφανση (a), πλέξη καλάθιού 2x2 (b) και πλέξη καλάθιού 4x4 (c). Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα στημόνι και κίτρινο τα υφάδια. [7]

3.3.3 Εισαγωγή στην κινηματική πλεκτών υφασμάτων

- **Κίνηση νημάτων**

Η απορρόφηση ενέργειας των πλεκτών υφασμάτων όταν υπόκεινται σε δυναμικά φορτία εξαρτάται έντονα από την ικανότητα του υφάσματος να επιτρέπει ή να περιορίζει τις κινήσεις των νημάτων μέσα στην πλέξη. Οι κινήσεις των νημάτων εμφανίζονται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των νημάτων, όπως η εναλλαγή των πτυχώσεων, ψαλιδισμός και τριβή.

Θεωρώντας ένα ύφασμα απλής ύφανσης υποκείμενο σε ένα εφελκυστικό φορτίο. Τα νήματα τύπου «warp» τεντώνουν, μειώνεται το ύψος της πτύχωσης, και επιμηκύνονται στο ενεργό μήκος τους. Αντίθετα, τα νήματα «weft» αναγκάζονται να αυξήσουν το ύψος των πτυχώσεων προκαλώντας έτσι τη συστολή του ενεργού μήκους τους. Αυτό το φαινόμενο καλείται «εναλλαγή πτυχώσεων» και είναι ανάλογο του φαινομένου του Poisson που εμφανίζεται στα μέταλλα. Η εναλλαγή των πτυχώσεων είναι ένα συνδυαστικό φαινόμενο και εμφανίζεται μεταξύ των νημάτων «warp» και «weft» και εξαρτάται από τον λόγο των αρχικών πτυχώσεων μεταξύ των δύο οικογενειών των νημάτων και τον λόγο των εφελκυστικών τάσεων μεταξύ των δύο τύπων νημάτων. Γενικά πρόκειται για μη γραμμικές επιμηκύνσεις. [7]

- **Κλείδωμα κόμβων**

Οι Hearle, Grosberg και Backer περιγράφουν ένα περιορισμένο φαινόμενο στην εναλλαγή των πτυχώσεων. Στην περίπτωση του διαξονικού εφελκυσμού, καθώς οι διαξονικές εφελκυστικές τάσεις αυξάνουν συνεχώς για έναν δεδομένο λόγο τάσεων στα warp και τα weft νήματα, η ολίσθηση του νήματος στις περιοχές διασταύρωσης με άλλα αρχικά αυξάνει και έπειτα μειώνεται καθώς το διάκενο μεταξύ των νημάτων φτάνει στην ελάχιστη τιμή του. Αυτό ο μηχανισμός αναφέρεται ως σημείο εκτατικού τερματισμού (extensional jamming point) και σημαίνει πως παρεμποδίζεται η πλήρης επιμήκυνση μιας οικογένειας νημάτων, χωρίς να φτάνει τη μέγιστη αντοχή της.

Θεωρώντας τώρα ένα ύφασμα απλής πλέξης υποκείμενο σε διάτμηση. Οι οικογένειες των νημάτων περιστρέφονται στα σημεία κόμβους, με τη στρέβλωσή τους να αυξάνει όσο αυξάνει το διατμητικό φορτίο. Η αλλαγή στη γωνία ονομάζεται

«γωνία διάτμησης». Σε μεγάλες γωνίες διάτμησης, ο διαθέσιμος χώρος μεταξύ των δύο τύπων νημάτων μειώνεται και εμφανίζεται ένας περιστροφικός τερματισμός (κλειδώμα) των νημάτων. Το φαινόμενο ονομάζεται διατμητικός τερματισμός (shear-jamming) και η γωνία στην οποία κλειδώνουν τα νήματα είναι γνωστή ως «γωνία διατμητικού τερματισμού». Η γωνία διατμητικού τερματισμού μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των νημάτων ανά μονάδα μήκους και μπορεί να εκτιμηθεί από το γεωμετρικό μοντέλο υφάσματος του Pierce ή να ληφθεί πειραματικά με διατμητικές ή διαξονικές διατάξεις δοκιμών. Η συνεχιζόμενη φόρτιση πέραν της αρχής της εμφάνισης του διατμητικού κλειδώματος προκαλεί διατμητικό τσαλάκωμα, μια μορφή τοπικών παραμορφώσεων εκτός του επιπέδου αναφοράς.

Είναι σημαντικό να οριστούν τα εφελκυστικά και διατμητικά σημεία κλειδώματος για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη ελευθερία κινήσεων στα νήματα που οδηγεί στα επιθυμητά επίπεδα απορρόφησης ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, το κλειδώμα σχετίζεται με τον μέγιστο αριθμό των νημάτων τύπου «weft» ανά μονάδα μήκους που μπορούν να πλεχθούν σε ένα ύφασμα για δεδομένο μέγεθος νημάτων «warp» και δεδομένα διάκενα μεταξύ αυτών.

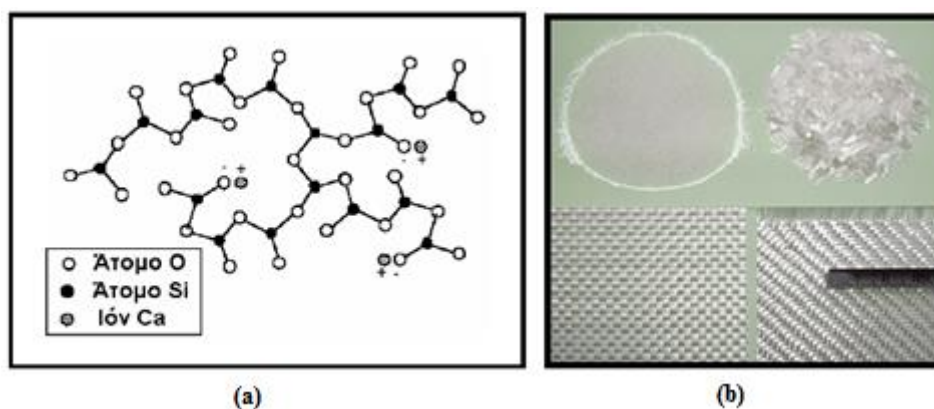
Η τριβή μεταξύ των νημάτων στις περιοχές των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιηθεί η μετακίνηση των νημάτων και έτσι να παρέχεται ένας μηχανισμός μεταφοράς και καταστροφής ενέργειας. [8]

3.4 Τύποι ινών για ενίσχυση σύνθετου υλικού

3.4.1 Ίνες γυαλιού

Οι ίνες γυαλιού (glass fibers) είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ίνες ως υλικό ενίσχυσης για πολυμερικές μήτρες (polymeric matrix composites, PMC). Χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (1940) και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα, κυρίως σε εφαρμογές, όπως, σκελετοί πλοίων, σωλήνες, δοχεία αποθήκευσης και βιομηχανικά δάπεδα.

Ο πιο κοινός τύπος ινών γυαλιού βασίζεται στο διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) με προσθήκη οξειδίων του ασβεστίου, βορίου, νατρίου, σιδήρου και αλουμινίου. Αυτού του τύπου τα γυαλιά είναι συνήθως άμορφα, όμως αν θερμανθούν έντονα για μεγάλα διαστήματα αποκτούν ορισμένη κρυσταλλικότητα, πράγμα που έχει αρνητική συνέπεια στην αντοχή τους. [1, 2, 4]



Εικόνα 22. Δομή γυαλιού (a) [1] και απόψεις (b) ασυνεχών ινών και υφασμάτων γυαλιού.

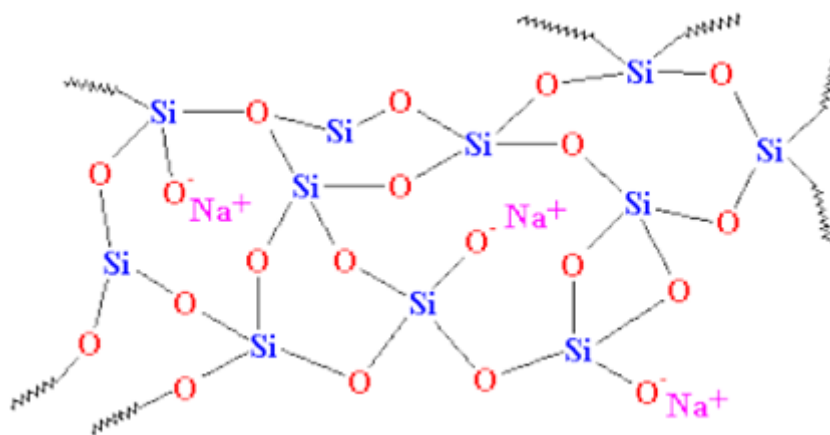
3.4.1.1 Ιδιότητες ινών γυαλιού

Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό κόστος, η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, η υψηλή χημική αντίσταση και οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητές τους. Από την άλλη, έχουν χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και μεγάλη πυκνότητα σε σχέση με άλλες ίνες, είναι ευαίσθητες σε εκτριβή κατά το χειρισμό τους (με ανεπιθύμητες συνέπειες στην αντοχή σε εφελκυσμό), έχουν σχετικά χαμηλή αντίσταση σε κόπωση και μεγάλη σκληρότητα που προκαλεί φθορά στα εργαλεία κατεργασίας τους. Επίσης, η ευαισθησία τους σε εγχαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, οδηγώντας έτσι στην ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, αλλά και της ικανότητας πρόσφυσής τους στην πολυμερική μήτρα. [1, 2, 4]

3.4.1.2 Δομή ινών γυαλιού

Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του γυαλιού προσδιορίζονται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Όπως έχει αναφερθεί οι ύαλοι είναι μη κρυσταλλικά πυριτικά άλατα που περιέχουν οξείδια, τα οποία

επηρεάζουν τις ιδιότητές τους. Στο πλέγμα της άμορφης δομής, όπως αυτή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, κάθε πολύεδρο αποτελείται από έναν συνδυασμό ατόμων οξυγόνου γύρω από ένα άτομο πυριτίου, που συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα ιόντα νατρίου σχηματίζουν ιοντικούς δεσμούς με τα άτομα του οξυγόνου και δε συνδέονται αμέσως με το πλέγμα.



Εικόνα 23. Δομή πλέγματος γυαλιού. [1]

Η δομή του πλέγματος και η αντοχή των δεσμών, μεταβάλλεται με την προσθήκη οξειδίων, οπότε είναι δυνατόν να παραχθούν ίνες γυαλιού με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Σε αντίθεση με τις ίνες άνθρακα και Kevlar 49, οι ιδιότητες των ινών γυαλιού είναι ισότροπες και παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά. Αυτό είναι συνέπεια της τρισδιάστατης δομής του γυαλιού. [2, 3]

3.4.1.3 Τύποι ινών γυαλιού

Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S:

✓ E-glass (E=electrical):

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

- ✓ C-glass (C=corrosion):
Υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, καθώς και αυξημένο κόστος.
- ✓ S-glass (S=stiffness):
Ακριβότερο από το E-glass, υψηλότερη δυσκαμψία, καθώς και υψηλότερη θερμική αντοχή, κύρια εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία
- ✓ Υαλονήματα με μεγάλα ποσοστά SiO₂ (>99.5%):
Αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτείται συνδυασμός υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία. [1, 3]

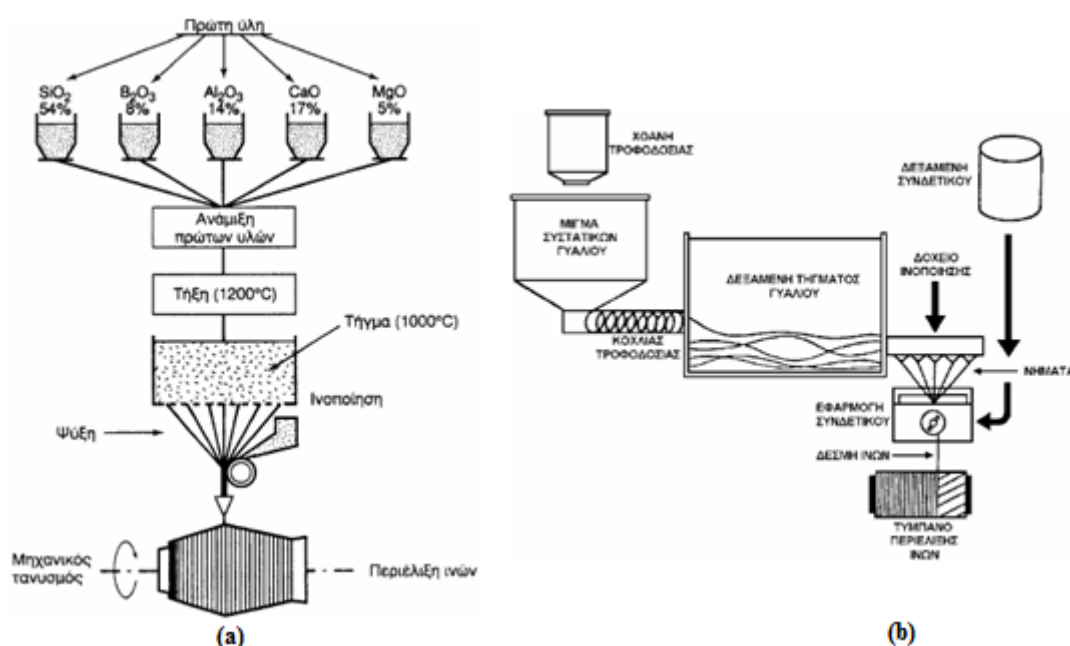
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ		ΤΥΠΟΣ			
		E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση %	• SiO ₂	54	60	65	>99.5
	• Al ₂ O ₃	16	25	25	-
	• B ₂ O ₃	8	-	-	-
	• CaO	17	9	-	-
	• MgO	5	6	10	-
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)		75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)		2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)		2.54	2.50	2.48	2.20
Θερμοκρασία τήξης (°C)		900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)		550	650	650	750

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά ινών γυαλιού. [1]

3.4.1.4 Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή των ινών γυαλιού πραγματοποιείται με τη μέθοδο της εκβολής τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα. Αρχικά, η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου γίνεται η τήξη της. Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Το γυαλί ρέει διαμέσου των οπών του πυθμένα της μήτρας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ενώ ο

έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στη δεξαμενή, καθώς και με έλεγχο της πυκνότητάς του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου να αποκτήσουν διάμετρο της τάξεως των 1 μm έως 15 μm. Ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός με νερό για να ψυχθούν. Στη συνέχεια, οι ίνες διέρχονται από μάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλύτερη πρόσφυση ινών μήτρας. Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, περιστρεφόμενο με μεγάλη ταχύτητα της τάξης των 50 m/s. Τα ρολά υαλονήματος υφίστανται ξήρανση προτού υποβληθούν σε περαιτέρω διεργασία μορφής.

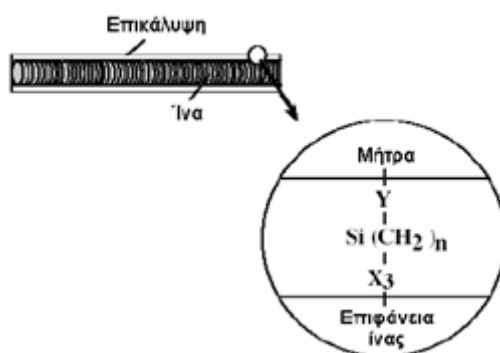


Εικόνα 24. Στάδια παραγωγής ινών γυαλιού (a) και απλοποιημένο διάγραμμα εγκατάστασης παραγωγής ινών γυαλιού (b). [1]

Η αντοχή των ινών εξαρτάται σε από τις συνθήκες παραγωγής τους και το περιβάλλον ελέγχου. Ίνες που μόλις έχουν παρασκευασθεί και όπου έχουν ληφθεί όλα τα μέτρα προστασίας τους κατά την Παρασκευή έχουν αντοχή 3.5 GNm⁻² και η διασπορά της αντοχής τους είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, η αντοχή τους μειώνεται ελέγχονται σε υγρό περιβάλλον, λόγω της απορρόφησης υγρασίας από την επιφάνειά τους. Η επίδραση του περιβάλλοντος είναι ακόμα ισχυρότερη όταν οι ίνες έρχονται σε

επαφή με οξέα. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας εξαρτώνται από την θερμοκρασία και οι ίνες υπόκεινται σε στατική κόπωση.

Μεταξύ άλλων, αξίζει να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια παραγωγής των ινών πρέπει να αποφεύγεται η επαφή των ινών μεταξύ τους ή με άλλα αντικείμενα, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα. Επίσης, τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή διακρίνονται σε προσωρινά και συμβατά. Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης, προσδίδοντας ταυτόχρονα στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες. Συνήθως χρησιμοποιούνται αμυλέλαια, που διευκολύνουν αποτελεσματικά την πρόσφυση ίνας και ρητίνης εμποτισμού. Τα προσωρινά πρόσθετα απομακρύνονται εύκολα με θέρμανση των ινών σε κλιματιζόμενο περιβάλλον σε θερμοκρασία ανώτερη ή ίση των 340 °C για χρονικό διάστημα 15 – 20 ωρών. Τα συμβατά πρόσθετα έχουν στόχο τη βελτίωση της αρχικής πρόσφυσης ρητίνης γυαλιού και τη μείωση των δυσάρεστων επιπτώσεων της υγρασίας ή άλλων περιβαλλοντικών επιδράσεων. Πρόκειται περί οργανοπυριτικών ενώσεων του τύπου $X_3Si(CH_2)_nY$, όπου η Y ομάδα συμβατή προς την πολυμερική μήτρα, X η υδρολυόμενη ομάδα στο πυρίτιο και n = 0 έως 3 η δράση των οποίων περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα. [1, 2, 3]

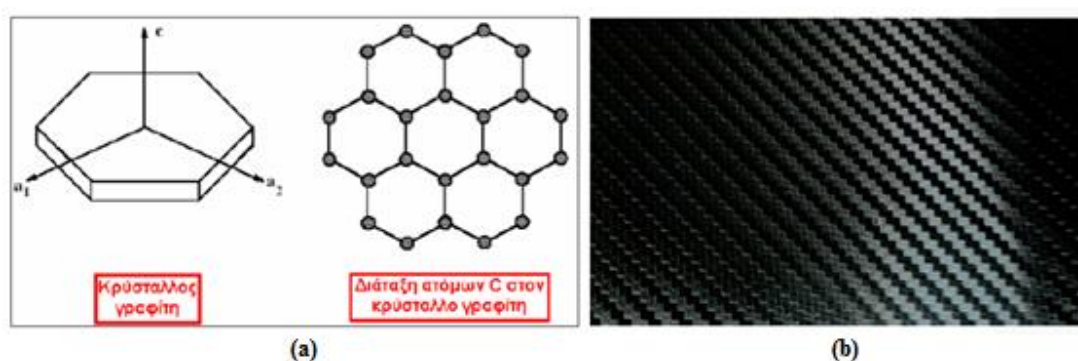


Εικόνα 25. Απεικόνιση επικάλυψης ίνας γυαλιού. [1]

3.4.2 Ίνες άνθρακα (carbon fibers)

Οι ίνες άνθρακα έχουν επικρατήσει σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Συνήθως, όπου απαιτείται ο βέλτιστος

συνδυασμός υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και χαμηλού βάρους, οι ίνες άνθρακα αποτελούν την επικρατέστερη επιλογή. Οι ίνες άνθρακα διατηρούν το υψηλό μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και την υψηλή αντοχή ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ ταυτόχρονα σε θερμοκρασία δωματίου δεν επηρεάζονται από την υγρασία. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμώνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται χαμηλή θερμική διαστολή. Από την άλλη, επιτρέπουν μικρή παραμόρφωση πριν την θραύση, έχουν χαμηλή αντίσταση σε κρούση και το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος των ινών γυαλιού. [1, 2, 3]

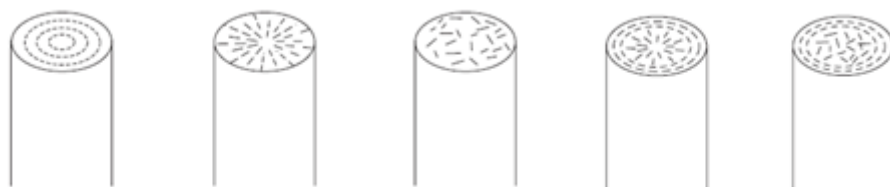


Εικόνα 26. Κρύσταλλος γραφίτη και διάταξη ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο γραφίτη (a) [1] και άποψη ανθρακονημάτων (b).

3.4.2.1 Ιδιότητες ινών άνθρακα

Οι εξαιρετικές ιδιότητες των ανθρακονημάτων οφείλονται στα χαρακτηριστικά του άνθρακα και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα του άνθρακα διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων. Ο ισχυρός ομοιοπολικός δεσμός μεταξύ των ατόμων σε αυτές τις επίπεδες εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε ένα εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας, ενώ ο ασθενής τύπου δεσμός Van der Waals που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

Επομένως, οι βασικές κρυσταλλικές μονάδες είναι έντονα ανισότροπες, με αποτέλεσμα αναλόγως της διάταξης των επιπέδων στρώσεων κατά τη διατομή μιας ίνας να επηρεάζονται και οι ιδιότητες της ίνας. [3]



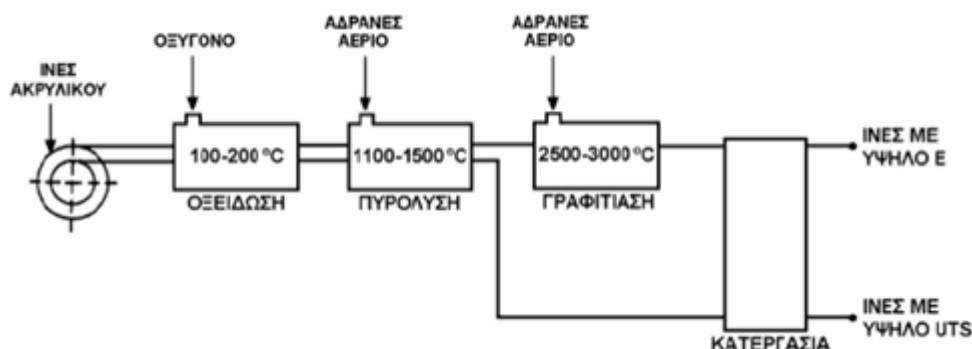
Εικόνα 27. Διάφορες διατάξεις επιπέδων στρώσεων κατά τη διατομή ίνας ανθρακονήματος.

3.4.2.2 Παραγωγή ινών άνθρακα

Στην παραγωγή ανθρακονημάτων χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα. Η παραγωγή των ινών γραφίτη από ίνες PAN πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο, λαμβάνει χώρα οξείδωση υπό τάση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200°C). Ταυτόχρονα με την οξείδωση εφαρμόζεται και ορισμένη τάση που είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς. Έπειτα ακολουθεί πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία 1100 – 1500°C. Οι παραγόμενες ίνες από αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers), αφού η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa. Τέλος, συνεχίζεται η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε θερμοκρασίες 2500 – 3000 °C, όπου πραγματοποιείται γραφίτιωση με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες αυτού του σταδίου χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers). Το μέτρο ελαστικότητας σε αυτήν τη φάση φτάνει περίπου τα 400 GPa, ενώ η διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm.

Αξίζει να αναφερθεί πως ατέλειες δομής οδηγούν στη δημιουργία κενών αέρα (voids) πολύπλοκου σχήματος που διατάσσονται κατά μήκος της ίνας. Τα κενά αυτά αποτελούν αδύναμα σημεία της δομής, όπου παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τάσεων με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής της ίνας. Άλλες αδυναμίες δομής που

συνδέονται με τον τρόπο παρασκευής των ινών είναι οι επιφανειακές ατέλειες και οι μακροκρύσταλλοι.



Εικόνα 28. Διαδικασία παραγωγής ινών άνθρακα. [1]

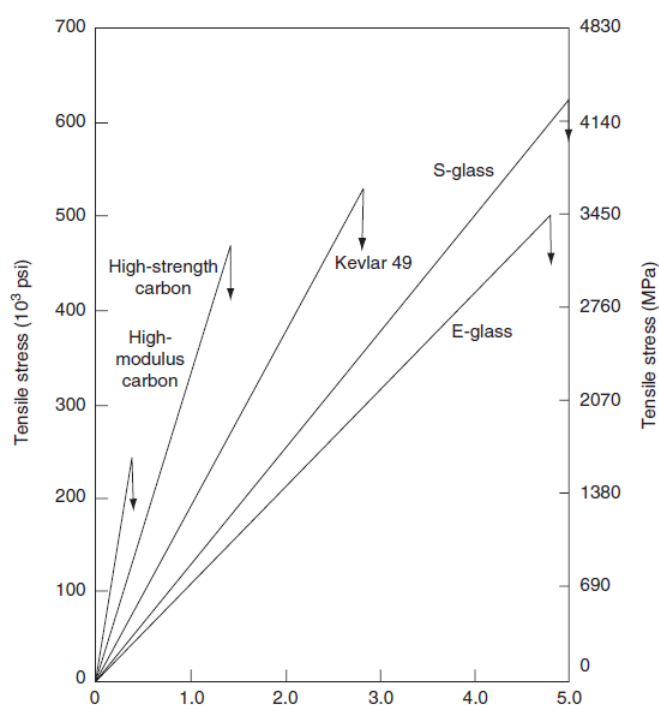
Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500°C και για τους δύο τύπους ινών. Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες ή πολυδιευθυντικό πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών καθορίζει, όπως αναμένεται, το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία. Η επιλογή από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής των ανθρακονημάτων δίνει τη δυνατότητα παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιτίωσης και άρα διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων. Οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτίωσης και το βαθμό ανισοτροπίας. [1, 2, 3]

Χαρακτηριστικά	Ίνες υψηλής αντοχής	Ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1.8	1.9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

3.4.3 Ίνες πολυμερούς

Οι ίνες πολυμερών χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά σύνθετων υλικών υψηλών προδιαγραφών, για τα οποία υπάρχουν απαιτήσεις χαμηλού βάρους, υψηλής αντοχής και στιβαρότητας και αντοχής σε κόπωση. Οι πιο συχνοί τύποι πολυμερικών ινών που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση σύνθετων υλικών είναι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και αρωματικά πολυαμίδια (αραμίδια), εκ των οποίων τα ευρύτερα γνωστά είναι τα Kevlar, Nomex, Twaron και Technora.



Σχήμα 4. Συγκριτικό διάγραμμα αντοχής σε εφελκυσμό διάφορων ινών ενίσχυσης. [5]

Παρακάτω ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών τυπικών ινών που χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές ως μέσο ενίσχυσης του σύνθετου υλικού που απαρτίζουν.

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών ενίσχυσης. [8]

Fiber	Manufacturer	Grade	Polymer Type	Spinning Method	Density (g/cc)	Strength (gpd)	Modulus (gpd)	Elongation at Break (%)	Specific Strength (10 ⁶ in)	Specific Modulus (10 ⁸ in)	Fiber Diameter (x10 ⁻⁶ m)	Maximum Temperature (°C)
Dyneema	DSM	SK75, SK78 SK60, SK62, SK65 SK25	Polyethylene Polyethylene Polyethylene	Gel Gel Gel	0.97 0.97 0.97	38-45 28-38 25	1267-1552 759-1158 608	3-4 3-4 3-4			12-21	
Spectra	Allied Signal	1000 900	Polyethylene Polyethylene	Gel Gel	0.97 0.97	35 30	2000 1400	2.7 3.5	13.4 11.5	7.6 5.3	28 38	100 100
Kevlar	DuPont	149	Aramid	Gel	1.47	18	1100	1.5	6.9	4.2	12	250
		129	Aramid	Gel	1.45	26.5	750	3.3	10.1	3	12	250
		119	Aramid	Gel	1.44	24	470	4.4	9.2	1.6	12	250
		49	Aramid	Gel	1.45	23	950	2.8	8.8	3.6	12	250
Nomex	DuPont	29	Aramid	Gel	1.43	23	580	3.6	8.8	2.1	12	250
			Aramid	Wet	1.38	5	140	22	1.9	0.5	121	250
Nylon		6,6	Polyamide	Melt	1.14	9	50	19	3.4	0.2	25	150
Technora	Tejin Aramid		Aramid	Dry	1.39	27	570	4.3	10.3	2.2	12	250
Twaron	Tejin Aramid		Aramid									
Vectran	Kuraray America	HT	Polyester	Melt	1.43	25.9	600	3.8	9.89	2.3	N/A (Chars >400)	276
		UM	Polyester	Melt								
PBI	PBI Performance Products		Polybenzimidazole	Dry	1.43	3.1	45	30	1.2	0.2		250
PBO	Toyobo	HM	Polybenzobisoxazole		1.56	42	2084					
PBT			Polybenzobisthiazole		1.57	25	2690	1.3	9.6	10.3		350
PET					1.39	9.5	100					
E-Glass	Owens Corning		Glass	Melt	2.55	11.6	320	3	4.4	1.2	5-25	350
			Glass	Melt	2.48	21.9	390	5.3	8.4	1.5	5-15	300
Steel					7.8	11	220	4.8	4.2	0.8		500

CONVERSIONS:

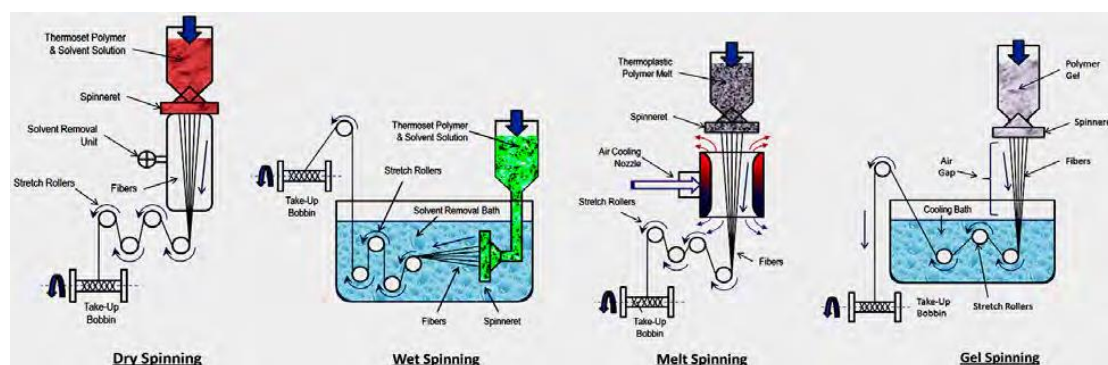
GPa = gpd x density (g/cc) / 11.33

Specific strength (in) = tenacity (gpd) x 3.82x10³

Specific modulus (in) = modulus (gpd) x 3.82x10³

3.4.3.1 Παραγωγή ινών

Οι ίνες πολυμερών παράγονται χρησιμοποιώντας πλήθος μεθόδων περιστροφής (ινοποίηση) (spinning methods) - ξηρή, υγρή, γέλης και τήξης περιστροφές. Το spinning αναφέρεται στη διαδικασία εξώθησης ινών μέσα από μια σειρά μικρών οπών σε συσκευές γνωστές ως περιδινητές. Το πολυμερές υλικό (και οι διαλύτες εφόσον υπάρχουν) πιέζεται μέσω των οπών στους περιδινητές. Οι περιδινητές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συνθετικών ινών είναι μήτρες που μοιάζουν στο τηλέφωνο του ντους. Καθώς το πολυμερές βγαίνει από τις οπές, το πολυμερές στερεοποιείται, σχηματίζοντας ίνες ελεγχόμενων και σταθερών διαμέτρων και διατομών σχεδόν απεριόριστου μήκους. Έπειτα οι ίνες τεντώνονται και τυλίγονται γύρω από ράουλα υποδοχής. Το τέντωμα των ινών αυξάνει την αντοχή τους σε εφελκυσμό και τη δυσθραυστότητα τους καθώς οι μοριακές αλυσίδες τους ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του άξονα της ίνας.



Εικόνα 29. Μέθοδοι ινοποίησης για την παραγωγή ινών πολυμερών. [7]

Η μέθοδος ινοποίησης επιλέγεται βάσει της συμβατότητας του πολυμερούς. Για παράδειγμα θερμοπλαστικά πολυμερή απαιτούν συρματοποίηση τήξης, ενώ θερμοσκληραινόμενα πολυμερή απαιτούν τη διάλυσή τους σε διαλύτη. Ίνες αραμιδίων (Kevlar) και UHMWPE (Dyneema και Spectra) παράγονται με συρματοποίηση εντός γέλης. Ίνες από nylon (πολυαμίδιο), Vectran (υγρός κρυσταλλικός πολυεστέρας) και το (terephthalate πολυαιθυλένιο) παράγονται με συρματοποίηση τήγματος. Ίνες από PBI (polybenzimidazole) παράγονται από ξηρή συρματοποίηση. Στις ίνες εφαρμόζονται και μέθοδοι περαιτέρω επεξεργασίας, συμπεριλαμβανόμενης της διακρίβωσης (sizing). Οι μέθοδοι διακρίβωσης είναι

επιφανειακές κατεργασίες των ινών (ή νημάτων) με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του τελικού προϊόντος, τη μείωση της τριβής για πιο εύκολο χειρισμό και πιο καλή ύφανση, έλεγχο απορρόφησης της υγρασίας, προστασία των ινών από περιβαλλοντικά αίτια και αυξημένη συμβατότητα για δέσιμο με υλικά μήτρες στα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες.

Οι σημερινοί τομείς έρευνας περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ινών επόμενης γενιάς υπερυψηλής απόδοσης μέσω προηγμένης χημείας πολυμερών, τεχνολογίες ενίσχυσης με carbon nano-tube για την παραγωγή ινών ασύγκριτων αντοχών και μεθόδους συρματοποίησης πολυμερών που επιτρέπει τη μείωση των διαμέτρων των ινών από την κλίμακα των micrometers σε nano-κλίμακα. [7]

3.4.3.2 Είδη πολυμερικών ινών

3.4.3.2.1 Αρωματικά πολυαμίδια (αραμίδια)

Ως ενίσχυση, οι ίνες αραμιδίων χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, υψηλή αντίσταση σε κρούση και χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής. Από την άλλη τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με αραμίδια έχουν χαμηλή αντοχή σε θλίψη και δημιουργούν δυσκολίες στην επεξεργασία τους. [4]

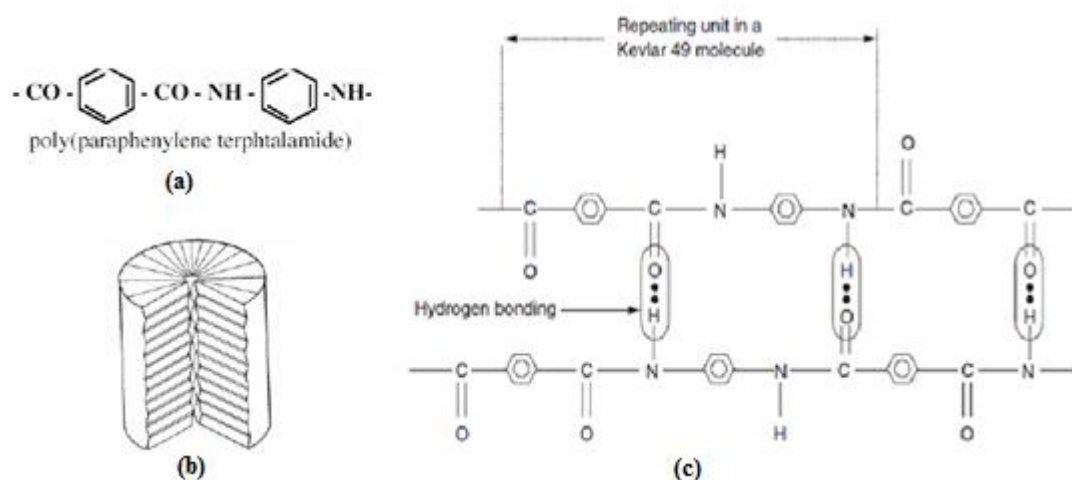
Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική μήτρα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar και παράγεται σε τρεις τύπους:

- ✓ Kevlar 29: Μέτρο ελαστικότητας 60GPa, αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa
- ✓ Kevlar 49: Μέτρο ελαστικότητας 120 GPa, αντοχή σε εφελκυσμό: 3.6 GPa
- ✓ Kevlar 43: Μέτρο ελαστικότητας 180 GPa, αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa

Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3). Η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει 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 καθ' αυτές πιο ισχυρές και

συντάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν ένα σταθερό πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας.



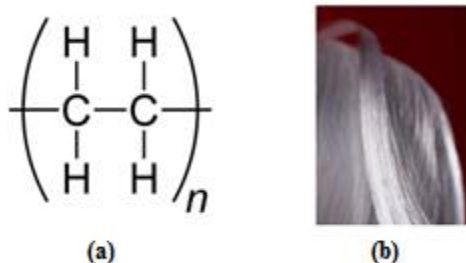
Εικόνα 30. Μοριακή αλυσίδα ίνας Kevlar 49 (α και c) και δομή ίνας Kevlar (b). [1]

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. Επίσης, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, στη θλίψη με 0,3% θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξίζει να αναφερθεί πως η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands). [1]

3.4.3.2 Ίνες από υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE)

Οι πιο γνωστές ίνες αυτού του τύπου είναι οι Spectra και Dyneema. Η μέθοδος παραγωγής με περιδίνηση τήγματος παράγει μια έντονα προσανατολισμένη ινώδη δομή υψηλού βαθμού κρυσταλλικότητας (95%-99%). Πρόκειται για ίνες με τον υψηλότερο λόγο αντοχής – βάρους από όλες τις ευρέως χρησιμοποιούμενες ίνες. Συγκεκριμένα για τις ίνες Spectra, δύο εξαιρετικά χαρακτηριστικά τους είναι η χαμηλή απορρόφηση υγρασίας (1% σε σχέση με 5-6% για το Kevlar 49) και υψηλή αντοχή σε εκτριβή. Το σημείο τήξης των ινών Spectra είναι 147°C, αλλά καθώς εμφανίζονται έντονα φαινόμενα ερπυσμού σε θερμοκρασίες άνω των 100°C, το ανώτερο όριο λειτουργίας τους σε ένα σύνθετο υλικό περιορίζεται στους 80°C με

90°C. Κατά την παρασκευή ενός σύνθετου υλικού με ίνες Spectra θερμοκρασίες κάτω των 125°C θεωρούνται μια ασφαλή περιοχή, καθώς από εκεί και πάνω παρουσιάζουν μια σημαντική και απότομη πτώση σε αντοχή.



Εικόνα 31. Επαναλαμβανόμενος μοριακός τύπος ινών Spectra (a) και απεικόνιση ινών Spectra (b)

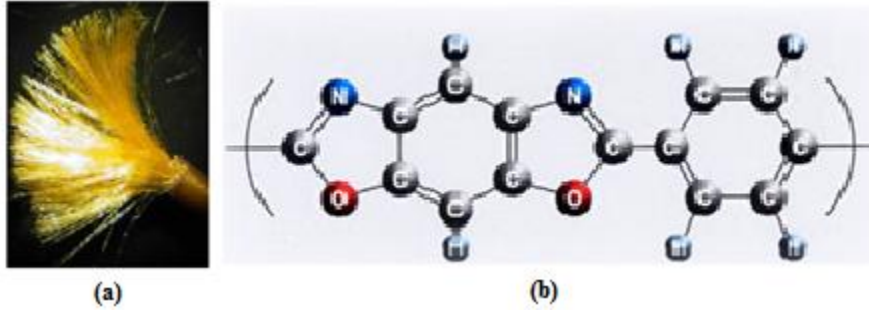
Οι ίνες Spectra παρέχουν μεγάλη αντίσταση σε κρούση όταν χρησιμοποιούνται σε πολυστρωματικά σύνθετα ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες και για αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σε βαλλιστικά σύνθετα. Ωστόσο, η χρήση τους σε υψηλής απόδοσης σύνθετα αεροναυπηγικής είναι περιορισμένη, εκτός κι αν εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τα συγκριτικά πιο στιβαρά ανθρακονήματα για την παρασκευή υβριδικών πολυστρωματικών σύνθετων με βελτιωμένη συμπεριφορά στην κρούση σε σχέση με αμιγώς ανθρακονημάτινα σύνθετα. [4]

3.4.3.2.3 Ίνες PBO

Οι ίνες από PBO (poly-phenylene benzobisoxazole) ανήκουν στην ομάδα των οργανικών ινών υψηλής απόδοσης και διατίθενται από την εταιρεία Toyobo με την ονομασία Zylon. Οι ίνες Zylon έχουν εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες και εμφανίζουν σχεδόν τη διπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό από ότι οι ίνες από συμβατικά παραaramίδια (π.χ. Kevlar, Twaron, Technora). Εκτός από υψηλό μέτρο ελαστικότητας, οι ίνες από PBO εμφανίζουν και μεγάλη αντίσταση στην πυρά, σχεδόν διπλάσια από των μετα-aramιδίων, όπως το Nomex. Συγκεκριμένα, η πυκνότητά τους είναι 1,54 g/cm³, η αντοχή τους σε εφελκυσμό ανέρχεται στα 5800 MPa και το μέτρο ελαστικότητας στα 270 GP.

Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγεται το γεγονός πως η αντοχή τους μπορεί να μειωθεί έως και κατά 35% μετά από έξι μήνες έκθεσης στο φως της ημέρας, και

γενικότερα οι ίνες εμφανίζουν προβλήματα γήρανσης όταν εκτίθενται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. [9, 10]



Εικόνα 32. Άποψη ινών PBO (a) και μοριακή αλυσίδα ινών PBO (b).

4. Κεφάλαιο: Νανοϋλικά

4.1 Εισαγωγή στη νανοτεχνολογία

Η νανοτεχνολογία αφορά τη μελέτη της ύλης σε ατομικό, μοριακό επίπεδο και υπερμοριακό επίπεδο. Ο συγκεκριμένος όρος εισήχθη για πρώτη φορά το 1974 από τον καθηγητή Norio Taniguchi [11] και αναφέρεται στο σχεδιασμό νέων υλικών, συσκευών και συστημάτων που δουλεύουν σε κλίμακα μεγέθους από 1 έως 100 nm. Στη νανοκλίμακα οι μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες των υλικών διαφέρουν σημαντικά με τη συμπεριφορά των ίδιων υλικών στην μακροκλίμακα. Τα νανοσωματίδια εμφανίζουν μεγάλη επιφάνεια επαφής, πράγμα που επηρεάζει την κινητικότητα και τη συμπεριφορά τους. Επομένως, αφού καθίσταται δυνατή η αλλαγή σε θεμελιώδεις ιδιότητες των υλικών, χωρίς να τροποποιηθεί η χημική τους σύσταση, δημιουργείται η προοπτική για πάρα πολλές εφαρμογές.

Τα υλικά που τουλάχιστον η μια διάστασή τους βρίσκεται στην νανοκλίμακα καλούνται νανοϋλικά και οι διάφορες δομές νανοδομές. Τα φουλερένια, δομές άνθρακα σε μορφή σφαίρας, καθώς και οι νανοσωλήνες άνθρακα, δομές άνθρακα σε μορφή σωλήνα, διαθέτουν ιδιαίτερες ιδιότητες το καθένα και αποτελούν σταθμούς στην εξέλιξη της νανοτεχνολογίας. [2]

4.2 Νανοςύνθετα υλικά

Στα νανοςύνθετα υλικά, το ένα τουλάχιστον υλικό πρέπει να βρίσκεται στη νανοκλίμακα. Ως μήτρα χρησιμοποιείται κάποιο πολυμερές, κεραμικό ή μεταλλικό υλικό, ενώ ως ενισχυτική φάση προστίθεται κάποιο έγκλεισμα μεγέθους τάξεως νανοκλίμακας (νανοέγκλεισμα).

Τα νανοσωματίδια παρασκευάζονται είτε σε μορφή κόκκου (μηδενικής διάστασης), είτε σε νανοσωλήνες (μιάς διάστασης), είτε λεπτά υμένια (thin films, δύο

διαστάσεων), είτε συμπολυμερή και πολύστρωτες δομές, όπως τα πολυστρωματικά γραφένια (δύο ή τριών διαστάσεων).

Τα νανοσύνθετα ξεχωρίζουν με τις εξαιρετικές ιδιότητες που προσφέρουν. Αυτή η υπεροχή αποδίδεται στα εγκλείσματα που προέρχονται από υλικά με αξιοσημείωτες ιδιότητες. Ωστόσο, οι ιδιότητες των νανοσυνθέτων δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των εγκλεισμάτων, αλλά και από τη μορφολογία και τη διεπιφάνεια εγκλείσματος – μήτρας. Η διεπιφάνεια στην περίπτωση των νανοσυνθέτων είναι ουσιαστικά άπειρη, καθώς η επιφάνεια επαφής των εγκλεισμάτων με τη μήτρα είναι πολύ μεγάλη. Επίσης, στη νανοκλίμακα εμφανίζονται μοριακά, ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα.

Ακολουθούν ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των νανοσυνθέτων υλικών σε σχέση με των κοινών σύνθετων:

- ✓ Βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες
- ✓ Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνά και αυτή των μετάλλων.
- ✓ Αν και γενικά άφλεκτα, στην περίπτωση που επέλθει καύση διαχέονται λιγότερο τοξικά αέρια και καπνοί προς το περιβάλλον.
- ✓ Θερμικώς σταθερά
- ✓ Χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα, οπότε προκύπτουν νανοσύνθετα με ειδικές ιδιότητες πολύ υψηλές.
- ✓ Υψηλή αντοχή σε έντονα τοξικό (χημικό) περιβάλλον

Από την τα νανοσύνθετα παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα έναντι των κοινών συνθέτων υλικών, τα οποία όμως δεν μπορούν να γενικευθούν σε όλες τις περιπτώσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημα, κυρίως στα νανοσύνθετα πολυμερικής μήτρας, είναι η οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στην παρασκευή τους. Η αιτία εντοπίζεται στο γεγονός πως τα νανοεγκλείσματα έχουν την τάση να έλκονται μεταξύ τους με δυνάμεις Van der Waals, δημιουργώντας συσσωματώματα. Συνεπώς για να εξασφαλιστούν οι βέλτιστες ιδιότητες του νανοσύνθετου υλικού, πρέπει να εξασφαλιστεί η ομογενής διασπορά των εγκλεισμάτων στη μήτρα. Για να συμβεί αυτό απαιτούνται χρονοβόρες διεργασίες, οι οποίες κοστίζουν και προϋποθέτουν κατάλληλο εξοπλισμό [12, 13].

4.3 Γραφένιο

4.3.1 Ο άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του

Ο άνθρακας είναι ένα τετρασθενές στοιχείο που τείνει να σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς με άλλα άτομα. Βρίσκεται ανάμεσα στα τέσσερα αφθονότερα στοιχεία του πλανήτη, είναι το πρώτο χημικό στοιχείο της 14^{ης} ομάδας του περιοδικού πίνακα και έχει ατομικό αριθμό $Z=6$. Αναλόγως της αλλοτροπικής μορφής του άνθρακα καθορίζονται και οι ιδιότητές του. Αυτές οι μορφές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ✓ Φυσικές μορφές άνθρακα: γραφίτης, διαμάντι και άμορφος άνθρακας.
- ✓ Τεχνητές μορφές άνθρακα: φουλερένια, νανοσωλήνες άνθρακα, ίνες άνθρακα και γραφένιο.



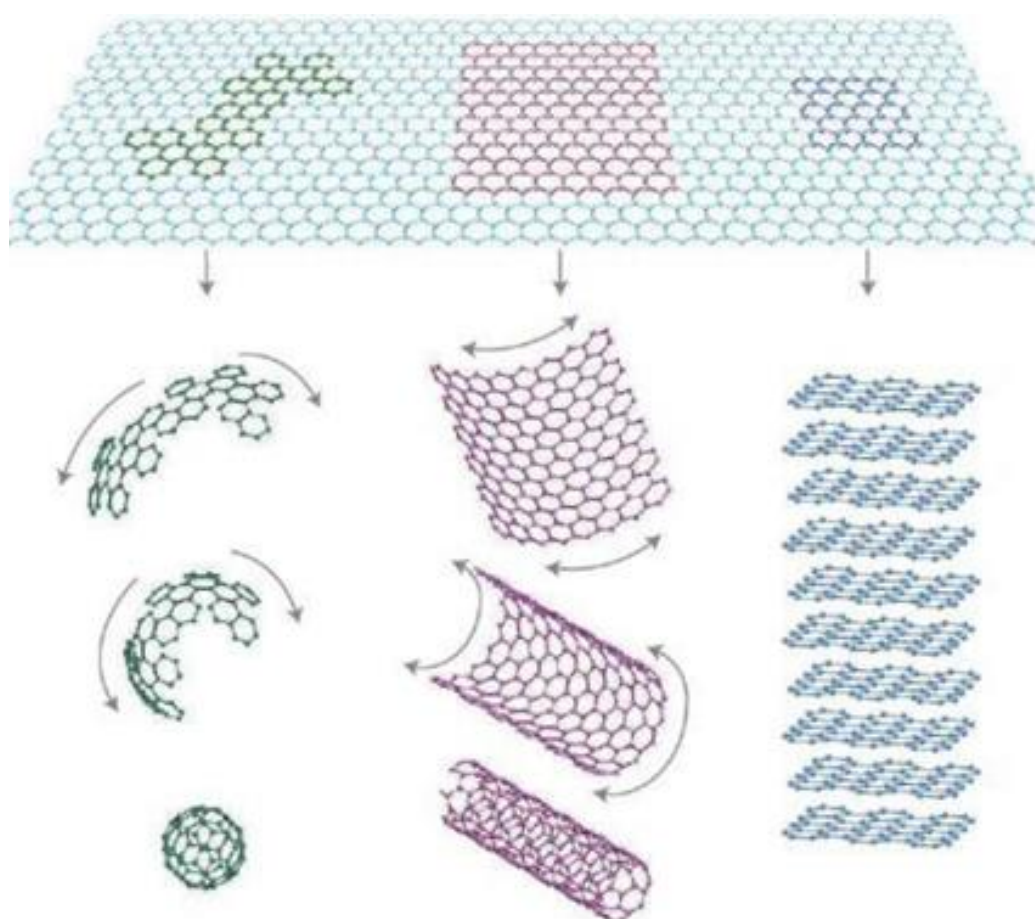
Εικόνα 33. Απεικόνιση άνθρακα.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία εστιάζει στο γραφένιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε μορφή νανοδομών (grapheme nanoplateles) για την ενίσχυση σύνθετου υλικού από εποξική ρητίνη και υαλονήματα.

4.3.2 Γενικά χαρακτηριστικά γραφενίου

Το γραφένιο είναι μια τεχνητή μορφή άνθρακα, η οποία ανακαλύφθηκε από τους A. Geim και K. Novoselov χρησιμοποιώντας της μέθοδο του μικρομηχανικού

σχισμού (scotch tape method). Το γραφένιο είναι ένα ενιαίο δισδιάστατο ατομικό στρώμα γραφίτη που αποτελείται από πολύ στενά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα που αναπτύσσονται σε ένα εξαγωνικό δικτυωτό πλέγμα, σχηματίζοντας μια κυβελοειδή διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί παρακάτω. Μπορεί να περιγραφεί ως ένα μόνο στρώμα ατόμων άνθρακα, πάχους από 0,33 έως 1,6 nm, όπως έχει προσδιοριστεί πειραματικά από διάφορες ερευνητικές ομάδες και παρουσιάζει λόγο μήκους προς διάμετρο που ξεπερνά το 10000. Πρόκειται ουσιαστικά για το δομικό υλικό από το οποίο αποτελείται ο γραφίτης (3D), το πολυστρωματικό γραφένιο (3D), οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes – 1D) και το φουλερένιο (0D), τα οποία αποτελούν αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα. [14, 15, 16, 17]



Εικόνα 34. Δισδιάστατη δομή γραφενίου. Μπορεί να πακεταρισθεί σε δομή 0D φουλερενίου, να τυλιχθεί σε δομή 1D νανοσωλήνων ή να δημιουργήσει στοιβάδες για την 3D δομή του γραφίτη. [17]

4.3.3 Ιδιότητες γραφενίου

- **Μηχανικές ιδιότητες**

Προκειμένου να υπολογιστεί η δύναμη του γραφενίου χρησιμοποιείται μια τεχνική που ονομάζεται μικροσκοπία ατομικής δύναμης (Atomic Force Microscopy – AFM). Ασκώντας πίεση σε φύλλα γραφενίου που έχουν τοποθετηθεί σε κοιλότητες διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) μετράται η σταθερά ελαστικότητας (1-5N/m). Μέσω της παραπάνω τεχνικής διαπιστώθηκε πως το γραφένιο είναι σκληρότερο από το διαμάντι και περίπου 300 φορές σκληρότερο από το χάλυβα. Το γραφένιο είναι αρκετά ισχυρό και δύσκαμπτο, με το μέτρο ελαστικότητας να υπολογίζεται στο 1 TPa και η αντοχή του σε θραύση να ανέρχεται στα 130 GPa. Η επιμήκυνση θραύσης του φτάνει το 20% του αρχικού μήκους του. [18, 23]

- **Χημικές ιδιότητες**

Λόγω της πλευρικής διαθεσιμότητας των ατόμων άνθρακα, το γραφένιο είναι χημικά πιο αντιδραστικό από άλλες μορφές άνθρακα. Συνήθως, τροποποιείται με λειτουργικές ομάδες οξυγόνου και αζώτου και αναλύεται από την υπέρυθρη φασματοσκοπία και τη φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτινών. Η δισδιάστατη δομή σε συνάρτηση με το ασυνήθιστο άμαζο φάσμα Dirac των ηλεκτρονίων διέγερσης χαμηλής ενέργειας προσδίδουν στο γραφένιο μια ιδιαίτερη χημική ευαισθησία. Αυτή η ευαισθησία για ένα μόνο μόριο, που αποδίδεται στο εξαιρετικά χαμηλό θόρυβο του γραφενίου και στην γραμμική ηλεκτρονική της πυκνότητας καταστάσεων (DOS), το καθιστά ένα πολλά υποσχόμενο ανιχνευτή με υψηλή ευαισθησία σε εξωτερικά φορτία, μαγνητικά πεδία ή μηχανικές καταπονήσεις. [21]

- **Ηλεκτρονικές ιδιότητες**

Οι βασικές συνιστώσες που συμβάλλουν στις εξαιρετικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου είναι: το κυψελωτό πλέγμα, η δισδιάστατη δομή και το γεγονός πως όλες οι πλευρές στο κρυσταλλικό πλέγμα καταλαμβάνονται από τα ίδια άτομα, γεγονός που του προσδίδει ανάστροφη συμμετρία. Τα κβαντικά άλματα των

ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο υποπλεγμάτων οδηγούν σε σχηματισμό ενεργειακών ζωνών και η τομή τους στα άκρα της ζώνης Brillouin προάγει τη δημιουργία κωνικών δομών στο ενεργειακό φάσμα. Ως εκ τούτου, τα quasi-σωματίδια του γραφενίου συμπεριφέρονται σαν να ήταν σχετικιστικά σωματίδια χωρίς μάζα (όπως τα φωτόνια), ενώ το ρόλο της ταχύτητας του φωτός διαδραματίζει σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα Fermi με $v^*F = c/300$. Για την ακρίβεια, οι φορείς φορτίου στο εξαγωνικό πλέγμα μπορούν να ρυθμίζονται συνεχώς μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών σε συγκεντρώσεις της τάξεως του $n=10^{13}\text{cm}^{-2}$ και να εμφανίζουν κινητικότητα της τάξεως των $15000\text{cm}^2/\text{Vs}$ σε συνθήκες περιβάλλοντος. Οι τιμές κινητικότητας που εξαρτώνται σε μικρό βαθμό από την θερμοκρασία, πράγμα που σημαίνει πως η κινητικότητα σε θερμοκρασίες 300 K περιορίζεται από σκεδάσεις λόγω των ατελειών και για αυτό μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά φθάνοντας μέχρι τα $100000\text{cm}^2/\text{Vs}$. [19, 20]

- **Θερμικές ιδιότητες**

Το γραφένιο διακρίνεται για την εξαιρετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητά του. Η αιτία για αυτό εντοπίζεται στους ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων του άνθρακα. Η θερμική αγωγιμότητα για το απομονωμένο γραφένιο φτάνει σε τιμές περίπου $5000\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ σε θερμοκρασία δωματίου, τιμή που ξεπερνάει την αντίστοιχη του διαμαντιού κατά 2,5 φορές. Συνήθως σε πρακτικές εφαρμογές, το γραφένιο στηρίζεται σε κάποιο υπόστρωμα, όπου εκεί η θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου διαμορφώνεται περίπου στα $600\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Η τιμή αυτή είναι περίπου διπλάσια από αυτή του χαλκού και πενήντα φορές μεγαλύτερη από εκείνη του πυριτίου. [21, 22]

- **Οπτικές ιδιότητες**

Παρότι πρόκειται για το λεπτότερο υλικό που έχει υπάρξει, παραμένει ορατό στο γυμνό μάτι. Οι μοναδικές ιδιότητες του γραφενίου παράγουν μια απροσδόκητα μεγάλη διαφάνεια για ένα ατομικό μόνο στρώμα. Πιο συγκεκριμένα, απορροφά $\approx 2,3\%$ του λευκού φωτός, όπου α η σταθερά της τέλειας δομής και π η γνωστή σταθερά. Το γραφένιο αποτελεί μια από τις σπάνιες περιπτώσεις όπου οι ιδιότητες

ενός συστήματος συμπακνωμένης ύλης είναι ανεξάρτητες των παραμέτρων του υλικού και μπορούν να εκφραστούν μονάχα συναρτήσει θεμελιωδών σταθερών. [21]

4.3.4 Εφαρμογές γραφενίου

Ένας από τους τρόπους αξιοποίησης των εξαιρετικών ιδιοτήτων του γραφενίου που περιγράφηκαν παραπάνω είναι η ενσωμάτωσή του σε διάφορα υλικά, όπως πολυμερή, μέταλλα και κεραμικά. Σήμερα, η πιο άμεση εφαρμογή του εντοπίζεται κυρίως στην ενίσχυση (σε μορφή σκόνης κρυσταλλιτών μικρομετρικών διαστάσεων) πολυμερών και στη σύνθεση αγωγίμων πλαστικών. Από την άλλη, όσον αφορά στην ενίσχυση μετάλλων υπάρχουν μόνο λίγες αναφορές. Στον κλάδο των θερμικών υλικών διεπαφής (Thermal Interface Materials), το γραφένιο έχει χρησιμοποιηθεί ως εξαιρετικό πληρωτικό. Η ισχυρή σύζευξη του γραφενίου με τα μεταλλικά σωματίδια προκάλεσε αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα του σύνθετου υλικού έως και 2.300%. Οι νανοδομές γραφενίου, λόγω της δισδιάστατης δομής, μπορούν να διασπείρονται σε όλα τα είδη διαλυτών και μητρών, κάτι που προμηνύει πως μελλοντικά ενδέχεται να αντικατασταθούν οι νανοσωλήνες άνθρακα στην ενίσχυση μετάλλων από νανοδομές γραφενίου. [17, 24, 25, 26].

4.3.5 Νανοδομές γραφενίου (Πολυστρωματικό γραφένιο, graphene nanoplatelets - GNPs)

Το γραφένιο ανάλογα με το πλήθος των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται, διακρίνεται σε γραφένιο μονού στρώματος και πολυστρωματικό γραφένιο. Το γραφένιο μονού στρώματος αποτελείται από ένα δισδιάστατο πλέγμα ατόμων άνθρακα (2D), ενώ το πολυστρωματικό αποτελείται από δύο ή και περισσότερα πλέγματα άνθρακα, σχηματίζοντας μια τρισδιάστατη δομή. Συγκριτικά με το μονοστρωματικό γραφένιο, το πολυστρωματικό παρασκευάζεται ευκολότερα σε μεγαλύτερες ποσότητες και με σχετικά χαμηλό κόστος.

Τα πολυστρωματικά γραφένια συναντώνται στη διεθνή ορολογία ως graphene nanoplatelets (GNPs) και αποτελούνται από 2 έως 100 φύλλα με εμβαδό επιφάνειας περίπου 1nm x 100nm. Ουσιαστικά, δεν υπάρχει απόλυτος τρόπος δόμησης των στρωμάτων, διότι συνήθως δεν είναι στοιχισμένα το ένα πάνω από το άλλο. Η

καλύτερη δυνατή παρατήρηση στρωμάτων γραφενίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) ή με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διερχόμενης δέσμης (TEM). Το πάχος των στρώσεων μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση φασματοσκοπίας. [23]

4.3.5.1 Ιδιότητες πολυστρωματικού γραφενίου (GNPs)

Οι νανοδομές γραφενίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των ιδιοτήτων σε ένα ευρύ φάσμα των πολυμερών υλικών. Το γραφένιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνο του και να αντικαταστήσει τα συμβατικά νανοπρόσθετα, διευρύνοντας το φάσμα των ιδιοτήτων του των υλικών ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συνδυασμό με άλλα πρόσθετα συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του κόστους και σε άλλες παραμέτρους. Με τις νανοδομές γραφενίου επιτυγχάνεται:

- ✓ Αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας και σταθερότητα
- ✓ Αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας
- ✓ Βελτίωση των ιδιοτήτων φραγμού
- ✓ Μείωση μάζας συνθέτου με ταυτόχρονη διατήρηση ή βελτίωση των ιδιοτήτων
- ✓ Αύξηση της αντοχής
- ✓ Αισθητική βελτίωση
- ✓ Μείωση ευφλεκτότητας

Όπως προαναφέρθηκε τα φύλλα γραφενίου που σχηματίζονται από νανοδομές γραφενίου, όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες άνθρακα, είναι θερμικά και ηλεκτρικά αγωγιμα. Ωστόσο, αντίθετα από τους νανοσωλήνες και τις ίνες άνθρακα, η μορφολογία των platelets παρέχει χαμηλότερη θερμική αντίσταση επαφής σε χαμηλότερα επίπεδα φόρτισης, με αποτέλεσμα υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και την αύξηση των τιμών της απόλυτης θερμοκρασίας λειτουργίας στα πολυμερή. Επίσης, ο συνδυασμός τους με ένα φιλμ ή ένα στερεό τμήμα πολυμερούς οδηγεί στη μείωση των συντελεστών διαπερατότητας και διάχυσης του υλικού της μήτρας. [27]

4.3.5.2 Μέθοδοι παρασκευής νανοδομών γραφενίου

Μια ευέλικτη μέθοδος μαζικής παραγωγής μονοστρωματικής γραφίνης είναι η αποφολίδωση σε υγρή φάση (liquid phase exfoliation). Η πιο συνηθισμένη μορφή αυτής της μεθόδου πραγματοποιείται με οξείδωση του γραφενίου και μετά με αποφολίδωση του οξειδίου του γραφενίου. Ωστόσο, το μεγάλο μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι πως το οξειδωμένο γραφένιο μαστίζεται με δομικά ελαττώματα. Αυτές οι ατέλειες εντοπίζονται συνήθως μέσω φασματοσκοπίας Raman και επηρεάζουν αρνητικά την κρυσταλλογραφική δομή του γραφενίου. [23] Το γεγονός αυτό επηρεάζει τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του γραφενίου. Βελτίωση αυτού του προβλήματος επετεύχθη με την προσθήκη διαφόρων διαλυτών κατά τη διαδικασία αποφολίδωσης. Η παραγωγή των νανοδομών γραφενίου μέσω της παραπάνω μεθόδου δίνει τρεις γενικές μορφές γραφίτη:

- Φυσικές νιφάδες γραφίτη
- Ενδοϋποστηλωμένο γραφίτη
- Αποφολιδωμένο γραφίτη



Εικόνα 35. Σκόνη νανοδομών γραφενίου.

5. Κεφάλαιο: Μηχανική σύνθετων υλικών

5.1 Εισαγωγή στη μηχανική σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά έχουν πολλά χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς, τα οποία είναι διαφορετικά από εκείνα των περισσοτέρων συμβατικών υλικών. Ορισμένα χαρακτηριστικά αποτελούν τροποποίηση της συμβατικής συμπεριφοράς, ενώ άλλα είναι εντελώς νέα και απαιτούν νέες αναλυτικές και απαιτούν νέες αναλυτικές και πειραματικές μεθόδους.

Τα περισσότερα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη μηχανολογία είναι ταυτόχρονα και ομοιογενή και ισοτροπικά. Ακολουθούν δύο σημαντικοί ορισμοί:

- ✓ Ένα ομογενές σώμα έχει ενιαίες φυσικές ιδιότητες σε όλο τον όγκο του υλικού του.
- ✓ Σε ένα ισοτροπικό σώμα οι μηχανικές ιδιότητες είναι οι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις από ένα σημείο του υλικού.

Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά, που αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι συχνά ανομοιογενή και μη-ισοτροπικά (ορθοτροπικά). Όπως προκύπτει από τους παραπάνω ορισμούς:

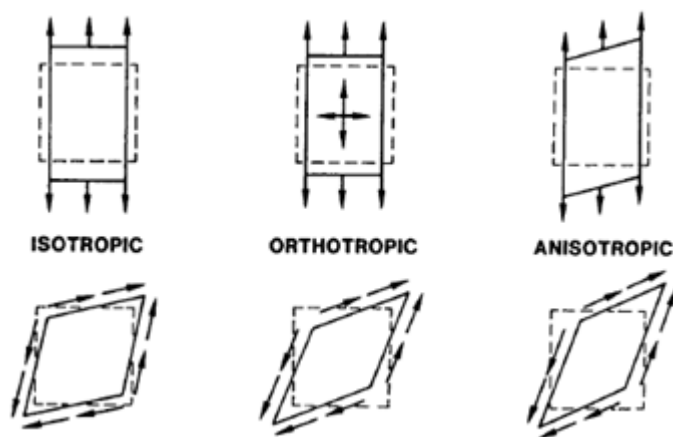
- ✓ Ένα ανομοιογενές σώμα δεν έχει ενιαίες ιδιότητες σε όλο τον όγκο του
- ✓ Ένα ορθοτροπικό σώμα έχει μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες είναι διαφορετικές προς τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις σε ένα σημείο του σώματος, οπότε προκύπτουν τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας μηχανικών ιδιοτήτων. Επομένως, οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από τον προσανατολισμό ενός σημείου στο σώμα.
- ✓ Ένα ανισοτροπικό σώμα έχει μηχανικές ιδιότητες που είναι διαφορετικές προς όλες τις κατευθύνσεις από ένα σημείο του σώματος. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχουν επίπεδα συμμετρίας μηχανικών ιδιοτήτων. Ωστόσο, και εδώ οι ιδιότητες εξαρτώνται από τον προσανατολισμό προς ένα σημείο του σώματος.

Για παράδειγμα, ένα πολυστρωματικό γυαλί ασφαλείας αποτελείται από τρεις στρώσεις, από τις οποίες η κάθε μία είναι ομογενής και ισοτροπική, αλλά το σύνθετο υλικό στο σύνολό του έχει ανομοιογένεια με μορφή βηματικής συνάρτησης στην κάθετη διεύθυνση προς το επίπεδο των στρώσεων του γυαλιού.

Λόγω της εγγενούς ανομοιογένειας των σύνθετων υλικών, η συμπεριφορά τους προσεγγίζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- ✓ Μικρομηχανική (micromechanics): Είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών, όπου η αλληλεπίδραση των συστατικών του συνθέτου εξετάζεται σε μικροσκοπική κλίμακα με σκοπό τον ορισμό της επίδρασης των συστατικών στις ιδιότητες του συνθέτου.
- ✓ Μακρομηχανική (macromechanics): Είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των συνθέτων υλικών, κατά την οποία έχει υποτεθεί πως το υλικό είναι ομοιογενές και η επίδραση των συστατικών υλικών του συνθέτου εντοπίζεται μόνο ως μια μέση τιμή των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του συνθέτου υλικού.

Παρακάτω αναλύεται μόνο η μακρομηχανική συμπεριφορά των συνθέτων υλικών, καθώς αυτή είναι σημαντικότερη κατά τον σχεδιασμό σχετικών σύνθετων δομών. [4, 5]



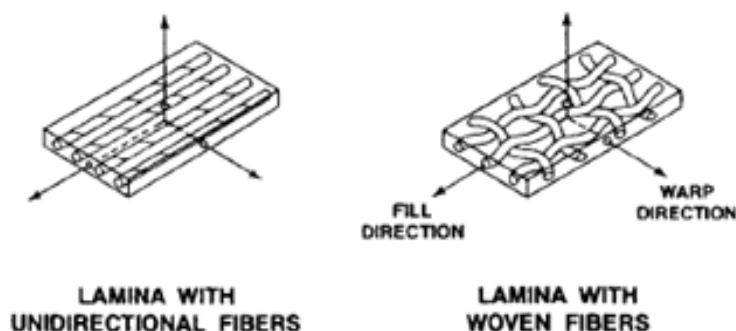
Εικόνα 36. Μηχανική συμπεριφορά διαφόρων υλικών. [5]

5.2 Βασική ορολογία πολυστρωματικών συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελούν τα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά ενισχυμένα με μακριές και συνεχείς ίνες.

5.2.1 Μονοστρωματικά σύνθετα (lamina)

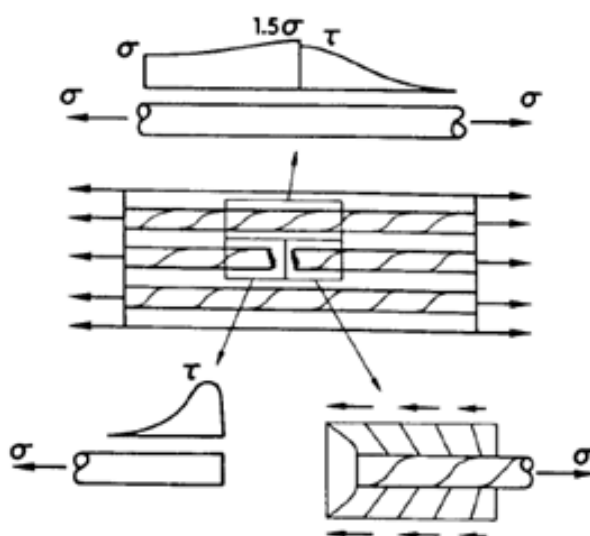
Το βασικό δομικό κομμάτι ενός πολυστρωματικού συνθέτου είναι το μονοστρωματικό φύλλο (lamina), το οποίο είναι μια επίπεδη διάταξη μονοδιευθυντικών ή πλεκτών ινών μέσα σε μια μήτρα. Δύο τυπικά επίπεδα μονοστρωματικά φύλλα μαζί με τους άξονες συντεταγμένων τους που είναι παράλληλοι και κάθετοι στην διεύθυνση των ινών φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 37. Δύο στοιχειώδης τύπου μονοστρωματικών συνθέτων (laminae). [5]

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι ίνες αποτελούν τη βασική ενίσχυση του συνθέτου, ενώ η μήτρα μπορεί να είναι οργανική, μεταλλική, κεραμική ή από άνθρακα. Σκοπός της μήτρας είναι να υποστηρίξει και να προστατεύει τις ίνες, καθώς και να μεταφέρει και το φορτίο σε αυτές, αλλά και μεταξύ τους. Το τελευταίο είναι ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στην περίπτωση που κάποια ίνα αστοχήσει, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Εδώ το φορτίο που φορτίζει το ένα άκρο της σπασμένης ίνας μεταφέρεται στη μήτρα και από εκεί μεταφέρεται στο άλλο κομμάτι της κομμένης ίνας και προφανώς στις υπόλοιπες ίνες της διάταξης. Ο

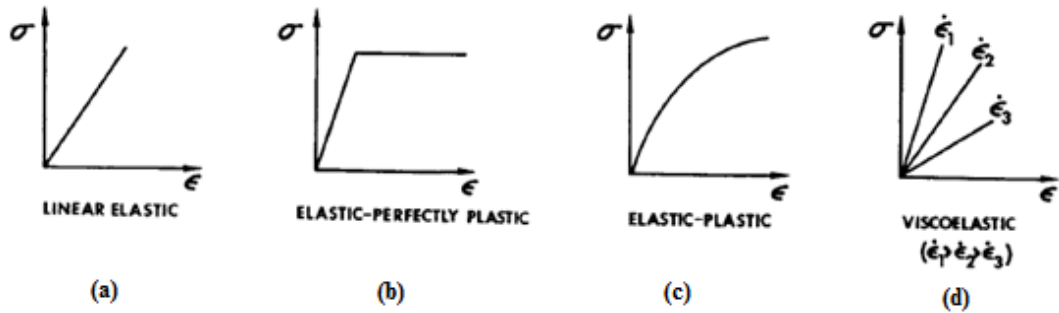
μηχανισμός της μεταφοράς φορτίου είναι η διατμητική τάση που αναπτύσσεται μέσα στο υλικό της μήτρας.



Εικόνα 38. Επίδραση σπασμένης ίνας στη μήτρα και κατανομή τάσεων στην ίνα. [5]

Οι ιδιότητες των συστατικών του μονοστρωματικού φύλλου, οι ίνες και η μήτρα, δεν θα συζητηθούν περαιτέρω, καθώς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελούν τα πολυστρωματικά σύνθετα. Παρ' όλα αυτά, γίνεται παρακάτω μια σύντομη αναφορά. Βάσει της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης διακρίνονται τυπικά τέσσερις κατηγορίες. Αν και οι ίνες εμφανίζουν γενικά γραμμική ελαστική συμπεριφορά, άλλα υλικά όπως για παράδειγμα οι δοκοί χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα επιδεικνύουν μια περισσότερο ελαστική – πλήρως πλαστική συμπεριφορά. Το αλουμίνιο, καθώς και πολλά πολυμερή και ορισμένα σύνθετα υλικά εμφανίζουν μια ελαστοπλαστική συμπεριφορά που μεταφράζεται σε μια μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά αν δεν αρθεί το φορτίο καταπόνησης. Σε γενικές γραμμές, τα σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας είναι βισκοελαστικά, ενδεχομένως και βισκοπλαστικά, καθώς η συμπεριφορά τους εξαρτάται από το βαθμό παραμόρφωσης και αντίστοιχα εμφανίζουν μια γραμμική ή μη γραμμική σχέση τάσης – παραμόρφωσης.

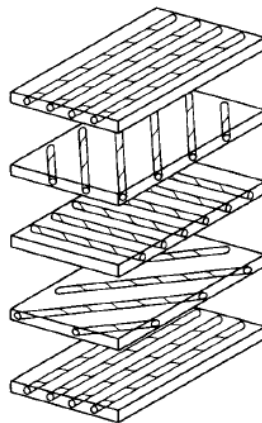
Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες, όπως το σύνθετο γραφίτη σε εποξική μήτρα αντιμετωπίζονται συνήθως ως γραμμικά ελαστικά υλικά, καθώς ουσιαστικά οι γραμμικά ελαστικές ίνες εξασφαλίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό αντοχής και δυσκαμψίας. [5]



Σχήμα 5. Τέσσερις κατηγορίες μηχανικής συμπεριφοράς συνθέτων με βάση τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης. Γραμμική ελαστική συμπεριφορά (a), ελαστική – πλήρως πλαστική συμπεριφορά (b), ελαστική – πλαστική συμπεριφορά (c) και βισκοελαστική (d). [5]

5.2.2 Πολυστρωματικά σύνθετα (laminate)

Ένα πολυστρωματικό σύνθετο αποτελείται από διάφορα μονοστρωματικά φύλλα με ποικίλους προσανατολισμούς του βασικού άξονα των ινών κάθε στρώσης, το ένα τοποθετημένο πάνω από το άλλο κατά τον άξονα z, ο οποίος είναι κάθετος προς το επίπεδο που ορίζουν οι στρώσεις. Οι στρώσεις ενός πολυστρωματικού συνήθως συνδέονται μεταξύ τους από το ίδιο υλικό που αποτελείται και η μήτρα της κάθε στρώσης. Πιο συγκεκριμένα, συνήθως το υλικό της μήτρας που καλύπτει την επιφάνεια του μονοστρωματικού φύλλου χρησιμοποιείται για να συνδεθεί πάνω στην πρώτη στρώση η επόμενη, χωρίς της πρόσθεση επιπλέον υλικού (της μήτρας). Τα πολυστρωματικά σύνθετα μπορούν να παρασκευαστούν με την εναπόθεση στρώσεων διαφορετικών υλικών ή όπως στην περίπτωση που μελετάται στην παρούσα εργασία στρώσεων από μονοστρωματικά φύλλα ενισχυμένων με ίνες.



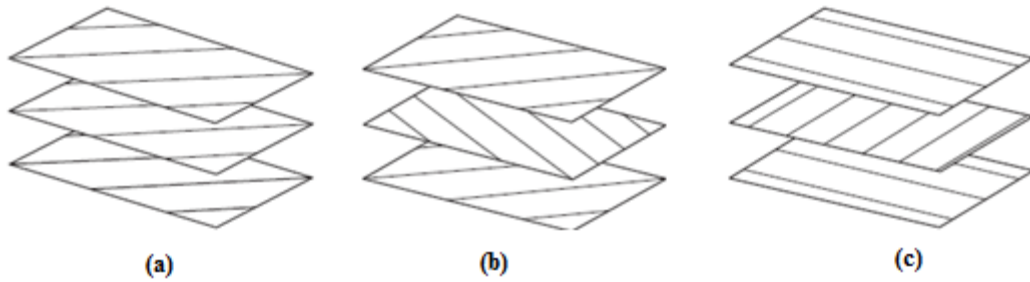
Εικόνα 39. Διαδοχικές στρώσεις πολυστρωματικού συνθέτου με διαφορετικό προσανατολισμό στρώσεων. [5]

Ο κύριος στόχος αυτής της στρωματοποίησης (lamination) είναι να προσαρμοστούν η αντοχή και η δυσκαμψία που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των ινών κάθε στρώσης στο περιβάλλον φόρτισης του σύνθετου υλικού. Τα πολυστρωματικά σύνθετα είναι ιδιαίτερος κατάλληλα για αυτό το σκοπό, καθώς οι στοιχειώδεις διευθύνσεις κάθε στρώσης μπορούν να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις λειτουργία του συνθέτου υλικού. Για παράδειγμα, έξι στρώσεις ενός δεκα-στρωματικού συνθέτου μπορούν να τοποθετηθούν με ένα συγκεκριμένο προσανατολισμό και οι υπόλοιπες τέσσερις σε γωνία 90° προς τις παραπάνω. Το προκύπτον σύνθετο έχει αντοχή και δυσκαμψία περίπου κατά 50% υψηλότερη προς τη μια διεύθυνση από σε σχέση με την άλλη. Ο λόγος της δυσκαμψίας προς τις δύο διευθύνσεις υπολογίζεται περίπου στο 6:4, αλλά στην περίπτωση κάμψης του σύνθετου το αποτέλεσμα είναι αβέβαιο, καθώς δεν έχει οριστεί παραπάνω η σειρά των στρώσεων. [5]

5.2.3 Κατηγορίες και σημειολογία συνθέτων ενισχυμένων με ίνες

Παρακάτω ακολουθούν ορισμένοι ειδικοί τύποι πολυστρωματικών συνθέτων, καθώς και η αντίστοιχη σημειολογία τους:

- Μονοδιευθυντικά πολυστρωματικά σύνθετα (unidirectional laminate):
Σε ένα μονοδιευθυντικό πολυστρωματικό σύνθετο, η γωνία προσανατολισμού των ινών είναι η ίδια σε όλες τις στρώσεις. Για παράδειγμα σε ένα πολυστρωματικό σύνθετο 0° , όλες οι στρώσεις τοποθετούνται σε γωνία $\theta = 0^\circ$.
- Πολυστρωματικό με αντίθετες γωνίες στρώσεων (angle-ply laminate):
Σε αυτήν την περίπτωση οι γωνίες προσανατολισμού των ινών στις διαφορετικές στρώσεις είναι $/\theta/-\theta/\theta/-\theta$ όπου $\theta \neq 0^\circ$ ή 90° .
- Πολυστρωματικό με διασταυρούμενες στρώσεις (cross-ply laminate):
Σε αυτήν την περίπτωση ο προσανατολισμός γωνιών των διαφορετικών στρώσεων είναι $/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/$.



Εικόνα 40. Τύποι πολυστρωματικών συνθέτων υλικών: μονοδιευθυντικό πολυστρωματικό (a), πολυστρωματικό με αντίθετες γωνίες στρώσεων (b) και πολυστρωματικό με διασταυρούμενες στρώσεις (c). [4]

- Συμμετρικά πολυστρωματικά (symmetric laminate):

Σε ένα συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο, ο προσανατολισμός των ινών κάθε στρώσης είναι συμμετρικός ως προς το μέσο επίπεδο της πολυστρωματικής διάταξης.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε στρώση πάνω από το μέσο επίπεδο υπάρχει μια ταυτόσημη στρώση (σε υλικό, πάχος και γωνία προσανατολισμού των ινών) σε ίση απόσταση κάτω από το μέσο επίπεδο της δομής. Επομένως, για τα συμμετρικά πολυστρωματικά σύνθετα ισχύει $\theta(z) = \theta(-z)$, όπου z είναι η απόσταση από το μέσο επίπεδο του πολυστρωματικού συνθέτου. Για παράδειγμα, σε ένα πολυστρωματικό έξι στρώσεων με γωνίες προσανατολισμού (από κάτω προς τα πάνω) στρώσεων $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$ γράφεται συνοπτικά $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]_s$, όπου ο δείκτης «s» σημαίνει συμμετρικό. Αντίστοιχα, σε μια διάταξη μονού αριθμού στρώσεων, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση $[0^\circ/+45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ]$, τότε ο κατάλληλος κωδικός είναι $[0^\circ/45^\circ/\overline{90^\circ}]_s$.

- Αντισυμμετρικό πολυστρωματικό (antisymmetric laminate):

Σε αυτήν την περίπτωση ο προσανατολισμός των στρώσεων αντισυμμετρικός ως προς το μέσο επίπεδο της πολυστρωματικής δομής. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε στρώση με γωνία προσανατολισμού ινών θ πάνω από το μέσο επίπεδο της δομής, υπάρχει μια στρώση με γωνία προσανατολισμού ινών $-\theta$ κάτω από το μέσο επίπεδο, προφανώς ίδιου υλικού, πάχους και ίσης απόστασης από το μέσο επίπεδο. Επομένως, για τα αντισυμμετρικά πολυστρωματικά ισχύει $\theta(z) = -\theta(-z)$. Για παράδειγμα, το πολυστρωματικό με γωνίες προσανατολισμού ινών κάθε

στρώσης (από κάτω προς τα πάνω) $\theta/-\theta/\theta/-\theta$ είναι αντισυμμετρικό (σε αντίθεση με το $\theta/-\theta/\theta/-\theta$ που είναι συμμετρικό).

- Μη-συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο (unsymmetric laminate):

Στα μη συμμετρικά πολυστρωματικά δεν υπάρχει κανένα είδος συμμετρίας ή αντισυμμετρίας. Για παράδειγμα, τα $0/0/0/90/90/90$ ή $0/\theta/-\theta/90$ είναι μη-συμμετρικά πολυστρωματικά σύνθετα.

- Ημι-ισοτροπικά πολυστρωματικά (quasi-isotropic laminate):

Αυτά τα πολυστρωματικά σύνθετα παρασκευάζονται από τρεις ή περισσότερες στρώσεις ίδιου πάχους και υλικού με ίσες διαφορές γωνιών προσανατολισμού μεταξύ γειτονικών στρώσεων. Για αυτό, αν ο συνολικός αριθμός στρώσεων είναι n , η διαφορά γωνίας προσανατολισμού μεταξύ των στρώσεων είναι π/n . Το προκύπτον πολυστρωματικό σύνθετο εμφανίζει μια ισοτροπική ελαστική συμπεριφορά στο επίπεδο των στρώσεων. Ωστόσο, οι ιδιότητες αντοχής του ενδέχεται να διαφέρουν αναλόγως της διεύθυνσης της φόρτισης. Για παράδειγμα, το πολυστρωματικά $[45/0/-45/90]$, $[0/+60/-60]$ και $[0/+45/-45/90]$ είναι ημι-ισοτροπικά πολυστρωματικά σύνθετα, καθώς εμφανίζουν ισοτροπική ελαστική συμπεριφορά στο επίπεδό τους. [4]

5.3 Θεωρία στρωματοποίησης (lamination theory)

Η θεωρία στρωματοποίησης είναι χρήσιμη κατά τον υπολογισμό τάσεων και παραμορφώσεων κάθε στρώσης σε μια λεπτή πολυστρωματική δομή. Η συγκεκριμένη θεωρία εισήχθη από τον Robert M. Jones. Με αφετηρία τα μητρώα δυσκαμψίας, η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός των μητρώων δυσκαμψίας του πολυστρωματικού σύνθετου.
2. Υπολογισμός των παραμορφώσεων και των καμπυλοτήτων του μέσου επιπέδου του πολυστρωματικού συνθέτου λόγω ασκούμενων δυνάμεων και ροπών.

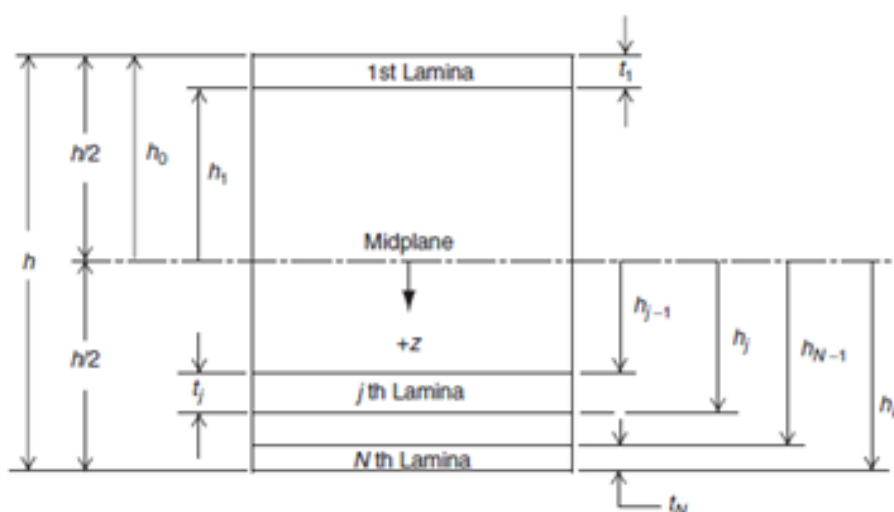
- Υπολογισμός των παραμορφώσεων ϵ_{xx} , ϵ_{yy} και γ_{xy} εντός του επιπέδου κάθε στρώσης.
- Υπολογισμός των τάσεων σ_{xx} , σ_{yy} και τ_{xy} εντός του επιπέδου κάθε στρώσης. [4, 5]

5.3.1 Παραδοχές της θεωρίας

Οι βασικές παραδοχές που γίνονται στη θεωρία στρωματοποίησης (lamination theory) είναι οι εξής:

- Η πολυστρωματική δομή είναι λεπτή και φαρδιά (το πλάτος είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος της δομής).
- Οι διάφορες στρώσεις συνδέονται μεταξύ τους με έναν ιδανικό ενδοστρωματικό δεσμό (interlaminar bond).
- Η κατανομή παραμορφώσεων κατά το πάχος της δομής είναι γραμμική.
- Όλες οι στρώσεις είναι μακροσκοπικά ομοιογενής και συμπεριφέρονται με γραμμικά ελαστικό τρόπο.

Το γεωμετρικό μέσο επίπεδο της πολυστρωματικής δομής περιλαμβάνει τους άξονες x και y , ενώ ο άξονας z ορίζει τη διεύθυνση του πάχους της πολυστρωματικής δομής. Το συνολικό πάχος της δομής είναι h , ενώ τα πάχη των διαφόρων στρώσεων αντιπροσωπεύονται ως t_1, t_2, t_3 κλπ. Ο συνολικός αριθμός των στρώσεων είναι N . [4]



Εικόνα 41. Γεωμετρία πολυστρωματικού συνθέτου. [4]

5.3.2 Παραμορφώσεις της πολυστρωματικής δομής (laminat strains)

Σύμφωνα με την τρίτη παραδοχή της θεωρίας, οι παραμορφώσεις της πολυστρωματικής δομής είναι γραμμικά εξαρτώμενες από την απόσταση από το μέσο επίπεδο ως εξής:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx}^o + zk_{xx} \\ \varepsilon_{yy} &= \varepsilon_{yy}^o + zk_{yy} \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^o + zk_{xy}\end{aligned}\quad (1)$$

όπου:

$\varepsilon_{xx}^o, \varepsilon_{yy}^o$ = οι ορθές παραμορφώσεις στο μέσο επίπεδο του πολυστρωματικού

γ_{xy}^o = η διατμητική παραμόρφωση στο μέσο επίπεδο του πολυστρωματικού

k_{xx}, k_{yy} = οι καμπυλότητες από κάμψη του πολυστρωματικού

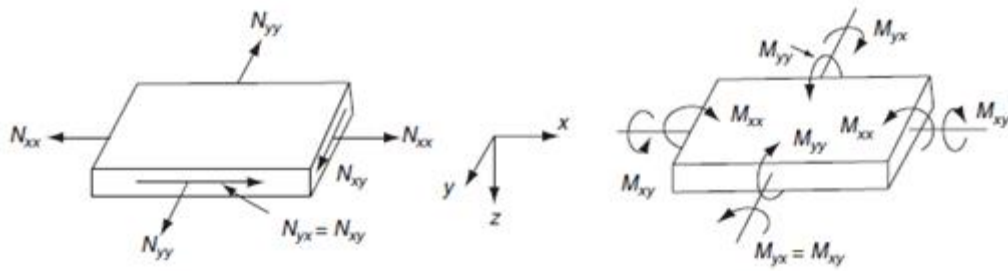
k_{xy} = η καμπυλότητα από στρέψη του πολυστρωματικού

z = η απόσταση από το μέσο επίπεδο κατά τη διεύθυνση του πάχους [4]

5.3.3 Δυνάμεις και ροπές του πολυστρωματικού συνθέτου

Οι ασκούμενες δυνάμεις και ροπές σε μια πολυστρωματική δομή συσχετίζονται με τις παραμορφώσεις του μέσου επιπέδου και τις καμπυλότητες του με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned}N_{xx} &= A_{11} \varepsilon_{xx}^o + A_{12} \varepsilon_{yy}^o + A_{16} \gamma_{xy}^o + B_{11} k_{xx} + B_{12} k_{yy} + B_{16} k_{xy} \\ N_{yy} &= A_{12} \varepsilon_{xx}^o + A_{22} \varepsilon_{yy}^o + A_{26} \gamma_{xy}^o + B_{12} k_{xx} + B_{22} k_{yy} + B_{26} k_{xy} \\ N_{xy} &= A_{16} \varepsilon_{xx}^o + A_{26} \varepsilon_{yy}^o + A_{66} \gamma_{xy}^o + B_{16} k_{xx} + B_{26} k_{yy} + B_{66} k_{xy} \\ M_{xx} &= B_{11} \varepsilon_{xx}^o + B_{12} \varepsilon_{yy}^o + B_{16} \gamma_{xy}^o + D_{11} k_{xx} + D_{12} k_{yy} + D_{16} k_{xy} \\ M_{yy} &= B_{12} \varepsilon_{xx}^o + B_{22} \varepsilon_{yy}^o + B_{26} \gamma_{xy}^o + D_{12} k_{xx} + D_{22} k_{yy} + D_{26} k_{xy} \\ M_{xy} &= B_{16} \varepsilon_{xx}^o + B_{26} \varepsilon_{yy}^o + B_{66} \gamma_{xy}^o + D_{16} k_{xx} + D_{26} k_{yy} + D_{66} k_{xy}\end{aligned}$$



Εικόνα 42. Καμπτικά και στρεπτικά φορτία που εφαρμόζονται στο μέσο επίπεδο μιας πολυστρωματικής διάταξης.

Αντίστοιχα, σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

όπου

N_{xx} = ορθή δύναμη στη διεύθυνση x (ανά μονάδα πλάτους)

N_{yy} = ορθή δύναμη στη διεύθυνση y (ανά μονάδα πλάτους)

N_{xy} = διατμητική δύναμη (ανά μονάδα πλάτους)

M_{xx} = καμπτική ροπή στο επίπεδο yz (ανά μονάδα πλάτους)

M_{yy} = καμπτική ροπή στο επίπεδο xz (ανά μονάδα πλάτους)

M_{xy} = στρεπτική ροπή (ανά μονάδα πλάτους)

$[A]$ = μητρώο εκτατικής δυσκαμψίας (extensional stiffness) για τη πολυστρωματική διάταξη (μονάδες: N/m ή lb/in)

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix}$$

$[B]$ = μητρώο δυσκαμψίας σύζευξης (coupling stiffness) για τη πολυστρωματική διάταξη (μονάδες: N ή lb)

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix}$$

$[D]$ = μητρώο καμπτικής δυσκαμψίας (bending stiffness) για τη πολυστρωματική διάταξη (μονάδες: Nm ή lb in)

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix}$$

Παρατηρώντας την εξίσωση (2), προκύπτουν τα εξής:

1. Οι συντελεστές A_{16} και A_{26} συνδέουν τις ορθές δυνάμεις της στρώσης με την διατμητική παραμόρφωση του μέσου επιπέδου και τη διατμητική δύναμη της στρώσης με τις ορθές παραμορφώσεις του μέσου επιπέδου.
2. Οι συντελεστές B_{11} , B_{12} και B_{22} συνδέουν τις ορθές δυνάμεις της στρώσης με τις καμπτικές καμπυλότητες, και τις καμπτικές ροπές με τις ορθές παραμορφώσεις του μέσου επιπέδου.
3. Οι συντελεστές B_{16} και B_{26} συνδέουν τις ορθές δυνάμεις της στρώσης με τις στρεπτικές καμπυλότητες, και τη στρεπτική ροπή με τις ορθές παραμορφώσεις του μέσου επιπέδου.
4. Ο συντελεστής B_{66} συνδέει τη διατμητική δύναμη της στρώσης με τη στρεπτική καμπυλότητα, και τη στρεπτική ροπή με τη διατμητική παραμόρφωση του μέσου επιπέδου.
5. Οι συντελεστές D_{16} και D_{26} συνδέουν τις καμπτικές ροπές με τη στρεπτική καμπυλότητα, και τη στρεπτική ροπή με τις καμπτικές καμπυλότητες.

Αξίζει να αναφερθεί, πως οι συνδέσεις μεταξύ ορθών δυνάμεων και διατμητικών παραμορφώσεων, καμπτικών ροπών και στρεπτικών καμπυλοτήτων κλπ. Εμφανίζονται μόνο σε πολυστρωματικές και όχι σε ενιαίες δομές. Για παράδειγμα, εάν παρασκευαστεί ένα πολυστρωματικό σύνθετο, έτσι ώστε αμφότερα τα A_{16} και $A_{26} = 0$, τότε δεν θα υπάρχει καμία σύζευξη μεταξύ των ορθών δυνάμεων της στρώσης και των διατμητικών παραμορφώσεων του μέσου επιπέδου. Αυτό σημαίνει πως οι ορθές δυνάμεις της στρώσης δεν θα προκαλέσουν διατμητική παραμόρφωση του πολυστρωματικού συνθέτου. Ομοίως, αν το πολυστρωματικό σύνθετο παρασκευαστεί, έτσι ώστε αμφότερα τα D_{16} και $D_{26} = 0$, τότε δεν θα υπάρχει καμία σύζευξη μεταξύ καμπτικών ροπών και στρεπτικής καμπυλότητας. Αυτό σημαίνει πως οι καμπτικές ροπές δεν θα προκαλέσουν στρέψη στο πολυστρωματικό σύνθετο. [4]

5.3.4 Συντελεστές στα μητρώα δυσκαμψίας

Οι συντελεστές στα μητρώα [A], [B] και [D] υπολογίζονται από:

$$A_{mn} = \sum_{j=1}^N (\overline{Q}_{mn})_j (h_j - h_{j-1}) \quad (4)$$

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (\overline{Q}_{mn})_j (h_j^2 - h_{j-1}^2) \quad (5)$$

$$D_{mn} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N (\overline{Q}_{mn})_j (h_j^3 - h_{j-1}^3) \quad (6)$$

όπου

N = ο συνολικός αριθμός των στρώσεων στο πολυστρωματικό σύνθετο

$(\overline{Q}_{mn})_j$ = στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας $[\overline{Q}]$ της j -νιοστής στρώσης

h_{j-1} = απόσταση από το μέσο επίπεδο μέχρι το πάνω μέρος της j -νιοστής στρώσης

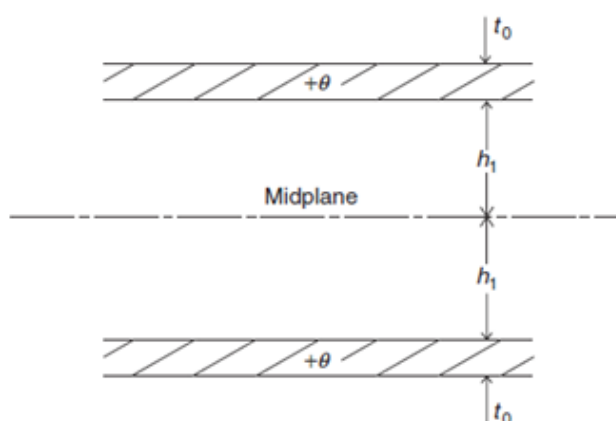
h_j = απόσταση από το μέσο επίπεδο μέχρι το κάτω μέρος της j -νιοστής στρώσης

Για το σύστημα συντεταγμένων όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα της γεωμετρίας της πολυστρωματικής διάταξης, το h_j είναι θετικό κάτω από το μέσο επίπεδο και αρνητικό πάνω από το μέσο επίπεδο.

Τα στοιχεία των μητρώων δυσκαμψίας [A], [B] και [D] είναι συναρτήσεις των ελαστικών ιδιοτήτων κάθε στρώσης και της θέσης της σε σχέση με το μέσο επίπεδο της πολυστρωματικής διάταξης. Από αυτά τα μητρώα δυσκαμψίας απορρέουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

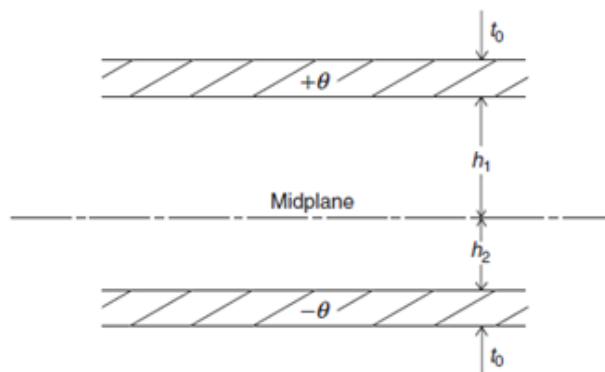
1. Αν [B] είναι ένα μη μηδενικό μητρώο, μια ορθή δύναμη, όπως η N_{xx} , θα προκαλέσει ορθές και διατμητικές παραμορφώσεις, καθώς και καμπυλότητες από κάμψη και στρέψη. Ομοίως, μια καμπτική ροπή, όπως η M_{xx} , θα προκαλέσει καμπυλότητες από κάμψη και στρέψη, καθώς και ορθές και διατμητικές παραμορφώσεις. Αυτή η σύζευξη «επιμήκυνσης – κάμψης», που αντιπροσωπεύεται από το μητρώο [B], εμφανίζεται μόνο στις πολυστρωματικές δομές, άσχετα από το γεγονός αν οι στρώσεις είναι ιστροπικές ή ορθοτροπικές. Αυτή η σύζευξη συμβαίνει λόγω της στοίβαξης των στρώσεων.

2. Σε ένα συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο είναι $[B] = 0$ και δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ επιμήκυνσης και κάμψης. Για την παρασκευή ενός συμμετρικού πολυστρωματικού σύνθετου κάθε στρώση με $+\theta$ γωνία προσανατολισμού πάνω από το μέσο επίπεδο έχει απέναντι της μια ταυτόσημη στρώση (σε πάχος και υλικό) με γωνία προσανατολισμού $+\theta$ στην ίδια απόσταση κάτω από το μέσο επίπεδο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αξίζει να αναφερθεί πως ένα συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο αντίθετων γωνιών (angle-ply) ή διασταυρούμενων γωνιών (cross-ply) διαθέτει περιττό αριθμό στρώσεων.



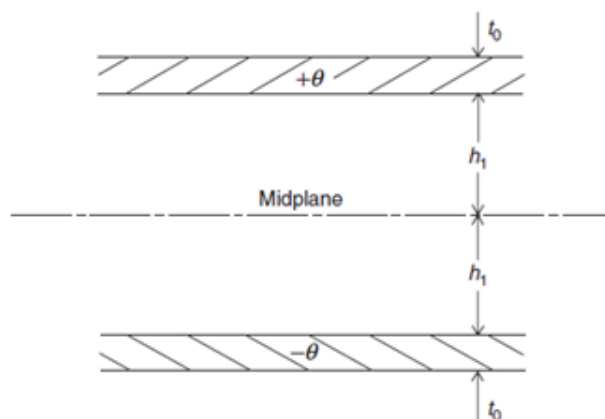
Εικόνα 43. Συμμετρική πολυστρωματική διάταξη για την οποία $[B] = [0]$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη επιμήκυνσης - καμπτικών φορτίων. [4]

3. Αν για κάθε στρώση με γωνία προσανατολισμού $+\theta$ υπάρχει μια ταυτόσημη (ίδια σε πάχος και υλικό) στρώση με $-\theta$ γωνία προσανατολισμού (όπως στην παρακάτω εικόνα), τότε η σύζευξη ορθής τάσης και διατμητικής παραμόρφωση (που αντιπροσωπεύονται από τα A_{16} και A_{26} στο μητρώο $[A]$) είναι μηδενική. Οι θέσεις αυτών των δύο στρώσεων είναι αυθαίρετες. Μια τέτοια πολυστρωματική διάταξη λέγεται ισορροπημένη (balanced). Για παράδειγμα η διάταξη $[0/+30/-30/+30/-30/0]$ αποτελεί ένα ισορροπημένο πολυστρωματικό, στο οποίο $A_{16} = A_{26} = 0$. Αξίζει να σημειωθεί, πως με κατάλληλη τοποθέτηση των στρώσεων, είναι δυνατό να παρασκευαστεί ένα ισορροπημένο συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο. Για παράδειγμα, η διάταξη $[0/+30/-30/-30/+30/0]$ είναι ένα ισορροπημένο συμμετρικό σύνθετο για το οποίο ισχύει $A_{16} = A_{26} = 0$, καθώς επίσης και $[B] = [0]$.



Εικόνα 44. Ισορροπημένη πολυστρωματική διάταξη για την οποία $A_{16} = A_{26} = 0$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη επιμήκυνσης - διάτμησης.

4. Αν για κάθε στρώση με διεύθυνση $+\theta$ πάνω από το μέσο επίπεδο, υπάρχει άλλη μια πανομοιότυπη στρώση (σε πάχος και υλικό) με διεύθυνση $-\theta$ στην ίδια απόσταση κάτω από το μέσο επίπεδο, όπως στην παρακάτω εικόνα, η σύνδεση καμπτικής ροπής και καμπυλότητας από στρέψη (που αντιπροσωπεύεται από τα D_{16} και D_{26} στο μητρώο $[D]$) για το σύνθετο είναι μηδέν. Για παράδειγμα, σε ένα πολυστρωματικό $[0/+30/-30/+30/-30/0]$ ισχύει $D_{16} = D_{26} = 0$. Αξίζει να σημειωθεί, πως τα D_{16} και D_{26} δεν μπορούν να ισούνται με μηδέν σε ένα συμμετρικό πολυστρωματικό σύνθετο, εκτός και αν $\theta = 0^\circ$ και 90° . [4]



Εικόνα 45. Πολυστρωματική διάταξη για την οποία $D_{16} = D_{26} = 0$ και συνεπώς δεν παρουσιάζεται σύζευξη καμπτικών - στρεπτικών φορτίων. [4]

5.3.5 Παραμόρφωση και καμπυλότητα του μέσου επιπέδου

Αν είναι γνωστές η ορθή δύναμη και ροπή που ασκούνται σε ένα πολυστρωματικό, οι παραμορφώσεις και οι καμπυλότητες υπολογίζονται μετασχηματίζοντας τις εξισώσεις (2) και (3) ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} = [A_I] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} + [B_I] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} = [C_I] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} + [D_I] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Όπου

$$\begin{aligned} [A_I] &= [A^{-1}] + [A^{-1}][B][(D^*)^{-1}][B][A^{-1}] \\ [B_I] &= -[A^{-1}][B][(D^*)^{-1}] \\ [C_I] &= -[(D^*)^{-1}][B][A^{-1}] = [B_I]^T \\ [D^*] &= [D] - [B][A^{-1}][B] \\ [D_I] &= [(D^*)^{-1}] \end{aligned} \quad (9)$$

Αξίζει να σημειωθεί, πως σε ένα συμμετρικό πολυστρωματικό, ισχύει $[B] = [0]$ και για αυτό $[A_I] = [A^{-1}]$, $[B_I] = [C_I] = [0]$ και $[D_I] = [D^{-1}]$. Σε αυτήν την περίπτωση, οι εξισώσεις για τις παραμορφώσεις και τις καμπυλότητες του μέσου επιπέδου διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} = [D^{-1}] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Από την εξίσωση (10) φαίνεται πως σε ένα συμμετρικό πολυστρωματικό, οι δυνάμεις επί των στρώσεων προκαλούν μόνο παραμορφώσεις επί των στρώσεων και καθόλου καμπυλότητες. Αντίστοιχα, από την εξίσωση (11) φαίνεται πως οι καμπτικές και στρεπτικές ροπές προκαλούν μόνο καμπυλότητες και καθόλου παραμορφώσεις στις στρώσεις. [4]

5.3.6 Παραμορφώσεις και τάσεις της στρώσης λόγω φορτίου

Γνωρίζοντας τις παραμορφώσεις και τις καμπυλότητες του μέσου επιπέδου ενός πολυστρωματικού, υπολογίζονται οι παραμορφώσεις στο μέσο επίπεδο κάθε στρώσης μέσω των παρακάτω γραμμικών σχέσεων:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_j = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + z_j \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (12)$$

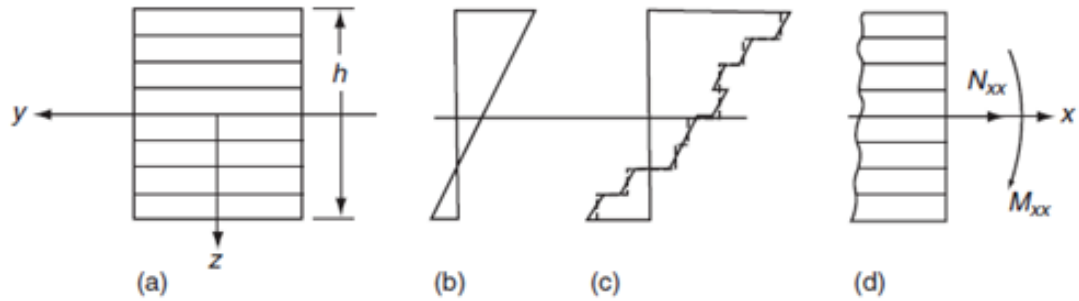
όπου z_j η απόσταση από το μέσο επίπεδο του πολυστρωματικού μέχρι το μέσο επίπεδο της j -νιοστής στρώσης.

Οι τάσεις της j -νιοστής στρώσης υπολογίζονται από το μητρώο δυσκαμψίας της, ως ακολούθως:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_j = [\overline{Q}_{mn}]_j \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}_j = [\overline{Q}_{mn}]_j \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^o \\ \varepsilon_{yy}^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + z_j [\overline{Q}_{mn}]_j \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων σε μια πολυστρωματική δομή. Αξίζει να σημειωθεί, πως η κατανομή των παραμορφώσεων είναι συνεχής και διαμορφώνεται γραμμικά σε σχέση με την απόσταση z από το μέσο επίπεδο της πολυστρωματικής διάταξης. Η κατανομή των τάσεων δεν είναι συνεχής, παρότι και αυτή διαμορφώνεται με γραμμικό τρόπο κατά το πάχος κάθε μιας στρώσης. Για λεπτές πολυστρωματικές δομές, η διαφοροποίηση της παραμόρφωσης και της τάσης κατά το πάχος κάθε στρώσης είναι μικρή. Για αυτό,

υπολογίζονται οι μέσες τιμές τους χρησιμοποιώντας την απόσταση του κέντρου της στρώσης z_j , όπως φαίνεται στις εξισώσεις (12) και (13). [4]



Εικόνα 46. Κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων σε μια πολυστρωματική διάταξη. Πολυστρωματικό σύνθετο υλικό (a), κατανομή παραμορφώσεων (b), κατανομή τάσεων (c) και οι προκύπτουσες ορθές δυνάμεις και καμπτικές ροπές (d). [4]

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6. Κεφάλαιο: Πειραματική διαδικασία

6.1 Πρότυπο εφελκυσμού ASTM D3039/D3039M

- **Αντικείμενο**

Το συγκεκριμένο πρότυπο μετρήσεων καθορίζει τις ιδιότητες εφελκυσμού πάνω στο επίπεδο συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ενίσχυση ινών υψηλής αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο αφορά πολυστρωματικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση συνεχών ή ασυνεχών ινών, των οποίων η πολυστρωματική διάταξη είναι ισορροπημένη και συμμετρική ως προς τη διεύθυνση της εκτέλεσης της δοκιμής.

- **Σύνοψη της μεθόδου δοκιμής**

Μια λεπτή λωρίδα σταθερής ορθογωνικής διατομής τοποθετείται στις βάσεις συγκράτησης μιας μηχανής μετρήσεων και το δοκίμιο καταπονείται σε εφελκυσμό ενώ καταγράφονται συνεχώς το φορτίο και η επιμήκυνση. Η απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό (ultimate tensile strength – UTS) καθορίζεται από το μέγιστο φορτίο προτού επακολουθήσει θραύση του δοκιμίου. Εφόσον, η μηχανή μετρήσεων διαθέτει κατάλληλο μετατροπέα, εξάγεται και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, από την οποία υπολογίζονται η μέγιστη παραμόρφωση εφελκυσμού, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson και η ελαστική παραμόρφωση.

- **Δοκίμια και προφίλ μετρήσεων**

Το πρότυπο ορίζει να μετρηθούν οι επιδόσεις τουλάχιστον πέντε δοκιμίων, εκτός κι αν μπορούν να αποκτηθούν αξιόπιστα αποτελέσματα με λιγότερα δοκίμια. Όσον αφορά τη γεωμετρία των προς έλεγχο δοκιμίων, αυτά πρέπει να έχουν σταθερή ορθογωνική διατομή, το ελάχιστο μήκος πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις σταθερής συγκράτησης του δοκιμίου επαυξημένο με το διπλάσιο του πλάτους του δοκιμίου. Το πλάτος επιλέγεται κατά βούληση ώστε να επιτρέπει αξιόπιστες μετρήσεις. Η ανοχή του πλάτους του δοκιμίου καθορίζεται στο $\pm 1\%$ του πλάτους, ενώ η ανοχή του πάχους του δοκιμίου έχει ανοχή $\pm 4\%$ της τιμής του πάχους. Επιπλέον φύλλα στις περιοχές συγκράτησης (tabs) τοποθετούνται μόνο εφόσον η αρχική συγκράτηση των

βάσεων δεν αποδειχθεί επαρκής. Εκτός κι αν ορίζεται διαφορετικά από το σχεδιασμό του πειράματος, τα δοκίμια, σύμφωνα με τη μέθοδο δοκιμών D5229/D5229M, φυλάσσονται και στη συνέχεια καταπονούνται σε σταθερές εργαστηριακές συνθήκες με θερμοκρασία περιβάλλοντος $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία αέρα $50\pm 10\%$. Προτού τοποθετηθεί το δοκίμιο στην πρέσα μετρήσεων, μετράται η διατομή του σε τρία σημεία (Διατομή = πλάτος x πάχος) και τα στοιχεία εισάγονται στο λογισμικό της πρέσας μετρήσεων για να μπορούν να αναχθούν τα φορτία και οι επιμηκύνσεις σε τάσεις και παραμορφώσεις. Τέλος, το δοκίμιο καταπονείται με εφελκυσμό υπό σταθερή ταχύτητα της κινητής κεφαλής της πρέσας, η οποία ορίζεται βάσει του προτύπου στα $2\text{mm}/\text{min}$. Οι ακριβείς διαστάσεις των τελικών δοκιμίων όπως ορίζονται από το πρότυπο παρουσιάζονται παρακάτω. [28]

6.2 Πρότυπο κάμψης τριών σημείων ASTM D790-03

- **Αντικείμενο**

Μέσω του συγκεκριμένου προτύπου καθορίζονται οι καμπτικές ιδιότητες ενισχυμένων πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των συνθέτων υλικών υψηλής αντοχής.

- **Σύνοψη της μεθόδου δοκιμής**

Το δοκίμιο σε μορφή μπάρας ορθογωνικής διατομής τοποθετείται πάνω σε δύο κυλινδρικές στηρίξεις και φορτίζεται σε κάμψη ακριβώς στο κέντρο του. Το δοκίμιο παραμορφώνεται έως ότου επέλθει η θραύση του στην εξωτερική του επιφάνεια είτε έως ότου η μέγιστη παραμόρφωση φτάσει το 5%. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μια μετρητική μηχανή, η οποία έχει τη δυνατότητα κίνησης της σταθερής κεφαλής με σταθερή ταχύτητα.

- **Δοκίμια και προφίλ μετρήσεων**

Οι στηρίξεις και η ράβδος άσκησης φορτίου καθορίζονται από το πρότυπο ως κυλινδρικής μορφής και προκειμένου να αποφευχθούν διείσδυση και συγκέντρωση τάσεων στο σημείο επαφής με τη ράβδο άσκησης φορτίου, οι ακτίνες καμπυλότητας των στηρίξεων και της ράβδου άσκησης φορτίου πρέπει να ισούνται με $5.0\pm 0.1\text{mm}$,

εκτός κι αν έχει σχεδιαστεί διαφορετικά το πείραμα. Μετράται πάλι η επιφάνεια της ορθογωνικής διατομής του δοκιμίου. Ο αριθμός των ελάχιστων απαραίτητων δοκιμών ανέρχεται πάλι σε πέντε, ενώ αυτά φυλάσσονται σε εργαστηριακές συνθήκες (όπως έχουν περιγραφεί παραπάνω), στις οποίες εκτελείται επιπλέον και το πείραμα. Η ταχύτητα της κινητής κεφαλής, όπου εδράζεται η ράβδος άσκησης φορτίου, καθορίζεται στα 2 mm/min. [29]

6.3 Πρέσα μετρήσεων Instron 4482

Για τον καθορισμό της επίδρασης των νανοσωματιδίων στην αντοχή του σύνθετου υλικού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αντοχής σε εφελκυσμό και κάμψη στη μηχανή μετρήσεων INSTRON 4482, η οποία πληροί τις προδιαγραφές μετρητικής διάταξης των παραπάνω προτύπων. Όλες οι δοκιμές φωτογραφήθηκαν και κατεγράφησαν σε κάμερα.



Parameter	Specification
Return speed	600 mm/min
Position control resolution	0.006 μm
Crosshead speed accuracy	± 0.10 mm or 0.15% of displacement
Load measurement	$\pm 0.5\%$ of reading down to 1/50 of load cell capacity
Strain measurement accuracy	$\pm 0.5\%$ of reading down to 1/50 of full range

Parameter	Specification
Load capacity	100 kN
Maximum speed	500 mm/min
Minimum speed	0.001 mm/min
Maximum force at full speed	75 kN
Maximum speed at full force	250 mm/min
Position measurement accuracy	± 0.10 mm or 0.15%

Εικόνα 47. Μηχανή μετρήσεων INSTRON 4482 και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της [30].

7. Κεφάλαιο: Παρασκευή πολυστρωματικών δοκιμίων

7.1 Υλικά και εξοπλισμός

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής μελέτης παρασκευάστηκαν ινώδη πολυστρωματικά σύνθετα υλικά, ενισχυμένα με νανοδομές γραφενίου. Ως μήτρα χρησιμοποιήθηκε εποξικό σύστημα ρητίνης. Τα σύνθετα υλικά αυτής της κατηγορίας ονομάζονται glass fiber reinforced plastics (GFRPs).



Εικόνα 48. Απόψεις από την εκτύλιξη του ρολού του υαλοϋφάσματος ενίσχυσης και από την παρασκευή των σύνθετων υλικών.

7.1.1 Μέτρα ασφαλείας

Κατά τη διαδικασία παρασκευής και προετοιμασίας των δοκιμίων τηρήθηκαν αυστηρά τα ακόλουθα μέτρα ασφαλείας:

- Όλες οι εργασίες έγιναν αποκλειστικά πάνω σε ειδικά προετοιμασμένους ξύλινους πάγκους εργασίας.

- Ο εξαερισμός του εργαστηρίου παρέμενε αναμμένος καθ' όλη τη διάρκεια της προετοιμασίας της ρητίνης, του γραφενίου και του εμποτισμού του σύνθετου υλικού.
- Η στολή εργασίας για χειρισμό της υγρής ρητίνης και του γραφενίου αποτελείται από μάσκα μισού προσώπου για προστασία αναπνοής με φίλτρα ABEK(2) και P(3), προστατευτικά γυαλιά, γάντια και χιτώνιο εργασίας.

Όσον αφορά τα φίλτρα της μάσκας μισού προσώπου, επιλέχθηκαν κατάλληλοι τύποι ώστε να παρέχουν προστασία από τα αέρια του εποξικού συστήματος και από τα νανοσωματίδια του γραφενίου. Ο κωδικός ABEK(2) αναφέρεται στην προστασία από οργανικά αέρια και ατμούς (A), ανόργανα αέρια και ατμούς (B), διοξείδιο του θείου (E), αμμωνία και οργανικά παράγωγα αμμωνίας (K), με την ένδειξη (2) να υποδηλώνει μεσαία ικανότητα απορρόφησης τοξικών ουσιών, με συγκέντρωση 0.5% κατ' όγκο (5000 ppm) στον αέρα (τιμή σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN14387). Το «P» αναφέρεται στην ικανότητα απορρόφησης στερεών μικροσωματιδίων και η ένδειξη (3) αντιστοιχεί σε ικανότητα απορρόφησης σωματιδίων με συγκέντρωση 1,0% κατ' όγκο (10000 ppm) στον αέρα. [32]



Εικόνα 49. Εξοπλισμός ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των συνθέτων υλικών: μάσκα μισού προσώπου για προστασία αναπνοής με φίλτρα ABEK(2) και P(3) (πάνω) και προστατευτικά γυαλιά (κάτω) (a), προστατευτικά γάντια (b) και χιτώνιο εργασίας (c).

7.1.2 Τύποι υαλοϋφάσματος

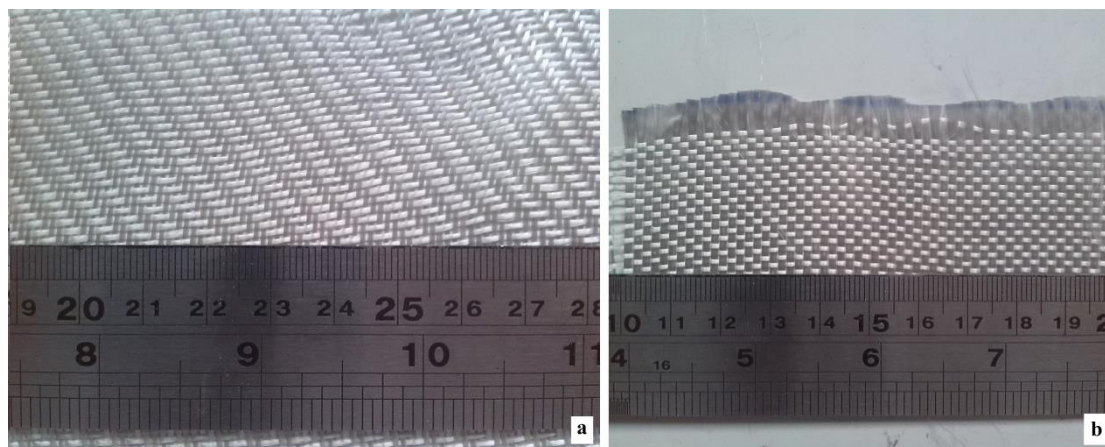
Το ύφασμα που χρησιμοποιήθηκε ως βάση της παρούσας πειραματικής μελέτης για την επίδραση των νανοπροσθηκών στην αντοχή του σύνθετου υλικού εποξικής μήτρας είναι το υαλοϋφασμα. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο ύφασμα λόγω του χαμηλού κόστους του και της ευρείας χρήσης του σε διάφορες εφαρμογές. Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πλέξης του υφάσματος:

✓ **Μονοδιευθυντική πλέξη (unidirectional)**

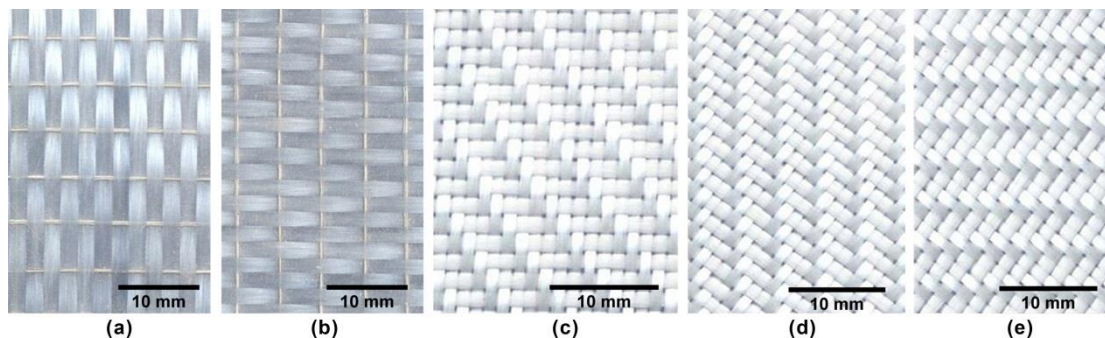
Τυπικά χαρακτηριστικά: Υψηλή αντοχή κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών (στημόνια) και υψηλός λόγος αξονικής αντοχής ανά βάρος.

✓ **Πλέξη τύπου Twill 2x2**

Τυπικά χαρακτηριστικά: Συγκριτικά πιο αραιή και χαλαρή πλέξη, στημόνια και υφάδια ιδίων διαστάσεων και με χαρακτηριστική μορφολογία «ψαροκόκαλου» στην όψη της.



Εικόνα 50. Απόψεις υαλοϋφασμάτων Twill 2x2 (a) και Unidirectional (b) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων.



Εικόνα 51. Ακριβείς διαστάσεις πλέξης μονοδιευθυντικής ενίσχυσης (a και b) και Twill 2x2 (c, d και e) που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων.

Για τον καλύτερο προσδιορισμό των δύο αυτών υαλοϋφασμάτων υπολογίστηκε το βάρος υφάσματος και η γραμμική πυκνότητα των ινών, σύμφωνα με τους σχετικούς τύπους των προτύπων ASTM D 3776 – 96 και ASTM D 1577 – 01:

- **Βάρος υφάσματος κατά ASTM D 3776 – 96 (Reapproved 2002):**

‘Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric’

Το συγκεκριμένο πρότυπο καλύπτει την μέτρηση της μάζας υφασμάτων ανά μονάδα επιφανείας (βάρος) μέσω τεσσάρων διαφορετικών μεθοδολογιών που αφορούν διαφορετικούς τύπους δοκιμίων μέτρησης. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η επιλογή «B», η οποία είναι κατάλληλη για τη μέτρηση πυκνότητας δειγμάτων (πλήρους πλάτους υφάσματος) πλεκτών υφασμάτων. Η μάζα του υφάσματος υπολογίζεται από ένα δοκίμιο με ακριβείς διαστάσεις μήκους και πλάτους, μεγέθη τα οποία έπειτα αντικαθίστανται στον παρακάτω τύπο δίνοντας το αποτέλεσμα. Όλες οι μετρήσεις βάρους πραγματοποιούνται σε πρότυπες συνθήκες για έλεγχο και δοκιμές υφασμάτων ($21 \pm 1^\circ\text{C}$ και $50 \pm 5\%$ Relative Humidity). Από το ρολό του υφάσματος αποκόπτεται τμήμα τουλάχιστον 250 mm, που καλύπτει όλο το πλάτος του υφάσματος. Οι ακμές κοπής πρέπει να είναι ευθείες, χωρίς κόμπους ή κενά. [33]

$$\frac{g}{m^2} = 10^6 G / (L_s W)$$

Όπου G: βάρος του δοκιμίου (g), L_s : μήκος του δοκιμίου (mm), και W: το πλάτος του δοκιμίου (mm).

- **Μέση γραμμική πυκνότητα ίνας κατά ASTM D 1577 – 01:**

‘Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers’

Αυτές οι μέθοδοι καλύπτουν τη μέτρηση της μάζας ανά μονάδα μήκους ινιδίων και ινών υφασμάτων. Το πρότυπο περιλαμβάνει μεθόδους άμεσης ζύγισης, καθώς και έμμεσου υπολογισμού (μέσω vibroscope) του ζητούμενου μεγέθους με κατάλληλες τροποποιήσεις των μεθόδων για ίνες με ή χωρίς πτυχώσεις. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος «A» που αφορά τον υπολογισμό της μέσης γραμμικής πυκνότητας ινιδίων μέσω κοψίματος δοκιμίου και άμεσης ζύγισής του. Η μέση γραμμική πυκνότητα, σε μονάδες μέτρησης tex ή denier, μεμονωμένων ινιδίων μέσα μια ίνα υπολογίζεται από τη μέτρηση μάζας και μήκους μιας ίνας και τον αριθμό των ινιδίων που αυτό περιέχει. Τα παραπάνω μεγέθη αντικαθίστανται στον παρακάτω τύπο, αποδίδοντας το ζητούμενο αποτέλεσμα, στρογγυλεύοντας στο πλησιέστερο 0.1 dtex ή 0.01 denier. Οι ίνες των υφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δεν εμφάνισαν πτυχώσεις μετά την απόπλεξη τους από το

ύφασμα, οπότε δε χρειάστηκαν ειδικά μέτρα προέντασης των ινών για τη ζύγισή τους. [34]

$$T_d = 10000 W / (L N)$$

$$D = 9000 W / (L N)$$

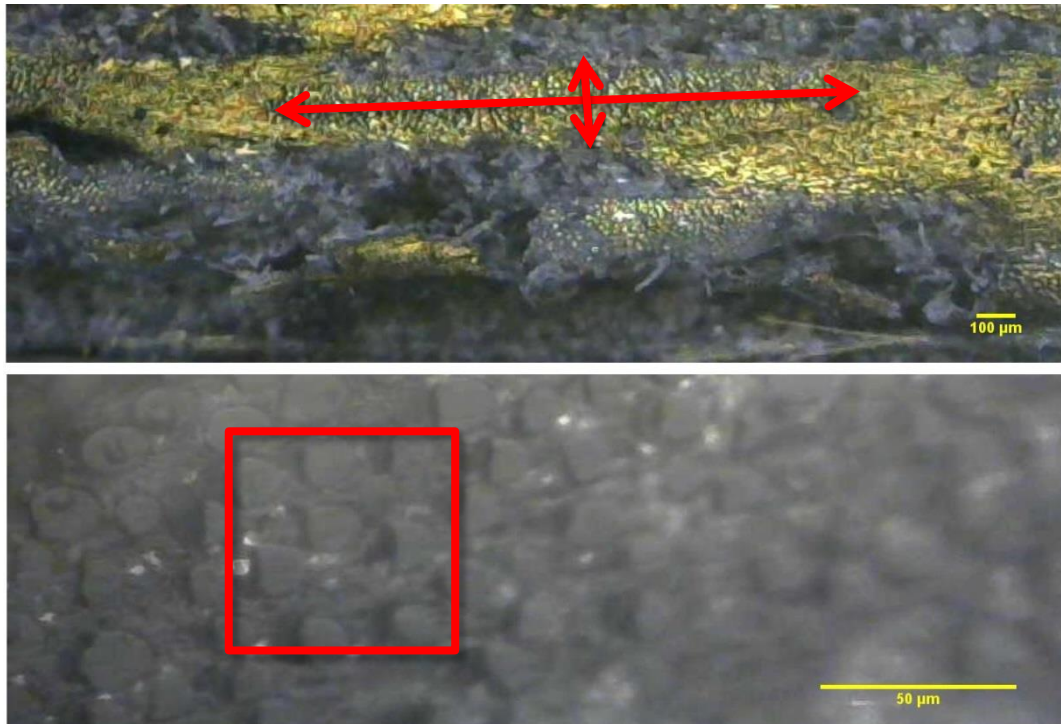
Όπου T: η μέση γραμμική πυκνότητα ίνας (dtex), D: η μέση γραμμική πυκνότητα ίνας (denier), W: το βάρος του νήματος (mg), L: το μήκος του νήματος (mm) και N: ο αριθμός ινών μέσα στο νήμα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως η καταμέτρηση των ινιδίων μέσα στην ίνα του υφάσματος Twill 2x2 έγινε με καταμέτρηση των ινιδίων (9 στον αριθμό) σε επιφάνεια ακριβών διαστάσεων (50 μm x 50 μm) από εικόνα μεγέθυνσης x50 που λήφθηκε από οπτικό μικροσκόπιο και με αναγωγή του εμβαδού σε όλη την επιφάνεια του νήματος, το οποίο προσεγγίστηκε ως εμβαδό έλλειψης με ακτίνες 786 μm και 129 μm και μελετήθηκε από εικόνα μεγέθυνσης x5. Αντίστοιχες ενέργειες πραγματοποιήθηκαν και στην περίπτωση υαλοϋφάσματος με unidirectional πλέξη, όπου η επιφάνεια διατομής ίνας προσεγγίστηκε από έλλειψη ακτίνων 890 μm και 180 μm, ενώ η περιοχή (50 μm x 50 μm) καταμέτρησης ινιδίων (16 στον αριθμό) λήφθηκε πάλι από εικόνα οπτικού μικροσκοπίου μεγέθυνσης x50. Επίσης, η ζύγιση ινών από Twill 2x2 μήκους 100 mm σύγκλιε στα 0,021 g, ενώ οι unidirectional ίνες, μήκους 55 mm συνέκλιαν στα 0,040 g.

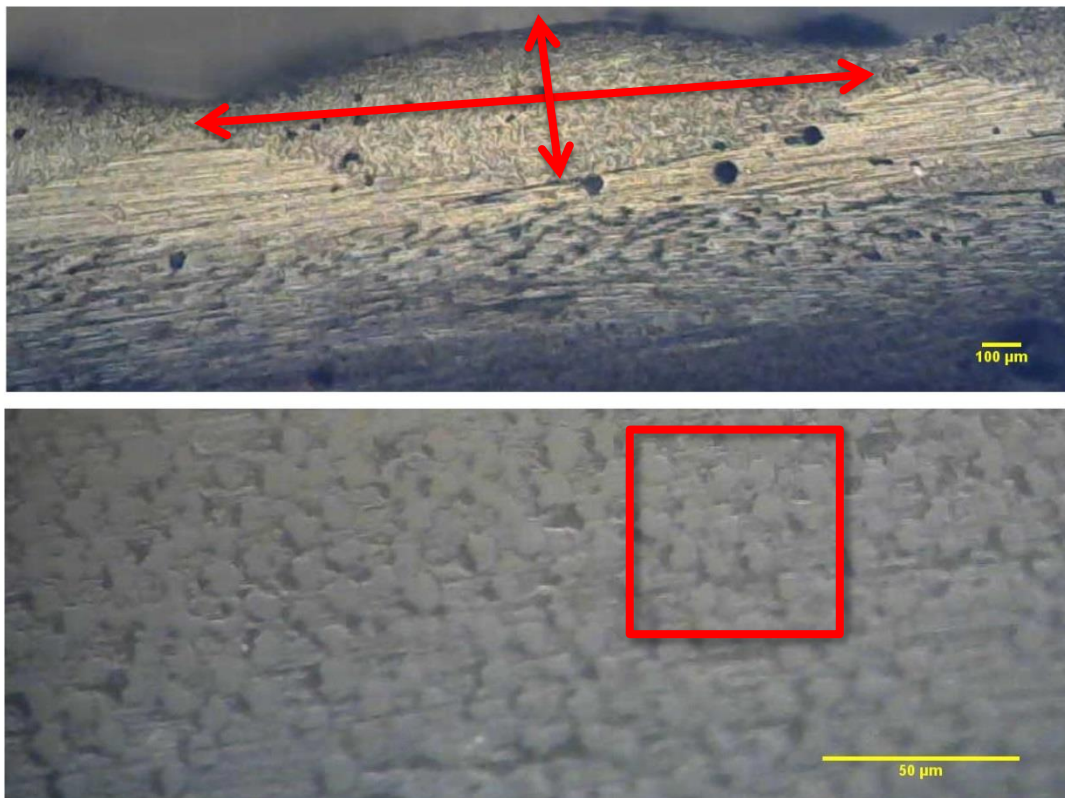
Παρακάτω παρουσιάζονται τα υπολογισθέντα μεγέθη των υφασμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις και τα παραπάνω πρότυπα (με στρογγυλοποίηση στον πιο κοντινό εμπορικά χρησιμοποιούμενο τύπο), καθώς και οι εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκαν για την καταμέτρηση των ινιδίων ανά ίνα (fibrils/fiber).

	Twill 2x2 weave	Unidirectional weave
Βάρος υφάσματος:	300 g/m²	600 g/m²
Μέση γραμμική πυκνότητα ινιδίου:	1.9 dtex – 1.66 denier	2.3 dtex – 2.03 denier
Αριθμός ινιδίων ανά ίνα:	1141 fibrils/fiber (1K)	3230 fibrils/fiber (3K)
Πάχος υφάσματος:	200 μm	250 μm
Μέση διάμετρος ινιδίων:	12 μm	9 μm

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά μεγέθη των υαλοϋφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών.



Εικόνα 52. Μικροσκοπικές απεικονίσεις διατομής δοκιμίου με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs: μεγέθυνση x5 για τον υπολογισμό εμβαδού διατομής νήματος (πάνω) και x50 για την καταμέτρηση ινιδίων σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 50 μm εντός του νήματος (κάτω).



Εικόνα 53. Μικροσκοπικές απεικονίσεις διατομής δοκιμίου με ενίσχυση unidirectional [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs: μεγέθυνση x5 για τον υπολογισμό εμβαδού διατομής νήματος (πάνω) και x50 για την καταμέτρηση ινιδίων σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 50 μm εντός του νήματος (κάτω).

7.1.3 Σύστημα ρητίνης

Για την παρασκευή των πολυστρωματικών συνθέτων υλικών, τόσο των σειρών που ενισχυθήκαν με νανοπροσθήκες γραφενίου όσο και των σειρών αναφοράς χωρίς ενίσχυση νανοπροσθηκών, χρησιμοποιήθηκε η θερμοσκληρυνόμενη εποξική ρητίνη δύο συστατικών EPOXY SYSTEM ES 35A/B, με σχέση ανάμειξης των δύο συστατικών 2 μέρη ρητίνης / 1 μέρος σκληρυντή (κατά βάρος). Η ανάμειξη είναι απαραίτητη διαδικασία για τον πολυμερισμό (σκλήρυνση) της εποξικής ρητίνης. Μετά την ανάμειξη, η εφαρμογή της ρητίνης στο ύφασμα πρέπει να γίνει εντός 30 λεπτών. Η χρήση του συγκεκριμένου συστήματος ενδείκνυται για τον εμποτισμό υφασμάτων από carbon, kevlar και υαλοϋφασμάτων.



Τεχνικά χαρακτηριστικά	Στοιχεία
Σχέση ανάμειξης των δύο συστατικών	2 μέρη ρητίνης / 1 μέρος σκληρυντή (κ.β.)
Ιξώδες (ρευστότητα) (25oC)	1000+/-200
Χρόνος χρήσης ετοιμού μείγματος (20oC)	30 λεπτά
Πλήρης σκλήρυνση	24 ώρες
Θερμική αντοχή	51oC

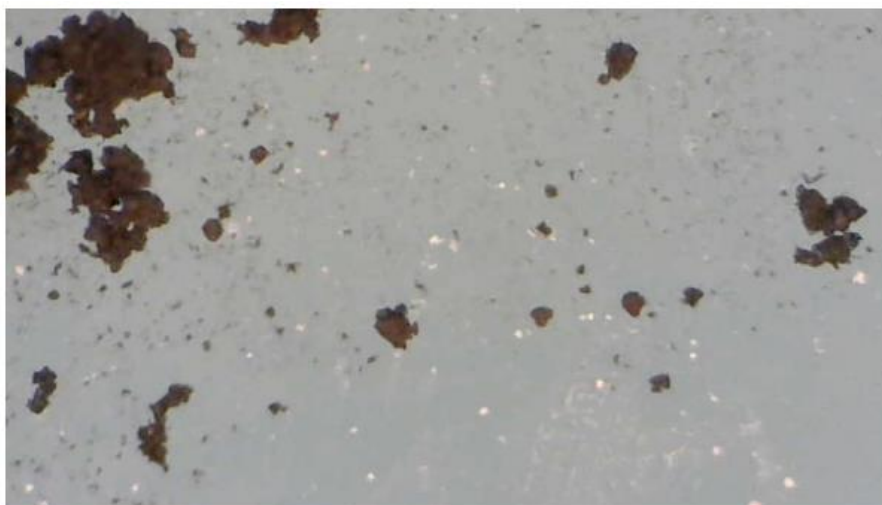
Εικόνα 54. Εποξική ρητίνη δύο συστατικών που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή των δοκιμίων. [31]

7.1.4 Γραφενικές νανοπροσθήκες (GNPs)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι πολυστρωματικές γραφενικές νανοπροσθήκες Alfa Aesar™ Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micronparticles, S.A. 500m²/g.



Εικόνα 55 Οι γραφενικές νανοπροσθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμών.



Εικόνα 56. Μικροσκοπική απεικόνιση γραφενίου (μεγέθυνση x5). [14]

7.2 Μέθοδος παρασκευής

Τα δοκίμια για τη διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού και κάμψης τριών σημείων παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακό ειδικά διαμορφωμένο χώρο με τη μέθοδο της χειροκίνητης στρώσης (Hand Lay-Up). Όλες οι απαραίτητες εργασίες έγιναν πάνω σε καθαρές ξύλινες επιφάνειες, οι οποίες ξύστηκαν πρότινος με σπάτουλα, καθαρίστηκαν με ασετόν και τέλος εφαρμόστηκε πάνω τους μια λεπτή στρώση από κερί για την εύκολη απομάκρυνση των δοκιμίων μετά τον εμποτισμό τους και την ξήρασή τους. Συνολικά παρασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμίων:

- Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμα (unidirectional) με προσανατολισμό στρώσεων [0/90/0/90] και με περιεκτικότητες γραφενικών νανοπροσθηκών 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% και 30% (GNPs w.t.).
- Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα πλέξης Twill 2x2 με προσανατολισμό στρώσεων [45/0/0/-45] και με περιεκτικότητες γραφενικών νανοπροσθηκών 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%, 15% και 20% (GNPs w.t.).
- Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα πλέξης Twill 2x2 με προσανατολισμό στρώσεων [45/-45/45/-45] και με περιεκτικότητες γραφενικών νανοπροσθηκών 0%, 1%, 2% και 3% (GNPs w.t.).



Εικόνα 57. Ειδικό κερί για καλούπια (α) που χρησιμοποιήθηκε για την επικάλυψη των πάγκων εργασίας και ηλεκτρονική ζυγαριά (β) για την προετοιμασία του μίγματος ρητίνης.



Εικόνα 58. Απεικόνιση σύνθετων υλικών έπειτα από σκλήρυνση σε συνθήκες δωματίου για επτά ημέρες.



Εικόνα 59. Κόφτης ελασμάτων (a) για την κοπή των σύνθετων υλικών στις επιθυμητές διαστάσεις δοκιμίων και τριβείο (b) για την λείανση των επιφανειών των (προς παρατήρηση σε μικροσκόπιο) δοκιμίων.

7.2.1 Δομή πολυστρωματικού συνθέτου και γεωμετρία

- Προσανατολισμός στρώσεων

Βάσει των οδηγιών των κατασκευαστών των υφασμάτων ενίσχυσης, καθορίστηκε ο προσανατολισμός των στρώσεων των πολυστρωματικών δοκιμίων. Στην περίπτωση δοκιμίων με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος οι στρώσεις τοποθετήθηκαν από κάτω προς τα πάνω με προσανατολισμό στρώσεων $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]$. Στην περίπτωση ενίσχυσης με υαλοϋφασμα Twill 2x2 οι στρώσεις από κάτω προς τα πάνω τοποθετήθηκαν με προσανατολισμό $[45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ]$. Επιπλέον, παρασκευάστηκε και μια μικρή σειρά δοκιμίων με ενίσχυση υαλοϋφάσματος Twill 2x2 με προσανατολισμό $[45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ]$, η οποία αναμένονταν να έχει χαμηλές επιδόσεις λόγω της διάταξης των στρώσεων.

- Γεωμετρία

Οι διαστάσεις των τελικών δοκιμίων προκύπτουν από τις απαιτήσεις των προτύπων που ακολουθήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Επισημαίνεται, πως από αμφότερα τα πρότυπα προκύπτουν διαφορετικές διαστάσεις για τα πολυστρωματικά δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος και διαφορετικές για εκείνα με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2.

- ✓ Για τα πειράματα εφελκυσμού κατά ASTM D3039/D3039M παρασκευάστηκαν τελικά δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος με μήκος 126 mm, πλάτος 13 mm και πάχος 1.6 mm. Αντίστοιχα, οι διαστάσεις για τα τελικά δοκίμια με ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 διαμορφώθηκαν ως εξής: μήκος 100-102mm, πλάτος 5-6mm και πάχος 1.1mm. Και στις δύο περιπτώσεις οι περιοχές συγκράτησης ορίστηκαν στα 25 mm από κάθε πλευρά του δοκιμίου. [28]
- ✓ Για πειράματα κάμψης τριών σημείων κατά ASTM D790-03 παρασκευάστηκαν τελικά δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος (UD) με μήκος 130 mm, πλάτος 12.7 mm και διάστημα στήριξης του δοκιμίου στα 108 mm συμμετρικά του κάθετου άξονα συμμετρίας του δοκιμίου. Αντίστοιχα, οι

διαστάσεις για τα τελικά δοκίμια με ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 διαμορφώθηκαν ως εξής: μήκος 93.6 mm, πλάτος 12.7 mm και διάστημα στήριξης του δοκιμίου στα 78 mm. [29]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί, πως προκειμένου να παρασκευαστούν ποιοτικά δοκίμια επαρκών διαστάσεων που θα δώσουν επαναλήψιμα αποτελέσματα, κόπηκαν αρχικά από τα ρολά των υφασμάτων ενίσχυσης μεγαλύτερες επιφάνειες, εμβαδού 450 mm x 250 mm (στις καθορισμένες διευθύνσεις ινών για τις επιθυμητές πολυστρωματικές διατάξεις). Αυτές διαμορφώθηκαν έτσι ώστε από κάθε πολυστρωματικό σύνθετο να μπορούν να αποκοπούν τουλάχιστον πέντε τελικά δοκίμια και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται ένα επαρκές περιθώριο γύρω τους, καθώς οι ακμές των υφασμάτων υπόκεινται σε τοπικές φθορές κατά το κόψιμό τους.

7.2.2 Διαδικασία εμποτισμού και παρασκευή

7.2.2.1 Προετοιμασία ρητίνης

Αρχικά, πρέπει να τονισθεί πως η υγρή ρητίνη (πριν τη σκλήρυνσή της) και οι νανοπροσθήκες γραφενίου (GNPs) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα και καρκινογόνα για τον άνθρωπο προτού αδρανοποιηθούν σε ένα σύνθετο υλικό και συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση μάσκας και ειδικών γαντιών κατά την μεταχείρισή τους.

Για την προετοιμασία της μήτρας των δοκιμίων αναφοράς χωρίς νανοπροσθήκες γραφενίου (GNPs) έγινε ανάμειξη σε γυάλινο δοχείο των δύο συστατικών του εποξικού συστήματος (ρητίνη και σκληρυντής) σε αναλογία 2:1 (A:B) κατά βάρος, βάσει των προδιαγραφών του κατασκευαστή του εποξικού συστήματος και ακολούθησε ανάδευσή τους για 25 λεπτά στις 400 rpm με ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο και ειδική μύτη ανάδευσης.

Για την προετοιμασία της μήτρας των δοκιμίων με νανοπροσθήκες γραφενίου (GNPs), αφού έγινε η ανάμειξη των δύο συστατικών του εποξικού συστήματος σε γυάλινο δοχείο, τοποθετήθηκε μέσα στο υγρό μίγμα ποσότητα σκόνης νανοπροσθηκών γραφενίου που αντιστοιχεί στην επιθυμητή κατά βάρος περιεκτικότητα νανοπροσθηκών του εποξικού συστήματος, που έπειτα ορίζεται ως η περιεκτικότητα σε νανοπροσθήκες του συνθέτου πολυστρωματικού υλικού. Προτού

αναμειχθούν με τη ρητίνη οι νανοπροσθήκες γραφενίου περιστράφηκαν σε τόρνο στις 2000 rpm για 2 ώρες (light stirring). Επισημαίνεται, πως η ανάδευση των νανοπροσθηκών με τα συστατικά του εποξικού συστήματος πραγματοποιήθηκε σε γυάλινο δοχείο, γιατί σε πλαστικά δοχεία αναπτύσσονται μαγνητικά φαινόμενα και η σκόνη του γραφενίου κολλάει στα τοιχώματα του δοχείου. Η ανάδευση του μίγματος έγινε πάλι για 2 ώρες στις 400 rpm.

Κατά την παρασκευή των πολυστρωματικών υλικών παρατηρήθηκε πως από 20 g μέχρι 30 g ρητίνης επαρκούν συνήθως, αναλόγως του τύπου της πλέξης του ενισχυτικού υφάσματος και της περιεκτικότητας σε νανοπροσθήκες γραφενίου που επηρεάζουν το ιξώδες του εποξικού συστήματος, για τον ποιοτικό εμποτισμό σύνθετου υλικού τεσσάρων στρώσεων υφάσματος εμβαδού 450 mm x 250 mm.

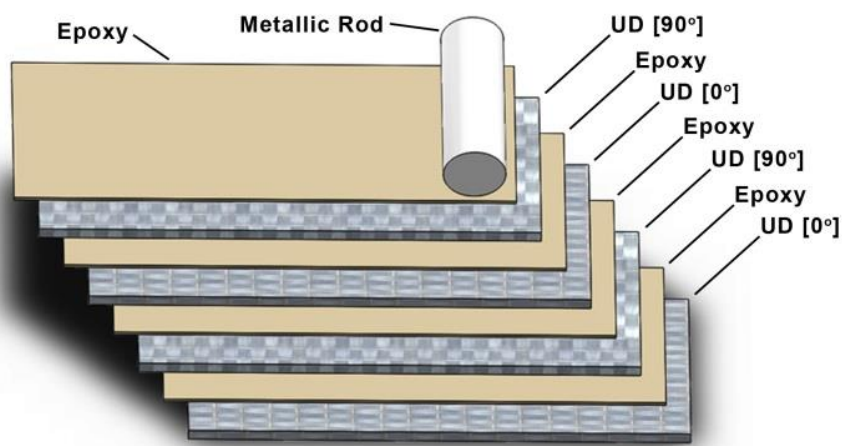


Εικόνα 60. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των σύνθετων υλικών. Ηλεκτρικό δραπενοκατσάβιδο και μύτη ανάδευσης (a) για την ανάδευση του συστήματος ρητίνης και ρολά για τον εμποτισμό των υφασμάτων με ρητίνη (b).

7.2.2.2 Εμποτισμός

Μετά την παρασκευή του μίγματος της ρητίνης, τοποθετείται πάνω στον κατάλληλα προετοιμασμένο ξύλινο πάγκο η πρώτη στρώση του ενισχυτικού υφάσματος που έχει κοπεί νωρίτερα στον επιθυμητό προσανατολισμό και έπειτα γίνεται η επάλειψή του με ρητίνη με την επιθυμητή περιεκτικότητα σε νανοδομές γραφενίου με τη χρήση πινέλου. Αφού επαλειφθεί με επαρκή ποσότητα ρητίνης η πρώτη στρώση γίνεται συμπίεσή της με τη χρήση ρολού επάλειψης, προκειμένου η ρητίνη διαπεράσει και από τις δύο πλευρές το ενισχυτικό ύφασμα, να προσδοθεί κατευθυντικότητα στις νανοπροσθήκες μέσα στην μήτρα του υλικού και, τέλος, να

μειωθεί το πορώδες του υλικού. Έπειτα, τοποθετείται πάνω από την πρώτη στρώση η δεύτερη στρώση του ενισχυτικού υφάσματος και ακολουθεί ξανά εφαρμογή ποσότητας ρητίνης με πινέλο και επάλειψή της με ρολό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι και την τελευταία (άνω) στρώση. Τα επαλειμμένα πολυστρωματικά σύνθετα υλικά αφήθηκαν για σκλήρυνση για επτά ημέρες σε συνθήκες δωματίου (εργαστηρίου).



Εικόνα 61. Γραφική απεικόνιση της πολυστρωματικής διάταξης με μονοδιευθυντική ενίσχυση σε διάταξη [0/90/0/90].

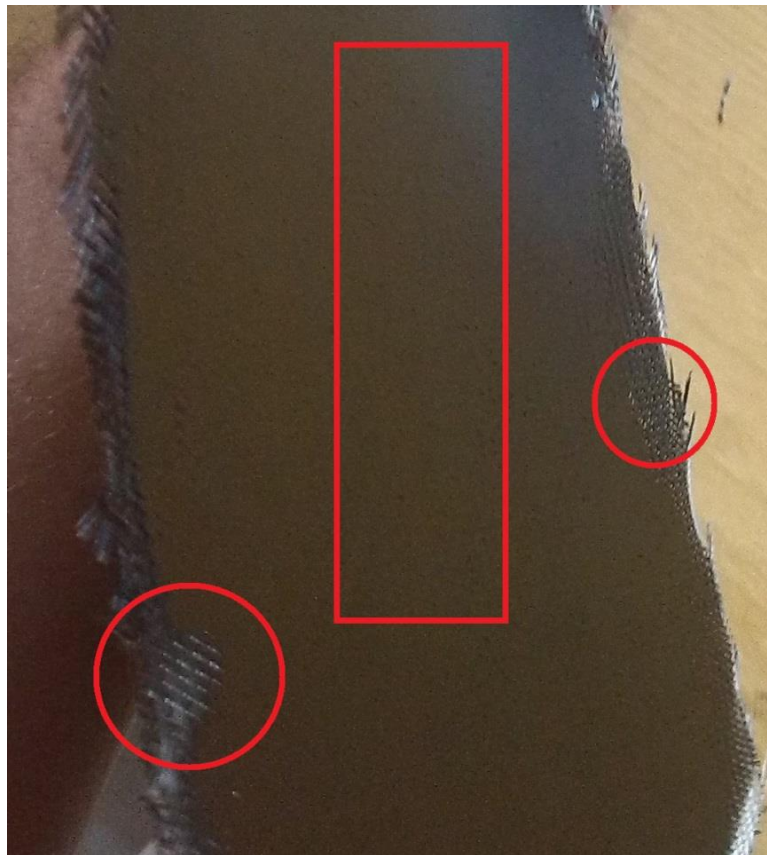
7.2.3 Ποιότητα εμποτισμού

Απαιτείται προσοχή και εμπειρία κατά τη φάση του εμποτισμού, καθώς ένα πολύ χαμηλό ποσοστό εμποτισμού (ανεπαρκές) μπορεί να αφήσει ακάλυπτες από ρητίνη περιοχές στο σύνθετο υλικό, υποβαθμίζοντας έτσι τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Υποβάθμιση μηχανικών ιδιοτήτων εμφανίζεται και στην περίπτωση ενός πολύ υψηλού ποσοστού εμποτισμού, καθώς εδώ εμφανίζονται αυξημένες παραμένουσες τάσεις και άνιση μεταφορά φορτίου στις ίνες της ενίσχυσης.

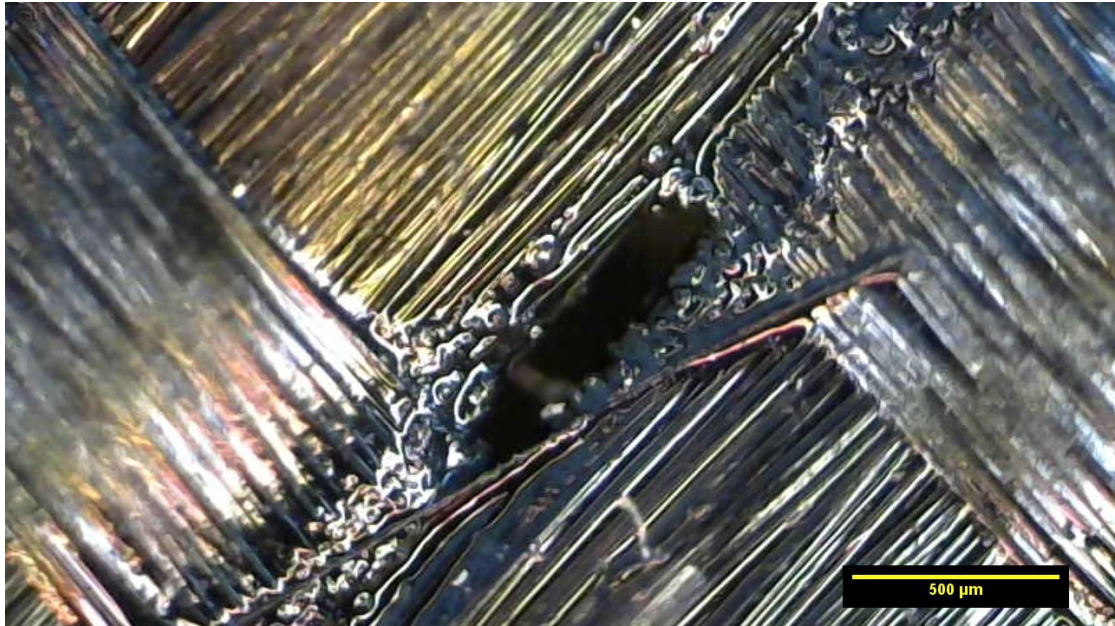
7.2.3.1 Οπτικός έλεγχος

Μετά την παρέλευση 24 ωρών από τον εμποτισμό της ρητίνης, το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό είναι έτοιμο για περαιτέρω επεξεργασία. Το σύνθετο

υλικό ανασηκώνεται και εξετάζεται αν έχει διαπεραστεί καθ' όλο το πάχος του με ρητίνη. Η πίσω όψη του δοκιμίου, που ακουμπά στον επαλειμμένο με κερί πάγκο εργασίας πρέπει να είναι λεία, ομαλή και σε καμία περίπτωση να μην διαφαίνονται κενά διαμέσου των κόμβων της πλέξης ή ανάμεσα από τα νήματα του υφάσματος. Οι τραχιές επιφάνειες στην πίσω όψη μαρτυρούν ανεπαρκή εμποτισμό. Η επάνω όψη πρέπει να έχει ομοιόμορφο χρώμα καθ' όλη την επιφάνειά της και να μην εμφανίζει εμφανείς φθορές, σκισίματα ή, αντίθετα, περίσσεια υλικού μήτρας. Μια πρώτη εκτίμηση για την καλή κατάσταση της άνω όψης είναι να διαφαίνεται κάτω από το υλικό της μήτρας η όψη και το ανάγλυφο της πλέξης. Εφόσον, διαπιστωθεί πως οπτικά το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό είναι καλής ποιότητας, τότε αυτό οδηγείται για κόψιμο στις επιθυμητές διαστάσεις των τελικών δοκιμίων σύμφωνα με τα πειραματικά πρότυπα που ακολουθήθηκαν στην παρούσα μελέτη και έχουν παρουσιαστεί παραπάνω. Ακολουθούν ορισμένες εικόνες ελαττωμάτων λόγω ανεπαρκούς εμποτισμού:



Εικόνα 62. Πίσω όψη εμποτισμένου υαλοϋφάσματος. Οι περιοχές σε κύκλους αφορούν σημεία του συνθέτου υλικού με χαρακτηριστικά ανεπαρκή εμποτισμό. Η περιοχή μέσα στο παραλληλόγραμμο είναι κατάλληλη για την εξαγωγή δοκιμίου μετρήσεων.



Εικόνα 63. Άποψη δοκιμίου με μονοδιευθυντική ενίσχυση και 2% GNP (wt) από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5). Κενό στην πλέξη λόγω ανεπαρκούς ποσότητας ρητίνης.



Εικόνα 64. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) πίσω όψης ανεπαρκώς εμποτισμένου δοκιμίου με μονοδιευθυντική ενίσχυση και 2% GNPs.

7.2.3.2 Ποιοτικός έλεγχος

Τα τελικά δοκίμια που εξάγονται από το πολυστρωματικό σύνθετο υλικό ζυγίζονται και το βάρος του συγκρίνεται με το πρότυπο βάρος των μη εμποτισμένων δοκιμίων. Αυτό είναι 1.9 g για πολυστρωματικό δοκίμιο με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος και 1.6 g για πολυστρωματικό δοκίμιο με ενίσχυση υφάσματος πλέξης Twill 2x2, κοινό και για τις δύο σειρές δοκιμίων με αυτού του τύπου την ενίσχυση). Τα πρότυπα βάρη προέκυψαν από την κοπή πανομοιότυπων στρώσεων υφασμάτων με των επιθυμητών τελικών δοκιμίων και τη ζύγιση των τεσσάρων στρώσεων χωρίς πολυμερική μήτρα. Αφαιρώντας το πρότυπο βάρος από το τελικό δοκίμιο του πειράματος προκύπτει το βάρος της ρητίνης που έχει εναποτεθεί σε κάθε δοκίμιο. Από αυτήν την τιμή υπολογίζεται το ποσοστό εμποτισμού κάθε δοκιμίου σε ρητίνη. Η επιθυμητή τιμή εμποτισμού συγκλίνει στη στο διάστημα 35% με 37% για να κριθεί ένα δοκίμιο κατάλληλο για μετρήσεις. Όσα δοκίμια κρίθηκαν ποιοτικώς επαρκή και εντός προδιαγραφών οδηγήθηκαν ύστερα στην πρέσα μετρήσεων INSTRON 4482 για τα πειράματα εφελκυσμού και κάμψης τριών σημείων. Σε όποια περίπτωση βρέθηκαν δοκίμια ανεπαρκούς ποιότητας, παρασκευάστηκαν εκ νέου νέα δοκίμια, προκειμένου να μπορεί να πραγματοποιηθεί ένας αριθμός μετρήσεων που να δίνει επαναλήψιμα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

7.2.4 Παρασκευή δοκιμίων δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing)

Προκειμένου να μελετηθεί και η επίδραση της δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing) στις μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού, τελικά δοκίμια από την προηγούμενη φάση με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος και περιεκτικότητας 2% w.t. σε νανοπροσθήκες γραφενίου (GNPs) οδηγήθηκαν σε εργαστηριακό κλίβανο και θερμάνθηκαν για 2, 4, 6 και 24 ώρες στους 50°C και 100°C, αντίστοιχα, και τέλος υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D790-03. Αντίστοιχα και σε αυτήν την περίπτωση το ποσοστό εμποτισμού τηρήθηκε στο 35% με 37%.



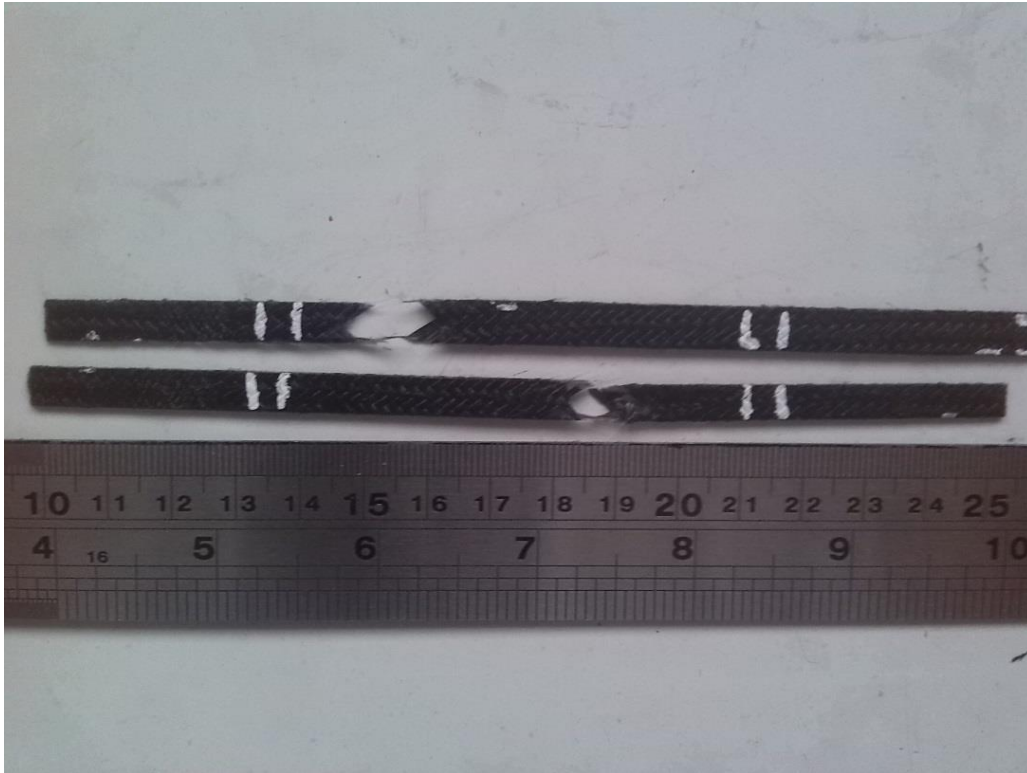
Εικόνα 65. Ο εργαστηριακός κλίβανος (αριστερά) που χρησιμοποιήθηκε για τη θερμική θεραπεία δοκιμίων (δεξιά) με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη στρώσεων [0/90/0/90] και 2% wt GNPs.

8. Κεφάλαιο: Αποτελέσματα δοκιμών

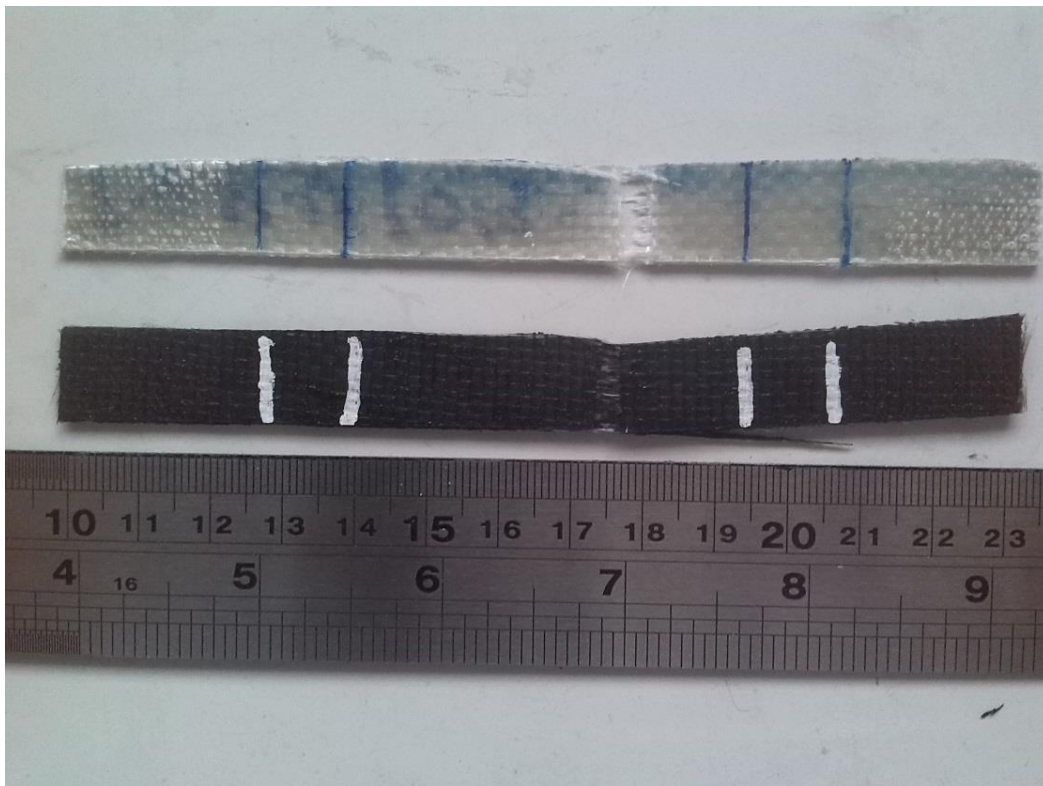
8.1 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Σε πείραμα εφελκυσμού κατά ASTM D3039/D3039M υποβλήθηκαν δοκίμια με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε διάταξη στρώσεων [45/0/0/-45] με περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) 0%, 5%, 10%, 15% και 20% (wt), καθώς και δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη στρώσεων [0/90/0/90] με περιεκτικότητες σε GNPs 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% και 30% (wt). Αφότου εκτελέστηκε επαρκής αριθμός πειραμάτων εφελκυσμού στα δοκίμια κάθε περιεκτικότητας, εκλέχθηκε από κάθε τύπο δοκιμίου (περιεκτικότητας και υφάσματος ενίσχυσης) εκείνο με την πιο αντιπροσωπευτική και επαναλήψιμη για τον τύπο απόδοση και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μεταξύ των διάφορων περιεκτικοτήτων σε νανοδομές γραφενίου (GNPs). Τέλος, υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών που παρασκευάστηκαν.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί, πως στο πρότυπο ASTM D3039/D3039M αναφέρεται πως εφόσον το υπάρχουν προβλήματα συγκράτησης του δοκιμίου στις σιαγόνες της μετρητικής διάταξης, όπως ολίσθηση ή θραύση του υλικού εντός της σιαγόνας, ή τα δοκίμια αστοχούν εκτός της περιοχής ελέγχου, τότε προτείνεται η συγκόλληση ειδικών tabs (από το ίδιο υλικό (ρητίνης, ενίσχυσης) στα άκρα του δοκιμίου, τα οποία έχουν σκοπό αφενός την ικανή συγκράτηση του δοκιμίου στις σιαγόνες και αφετέρου εξασφαλίζουν πως το δοκίμιο θα αστοχήσει εντός της περιοχής ελέγχου. Τα tabs τοποθετούνται από τα άκρα των δοκιμίων έως τα όρια της περιοχής ελέγχου τους. Στα άκρα των δοκιμίων εφελκυσμού της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν με λευκή γραμμή τα όρια συγκράτησης των σιαγόνων και στη συνέχεια ορίστηκε, σχεδιάζοντας πάλι με λευκές γραμμές η περιοχή ελέγχου στο κεντρικό τμήμα των δοκιμίων, μήκους 50 mm, όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν παρακάτω. Παρατηρήθηκε πως τα δοκίμια αστοχούν εντός της περιοχής ελέγχου, οπότε δε χρειάστηκε η τοποθέτηση tabs στα άκρα τους. [28]



Εικόνα 66. Θραύση δοκιμίου με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 10% w.t. GNPs. Χαρακτηριστική για την πλέξη μορφή «χελιδονοουράς» στην περιοχή θραύσης.

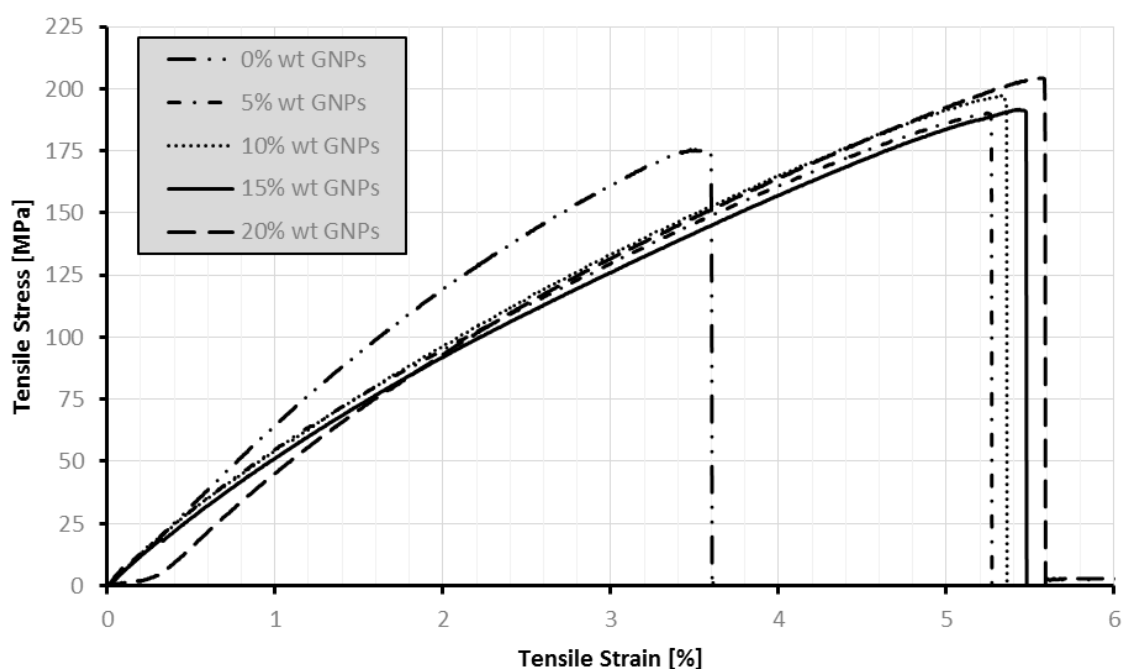


Εικόνα 67. Θραύση δοκιμίων με μονοδιευθυντική ενίσχυση διάταξης [0/90/0/90] με 0% (πάνω) και 10% w.t. GNPs (κάτω). Αστοχία κατά μήκος των μονοδιευθυντικών ινών, χαρακτηριστική αστοχία της συγκεκριμένης πλέξης.

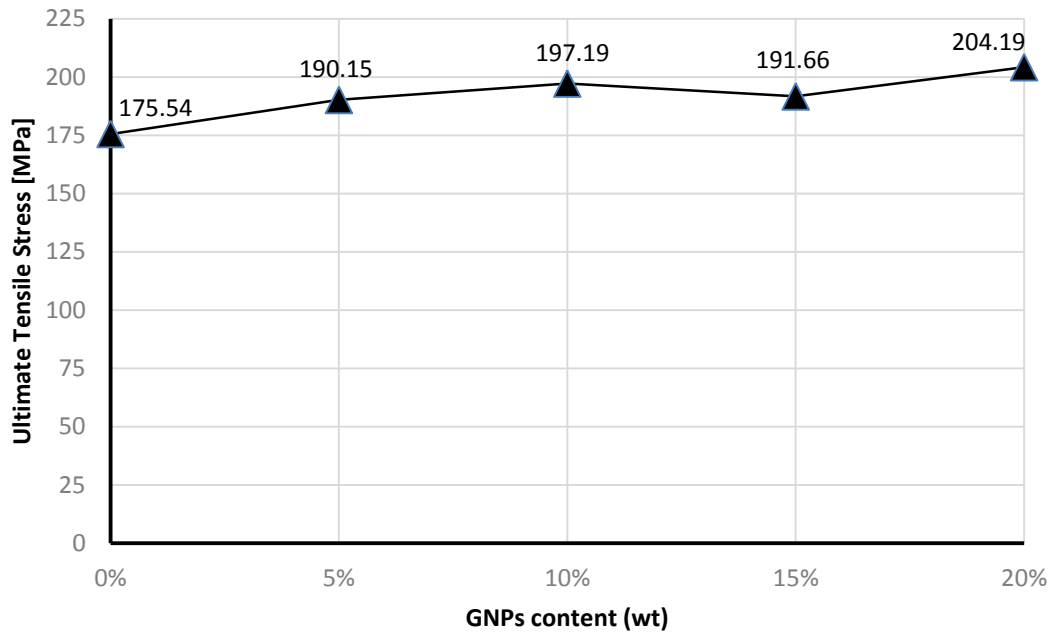
8.1.1 Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45]

Στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για τα δοκίμια με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45] με περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) 5%, 10%, 15% και 20% (wt) παρατηρούνται τα εξής σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες, το οποίο αστοχεί στα 175.54 MPa:

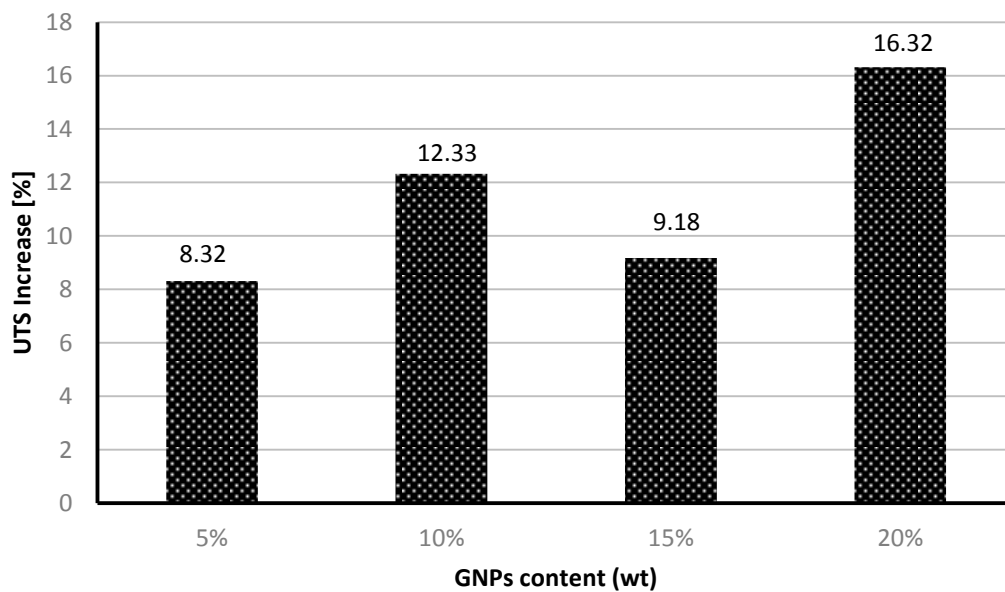
- ✓ Οι νανοπροσθήκες γραφενίου, σε όλα τα ποσοστά πρόσμειξης στη μήτρα του συνθέτου, από 5% έως και 20% wt GNPs αυξάνουν την απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) και την παραμόρφωση θραύσης.
- ✓ Η μικρότερη αύξηση αντοχής, κατά 8.32%, αφορά την προσθήκη 5% wt GNPs, όπου και η παραμόρφωση θραύσης αυξάνεται κατά 1,67%.
- ✓ Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στα 20% wt GNPs, όπου η απόλυτη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) έφτασε τα 204.19 MPa, σημειώνοντας αύξηση κατά 16.32% επί του δοκιμίου χωρίς νανοπροσθήκες, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται και η παραμόρφωση θραύσης, η οποία φτάνει το 5.59% σε σχέση με το 3.60% του δοκιμίου χωρίς νανοπροσθήκες.
- ✓ Οι προσθήκες από 5% έως και 15% wt GNPs δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα καμία δεν πέφτει κάτω από την αντοχή των 5% GNPs (wt) στα 190.15 MPa.



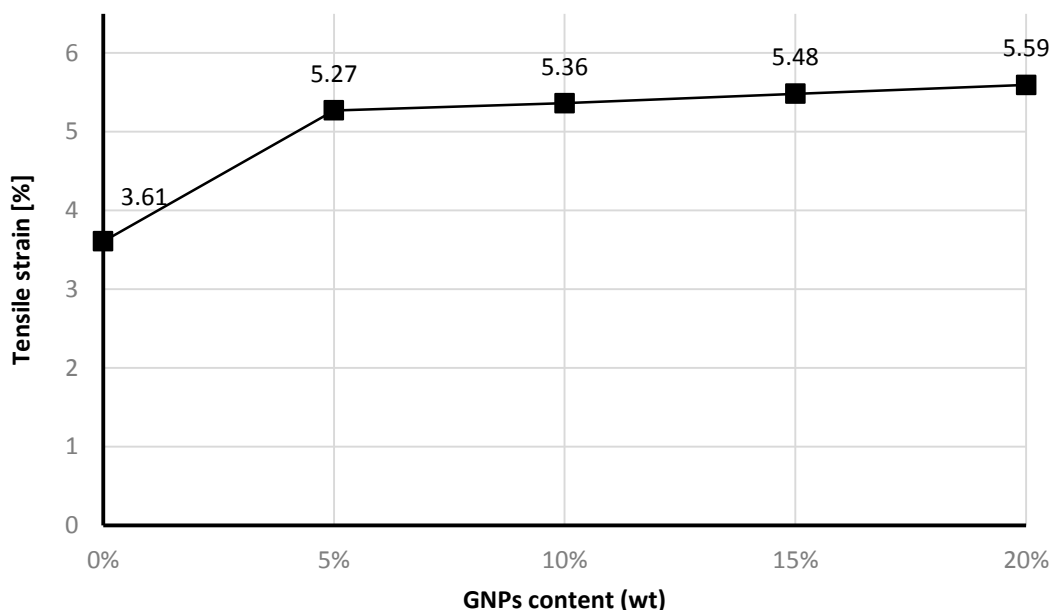
Σχήμα 6. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/0/0/-45] από 0% έως 20% wt GNPs.



Σχήμα 7. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμίων με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.



Σχήμα 8. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμίων με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).



Σχήμα 9. Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό δοκιμίων με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.

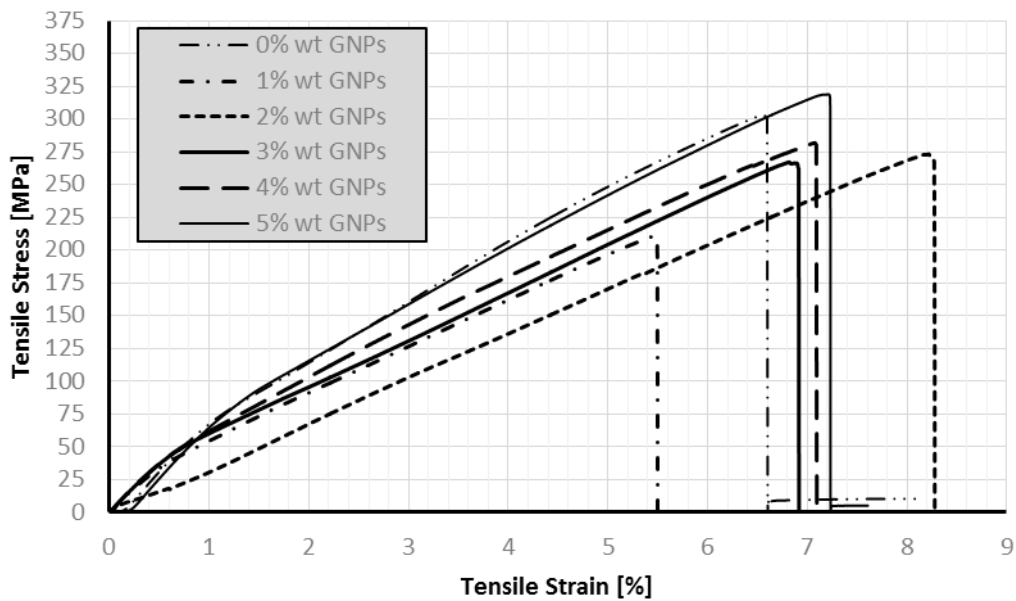
8.1.2 Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφάσμα σε διάταξη [0/90/0/90]

Στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού για τα δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη [0/90/0/90] με περιεκτικότητες σε νανοδομές 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% και 30% wt GNPs παρατηρούνται τα εξής:

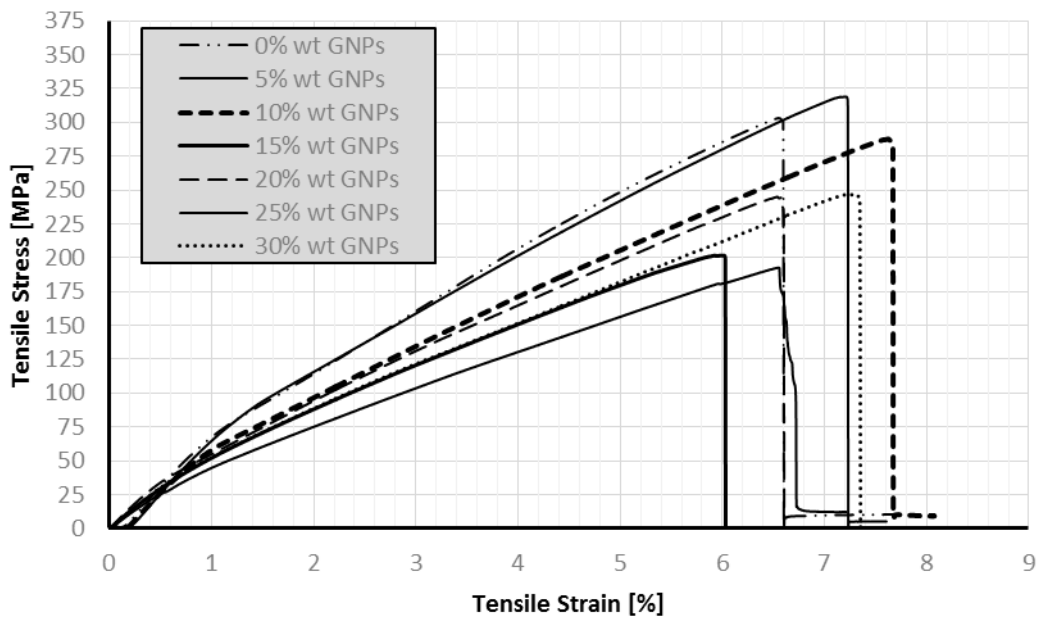
- ✓ Αντίθετα με την ενίσχυση Twill 2x2, οι νανοπροσθήκες σε σύνθετο με ενίσχυση μονοδιευθυντικού (UD) υαλοϋφάσματος έχουν αρνητική επίδραση στη συμπεριφορά του σύνθετου.
- ✓ Μόνο τα 5% wt GNPs επέφεραν αύξηση της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) και αυτό κατά μόλις 5.19% σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες το οποίο αστόχησε στα 303.17 MPa (συγκριτικά η ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με περιεκτικότητα 0% wt GNPs έφτασε τα 175.54 MPa).
- ✓ Όλες οι προσθήκες πλην των 2%, 4%, 5% και 10% wt GNPs επέφεραν μείωση της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) κατά τουλάχιστον 10% και

ξεπέρασαν το 30% στην περίπτωση των 1%, 15%, 25% και 30% wt GNPs. Η προσθήκη 25% wt GNPs αστόχησε χαμηλότερα από όλες, στα 192.61 MPa.

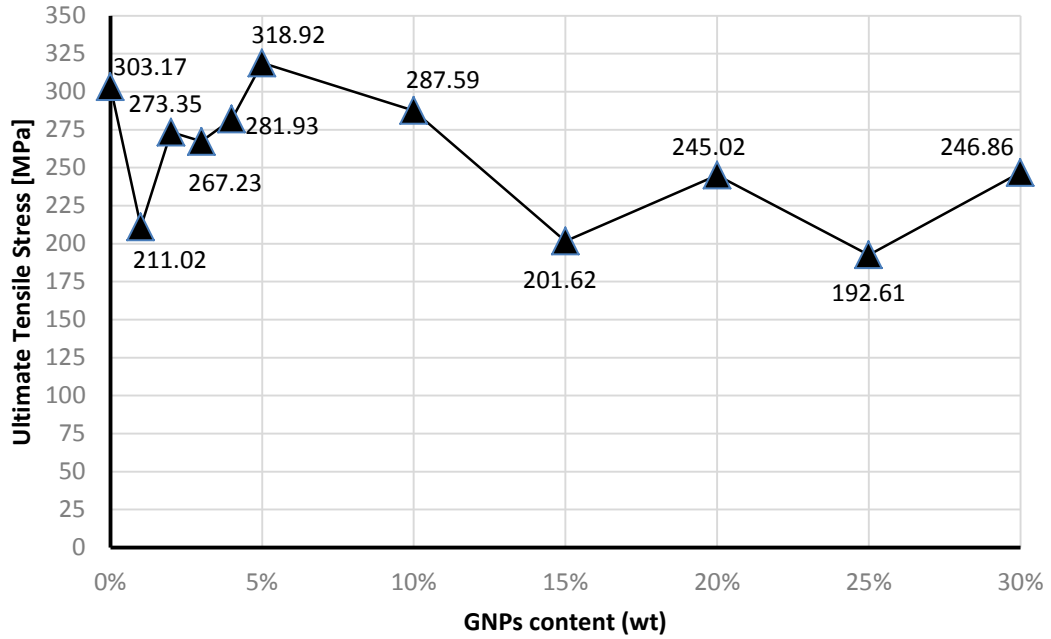
- ✓ Η μεγαλύτερη παραμόρφωση θραύσης παρατηρείται στην προσθήκη 2% wt GNPs φτάνοντας το 8.27% σε σχέση με 6.60% του δοκιμίου χωρίς νανοπροσθήκες, με μια ταυτόχρονη μείωση της αντοχής κατά 9.84%.



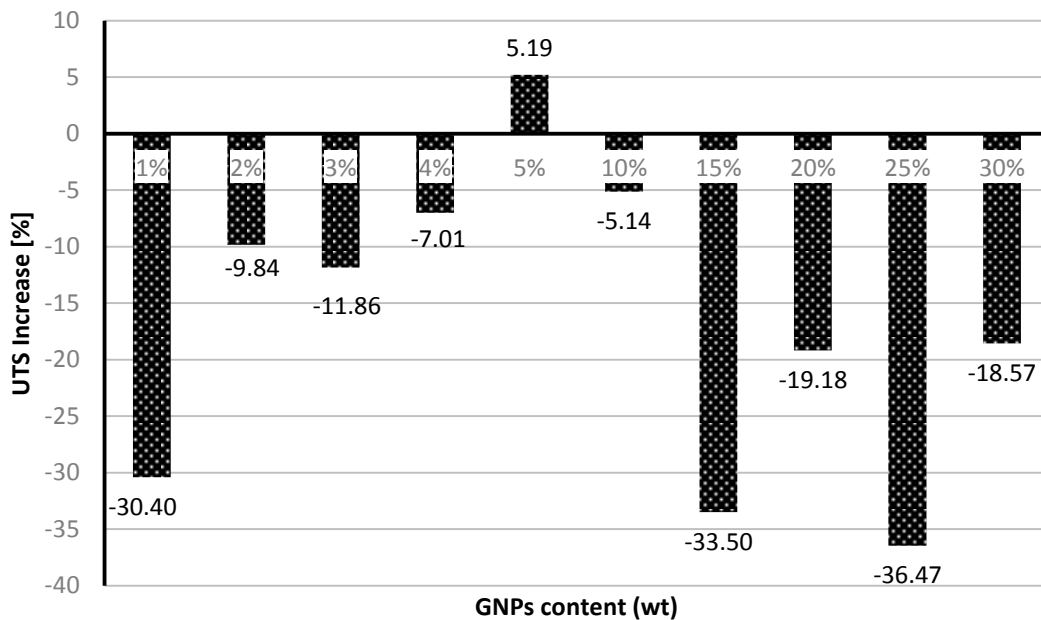
Σχήμα 10. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] από 0% έως 5% wt GNPs.



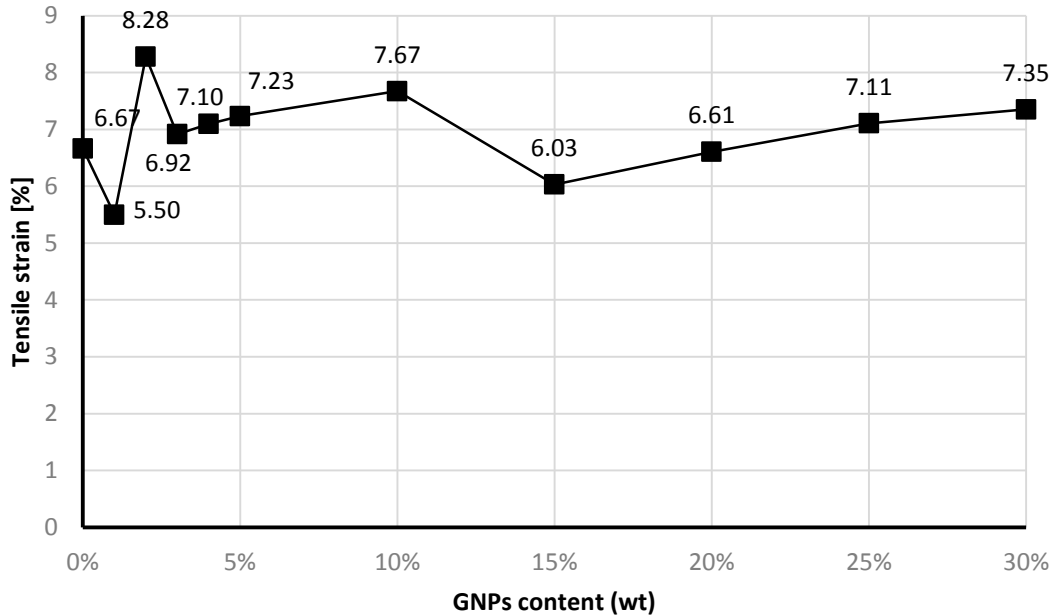
Σχήμα 11. Συγκριτικό διάγραμμα εφελκυσμού τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] από 0% έως 30% wt GNPs.



Σχήμα 12. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.



Σχήμα 13. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης/μείωσης της απόλυτης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).



Σχήμα 14. Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης παραμόρφωσης κατά τον εφελκυσμό δοκιμίων με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.

8.1.3 Μέτρα ελαστικότητας πειραματικών δοκιμίων

Από τις κλίσεις των καμπυλών των διαγραμμάτων τάσης – παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή υπολογίστηκαν τα μέτρα ελαστικότητας των παραχθέντων συνθέτων υλικών. Παρατηρήθηκαν τα εξής για κάθε τύπο υφάσματος ενίσχυσης:

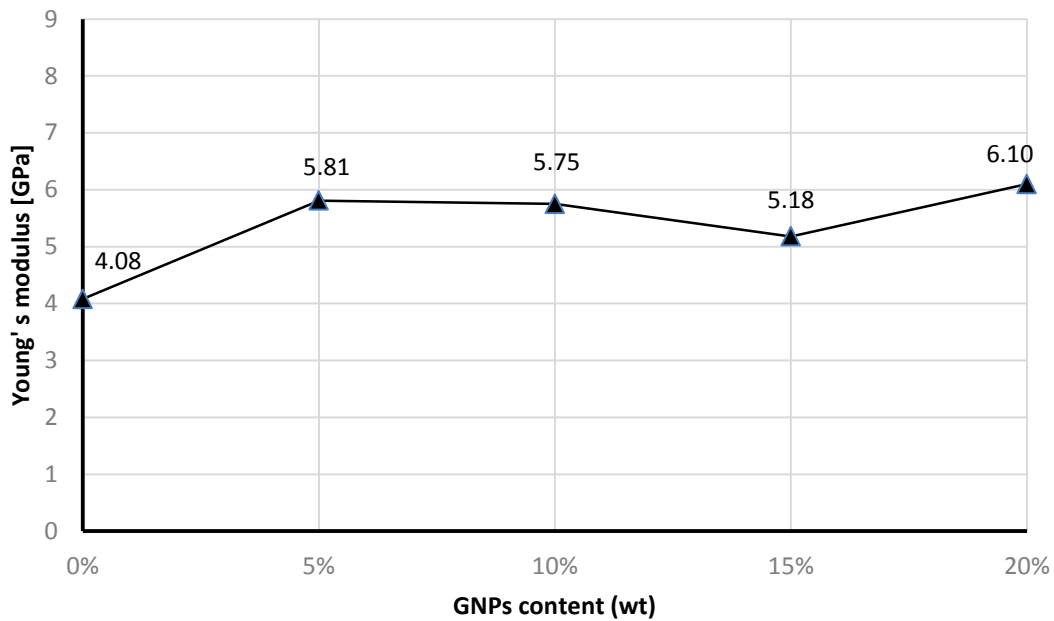
- **Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45]**

Στο δοκίμιο αναφοράς, χωρίς να νανοπροσθήκες, υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας στα 4.08 GPa. Με τη συγκεκριμένη ενίσχυση, το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει σε όλες τις περιεκτικότητες, με το υψηλότερο να σημειώνεται στην περίπτωση των 20% w.t. GNPs (6.10 GPa). Παρ' όλα αυτά, μπορεί να ειπωθεί πως ακόμα και από το τα 5% w.t. GNPs παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 42%, και πως αυτή η αύξηση διατηρείται περίπου σταθερή μέχρι τα 20% w.t. GNPs.

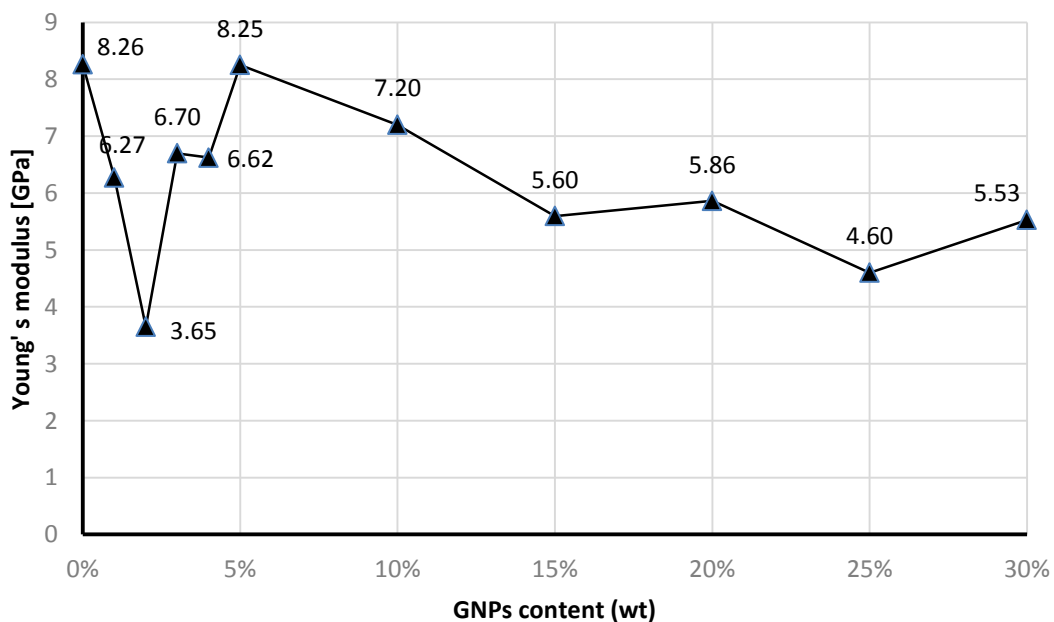
- **Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμα σε διάταξη [0/90/0/90]**

Σε αυτήν την περίπτωση ενίσχυσης, το μέτρο ελαστικότητας, με εξαίρεση την περίπτωση προσθήκης 5% w.t. GNPs, το οποίο με 8.25 GPa, έφτασε το μέτρο του δοκιμίου αναφοράς (8.26 GPa), παρατηρήθηκε πως υποβαθμίζεται σε όλες τις

περιπτώσεις περιεκτικότητας, με σημαντική μείωση από τα 15% w.t. GNPs μέχρι τα 30% w.t. GNPs. Στα 15% w.t. GNPs παρουσιάστηκε μείωση του μέτρου κατά 47,5% (φτάνοντας τα 5.60 GPa), ενώ στα 25% w.t. GNPs μειώθηκε κατά 55,7% (φτάνοντας τα 4.60 GPa). Η μεγαλύτερη μείωση παρουσιάστηκε στα 2% w.t. GNPs (3.65 GPa), η οποία, όμως, δείχνει να είναι μια ακραία και μεμονωμένη απόκλιση.



Σχήμα 15. Συγκριτικό διάγραμμα μέτρων ελαστικότητας (σε GPa) με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού, δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45].



Σχήμα 16. Συγκριτικό διάγραμμα μέτρων ελαστικότητας (σε GPa) με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού, δοκιμών με μονοδιευθυντική (UD) ενίσχυση [0/90/0/90].

8.2 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων

Σε πείραμα κάμψης κατά ASTM D790-03 υποβλήθηκαν δοκίμια με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε διάταξη στρώσεων [45/0/0/-45] με περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%, 15% και 20% (w.t.), δοκίμια με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε διάταξη στρώσεων [45/-45/45/-45] με περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) 0%, 1%, 2% και 3% (w.t.), καθώς και δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος σε διάταξη στρώσεων [0/90/0/90] με περιεκτικότητες σε GNPs 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% και 30% (w.t.). Αφότου εκτελέστηκε επαρκής αριθμός πειραμάτων κάμψης στα δοκίμια κάθε περιεκτικότητας, εκλέχθηκε από κάθε τύπο δοκιμίου (περιεκτικότητας και υφάσματος ενίσχυσης) εκείνο με την πιο αντιπροσωπευτική και επαναλήψιμη για τον τύπο απόδοση και δημιουργήθηκαν συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μεταξύ των διάφορων περιεκτικοτήτων σε νανοδομές γραφενίου (GNPs). Η προσέγγιση των ζευγών των τιμών από το πείραμα έγινε με πολυωνυμική καμπύλη 3^{ου} βαθμού.



Εικόνα 68. Προοδευτικές απόψεις από πείραμα κάμψης.

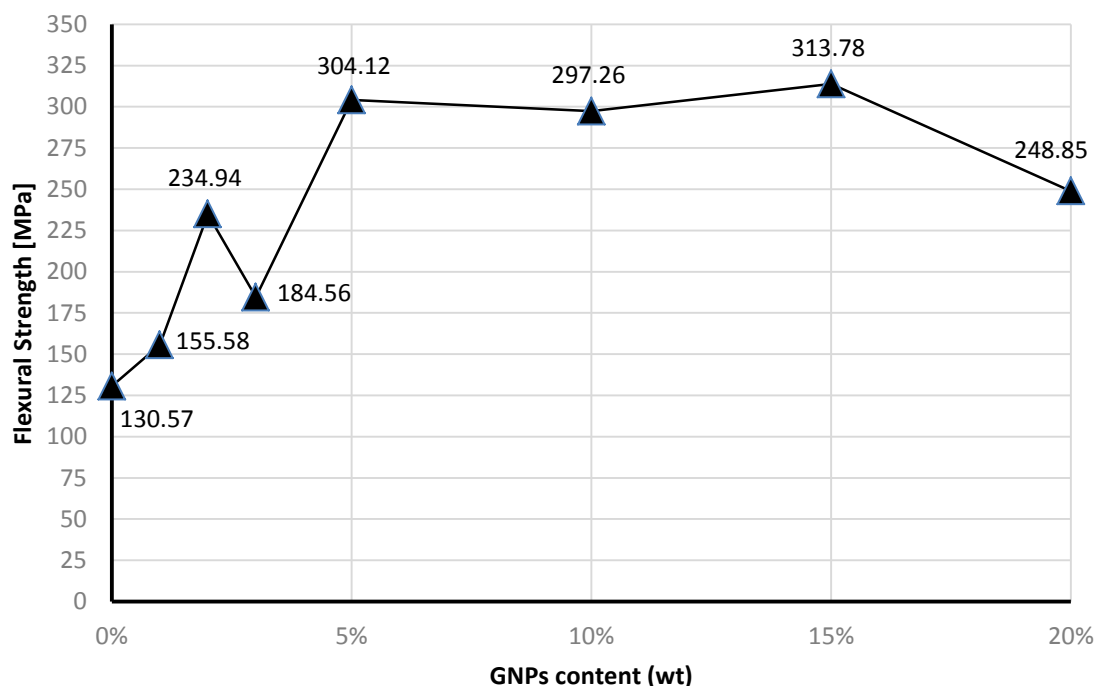


Εικόνα 69. Άποψη προφίλ δοκιμίου μονοδιευθυντικής ενίσχυσης και 5% w.t. GNPs, κατόπιν κάμψης.

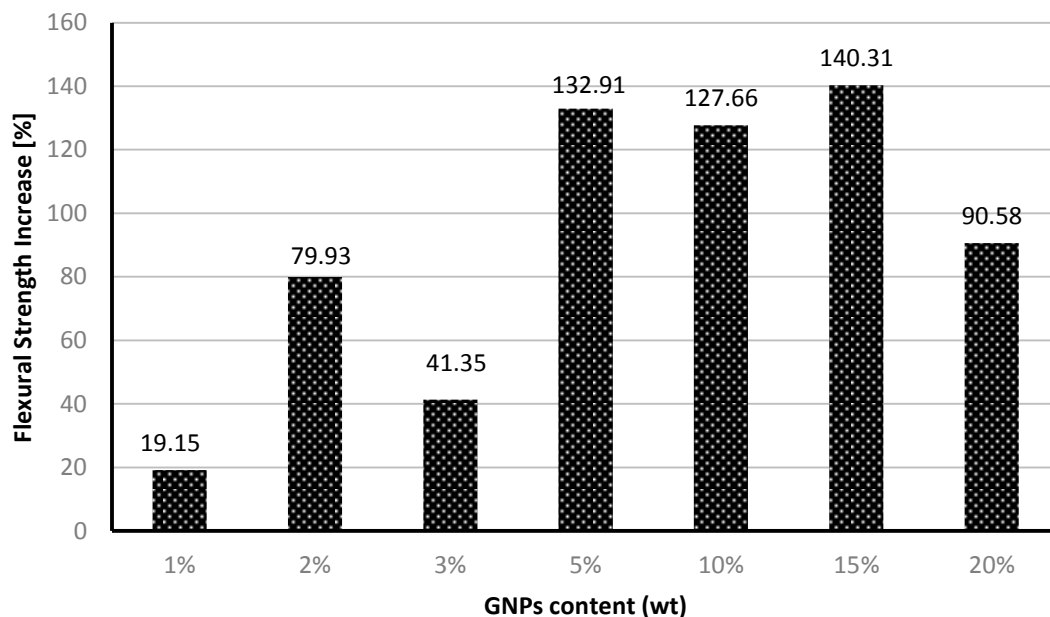
8.2.1 Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45]

Από τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από τις δοκιμές κάμψεις στα σύνθετα υλικά με ενίσχυση υαλοϋφάσματος Twill 2x2 [45/0/0/-45] και με περιεκτικότητες 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 10%, 15% και 20% w.t. GNPs, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Όλες οι περιεκτικότητες νανοδομών γραφενίου επέφεραν αύξηση της αντοχής σε κάμψη σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς που δεν περιείχε νανοδομές, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη δυσκαμψία του υλικού.
- ✓ Από τα 5% μέχρι τα 15% w.t. GNPs εμφανίζεται μια σταθερή περιοχή, όπου η αντοχή αυξήθηκε από τα 130.57 MPa (0% w.t. GNPs) στην περιοχή των 300 MPa, με μέγιστη τιμή τα 313.78 MPa στην περίπτωση των 15% w.t. GNPs.
- ✓ Στη μέγιστη περιεκτικότητα των 20% w.t. GNPs η αντοχή σε κάμψη αρχίζει να φθίνει (248.85 MPa).
- ✓ Ήδη οι προσθήκες των 2% και 3% w.t. GNPs αύξησαν την αντοχή σε κάμψη κατά 79.93% (στα 234.94 MPa) και 41.35% (στα 184.56 MPa), αντίστοιχα σε σχέση με το δοκίμιο χωρίς προσθήκη νανοδομών.



Σχήμα 17. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.

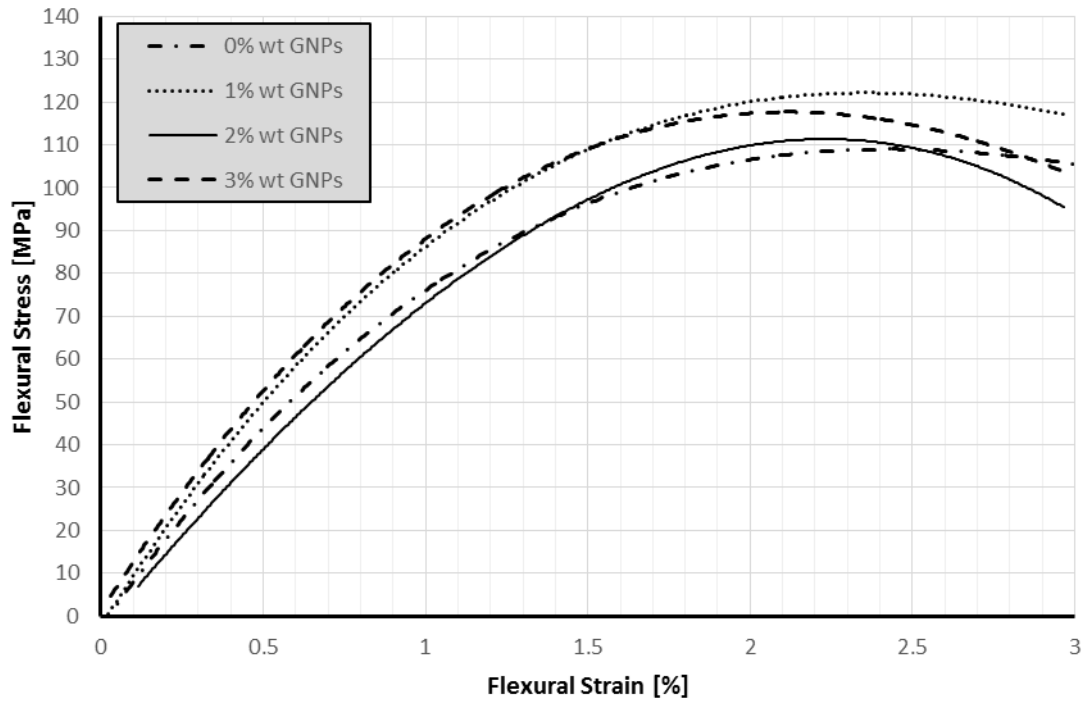


Σχήμα 18. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμίων ενίσχυσης Twill 2x2 [45/0/0/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).

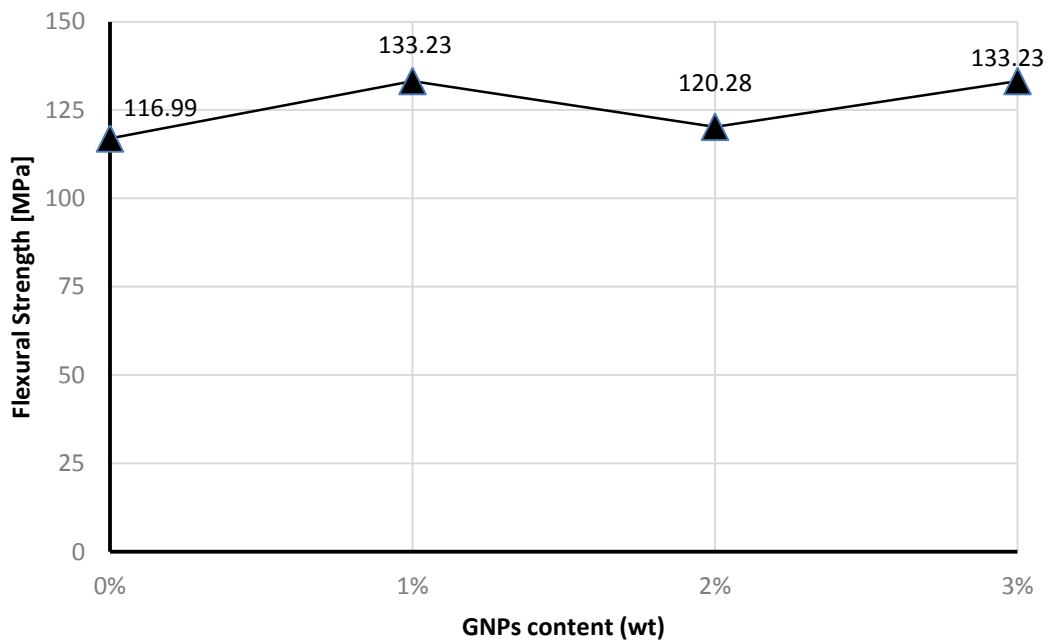
8.2.2 Δοκίμια ενισχυμένα με υαλοϋφασμα Twill 2x2 σε διάταξη [45/-45/45/-45]

Οι μετρήσεις από τα πειράματα κάμψης δοκιμίων με ενίσχυση υαλοϋφάσματος Twill 2x2 με γωνίες στρώσεων [45/-45/45/-45] και με περιεκτικότητες 0%, 1%, 2% και 3% w.t. GNPs οδήγησαν στα εξής:

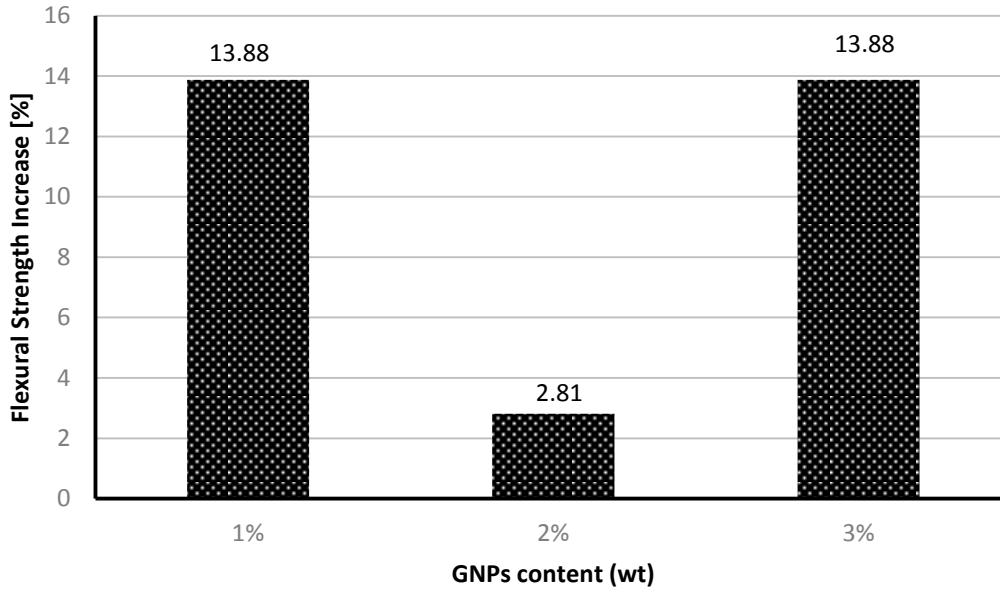
- ✓ Και οι τρεις χαμηλές περιεκτικότητες έφεραν μικρή αύξηση της αντοχής σε κάμψη, η οποία κορυφώθηκε στα 133.23 MPa (αύξηση κατά 13.88%), στην περίπτωση των δοκιμίων με 1% και 3% w.t. GNPs, σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς (116.99 MPa).
- ✓ Η συγκεκριμένη διάταξη στρώσεων δεν ενισχύθηκε εξίσου από την προσθήκη των νανοδομών, καθώς συγκριτικά με τα δοκίμια στρώσεων [45/0/0/-45] των 1%, 2% και 3% w.t. GNPs, τα οποία έφεραν μια μέση αύξηση κατά 46.81%, τα αντίστοιχα με γωνίες στρώσεων [45/-45/45/-45] αύξησαν την αντοχή σε κάμψη κατά μόλις 10.19%.



Σχήμα 19. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με ενίσχυση πλέξης Twill 2x2 [45/-45/45/-45] από 0% έως 3% wt GNPs.



Σχήμα 20. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με ενίσχυση Twill 2x2 [45/-45/45/-45] με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.

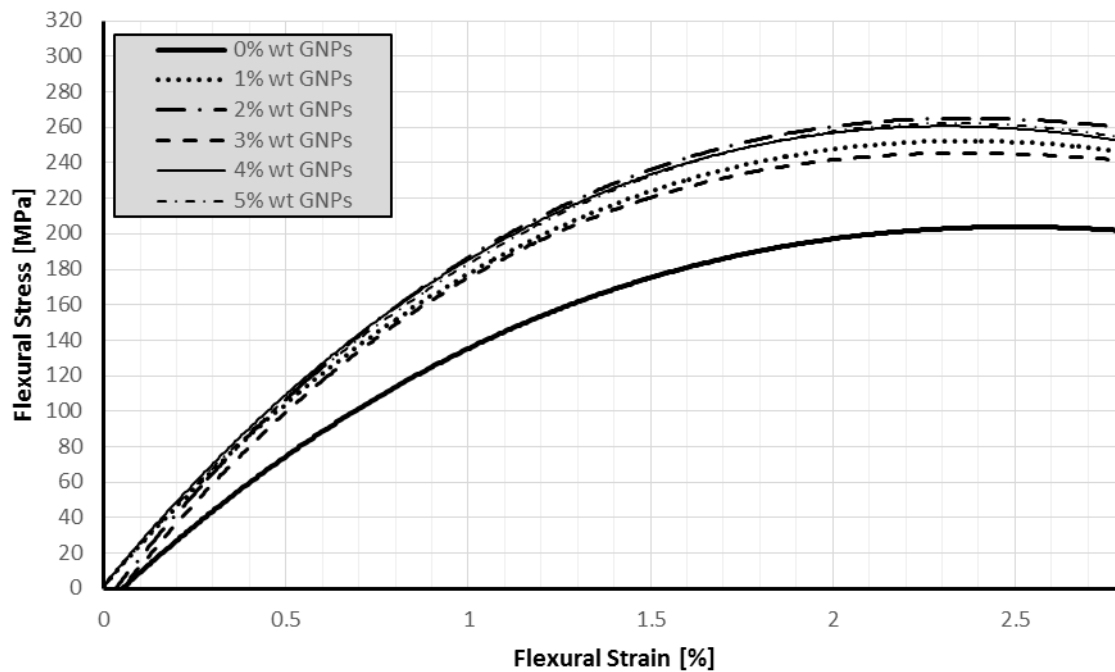


Σχήμα 21. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμίων ενίσχυσης Twill 2x2 [45/-45/45/-45] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).

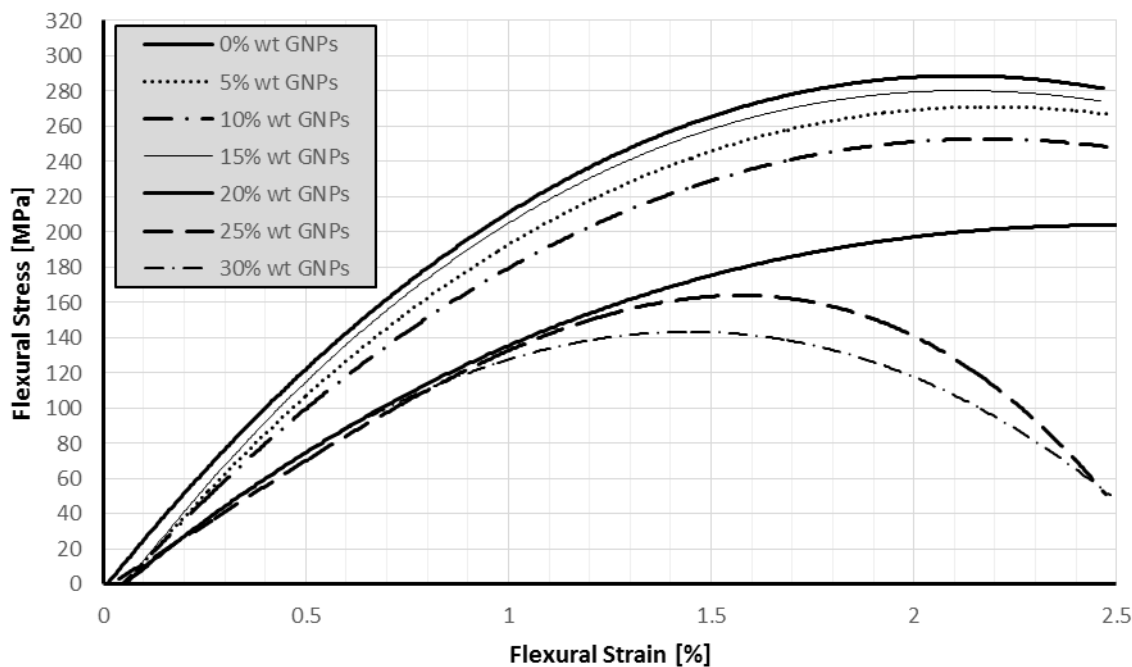
8.2.3 Δοκίμια ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμα σε διάταξη [0/90/0/90]

Τα πειράματα αποτελέσματα των δοκιμίων με μονοδιευθυντική (UD) ενίσχυση υαλοϋφάσματος σε διάταξη [0/90/0/90] και με περιεκτικότητες w.t. σε GNPs 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% και 30% παρουσιάζονται παρακάτω:

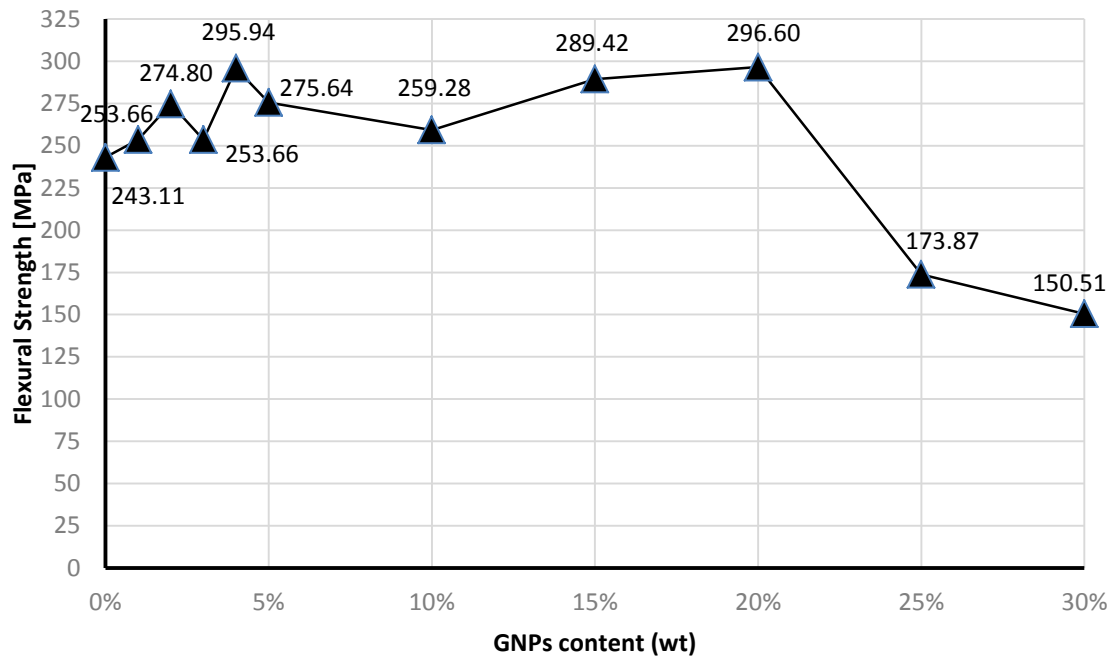
- ✓ Όλες οι περιεκτικότητες μέχρι και τα 20% αύξησαν την αντοχή σε κάμψη σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς, το οποίο αστόχησε στα 243.11 MPa. Τα μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης παρατηρήθηκαν στην περίπτωση των δοκιμίων με 4% και 20% w.t. GNPs, τα οποία έφτασαν τα 295.94 MPa και 296.60 MPa (αύξηση αντοχής 22%), αντίστοιχα.
- ✓ Τα χαμηλότερα ποσοστά αύξησης (4.34%) εμφανίστηκαν στις προσθήκες 1% και 3% w.t. GNPs, των οποίων τα δοκίμια αστόχησαν στα 253.66 MPa.
- ✓ Άνω των 20% w.t. εμφανίστηκε σταδιακή υποβάθμιση της αντοχής, όπως έδειξαν οι μετρήσεις των δοκιμίων με 25% και 30% w.t. GNPs, οι οποίες με 173.87 MPa και 150.51 MPa μειώθηκαν σε σχέση με την αντοχή του δοκιμίου αναφοράς κατά 28.48% και 38.09%, αντίστοιχα.



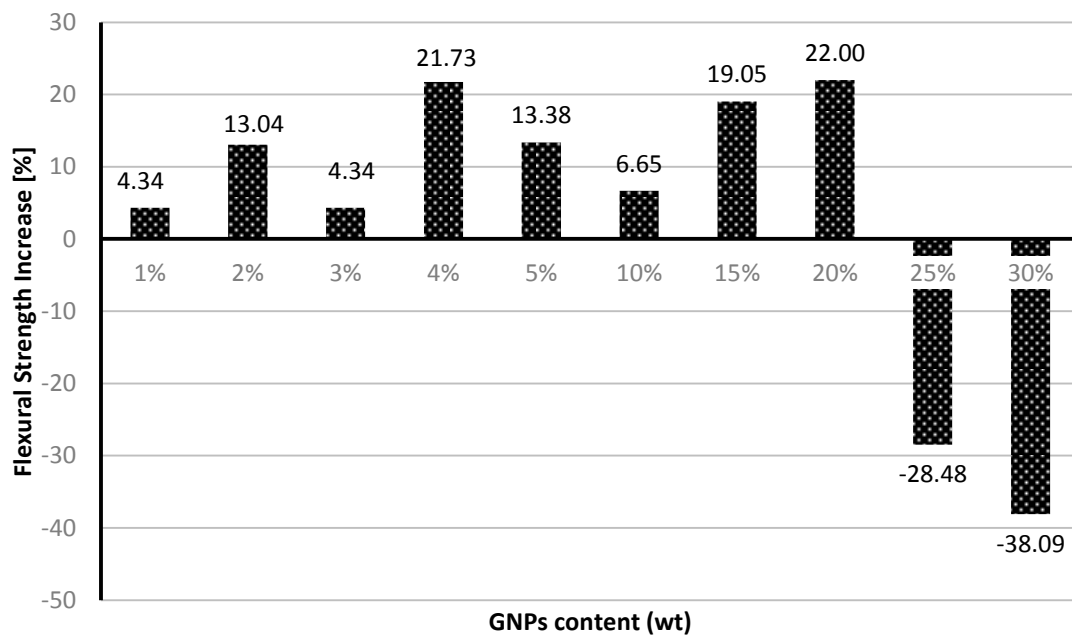
Σχήμα 22. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] από 0% έως 5% wt GNPs.



Σχήμα 23. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] από 0% έως 30% wt GNPs.



Σχήμα 24. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών με μονοδιευθυντική ενίσχυση με βάση την περιεκτικότητα σε GNPs.

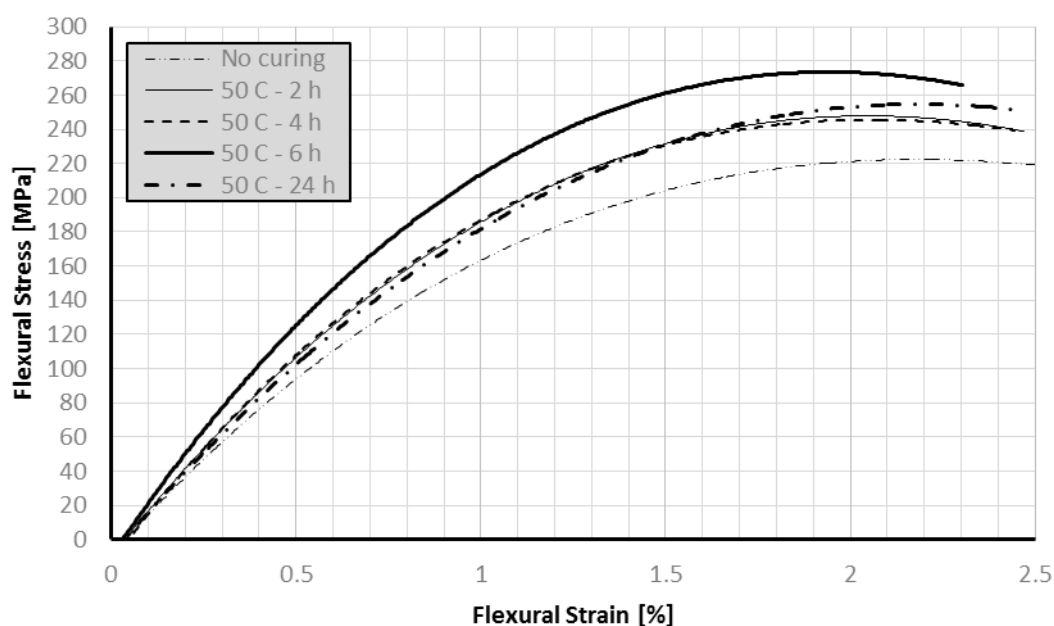


Σχήμα 25. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης/μείωσης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο χωρίς νανοπροσθήκες (0% wt GNPs).

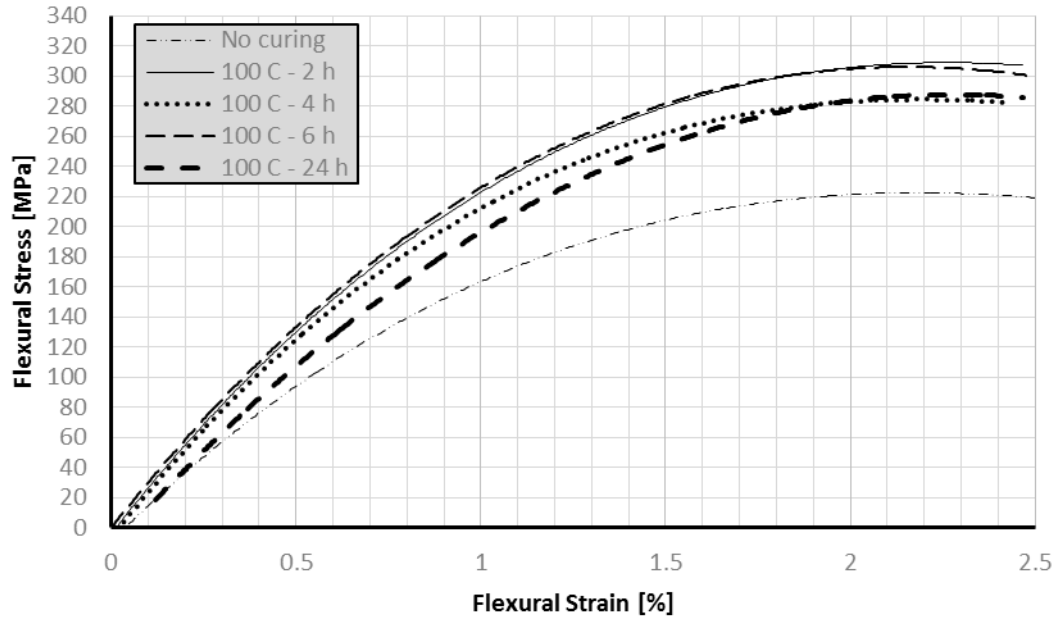
8.3 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κατόπιν post-curing

Τα πειράματα κάμψης των δοκιμίων δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing) πραγματοποιήθηκαν κατά το πρότυπο ASTM D790-03. Για τις ανάγκες των πειραμάτων παρασκευάστηκαν πολυστρωματικά δοκίμια (ίδιας εποξικής μήτρας) ενισχυμένα με μονοδιευθυντικό υαλοϋφασμα σε διάταξη [0/90/0/90] με περιεκτικότητα 2% σε GNPs και αφού αφέθηκαν για σκλήρυνση σε συνθήκες δωματίου (25°C) για επτά ημέρες τοποθετήθηκαν σε εργαστηριακό κλίβανο για 2, 4, 6 και 24 ώρες στους 50°C και 100°C, αντίστοιχα. Μετά το τέλος του χρόνου του post-curing τα δοκίμια αφέθηκαν στο περιβάλλον του φούρνου για αργή ψύξη, προκειμένου να μην προκληθεί θερμικό σοκ στο υλικό της μήτρας του συνθέτου υλικού από την έντονη αλλαγή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ως μέτρο σύγκρισης της επίδρασης του post-curing στις μηχανικές ιδιότητες του πολυστρωματικού υλικού χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ίδιων χαρακτηριστικών με των υπολοίπων, που δεν υποβλήθηκαν όμως σε ειδικούς κύκλους θερμικής θεραπείας (no curing), παρά αφέθηκαν για σκλήρυνση σε συνθήκες δωματίου για επτά ημέρες. Παρακάτω ακολουθούν τα συγκριτικά διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης που ελήφθησαν από τα πειράματα κάμψης.

8.3.1 Συγκριτικά διαγράμματα διάρκειας post-curing

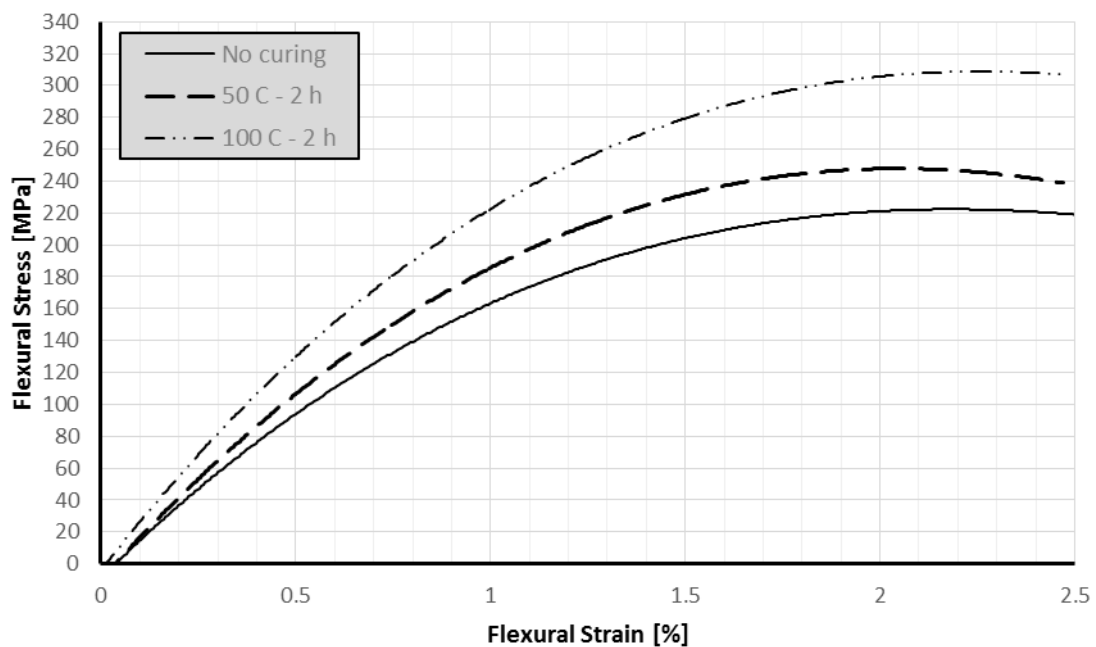


Σχήμα 26. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50°C για 2, 4, 6 και 24 ώρες.

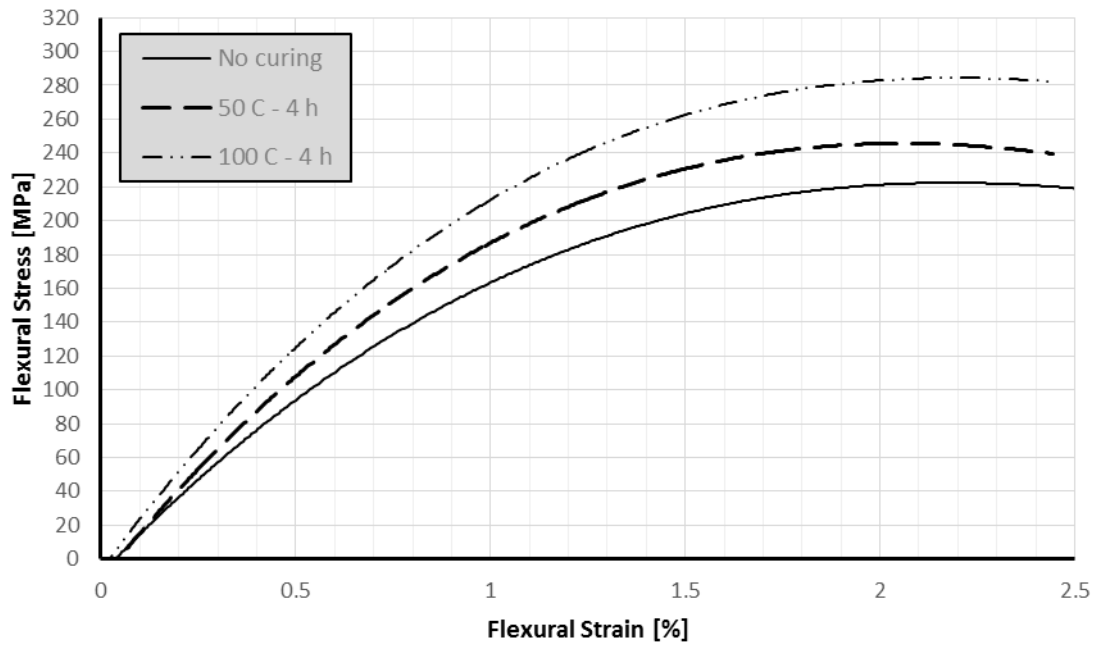


Σχήμα 27. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 100°C για 2, 4, 6 και 24 ώρες.

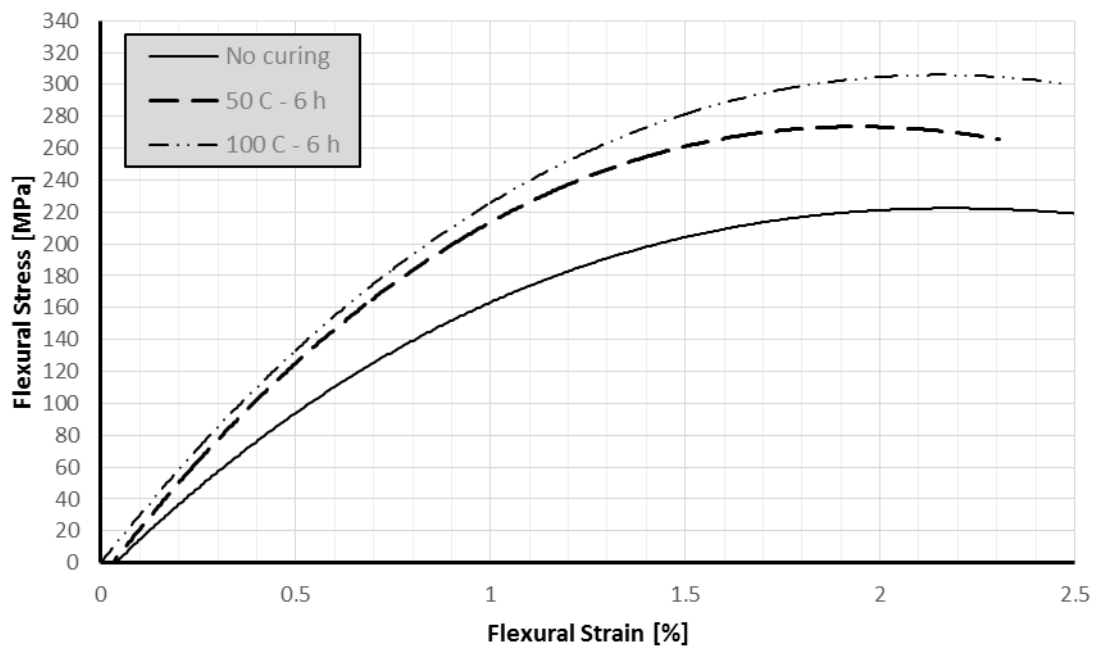
8.3.2 Συγκριτικά διαγράμματα θερμοκρασίας post-curing



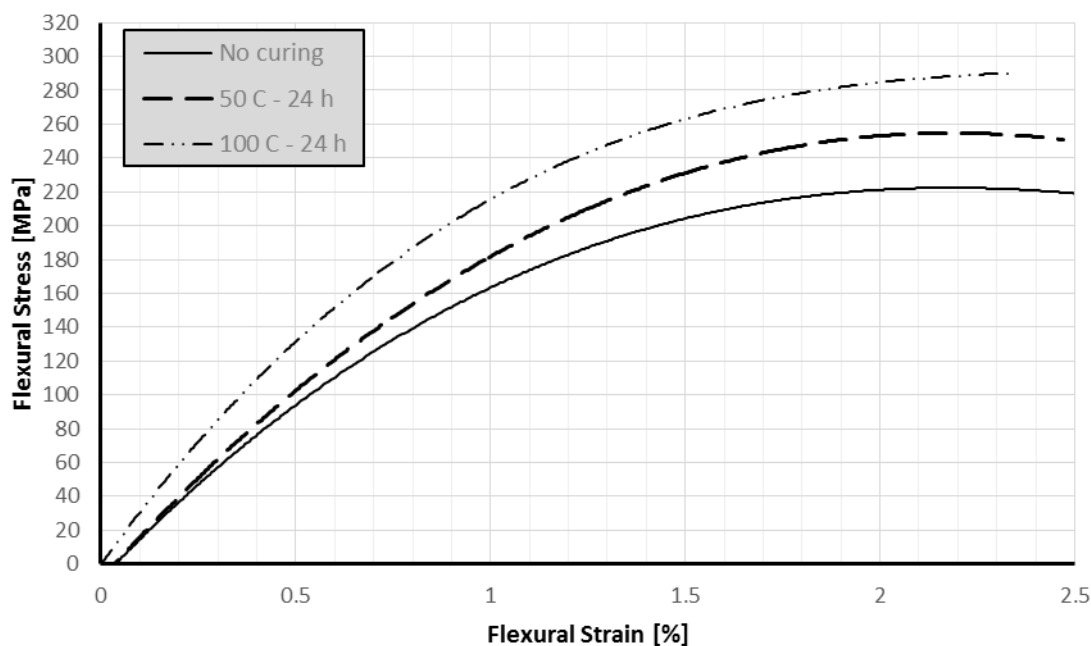
Σχήμα 28. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50°C και 100°C για 2 ώρες.



Σχήμα 29. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50οC και 100οC για 4 ώρες.



Σχήμα 30. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50οC και 100οC για 6 ώρες.



Σχήμα 31. Συγκριτικό διάγραμμα κάμψης τάσης - παραμόρφωσης δοκιμίων μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και 2% GNPs (wt) κατόπιν θερμικής θεραπείας στους 50οC και 100οC για 24 ώρες.

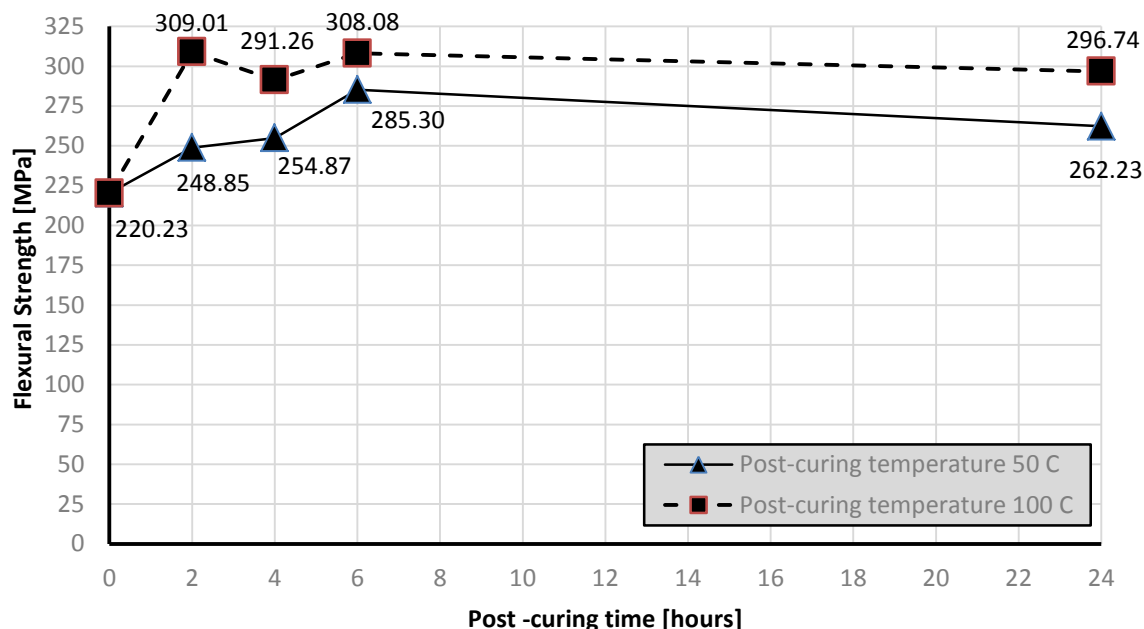
8.3.3 Επίδραση του post-curing στην αντοχή σε κάμψη

Από τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης (κάμψης) των δοκιμίων με μονοδιευθυντική ενίσχυση διάταξης [0/90/0/90] και με 2% w.t. GNPs, κατόπιν θερμικής θεραπείας 2, 4, 6 και 24 ωρών στους 50°C και στους 100°C προέκυψαν τα εξής σε σχέση με αυτά που η σκλήρυνση τους έγινε σε συνθήκες δωματίου:

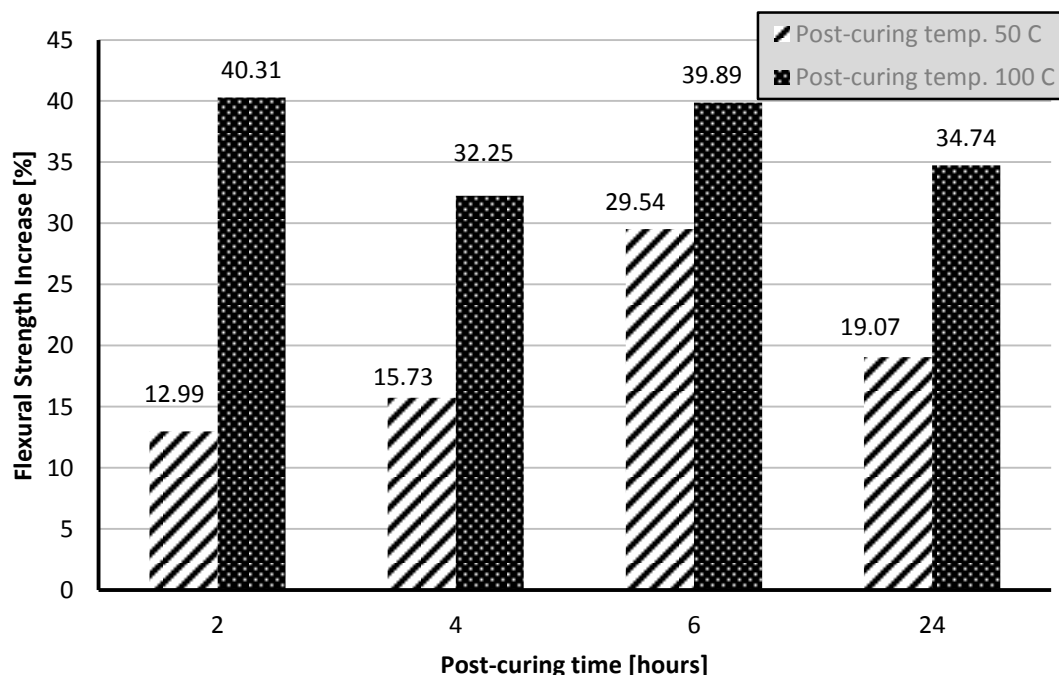
- ✓ Όλοι οι κύκλοι post-curing στους 50°C και στους 100°C προκάλεσαν αύξηση της αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων, συνολικά από 12.99% έως και 40.31%, δείχνοντας έτσι πως με τον τυπικό κύκλο θεραπείας των επτά ημερών σε θερμοκρασία δωματίου δεν έχει επέλθει η πλήρης σκλήρυνση του συνθέτου υλικού.
- ✓ Ήδη μετά από δύο ώρες post-curing στους 50°C και στους 100°C, η αντοχή σε κάμψη ανέβηκε από τα 220.23 MPa στα 248.85 και 309.01 MPa για τους δύο κύκλους αντίστοιχα.
- ✓ Το post-curing στους 100°C έφερε συνολικά μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής σε κάμψης σε όλους τους κύκλους, επιτυγχάνοντας μέγιστη τιμή 309.01 MPa μετά

από δύο ώρες post-curing, η οποία διατηρείται σχεδόν σταθερή και στους κύκλους των 4,6 και 24 ωρών (296.74 MPa).

- ✓ Το post-curing στους 50°C εμφάνισε μέγιστη αντοχή στον κύκλο των έξι ωρών με 285.30 MPa, που αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 29.54% της αντοχής, ενώ στις 24 ώρες θεραπείας η αντοχή έπεσε στα 262.23 MPa (αύξηση κατά 19.07%).



Σχήμα 32. Συγκριτικό διάγραμμα τιμών αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και με 2% GNPs (wt) αναλόγως της θερμοκρασίας και της διάρκειας της θερμικής θεραπείας.



Σχήμα 33. Γραφική απεικόνιση ποσοστιαίας αύξησης της αντοχής σε κάμψη δοκιμών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης [0/90/0/90] και με 2% GNPs (wt) σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο που δεν υποβλήθηκε σε θερμική θεραπεία.

8.4 Μικροσκοπικός έλεγχος δοκιμίων

Πριν και μετά τα πειράματα, τα δοκίμια οδηγήθηκαν για μικροσκοπικό έλεγχο σε στερεοσκόπιο και οπτικό μικροσκόπιο (Leica DMR) για παρατήρηση τόσο μορφολογικών ελαττωμάτων, όπως το πορώδες, όσο και για έλεγχο της διασποράς των νανοδομών γραφενίου (GNPs), της ποιότητας εμποτισμού ή των χαρακτηριστικών στην περιοχή αστοχίας του συνθέτου υλικού. Παρακάτω ακολουθούν ορισμένες παρατηρήσεις που σημειώθηκαν κατά τον μικροσκοπικό έλεγχο και οι σχετικές εικόνες. Σημειώνεται πως οι εικόνες έχουν επεξεργαστεί με το πρόγραμμα ImageJ2x για την τοποθέτηση κλίμακας στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 70. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των δοκιμίων: Στερεοσκόπιο (a) και οπτικό μικροσκόπιο (b) για την παρατήρηση της μορφολογίας των συνθέτων υλικών, της διασποράς των εγκλεισμάτων και την ποιότητα εμποτισμού.

- **Πορώδες**

Με χαμηλή ακόμη μεγέθυνση (x5) αποκαλύπτεται η ύπαρξη πορώδους κατά τη διατομή του υλικού. Το πορώδες αυτό οφείλεται τόσο σε εγκλείσματα αέρα που εγκλωβίστηκαν κατά την ανάδευση του υλικού της μήτρας ή κατά την παρασκευή του συνθέτου υλικού. Η ύπαρξη πορώδους οδηγεί σε υποβάθμιση της αντοχής του

υλικού, καθώς σε εκείνα τα σημεία προκαλείται συγκέντρωση τάσεων και ταυτόχρονα μειώνεται η ενεργός διατομή του υλικού.

- **Στρώσεις συνθέτου υλικού**

Επίσης στις μικροσκοπικές απεικονίσεις χαμηλής μεγέθυνσης φαίνεται πως οι στρώσεις του υφάσματος ενίσχυσης ξεχωρίζουν μεταξύ τους από το διαφορετικό ανάγλυφο της επιφάνειάς τους. Οι στρώσεις με τις ίνες τους να διέρχονται από την επίπεδο των εικόνων βρίσκονται τοποθετημένες με κάποιο γωνία ως προς το επίπεδο αυτό, ενώ οι στρώσεις όπου φαίνονται επιμήκεις παράλληλες γραμμές και ένα ραβδωτό ανάγλυφο έχουν τοποθετηθεί παράλληλα με το επίπεδο της εικόνας, αφού οι ίνες τους φαίνονται κατά μήκος.

- **Χαρακτηριστικά αστοχίας**

Ένας από τους συνήθεις μηχανισμούς αστοχίας πολυστρωματικών συνθέτων υλικών ενισχυμένων με ίνες είναι η αποκόλληση στρώσης. Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο αποκολλάται ένα νήμα ινών από το πολυμερικό υλικό της μήτρας. Από το οπτικό μικροσκόπιο και το στερεοσκόπιο ελήφθησαν απεικονίσεις διατομών δοκιμίων μακριά από τη ζώνη φόρτισης (σε κάμψη) και απεικονίσεις αποκόλλησης στρώσης στη ζώνη φόρτισης του υλικού. Μακριά από τη ζώνη φόρτισης ή πριν την καταπόνηση, το πολυστρωματικό σύνθετο εμφανίζει μια ομοιογενή εικόνα κατά τη διατομή του, όπου τα νήματα φαίνονται να είναι πλήρως ενσωματωμένα στη μήτρα. Αντίθετα, στην περίπτωση της αποκόλλησης στρώσης ή νήματος, εμφανίζεται ένα ξεκάθαρο όριο στην περιοχή αλλαγής των στρώσεων ή γύρω από το νήμα. Τέλος, ακολουθούν και εικόνες δοκιμίων κατόπιν καταπόνησης, όπου απεικονίζεται αποχρωματισμός επιφανείας, παραμόρφωση γωνιών πλέξης και θραύση ινών.

- **Ποιότητα εμποτισμού**

Επιπλέον των ιδιαίτερων μορφολογικών χαρακτηριστικών, ο έλεγχος των δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο, δίνει γενικά και μια εικόνα για την ποιότητα

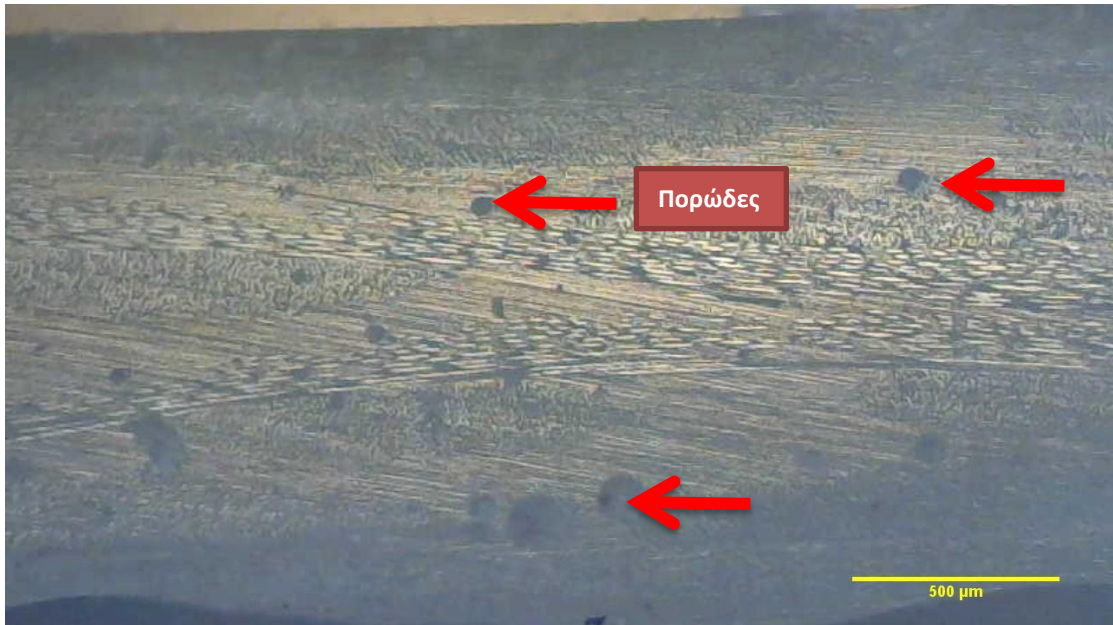
εμποτισμού του συνθέτου υλικού. Στις εικόνες που ακολουθούν, είναι εμφανές πως τα σύνθετα υλικά που παρήχθησαν διαθέτουν καλή ποιότητα εμποτισμού, όπως φαίνεται από το γεγονός πως το υλικό της μήτρας εμφανίζει μια ομοιογενή εικόνα πλήρωσης τόσο μεταξύ των στρώσεων των υφασμάτων ενίσχυσης όσο και μεγάλο βάθος εμποτισμού εντός των νημάτων και ανάμεσα από τις ίνες τους.

- **Διασπορά νανοεγκλεισμάτων**

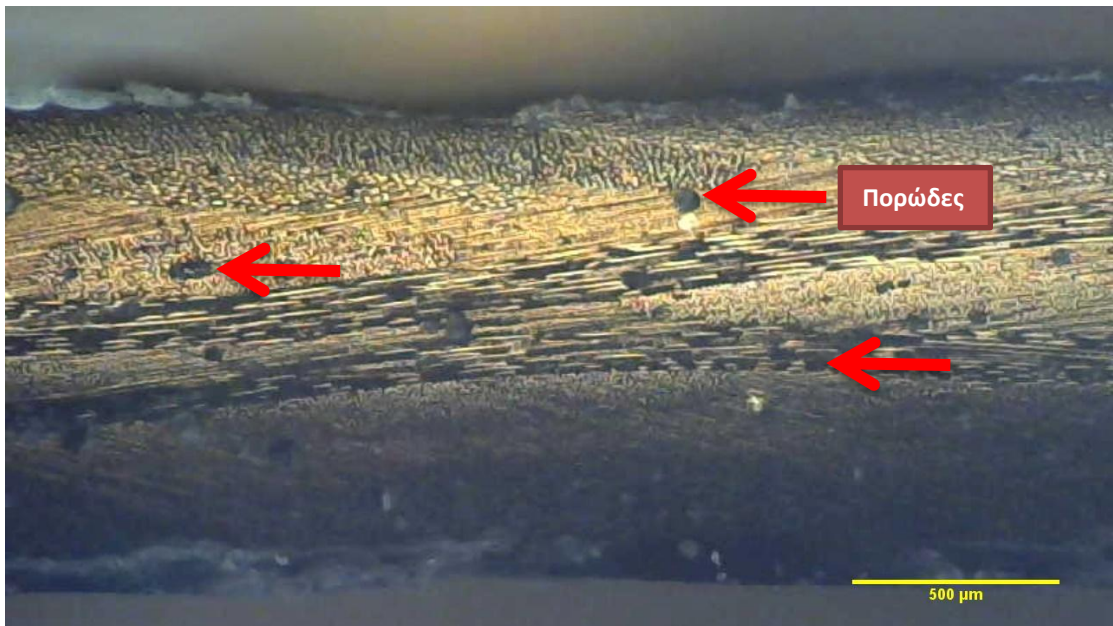
Πέρα από την ποιότητα και το βάθος εμποτισμού, άλλη μια ιδιαίτερη παράμετρος στα σύνθετα υλικά με εγκλείσματα αφορά τη διασπορά των εγκλεισμάτων, καθώς και την τάση τους, ειδικά των νανοσωματιδίων, να δημιουργούν συσσωματώματα μέσα στο υλικό της μήτρας. Παρακάτω τονίζονται τα εγκλείσματα, καθώς και η θέση τους είτε στο περιβάλλον της μήτρας είτε εντός των νημάτων.

- **Συσσωματώματα γραφενίου (aggregates)**

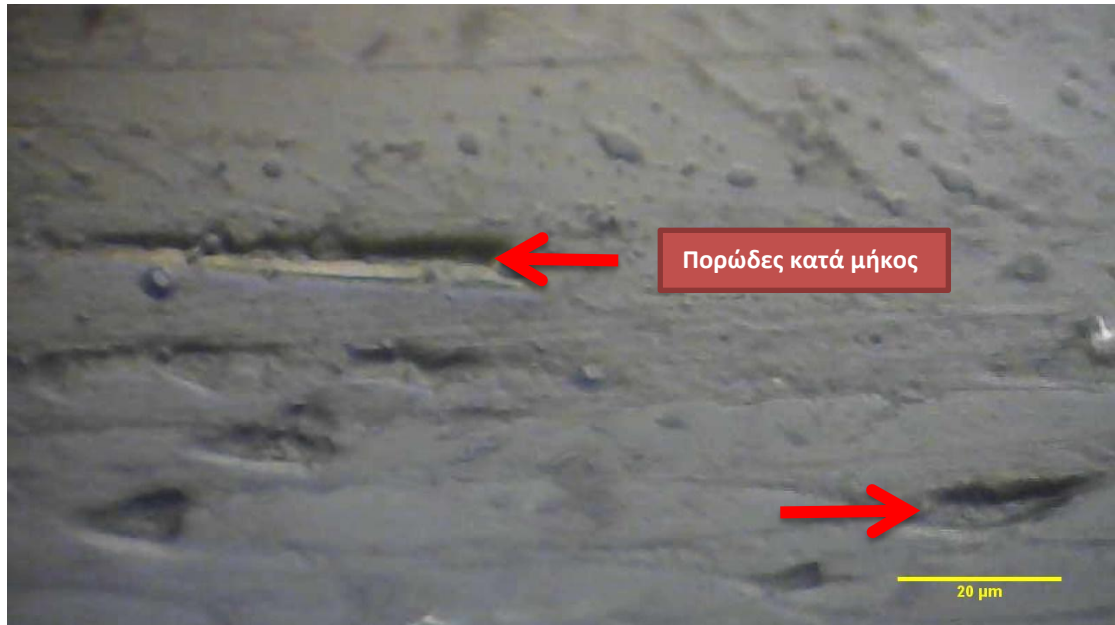
Τέλος, παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές όψεις συσσωματωμάτων γραφενίου εντός του υλικού της μήτρας. Αξίζει να αναφερθεί, πως η δημιουργία συσσωματωμάτων είναι ελάττωμα, καθώς δεν γίνεται πλήρη εκμετάλλευση της μεγάλης επιφάνειας των νανοεγκλεισμάτων (GNPs) και δημιουργούνται σημεία συγκέντρωσης τάσεων. Παρακάτω ακολουθούν οι εικόνες που περιγράφηκαν παραπάνω.



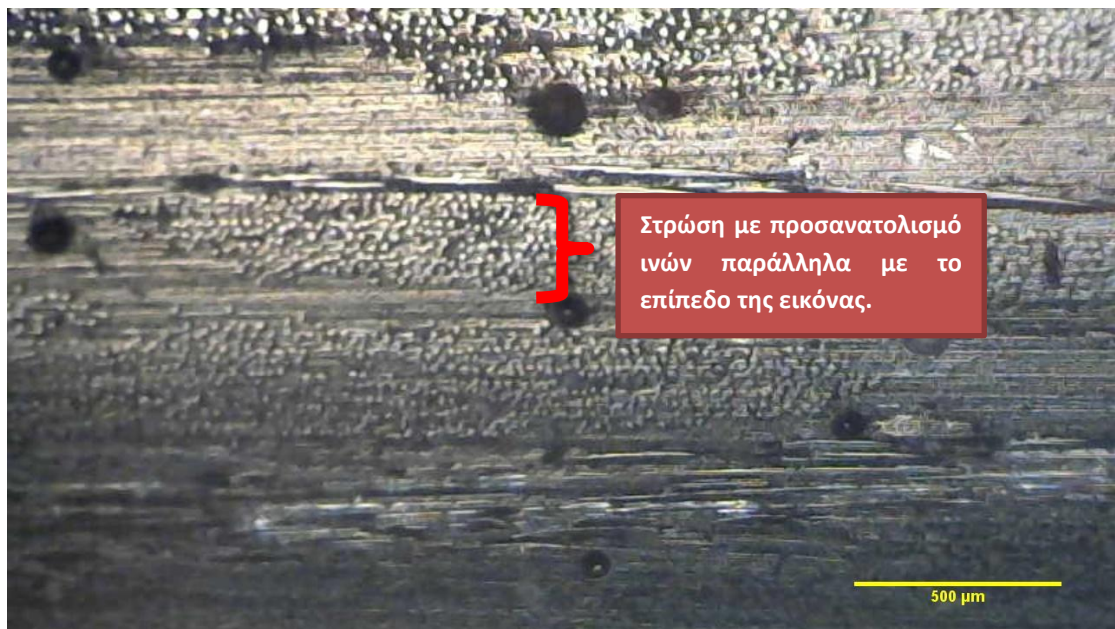
Εικόνα 71. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού χωρίς νανοπροσθήκες με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45]. Πορώδες στη μήτρα του υλικού και ορατές στρώσεις υφασμάτων.



Εικόνα 72. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs. Πορώδες στο σύνθετο υλικό.



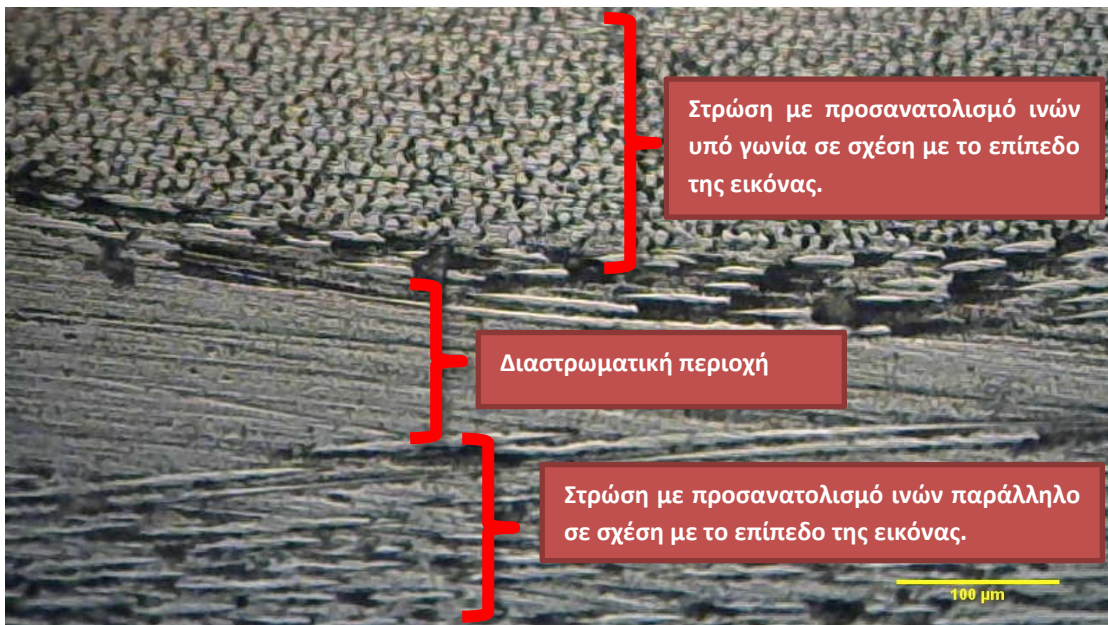
Εικόνα 73. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση $\times 100$) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs. Ορατό πορώδες (κατά μήκος τομή).



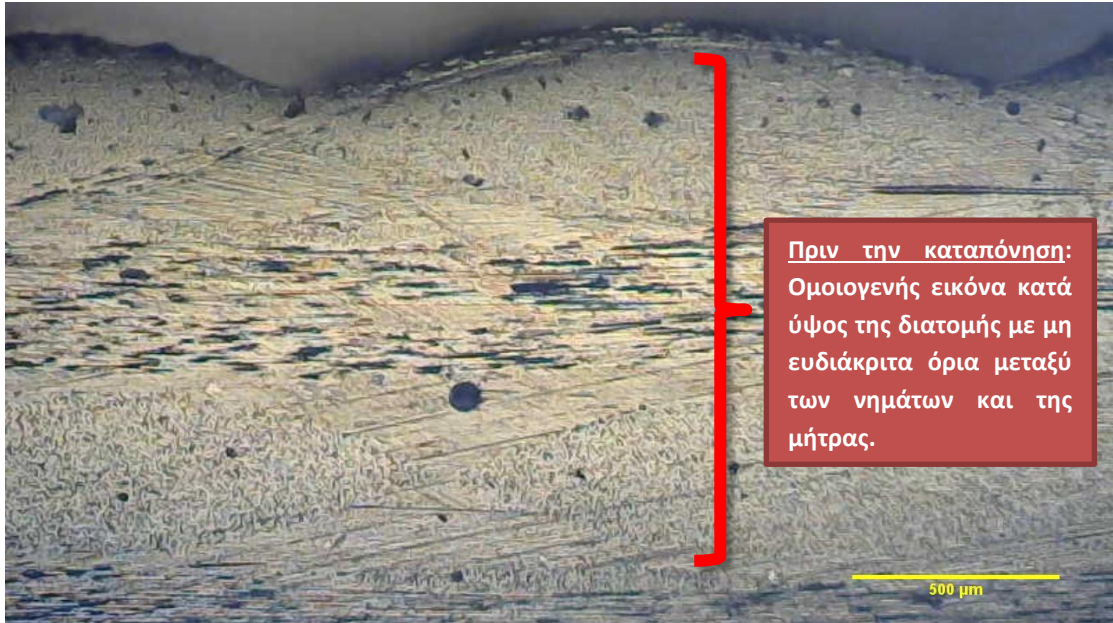
Εικόνα 74. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση $\times 5$) εγκάρσιας διατομής συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.



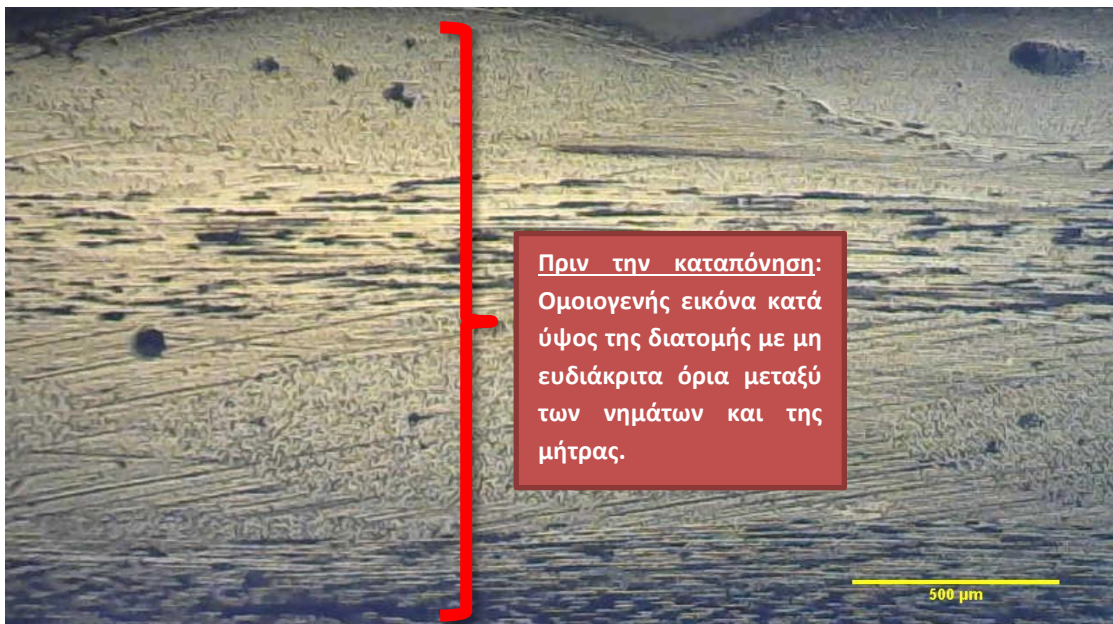
Εικόνα 75. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.



Εικόνα 76. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.



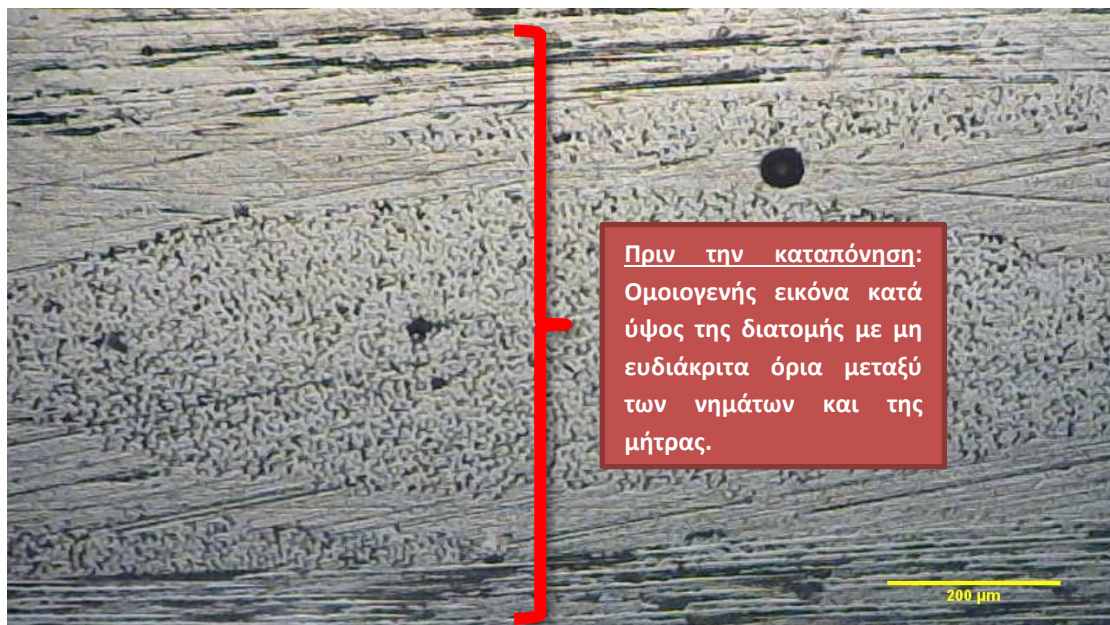
Εικόνα 77. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.



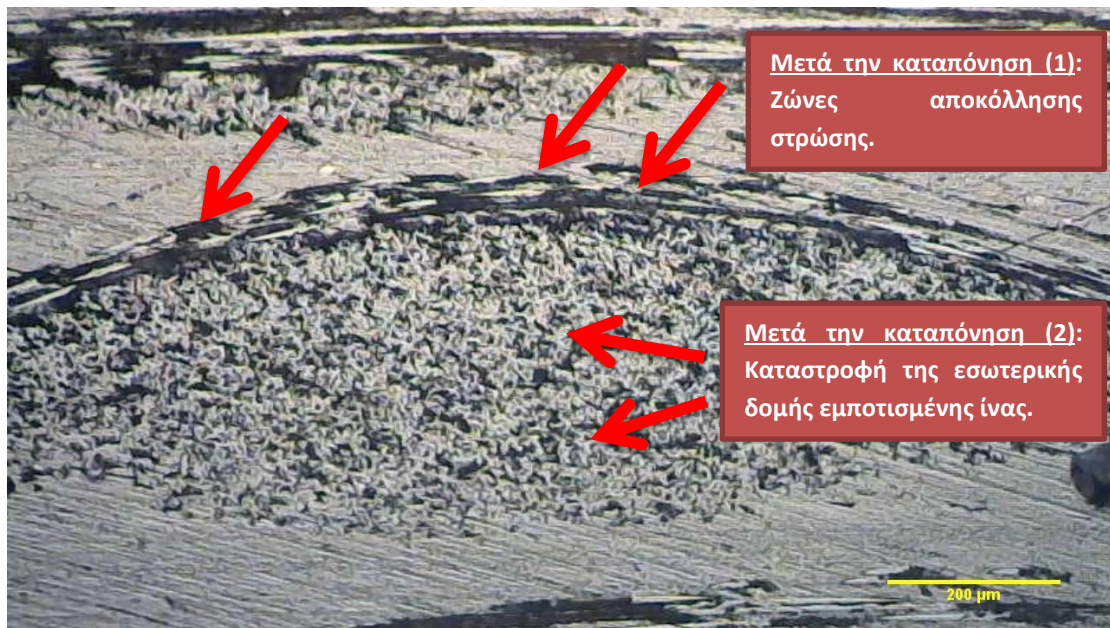
Εικόνα 78. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.



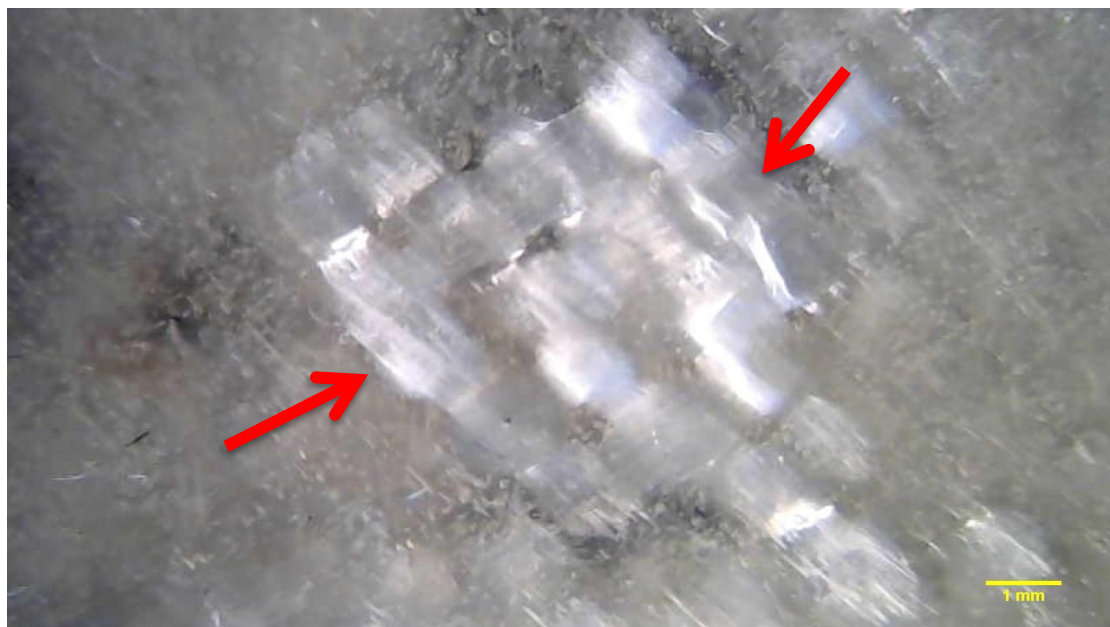
Εικόνα 79. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs κατόπιν καμπτικής καταπόνησης.



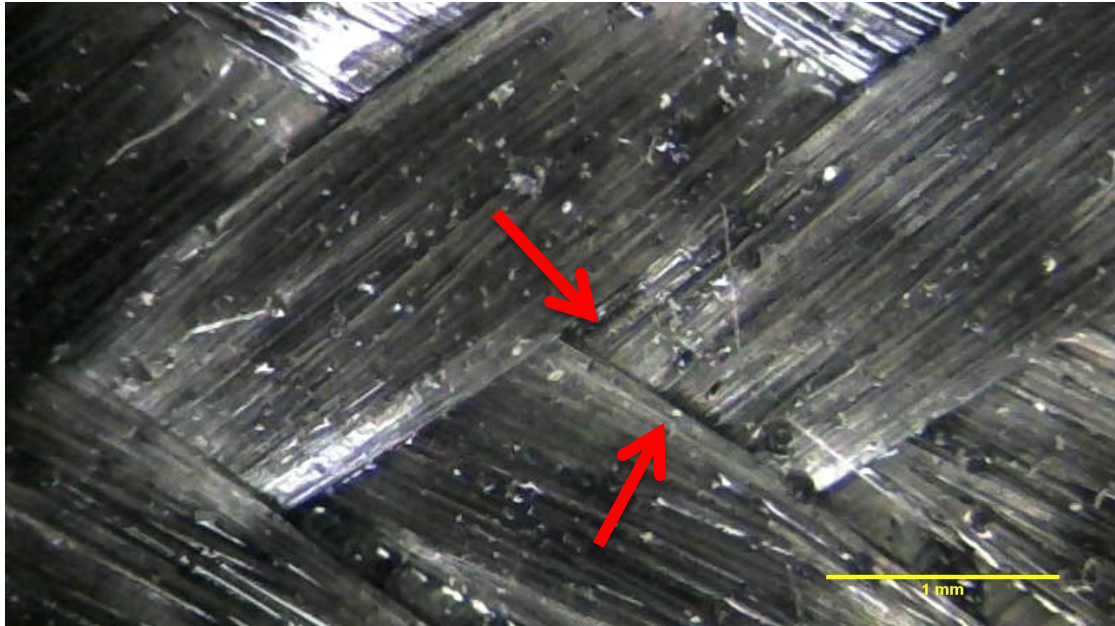
Εικόνα 80. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs που δεν έχει καταπονηθεί.



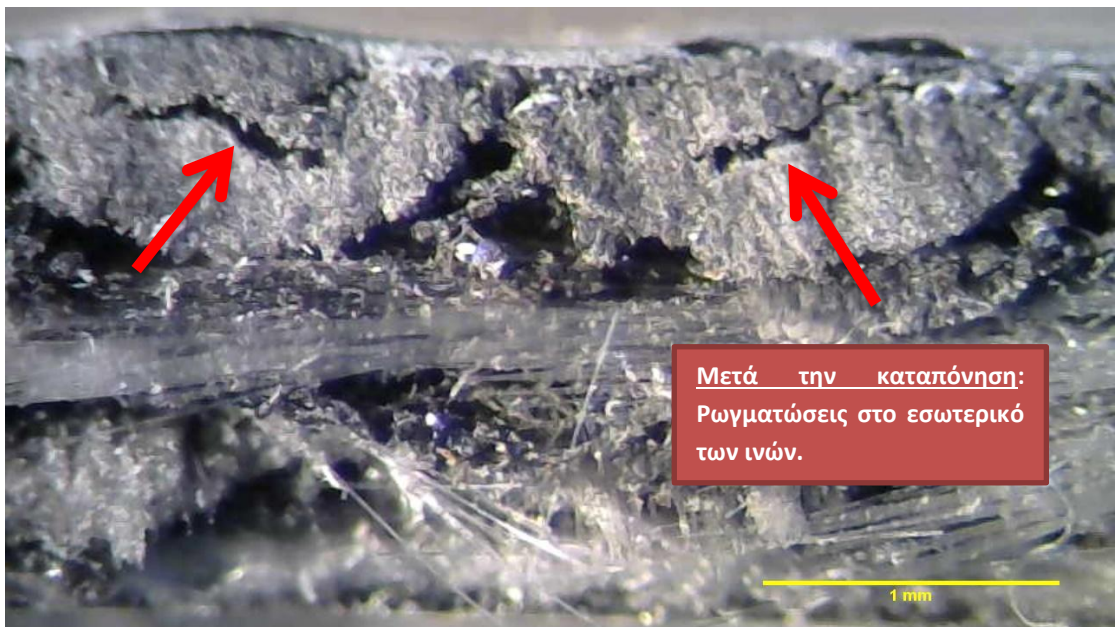
Εικόνα 81. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x10) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs κατόπιν καμπτικής καταπόνησης.



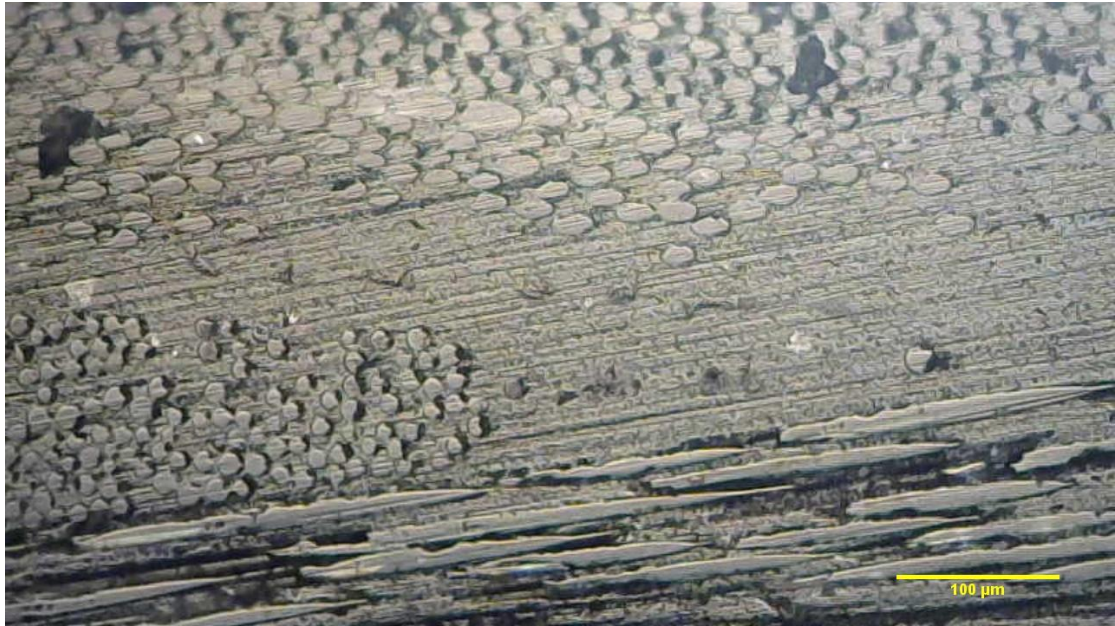
Εικόνα 82. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x0.63) συνθέτου υλικού χωρίς νανοδομές με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45]. Αποχρωματισμός μετά από καταπόνηση.



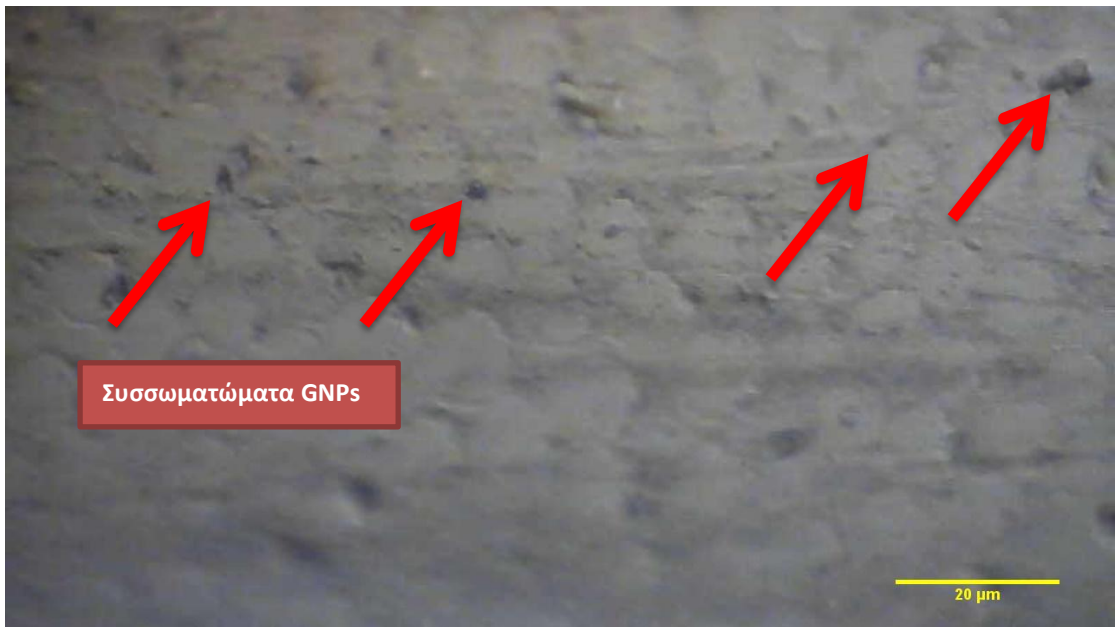
Εικόνα 83. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x2) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs κατόπιν καταπόνησης. Παραμόρφωση πλέξης.



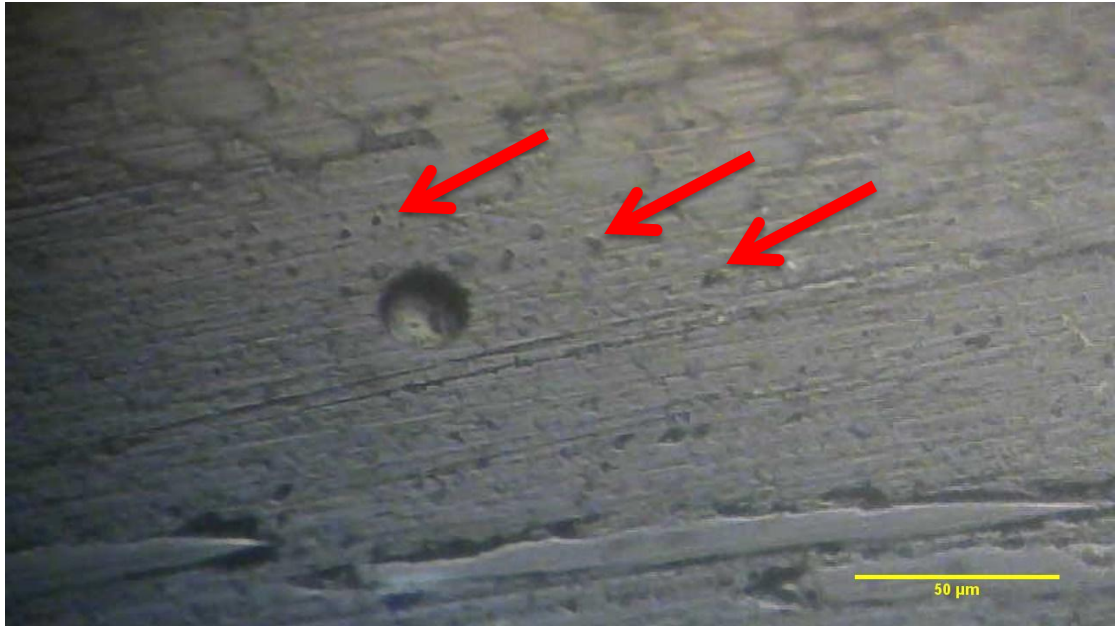
Εικόνα 84. Άποψη από στερεοσκόπιο (μεγέθυνση x2.5) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση διάταξης [0/90/0/90] και 4% w.t. GNPs. Ρωγματώσεις στο εσωτερικό των ινών.



Εικόνα 85. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x20) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.



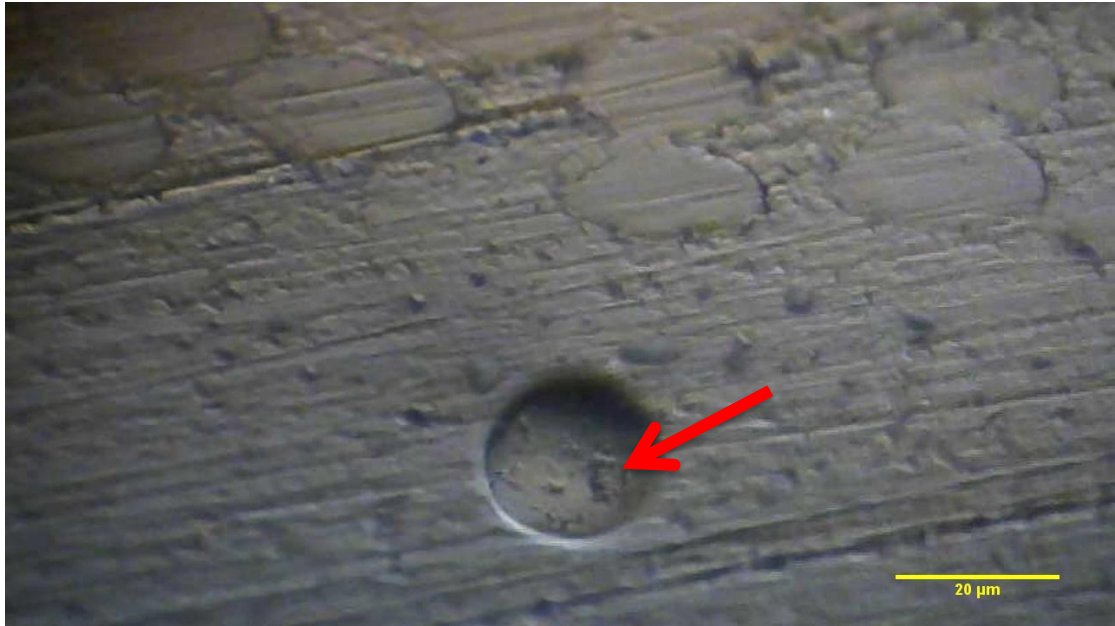
Εικόνα 86. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs. Είναι εμφανής η ομοιόμορφη διασπορά των νανοδομών γραφενίου. Παρατηρούνται αραιά συσσωματώματα.



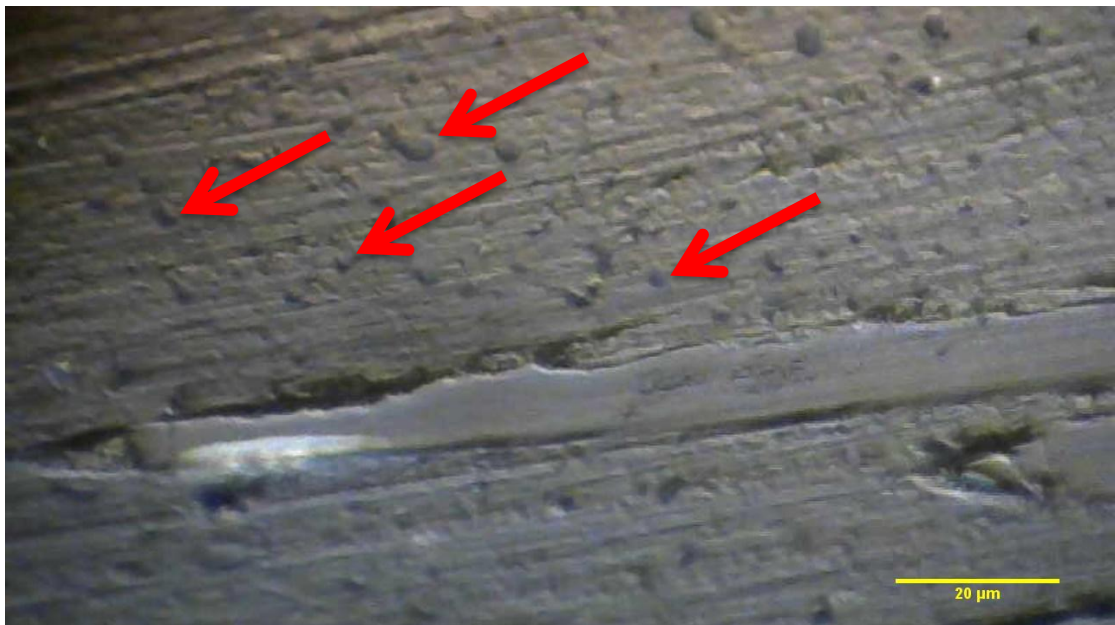
Εικόνα 87. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs. Είναι εμφανής η ομοιόμορφη διασπορά των νανοδομών γραφενίου. Παρατηρούνται αραιά συσσωματώματα



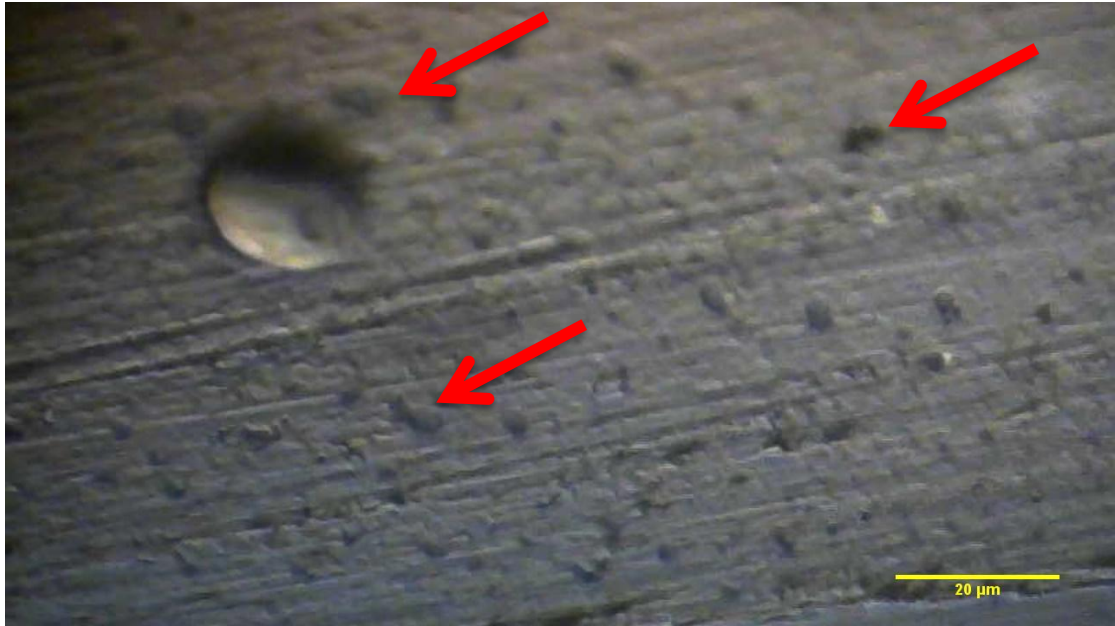
Εικόνα 88. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.



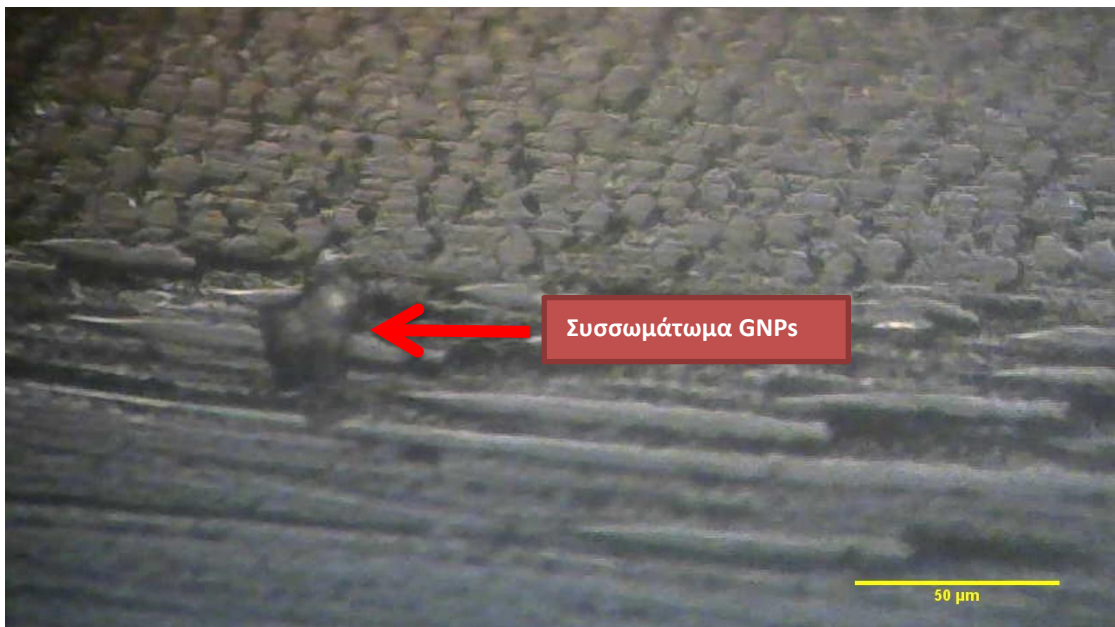
Εικόνα 89. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.



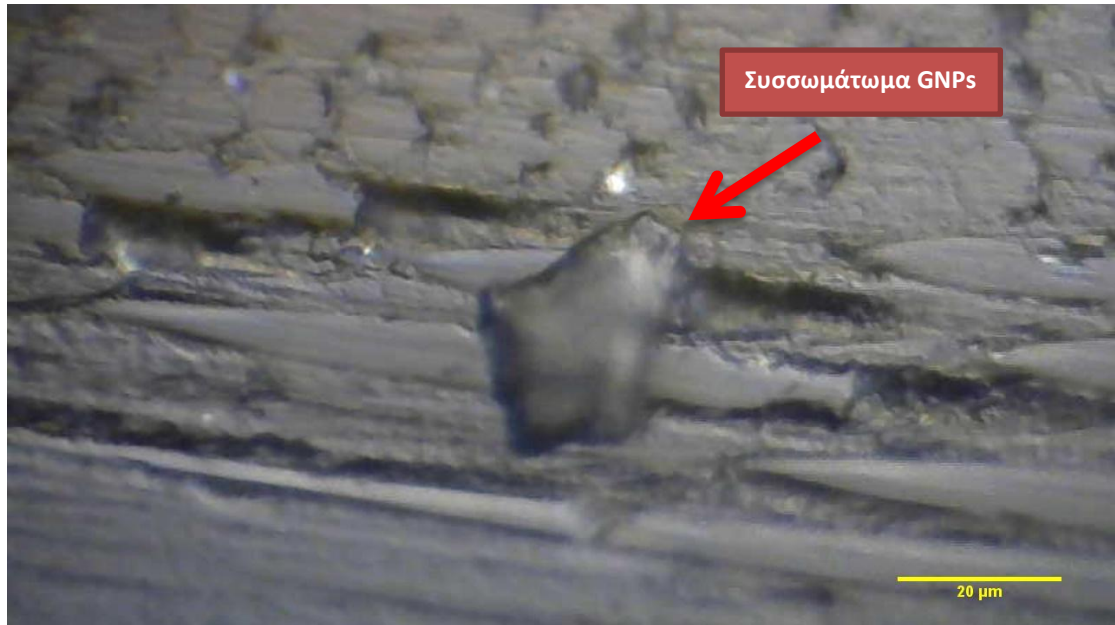
Εικόνα 90. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.



Εικόνα 91. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] και 2% w.t. GNPs.



Εικόνα 92. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x50) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.



Εικόνα 93. Άποψη από οπτικό μικροσκόπιο (μεγέθυνση x100) συνθέτου υλικού με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] και 1% w.t. GNPs.

9. Κεφάλαιο: Συμπεράσματα δοκιμών και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

9.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από πειράματα

Παρακάτω ακολουθεί μια σύνοψη και σύγκριση των αποτελεσμάτων που έδωσαν τα πειράματα εφελκυσμού και κάμψης των δοκιμίων από σύνθετο υλικό εποξικής μήτρας με ενίσχυση υαλοϋφάσματος Twill 2x2 και unidirectional (μονοδιευθυντική πλέξη), καθώς και με προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs). Συνολικά, λοιπόν, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- **Ως προς την πλέξη**

Η μονοδιευθυντική πλέξη είναι αρκετά πιο σταθερή και ικανή να παραλάβει μεγάλα φορτία σε σχέση με την Twill 2x2, καθώς ήδη τα δοκίμια αναφοράς χωρίς νανοπροσθήκες γραφενίου σημείωσαν στον εφελκυσμό τιμές αντοχής 303.17 MPa (UD – [0/90/0/90]), αντίθετα από τα 175.54 MPa που σημείωσαν τα δοκίμια ενισχυμένα με Twill 2x2 [45/0/0/-45], μια τιμή μειωμένη κατά 42% σε σχέση με το μονοδιευθυντικό δοκίμιο. Η ίδια εικόνα διατηρήθηκε και στην κάμψη, όπου το μονοδιευθυντικό δοκίμιο αναφοράς αστόχησε στα 243.11 MPa, ενώ τα δοκίμια αναφοράς (0% w.t. GNPs) με ενίσχυση Twill 2x2 σε διάταξη [45/0/0/-45] και [45/-45/45/-45] αστόχησαν στα 130.57 MPa (τιμή μειωμένη κατά 46%) και 116.99 MPa (τιμή μειωμένη κατά 52%), αντίστοιχα.

- **Ως προς την περιεκτικότητα σε GNPs κατά τον εφελκυσμό**

Στις δοκιμές εφελκυσμού των δοκιμίων με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45], η προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) έφερε αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από 8.32% έως και 16.32%, αυξάνοντας έτσι την αντοχή από τα 175.54 MPa στα

190.15 MPa (5% w.t. GNPs) ή στα 204.19 MPa (20% w.t. GNPs), αντίστοιχα. Ταυτόχρονα αυξήθηκε και η επιμήκυνση θραύσης από το 3.61% στο 5.59%, και το μέτρο ελαστικότητας από τα 4.08 GPa στα 6.10 GPa.

Ο εφελκυσμός των δοκιμίων με μονοδιευθυντική ενίσχυση [0/90/0/90] έδειξε πως η προσθήκη νανοδομών γραφενίου δεν έχει θετική επίδραση στις τιμές αντοχής του συνθέτου υλικού, καθώς μόνο η περιεκτικότητα των 5% w.t. GNPs έδειξε μια αύξηση της τάξεως των 5.19% (από τα 303.17 MPa στα 318.92 MPa), σε όλες τις υπόλοιπες περιεκτικότητες εμφανίστηκε μείωση από 5.14% (10% w.t. GNPs) έως 36.47% (25% w.t. GNPs). Όσον αφορά την επιμήκυνση θραύσης αυτή από το 6.67% ανέβηκε ελαφρώς σε ορισμένες περιεκτικότητες, όπως στην περίπτωση των 2% w.t. GNPs με παραμόρφωση 8.28% (μέγιστη τιμή) ή των 10% και 30% w.t. GNPs με παραμόρφωση θραύσης 7.67% και 7.35%, αντίστοιχα. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, επίσης δεν ενισχύεται από τις προσθήκες νανοδομών, καθώς το αρχικό των 8.26 GPa (0% w.t. GNPs) μειώνεται με την προσθήκη GNPs φτάνοντας στην ακραία περίπτωση των 25% και 30% w.t. GNPs με 4.60 GPa και 5.53 GPa, αντίστοιχα. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση των 5% w.t. GNPs με 8.25 GPa.

- **Ως προς την περιεκτικότητα σε GNPs κατά την κάμψη**

Η προσθήκη νανοδομών γραφενίου είχε θετική επίδραση στην αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια με ενίσχυση Twill 2x2 [45/0/0/-45] παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής από τα 130.57 MPa (δοκίμιο αναφοράς) κατά 19.15% με προσθήκη 1% w.t. GNPs, φτάνοντας έως και τα 313.78 MPa με προσθήκη 15% w.t. GNPs (αύξηση κατά 140.31%). Στην πράξη, επαρκεί ήδη η περιεκτικότητα των 5% w.t. GNPs για μια αύξηση της αντοχής κατά 132.91% (αστοχία στα 304.12 MPa).

Αντίστοιχα και τα δοκίμια με ενίσχυση Twill 2x2 [45/-45/45/-45] επωφελήθηκαν στην αντοχή σε κάμψη από την προσθήκη GNPs, αφού η αντοχή τους αυξήθηκε από τα 116.99 MPa στα 133.23 MPa στην περίπτωση των προσθηκών 1% και 3% w.t. GNPs, σημειώνοντας αύξηση της αντοχής κατά 13.88%. Σε αυτό σημείο αξίζει να αναφερθεί πως στην περιοχή των περιεκτικοτήτων 1% έως 3% w.t. GNPs, η διάταξη [45/0/0/-45] έχει σαφές προβάδισμα στη βελτίωση της αντοχής της με την προσθήκη

GNPs, καθώς η προσθήκη 1%, 2% και 3% w.t. GNPs επιφέρει αύξηση της αντοχής κατά 19.15%, 79.93% και 41.35%, αντίστοιχα.

Στην περίπτωση της μονοδιευθυντικής ενίσχυσης (unidirectional) με διάταξη στρώσεων [0/90/0/90] παρατηρήθηκε μια κλιμακωτή βελτίωση της αντοχής του δοκιμίου αναφοράς με 243.11 MPa, η οποία φτάνει τη μέγιστη τιμή στην περίπτωση των 20% w.t. GNPs με 296.60 MPa (αύξηση κατά 22%). Βέβαια, ήδη η περιοχή των 4% και 5% w.t. GNPs αρκεί για αύξηση της αντοχής κατά 21.73% και 13.38%, αντίστοιχα, με 295.94 MPa και 275.64 MPa, αντίστοιχα. Ωστόσο, στις πλουσιότερες περιεκτικότητες των 25% και 30% w.t. GNPs, τα δοκίμια αστόχησαν νωρίτερα και από το δοκίμιο αναφοράς χωρίς την προσθήκη νανοδομών, μειώνοντας την αντοχή κατά 28.48% και 38.09%, αντίστοιχα. Σημειώνεται, πως συγκριτικά τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης της αντοχής με την προσθήκη νανοδομών γραφενίου στην περίπτωση ενίσχυσης Twill 2x2 [45/0/0/-45] είναι αρκετά υψηλότερα μέχρι τα 20% w.t. GNPs σε σχέση με αυτά των μονοδιευθυντικών ενισχύσεων.

- **Ως προς τη δευτερογενή θερμική θεραπεία (post-curing)**

Υπενθυμίζεται πως σε δευτερογενή θερμική θεραπεία (post-curing) υποβλήθηκαν μόνο δοκίμια με ενίσχυση μονοδιευθυντικού υαλοϋφάσματος και 2% w.t. GNPs, τα οποία καταπονήθηκαν μετά τη θερμική θεραπεία σε κάμψη. Όλοι οι κύκλοι post-curing στους 100°C επέφεραν μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής από τους κύκλους στους 50°C. Η αντοχή του δοκιμίου αναφοράς που αφέθηκε για σκλήρυνση για επτά ημέρες σε συνθήκες δωματίου (curing) εμφάνισε αντοχή 220.23 MPa. Μετά από μόλις δύο ώρες στους 100°C η αντοχή αυξήθηκε κατά 40.31% (309.01 MPa) σε σχέση με την αύξηση των 12.99% (248.85 MPa) της θεραπείας στους 50°C. Το post-curing στους 100°C φαίνεται να έχει σχετικά σταθερή θετική επιρροή με ελαφρώς φθίνουσα συμπεριφορά στην αντοχή του υλικού, προκαλώντας αύξηση της αντοχής κατά 32.25%, 39.89% και 34.74% για τις 4, 6 και 24 ώρες, αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα ποσοστά αύξησης μετά από 4, 6 και 24 ώρες στους 50°C είναι 15.73%, 29.54% (μέγιστη αύξηση) και 19.07%, όπου πάλι παρατηρήθηκε ελαφριά υποβάθμιση μετά από 24 ώρες post-curing σε σχέση με τη μέγιστη αντοχή που εμφανίστηκε νωρίτερα.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτά, προέκυψαν ορισμένα θέματα, τα οποία αξίζουν περαιτέρω προσοχής και ενδεχομένως έρευνας.

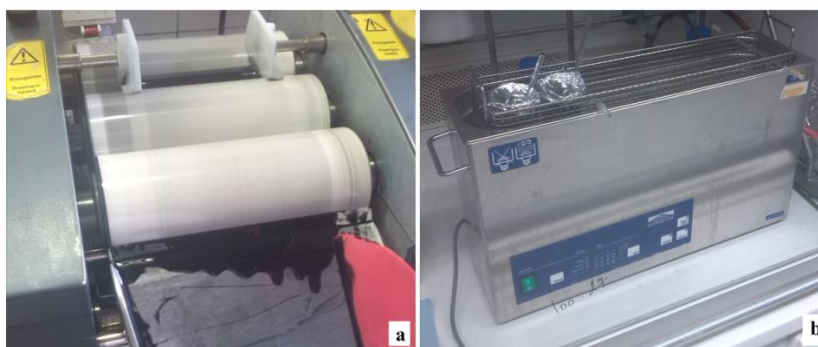
Καθώς ο μικροσκοπικός έλεγχος έδειξε την ύπαρξη πορώδους κατά τη διατομή του υλικού, πράγμα που σημαίνει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων, αποτελεί ενδιαφέρον θέμα η παρασκευή δοκιμίων, κατά την οποία έχουν ληφθεί μέτρα για τη μείωση του πορώδους, όπως η προσθήκη ειδικών αντιαφριστικών μέσων (defoamers και air release additives) για την απομάκρυνση εγκλεισμάτων αέρα. Άλλη μια μέθοδος για την απομάκρυνση αέρα αποτελεί η τοποθέτηση του μίγματος ρητίνης και νανοεγκλεισμάτων σε περιβάλλον κενού, όπου αναρροφάται ο αέρας από το υλικό, προτού αυτό επαλειφθεί στο ύφασμα ενίσχυσης. Παράλληλα, στο εμπόριο διατίθενται και ειδικά πρόσθετα για την καλύτερη διασπορά και προσκόλληση των νανοεγκλεισμάτων στη μήτρα του συνθέτου υλικού (wetting and dispersing additives), τα οποία δεν τοποθετήθηκαν στα δοκίμια της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται πως η διασπορά των νανοδομών και η αποφυλλοποίηση των συσσωματωμάτων επιτυγχάνεται και με μηχανικές μεθόδους, όπως η Three Rolls Mill ή με την τοποθέτηση του μίγματος ρητίνης σε λουτρό διεγερμένο από υπερήχους. Επίσης, η παρατήρηση των δοκιμίων με οπτικό μικροσκόπιο δεν επαρκεί για εις βάθος ανάλυση, ειδικά σε κλίμακα νανοδιαστάσεων. Ωστόσο, μέθοδοι όπως η SEM (scanning electron microscope) ή AFM (atomic force microscope) αποκαλύπτουν περισσότερες λεπτομέρειες για τις ιδιότητες και τη σύσταση του συνθέτου υλικού. [36]

Επίσης, για την εξαγωγή ακριβών συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της προσθήκης νανοδομών γραφενίου ή τη διάταξη των στρώσεων ενίσχυσης, προτείνεται και η παρασκευή συνθέτων υλικών με διαφορετικά νανοεγκλείσματα σε σχέση με αυτά που παρήχθησαν στην παρούσα εργασία, ακόμα και με διαφορετικό ύφασμα ή ίνες ενίσχυσης, ώστε να διαπιστωθεί η ακριβής επίδραση των συνιστωσών του υλικού στη συμπεριφορά του.

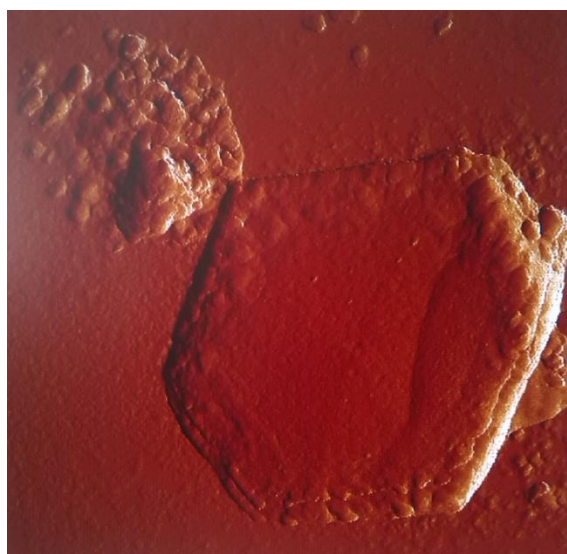
Το γραφένιο ως νανοέγκλεισμα συνθέτου υλικού εμπορικά δεν εφαρμόζεται αποκλειστικά για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Σε άλλες εφαρμογές

χρησιμοποιείται είτε για την ηλεκτρική ή την θερμική αγωγιμότητά του ή για την αντιβακτηριδιακή δράση του, επομένως μετά από κατάλληλες δοκιμές μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και προς αυτές τις κατευθύνσεις της επίδρασης του γραφενίου στις ιδιότητες του συνθέτου υλικού.

Τέλος, η μέθοδος εμποτισμού με το χέρι (Hand Lay-Up) μπορεί να προκαλέσει ελαττώματα στο σύνθετο υλικό, όπως ανομοιόμορφη εναπόθεση ρητίνης, ή φτωχό ή υπερβολικά πλούσιο εμποτισμό, φαινόμενα που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες του συνθέτου υλικού. Μια κατά πολύ ακριβέστερη μέθοδος εμποτισμού αποτελεί ο εμποτισμός σε κενό (VIP – vacuum infusion process), όπου βελτιστοποιείται η κατανομή της ρητίνης στον όγκο του υλικού, αλλά και η ποσότητά της που χρησιμοποιείται για τον εκάστοτε εμποτισμό, αφού κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο αναρροφάται συγκεκριμένη επαρκής ποσότητα ρητίνης για τον εμποτισμό του υλικού, με την περίσσεια να μπορεί να αποβληθεί κατά τον εμποτισμό. [38]



Εικόνα 94. Μέθοδοι διασποράς και αποφυλλοποίησης εγκλεισμάτων: Three Rolls Mill (a) και συσκευή λουτρού με υπερήχους (b).



Εικόνα 95. Εστίαση από AFM (atomic force microscope) σε τετραγωνική περιοχή πλευράς 22 μ m διατομής συνθέτου υλικού εποξικής μήτρας εμπλουτισμένης με τροποποιημένες γραφενικές νανοδομές (3% w.t.).

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Μανωλάκος, 2004, *Σημειώσεις μαθήματος Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2] Μ. Ε. Μητρούση, 2014, *Μελέτη της μεταβολής της απόσβεσης πολυμερών και σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοσωματιδίων*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Φυσικής Σχολής Θετικών Επιστημών Πανεπιστημίου Πατρών.
- [3] Δ. Ι. Παντελής, 2008, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- [4] P. K. Mallick, 2007, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [5] R. M. Jones, 1999, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd edition, Taylor & Francis.
- [6] ‘Polymer Composites’, viewed 29 May 2016, <<http://www.netcomposites.com/guide-tools/guide/introduction/polymer-composites>>
- [7] P.V. Cavallaro, 2011, *Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing and Ballistic Impact Dynamics*, NUWC-NPT Technical Report, Naval Undersea Warfare Center Division, Newport, Rhode Island, pp. 10-16.
- [8] J. W. S. Hearle, P. Grosberg, S. Backer, 1969, *Structural Mechanics of Fibers, Yarns, and Fabrics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [9] W. C. Smith, 1999, *High Performance And High Temperature Resistant Fibers*, Industrial Textile Associates, Greer USA.
- [10] D. Groves, 2013, *Back to the Future: Fibre Technologies*, National Composites Centre, United Kingdom.
- [11] N. Taniguchi, 1974, *On the Basic Concept of Nano-Technology*, Proceeding of the Production Engineering International Conference, Part II, Tokyo, Japan.
- [12] P. M. Ajayan, L. S. Schadler, P.V. Braun, 2003, *Nanocomposite Science and Technology*, Wiley Editions.
- [13] Ε. Δρακόπουλος, 2010, *ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών*, Πανεπιστήμιο Πατρών.

- [14] Α. Κρομμύδας, 2016, 'Επίδραση νανοδομών γραφενίου στις μηχανικές ιδιότητες και την μικροδομή αλουμινίου καθαρότητας 96,66%', Διπλωματική Εργασία, Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- [15] W. Choi, I. Lahiri, R. Seelaboyina, Y. S. Kang, 2010, *Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review*, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Indian Institute of Technology, Roorkee.
- [16] K. S. Novoselov, et. al., 2005, *Two-Dimensional Atomic Crystals*, Proc. Nat. Acad. Sci., USA.
- [17] A. K. Geim, K. S. Novoselov, 2007, *The Rise of Graphene*, Nat. Mater. 6, pp. 183-191.
- [18] C. Lee, X. D. Wei, J. W. Kysar, J. Hone, 2008, 'Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene', *Science*, vol. 321, pp. 385-388.
- [19] Σ. Παπάζογλου, 2013, 'Διεργασίες laser στο γραφένιο', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ.
- [20] K. I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Horne, et al. 2008, *Solid State Communications*, vol. 146, p. 351-355.
- [21] E. Y. Andrei, G. Li and X. Du, 2012, 'Electronic properties of graphene: a perspective from scanning tunneling microscopy and magnetotransport', vol. 75.
- [22] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, et al., 2008, 'Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene', *Nano Letters*, vol. 8, no 3, p. 902-907.
- [23] J. H. Warner, F. Schaffel, A. Bachmatiuk, M. H. Rummeli, 2013, *Graphene: Fundamentals and emergent applications*, Elsevier
- [24] V. Goyal, A.A. Balandin, 2012, 'Thermal properties of the hybrid graphene-metal nano-micro-composites: Applications in thermal interface materials', *Applies Physics Letters*, vol. 100.
- [25] K.M.F. Shalil, A.A. Balandin, 2012, 'Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials', *Solid State Communications*, vol. 152, pp. 1331-1340.
- [26] K.M.F. Shahil, A.A. Balandin, 2012, *Nano Letters*, vol. 12, pp. 861-867.
- [27] 'STREM Graphene Nanoplatelets', viewed 15 June 2016, <https://secure.strem.com/uploads/resources/documents/graphene_nanoplatelets_copy_1.pdf>

- [28] ASTM D3039/3039M – 00, 2000, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International.
- [29] ASTM D790 – 03, 2003, *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, ASTM International.
- [30] ‘Physics Group’, Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata, viewed 24 May 2016, <<http://pgweb.vecc.gov.in/>>.
- [31] A. Ανδρέου: *Κατάλογος προϊόντων*, viewed 25 June 2016, <<http://www.aandreou.gr/>>.
- [32] Dräger Safety AG: *Guide for selection and use of filtering devices*, viewed 14 July 2016, <http://www.draeger.com/sites/assets/PublishingImages/Products/com_explore_1700/Attachments/9045782_AB_Selection_Guide_Atemschutz_en-121211-fin.pdf>.
- [33] ASTM D 3776 – 96, 1996 (reapproved 2002), *Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of fabric*, ASTM International.
- [34] ASTM D 1577 – 01, 2001, *Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers*, ASTM International.
- [35] R. M. Wang, S. R. Zheng, Y. P. Zheng, 2011, *Polymer matrix composites and technology*, Woodhead Publishing, Science Press, Beijing, China.
- [36] BYK Additives & Instruments: *Additive Guide*, viewed 5 August 2016, <<http://www.byk.com/en/additives.html>>
- [37] R. Brown, 1999, *Handbook of Polymer Testing: Physical Methods*, CRC Press, USA.
- [38] A. Goren, C. Atas, 2008, ‘Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding’, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 34, issue 2, pp. 117-120.