



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επίδραση γραφενικών νανοπροσθηκών σε σύνθετο
μονοστρωματικό υλικό εποξικής
ρητίνης/υαλοϋφάσματος.»**

ΖΟΥΦΙΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επίδραση γραφενικών νανοπροσθηκών σε σύνθετο
μονοστρωματικό υλικό εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος.»**

**« Effect of graphene nanoplatelets fillers on epoxy/glass-
fabric composite laminae. »**

ΖΟΥΦΙΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

*Στην οικογένεια μου
και τους αγαπημένους θεούς μου
Ιωάννη και Σύρμω Δημάκη*

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών και στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που με εμπιστεύθηκαν και με την συμβολή τους βοήθησαν σημαντικά στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα επιθυμούσα, να εκφράσω στον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Μανωλάκο Δημήτριο για την αμέριστη εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για όλες τις γνώσεις που αποκόμισα κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Ειλικρινά, θεωρώ ευτύχημα το να βρεθεί στον δρόμο μου και με τα φώτα του να καταφέρω να ολοκληρώσω ένα σημαντικό κεφάλαιο της ζωής μου. Ελπίζω οι εμπειρίες που αποκόμισα όντας στο πλευρό του, να αποτελέσουν αρωγό της μετέπειτα πορείας μου επαγγελματικά.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, κύριο Γεώργιο Σερέτη. Πραγματική πηγή έμπνευσης από την αρχή της συνεργασίας μας. Όντας ένα αρκετά συνειδητοποιημένο άτομο με εξαιρετικό επίπεδο γνώσεων, υπήρξε πάντα τυπικός στις υποχρεώσεις του απέναντί μου με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός αρκετά φιλικού και ήρεμου περιβάλλοντος, κατάλληλο για την περαιτέρω συνεργασία μας. Τον ευχαριστώ θερμά λοιπόν για την συνεχή και αμέριστη καθοδήγησή του, καθώς και για την υπομονή, στήριξη και κατανόηση που επέδειξε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Είναι σημαντικό να νιώθεις δημιουργικός μα πρέπει να υπάρχει ο κατάλληλος άνθρωπος να σου δίνει τα απαραίτητα κίνητρα.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω, να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του τομέα και συγκεκριμένα τους κυρίους Μελισσά Νικόλαο και Κερασιώτη Κωνσταντίνο για την βοήθεια τους όποτε κρινόταν απαραίτητο κατά την

διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, όπως επίσης και για την ηθική υποστήριξη τους όλο αυτό το διάστημα.

Κλείνοντας, επιθυμώ να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που μου στάθηκαν όσο κανείς άλλος σε κάθε μου επιλογή και βήμα παρα τις όποιες δυσκολίες. Με μεγάλη χαρά λοιπόν αναφέρομαι στους γονείς μου, Δημήτριο και Κωνσταντίνα Ζουφιάκου όπως και τα αδέρφια μου Άγγελο και Γεώργιο Ζουφιάκο.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών και αντικείμενο της αποτέλεσε η μελέτη της επίδρασης των γραφενικών νανοδομών (GNPs-Graphene Nanoplatelets) σε σύνθετα μονοστρωματικά υλικά εποξικής μήτρας με ενίσχυση υαλοϋφάσματος.

Πραγματοποιήθηκε ενσωμάτωση των νανοδομών γραφενίου σε σύστημα εποξικής ρητίνης με ανάδευση σε θερμοκρασία δωματίου και εν συνεχεία για την παρασκευή σύνθετων μονοστρωματικών υλικών έγινε εμποτισμός του εν λόγω μίγματος σε υλικό ενίσχυσης με την μέθοδο hand-lay-up. Το υλικό ενίσχυσης του οποίου έγινε χρήση ήταν υαλοϋφασμα δύο διαφορετικών τύπων πλέξης (Twill 2x2, UD) . Η προσθήκη των γραφενικών νανοδομών έγινε σε περιεκτικότητες από 0% w.t. έως 5% w.t. και στα παραχθέντα δοκίμια έγιναν μηχανικές δοκιμές (εφελκυσμός, διάσχιση) .

Οι δοκιμές εφελκυσμού, κατά το διεθνές πρότυπο ASTM D3039/D3039M-00, έδειξαν σημαντική βελτίωση της μέγιστης τάσης (UTS-Ultimate Tensile Strength) στα δοκίμια ενίσχυσης πλέξης UD. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε περιεκτικότητα προσθήκης σε γραφενικές νανοδομές (από 1% έως 5% w.t.) σημειώθηκε ποσοστιαία αύξηση που σε αρκετές περιπτώσεις ξεπέρασε ακόμη και το 100%. Αντιθέτως, τα δοκίμια ενίσχυσης πλέξης Twill 2x2 αντέδρασαν αρνητικά. Ειδικότερα, η μέγιστη τάση (UTS) με εξαίρεση την περιεκτικότητα 1% w.t.GNPs, σημείωσε χειρότερες επιδόσεις σε σχέση με το δοκίμια τα οποία δεν περιείχαν προσθήκη γραφενικών νανοδομών.

Όσον αφορά στις δοκιμές διάσχισης, που πραγματοποιήθηκαν βάσει του διεθνούς προτύπου ASTM D2261-96, η προσθήκη γραφενικών νανοδομών (GNPs) δεν φάνηκε να επηρεάζει το ίδιο τις μηχανικές ιδιότητες των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών κάθε περιεκτικότητας. Παρουσιάστηκε βέβαια μια βελτίωση χωρίς ιδιαίτερες αποκλίσεις για κάθε περιεκτικότητα σε GNPs. Πιο συγκεκριμένα, στις περιεκτικότητες 1% και 2% w.t. GNPs παρουσιάστηκε σημαντική βελτίωση της τάσης του 50% σε σχέση με το μέγιστο φορτίο και 54% σε σχέση με την μέγιστη

τάση. Οι περιεκτικότητες 3%, 4% και 5%w.t.GNPs δεν αντέδρασαν καθόλου στην προσθήκη γραφενικών νανοδομών σημειώνοντας σχεδόν την ίδια επίδοση σε σχέση με το δοκίμιο που δεν δέχτηκε προσθήκη σε γραφενικές νανοδομές.

Βέβαια, επιχειρήθηκε να μελετηθεί και το πώς επιδρά η επιβολή δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing) σε ορισμένα δοκίμια, όσον αφορά στην απόδοση τους σε μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, βάσει του διεθνούς προτύπου ASTM D3039/D3039M-00. Πρόκειται για μονοστρωματικά δοκίμια εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος τόσο πλέξης Twill 2x2 όσο και μονοδιευθυντικής πλέξης 2% w.t. GNPs, τα οποία αρχικά υπέστησαν θερμική θεραπεία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 7 ημέρες. Η επιβολή δευτερογενούς θερμικής θεραπείας πραγματοποιήθηκε σε κλίβανο του εργαστηρίου και οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

Για τα δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης UD:

- Παραμονή σε εργαστηριακό κλίβανο στους 50°C για 4h, 8h, 18h και 24h.
- Παραμονή σε εργαστηριακό κλίβανο στους 80°C για 4h, 8h, 18h και 24h.
- Παραμονή σε εργαστηριακό κλίβανο στους 100°C για 4h, 8h, 18h και 24h.
- Παραμονή σε εργαστηριακό κλίβανο στους 120°C για 4h, 8h, 18h και 24h.

Για την ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2:

- Παραμονή σε εργαστηριακό κλίβανο στους 50°C για 1h και 4h.

Και στους δύο τύπους πλέξης σημειώθηκε σημαντική ενίσχυση της μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS-Ultimate Tensile Strength) με την περίπτωση των δοκιμίων ενίσχυσης πλέξης Twill 2x2 να ξεπερνά σε αύξηση το ποσοστό του 70%.

Από το σύνολο των ελέγχων και των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτει τελικά το συμπέρασμα ότι η προσθήκη σε νανοδομές γραφενίου σε ποσοστό 2%, δείχνει να επιδρά θετικότερα όσον αφορά στην επίδοση των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών.

Abstract

This study elaborated the technology of machining and its object was to investigate the effect of graphene nanoplatelets (GNPs) fillers on epoxy/glass-fabric composite laminae.

The incorporation of graphene nanoplatelets fillers in liquid epoxy resin was performed by stirring in room temperature. Then the mixture, in question, was used for the impregnation of the reinforcing material. The production of one layer composite materials became through the hand lay-up method. The reinforcing material that was used was glass-fabric of two types of weave (Twill 2x2, UD). The additions of graphene nanoplatelets were at levels from 0% w.t. to 5% w.t. and the produced test specimens underwent mechanical tests (tensile tests, tearing tests).

The tensile tests, in compliance with the ASTM D3039/D3039M-00 standard, showed significant improvement in UTS (Ultimate Tensile Strength) regarding the test specimens of unidirectional reinforcement. Specifically, for each level of addition of graphene nanoplatelets (from 1% to 5%) an important percentage increase was noted, that in many cases even exceeded 100%. In the contrast, the test specimens of Twill 2x2 reinforcement reacted negatively. Specifically, the UTS (Ultimate Tensile Strength) , except for 1% w.t. GNPs, noted worse performance than the test specimens which contained no addition of graphene nanoplatelets.

Regarding the tearing tests performed, in compliance with the ASTM D2261-96 standard, adding graphene nanoplatelets (GNPs) did not appear to have the same effect on the mechanical properties of single layer composites for each case of addition. There was certainly an improvement without major deviations for each level of addition. More specifically, the test specimens of 1% and 2% w.t GNPs noted significant improvement that reached 50% as for the maximum load and 54% regarding the maximum stress. On the other hand, the test specimens of 3%, 4% and 5% w.t. GNPs did not seem to make any difference after the addition of graphene

nanoplatelets, noting almost the same performance with the test specimen having no additions.

Of course, it was attempted to be investigated the way that post-curing affects some test specimens in terms of their performance in tensile tests. The test specimens were both of Twill 2x2 reinforcement and of unidirectional reinforcement, 2% w.t. addition of GNPs. At first, the test specimens were undergone thermal curing, at room temperature for 7 days. Imposing post-curing was performed in oven that was property of the lab and the conditions that selected were the following:

For test specimens of glass-fabric UD reinforcement :

- Staying in oven at 50°C for 4h, 8h, 18h and 24h.
- Staying in oven at 80°C for 4h, 8h, 18h and 24h.
- Staying in oven at 100°C for 4h, 8h, 18h and 24h.
- Staying in oven at 120°C for 4h, 8h, 18h and 24h.

For test specimens of glass-fabric Twill 2x2 reinforcement:

- Staying in oven at 50°C for 1h and 4h.

In both types of weaving of reinforcement, was noted significant strengthening of the UTS (Ultimate Tensile Strength) .Specifically, as for the Twill 2x2 reinforcement the percentage increase of UTS exceeded 70%.

As a general remark, it can be noted that a 2% w.t. GNPs addition, appears to affect positively the performance of one layer composite materials.

Πίνακας περιεχομένων

Εικόνες- Πίνακες- Διαγράμματα	1
Εικόνες.....	1
Πίνακες.....	2
Διαγράμματα.....	3
I. Θεωρητικό Μέρος.....	6
1.Σύνθετα υλικά.....	8
1.1.Ιστορική αναδρομή	8
1.2.Γενικά	13
1.3.Ορισμός	14
1.4.Σημαντικότητα και αντικείμενο της επιστήμης και τεχνολογίας των σύνθετων υλικών	15
1.5.Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	16
1.6.Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα σύνθετων υλικών	19
2.Σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας ενισχυμένα ίνες.....	21
2.1.Ο ρόλος της μήτρας.....	21
2.1.1.Ταξινόμηση των μητρών	21
2.2.Οργανικές μήτρες.....	22
2.2.1.Θερμοπλαστικές ή Πλαστομερείς Μήτρες (Thermoplastic)	22
2.2.2.Θερμοσκληρυνόμενες ή Θερμοσταθερές μήτρες (Thermosettings).....	23
2.2.3.Ελαστομερείς ή Ελαστικές Μήτρες (Elastomers, Rubbers).....	24
2.3.Τύποι ρητινών	25
2.3.1.Πολυεστερικές ρητίνες.....	25
2.3.2.Βυνιλεστερικές Ρητίνες	27
2.3.3.Φαινολικές ρητίνες	28
2.3.4.Εποξικές (εποξειδικές) ρητίνες.....	29
2.3.4.1.Σκληρυντές	33
2.4.Ίνες ενίσχυσης	34
2.4.1.Ίνες γυαλιού (Fiberglass)	35
2.4.2.Ίνες άνθρακα (Carbon fibers) -γραφίτη.....	40
2.4.3.Ίνες πολυμερούς	42
2.4.3.1.Είδη ινών πολυμερούς	43
2.4.3.1.1.Αραμιδικές ίνες	43
2.4.3.1.2.Μετα-αραμιδικές ίνες	44
2.4.3.1.3.Παρα-αραμιδικές ίνες/ίνες αρωματικών αραμιδίων	44

2.5. Προϊόντα από ίνες.....	46
2.5.1. Τύποι υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά	47
2.5.1.1. Τύποι πλέξεων πλεγμένων υφασμάτων (Woven)	49
2.5.1.1.1. Plain-Weave (Απλή πλέξη)	49
2.5.1.1.2. Twill-Weave (Πλέξη Twill)	49
2.5.1.1.3. Satin Weave (Πλέξη Satin).....	50
2.5.1.1.4. Basket Weave (Καλαθωτή Πλέξη)	51
2.5.1.1.5. Leno Weave (Πλέξη Leno).....	52
2.5.1.1.6. Mock Leno Weave (Πλέξη Mock Leno)	52
2.5.1.1.7. Πλέξη Weft-Knitted	53
2.5.1.1.8. Πλέξη Warp-Knitted	54
2.6. Τρόποι ενίσχυσης ρητίνης.....	54
2.6.1. Επιλογή κατάλληλου εγκλείσματος	55
2.6.1.1. Επίδραση εγκλείσματος στις ιδιότητες των ρητινών (εποξικών)	56
2.6.2. Εφαρμογή θερμικής θεραπείας- Curing	58
2.6.2.1. Θερμική θεραπεία (Curing)	58
2.6.2.2. Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης-Tg	59
2.6.2.3. Επίδραση των παραμέτρων του curing στις ιδιότητες των σύνθετων υλικών.....	60
3. Τύποι σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες	62
3.1. Γενικά	62
3.2. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites, CFRPs)	62
3.2.1. Γενικά	62
3.2.2. Ιδιότητες.....	63
3.2.3. Εφαρμογές.....	64
3.3. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymer Composites, GFRPs).....	65
3.3.1. Γενικά	65
3.3.2. Ιδιότητες.....	66
3.3.3. Εφαρμογές.....	66
3.4. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου (Aramid Fiber Reinforced Polymer Composites, AFRPs)	67
3.4.1. Γενικά	67
3.4.2. Ιδιότητες.....	68
3.4.3. Εφαρμογές.....	68

4.Τεχνικές κατασκευής σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες.....	68
4.1.Μέθοδοι κλειστής διαμόρφωσης (Closed Molding).....	69
4.1.1.Resin Transfer Molding- Μέθοδος χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση	69
4.1.2.Vacuum Infusion- Μέθοδος έγχυσης κενού	70
[19]	72
4.2.Μέθοδοι ανοιχτής διαμόρφωσης (Open Molding).....	72
4.2.1.Hand lay-up- Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι.....	72
4.2.2.Spray lay-up- Μέθοδος ψεκασμού	73
5.Γραφένιο (Graphene)	75
5.1.Ο άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του	75
5.2.Γενικά για το γραφένιο	77
5.3.Ιδιότητες Γραφενίου	78
5.3.1.Μηχανικές Ιδιότητες	79
5.3.2.Χημικές Ιδιότητες	79
5.3.3.Ηλεκτρονικές Ιδιότητες	80
5.3.4.Ηλεκτρικές Ιδιότητες	80
5.3.5.Οπτικές Ιδιότητες	80
5.3.6.Θερμικές Ιδιότητες.....	81
5.4.Μέθοδοι παρασκευής Γραφενίου	81
5.4.1.Μηχανική διάσπαση (Mechanical Cleavage).....	81
5.4.2.Χημική Εναπόθεση Αερίου (Chemical Vapor Deposition, CVD).....	82
5.4.3.Χημική αναγωγή του οξειδίου του πυριτίου	83
5.4.4.Επιταξιακή ανάπτυξη (Epitaxial growth).....	83
5.5.Εφαρμογές Γραφενίου	84
5.6.Νανοδομές Γραφενίου (Graphene Nanoplatelets).....	84
5.6.1.Ιδιότητες νανοδομών γραφενίου -Εφαρμογές	85
6.Μηχανική μονοστρωματικών σύνθετων.....	86
6.1.Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων υλικών.....	86
6.2.Χαρακτηριστικά ενός μονοστρωματικού σύνθετου ενισχυμένου με ίνες	87
6.2.1.Βασικές αρχές.....	87
6.2.1.1.Άξονες συντεταγμένων	87
6.2.1.2.Σημειογραφία-Συμβολισμοί.....	89
6.2.1.3.Μετασηματισμοί τάσεων και παραμορφώσεων ενός λεπτού μονοστρωματικού σύνθετου (under plane stress)	90
6.2.1.4.Ισοτροπικά, ανισοτροπικά και ορθοτροπικά υλικά.....	91

6.3.Ελαστικές ιδιότητες μονοστρωματικού σύνθετου	93
6.3.1.Μονοδιευθυντικά μονοστρωματικά σύνθετα συνεχών ινών και γωνία προσανατολισμού $\theta = 0^\circ$	93
6.3.2.Μονοδιευθυντικά μονοστρωματικά σύνθετα συνεχών ινών υπό γωνία (angle-ply lamina).....	94
6.4.Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για ένα λεπτό μονοστρωματικό σύνθετο	95
6.4.1.Ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο.....	95
6.4.2.Ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο	96
6.5.Μητρώα συμβιβαστότητας (compliance matrix) και δυσκαμψίας (stiffness matrix) ..	98
6.5.1.Ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο.....	98
6.5.2.Ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο (Specially Orthotropic Lamina) ($\theta=0^\circ$ ή 90°).....	99
6.5.3.Γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο (General orthotropic lamina, $\theta \neq 0^\circ$ ή $\theta = 0^\circ$)	100
7.Πρόγνωση αστοχίας (Failure Prediction) σε μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο.....	104
7.1.Θεωρία μέγιστης τάσης	106
7.2.Θεωρία μέγιστης παραμόρφωσης.....	108
7.3.Θεωρία Azzi- Tsai- Hill	109
7.4.Θεωρία αστοχίας Tsai-Wu.....	110
II. Πειραματικό Μέρος.....	112
8.Πειραματική Διαδικασία	113
8.1.Υλικά για την παρασκευή των δοκιμών	113
8.1.1.Σύστημα εποξικής (εποξειδικής) ρητίνης.....	113
8.1.2.Νανοδομές Γραφενίου (GNPs-Graphene Nanoplatelets).....	114
8.1.3.Υαλοϋφασμα	116
8.2.Παρασκευή μονοστρωματικών δοκιμών	119
8.2.1.Λήψη μέτρων ασφαλείας.....	119
8.2.2.Προετοιμασία ξύλινων επιφανειών.....	121
8.2.3.Προετοιμασία υαλοϋφάσματος.....	121
8.2.4.Προετοιμασία εποξικής ρητίνης	122
8.2.5.Εμποτισμός υφασμάτων ενίσχυσης.....	124
8.2.5.1.Ποιότητα εμποτισμού	125
8.2.6.Οπτικός έλεγχος	126
8.2.7.Ποιοτικός Έλεγχος	128
8.2.7.1.Υπολογισμός πρότυπου βάρους	128

8.2.7.2.Υπολογισμός βάρους-ποσοστού εμποτισμού ρητίνης	129
9.Πειραματικές δοκιμές	129
9.1.Πρέσα Instron 4482.....	129
9.2.Δοκιμές εφελκυσμού	131
9.2.1.Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης (UD).....	131
9.2.2.Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2	139
9.3.Δοκιμές εφελκυσμού μετά από την επίδραση δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (Post-Curing).....	146
9.3.1.Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης (UD).....	148
9.3.2.Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2	164
9.4.Δοκιμές διάσχισης.....	168
10.Συμπεράσματα	178
11.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	182
Βιβλιογραφία.....	183

Εικόνες- Πίνακες- Διαγράμματα

Εικόνες

Εικόνα 1: Το φυτό πάπυρος (αριστερά) - Περγαμηνή (δεξιά).....	10
Εικόνα 2: Διαδικασία παρασκευής περγαμηνής.....	11
Εικόνα 3: Λινοθήρακας Μεγάλου Αλεξάνδρου.....	12
Εικόνα 4: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.....	16
Εικόνα 5: Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια/τρισδιάστατη πλέξη.....	19
Εικόνα 6: Διάδοση ρωγμής σε (α) ομογενές υλικό και (β) διασπαστικό υλικό.....	20
Εικόνα 7: Μοριακή δομή θερμοπλαστικών ρητινών (αριστερά) και θερμοσκληρυνόμενων ρητινών (δεξιά).....	22
Εικόνα 8: Τυπική μορφή πολυεστέρα.....	25
Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση μοριακής αλυσίδας πολυεστερικής ρητίνης.....	27
Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μοριακών αλυσίδων πολυεστερικής ρητίνης που υποστεί πολυμερισμό.....	27
Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση της εξιδανικευμένης χημικής δομής τυπικού βινυλεστέρα.....	28
Εικόνα 12: Αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ φαινολών και αλδεϋδών για την παραγωγή φαινολικών ρητινών.....	28
Εικόνα 13: Τυπική δομή εποξικής ρητίνης σε μορφή δακτυλίου.....	30
Εικόνα 14: Χαρακτηριστικές εικόνες δομής γυαλιού. Δομή χαλαζιακού γυαλιού (αριστερά) ,δομή κοινού γυαλιού (δεξιά).....	36
Εικόνα 15: Ίνες γυαλιού τύπου E.....	37
Εικόνα 16: Ίνες γυαλιού τύπου C.....	38
Εικόνα 17: Ίνες γυαλιού τύπου S.....	38
Εικόνα 18: Παραγωγή ινών γυαλιού.....	39
Εικόνα 19: Δομή κρυστάλλου γραφίτη (αριστερά) -Διάταξη ατόμων άνθρακα στον κρύσταλλο γραφίτη (δεξιά).....	40
Εικόνα 20: Παραγωγή ινών άνθρακα.....	42
Εικόνα 21: Μορφή αραμιδικών ινών.....	43
Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση ινών Kevlar 49 (αριστερά) -Μικροδομή των ινών αραμιδίου (δεξιά).....	46
Εικόνα 23: (α) Υφή μονοδιευθυντικού υφάσματος-(β) Συσκευασία μονοδιευθυντικού υφάσματος.....	48
Εικόνα 24: Μορφή απλής πλέξης (Plain Weave).....	49
Εικόνα 25: Μορφή πλέξης Twill (Twill Weave).....	50
Εικόνα 26: Μορφή πλέξης Satin (Satin Weave).....	50
Εικόνα 27: Μορφή καλαθωτής πλέξης (Basket Weave).....	51
Εικόνα 28: Μορφή πλέξης Leno (Leno Weave).....	52
Εικόνα 29: Μορφή πλέξης Mock Leno (Mock Leno Weave).....	52
Εικόνα 30: Μορφή πλέξης Weft-Knitted (Weft-Knitted Weave).....	53
Εικόνα 31: Μορφή πλέξης Warp-Knitted (Warp-Knitted Weave).....	54
Εικόνα 32: Μέθοδος χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση (RTM).....	69
Εικόνα 33: Διάταξη μεθόδου έγχυσης κενού (Vacuum Infusion).....	71
Εικόνα 34: Μορφή διάταξης έγχυσης κενού.....	72
Εικόνα 35: Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand lay-up).....	72
Εικόνα 36: Μέθοδος ψεκασμού (Spray lay-up).....	74
Εικόνα 37: Άνθρακας.....	76
Εικόνα 38: Οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα.....	77
Εικόνα 39: Μορφή μοριακής δομής γραφενίου.....	77
Εικόνα 40: Μορφή Νανοδομών γραφενίου(Graphene Nanoplatelets).....	85
Εικόνα 41: Ορισμός των κύριων αξόνων του υλικού και των αξόνων φόρτισης για ένα μονοστρωματικό υλικό.....	88
Εικόνα 42: Καθορισμός συστήματος συντεταγμένων με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού. Παρατηρείται διαφορά σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών μεταξύ των (a) και (b.).....	89

Εικόνα 43: Σύνολο ορθών και διαμηθικών τάσεων.....	90
Εικόνα 44: Μορφή τριών επιπέδων συμμετρίας σε ένα ορθοτροπικό υλικό.....	92
Εικόνα 45: Διαφοροποίηση όσον αφορά στην παραμόρφωση ισοτροπικών (a) , ειδικά ορθοτροπικών (b) και ανισοτροπικών (c) υλικών που υφίστανται μονοαξονικό εφελκυσμό και διάτμηση.	92
Εικόνα 46: Εφαρμογή (a) διαμήκους εφελκυστικής τάσης, (b) εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης και (c) διατμητικής τάσης σε ένα μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο υλικό συνεχών ινών και γωνίας προσανατολισμού $\theta=0^\circ$	93
Εικόνα 47: Μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο υλικό, συνεχών ινών υπό γωνία (angle-ply).....	95
Εικόνα 48: Εφαρμογή τάσεων σε ένα ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο	96
Εικόνα 49: Εφαρμογή τάσεων σε ένα γενικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο.....	97
Εικόνα 50: Εφαρμογή τάσεων σε ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο.....	98
Εικόνα 51: Εφαρμογή τάσεων σε σύστημα δύο αξόνων σε ένα λεπτό ορθοτροπικό μονοστρωματικό υλικό.	106
Εικόνα 52: Σύστημα εποξικής ρητίνης ES35A/B.....	114
Εικόνα 53: Νανοδομές γραφενίου- Alfa Aesar™ Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micronparticles, S.A. 500m ² /g.....	115
Εικόνα 54: Μορφή υαλοϋφάσματος ενίσχυσης μονοδιευθυντικής πλέξης (UD) , του οποίου έγινε χρήση κατά την πειραματική διαδικασία.....	116
Εικόνα 55: Μορφή υαλοϋφάσματος ενίσχυσης πλέξης Twill 2x2, του οποίου έγινε χρήση κατά την πειραματική διαδικασία.	117
Εικόνα 56: Ειδικά προστατευτικά γυαλιά.....	120
Εικόνα 57: Μάσκα μισού προσώπου με φίλτρα ABEK(2) και P(3).	120
Εικόνα 58: Μορφή υφάσματος ενίσχυσης το οποίο έχει υποστεί φθορά στην πλέξη του λόγω κακής κοπής.	122
Εικόνα 59: Εργαστηριακός αναδευτήρας με μύτη ανάδευσης.....	123
Εικόνα 60: Μονοστρωματικά σύνθετα υλικά υαλοϋφάσματος, εμποτισμένα με μίγμα εποξικής ρητίνης και προσθηκών γραφενικών νανοδομών, τοποθετημένα σε ξύλινη επιφάνεια.	125
Εικόνα 61: Περιοχή ποιοτικά καλού εμποτισμού (βέλος) - Περιοχές μη ποιοτικά σωστού εμποτισμού (κύκλοι).....	127
Εικόνα 62: Σχεδιασμός επιφάνειας μονοστρωματικού σύνθετου υλικού για την τελική κοπή δοκιμίων στις κατάλληλες διαστάσεις.....	128
Εικόνα 63:Μηχανική πρέσα Instron 4482.....	130
Εικόνα 64: Προοδευτικές απόψεις δοκιμής εφελκυσμού σε μονοστρωματικό δοκίμιο εποξικής ρητίνης με προσθήκη νανοδομών γραφενίου και ενίσχυση υαλοϋφάσματος.....	131
Εικόνα 65: Αρχική μορφή μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος, μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.....	132
Εικόνα 66: Αρχική μορφή μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs.....	139
Εικόνα 67:Δοκίμια εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος 2% w.t. GNPs που έχουν υποστεί δοκιμή εφελκυσμού, κατόπιν επίδρασης δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing).	146
Εικόνα 68: Εργαστηριακός Κλίβανος.....	147
Εικόνα 69: Αρχική μορφή δοκιμίου προς δοκιμή διάσχιση.....	169
Εικόνα 70: Μορφή δοκιμίων προς διάσχιση. Σχεδιασμός τομής και περιοχής συγκράτησης.....	169

Πίνακες

Πίνακας 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού	37
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar.....	45
Πίνακας 3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά συστήματος εποξικής ρητίνης ES 35 A/B.	114
Πίνακας 4:Πίνακας δεδομένων μονοστρωματικών δοκιμίων ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, για πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού.	133
Πίνακας 5 :Πίνακας δεδομένων συνθηκών post-curing δοκιμίων ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.	149
Πίνακας 6: Πίνακας δεδομένων μονοστρωματικών δοκιμίων ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, για πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού, κατόπιν post-curing (συνθήκες δευτερογενούς θερμικής θεραπείας)	164

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Σύγκριση θεωριών μέγιστης τάσης, μέγιστης παραμόρφωσης και Azzi-Tsai-Hill με δεδομένα μονοαξονικής εφελκυστικής δύναμης ενός σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης ενισχυμένο με υαλοϋφασμα.	108
Διάγραμμα 2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, προσθήκης σε %w.t. GNPs από 0% έως 5%.	133
Διάγραμμα 3:Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με την %w.t. GNPs (0%w.t. έως 5%w.t.)	135
Διάγραμμα 4:Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μεταβολής μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t.-5%w.t.)	136
Διάγραμμα 5: Συγκριτικό γράφημα τιμών παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t.-5%w.t.)	136
Διάγραμμα 6: Συγκριτικό γράφημα τιμών ποσοστιαίας μεταβολής παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t.-5%w.t.)	137
Διάγραμμα 7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/ υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, προσθήκης σε %w.t. GNPs από 0% έως 5%.	137
Διάγραμμα 8: : Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.	138
Διάγραμμα 9: : Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.	138
Διάγραμμα 10:Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/ υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 , προσθήκης σε % w.t. GNPs από 0% έως 5%.	140
Διάγραμμα 11:Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε σχέση με το ποσοστό περιεκτικότητας κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0% έως 5%)	142
Διάγραμμα 12:Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μεταβολής μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (1%-5%)σε σχέση με το δοκίμιο μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου.....	142
Διάγραμμα 13: : Συγκριτικό γράφημα τιμών παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0%-5%).	143
Διάγραμμα 14: Συγκριτικό γράφημα ποσοστιαίας μεταβολής παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0%-5%) σε σχέση με το δοκίμιο μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου.....	143
Διάγραμμα 15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/ υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 , προσθήκης σε % w.t. GNPs από 0% έως 5%.	144
Διάγραμμα 16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.	145
Διάγραμμα 17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.	145
Διάγραμμα 18:Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 4h, 8h,18h και 24h.	150
Διάγραμμα 19: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 80°C για 4h, 8h,18h και 24h.	150
Διάγραμμα 20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 100°C για 4h, 8h,18h και 24h.	151

Διάγραμμα 41: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής τιμών μέγιστης τάσης (UTS) πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.	166
Διάγραμμα 42: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.	167
Διάγραμμα 43: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μείωσης παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.	167
Διάγραμμα 44: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 1h και 4h.	168
Διάγραμμα 45: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 0% w.t. GNPs.	171
Διάγραμμα 46: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 1% w.t. GNPs.	171
Διάγραμμα 47: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.	172
Διάγραμμα 48: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 3% w.t. GNPs.	172
Διάγραμμα 49: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 4% w.t. GNPs.	173
Διάγραμμα 50: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 5% w.t. GNPs.	173
Διάγραμμα 51: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 0% w.t. GNPs.	174
Διάγραμμα 52: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 1% w.t. GNPs.	174
Διάγραμμα 53: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.	175
Διάγραμμα 54: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 3% w.t. GNPs.	175
Διάγραμμα 55: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 4% w.t. GNPs.	176
Διάγραμμα 56: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 5% w.t. GNPs.	176
Διάγραμμα 57: Συγκριτικό γράφημα μέγιστων τιμών φορτίου διάσχισης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με την % w.t. GNPs (0%w.t. -5%w.t.).	177
Διάγραμμα 58: Συγκριτικό γράφημα μέγιστων τιμών τάσης διάσχισης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με την % w.t. GNPs (0%w.t. -5%w.t.).	177
Διάγραμμα 59: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της μέγιστης τάσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με το δοκίμιο άνευ προσθήκης γραφενικών νανοδομών.	178
Διάγραμμα 60: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου φορτίου δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με το δοκίμιο άνευ προσθήκης γραφενικών νανοδομών.	178

I. Θεωρητικό Μέρος

1.Σύνθετα υλικά

1.1.Ιστορική αναδρομή

Η επιστήμη των σύνθετων υλικών τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μια σταθερή αλλά πολλά υποσχόμενη πορεία, όσον αφορά στην μελέτη και εξέλιξή τους. Είναι γνωστό το γεγονός ότι στην διαχρονική του πορεία ο άνθρωπος προσπάθησε να συνδυάσει τις γνώσεις του σε τεχνολογικό επίπεδο προκειμένου να δημιουργήσει ο,τιδήποτε θα τον βοηθούσε στο να καλύψει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος των αναγκών του. Για τον λόγο αυτό, νέα υλικά με αρκετά βελτιωμένες ιδιότητες κάνουν αισθητή την παρουσία τους, ήδη από αρχαιοτάτων χρόνων, και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην μετεξέλιξη του ανθρώπινου είδους τεχνολογικά.

Αναζητώντας ιστορικά την εξέλιξη των σύνθετων υλικών, στην ουσία είναι σαν να ρίχνουμε μια ματιά στην ταυτόχρονη ανάπτυξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η ιστορική εξέλιξη των υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη του ανθρώπου και την μετάβασή του από την προϊστορία στην ιστορία. Η ανάπτυξη νέων υλικών και η εξέλιξη υπαρχόντων είναι η βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η πρόοδος της ανθρωπότητας σε όλες τις διαστάσεις της, από την καθημερινότητά ,την υγεία ,την επιστήμη ακόμα και τις τέχνες. Σύνθετα υλικά λοιπόν έχουν εμφανή την χρήση τους όσον αφορά σε εφαρμογές όπως οι κατασκευές, η δημιουργία οπλικών συστημάτων, οι γραφικές ύλες και η ναυσιπλοΐα.

Υλικά όπως η πέτρα, το ξύλο, τα κόκκαλα τα οποία υπάρχουν ελεύθερα στην φύση ήταν από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος. Ο συνδυασμός τους με άλλα συστατικά οδήγησε στον σχηματισμό νέων ενισχυμένων υλικών η χρήση των οποίων διευκόλυνε σημαντικά την ζωή του σε αρκετούς τομείς της καθημερινότητας του.

Ανατρέχοντας στην αρχαία Αίγυπτο περί το 5000 π.Χ. παρατηρούμε την χρήση των πρώτων χειροποίητων σύνθετων υλικών στην δημιουργία των οποίων γίνεται χρήση λάσπης και άχυρων. Δημιουργούνται τα πρώτα τούβλα η χρήση των οποίων συνέβαλε σημαντικά στην εξέλιξη των κατασκευαστικών δομών όπως κατοικίες κ.α. Η τεχνική στην ουσία οδηγούσε στην ενίσχυση των τούβλων με πλέγματα από άχυρο, γεγονός που εξασφάλιζε τον περιορισμό των τάσεων συστολής

που παρατηρούνταν έπειτα από την ξήρανση του πηλού. Επιπρόσθετα, στην περιοχή της Αιγύπτου ήταν ιδιαίτερα αναπτυγμένη και η μέθοδος της μουμιοποίησης ή πιο ευρέως γνωστή ως μέθοδος της ταρίχευσης. Λαμβάνοντας υπόψη την διαδικασία γίνεται κατανοητό το γεγονός ότι πρόκειται για μια σύνθετη κατασκευή, αφού το σώμα του θανόντος τυλιγόταν προσεχτικά με λινά υφάσματα και στην συνέχεια γινόταν εμποτισμός με υγρή ρητίνη. Έτσι δημιουργούταν ένα είδος εξωτερικής προστασίας του σώματος του θανόντος, γεγονός που συντελούσε και στη σωστή διατήρησή του στο βάθος του χρόνου.

Περί το 3000 π.Χ. πραγματοποιείται για πρώτη φορά τόσο στην Αίγυπτο όσο και την Μεσοποταμία η κατασκευή σχεδίων κάνοντας χρήση καλαμιών από πάπυρο τα οποία αρχικά είχαν εμβαπτιστεί σε πίσσα. Τα πρώτα αυτά μέσα πλεύσης αποτέλεσαν και τα πρώτα βήματα για την μετέπειτα κατασκευή σύγχρονων σκαφών με χρήση ινών γυαλιού.

Στην περιοχή της Μεσοποταμίας περί το 1000 π.Χ. φαίνεται πως εφαρμόστηκε για πρώτη φορά μια μέθοδος που βοηθούσε σημαντικά στον περιορισμό της φθοράς των επιφανειών τόσο των πλακιδίων όσο και των τούβλων. Κατά την μέθοδο αυτή εφαρμοζόταν η τεχνική του βερνικώματος των επιφανειών.

Κατά την περίοδο των Ρωμαϊκών χρόνων παρατηρείται μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα της οδοποιίας. Πιο συγκεκριμένα, για την ενίσχυση του οδοστρώματος έγινε χρήση τριμμάτων από κεραμίδι.

Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την ενίσχυση δομών κατά την κατασκευή οικοδομών, αποτελεί στην ουσία την μετεξέλιξη μιας τεχνικής ανάμιξης γύψου με ζωικά τριχώματα, η οποία εφαρμοζόταν παλαιότερα. Η τεχνική αυτή ήταν μια μέθοδος που συντελούσε σε μεγάλο βαθμό στο να ενισχύονται εύθραυστα υλικά κατασκευών στους τότε αναπτυσσόμενους πολιτισμούς.

Μέχρι το τέλος της αυτοκρατορίας των Ρωμαίων, ο πάπυρος αποτελούσε την πιο διαδεδομένη γραφική ύλη της αρχαιότητας. Ο πάπυρος είναι ένα φυτό το οποίο για περισσότερο από 6000 χρόνια έδινε στους Αιγύπτιους την πρώτη ύλη γραφής. Σε αυτό βέβαια συντελούσε σε μεγάλο βαθμό το γεγονός ότι το φυτό αυτό

αφθονούσε στις όχθες του ποταμού Νείλου. Οι κατασκευαστές του παπύρου έκοβαν το φλοιό του κορμού σε λεπτές λωρίδες τις οποίες ένωναν μεταξύ τους και σχημάτιζαν πλατιές και μακριές ταινίες. Βάζοντας δύο στρώματα το ένα πάνω στο άλλο δημιουργούσαν μια εύκαμπτη και επίπεδη επιφάνεια που την στέγνωναν και την βερνίκωναν. Καθεμία από αυτές τις επιφάνειες αποτελούσαν το λεγόμενο φύλλο. Κολλούσαν στην συνέχεια με άμυλο περίπου είκοσι τέτοια φύλλα και με ένα απλό κολλάρισμα μπορούσε κανείς να γράψει στον πάπυρο, αφού είχε αρκετή αντοχή και διάρκεια. Στην πορεία βέβαια ο πάπυρος αντικαταστάθηκε από την περγαμινή περί το 197 μ.Χ. από τον βασιλιά της Περγάμου, Ευμένη Β'. Η περγαμινή κατασκευαζόταν από δέρμα προβάτου, κασίικας ή μοσχαριού. Ειδικότερα, οι κατασκευαστές βουτούσαν τα δέρματα σε ασβεστόνερο, έπειτα τα έπλεναν και τα καθάριζαν από το τρίχωμα και τα ίχνη σάρκας που είχαν απομείνει πάνω τους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούσαν σκόνη από γύψο προκειμένου να απορροφηθούν και τα τελευταία ίχνη λίπους. Τέλος, τα στέγνωναν και τα χτυπούσαν με ένα είδος σπάτουλας. Με τον τρόπο αυτό, το φύλλο της περγαμινής ήταν έτοιμο να δεχθεί γραφή. Με το πέρασμα του χρόνου, η περγαμινή αντικαταστάθηκε από το χαρτί.



Εικόνα 1: Το φυτό πάπυρος (αριστερά) - Περγαμινή (δεξιά)



Εικόνα 2: Διαδικασία παρασκευής περγαμηνής

Κατά την διάρκεια των μυκηναϊκών χρόνων ,παρατηρείται χρήση του λινοθώρακα. Η πρώτη γραπτή αναφορά του όρου << λινοθώρακα>> απαντάται στα Ομηρικά Έπη (Ηλιάδα,2.529;2.830) γεγονός που ενισχύει την άποψη της χρήσης του από τον μυκηναϊκό στρατό της εποχής. Πρόκειται για ένα είδος προσωπικής αμυντικής θωράκισης κατασκευασμένος από δέρμα και ύφασμα. Όπως κανείς αντιλαμβάνεται από την ονομασία του το ύφασμα κατασκευής του ήταν το λινό. Η χρήση λινού βέβαια δεν απέκλειε ταυτόχρονη συμπληρωματική χρήση άλλων υλικών φυτικής ή ζωικής προέλευσης. Θεωρείται μια σύνθετη πανοπλία που απαιτούσε υψηλή κατανάλωση πρώτων υλών και εξειδικευμένες τεχνικές. Ο υφασμάτινος πυρήνας διαδραμάτιζε τον ρόλο του δομικού σκελετού πάνω στον οποίο βασιζόταν η μετέπειτα υπερκατασκευή. Μερικές φορές παρατηρούταν και ενίσχυσή του με χρήση μεταλλικών φολίδων και ελασμάτων. Ένας λινοθώρακας με πλήρη μεταλλική επικάλυψη μπορούσε ακόμη και να πλησιάζει το βάρος των 15 κιλών, δηλαδή το μισό συνολικό βάρος της εξάρτησης ενός βαριά θωρακισμένου οπλίτη των πρώτων γραμμών. Παραλλαγή του λινοθώρακα ήταν ο φολιδωτός τον οποίο χρησιμοποίησαν πρώτοι οι Αιγύπτιοι και τον φορούσαν και οι Πέρσες κάτω από τους χιτώνες τους.



Εικόνα 3: Λινοθώρακας Μεγάλου Αλεξάνδρου

Ο λινοθώρακας αποτελεί την εξέλιξη του κωδωνόσημου θώρακα, ο οποίος λόγω της κατασκευής του περιόριζε σημαντικά την ευκινησία του οπλίτη. Αντίθετα, ο λινοθώρακας προσέφερε μεγάλη ευκινησία και ποικιλία κινήσεων βοηθώντας σημαντικά στην εκτέλεση του ωθισμού.

Σημαντικές εργασίες έγιναν στις αρχές του 19^ο αιώνα με το καουτσούκ. Το πρώτο καουτσούκ που κατασκευάστηκε συνθετικά είχε την ιδιότητα να μαλακώνει με την θέρμανση και να σκληραίνει με την ψύξη. Το 1839 λοιπόν ο εφευρέτης Charles Goodyear επινόησε την διαδικασία του βουλκανισμού (επιθείωση, δηλαδή θερμική επεξεργασία, επονομαζόμενη curing, μίγματος καουτσούκ και θείου) η οποία οδήγησε σε προϊόντα σημαντικής αντοχής.

Το 1869 ο John Wesley Hyatt εφηύρε το πρώτο συνθετικό πολυμερικό υλικό από νιτρική κυτταρίνη και καμφορά. Το κυτταρινοειδές (celluloid) είναι ένα σκληρό υλικό που χρησιμοποιείται σε κτένες, φίλμ, παιχνίδια κ.τ.λ.

Το 1920 εμφανίστηκε ο βακελίτης που πήρε το όνομά του προς τιμήν του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Ο βακελίτης αποτέλεσε το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού. Πιο συγκεκριμένα αφορά σε μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη.

Το 1960 παρατηρήθηκε για πρώτη φορά η ανάπτυξη υψηλής αντοχής ινών γυαλιού όπως και η ανάπτυξη υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου. Ο λόγος που παρουσιάστηκε η ανάγκη αυτή αφορούσε στο γεγονός ότι υπήρχε υψηλή τάση στην αεροδιαστημική βιομηχανία για μεγαλύτερη απόδοση σε συνδυασμό όμως με παράλληλη μείωση του βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

Το 1969 άρχισαν για πρώτη φορά να διατίθενται στην αγορά οι πρώτες ίνες άνθρακα.

Το 1971 άρχισαν να διατίθενται στην αγορά για πρώτη φορά οι ίνες αραμιδίου. Οι ίνες αραμιδίου στις μέρες μας χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές που αφορούν στα ελαστικά των αυτοκινήτων όπως και σε εφαρμογές αεροδιαστημικής και ναυπηγικής. [1] , [2] , [3] , [4]

1.2.Γενικά

Τα υλικά αποτέλεσαν την βάση για την εξέλιξη του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπινου είδους. Εδώ και χιλιάδες χρόνια, τα ανθρώπινα όντα κατάφεραν να αποκτήσουν πρόσβαση σε αυτά και κατά συνέπεια να τα χρησιμοποιήσουν προκειμένου να προοδεύσουν. Κάθε φορά που ένα νέο υλικό προέκυπτε, παρατηρούταν και μια τεράστια ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Δείγμα αυτού αποτελούν η εποχή του Λίθου, του Χαλκού και του Σιδήρου. Οι χρονικές αυτές περιόδοι της ανθρώπινης ιστορίας πήραν το όνομά τους από τα αντίστοιχα υλικά, τα οποία αποτέλεσαν σταθμό στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού.

Φτάνοντας στον 20^ο αιώνα, συναντούμε υψηλής απόδοσης υλικά, τα οποία έχουν διεισδύσει στην εθνική οικονομία και την ζωή των ανθρώπων σε διάφορους τομείς με ένα σπάνιο ρυθμό ανάπτυξης, αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, οι ολοένα και περισσότερο αυξανόμενες απαιτήσεις για πιο ελαφριές και ανθεκτικές κατασκευές, με όσο το δυνατόν πιο χαμηλό κόστος και φιλικότητα προς το περιβάλλον αποτέλεσαν τα κριτήρια για την ανάπτυξη των νέων αυτών

υλικών. Ανάμεσα σε αυτά τα υλικά περιλαμβάνονται και τα σύνθετα υλικά, τα οποία και αποτελούν και το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τους ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης της επιστήμης και της τεχνολογίας, καθιστά τα σύνθετα υλικά ιδιαίτερα σημαντικά όσον αφορά στην εθνική οικονομία και άμυνα. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν την βάση των νέων τεχνολογιών οι οποίες κατά κάποιο τρόπο απαιτούν υλικά με σχετικά ασυνήθιστες ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν στην αυξανόμενη αντοχή και φυσικά την αναγκαία μείωση του βάρους, καθιστώντας τις τελικές εφαρμογές αξιόπιστες και ασφαλείς. Είναι έντονη λοιπόν η παρουσία των σύνθετων υλικών σε αρκετούς τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η ναυπηγική και πολλοί ακόμη βιομηχανικοί τομείς που αφορούν στην κατασκευή προϊόντων απαραίτητων για την διευκόλυνση της καθημερινότητας των ανθρώπων.

1.3.Ορισμός

Ο όρος σύνθετο υλικό κατά τον Changxu Shi ο οποίος έδωσε ένα εμπειριστατωμένο ορισμό είναι ο ακόλουθος: "Τα σύνθετα υλικά είναι νέα υλικά, τα οποία προέρχονται από συνδυασμούς διαφορετικών τύπων υλικών, όπως τα οργανικά πολυμερή, ανόργανα μη μεταλλικά ή μεταλλικά και ούτω καθεξής, μέσω της τεχνολογίας ανάμιξης (compound technology) .Το υλικό που προκύπτει όχι μόνο διατηρεί το κύριο χαρακτηριστικό των αρχικών συστατικών του, αλλά αποκτά και ιδιότητες που δεν παρουσιάζουν τα αρχικά συστατικά μέσω των συνδυασμένων επιδράσεων, με αποτέλεσμα την δημιουργία προϊόντων ανώτερων, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από εκείνα που προκύπτουν από την απλή ανάμιξη γενικά υλικών μεταξύ τους." [5]

Ακόμη κατά τον Agarwal (1990) ως σύνθετο υλικό καλείται "εκείνο που μακροσκοπικά αποτελείται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους". [1]

Το δομικό σύνθετο είναι ένα υλικό σύστημα που αποτελείται από δύο ή περισσότερες φάσεις σε μακροσκοπική κλίμακα, των οποίων η μηχανική απόδοση και οι ιδιότητες έχουν σχεδιαστεί για να είναι ανώτερες από εκείνες των συστατικών υλικών, τα οποία ενεργούν ανεξάρτητα. Η μια από τις φάσεις είναι συνήθως ασυνεχής, πιο άκαμπτη και ισχυρότερη και ονομάζεται οπλισμός (reinforcement) ,ενώ

η λιγότερο άκαμπτη και ασθενέστερη φάση είναι συνεχής και ονομάζεται μήτρα (matrix) .Μερικές φορές λόγω χημικών αλληλεπιδράσεων ή άλλων επιδράσεων επεξεργασίας ,μια επιπρόσθετη ξεχωριστή φάση που ονομάζεται μεσόφαση (interphase) υπάρχει ανάμεσα στον οπλισμό και την μήτρα. Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού εξαρτώνται από τις ιδιότητες των συστατικών του, τη γεωμετρία και την κατανομή των φάσεων του. Η κατανομή του οπλισμού καθορίζει την ομοιογένεια ή ομοιομορφία του συστήματος του υλικού. Όσο περισσότερο ανομοιόμορφη είναι η κατανομή του οπλισμού, τόσο πιο ετερογενές είναι το υλικό και τόσο πιο υψηλότερη είναι η διασπορά των ιδιοτήτων και η πιθανότητα αστοχίας σε ασθενέστερες περιοχές. Η γεωμετρία και ο προσανατολισμός του οπλισμού επηρεάζουν την ανισοτροπία του συστήματος. [6]

Είναι γενικά λογικό το γεγονός πως υπάρχουν αρκετές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα σύνθετα υλικά. Βέβαια, από όλες εκείνες τις κατηγορίες η πιο ευρέως διαδεδομένη είναι εκείνη των ινωδών σύνθετων υλικών (fiber reinforced composites) , όπου η μήτρα ενισχύεται με ίνες (fibers) . Σαν υλικά μήτρας συνήθως χρησιμοποιούνται μέταλλα, κεραμικά και πολυμερή, με τα τελευταία να αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή. Οι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται για ενίσχυση είναι οι ίνες ύαλου (glass fibers) , οι ίνες άνθρακα (carbon fibers) , οι ίνες αραμιδίου(Kevlar) , οι κεραμικές ίνες (ceramic fibers) και οι πολυμερικές ίνες (polymeric fibers) .

1.4.Σημαντικότητα και αντικείμενο της επιστήμης και τεχνολογίας των σύνθετων υλικών

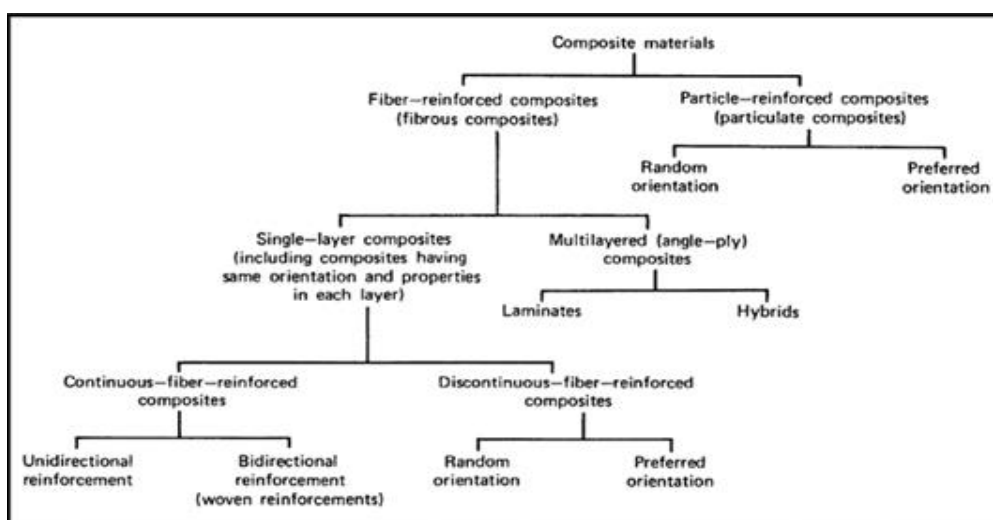
Η μελέτη των σύνθετων υλικών αποτελεί τη φιλοσοφία του υλικού και της διαδικασίας σχεδιασμού ,που επιτρέπει την βέλτιστη σύνθεση των υλικών, μαζί με τον διαρθρωτικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση, σε μια ταυτόχρονη και διαδραστική διαδικασία. Είναι μια επιστήμη και τεχνολογία που απαιτεί στενή αλληλεπίδραση των διαφόρων επιστημονικών κλάδων όπως η δομική σχεδίαση και ανάλυση, η επιστήμη των υλικών, η μηχανική των υλικών και η μηχανική επεξεργασία. Το πεδίο εφαρμογής των σύνθετων υλικών, όσον αφορά στην έρευνα και την τεχνολογία αποσκοπεί στις ακόλουθες εργασίες:

- ✚ Διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών των συστατικών και των σύνθετων υλικών.
- ✚ Βελτιστοποίηση του υλικού για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας.
- ✚ Ανάπτυξη αποτελεσματικών και αποδοτικών διαδικασιών κατασκευής και αξιολόγηση των επιδράσεών τους στις ιδιότητες του υλικού.
- ✚ Ανάπτυξη αναλυτικών διαδικασιών και αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών και την πρόβλεψη της δομικής τους συμπεριφοράς.
- ✚ Ανάπτυξη αποτελεσματικών πειραματικών μεθόδων για τον υλικό χαρακτηρισμό, ανάλυση των τάσεων και ανάλυση αστοχίας.
- ✚ Μη καταστροφική αξιολόγηση του υλικού και της δομικής αξιοπιστίας.
- ✚ Εκτίμηση της αντοχής, κρισιμότητας ελαττώματος και πρόβλεψη διάρκειας ζωής. [6]

1.5.Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

[1] Είναι γενικά γνωστό πως με το πέρασμα του χρόνου η τεχνολογία που αφορά στα σύνθετα υλικά αποκτά ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον. Για το λόγο αυτό λοιπόν υπάρχουν πολυάριθμα είδη σύνθετων υλικών. Το γεγονός αυτό παρέχει την δυνατότητα να τα κατηγοριοποιήσουμε με ποικίλους τρόπους.

Παρακάτω ακολουθεί εικόνα της γενικής ταξινόμησης των σύνθετων υλικών:



Εικόνα 4: Γενική ταξινόμηση των σύνθετων υλικών.

1^{ος} Τρόπος ταξινόμησης

Με βάση το είδος του υλικού της μήτρας του σύνθετου υλικού διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες:

- ❖ Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας-PMC (Polymer Matrix Composites)
- ❖ Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας-CMC (Ceramic Matrix Composites)
- ❖ Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας-MMC (Metal Matrix Composites)

2^{ος} Τρόπος ταξινόμησης

Ανάλογα τώρα με την τάξη μεγέθους την οποία έχει η φάση ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- ❖ Νανοσύνθετα στα οποία η τάξη μεγέθους της διεσπαρμένης φάσης κυμαίνεται από ένα νανόμετρο και μπορεί να φτάσει έως και μερικές εκατοντάδες νανόμετρα.
- ❖ Μικροσύνθετα στα οποία η ασυνεχής φάση ενίσχυσης είναι συνήθως της τάξης του μικρόμετρου.
- ❖ Μακροσύνθετα στα οποία η τάξη μεγέθους του εγκλείσματος είναι συνήθως από μερικά χιλιοστά και ενδέχεται να φτάσει και το ένα μέτρο.

3^{ος} Τρόπος ταξινόμησης

Ένα ακόμη κριτήριο προκειμένου να κατηγοριοποιηθούν τα σύνθετα υλικά αφορά στο συστατικό ενίσχυσης. Οι κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

- ❖ Κοκκώδη σύνθετα υλικά (Particulate composites)
- ❖ Ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-reinforced composites)
- ❖ Πολυστρωματικά σύνθετα υλικά (Laminated composites)

Ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber-reinforced composites)

1^{ος} Τρόπος ταξινόμησης

Όσον αφορά στα ινώδη σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites) ,είναι δυνατόν να γίνει ακόμη μια κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον προσανατολισμό και την διάταξη των ινών. Συνεπώς υπάρχουν οι εξής υποκατηγορίες :

- ❖ Μονοδιευθυντικά ινώδη σύνθετα υλικά, στα οποία όλες οι ίνες έχουν τον ίδιο προσανατολισμό.
- ❖ Πολυδιευθυντικά ινώδη σύνθετα υλικά, στα οποία οι ίνες έχουν διαφορετικές και τυχαίες διευθύνσεις.

2^{ος} Τρόπος ταξινόμησης

Ένας επιπλέον διαχωρισμός των ινωδών σύνθετων υλικών βασίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών και παρατηρούνται οι ακόλουθες κατηγορίες:

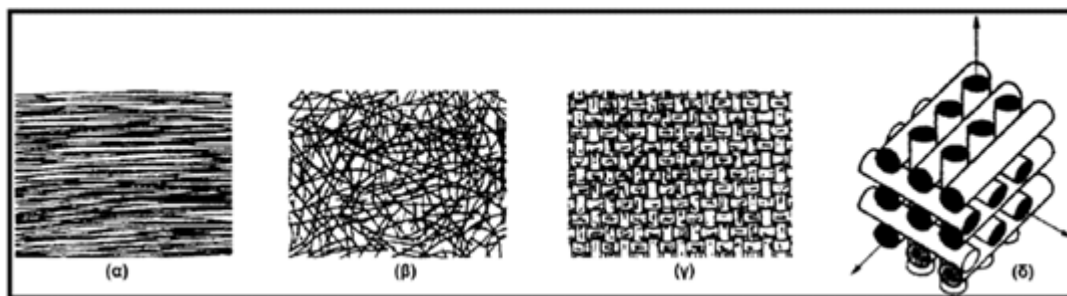
1. Συνεγείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers) ,στις οποίες ισχύει ότι l/d θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη ή ίση από 100.
2. Ασυνεγείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers) ,στις οποίες ισχύει ότι l/d θα πρέπει να είναι μικρότερος από 100.
3. Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers) ,στις οποίες η διάμετρος θα πρέπει να είναι μικρότερη από 1 μικρόμετρο και το μήκος περίπου ίσο με 100 μικρόμετρα.

Πολυδιευθυντικά ινώδη σύνθετα υλικά

Η κατηγορία αυτή των σύνθετων υλικών μπορεί περαιτέρω να διαχωριστεί στις ακόλουθες υποκατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

1. Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
2. Σύνθετα με ίνες σε πλέξη υφάσματος
3. Σύνθετα με ίνες σε τρισσορθογώνια/τρισδιάστατη ύφανση

Ακολουθεί εικόνα που απεικονίζει τύπους διάταξης ινών:



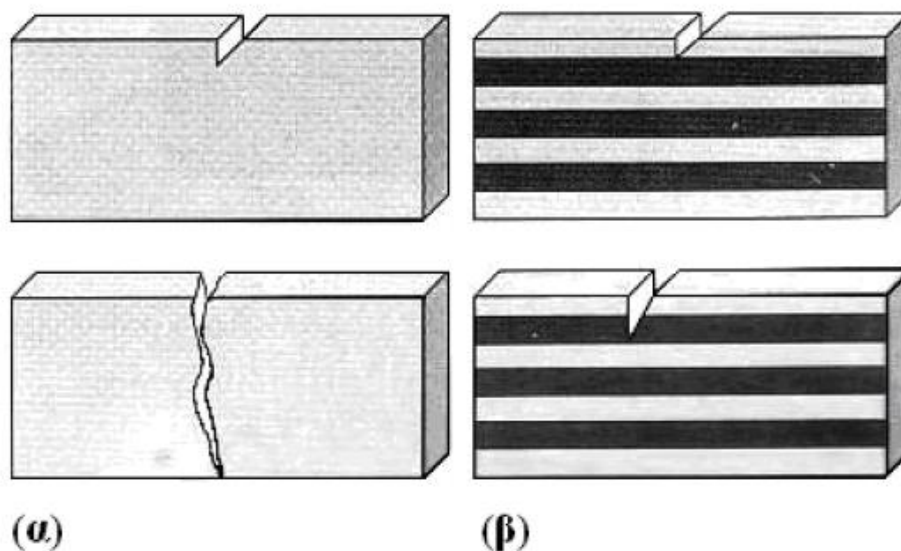
Εικόνα 5: Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια/τρισδιάστατη πλέξη

1.6.Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα σύνθετων υλικών

Λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό των σύνθετων υλικών κατανοούμε τον λόγο που στις μέρες μας παρατηρείται ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην εξέλιξη τεχνολογικά και την χρήση σε αρκετούς τομείς της καθημερινότητας του ανθρώπου των νέων αυτών υλικών. Με ένα σχετικά γρήγορο ρυθμό γίνεται σταδιακή αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών, αφού όλο και περισσότεροι επιστήμονες στρέφουν το ενδιαφέρον τους στο να μελετήσουν και να βελτιώσουν τα υλικά αυτά, αφού πρόκειται για υλικά τα οποία παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ιδιότητες, ανώτερες πάντα εκείνων των συστατικών τους, ο συνδυασμός των οποίων οδηγεί στην δημιουργία τους.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα παραδοσιακά είναι το γεγονός ότι παρουσιάζουν σημαντικά πιο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Βέβαια, στη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων τους συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό τόσο οι ενισχυτικές ίνες όσο και η μήτρα. Η κατάλληλη επιλογή τους και η σωστή αναλογία τους στο σύνθετο υλικό συμβάλλει καθοριστικά στην βέλτιστη συνολικά μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Καταλυτικό φυσικά ρόλο στην συγκεκριμένη πτυχή του σύνθετου παίζει και το γεγονός κατά το οποίο ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής για την οποία προορίζεται, δίνεται η δυνατότητα να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα τέτοιο υλικό έχοντας τις επιθυμητές ιδιότητες. Επιπλέον, ο σχεδιασμός ενός σύνθετου υλικού αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών, αφού εάν ληφθεί υπόψη μια σειρά παραμέτρων επηρεάζεται σημαντικά το τελικό προϊόν όσον αφορά στις τελικές του ιδιότητες και την συμπεριφορά του γενικά ως προς την απόδοσή του.

Όσον αφορά στις ίνες ενίσχυσης συμβάλλουν ουσιαστικά στην σωστή απόδοση του σύνθετου. Ειδικότερα, μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο να αποφευχθεί η οποιαδήποτε διάδοση ρωγμής η οποία μπορεί να οφείλεται σε κάποια εγκοπή.



Εικόνα 6: Διάδοση ρωγμής σε (α) ομογενές υλικό και (β) διφασικό υλικό

Επιπρόσθετα, οι ενισχυτικές ίνες έχουν το σημαντικό χαρακτηριστικό να παραλαμβάνουν σημαντικά υψηλά φορτία μέχρι το υλικό να αστοχήσει πλήρως. Συγκεκριμένα οι τάσεις μεταβιβάζονται προς διάφορες κατευθύνσεις μέσα στην μάζα του υλικού βρίσκοντας ίνες οι οποίες δεν έχουν αστοχήσει ακόμα. Από ένα σημείο και μετά επέρχεται η θραύση.

Σίγουρα όμως οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών δεν αποτελούν το μόνο κριτήριο για την στροφή του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας και των βιομηχανιών προς τα σύνθετα υλικά. Είναι σημαντικό το γεγονός κατά το οποίο τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σημαντικές ιδιότητες που αφορούν για παράδειγμα την αντίσταση στην διάβρωση, την αντίσταση σε φθορά λόγω χρήσης, η θερμική μόνωση, η συμπεριφορά στην κόπωση, η ακουστική μόνωση, το χαμηλό κόστος, το χαμηλό βάρος που οδηγεί σε ελαφριές κατασκευές, η θερμική αγωγιμότητα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Όταν οι ιδιότητες αυτές ή ένα μέρος τους συνδυαστούν για την κατασκευή ενός σύνθετου υλικού μπορούν να επιτευχθεί η δημιουργία σημαντικών κατασκευών, που άλλοτε πιθανά να ήταν σχετικά δύσκολο να υπάρξουν.

Το βασικά βέβαια πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά αφορά στις ειδικές τους ιδιότητες. Με τον όρο ειδικές ιδιότητες αναφερόμαστε στο λόγο μιας ιδιότητας ενός υλικού προς την πυκνότητά του. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή της ειδικής ιδιότητας τόσο και πιο ελαφρύ θα είναι το υλικό και τόσο πιο μεγαλύτερη τιμή της ιδιότητας του θα παρατηρείται. Αυτή η ιδιότητα των σύνθετων υλικών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή για την κατασκευή εφαρμογών που απαιτείται συνδυασμός χαμηλού βάρους και υψηλής απόδοσης όπως για παράδειγμα στον τομέα της αεροναυπηγικής. [2] , [7]

2.Σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας ενισχυμένα ίνες

2.1.0 ρόλος της μήτρας

Η κατηγοριοποίηση σύμφωνα με το υλικό της μήτρας δεν είναι τυχαία αν αναλογιστεί κανείς τον ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο της όσον αφορά στο σύνθετο υλικό. Βέβαια, έναν ακόμη λόγο αποτελεί το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις το 30% με 40% του συνολικού όγκου του σύνθετου υλικού καταλαμβάνεται από την μήτρα. Ειδικότερα, η μήτρα μεταφέρει τα φορτία μέσω της διεπιφάνειας στο έγκλεισμα ,το οποίο προστατεύει συγχρόνως από τους όποιους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι ενδέχεται να προκαλέσουν τριβή και διάβρωση. Έχει σημαντικό συνδετικό ρόλο, αφού αποτελεί συγκολλητική ουσία και φυσικά συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Επιπλέον, συμβάλλει στην διατήρηση του σχήματος του σύνθετου υλικού, ευθυγραμμίζοντας τις ενισχύσεις.[8] Τέλος, από την επιλογή του τύπου της μήτρας που θα χρησιμοποιηθεί κρίνεται και ο βιομηχανικός εξοπλισμός που θα είναι απαραίτητος.

2.1.1.Ταξινόμηση των μητρών

Οι μήτρες διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

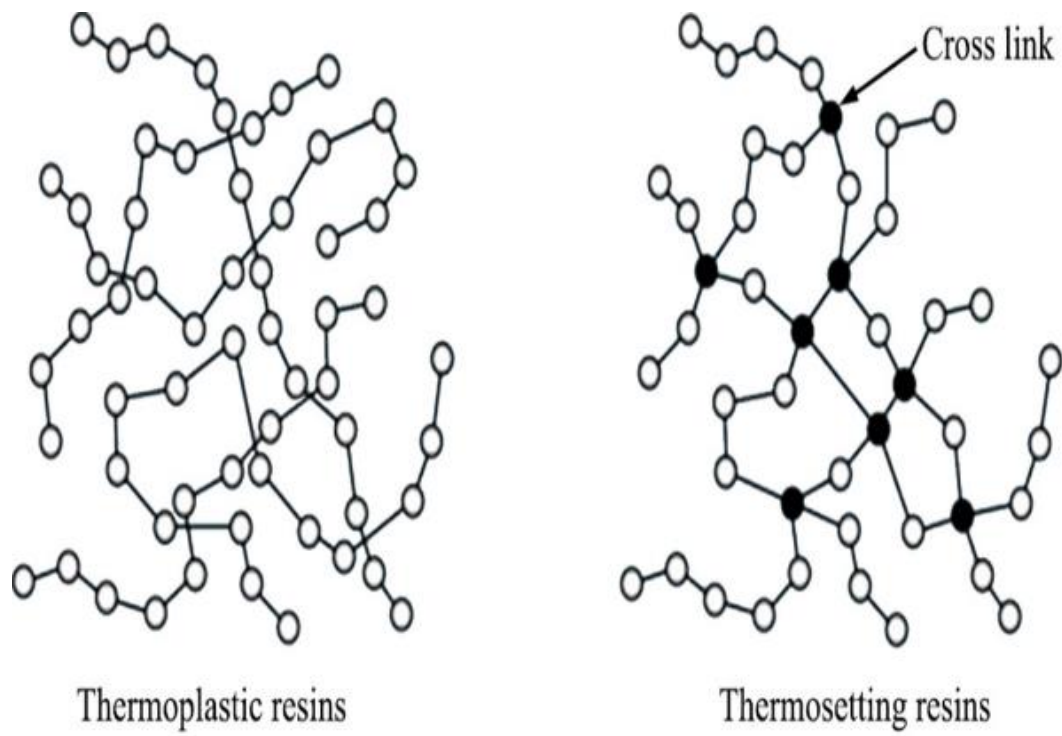
- ✓ **Οργανικές μήτρες**
- ✓ **Κεραμικές μήτρες**

- ✓ Μεταλλικές μήτρες

2.2.Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες με την σειρά τους διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- ✓ Θερμοπλαστικές ή Πλαστομερείς οργανικές μήτρες
- ✓ Θεμοσκληρυνόμενες ή Θερμοσταθερές οργανικές μήτρες
- ✓ Ελαστομερείς ή Ελαστικές μήτρες



Εικόνα 7: Μοριακή δομή θερμοπλαστικών ρητινών (αριστερά) και θερμοσκληρυνόμενων ρητινών (δεξιά)

2.2.1.Θερμοπλαστικές ή Πλαστομερείς Μήτρες (Thermoplastic)

Όπως ήδη προαναφέρθηκε στα σύνθετα υλικά γίνεται χρήση μήτρας από πολυμερές υλικό. Οι θερμοπλαστικές μήτρες λοιπόν ως πολυμερή αποτελούνται από γραμμικά μόρια. Με την επιβολή θέρμανσης παρατηρείται μια χαλάρωση των μοριακών δεσμών με αποτέλεσμα την μετατροπή τους σε ρευστά. Βέβαια, στο χρονικό διάστημα κατά το οποίο υφίστανται θέρμανση, για όσο αυτό διαρκέσει, είναι εφικτό να υποστούν μορφοποίηση με την άσκηση υψηλών πιέσεων. Με την ίδια

λογική και αφού υποστούν ψύξη εν συνεχεία μετατρέπονται σε στερεό υλικό. Αυτός ο κύκλος ρευστοποίησης με την επιβολή θέρμανσης και στερεοποίησης με την επιβολή ψύξης μπορεί να επαναληφθεί θεωρητικά άπειρες φορές και αυτό βέβαια αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας μορφοποίησης των συγκεκριμένων υλικών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες. Το μόνο μειονέκτημα που ίσως επιφέρει η επανάληψη της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι ότι από ένα σημείο και μετά υπάρχει πιθανότητα να παρατηρηθεί υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού.

Τα θερμοπλαστικά υλικά γενικά διατίθενται σε υγρή μορφή ή ακόμα και σε στερεά. Είναι παρατημένο ότι είναι ευαίσθητα στην θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης.

Όσον αφορά στον όγκο παραγωγής τους είναι γενικά γνωστό πως αποτελούν την πλειονότητα της παραγωγής πολυμερών στις μέρες μας.

Τυπικές μορφές υλικών πολυμερικής μήτρας αποτελούν τα πολυαιθυλένιο (PE), το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυακρilonιτρίλιο (PAN), τα πολυαμίδια (Nylon), τα φθοροπολυμερή και αρκετά άλλα.[9]

2.2.2.Θερμοσκληρυνόμενες ή Θερμοσταθερές μήτρες (Thermosettings)

Αποτελούνται από γραμμικά μόρια και σχετικά μικρά μακρομόρια. Στη ρευστή τους κατάσταση παρουσιάζονται σαν μόρια μακράς αλυσίδας, αλλά με δυνατότητα να αντιδρούν και να σκληραίνουν. Με την επιβολή θέρμανσης ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και αποκτούν την δυνατότητα να μορφοποιούνται, αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά. Η διαφορά τους με τις θερμοπλαστικές μήτρες είναι πως η διαδικασία αυτή είναι μη αντιστρεπτή. Επομένως δεν είναι εφικτό να μαλακώνουν ξανά και να αποκτούν την δυνατότητα να ρέουν.

Προκειμένου να κατανοηθεί η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται πρέπει να αναφερθεί πως ακολουθεί δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο παρατηρείται δημιουργία μακρομοριακών αλυσίδων που παρουσιάζουν την δυνατότητα να αντιδράσουν περαιτέρω. Κατά το δεύτερο στάδιο γίνεται εισαγωγή καταλύτη που

ενεργοποιεί χημική αντίδραση των μακρομορίων μεταξύ τους με αποτέλεσμα να παρατηρείται έντονα η δημιουργία σταυροδεσμών (crosslinks) .Οι εν λόγω δεσμοί πραγματοποιούνται μεταξύ των μακρομορίων και σαν αποτέλεσμα έπειτα από την ψύξη του το υλικό γίνεται έντονα άκαμπτο και στερεό. Δημιουργείται τελικά σε μια θερμοσκληρυνόμενη μήτρα ένα τρισδιάστατο στιβαρό πλέγμα μορίων (network) ,στο οποίο τα μόρια παρουσιάζουν ελάχιστους βαθμούς ελευθερίας.

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι περισσότερο διαδεδομένες για αρκετούς λόγους. Ειδικότερα, παρουσιάζουν χαμηλού σημείου τήξης ιξώδες και απαιτούν χαμηλές θερμοκρασίες για την επεξεργασία τους. Επιπλέον, συμβάλλουν στον καλύτερο εμποτισμό των ινών ενίσχυσης στα σύνθετα υλικά, σημειώνοντας χαμηλό κόστος σε σχέση με την τιμή τους.[8]

Τυπικές μορφές θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών αποτελούν τα φαινολικά πολυμερή ,οι εποξικές ρητίνες, οι ακόρεστοι πολυεστέρες, οι αμινοπλάστες, τα πολυϊμίδια και πολλά άλλα ακόμα.[8], [9]

2.2.3.Ελαστομερείς ή Ελαστικές Μήτρες (Elastomers, Rubbers)

Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένης μορφής αλυσίδες. Στην περίπτωση των ελαστομερών πολυμερών εμφανίζεται έντονα η ιδιότητα της υπερελαστικότητας. Σύμφωνα με την ιδιότητα αυτή παρατηρείται κατά την κατεργασία του εφελκυσμού για παράδειγμα πάρα πολύ μεγάλη επιμήκυνση, ενώ κατά την αποφόρτιση το υλικό παρουσιάζει ακαριαία αποφόρτιση αποκτώντας ταχύτατα πλήρη επαναφορά στην αρχική του κατάσταση. Έχει γενικά παρατηρηθεί πως η ιδιότητα της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιακών αλλαγών και συνθηκών περιβάλλοντος. Επιπλέον, έχουν μικρό έως αμελητέο βαθμό κρυσταλλικότητας ενώ σχετικά με το μοριακό τους βάρος γνωρίζουμε ότι είναι αρκετά υψηλό.

Τυπικά ελαστομερή πολυμερή είναι τα ακόλουθα: Το συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, το συνθετικό πολυισοπρένιο, το ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, το πολυχλωροπροπένιο, οι σιλικόνες και πολλά άλλα.[9]

2.3. Τύποι ρητινών

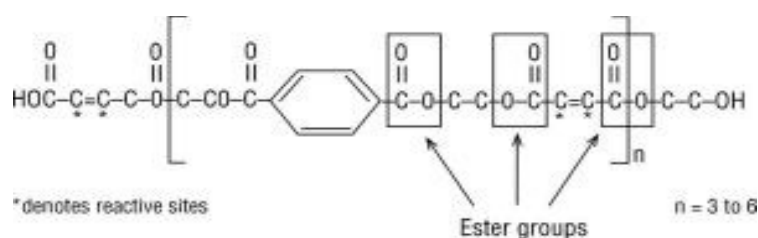
2.3.1. Πολυεστερικές ρητίνες

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι από τα πιο διαδεδομένα συστήματα ρητίνης. Ανήκουν στην κατηγορία των ακόρεστων ρητινών (unsaturated resins). Πρόκειται για θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή τα οποία μπορούν να υποστούν curing εφόσον εφαρμοστούν οι κατάλληλες συνθήκες. Συνήθως γίνεται αναφορά στην κατηγορία αυτών των ρητινών με την ονομασία 'πολυεστέρες'.

Βασιζόμενοι στην οργανική χημεία, είναι γενικά γνωστό πως από την αντίδραση μιας αλκοόλης με ένα οργανικό οξύ γίνεται παραγωγή εστέρα όπως και νερού. Κάνοντας χρήση λοιπόν κατάλληλων αλκοολών όπως η γλυκόλη όπως επίσης και διβασικών οξέων με την προσθήκη ταυτόχρονα κατάλληλων μονομερών γίνεται δυνατή η παραγωγή μιας μεγάλης ποικιλίας πολυεστέρων.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πολυεστερικών ρητινών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά βάση στην βιομηχανία κατασκευής σύνθετων υλικών και αυτές είναι οι ορθοφθαλικές και οι ισοφθαλικές. Η ορθοφθαλική πολυεστερική ρητίνη (orthophthalic polyester resin) αποτελεί την πιο οικονομική κατηγορία ρητίνης και για το λόγο αυτό παρατηρείται και η σε μεγάλο βαθμό χρήση της. Όσον αφορά στην ισοφθαλική πολυεστερική ρητίνη (isophthalic polyester resin), ο τύπος αυτός ρητίνης τώρα γίνεται αρκετά διαδεδομένος, ιδιαίτερα στην ναυπηγική, αφού παρουσιάζει υψηλή αντοχή στο νερό και φυσικά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Έντονη είναι η χρήση τους λοιπόν σε κατασκευές υψηλής αντοχής με μοναδικό ίσως μειονέκτημα τους το υψηλότερο κόστος το οποίο παρουσιάζουν.

Τυπική μορφή ενός πολυεστέρα παρατηρείται στην ακόλουθη εικόνα.



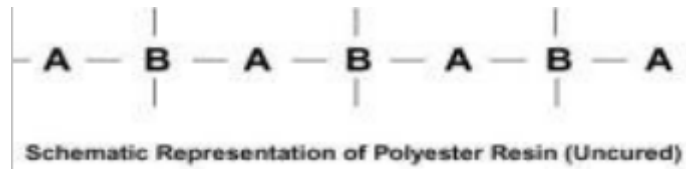
Εικόνα 8: Τυπική μορφή πολυεστέρα

Η μορφή της ομάδας του εστέρα είναι η εξής: CO-O-C

Οι περισσότερες πολυεστερικές ρητίνες έχουν υψηλό ιξώδες, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα παχύρρευστες. Έχουν υγρή μορφή με ελαφρύ χρωματισμό και αποτελούνται από ένα διάλυμα ενός πολυεστέρα σε ένα μονομερές το οποίο ονομάζεται στυρένιο. Η προσθήκη στυρενίου σε ποσοστό περισσότερο από 50% συμβάλλει στην μείωση του ιξώδους και συνεπώς στην ευκολότερη διαχείριση της ρητίνης όσον αφορά στην επεξεργασία της. Σημαντικός ακόμα είναι ο ρόλος του στυρενίου στον πολυμερισμό των πολυεστερικών ρητινών συνεισφέροντας έτσι στην δημιουργία σταυροδεσμών και την μετατροπή τελικά της ρητίνης από υγρή σε στερεή μορφή. Έτσι, οι πολυεστερικές ρητίνες μπορούν να μορφοποιηθούν χωρίς την χρήση πίεσης και για το λόγο αυτό αποκαλούνται και ρητίνες "χαμηλής πίεσης".

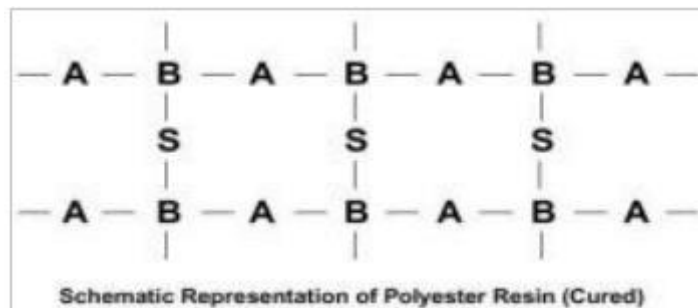
Όσον αφορά στην διαδικασία πολυμερισμού των πολυεστερικών ρητινών, συνήθως παρατηρείται η χρήση επιταχυντών, καταλυτών και αναστολέων προκειμένου να γίνει η διαδικασία του πολυμερισμού μέσα σε επιλεγμένα χρονικά όρια. Βέβαια, οι πολυεστερικές ρητίνες από μόνες τους, είναι γενικά γνωστό πως υφίστανται πολυμερισμό. Απαιτείται όμως κάποιο χρονικό διάστημα, το οποίο εάν είναι αναγκαίο να ελεγχθεί είναι απαραίτητη η χρήση των προαναφερθέντων προϊόντων. Όσον αφορά στον καταλύτη, δεν παρατηρείται συμμετοχή του σε κάποια αντίδραση απλά συμβάλλει στην έναρξη της διαδικασίας του πολυμερισμού. Η ποσότητα του καταλύτη που θα χρησιμοποιηθεί, σε συνδυασμό με την κατάλληλη θερμοκρασία η οποία θα επιλεγθεί επηρεάζουν σημαντικά τον χρόνο στον οποίο θα ολοκληρωθεί ο πολυμερισμός. Σχετικά με τους επιταχυντές και τους αναστολείς, ο βασικός ρόλος τους έγκειται στο να επιταχύνουν και να επιβραδύνουν αντίστοιχα την διαδικασία.

Οι μοριακές αλυσίδες ενός πολυεστέρα μπορούν να παρουσιαστούν όπως στην εικόνα που ακολουθεί με το B να αντιπροσωπεύει τις ελεύθερες ρίζες του μορίου.



Εικόνα 9: Σχηματική απεικόνιση μοριακής αλυσίδας πολυεστερικής ρητίνης

Με την προσθήκη λοιπόν στυρενίου και ποσότητας καταλύτη παρατηρείται δημιουργία σταυροδεσμών μεταξύ των αλυσίδων όπως στην εικόνα που ακολουθεί με το S να αντιπροσωπεύει το στυρένιο.

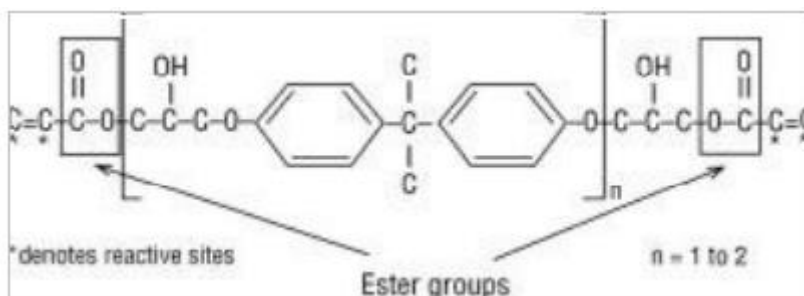


Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μοριακών αλυσίδων πολυεστερικής ρητίνης που υποστεί πολυμερισμό

2.3.2.Βινυλεστερικές Ρητίνες

Η μοριακή δομή των βινυλεστερικών ρητινών παρουσιάζει παρόμοια μορφή με εκείνη των πολυεστερικών. Διαφέρει μονάχα η τοποθεσία στην μοριακή αλυσίδα ενός βινυλεστέρα των ελεύθερων ριζών, οι οποίες βρίσκονται πιο συγκεκριμένα στα άκρα της αλυσίδας. Οι βινυλεστέρες φέρουν μικρότερο αριθμό εστερικών ομάδων και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε νερό και άλλες χημικές ουσίες. Η ιδιότητα αυτή των βινυλεστερικών ρητινών σε σχέση με την αντοχή τους, τις καθιστά και την κύρια επιλογή σε εφαρμογές σωληνώσεων ή στην κατασκευή δεξαμενών για την αποθήκευση χημικών ουσιών.

Παρακάτω ακολουθεί σχηματική απεικόνιση της εξιδανικευμένης χημικής δομής ενός τυπικού βινυλεστέρα.

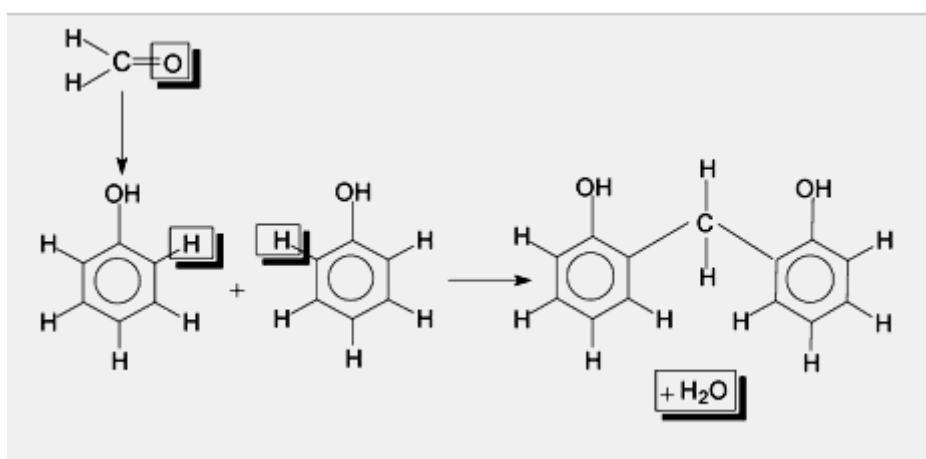


Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση της εξιδανικευμένης χημικής δομής τυπικού βινυλεστέρα

Όσον αφορά στο κόστος τους είναι σχετικά υψηλότερο από εκείνο των πολυεστερικών ρητινών και για το λόγο αυτό δεν είναι και συχνή η χρήση τους σε πολλές εφαρμογές. Στις ιδιότητες των βινυλεστερικών ρητινών συγκαταλέγεται η αντοχή σε κόπωση και κρούση και η υψηλή δυσκαμψία που παρουσιάζουν. Γίνεται χρήση τους με περιορισμό σε μικρά σκάφη υψηλών απαιτήσεων. [10]

2.3.3. Φαινολικές ρητίνες

Οι φαινολικές ρητίνες προέρχονται από την αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ φαινολών ή φαινολικών παραγώγων (ρεσορκινόλη) και αλδευδών (φορμαλδεΐδη και φουρφουράλη). Παρακάτω παρατίθεται εικόνα της αντίδρασης.



Εικόνα 12: Αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ φαινολών και αλδευδών για την παραγωγή φαινολικών ρητινών

Εάν η αναλογία φαινόλης προς φορμαλδεΐδη είναι μεγαλύτερη της μονάδας ένα γραμμικό πολυμερές προκύπτει με έναν όξινο καταλύτη. Σε περίπτωση όμως που

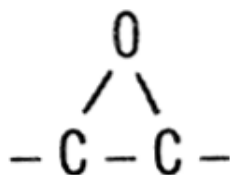
έχω την παραπάνω αναλογία μικρότερη της μονάδας και ένα βασικό καταλύτη τότε προκύπτει ένα πολυμερές τρισδιάστατης δομής δικτύου.

Οι φαινολικές ρητίνες παρουσιάζουν το βασικό πλεονέκτημα της υψηλής αντοχής σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Η καλή τους αυτή συμπεριφορά οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης που τις χαρακτηρίζει. Ειδικότερα η εν λόγω θερμοκρασία αγγίζει τους 530°C ξεπερνώντας κατά πολύ την θερμοκρασία ανάφλεξης των πολυεστερικών ρητινών που δεν ξεπερνά τους 370°C. Η καλή συμπεριφορά που παρουσιάζουν σε συνθήκες φωτιάς ενισχύεται από την χαμηλή ταχύτητα διάδοσης της φλόγας και από την χαμηλή εκπομπή καπνού. Επιπρόσθετα, παρουσιάζουν σημαντικές συγκολλητικές και διηλεκτρικές ιδιότητες όπως και υψηλή αντίσταση στην τριβή και την χημική προσβολή. Στα μειονεκτήματα των φαινολικών ρητινών συγκαταλέγονται οι μέτριες μηχανικές ιδιότητες και η μη καλή συμπεριφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον αφού χαρακτηρίζονται από υψηλή χημική έλξη προς το νερό.

Σημαντική είναι η εφαρμογή τους όσον αφορά σε περιπτώσεις ηλεκτρικής μόνωσης όπως και στην αυτοκινητοβιομηχανία για την παραγωγή αρκετών μορφοποιημένων εξαρτημάτων. Αρκετά μεγάλη εφαρμογή βρίσκουν επίσης και σε αρκετά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης.

2.3.4.Εποξικές (εποξειδικές) ρητίνες

Για πρώτη φορά πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη παραγωγή εποξικών ρητινών, στα τέλη του 1930 και τις αρχές του 1940, σε Ευρώπη και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Ο όρος 'εποξική ρητίνη' αναφέρεται σε μια ευρεία κατηγορία θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Χαρακτηριστικό των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών αποτελεί η δημιουργία σταυροδεσμών (cross-links). Στις εποξικές ρητίνες λοιπόν παρατηρείται πρωταρχική δημιουργία σταυροδεσμών μέσω της αντίδρασης της εποξικής ομάδας. Γενικά, μια εποξική ρητίνη μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μόριο το οποίο αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα άνθρακα σε μορφή δακτυλίου. Ακολουθεί σχετική εικόνα δομής εποξικών ρητινών.



Εικόνα 13: Τυπική δομή εποξικής ρητίνης σε μορφή δακτυλίου

Ενώ η παρουσία αυτής της λειτουργικής ομάδας ορίζει ένα μόριο, ως ένα εποξείδιο, η μοριακή βάση στην οποία είναι συνδεδεμένη μπορεί να ποικίλει, δίδοντας διάφορες κατηγορίες εποξικών ρητινών. Σε συνδυασμό με την σωστή επιλογή ενός παράγοντα σκλήρυνσης (σκληρυντής) και τον κατάλληλο τροποποιητή (modifier) ,οι εποξικές ρητίνες που προκύπτουν μπορούν να βρουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Η πιο σημαντική πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στην παραγωγή εποξικών ρητινών είναι η επιχλωρουδρίνη, η οποία χρησιμοποιείται σαν βάση για σχεδόν κάθε ρητίνη που διατίθεται στο εμπόριο. Στην περίπτωση αυτή εξαιρούνται μονάχα οι κυκλοαλιφατικές ρητίνες.

Οι εποξικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο για εφαρμογές σύνθετων υλικών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εκείνες που είναι κατάλληλες για δομικές ή υψηλής θερμοκρασίας εφαρμογές και εκείνες που είναι κατάλληλες για μη δομικές ή χαμηλής θερμοκρασίας εφαρμογές. Ο παράγοντας στον οποίο στηρίζεται η παραπάνω διάκριση τους είναι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) .Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι η θερμοκρασία κάτω από την οποία ένα πολυμερές βρίσκεται σε υαλώδη κατάσταση όπου παρατηρείται πολύ μικρή κινητικότητα των τμημάτων της πολυμερικής αλυσίδας. Πάνω από την θερμοκρασία αυτή αντίθετα παρατηρείται κίνηση των τμημάτων της πολυμερικής αλυσίδας και το πολυμερές περνά στην ελαστική κατάσταση (rubbery) .Το μέτρο ελαστικότητας ενός υλικού πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι συνήθως μερικές τάξεις μεγέθους μικρότερο σε σχέση με την τιμή του κάτω από την θερμοκρασία αυτή. Το γεγονός αυτό λοιπόν έχει πολύ σημαντικό ρόλο όσον αφορά στην επιλογή μιας ρητίνης. Επιπλέον, η θερμοκρασία T_g επηρεάζεται από την απορρόφηση υγρασίας και την ύπαρξη διαλυτών.

Στις εποξικές ρητίνες που έχουν υποστεί θερμική θεραπεία (cured resins) η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης εξαρτάται και από τη μοριακή δομή τους, η οποία αναπτύσσεται κατά την διεργασία της θερμικής θεραπείας (curing) και που χαρακτηρίζεται από ιδιότητες όπως η πυκνότητα των σταυροδεσμών και η δυσκαμψία του σκελετού του πολυμερούς. Είναι γενικά παρατηρημένο, ότι ρητίνες που έχουν υποστεί πλήρως curing και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα σταυροδεσμών. Έτσι η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία στην οποία μια εποξική ρητίνη υφίσταται curing και η T_g σημειώνει μεταβολή με πιθανή αλλαγής της. Έτσι ένα σύστημα ρητίνης χαμηλής θερμοκρασίας θα έχει και μικρότερη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

Αξίζει να θυμόμαστε ότι η μοριακή δομή και άλλα χαρακτηριστικά του προϊόντος που έχει υποστεί θερμική θεραπεία (curing) εξαρτώνται το ίδιο σε μεγάλο βαθμό τόσο από την επιλογή της βασικής ρητίνης όσο και από τον σκληρυντή και τον τροποποιητή. Οι ρητίνες που δεν έχουν υποστεί θεραπεία (uncured resins) διαφοροποιούνται σε σχέση με το ιξώδες σε θερμοκρασία δωματίου και τον τύπο του υλικού.

Καθώς οι δυνατότητες κατεργασίας εξελίσσονται ή τροποποιούνται νέοι τύποι υλικών παράγονται. Έχουμε λοιπόν υγρές ρητίνες, ρητίνες σε σκόνη, διαλύματα που παράγονται από διαλύτες και σε μερικές περιπτώσεις σαν υδατικά γαλακτώματα (based on water paints) .

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό για την επιλογή ρητινών είναι το εποξικό ισοδύναμο βάρος (EEW) το οποίο ορίζεται ως το βάρος της ρητίνης ανά ομάδα εποξειδίου. Το εποξικό ισοδύναμο βάρος χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η στοιχειομετρική αναλογία ανάμεσα στην ρητίνη και τον σκληρυντή, προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι ιδιότητες που αποκτώνται μέσω του curing. Διαιρώντας το μοριακό βάρος μιας ρητίνης με το πλήθος των εποξικών ομάδων ανά μόριο υπολογίζουμε το EEW. Στην πράξη όμως, η εκτίμηση θα είναι χαμηλή, καθώς στις περισσότερες ρητίνες που διατίθενται παρατηρείται κατανομή του μοριακού βάρους και όχι εξιδανικευμένες δομές.

Στις εφαρμογές των σύνθετων υλικών γίνεται κατά βάση χρήση τριών τύπων εποξικών ρητινών. Αυτοί είναι οι ακόλουθοι: φαινολικοί γλυκιδυλαιθέρες (phenolic glycidyl ethers) ,αρωματικές γλυκιδυλικές αμίνες (aromatic glycidyl amines) και κυκλοαλιφατικές (cycloaliphatics) .

Όσον αφορά στις φαινολικούς γλυκιδυλαιθέρες παράγονται από την αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ της επιχλωρουδρίνης και της φαινολικής ομάδας. Η δομή του μορίου που περιέχει την φαινόλη και το πλήθος των φαινολικών ομάδων διακρίνουν περαιτέρω αυτούς τους τύπους ρητινών. Η κύρια εποξική ρητίνη της ομάδας αυτής είναι η DGEBA γλυκιδυλαιθέρας δυσφαινόλης-A. Άλλες εποξικές ρητίνες της ομάδας αυτής είναι και η τετραβρομοδισφαινόλη-A (tetrabromo bisphenol-A) .Αυτές οι βρωμιούχες ρητίνες έχουν την ιδιότητα να επιβραδύνουν την φλόγα στην ανάπτυξή της και χρήση τους μεγάλη παρατηρείται σε ηλεκτρικές εφαρμογές. Ένας ακόμα τύπος φαινολικής εποξικής ρητίνης είναι και η διγλυκιδυλαιθέρας δυσφαινόλης -F,η οποία έχει χαμηλό ιξώδες.

Οι γλυκιδυλικές αμίνες (glycidyl amines) δημιουργούνται από την αντίδραση της επιχλωρουδρίνης με μια αμίνη με τις αρωματικές αμίνες να προτιμούνται για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών. Πιο διαθέσιμη ρητίνη της ομάδας αυτής είναι η TGMDA (tetraglycidyl methylene dianiline) τετραγλυκιδυλική μεθυλοδιανιλίνη.

Σε σχέση με τις κυκλοαλιφατικές οι εποξικές ρητίνες διαφοροποιούνται διότι περιέχουν την εποξική ομάδα στο εσωτερικό της δομής του δακτυλίου και όχι από έξω. Έχουν πολύ χαμηλό ιξώδες και χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα της υψηλής θερμοκρασίας απόδοσης.

Οι εποξικές ρητίνες αντιδρούν με ένα μεγάλο αριθμό χημικών ουσιών που ονομάζονται σκληρυντές. Όπως οι αμίνες, τα παράγωγα αμινών και οι ανυδρίτες. Οι εποξικές ρητίνες διαμορφώνονται με άπειρο αριθμό τρόπων προκειμένου να υπάρχει ένας σχετικός έλεγχος χαρακτηριστικών, όπως η σταθερότητα του συστήματος, η κινηματική της θερμικής θεραπείας, οι φυσικοί τύποι ,η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ,η μηχανική απόδοση και η αντίσταση στην χημική προσβολή. Οι κύκλοι της θερμικής θεραπείας κυμαίνονται από δευτερόλεπτα σε μέρες με ορισμένα συστήματα που ενεργοποιούνται με την θερμότητα να παραμένουν σε λανθάνουσα

κατάσταση από μήνες έως και χρόνια σε θερμοκρασία. Η εποξική ρητίνη που δεν έχει υποστεί θερμική θεραπεία (uncured resin) μπορεί να είναι στερεής μορφής, υγρής ή ελαστικής ,και μπορεί να υποστεί θερμική θεραπεία σε θερμοκρασίες από 5-260 °C (40-500 °F) .Το τελικό προϊόν, το οποίο έχει δεχτεί πλήρως curing μπορεί να είναι μαλακό και εύκαμπτο ή άκαμπτο και υαλώδες με την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης να κυμαίνεται από θερμοκρασίες μικρότερες εκείνης του δωματίου μέχρι και τους 260°C. [11]

2.3.4.1.Σκληρυντές

Οι σκληρυντές αποτελούν χημικές ουσίες οι οποίες αντιδρούν με τις εποξικές ρητίνες. Διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες

- σκληρυντές θερμοκρασίας δωματίου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν για παράδειγμα οι DETA (diethylene triamine), TETA (triethylene tetramine)
- σκληρυντές θερμοκρασίας δωματίου ή υψηλής θερμοκρασίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συμπλέγματα BF₃ τα ιμιδαζόλια. Αντί για pot life (λεπτά ή ώρες) μπορούν να παραμείνουν σε λανθάνουσα κατάσταση από ώρες έως και μέρες. Με τον όρο pot life εννοούμε τον χρόνο εργασιμότητας που είναι ο χρόνος που έχει κάποιος στην διάθεσή του πριν αρχίσει να μειώνεται το ιξώδες ενός μίγματος ρητίνης κατά την ανάμιξή του. Οι σκληρυντές της κατηγορίας αυτής συνήθως χρησιμοποιούνται σαν επιταχυντές σε συνδυασμό με άλλους εποξικούς σκληρυντές.
- Υψηλής θερμοκρασίας σκληρυντές. Στην κατηγορία αυτή συνήθως ανήκουν αρωματικές αμίνες και ανυδρίτες. Οι αρωματικές αμίνες βρίσκονται συνήθως σε μορφή σκόνης που ανακατεύεται μέσα στην ρητίνη ή τήκεται μέσα σε αυτή. Πιο διαδεδομένη αρωματική αμίνη είναι το διαμινοδιφαινυλομεθάνιο [4,4'-diaminodiphenyl methane,DADM] .Αλλιώς ονομάζεται και MDA, DDM. Λόγω του ότι είναι αρκετά καρκινογόνο υπήρξε ανάγκη εύρεσης λιγότερο τοξικών αρωματικών αμιμών. Η λιγότερο τοξική αμίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι η MPDA. Οι ανυδρίτες επιλέγονται συνήθως διότι έχουν χαμηλό ιξώδες, μη κρίσιμες αναλογίες ανάμιξης, προκαλούν ελάχιστο ερεθισμό σε επαφή με το δέρμα, και έχουν υψηλό χρόνο εργασιμότητας. Η χρήση τους οδηγεί σε υψηλή θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, τέλειες ηλεκτρικές ιδιότητες,

χαμηλό βαθμό συρρίκνωσης και διατήρηση των φυσικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.

- Miscelleneous (ανάμικτοι) σκληρυντές. Εδώ συναντούμε θειόλες και πολυσουλφίδια για παράδειγμα. Είναι αναγκαία η χρήση τους σε περίπτωση σταθερότητας συνθηκών δωματίου (θερμοκρασίας) και όταν απαιτείται άμεσα υψηλή θερμοκρασία θερμικής θεραπείας (T_{cure}) . [11]

2.4. Ίνες ενίσχυσης

Οι ίνες αποτελούν ένα από τα βασικά συστατικά του σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας. Ο ρόλος των ινών αφορά στην ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός συστήματος ρητίνης, η οποία συνήθως χρησιμοποιείται ως υλικό μήτρας. Όπως γίνεται κατανοητό, δεδομένου του μεγάλου αριθμού εφαρμογών, υπάρχουν αρκετοί τύποι ινών. Ο κάθε τύπος χαρακτηρίζεται από διαφορετικές ιδιότητες, επηρεάζοντας το σύνθετο υλικό ποικιλοτρόπως.

Οι ίνες χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή τιμή του λόγου μήκους προς την διάμετρο όπως και από το γεγονός ότι η διάμετρος τους πλησιάζει σαν τιμή το μέγεθος των κρυστάλλων του υλικού των ινών. Με τον τρόπο αυτό οι κρύσταλλοι προσανατολίζονται κατά την κατεύθυνση του άξονα της ίνας. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια εξήγηση για το ότι παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται, σε οποιαδήποτε άλλη μορφή.

Υπάρχουν συγκεκριμένοι παράγοντες από τους οποίους καθορίζεται η συνεισφορά των ενισχυτικών ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν στο ποσοστό των ινών στο σύνθετο υλικό, τον προσανατολισμό των ενισχυτικών ινών και την επιφανειακή επίδραση μεταξύ των ινών και της ρητίνης.

Οι ίνες ενίσχυσης σήμερα διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- ίνες γυαλιού (Fiberglass)
- ίνες άνθρακα (Carbon fibers) -γραφίτη
- ίνες πολυμερούς (Polymeric fibers)

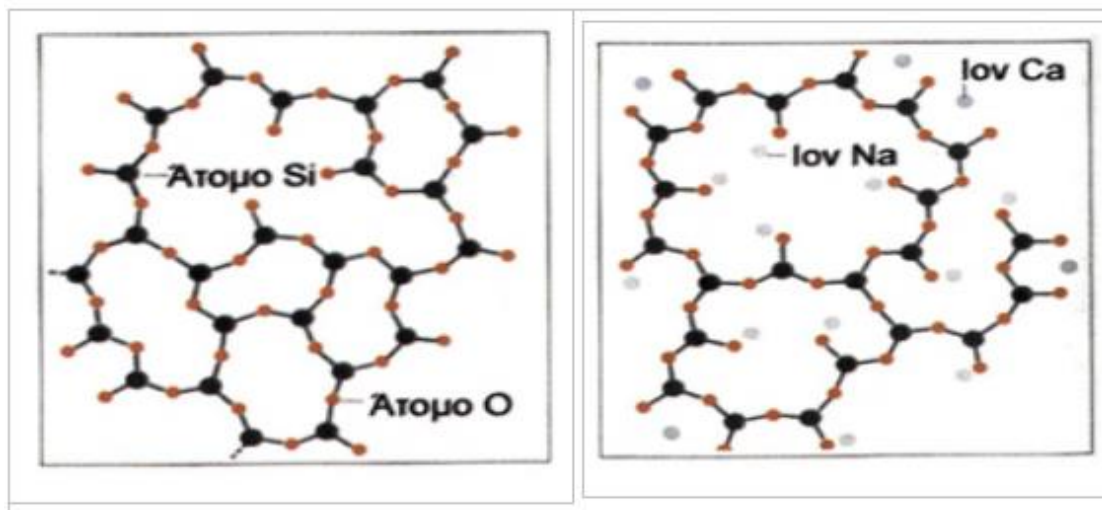
Όσον αφορά στην χρήση τους στα σύνθετα υλικά, η μορφή τους ενδέχεται να είναι είτε νήματος είτε υφάσματος με μια μεγάλη ποικιλία μορφών πλέξεως.

2.4.1. Ίνες γυαλιού (Fiberglass)

Η ιστορία των ινών γυαλιού τοποθετείται χρονικά μερικούς αιώνες π.Χ. Ειδικότερα, στην Αίγυπτο η πρώτη μορφή μη ποιοτικά καλών ινών κάνει την εμφάνισή της. Οι εν λόγω ίνες σχηματίζονταν ύστερα από την θέρμανση γυαλιού και κατασκευάζονταν μέσα σε δοχεία με περιέλιξη επί μιας ατράκτου και σύντηξη. Πολύ αργότερα, το 1893 πρώτος ο Edward Libbey κατασκεύασε ίνες γυαλιού οι οποίες είχαν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία και γινόταν χρήση τους σε πλέξη. Η πρώτη εταιρία στην οποία δόθηκε άδεια στα τέλη του 1940 και τις αρχές του 1950 όσον αφορά στην τεχνολογία των ινών γυαλιού ήταν η Owens-Corning Fiberglass. Έγινε τότε για πρώτη φορά αξιοποίηση τους σε διάφορες εφαρμογές που αφορούσαν τόσο θέματα μόνωσης όσο και ενίσχυσης. Μετά το 1958 παρατηρήθηκε σημαντική ανάπτυξη της βιομηχανίας παραγωγής σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού. Τα τελευταία 50 χρόνια περισσότερες από 30 χώρες παράγουν περισσότερα από 5000 είδη ινών γυαλιού με την παγκόσμια παραγωγή τους το 1996 να αγγίζει τους 2,3 εκατομμύρια τόνους [5]. Μέχρι σήμερα αποτελούν τους πιο επιτυχημένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας. Τα στοιχεία που αποτελούν την δομική τους βάση είναι τα ακόλουθα:

- Οξείδια του πυριτίου
- Οξείδια του ασβεστίου
- Οξείδια του αλουμινίου
- Οξείδια του βορίου κ.α.

Ακολουθούν χαρακτηριστικές εικόνες της δομής του γυαλιού .Στην αριστερή πλευρά έχουμε μια δομή χαλαζιακού γυαλιού, ενώ δεξιά είναι η δομή κοινού γυαλιού.



Εικόνα 14: Χαρακτηριστικές εικόνες δομής γυαλιού. Δομή χαλαζιακού γυαλιού (αριστερά) ,δομή κοινού γυαλιού (δεξιά)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ιών γυαλιού. Το κριτήριο για την διάκρισή τους αποτελεί η χημική τους σύσταση. Οι τύποι λοιπόν για τους οποίους γίνεται λόγος παρακάτω είναι οι εξής:

- E-Glass
- S-Glass
- C-Glass

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων ιών γυαλιού:

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 1: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού

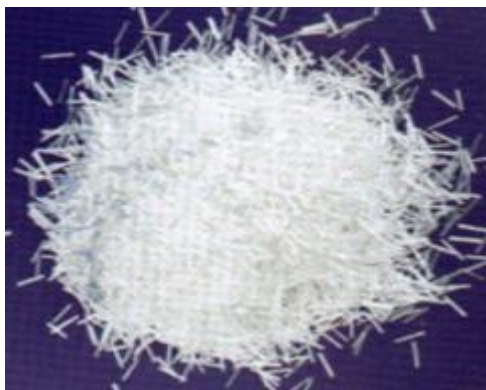
E-Glass (E stands for Electricity)



Εικόνα 15: Ίνες γυαλιού τύπου E

Η κατηγορία αυτή των ινών γυαλιού αποτελεί και την πιο διαδεδομένη μεταξύ των υπολοίπων. Τα συγκεκριμένα υαλονήματα παρουσιάζουν σημαντικά καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή, δυσκαμψία καθώς και ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά όσον αφορά στην προσαρμογή τους στις όποιες αλλαγές περιβαλλοντικών συνθηκών. Το μόνο ίσως μειονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από μέτρια αντοχή σε σχέση με ορισμένα χημικά αντιδραστήρια. Ορισμένα δεδομένα που αφορούν στον E τύπο ινών γυαλιού είναι τα ακόλουθα. Παρουσιάζουν θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης ίση με 600 °C και θερμοκρασία κρυστάλλωσης ίση με περίπου 1140°C. Η πυκνότητα τους ισούται με 2,54 g/cm³.

C-Glass (C stands for Corrosion)



Εικόνα 16: Ίνες γυαλιού τύπου C

Η συγκεκριμένη κατηγορία ινών γυαλιού χαρακτηρίζεται από υψηλή αντίσταση στην χημική διάβρωση. Όσον αφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση από τα υαλονήματα τύπου E. Το μόνο που ίσως καθιστά τις ίνες αυτές λιγότερο προσιτές αποτελεί το γεγονός κατά το οποίο το κόστος τους είναι υψηλότερο από εκείνο των υαλονημάτων τύπου E.

S-Glass (S stands for Stiffness)

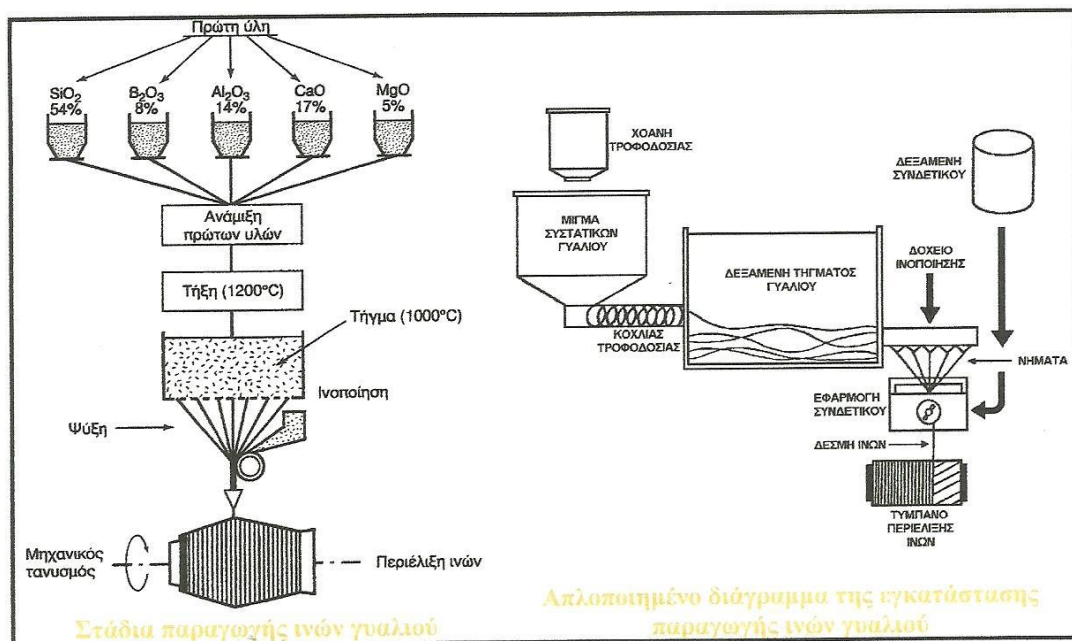


Εικόνα 17: Ίνες γυαλιού τύπου S

Η συγκεκριμένη κατηγορία υαλονημάτων είναι επίσης ακριβότερη όσον αφορά το κόστος τους σε σχέση με τα υαλονήματα τύπου E. Όσον αφορά τις ιδιότητές τους, τα υαλονήματα τύπου S χαρακτηρίζονται από υψηλή δυσκαμψία όπως

και θερμική αντοχή σε σχέση με τους προαναφερθέντες τύπους. Το βασικό αυτό χαρακτηριστικό τους καθιστά τις ίνες αυτές ιδιαίτερα δημοφιλείς στον τομέα των αεροπορικών βιομηχανιών.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ίνες γυαλιού περιέχουν διάφορα οξείδια, η ποσότητα των οποίων διαφέρει κάθε φορά. Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO_2 (μεγαλύτερα από 99,5%) παρατηρούνται αυξημένες μηχανικές ιδιότητες των ινών όπως και μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του σύνθετου. Το ποσοστό των οξειδίων στο γυαλί επηρεάζεται από την διαδικασία παρασκευής του, την διαδικασία μορφοποίησής του (δημιουργία ινών) και από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

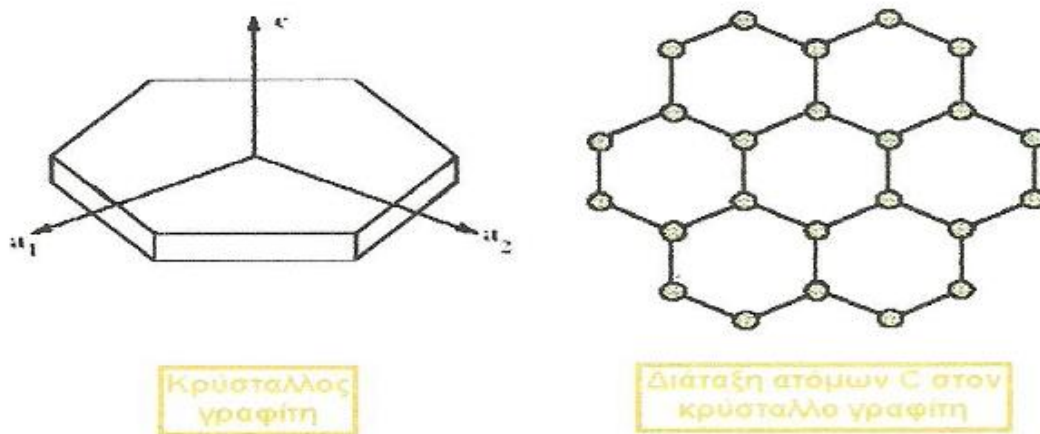


Εικόνα 18: Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή των ινών γυαλιού πραγματοποιείται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή όπου και θα υποστεί τήξη. Το τήγμα εν συνεχεία τροφοδοτείται σε μια σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα. Οι οπές τις οποίες θα φέρει ο διάτρητος πυθμένας θα κυμαίνεται μεταξύ του 1 και 2 mm. Το γυαλί, δεδομένης της επίδρασης της βαρύτητας, ρέει μέσω των οπών του πυθμένα. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο (1-15 μm). Ακολουθεί ψεκασμός των ινών με νερό, με στόχο την ψύξη τους. Στην συνέχεια οι ίνες διέρχονται μέσω ιμάντα που τους επιβάλλει προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizers), τα οποία λειτουργούν σαν προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν σημαντικά στην καλή πρόσφυση ινών-μήτρας. Τέλος οι ίνες περιτυλίγονται ανά δέσμες των 204 νηματίων, τιμή τυπική για δέσμες, γύρω από τύμπανο το οποίο στρέφεται με ταχύτητα της τάξης των 50m/s. Οι ρολοί ύαλονήματος που παράγονται υφίστανται ξήρανση, προτού υποβληθούν σε περαιτέρω διεργασία μορφής.[1]

2.4.2. Ίνες άνθρακα (Carbon fibers) - γραφίτη



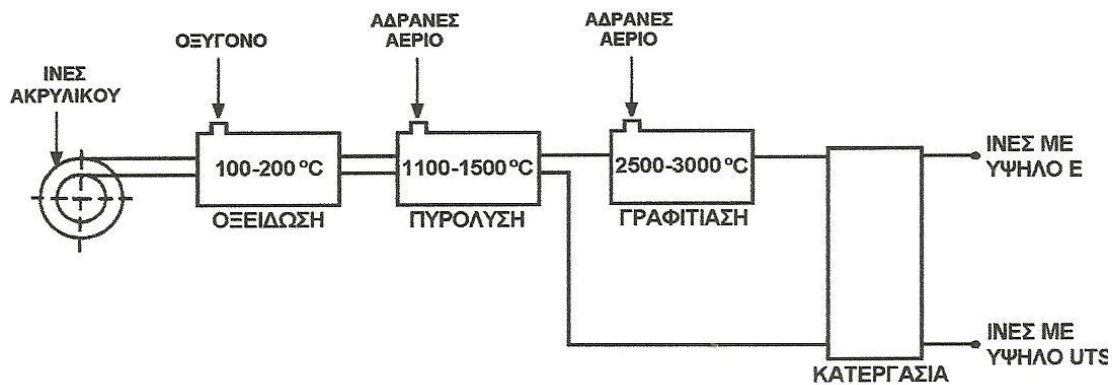
Εικόνα 19: Δομή κρυστάλλου γραφίτη (αριστερά) -Διάταξη ατόμων άνθρακα στον κρυστάλλο γραφίτη (δεξιά)

Πρώτος ο Edison τον 19^ο αιώνα έκανε χρήση ινών άνθρακα σε λαμπτήρες. Η χρήση των ινών άνθρακα ως ενισχυτικές ίνες σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας έκαναν την εμφάνισή τους περί το 1960 ύστερα από την μελέτη των Shindo από την Ιαπωνία, Watt από Αγγλία και των Bacon και Singer από τις Η.Π.Α.. Πολύ

γρήγορα γνώρισαν υψηλή εξέλιξη όσον αφορά στην χρήση τους στον τομέα των κατασκευών και δικαίως χαρακτηρίζονται ως σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής (high performance composites). Πιο συγκεκριμένα, όπου απαιτείται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης βάρους είναι επιτακτική η εφαρμογή ινών άνθρακα. Επιπρόσθετα, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού είναι απαραίτητο να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών. Η υπεροχή βέβαια αυτή των ινών άνθρακα οφείλεται στην φύση του άνθρακα ως στοιχείου και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα.

Οι ίνες άνθρακα παράγονται με οξείδωση και θερμική πυρόλυση του πολυακριλονιτριλίου. Όπως όλα τα πολυμερή, τα μόρια του πολυακριλονιτριλίου αποτελούνται από μακριές αλυσίδες οι οποίες ευθυγραμμίζονται κατά την διαδικασία παραγωγής τους και σχηματίζουν τις ίνες άνθρακα. Όταν εφαρμοστούν οι κατάλληλες συνθήκες θέρμανσης, οι αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζουν τα ανθρακονήματα, τα οποία έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 80-95 %.

Με περαιτέρω θερμική κατεργασία, παράγονται δύο τύποι ινών. Εκείνες της υψηλής αντοχής (high strength) οι οποίες θερμαίνονται στους 1500-2000 °C και εκείνες του υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus) οι οποίες θερμαίνονται στους 2500-3000°C. Στο στάδιο αυτό της θερμικής κατεργασίας υφίσταται το φαινόμενο της γραφίτιωσης με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση και η περιεκτικότητα των ινών σε άνθρακα αγγίζει το 99%. Οι ίνες υψηλής αντοχής έχουν αντοχή στα 3000 GPa ενώ οι ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζουν αντοχή 400 Gpa.



Εικόνα 20: Παραγωγή ινών άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα έχουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα να παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση σε αλκαλικό και όξινο περιβάλλον. Το ίδιο ισχύει και για την υπεριώδη ακτινοβολία. Επιπρόσθετα, χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε κόπωση και υπό την επιβολή τάσεων, επιδεικνύουν ισχυρή αντίσταση σε διάβρωση.

Στην συντριπτική τους πλειοψηφία, το να γίνει χρήση ινών άνθρακα συνεπάγεται και υψηλό κόστος. Βέβαια, το γεγονός ότι πρόκειται για υψηλής απόδοσης υλικά οδήγησε στην ανεύρεση λύσεων στο πρόβλημα αυτό. Έτσι, η ύπαρξη τα τελευταία χρόνια μιας μεγάλης ποικιλίας εμπορικά διαθέσιμων ινών άνθρακα, όπως και πολυμερικών υλικών τα οποία προορίζονται για τις μήτρες των σύνθετων υλικών, έχει οδηγήσει στην σημαντική μείωση του κόστους τους και την ολοένα και μεγαλύτερη προτίμησή τους σε περισσότερες εφαρμογές.

Τέλος, όπως ακριβώς και οι ίνες γυαλιού, έτσι και οι ίνες άνθρακα υπάρχουν σε διάφορες μορφές όπως νήματα, υφάσματα διαφορετικών πλέξεων, πρεομποτισμένα υφάσματα και άλλα.[1]

2.4.3. Ίνες πολυμερούς

Οι ίνες πολυμερούς αποτελούν μια αρκετά σημαντική κατηγορία ινών οι οποίες επίσης χρησιμοποιούνται συχνά όσον αφορά στην κατασκευή σύνθετων υλικών ως υλικά ενίσχυσης. Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς, είναι εκείνες από ίνες Nylon, Kevlar και πολυαιθυλένιο.

2.4.3.1.Είδη ινών πολυμερούς

2.4.3.1.1.Αραμιδικές ίνες



Εικόνα 21: Μορφή αραμιδικών ινών

Οι ίνες αραμιδίου ανήκουν στην κατηγορία των πολυμερικών ινών. Σημαντική εξέλιξη τους πραγματοποιήθηκε περί το 1960-1970. Συγκεκριμένα, σταθμός στην εξέλιξη τους υπήρξε η κατασκευάστρια εταιρία DuPont η οποία για πρώτη φορά το 1964 κατασκεύασε για πρώτη φορά ίνες τέτοιου τύπου. Η ονομασία αραμίδια υιοθετήθηκε για πρώτη φορά το 1974 από την ομοσπονδιακή επιτροπή εμπορίου των Η.Π.Α. (US Federal Trade Commission).

Από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά τους είναι το χαμηλό τους ειδικό βάρος και η πολύ υψηλή ειδική αντοχή τους στον εφελκυσμό. Χαρακτηρίζονται ακόμη από υψηλό συντελεστή απόσβεσης σε κραδασμούς, γεγονός που καθιστά αυτό τον τύπο ινών ιδανικές για εφαρμογή σε δυναμικά φορτιζόμενες κατασκευές

Επιπρόσθετα οι ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, όπως και υψηλή αντίσταση στην διάβρωση. Οι μηχανικές τους ιδιότητες επηρεάζονται ύστερα από την παρατεταμένη έκθεσή τους στο φως και την υπεριώδη ακτινοβολία. Παρατηρείται υψηλή θερμική αντίσταση μέχρι και τους 380⁰C σε ατμοσφαιρικό αέρα και μέχρι τους 480⁰C υπό συνθήκες έκθεσης του σε άζωτο.

Οι αραμιδικές ίνες διακρίνονται περαιτέρω στις ακόλουθες κατηγορίες

- Παρα-Αραμιδικές ίνες ή ίνες αρωματικών αραμιδίων (Kevlar, Twaron, Technora)
- Μετα-Αραμιδικές ίνες (Nomex, Kermel, Comex)

2.4.3.1.2.Μετα-αραμιδικές ίνες

Ιδιότητες

Οι μετα-αραμιδικές ίνες όπως εκείνες των Nomex, Kermel και Comex παρουσιάζουν σημαντική αντοχή όσον αφορά στην έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχή σε χημική προσβολή όπως και υψηλή αντίσταση στην τριβή. Οι ίνες αυτής της κατηγορίας κατασκευάζονται μέσω της μεθόδου υγρής νηματοποίησης (wet spinning). Από την μέθοδο αυτή προκύπτουν ημικρυσταλλικές ίνες, των οποίων η μοριακή αλυσίδα είναι μερικώς προσανατολισμένη κατά μήκος του άξονα της ίνας. Το συγκεκριμένο είδος ινών χαρακτηρίζεται από την μοναδική ικανότητα τους να αντέχουν στην τάση από εφελκυσμό κατά την έκθεση τους σε φωτιά, σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 400°C.[12]

Εφαρμογές

Η κατηγορία των μετα-αραμιδικών ινών βρίσκουν σημαντικές εφαρμογές όσον αφορά στην προστατευτική ενδυμασία των περισσότερων διασωστών και ειδικά εκείνων της πυροσβεστικής. Αυτό βέβαια οφείλεται στην υψηλή θερμική αντοχή που διακρίνει την συγκεκριμένη κατηγορία ινών. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η χρήση των εν λόγω ινών όσον αφορά σε θέματα ηλεκτρικής μόνωσης. Τέλος, εφαρμογές των μετα-αραμιδικών ινών συναντούμε και στον τομέα της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας όπως και τον στρατό.[12]

2.4.3.1.3.Παρα-αραμιδικές ίνες/ίνες αρωματικών αραμιδίων

Ιδιότητες

Στην κατηγορία των παρα-αραμιδικών ινών ανήκουν οι ίνες Kevlar, Twaron και Technora. Οι ίνες της κατηγορίας αυτής εμφανίζουν υψηλή αντοχή στον εφελκυσμό (η μέγιστη πίεση όπου μπορεί να αντέξει ένα υλικό) όπως και υψηλό μέτρο ελαστικότητας (η τάση του υλικού να παραμορφώνεται κατά την άσκηση δύναμης). Η παραγωγή των ινών αυτών πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου

περιδίνησης (spinning) γνωστή ως υγρή νηματοποίηση (wet spinning) με αποτέλεσμα την δημιουργία ινών οι οποίες αποτελούνται από αλυσίδες πλήρως εκτεταμένων υγρών κρυστάλλων. Οι αλυσίδες που σχηματίζονται κατά μήκος του άξονα της ίνας παρουσιάζουν υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας γεγονός που οδηγεί σε σημαντική αύξηση της αντοχής των προκυπτουσών ινών.

Όπως παραπάνω αναφέρθηκε στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ίνες Kevlar. Υπάρχουν διάφορα είδη ινών KEVLAR.

- Kevlar 29: Μέτρο ελαστικότητας 60GPa, αντοχή σε εφελκυσμό 3.6 GPa
- Kevlar 49: Μέτρο ελαστικότητας 120 GPa, αντοχή σε εφελκυσμό: 3.6 GPa
- Kevlar 149: Μέτρο ελαστικότητας 180 GPa, αντοχή σε εφελκυσμό 3.4 GPa

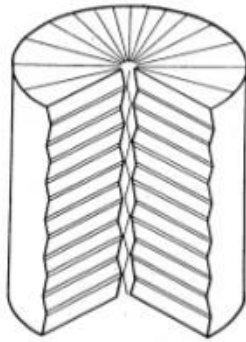
Η πυκνότητα και των τριών τύπων είναι ίδια (1.45 g/cm^3). Η διαφορετική ελαστικότητα οφείλεται στο γεγονός της βελτιωμένης ευθυγράμμισης των μοριακών αλυσίδων, που αυξάνει δυσκαμψία στη διεύθυνση του άξονα της ίνας.

Ακολουθεί πίνακας με ιδιότητες των ινών Kevlar-29 και Kevlar-49

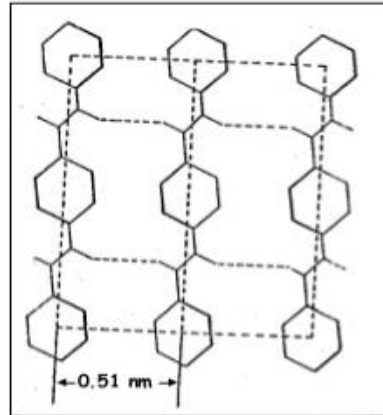
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar 29	Kevlar 49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm^3)	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ($^{\circ}\text{C}$)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας ($^{\circ}\text{C}$)	400	425

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ινών Kevlar

Kevlar fibers



Schematic diagram of Kevlar® 49 fiber showing the radially arranged pleated sheets



Microstructure of aramid fiber

Εικόνα 22: Σχηματική απεικόνιση ινών Kevlar 49 (αριστερά) -Μικροδομή των ινών αραμιδίου (δεξιά)

[1],[12]

Εφαρμογές

Όσον αφορά στις εφαρμογές των παρα-αραμιδικών ινών, οι ίνες Kevlar 29 συμβάλλουν σημαντικά στην κατασκευή καλωδίων και σχοινιών ενώ οι ίνες Kevlar 49 έχουν πάρα πολλές εφαρμογές στα ινοπλισμένα πολυμερή (FRP) .Αξίζει να σημειωθεί και η σημαντική εφαρμογή τους στην κατασκευή ενδυμάτων πυροπροστασίας, λαμβάνοντας υπόψη το ότι παρουσιάζουν χαμηλή ευφλεκτότητα. Σημαντική ακόμα εφαρμογή σημειώνουν στον τομέα της βαλλιστικής προστασίας ,στην ενίσχυση των εύκαμπτων σωλήνων όπως και την ενίσχυση των ελαστικών. [12]

2.5.Προϊόντα από ίνες

Τα τελευταία χρόνια, έπειτα από την ανακάλυψη των διαφόρων τύπων ινών, των οποίων χρήση γίνεται σε μεγάλη κλίμακα ως ενίσχυση στα σύνθετα υλικά παρατηρήθηκε και περαιτέρω επεξεργασία τους με αποτέλεσμα την δημιουργία αρκετών προϊόντων με βάση τις ίνες αυτές. Πιο συγκεκριμένα είναι γενικά γνωστό πως οι ίνες παράγονται μεμονωμένα. Από την ένωση αρκετών σε αριθμό ινών μαζί,

έχουμε την δημιουργία των νημάτων (strands) .Αρκετά σε αριθμό νήματα (strands) ,μη στριμμένα μεταξύ τους και παράλληλα τοποθετημένα οδηγούν στην δημιουργία πλεξίδων νημάτων (rovings) .Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί περιστροφή των πλεξίδων (rovings) τότε έχουμε την δημιουργία των yarns.

Όσον αφορά στις πλεξίδες νημάτων (rovings) ή τα yarns, μέσω διάφορων κατασκευαστικών μεθόδων πλέκονται και από την διαδικασία αυτή έχουμε την δημιουργία υφασμάτων διαφόρων μορφών πλέξεων. Συνήθως, στις περισσότερες εφαρμογές κατασκευής σύνθετων υλικών γίνεται χρήση υφασμάτων, καθώς απαιτείται χρήση τους σε εφαρμογές υψηλών αντοχών.

2.5.1.Τύποι υφασμάτων που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά

Τρία είδη υφασμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως ως υλικά ενίσχυσης στα σύνθετα υλικά. Η διάκρισή τους βασίζεται στο υλικό των ινών. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Υφάσματα από ίνες γυαλιού (υαλονήματα)
- Υφάσματα από ίνες άνθρακα (ανθρακονήματα)
- Υφάσματα από ίνες αραμιδίου

Με βάση τον τρόπο κατανομής των ινών σε σχέση με τον σχηματισμό των υφασμάτων παρατηρούνται οι εξής κατηγορίες:

- Μονοδιευθυντικά υφάσματα (Unidirectional/UD)



Εικόνα 23: (α) Υφή μονοδιευθυντικού υφάσματος-(β) Συσκευασία μονοδιευθυντικού υφάσματος

- Πλεγμένα υφάσματα (Woven)
- Μη πλεγμένα (Non-Woven).

Τα μη πλεγμένα υφάσματα παράγονται μέσω δύο μεθόδων.

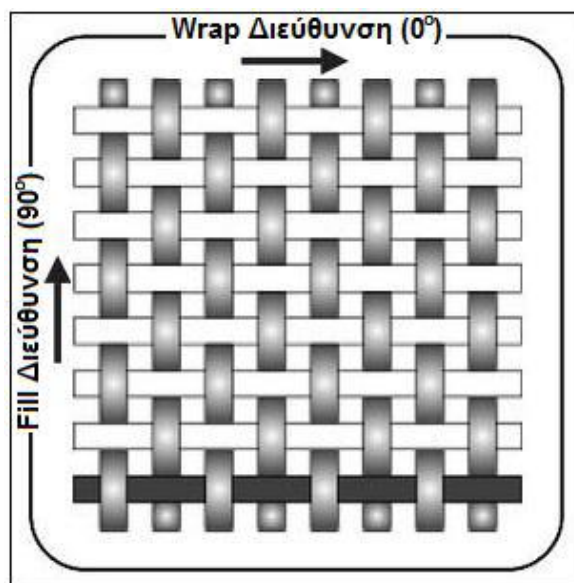
- **Συγκόλληση (Bonding)**
- **Felting**
- Υβριδικά ή Μικτά ή Σύμμικτα υφάσματα (Hybrid)

Λαμβάνοντας υπόψη το είδος της πλέξης τα πλεγμένα (Woven) υφάσματα διακρίνονται στα ακόλουθα:

- Υφάσματα απλής πλέξης (Plain)
- Υφάσματα πλέξης Twill
- Υφάσματα πλέξης Satin
- Υφάσματα πλέξης Knit (Knitted)
- Υφάσματα πλέξης Leno
- Υφάσματα καλαθωτής πλέξης (Basket)
- Υφάσματα πλέξης Mock Leno

2.5.1.1. Τύποι πλέξεων πλεγμένων υφασμάτων (Woven)

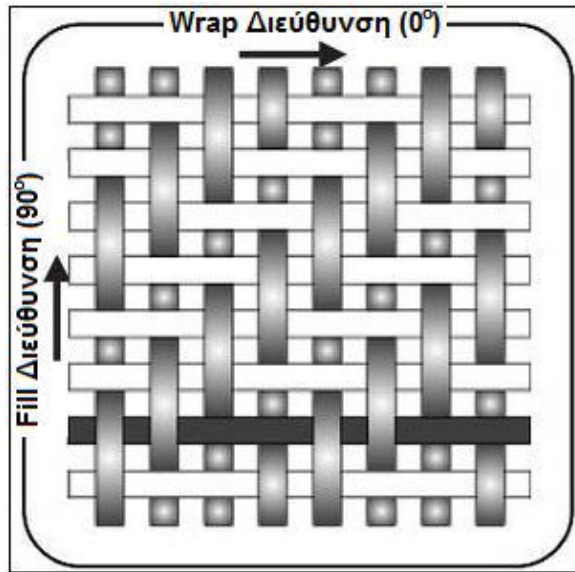
2.5.1.1.1. Plain-Weave (Απλή πλέξη)



Εικόνα 24: Μορφή απλής πλέξης (Plain Weave)

Στην απλή πλέξη, κάθε εγκάρσιος θύσανος ινών περνάει διαδοχικά πάνω και κάτω από κάθε διαμήκη θύσανο. Το ύφασμα που προκύπτει από το είδος αυτής της πλέξης είναι συμμετρικό και χαρακτηρίζεται από καλή σταθερότητα και πορώδες. Ίσως το μοναδικό μειονέκτημα υφασμάτων πλεγμένων κατά αυτόν τον τρόπο ,αποτελεί το γεγονός των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων τους σε σχέση με τα υφάσματα άλλου είδους πλέξεων. [13]

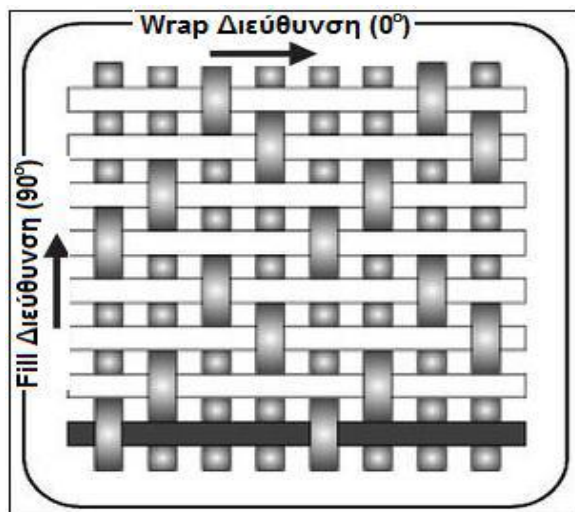
2.5.1.1.2. Twill-Weave (Πλέξη Twill)



Εικόνα 25: Μορφή πλέξης Twill (Twill Weave)

Σε αυτό το είδος πλέξης, δύο ή περισσότεροι διαμήκεις θύσανοι υφαίνονται εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερους εγκάρσιους θυσάνους κατ' επανάληψη. Αυτή η πλέξη, οπτικά έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία τους σχηματισμού ευθείας ή διαγωνίου μορφής. Τα υφάσματα τέτοιου τύπου πλέξης χαρακτηρίζονται από υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με εκείνα της απλής πλέξης, ενώ όσον αφορά στην επιφάνεια τους είναι ιδιαίτερα ομαλή. [13]

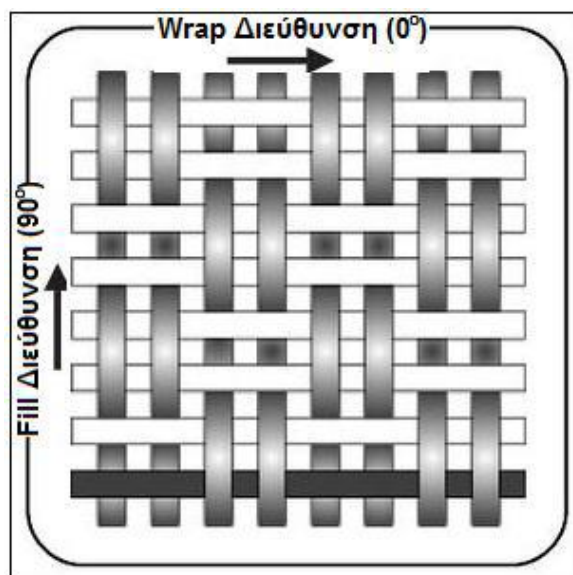
2.5.1.1.3.Satin Weave (Πλέξη Satin)



Εικόνα 26: Μορφή πλέξης Satin (Satin Weave)

Ο συγκεκριμένος τύπος πλέξης κατά βάση στηρίζεται στην πλέξη Twill. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται ένα είδος τροποποίησης της πλέξης Twill, προκειμένου να πραγματοποιηθούν λιγότερες σε αριθμό διασταυρώσεις μεταξύ των θυσάνων ινών στις δύο κάθετες διευθύνσεις (στημόνι, υφάδι). Χαρακτηριστικό των υφασμάτων της συγκεκριμένης πλέξης είναι η υψηλές μηχανικές ιδιότητες. Παρατηρείται ασυμμετρία, χαρακτηριστικό το οποίο ενδέχεται να προκαλέσει την δημιουργία τάσεων. [13]

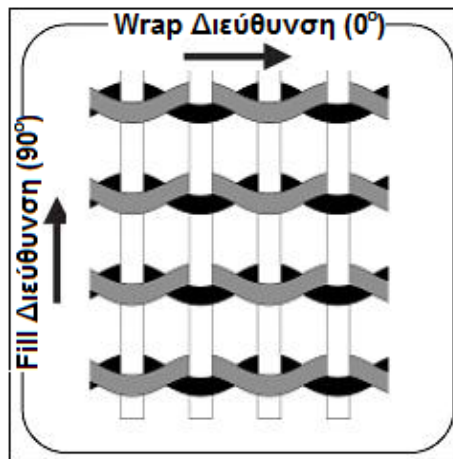
2.5.1.1.4. Basket Weave (Καλαθωτή Πλέξη)



Εικόνα 27: Μορφή καλαθωτής πλέξης (Basket Weave)

Το συγκεκριμένο είδος πλέξης βασίζεται στην δομή της απλής πλέξης, μόνο που δύο ή περισσότεροι θύσανοι ινών περνούν εναλλάξ πάνω και κάτω από δύο ή περισσότερους κατακόρυφους θυσάνους. Σε σχέση με την απλή πλέξη η καλαθωτή πλέξη είναι αρκετά πιο ισχυρή. [13]

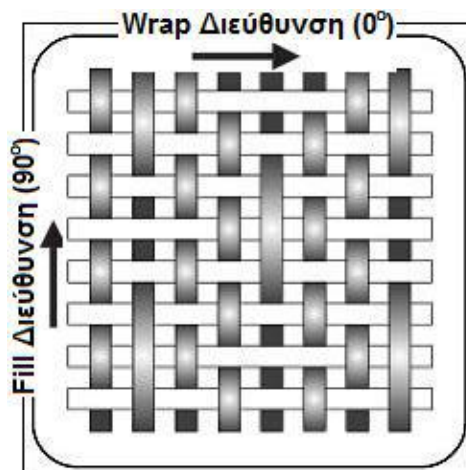
2.5.1.1.5.Leno Weave (Πλέξη Leno)



Εικόνα 28: Μορφή πλέξης Leno (Leno Weave)

Πρόκειται για μια ακόμα μορφή πλέξης που στηρίζεται στην δομή άλλης σε εκείνη άλλης απλής πλέξης. Στο συγκεκριμένο είδος παρατηρείται η εξής δομή πλέξης των θυσάνων των ινών. Διπλανοί διαμήκεις θύσανοι ινών πλέκονται γύρω από κάθε διαδοχικό εγκάρσιο θύσανο με αποτέλεσμα τη δημιουργία άλλης σπειροειδούς ζεύγους, κλειδώνοντας έτσι κάθε κατακόρυφο θύσανο στο ίδιο μέρος. Τα υφάσματα άλλης συγκεκριμένης πλέξης δεν είναι να δυνατό να γίνει χρήση άλλης στα σύνθετα υλικά μεμονωμένα, αλλά μόνο σε συνδυασμό με υφάσματα και άλλης πλέξης. [13]

2.5.1.1.6.Mock Leno Weave (Πλέξη Mock Leno)

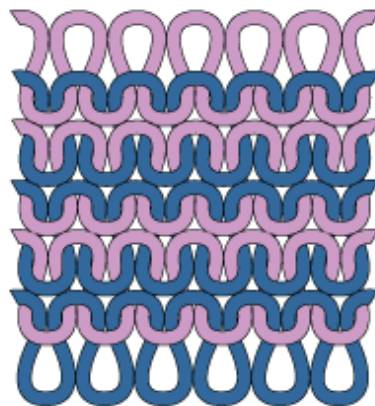


Εικόνα 29: Μορφή πλέξης Mock Leno (Mock Leno Weave)

Πρόκειται για έναν ακόμα τύπο η δομή του οποίου βασίζεται στην απλή πλέξη. Ειδικότερα, στην πλέξη Mock Leno σποραδικοί οριζόντιοι θύσανοι σε ίσα

διαστήματα, αλλά αρκετούς θυσάνους ινών μακριά αποκλίνουν από το μοτίβο “πάνω κάτω κάθε ένα θύσανο” και το κάνουν κάθε δύο ή περισσότερους θυσάνους ινών. Το ίδιο μοτίβο ακολουθείται και στην κατακόρυφη κατεύθυνση με αποτέλεσμα την δημιουργία τελικά ενός υφάσματος με αρκετά τραχεία επιφάνεια, σχετικά παχύ και με πρόσθετο πορώδες. [13]

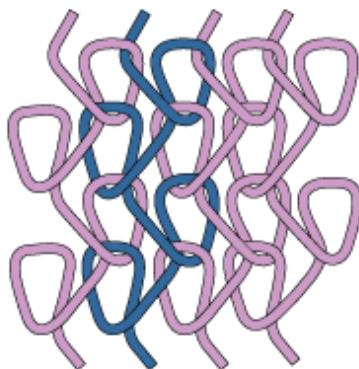
2.5.1.1.7. Πλέξη Weft-Knitted



Εικόνα 30: Μορφή πλέξης Weft-Knitted (Weft-Knitted Weave)

Τα πλεγμένα κατά το υφάδι υφάσματα (Weft-Knitted) προκύπτουν από την δημιουργία αριθμού θηλιών (loops) κατά μήκος της οριζόντιας κατεύθυνσης της δομής που απεικονίζεται στην παραπάνω φωτογραφία, κάνοντας χρήση θυσάνων ινών (ronings) , οι οποίοι έχουν υποστεί συστροφή δημιουργώντας τα yarns. Τα υφάσματα τα οποία δημιουργούνται με αυτό το είδος πλέξης εμφανίζουν ελαστικότητα. Απλά, πιθανή απόπλεξη σε ένα σημείο οδηγεί σε διάδοση της αστοχίας κατά μήκος του υφάσματος. [14]

2.5.1.1.8. Πλέξη Warp-Knitted



Εικόνα 31: Μορφή πλέξης Warp-Knitted (Warp-Knitted Weave)

Τα πλεγμένα κατά το στημόνι υφάσματα (Warp-Knitted) προκύπτουν από την δημιουργία θηλιών (loops) κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης της δομής που απεικονίζεται στην παραπάνω φωτογραφία κάνοντας χρήση θυσάνων από ίνες (rovings), οι οποίες έχουν υποστεί συστρόφη δημιουργώντας τα yarns. Τα υφάσματα τα οποία προκύπτουν με το συγκεκριμένο είδος πλέξης εμφανίζουν σχετική ελαστικότητα χωρίς να υφίστανται προβλήματα απόπλεξης. Σε σχέση με τα υφαντά υφάσματα (woven) τα πλεκτά εμφανίζουν υψηλή αντοχή σε φθορά. [14]

2.6. Τρόποι ενίσχυσης ρητίνης

Τα σύνθετα υλικά όσον αφορά στον τρόπο σύνθεσής τους αποτελούνται από δύο φάσεις. Ειδικότερα, η πρώτη φάση αναφέρεται στην μήτρα και η δεύτερη στην ενίσχυση. Αν και είναι αρκετά σημαντικός ο ρόλος και οι ιδιότητες της, η μήτρα από μόνη της αποτελεί το ασθενές τμήμα του σύνθετου υλικού. Για το λόγο αυτό, συνήθως επιλέγονται διάφοροι τρόποι για την ενίσχυσή της, με απώτερο στόχο την δημιουργία τελικά ενός ιδιαίτερα αποδοτικού προϊόντος με ιδιότητες αρκετά αναβαθμισμένες. Σαν μήτρα συνήθως επιλέγεται κάποιο πολυμερές και πιο συγκεκριμένα κάποιο είδος ρητίνης που στις περισσότερες των περιπτώσεων ανήκει στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων εποξικών ρητινών.

Για την ενίσχυση λοιπόν των ρητινών στα σύνθετα υλικά πολυμερικής (ρητινικής) μήτρας έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τρόποι που στην πλειοψηφία τους είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικοί. Επιγραμματικά είναι οι ακόλουθοι:

- Επιλογή κατάλληλου εγκλείσματος
- Εφαρμογή θερμικής κατεργασίας curing

2.6.1.Επιλογή κατάλληλου εγκλείσματος

Τα εγκλείσματα ή όπως αλλιώς αναφέρονται ως ενισχυτικά υλικά είναι συνήθως ανόργανα υλικά τα οποία περικλείονται στην μήτρα και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο όσον αφορά στις τελικές ιδιότητες του προκύπτοντος σύνθετου υλικού, επιτελώντας σημαντικές λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα εάν κάποιος επιλέξει τον κατάλληλο τύπο και υλικό ενίσχυσης μπορεί να κατορθώσει το σύνθετο υλικό να αποκτήσει τις ιδιότητες που εκείνος επιθυμεί να του προσδώσει.

Τα εγκλείσματα έχουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες, κατά πολύ ανώτερες από εκείνες που χαρακτηρίζουν την μήτρα, προσδίδοντας στο σύνθετο υλικό αυξημένη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Τα εγκλείσματα που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι παρα πολλά με το μέγεθος, την γεωμετρία και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους να τα διακρίνουν.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες εγκλεισμάτων

- Εγκλείσματα σε μορφή ινών
- Εγκλείσματα σε μορφή κόκκων
- Εγκλείσματα σε μορφή φολίδων

Τα εγκλείσματα σε μορφή ινών αποτελούν το πιο διαδεδομένο τύπο εγκλείσματος, ιδιαίτερα όταν γίνεται λόγος για πολυμερικές (ρητινικές) μήτρες. Οι ίνες ενδέχεται να είναι διαφόρων τύπων όπως κεραμικές, μεταλλικές, οργανικές ή από γυαλί. Η μεγάλη σε βαθμό χρήση τους οφείλεται στο γεγονός ότι παρουσιάζουν σημαντικές μηχανικές ιδιότητες, ενώ επιπλέον έχουν την ικανότητα να ενσωματώνονται σε διαφορετικούς σχηματισμούς ανάλογα πάντα με το είδος της εφαρμογής για την οποία προορίζονται. Στα διάφορα σύνθετα υλικά λοιπόν συναντούμε ίνες άλλοτε με τυχαία διάταξη, άλλοτε προσανατολισμένες σε μια κατεύθυνση, σε αλληλουχία στρωμάτων με συγκεκριμένο προσανατολισμό ή σε μορφή πλέγματος.

Τα εγκλείσματα σε μορφή κόκκων ή αλλιώς σωματιδίων οργανικών ή ανόργανων μπορούν είτε να εμφανίζουν μεγάλη διασπορά στο σχήμα και το μέγεθός τους είτε να είναι σχετικά ομοιόμορφα. Στην περίπτωση αυτή ονομάζονται σκόνες. Το μέγεθος και η φύση των εγκλεισμάτων σε μορφή σωματιδίων ή κόκκων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά των σύνθετων υλικών.

Τέλος, τα εγκλείσματα σε μορφή φολίδων είναι επίσης σημαντικά. Ειδικότερα οι φολίδες έχουν την ιδιότητα να κάθονται η μια πάνω στην άλλη με αποτέλεσμα την δημιουργία στρώσεων. Καθιστούν λοιπόν το σύνθετο υλικό ιδιαίτερα θερμικά και ηλεκτρικά αγωγίμο. [15]

2.6.1.1.Επίδραση εγκλείσματος στις ιδιότητες των ρητινών (εποξικών)

Τα εγκλείσματα όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιούνται προκειμένου να πραγματοποιηθεί σημαντική επίδραση όσον αφορά στις ιδιότητες της μήτρας, την οποία συνήθως αποτελεί κάποιο πολυμερές (ρητίνη) .Στόχος είναι η ενίσχυση μιας σειράς ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν τις εποξικές ρητίνες. Παρακάτω γίνεται αναφορά στον τρόπο που επηρεάζονται ορισμένες βασικές ιδιότητες των εποξικών ρητινών.

✚ Ιξώδες

Το ιξώδες των εποξικών ρητινών αυξάνεται με την προσθήκη εγκλείσματος. Βέβαια, η αύξηση αυτή έχει παρατηρηθεί πως είναι αρκετά μεγαλύτερη στα ινώδη σύνθετα σε σχέση με τα κοκκώδη σύνθετα υλικά.

✚ Πρόσφυση

Πρόσφυση δύο υλικών είναι ουσιαστικά ένας δείκτης του πόσο δύσκολα ή εύκολα μπορεί να γίνει ο αποχωρισμός των δύο αυτών υλικών από το σημείο επαφής (διεπιφάνεια) στο άπειρο. Με την προσθήκη λοιπόν εγκλείσματος στην ρητίνη αυξάνεται σημαντική η ιδιότητα αυτή στις εποξικές ρητίνες, αφού ελαττώνεται ο βαθμός συστολής.

✚ Συστολή

Η συστολή κατά την διάρκεια σκλήρυνσης της ρητίνης ελαττώνεται ανάλογα με την αύξηση σε περιεκτικότητα του εγκλείσματος στο σύνθετο υλικό. Αυτό οφείλεται στο ότι η ρητίνη αντικαθίσταται τοπικά από υλικό που δεν εμφανίζει μεταβολή στις διαστάσεις του, σε αντίθεση με την καθαρή ρητίνη.

✚ Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής της στερεοποιημένης εποξικής ρητίνης ελαττώνεται με την αύξηση της κατ' όγκο συγκέντρωσης των εγκλεισμάτων.

✚ Ειδική πυκνότητα

Τα εγκλείσματα όπως είναι γνωστό στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν υψηλότερη πυκνότητα από εκείνη την οποία έχει η ρητίνη. Αυξάνουν έτσι τα εγκλείσματα την πυκνότητα των σύνθετων υλικών ανάλογα με την κατά όγκο περιεκτικότητά τους. Το γεγονός αυτό συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην ελάττωση του κόστους των σύνθετων υλικών.

✚ Θερμική αγωγιμότητα

Συνήθως προσθήκη εγκλεισμάτων οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας των εποξικών ρητινών αρκεί να ελέγχεται η ποσότητα που προστίθεται. Ο λόγος που είναι απαραίτητος ο έλεγχος αυτός είναι το ότι σε περίπτωση που γίνει προσθήκη εγκλείσματος σε μεγάλη περιεκτικότητα τότε ενδέχεται να παρατηρηθεί αύξηση των φυσαλίδων αέρα στο υλικό, που ως γνωστόν λειτουργούν σαν θερμομονωτικά.

✚ Συμπεριφορά στην κάμψη

Έχει παρατηρηθεί πως η προσθήκη εγκλείσματος σε κάποια εποξική ρητίνη ως ενίσχυση οδηγεί σε ελάττωση της αντοχής σε κάμψη του σύνθετου υλικού, ενώ αντίθετα οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητάς του σε κάμψη.

✚ Σκληρότητα επιφάνειας-αντίσταση σε τριβή

Η προσθήκη οποιασδήποτε μορφής εγκλείσματος αυξάνει την σκληρότητα της επιφάνεια όπως το ίδιο συμβαίνει και με την αντίσταση στην τριβή.

Αντοχή σε συμπίεση

Τα εγκλείσματα έχει παρατηρηθεί πως αυξάνουν την αντοχή σε συμπίεση του υλικού, αφού του δημιουργούν έντονη δυσκαμψία.

[9]

2.6.2.Εφαρμογή θερμικής θεραπείας- Curing

2.6.2.1.Θερμική θεραπεία (Curing)

Η θερμική θεραπεία ή αλλιώς thermal curing αποτελεί μια κατεργασία κατά την οποία θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, χαμηλού μοριακού βάρους αποκτούν δομή δικτύου σταυροδεσμών (cross-link network structure) .Κατά την διάρκεια της εν λόγω κατεργασίας παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές όσον αφορά στις θερμικές, μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των ρητινών. Πρόκειται για μια εξώθερμη χημική αντίδραση στην οποία υποβάλλονται οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες με την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο βαθμός του curing (degree of curing) ο οποίος έχει επιτευχθεί υποδηλώνει και το πλήθος των σταυροδεσμών οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί.

[16]

Στην διαδικασία του curing των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών η θερμοκρασία παίζει τον ρόλο του καταλύτη προκειμένου να προσδοθεί ταχύτητα στην χημική αντίδραση του πολυμερισμού η οποία πραγματοποιείται. Συνήθως γίνεται χρήση πέραν των ρητινών και επιπρόσθετων ουσιών οι οποίες ονομάζονται σκληρυντές. Οι σκληρυντές αναμιγνύονται με την ρητίνη και βοηθούν σημαντικά στην διαδικασία αυτή.

Κατά την διαδικασία του curing παράγονται διάφορες αέριες πτητικές ουσίες. Οι εν λόγω πτητικές ουσίες προέρχονται από την θέρμανση των διαλυτών. Γενικότερα, όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία τόσο πιο γρήγορα το υλικό υφίσταται curing. Η επιβολή θερμότητας είναι απαραίτητη διότι μερικοί καταλύτες ή/και σκληρυντές δεν είναι ενεργοί κάτω από κάποια συγκεκριμένη κρίσιμη θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, με την επιβολή θερμότητας είναι δυνατή η απομάκρυνση των παραγόμενων πτητικών ουσιών από τους διαλύτες και το νερό, ενώ η ρητίνη έχει την δυνατότητα να ρέει λόγω χαμηλού ιξώδους με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη κατανομή της. Τέλος, με την πρόσδοση θερμότητας τα μόρια αποκτούν περισσότερη

κινητική ενέργεια με αποτέλεσμα να παρατηρείται αύξηση των ενεργών ομάδων που υφίστανται curing. Βέβαια απαραίτητη είναι και η επιβολή πίεσης κατά την διάρκεια της διαδικασίας προκειμένου το σύστημα της ρητίνης και του υλικού ενίσχυσης να στερεοποιηθεί με ταυτόχρονη αποβολή της όποιας περίσσιας ρητίνης.

Όσον αφορά στο χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται προκειμένου να ολοκληρωθεί η εν λόγω διαδικασία, είναι γενικά γνωστό ότι κυμαίνεται από κάποιες ώρες έως και αρκετές ημέρες και η θερμοκρασία που επιβάλλεται μπορεί να αγγίζει έως και μερικές εκατοντάδες °C. Αυτό βέβαια, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την θερμική αντοχή της ρητίνης σε συνδυασμό πάντα με την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης Tg. [1]

2.6.2.2.Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης-Tg

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης Tg είναι ένα εύρος θερμοκρασιών όπου ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές μεταβαίνει από μια πιο εύκαμπτη, μαλακή και ελαστική κατάσταση σε μια σκληρή, στέρεα και υαλώδη κατάσταση. Στην ουσία πρόκειται για μια δευτέρου βαθμού θερμοδυναμική μετάβαση, καθώς στην θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης παρατηρείται ένα σημαντικό άλμα σε σχέση με την θερμοχωρητικότητα. Αυτήν η αύξηση βέβαια δεν παρατηρείται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία αλλά σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Στην πραγματικότητα, για τον λόγο αυτό η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι μια κινητική μετάβαση (kinetic transition). Όπως προαναφέρθηκε πρόκειται για ένα εύρος θερμοκρασιών στο οποίο επηρεάζεται σημαντικά η κινητικότητα των πολυμερικών αλυσίδων. Ειδικότερα, σε θερμοκρασίες πέραν της Tg παρατηρείται μεγάλη ενεργοποίηση της κινητικότητας τμημάτων των πολυμερικών αλυσίδων. Σε αυτήν την θερμοκρασία (για θέρμανση) η υαλώδης κατάσταση μετατρέπεται σε ελαστική. Στην περίπτωση θερμοκρασιών μικρότερων της Tg τα τμήματα των πολυμερικών αλυσίδων παγώνουν, διατηρώντας μονάχα μια παλμική κίνηση (vibrational motion) . Η μέγιστη τιμή της ορίζεται από την χημική δομή της εποξικής ρητίνης, τον τύπο του σκληρυντή και τον βαθμό της κατεργασίας.

Συνήθως για την μέτρηση της θερμοκρασίας Tg γίνεται χρήση της μεθόδου κατά την οποία γίνεται χρήση του διαφορικού σαρωτή θερμιδομετρίας DSC (Differential Scanning Calorimetry) . Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος. Πιο συγκεκριμένα, για ένα πολυμερές βάσει της Tg καθορίζεται η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του όπως επίσης και η χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία επεξεργασίας του. [17], [9]

2.6.2.3.Επίδραση των παραμέτρων του curing στις ιδιότητες των σύνθετων υλικών

Η διαδικασία του curing καθορίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους.

- ✓ Θερμοκρασία
- ✓ Χρόνος
- ✓ Πίεση

Θερμοκρασία-Χρόνος

Η διαδικασία της θερμικής κατεργασίας του curing είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί είτε με την επιβολή άμεσα της απαιτούμενης θερμοκρασίας είτε σταδιακά με την επιβολή κατάλληλων κάθε φορά θερμοκρασιών για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως το υλικό ξεκινά να θερμαίνεται από θερμοκρασία δωματίου με σταθερό ρυθμό θέρμανσης και ψύχεται τελικά μέχρι να φτάσει ξανά σε θερμοκρασία δωματίου με σταθερό ρυθμό. Ο παράγοντας της θερμοκρασίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά στην δραστικότητα του συστήματος που χρησιμοποιείται κάθε φορά (ρητίνη-σκληρυντής) . Εάν μια ρητίνη υποστεί αρχικά curing με την επιβολή χαμηλής θερμοκρασίας, η αντίδραση πολυμερισμού που υφίσταται (curing-σκλήρυνση) πραγματοποιείται με αργό ρυθμό με αποτέλεσμα τα μακρομόρια να έχουν την δυνατότητα ελευθερίας στην κινητικότητά τους και ο σκληρυντής να είναι σε θέση να αντιδράσει πλήρως με την ρητίνη που βρίσκεται γύρω του, δημιουργώντας όλο και περισσότερα ενεργά κέντρα. Ως φυσικό επακόλουθο της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία μια ομοιόμορφης δομής όπως και ομοιομορφίας όσον αφορά στην πυκνότητα της δημιουργίας σταυροδεσμών (cross-links) .

Σε περίπτωση που επιχειρηθεί διαδικασία curing με την άμεση επιβολή υψηλής θερμοκρασίας, η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η αντίδραση είναι αρκετά υψηλή και ο σκληρυντής δεν είναι σε θέση να αντιδράσει με πιο απομακρυσμένα μακρομόρια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ύπαρξη ετερογένειας στο σύστημα με αποτέλεσμα μεγάλη διαφοροποίηση όσον αφορά στην πυκνότητα των υπό δημιουργία σταυροδεσμών και την ανάπτυξη υψηλών εσωτερικών τάσεων. Για το λόγο αυτό και την αποφυγή ενδεχόμενων λαθών όσον αφορά στην τελική δομή του προκύπτοντος προϊόντος στα περισσότερα σύνθετα προηγμένα υλικά επιλέγεται η σταδιακή επιβολή θερμοκρασίας από πιο χαμηλή μέχρι πιο υψηλή, όχι όμως άμεσα.

Στο στάδιο χαμηλής θερμοκρασίας curing, η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι σχετικά αργή με την ρητίνη να υφίσταται μερικό πολυμερισμό (curing). Ευνοείται έτσι η δημιουργία ομοιόμορφου δικτύου σκλήρυνσης, ενώ στο εσωτερικό του υλικού παρατηρούνται μικρής τάξης τάσεις με την απόδοση της ρητίνης να είναι αρκετά καλή. Όσον αφορά στην περίπτωση του σταδίου υψηλής θερμοκρασίας curing, παρατηρείται βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων όπως και της αντοχής σε θερμότητα της μήτρας.

Με την επιλογή σταδιακού curing ευνοείται σε μεγάλο βαθμό ο εμποτισμός που έχει πραγματοποιηθεί. Ειδικότερα, ολοκληρώνεται περαιτέρω η διαδικασία του εμποτισμού και εξαλείφεται η ύπαρξη των όποιων αστοχιών του υλικού κατά την κατασκευή του όπως οι εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα στην διεπιφάνεια του. Όσον αφορά στα συστήματα πολλαπλών συστατικών, είναι αναγκαίος ο μοριακός σχεδιασμός. [5]

Πίεση

Όσον αφορά στην πίεση έχει καθοριστικό ρόλο, αφού βοηθά στην απομάκρυνση υλικών χαμηλού μοριακού βάρους όπως οι διαλύτες, η υγρασία, οι φυσαλίδες αέρα καθώς και τα όποια πτητικά υποπροϊόντα που παράγονται κατά την χημική αντίδραση του curing. Είναι δυνατή έτσι η επιτάχυνση της διαδικασίας του εμποτισμού όπως φυσικά και η σημαντική βελτίωσή του ποιοτικά.

Κατά την διαδικασία κατασκευής σύνθετων υλικών καλό είναι πάντα να υπάρχει ένας σχετικός έλεγχος του χρονικού σημείου στο οποίο εφαρμόζεται η πίεση.

Σε περίπτωση που η ρητίνη έχει ήδη φτάσει στο σημείο gel, στο οποίο έχει πλέον χάσει την ιδιότητα της να ρέει (gel point), τότε οποιαδήποτε επιβολή πίεσης δεν θα μπορέσει να συνεισφέρει στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας με αποτέλεσμα την ύπαρξη πορώδους στο υλικό, χαμηλού επιπέδου πρόσφυσης και φυσαλίδων αέρα. Προκύπτει τελικά ένα προϊόν μη συμπαγές χωρίς ιδανικές ιδιότητες.

Βέβαια, επιπλέον παράγοντες όπως η γεωμετρία, η θερμική μάζα και το γεγονός για το αν πρόκειται για μονοστρωματικό ή πολυστρωματικό υλικό, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την χημική αντίδραση του curing. [5]

3. Τύποι σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες

3.1. Γενικά

Από τα πιο διαδεδομένα σύνθετα υλικά είναι τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες στα οποία είτε ένα θερμοπλαστικό είτε ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές χρησιμοποιείται ως μήτρα. Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας για εφαρμογές κατασκευών ξεκίνησε το 1950 και μέχρι σήμερα καταλαμβάνουν την πρώτη θέση προτίμησης. Ένας από τους κυριότερους λόγους για την αυξημένη χρήση τους είναι το γεγονός ότι είναι αρκετά εύκολο να υποστούν επεξεργασία, καθώς δεν απαιτείται χρήση πολύ υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών. Επιπλέον και ο εξοπλισμός που χρειάζεται για την επεξεργασία των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας είναι σχετικά απλός και λιγότερο ακριβός σε σχέση με εξοπλισμούς άλλων τύπων σύνθετων υλικών.

3.2. Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites, CFRPs)

3.2.1. Γενικά

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην δεκαετία του '50 σημειώνοντας σημαντικό ενδιαφέρον. Μέσα στα επόμενα χρόνια καθιερώθηκαν σε πολυάριθμες εφαρμογές, συμβάλλοντας στην τεχνολογική εξέλιξη των διαφόρων κατασκευών. Πρόκειται για υλικά υψηλής απόδοσης με υψηλό κόστος για την παραγωγή τους. Τα συστατικά που απαρτίζουν τα υλικά αυτά είναι οι ίνες από άνθρακα όπως και ένα πολυμερές στο

ρόλο της μήτρας. Η επιλογή του υλικού της μήτρας παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Συνήθως στα CFRP ως κύριο υλικό για την μήτρα είναι κάποια εποξική ρητίνη χωρίς αυτό όμως να αποκλείει και την χρήση κεραμικών ή μεταλλικών μητρών για τα συγκεκριμένα υλικά.

3.2.2.Ιδιότητες

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα CFRPs είναι ευρέως διαδεδομένα αν και παρατηρείται υψηλό κόστος για την παραγωγή τους. Χαρακτηρίζονται από ένα πλήθος ιδιοτήτων που τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά. Στις ιδιότητές τους λοιπόν συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- ✚ Χαμηλή πυκνότητα (40% χαμηλότερη από εκείνη του αλουμινίου)
- ✚ Υψηλή αντοχή (σε βαθμό που προσεγγίζει εκείνη του χάλυβα υψηλής αντοχής)
- ✚ Υψηλή ακαμψία (stiffness) (Πιο άκαμπτο από το τιτάνιο, με ακόμα πιο χαμηλή πυκνότητα από εκείνο)
- ✚ Πολύ καλή αντοχή σε κόπωση (καλή διάρκεια ζωής υπό την επιβολή φορτίου)
- ✚ Καλή αντοχή σε ερπυσμό (creep resistance)
- ✚ Χαμηλό συντελεστή τριβής όπως και πολύ καλή αντοχή σε φθορά (ένα 40wt. % σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας από nylon ενισχυμένο με κοντές ίνες άνθρακα έχει συντελεστή τριβής σχεδόν τόσο χαμηλό όσο εκείνος του Teflon και χωρίς να έχει εφαρμοστεί λίπανση οι ιδιότητές του σε φθορά πλησιάζουν εκείνες του χάλυβα στον οποίο έχει εφαρμοστεί λίπανση)
- ✚ Σκληρότητα και αντοχή σε βλάβες
- ✚ Σημαντική αντίσταση σε χημική προσβολή (η ιδιότητα αυτή ορίζεται σε σημαντικό βαθμό από την πολυμερική μήτρα)
- ✚ Αντοχή σε διάβρωση
- ✚ Διαστασιακή σταθερότητα (Μπορούν να σχεδιαστούν για μηδενικό συντελεστή θερμικής εκτόνωσης)
- ✚ Πολύ καλή ικανότητα απόσβεσης κραδασμών
- ✚ Χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση

- ✚ Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- ✚ Υψηλές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) [18]

3.2.3.Εφαρμογές

Όπως έχει ήδη διατυπωθεί τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) έχουν χαρακτηριστεί ως υλικά υψηλής απόδοσης και παρουσιάζουν εφαρμογές σε αρκετούς τομείς. Κατά κύριο λόγο χρήση τους γίνεται στον τομέα της αεροδιαστημικής βιομηχανίας. Στην πορεία βέβαια η όλο και μεγαλύτερη τάση όσο αφορά στην μείωση της τιμής των ινών άνθρακα οδήγησε σε ακόμα περισσότερες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως εκείνοι της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ναυπηγικής, της αεροναυπηγικής, του αθλητισμού, των δομικών κατασκευών και της βιοϊατρικής.

Στον τομέα της αεροδιαστημικής είναι επιτακτική η χρήση ελαφρών κατασκευαστικών υλικών με απώτερο στόχο την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου και την μείωση του κόστους λειτουργίας της εφαρμογής. Επιπλέον ο συντελεστής θερμικής διαστολής αυτών των υλικών κατά μήκος των ινών εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα σχήματος, ιδιαίτερα όταν γίνεται λόγος για κατασκευαστικά ή λειτουργικά στοιχεία διαστημοπλοίων ή δορυφόρων, τα οποία είναι εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σημαντική είναι η συνεισφορά των CFRP όσον αφορά στην αεροναυπηγική για την κατασκευή στρατιωτικών αεροσκαφών και ελικοπτέρων όπως και για τα αντίστοιχα μη πολεμικά αεροσκάφη. Διάφορα μέρη τους λοιπόν όπως τα πτερύγια, τα φτερά, τον κινητήρα, μέρη της ατράκτου αλλά και μέρη εσωτερικού χώρου των αεροσκαφών κατασκευάζονται από τέτοιου είδους υλικά παρουσιάζοντας υψηλότερη απόδοση όπως και σαφή ελάττωση κόστους. Βέβαια, προκειμένου να αποφευχθούν περιστατικά που αφορούν στην απώλεια ανθρώπινων ζωών, η μελέτη και ο σχεδιασμός των υλικών απαιτεί σημαντική προσοχή. Πιθανό λάθος ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία με σημαντικές συνέπειες.

Όσον αφορά στην αυτοκινητοβιομηχανία σημαντική είναι η χρήση τους προκειμένου να γίνει εφικτή η ελάττωση του βάρους των οχημάτων. Για το λόγο αυτό χρήση ανθρακονημάτων γίνεται σε διάφορα μέρη τους όπως ο προφυλακτήρας, οι

τροχοί ,ο άξονας μετάδοσης της κίνησης, διάφορα εξαρτήματα του κινητήρα των αυτοκινήτων και πολλά άλλα. Πιο σημαντική είναι η εφαρμογή τους στα αγωνιστικά αυτοκίνητα τα τελευταία χρόνια όπως εκείνα που χρησιμοποιούνται σε αγώνες ταχύτητας Formula 1. Ο λόγος της έντονης παρουσίας τους στην συγκεκριμένη κατηγορία οχημάτων αφορά στην ανάγκη για χαμηλότερο βάρος, αυξημένη αντοχή, χαμηλό κόστος και υψηλή απόδοση.

Τέλος ιδιαίτερα αισθητή είναι η εφαρμογή τους και στην βιομηχανία του αθλητισμού. Αθλητικά είδη λοιπόν όπως ρακέτες, ποδήλατα, πέδιλα σκι και πολλά ακόμη κατασκευάζονται με χρήση των συγκεκριμένων υλικών. Το ίδιο παρατηρείται και στον τομέα των δομικών κατασκευών για τον οπλισμό σκυροδέματος όπως και τον τομέα της βιοϊατρικής για την κατασκευή προσθετικών μελών του ανθρώπινου σώματος. [18] , [20]

3.3.Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymer Composites,GFRPs)

3.3.1.Γενικά

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού ,GFRP, έκαναν την εμφάνιση τους γύρω στην δεκαετία του '30 με την πιο ενεργή συμμετοχή τους σε όλο και περισσότερους τομείς να παρατηρείται την δεκαετία του '60.Πρόκειται για υλικά με αρκετές και ενδιαφέρουσες ιδιότητες γεγονός που εξηγεί και τις πολυάριθμες εφαρμογές τους. Συστατικά τους αποτελούν οι ίνες γυαλιού όπως και κάποιο πολυμερές σαν υλικό για την δημιουργία της μήτρας. Συνήθως σαν υλικό μήτρας χρησιμοποιείται κάποιο θερμοπλαστικό ή κάποιο θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, με την τελευταία κατηγορία να είναι η επικρατέστερη. Στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή συγκαταλέγονται αρκετές ρητίνες όπως οι εποξικές και οι βινυλεστερικές. Βέβαια, για την τελική επιλογή του υλικού της μήτρας σημαντικό κριτήριο αποτελεί το τελικό κόστος και οι απαιτήσεις της εφαρμογής.

3.3.2.Ιδιότητες

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, GFRP, παρουσιάζουν ένα πλήθος ιδιοτήτων, οι οποίες καθιστούν τα υλικά αυτά ιδιαίτερα ελκυστικά στον βιομηχανικό τομέα. Στις ιδιότητες των υλικών συγκαταλέγονται τα ακόλουθα:

- ✚ Υψηλή αντοχή
- ✚ Πρόκειται για ελαφριά υλικά
- ✚ Υψηλή αντίσταση στο θαλασσινό νερό
- ✚ Υψηλή αντίσταση σε χημική προσβολή
- ✚ Αντίσταση σε φθορά
- ✚ Χαρακτηρίζονται από ομοιογενή δομή
- ✚ Δυνατότητα μορφοποίησης σε διάφορα σχήματα και μορφές
- ✚ Υψηλή αντοχή σε διάβρωση
- ✚ Χαμηλό κόστος συντήρησης
- ✚ Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση

[20], [21]

3.3.3.Εφαρμογές

Η ναυπηγική αποτελεί ένα από τους τομείς, στον οποίο τα συγκεκριμένα σύνθετα υλικά έχουν ευρύτατη εφαρμογή. Βέβαια στο γεγονός αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό το ότι τα GFRP παρουσιάζουν σημαντική αντοχή σε διάβρωση όσον αφορά στο θαλασσινό νερό. Ταυτόχρονα η αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών με τα νέα αυτά υλικά οφείλεται και σε μεγάλο βαθμό στο ότι πρόκειται για αρκετά ελαφριά υλικά με σχετικά εύκολο τρόπο παραγωγής, που μελέτες έχουν δείξει ότι διατηρούν τις ιδιότητές τους μετά και από το πέρασμα 30 χρόνων.

Εκτενέστατη είναι και η εφαρμογή των GFRP όσον αφορά στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ειδικότερα, γίνεται χρήση τους για την κατασκευή ενισχυμένων πλαισίων, όπως και την κατασκευή ορισμένων τμημάτων αγωνιστικών οχημάτων, στα οποία οι κατασκευαστές πέρα από το χαμηλό τους βάρος

εκμεταλλεύονται τις παραμέτρους των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αυτών, σε συνδυασμό με την μεγάλη ευελιξία που προσφέρουν στον σχεδιασμό τους.

Ιδιαίτερα σημαντική ακόμα είναι και η εκμετάλλευση των σύνθετων αυτών υλικών για την κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς. Αυτό οφείλεται στην εξαιρετική αντίσταση σε διάβρωση την οποία παρουσιάζουν όπως και το χαμηλό ειδικό τους βάρος. Χαρακτηριστικές εφαρμογές σε αυτήν την κατηγορία είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητών για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενές αποθήκευσης νερού αλλά και κατασκευή ειδικών εγκαταστάσεων για την παραγωγή χημικών ουσιών.

Μια ακόμα εφαρμογή των υλικών αυτών αφορά σε θέματα όπου απαιτείται ηλεκτρική μόνωση.

Τέλος, η αντοχή σε διάβρωση και το μικρό τους βάρος αποτελούν δύο ιδιότητες των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες γυαλιού που τα καθιστούν ιδιαίτερα σημαντικά στον τομέα των δομικών κατασκευών. Σε κατασκευές τέτοιου είδους, η χρήση GFRP οδηγεί σε μετέπειτα χαμηλά κόστη συντήρησης. [20] ,[22]

3.4.Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου (Aramid Fiber Reinforced Polymer Composites,AFRPs)

3.4.1.Γενικά

Είναι γενικά αναγνωρισμένο ότι στα υψηλής απόδοσης σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες, γίνεται έντονα χρήση αραμιδικών ινών και συγκεκριμένα παρα-αραμιδικών ινών (p-AFRPs) ως ενισχυτικού μέσου του σύνθετου υλικού. Οι ίνες ενίσχυσης των οποίων γίνεται χρήση ενδέχεται να βρίσκονται είτε σε συνεχή (continuous) μορφή είτε ασυνεχή (discontinuous) . Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι όσον αφορά στην επιλογή μήτρας σε γενικές γραμμές γίνεται επιλογή εποξικών , πολυεστερικών όπως και βινυλεστερικών ρητινών. Βέβαια, όταν πρόκειται για υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές γίνεται επιλογή σύνθετων υλικών εποξικής μήτρας ενισχυμένων με συνεχούς μορφής παρα-αραμιδικές ίνες. [23]

3.4.2.Ιδιότητες

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου παρουσιάζουν σημαντικές ιδιότητες. Επιγραμματικά οι ιδιότητες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- ✚ Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ✚ Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- ✚ Υψηλό μέτρο ελαστικότητας
- ✚ Πολύ υψηλή αντοχή
- ✚ Πολύ υψηλή σκληρότητα
- ✚ Υψηλή αντίσταση στην διάβρωση
- ✚ Αντίσταση σε ευφλεκτότητα
- ✚ Δυνατότητα μορφοποίησης(επεξεργασιμότητα)

[23] , [24]

3.4.3.Εφαρμογές

Από τις κυριότερες εφαρμογές των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών αποτελεί η βαλλιστική προστασία. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι η χρήση όσον αφορά στην επισκευή κατασκευών όπως σήραγγες και άλλες δομές οι οποίες είναι επιρρεπείς σε σεισμικές δραστηριότητες. [24]

4.Τεχνικές κατασκευής σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένων με ίνες

Μέχρι σήμερα έχουν ανακαλυφθεί αρκετές μέθοδοι για την κατασκευή σύνθετων υλικών, η καθεμία τους ,βέβαια με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Ανάλογα με τα μέσα που διαθέτουμε και το τι ακριβώς σύνθετο θέλουμε να κατασκευάσουμε διαλέγουμε και την κατάλληλη μέθοδο. Από όλες τις μεθόδους που υπάρχουν επιγραμματικά οι πιο διαδεδομένες είναι οι ακόλουθες:

- ✚ Resin Transfer Molding- Μέθοδος χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση
- ✚ Vacuum Infusion- Μέθοδος έγχυσης κενού

- ✚ Hand lay-up- Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι
- ✚ Spray lay-up- Μέθοδος ψεκασμού

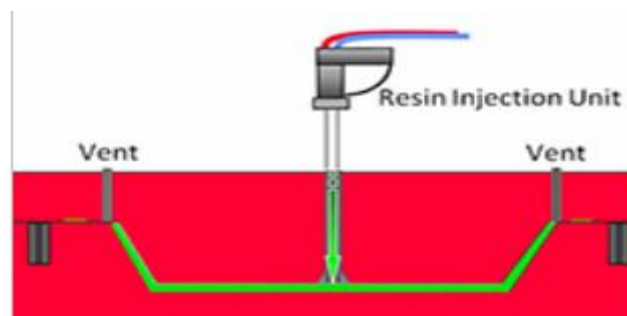
Μια πολύ σημαντική εξέλιξη στον τομέα των σύνθετων υλικών αποτέλεσε η δημιουργία της ταινίας προεμποτισμένων ινών (pre-impregnated fibers-tape prepreg). Οι ίνες αυτού του τύπου είναι εμβαπτιστεί σε ρητίνη σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον. Η καινοτομία αυτή πρακτικά σημαίνει ότι ο κατασκευαστής του τελικού προϊόντος δεν χρειάζεται πλέον να ασχολείται με την ανάμιξη των συστατικών της μήτρας ούτε με την αναλογία μήτρας οπλισμού στην κατασκευή του, αφού αυτά έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια κατά την διαμόρφωση της ταινίας προεμποτισμένων ινών.

Ανάλυση των προαναφερθέντων μεθόδων

Βέβαια, οι μέθοδοι παρασκευής σύνθετων υλικών μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση τον τρόπο διαμόρφωσης. Ειδικότερα, η πρώτη κατηγορία αφορά στην παρασκευή τους με ανοιχτή διαμόρφωση (Open Molding), ενώ η δεύτερη αναφέρεται στα σύνθετα υλικά τα οποία παρασκευάζονται με κλειστή διαμόρφωση (Closed Molding).

4.1.Μέθοδοι κλειστής διαμόρφωσης (Closed Molding)

4.1.1.Resin Transfer Molding- Μέθοδος χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση



Εικόνα 32: Μέθοδος χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση (RTM)

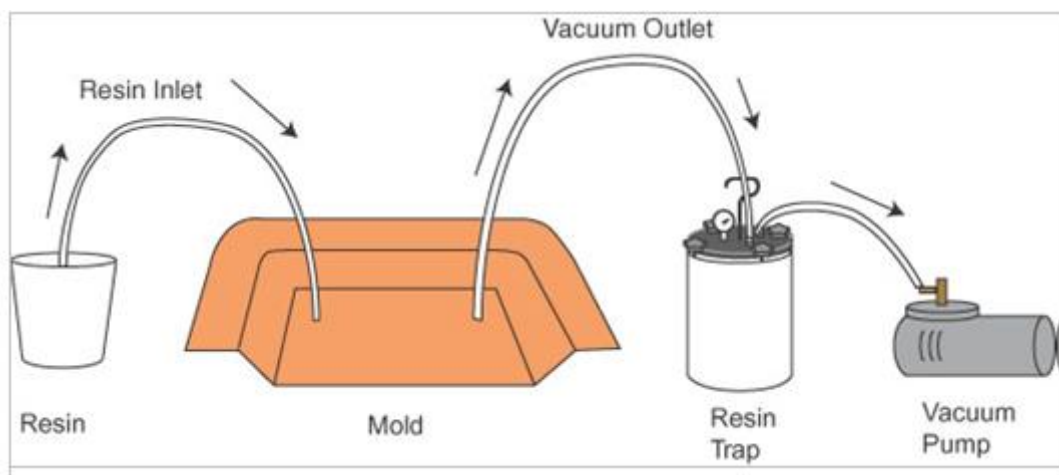
Πρόκειται για μια ευρέως διαδεδομένη διαδικασία παρασκευής σύνθετων υλικών υγρής ρητίνης σε διάφορες παραλλαγές. Σε όλες τις μορφές εφαρμογής της μεθόδου RTM γίνεται χρήση δύο ή περισσότερων τμημάτων καλουπιού τα οποία είναι απαραίτητα προκειμένου τα διάφορα τεμάχια τα οποία παράγονται να αποκτούν τελικά αρκετά καλή επιφάνεια. Οι ευρέως διαδεδομένες παραλλαγές της τεχνικής RTM είναι 2. Στην πρώτη παρατηρείται εξαναγκασμένη ροή ρητίνης από μεγάλη θετική πίεση, ενώ στην δεύτερη υφίσταται ροή ρητίνης με την εφαρμογή κενού. Επιπρόσθετα είναι απαραίτητο να σημειωθεί πως η έγχυση της ρητίνης ενδέχεται να είτε υπό σταθερή πίεση είτε υπό σταθερή ροή και σταθερή ταχύτητα μετώπου ροής.

Ειδικότερα, για την μέθοδο, όπως φαίνεται και από την παραπάνω φωτογραφία, το υπό χρήση καλούπι αποτελείται από δύο τμήματα. Τα τμήματα φέρουν οπές οι οποίες είναι απαραίτητες προκειμένου να εισέρχεται η ρητίνη και ποσότητα αέρα. Αρχικά τοποθετούνται τα υφάσματα και το καλούπι κλείνει. Κατόπιν εισάγεται το μίγμα ρητίνης με τον κατάλληλο σκληρυντή αφού βέβαια έχει αναμειχθεί επαρκώς. Με την ολοκλήρωση του εμποτισμού, το τεμάχιο παραμένει ικανό προκειμένου να υποστεί curing. Βέβαια, για να υποστεί πλήρες curing θα πρέπει να γίνει χρήση ειδικού φούρνου. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που παρατηρείται ολοκλήρωση του curing σε θερμοκρασία δωματίου, με την διαφορά ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται περισσότερο χρονικό διάστημα. [19]

4.1.2. Vacuum Infusion- Μέθοδος έγχυσης κενού

Η μέθοδος αυτή εντάσσεται στην κατηγορία των μεθόδων κλειστής διαμόρφωσης. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής γίνεται δημιουργία κενού, το οποίο αξιοποιείται προκειμένου να εξαναγκαστεί η ροή της ρητίνης να περάσει και να εμποτιστεί το ύφασμα. Είναι εφαρμογές χαμηλής πίεσης και ενδέχεται να γίνεται και χρήση καλουπιών. Συνηθέστερα σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται διατάξεις μονού καλουπιού με εναλλασσόμενη, επαναχρησιμοποιούμενη ή δύσκαμπτη σακούλα για την δημιουργία κενού. Η ρητίνη αναρροφάται από δοχείο ,αφού πρώτα έχει αναμειχθεί με τον κατάλληλο καταλύτη , διαβρέχει το ύφασμα και παγιδεύεται με κατάλληλο εξοπλισμό πριν την είσοδο της αντλίας κενού. Η ρητίνη αναρροφάται όπως είπαμε παραπάνω από δοχείο το οποίο είναι ανοιχτό στην ατμοσφαιρική πίεση. Το γεγονός αυτό μας δίνει την δυνατότητα να χαρακτηριστεί η μέθοδος αυτή, ως

κατεργασία σταθερής πίεσης. Το αντίστοιχο βέβαια δεν ισχύει και για την ροή ,αφού δεν είναι σταθερή.

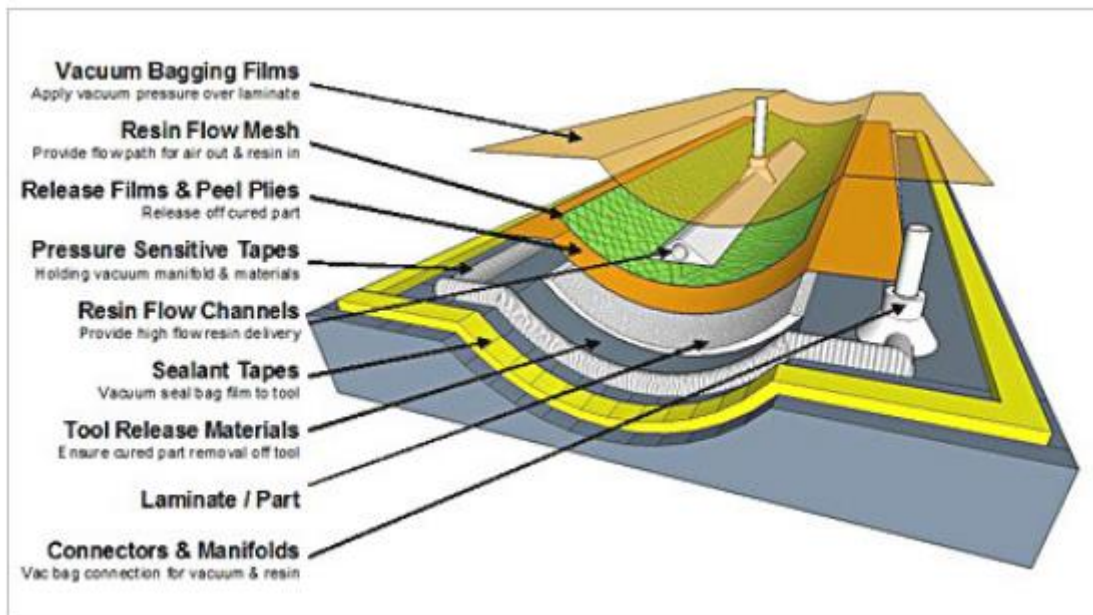


Εικόνα 33: Διάταξη μεθόδου έγχυσης κενού (Vacuum Infusion)

Τα βήματα για την εφαρμογή της εν λόγω διαδικασίας είναι τα ακόλουθα επιγραμματικά:

- Καθαρισμός του καλουπιού και εφαρμογή κατάλληλου αντικολλητικού υλικού προκειμένου να είναι πιο εύκολη η απομάκρυνση του υλικού.
- Τοποθέτηση υφάσματος.
- Τοποθέτηση υφάσματος αποκόλλησης (release fabric/peel ply) όπως και φιλμ ή σακούλας αναπνοής (release film-perforated) .
- Τοποθέτηση πλέγματος διάχυσης (infusion mesh) .
- Τοποθέτηση σακούλας κενού (vacuum bag) .
- Δημιουργία κενού, έλεγχος ποιότητας στεγάνωσης της σακούλας και του υπόλοιπου εξοπλισμού.
- Εισαγωγή ρητίνης στην κοιλότητα μέχρι να πραγματοποιηθεί πλήρης εμποτισμός του υφάσματος.
- Διατήρηση υποπίεσης τουλάχιστον μέχρι την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g .
- Εφαρμογή θερμικού curing υπό συνθήκες οι οποίες ποικίλουν.

Ακολουθεί σχετική εικόνα της προαναφερθείσας διάταξης



Εικόνα 34: Μορφή διάταξης έγχυσης κενού

[19]

4.2.Μέθοδοι ανοιχτής διαμόρφωσης (Open Molding)

4.2.1.Hand lay-up- Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι



Εικόνα 35: Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand lay-up)

Η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι απαιτεί αρχικά μια προετοιμασία του καλουπιού στο οποίο θα γίνει η διαμόρφωση. Η προετοιμασία αυτή είναι απαραίτητη

για να μην κολλήσει το κατασκευαζόμενο κομμάτι. Έτσι το καλούπι καλύπτεται με αντικολλητική ουσία (release material) .Όσον αφορά τα αντικολλητικά υλικά που ενδέχεται να χρησιμοποιήσει κάποιος είναι ποικίλα. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού γίνεται ανάλογα με την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας που επιθυμείται και το αν θα ακολουθήσει αργότερα και κάποια άλλη κατεργασία όπως για παράδειγμα η βαφή.

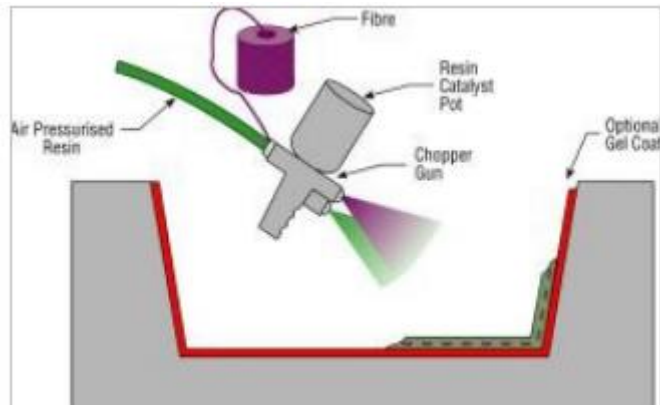
Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η επικάλυψη του καλουπιού με ένα φύλλο πολυμερούς μη ενισχυμένου που θα αποτελέσει και την εξωτερική επιφάνεια του κομματιού μετά το τέλος της διαδικασίας μορφοποίησης. Το πολυμερές αυτό φύλλο είναι δυνατόν να είναι σε στερεή μορφή φιλμ, να ψεκαστεί πάνω στο καλούπι ή να αποχυθεί με ή χωρίς πίεση πάνω σε αυτό. Κατόπιν ακολουθεί κάποιος έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν η επίστρωση του gel coating έγινε ομοιόμορφα. Ο έλεγχος αυτός είναι κρίσιμος για την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας.

Στη συνέχεια ετοιμάζεται η ενίσχυση του σύνθετου υλικού. Η ενίσχυση αυτή μπορεί να είναι είτε σε μορφή πλεγμένου υφάσματος ή πανιού κοντών ινών τυχαίας διεύθυνσης. Το ύφασμα λοιπόν κόβεται στο κατάλληλο μέγεθος και επιστρώνεται στο καλούπι. Στην συνέχεια αναμιγνύεται και η ρητίνη με τον κατάλληλο διαλύτη για το curing. Μετα την επίστρωση με το μίγμα αυτό ρητίνης και καταλύτη ,γίνεται στρώσιμο με ρολά αφενός για να ομογενοποιηθεί η κατασκευή και να διαπεράσει το μίγμα την ενίσχυση και αφετέρου για να διαφύγει ο παγιδευμένος στο πανί αέρας. Τελικά ακολουθεί το curing και ο κατασκευαστής είναι σε θέση να εφαρμόσει τρεις βασικούς ελέγχους:

- ✓ Ειδικός οπτικός έλεγχος
- ✓ Επιφανειακός έλεγχος
- ✓ Έλεγχος της διατομής

[20]

4.2.2.Spray lay-up- Μέθοδος ψεκασμού



Εικόνα 36: Μέθοδος ψεκασμού (Spray lay-up)

Η μέθοδος spray-up ή αλλιώς τεχνική ψεκασμού των ινών είναι και αυτή μια διαδικασία επίστρωσης του σύνθετου στο καλούπι, με την διαφορά όμως πως γίνεται χρήση ψεκαστήρα. Ακόμη εδώ οι ίνες εδώ κόβονται σε μικρά μεγέθη και δεν είναι σε μορφή πανιού.

Αρχικά γίνεται η προετοιμασία του καλουπιού με την επίστρωση του αντικολλητικού coating και του αρχικού φύλλου πολυμερούς στη συνέχεια. Δεν είναι αναγκαίο να γίνει περισσότερη εμβάθυνση εδώ, καθώς η διαδικασία προετοιμασίας είναι η ίδια με εκείνη της μεθόδου hand-lay up η οποία περιγράφεται παραπάνω με λεπτομέρεια.

Η πρώτη ύλη αποτελείται από την ρητίνη του πολυμερούς και τις ίνες που είναι τυλιγμένες σε κάποιο roving (μίτος) .Ακολουθώντας, οι κοντές ίνες κόβονται από ένα μηχανικό κόφτη (chopper) .Αφού κοπούν οι ίνες ,ψεκάζονται ταυτόχρονα μαζί με την ρητίνη στην επιφάνεια του καλουπιού. Γενικά υπάρχουν 2 τρόποι ψεκασμού της ρητίνης στο καλούπι. Έτσι μπορεί να έχουμε στο ψεκαστικό σύστημα δύο ακροφύσια εκ των οποίων το πρώτο ψεκάζει ρητίνη αναμεμειγμένη με καταλύτη και το άλλο ρητίνη με promoter (προωθητικό) .Η άλλη εναλλακτική είναι να έχουμε ένα μόνο ακροφύσιο που ψεκάζει ρητίνη με καταλύτη τα οποία έχουν αναμειχθεί σε ειδικό θάλαμο προανάμειξης.

Η διαδικασία αυτή τελειώνει όπως και η τεχνική επίστρωσης με το χέρι με την συμπίεση με ρολλούς για να ομογενοποιηθεί το υλικό και να απομακρυνθεί ο αέρας ο οποίος έχει εγκλωβιστεί.

Εδώ είναι αναγκαίο να γίνει αναφορά στον ειδικό εξοπλισμό που απαιτείται για την μορφοποίηση με ψεκασμό ινών. Αναγκαία είναι γενικά τα ακόλουθα: Πιεστικά δοχεία (pots) για τον καταλύτη και τα διαλύματα ,κόφτες για τις ίνες, ακροφύσια ψεκασμού ,αγωγοί μεταφοράς υλικών στα ακροφύσια, αντλίες για την ρητίνη και τον καταλύτη. Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι αντλίες αέρα με ελεγχόμενη παροχή από ειδικούς ενσωματωμένους ρυθμιστές. Πρέπει εδώ να αναφερθεί πως επειδή ο καταλύτης βρίσκεται υπό πίεση πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα ασφαλείας για τον τεχνίτη. Λόγω της υψηλής πίεσης του καταλύτη είναι δύσκολος ο έλεγχος του ποσοστού του που αναμιγνύεται με την ρητίνη. Οι αγωγοί μεταφοράς των υλικών πρέπει να αντέχουν σε χημική διάβρωση και στην υψηλή πίεση των υλικών για αυτό και είναι συνήθως κατασκευασμένοι με Teflon, PVF, Viton. Οι ίνες κόβονται από ειδικό μηχανικό κόφτη σε μήκος 12-50 mm. Οι κόφτες είναι συνήθως δύο κύλινδροι, ένας από αλουμίνιο και ο άλλος από ελαστικό πάνω στους οποίους προσαρμόζονται οι λεπίδες που κόβουν τις ίνες.

Όσον αφορά τώρα τα ψεκαστικά πιστόλια, υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι, με το εάν γίνεται χρήση αέρα για την εξώθηση του καταλύτη ή όχι και τον τύπο μίξης ρητίνης καταλύτη. Ειδικότερα, υπάρχουν οι εξής κατηγορίες:

- ❖ Ψεκαστικό σύστημα εξωτερικής μίξης
- ❖ Σύστημα με εσωτερική μίξη και χρήση αέρα
- ❖ Σύστημα με εσωτερική μίξη χωρίς χρήση αέρα
- ❖ Σύστημα ψεκασμού με χρήση δύο δοχείων χωρίς αέρα [20]

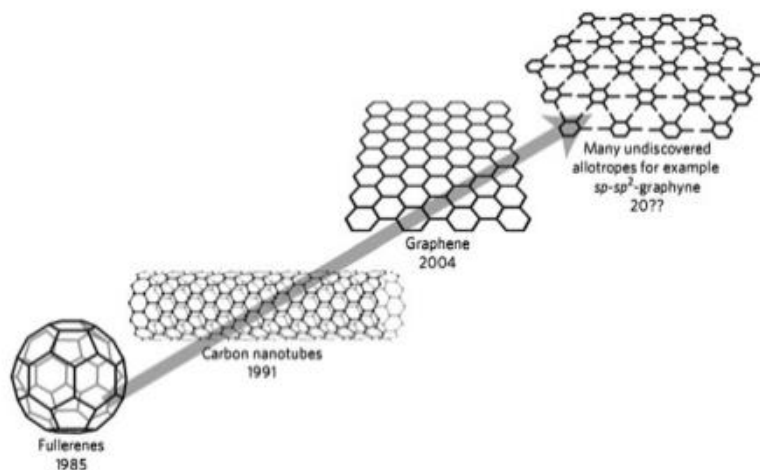
5.Γραφένιο (Graphene)

5.1.0 άνθρακας και οι αλλοτροπικές μορφές του



Εικόνα 37: Άνθρακας

Ο άνθρακας είναι μέσα στα τέσσερα αφθονότερα στοιχεία του πλανήτη. Συμβολίζεται με C (Carbon) , είναι το πρώτο χημικό στοιχείο της 14ης ομάδας του περιοδικού πίνακα και έχει ατομικό αριθμό $Z=6$. Πρόκειται για ένα τετρασθενές στοιχείο που συνήθως δρα σχηματίζοντας ομοιοπολικούς χημικούς δεσμούς με άλλα άτομα. Υπάρχουν αρκετές αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα , των οποίων οι ιδιότητες διαφέρουν κατά πολύ.

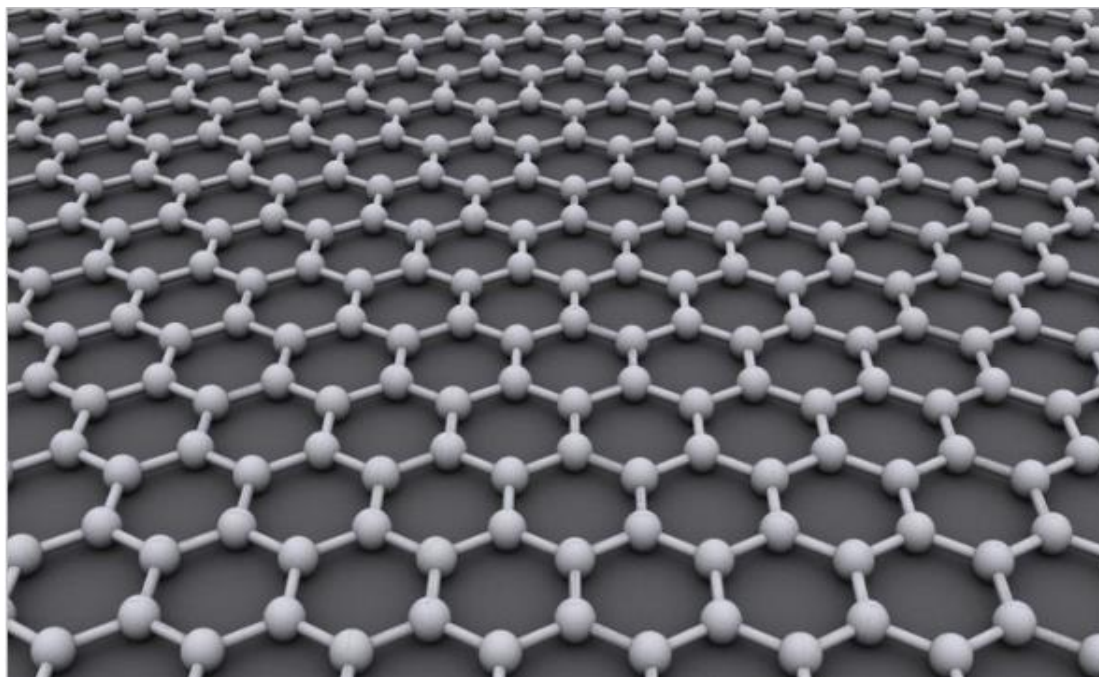


Εικόνα 38: Οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα

Οι αλλότροπες μορφές του άνθρακα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1. Φυσικές μορφές άνθρακα: γραφίτης, διαμάντι και άμορφος άνθρακας
2. Τεχνητές μορφές άνθρακα: φουλερένια, νανοσωλήνες άνθρακα, ίνες άνθρακα και το γραφένιο.[25]

5.2.Γενικά για το γραφένιο



Εικόνα 39: Μορφή μοριακής δομής γραφενίου

Για αρκετές δεκαετίες η απομόνωση του μονοστρωματικού γραφενίου έμοιαζε να είναι αδύνατη αν βασιζόταν κανείς, μεταξύ των άλλων, σε θεωρητικές μελέτες σχετικές με τη θερμοδυναμική σταθερότητα των δισδιάστατων κρυστάλλων. Ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση αυτή έγινε από μια ερευνητική ομάδα στο Manchester την οποία αποτελούσαν οι Geim και Novoselov, το 2004. Οι εν λόγω ερευνητές ανέφεραν μια μέθοδο για την δημιουργία μονοστρωματικού γραφενίου σε ένα υπόστρωμα οξειδίου του πυριτίου με αποφλοίωση του γραφίτη με μικρομηχανική διάσπαση (scotch tape method) . Το γραφένιο επέδειξε σημαντικές δομικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες. Μετά από 6 χρόνια, το 2010, οι ερευνητές Geim και Novoselov τιμήθηκαν με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής για τα πρωτοποριακά πειράματα τα οποία πραγματοποίησαν σχετικά με το υλικό του δισδιάστατου γραφενίου. [26]

Το γραφένιο αποτελεί μια αλλοτροπική κρυσταλλική μορφή του άνθρακα. Είναι ένα ενιαίο δυσδιάστατο ατομικό στρώμα του γραφίτη, το οποίο αποτελείται από πολύ στενά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα που οργανώνονται σε ένα εξαγωνικό κυψελοειδές πλέγμα. Αυτό που ακριβώς θέτει το γραφένιο σε ισχυρή θέση είναι τόσο οι δεσμοί sp^2 που παρουσιάζει όσο και το εξαιρετικά λεπτό ατομικό πάχος του, στα 0,345 nm. Πρόκειται για ένα πολλά υποσχόμενο υλικό, με μεγάλη συμμετοχή σε ολόενα και περισσότερες εφαρμογές.

5.3.Ιδιότητες Γραφενίου

Όπως προαναφέρθηκε, το γραφένιο αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά τεχνολογικά επιτεύγματα. Από την στιγμή της ανακάλυψης του από τους Geim και Novoselov και έπειτα παρατηρήθηκε το πόσο σημαντικές είναι οι ιδιότητες τις οποίες παρουσιάζει, σπάζοντας ρεκόρ σε αρκετούς τεχνολογικούς τομείς. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε σχέση με τις διαφορετικού τύπου ιδιότητές του. Ειδικότερα χαρακτηρίζεται από

- ✚ Μηχανικές ιδιότητες
- ✚ Χημικές ιδιότητες
- ✚ Ηλεκτρονικές ιδιότητες
- ✚ Ηλεκτρονικές ιδιότητες
- ✚ Οπτικές ιδιότητες

✚ Θερμικές ιδιότητες

5.3.1.Μηχανικές Ιδιότητες

Το γραφένιο έχει αναφερθεί ότι παρουσιάζει το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας όπως και την υψηλότερη αντοχή. Ένα ενιαίο στρώμα γραφενίου, αναμένεται να παρουσιάζει την υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό με ακαμψία, παρόμοια με εκείνη του γραφίτη. Μια μέθοδος για τον προσδιορισμό των εγγενών μηχανικών ιδιοτήτων του γραφενίου είναι η διερεύνηση της διακύμανσης φωνονικής συχνότητας κατά την εφαρμογή θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Η φασματοσκοπία Raman είναι μια από τις τεχνικές που μπορεί να παρακολουθεί την συχνότητα φωνονίων υπό μονοαξονική αντοχή και υδροστατική τάση.

Το γεγονός των υψηλών μηχανικών του ιδιοτήτων κατέστησε το γραφένιο ήδη από τα πρώτα χρόνια της εφαρμογής του πρωταγωνιστή όσον αφορά στην κατασκευή μιας νέας γενιάς ισχυρών σύνθετων υλικών. [27] Έχει διαπιστωθεί ότι η αντοχή του σε θραύση είναι 200 φορές πιο ισχυρή από εκείνη που σημειώνεται στο ατσάλι. Όσον αφορά στην αντοχή του στον εφελκυσμό παρατηρήθηκε πως είναι η μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη μετρούμενη μέχρι τώρα (130 GPa) . [28]

5.3.2.Χημικές Ιδιότητες

Το γραφένιο αποτελεί ένα ιδιαίτερα αντιδραστικό υλικό, συγκρινόμενο πάντα όμως με τις υπόλοιπες μορφές του άνθρακα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πλευρική διαθεσιμότητα των ατόμων του άνθρακα. Όπως η επιφάνεια του γραφίτη, έτσι και το γραφένιο διαθέτει την ιδιότητα να εκροφήσει και να προσροφήσει διάφορα άτομα και μόρια. Οι αδύναμα συνημμένες προσροφημένες ουσίες δρουν συνήθως ως δότες ή αποδέκτες και οδηγούν σε αλλαγές στην συγκέντρωση μεταφορέων, δίνοντας στο γραφένιο την δυνατότητα να διατηρείται αρκετά αγώγιμο.

Το γραφένιο παρουσιάζει αυξημένη χημική ευαισθησία. Αυτή του η ιδιότητα οφείλεται στην δισδιάστατη δομή του και το ασυνήθιστο άμαζο φάσμα Dirac χαμηλών διεγέρσεων ενέργειας. Αυτή η ευαισθησία για ένα μόριο, που αποδίδεται στον χαμηλό ηλεκτρονικό θόρυβο του γραφενίου και στην γραμμική ηλεκτρονική της πυκνότητας καταστάσεως (DOS) ,το καθιστά έναν πολύτιμο ανιχνευτή, ειδικά σε

εφαρμογές που απαιτείται ευαισθησία σε εξωτερικά φορτία, μαγνητική ένταση ή μαγνητικό πεδίο. [28]

5.3.3. Ηλεκτρονικές Ιδιότητες

Τα συστατικά στοιχεία που συμμετέχουν στην παραγωγή των τόσο ασυνήθιστων αλλά εξαιρετικών ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του γραφενίου είναι: το κυψελωτό πλέγμα του, η δισδιάστατη δομή του και το γεγονός ότι όλες οι πλευρές στο κρυσταλλικό πλέγμα καταλαμβάνονται από τα ίδια άτομα, γεγονός το οποίο 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 των κωνικών δομών στο ενεργειακό φάσμα. Σαν αποτέλεσμα 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. Πιο συγκεκριμένα, οι φορείς φορτίου στο εξαγωνικό πλέγμα μπορούν να ρυθμίζονται (tuned) συνεχώς μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών σε συγκεντρώσεις της τάξεως του $n=10^{13}\text{cm}^{-2}$ και να εμφανίζουν κινητικότητα της τάξεως των $\sim 15000\text{cm}^2/\text{Vs}$ σε συνθήκες περιβάλλοντος. [25]

5.3.4. Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Το γραφένιο είναι εντελώς διαφορετικό από τα περισσότερα συμβατικά τρισδιάστατα υλικά. Είναι ένα ημιμέταλλο ή μηδενικού χάσματος ημιαγωγός και παρουσιάζει αμφιπολικό φαινόμενο επίδρασης πεδίου όπου οι φορείς μεταφοράς φορτίου μπορούν να εναλλάσσονται μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών ,ενώ η κινητικότητα των φορέων αγωγιμότητας είναι $200000\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$.

5.3.5. Οπτικές Ιδιότητες

Οι οπτικές ιδιότητες του γραφενίου οφείλονται άμεσα στην δισδιάστατη δομή του όπως φυσικά και το χωρίς κενά ηλεκτρονικό του φάσμα. Παρά το γεγονός ότι το γραφένιο αποτελεί ένα από τα λεπτότερα υλικά που έχουν υπάρξει, είναι

δυνατή η οπτική του επαφή με γυμνό μάτι κάνοντας απλά χρήση ενός γυάλινου πλακιδίου καλυμμένου με γραφένιο. Οι μοναδικές ηλεκτρονικές ιδιότητες του παράγουν μια απροσδόκητα μεγάλη διαφάνεια για ένα ατομικό μονό στρώμα με εκπληκτικά απλή τιμή. Απορροφά δηλαδή πα $\approx 2,3\%$ του λευκού φωτός, όπου α είναι η σταθερά της τέλει δομής. Αυτή είναι μία από τις σπάνιες περιπτώσεις όπου οι ιδιότητες ενός συστήματος συμπυκνωμένης ύλης είναι ανεξάρτητες των παραμέτρων του υλικού και μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει μονάχα θεμελιωδών σταθερών. [25] , [28]

5.3.6.Θερμικές Ιδιότητες

Γενικά το γραφένιο θεωρείται παρα πολύ καλός θερμικός αγωγός. Ειδικότερα, ύστερα από μέτρηση της θερμικής του αγωγιμότητας όσο και της θερμικής αγωγιμότητας άλλων αλλοτροπικών μορφών του άνθρακα όπως του διαμαντιού, του γραφίτη και των νανοσωλήνων διαπιστώθηκε πως η τιμή της για το γραφένιο σε θερμοκρασία δωματίου ξεπέρασε τις $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Η τιμή αυτή είναι διπλάσια από εκείνη του διαμαντιού και των νανοσωλήνων, γεγονός που ξεχωρίζει το γραφένιο. Βέβαια, όσον αφορά στο γραφένιο το οποίο στηρίζεται σε κάποιο υπόστρωμα τότε η τιμή της θερμικής του αγωγιμότητας σε θερμοκρασία δωματίου αγγίζει τα 600 W/mK .

Οι θερμικές ιδιότητες του γραφενίου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο όσον αφορά στην εφαρμογή του σε ηλεκτρονικές συσκευές. Η θερμική διαχείριση είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην καλύτερη απόδοση και την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η θερμική αγωγιμότητα συμβάλλει αποτελεσματικά στην ψύξη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, δεδομένης της αύξησης της πυκνότητας των κυκλωμάτων και της συρρίκνωσης των συσκευών. [27]

5.4.Μέθοδοι παρασκευής Γραφενίου

5.4.1.Μηχανική διάσπαση (Mechanical Cleavage)

Η μέθοδος της μηχανικής διάσπασης αποτελεί την πρώτη μέθοδο που αναπτύχθηκε για την απομόνωση του γραφενίου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, είναι αρκετά εύκολη η αποφλοιώση του γραφίτη με την χρήση ειδικής κολλητικής ταινίας,

αφού παρατηρούνται ασθενείς δυνάμεις Van der Waals στο γραφίτη. Η παρουσία του γραφενίου είναι αρκετά εύκολο να προσδιοριστεί με την μεταφορά των κομματιών γραφίτη και γραφενίου σε καθαρό υπόστρωμα συνήθως διοξειδίου του πυριτίου. Το μόνο που χρειάζεται να γίνει για την μεταφορά αυτή είναι ένα απλό πάτημα της ταινίας (ταμπονάρισμα) , αφού πρώτα γίνει έλεγχος με οπτικό μικροσκόπιο για τον έλεγχο της ύπαρξης λεπτών θραυσμάτων στην ταινία. Η μέθοδος περιλαμβάνει αναζήτηση για μεμονωμένα φύλλα γραφενίου ανάμεσα σε ένα μεγάλο αριθμό πολυστρωματικών φολίδων. Σε περίπτωση πιθανής εύρεσης μεμονωμένου φύλλου γραφενίου, τα δείγματα ταυτοποιούνται ύστερα από έλεγχο με οπτικό μικροσκόπιο και πειστικές αποδείξεις σχετικά με το πάχος τους, θα πρέπει να παρέχονται μέσω των τεχνικών Raman.

Βέβαια, η απόδοση της προσέγγισης αυτής δεν είναι αρκετά ικανοποιητική λόγω της επίδρασης ανθρώπινου παράγοντα. Όσον αφορά στην επιλογή υποστρώματος, είναι κρίσιμης σημασίας προκειμένου να είναι εμφανής η αντίθεση του γραφενίου. Η τεχνική αυτή, λόγω της χρήσης ταινίας, ενδέχεται να αφήσει υπολείμματα κόλλας στην επιφάνεια, οδηγώντας σε περιορισμό της κινητικότητας του φορέα. Η τεχνική αυτή δεν είναι ούτε επεκτάσιμη ούτε ικανή για μαζική παραγωγή. Παρόλα αυτά όμως η λήψη δειγμάτων γραφενίου που αποκτώνται είναι αναγκαία για την ύπαρξη μελετών για τον χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων του γραφενίου. [29]

5.4.2.Χημική Εναπόθεση Αερίου (Chemical Vapor Deposition, CVD)

Η σύνθεση γραφενίου μέσω της μεθόδου χημικής εναπόθεσης αερίου είναι γενικά μια σχετικά καινούρια μέθοδος, πολλά όμως υποσχόμενη. Στην μέθοδο αυτή, το γραφένιο αναπτύσσεται άμεσα σε ένα μεταλλικό υπόστρωμα μετάπτωσης μέσω του κορεσμού του άνθρακα κατά την έκθεσή του σε αέριο υδρογονάνθρακα, όπως το μεθάνιο, με την επιβολή υψηλών θερμοκρασιών. Μεμβράνες νικελίου ή χαλκού συνήθως χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. Όταν το υπόστρωμα ψύχεται η διαλυτότητα του άνθρακα στο υπόστρωμα μειώνεται και ο άνθρακας κατακάθεται για να σχηματίσει φύλλα γραφενίου (ατομικά ή πολυστρωματικά). Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου χημικής εναπόθεσης είναι η υψηλή

συμβατότητα που παρουσιάζει με την σημερινή συμπληρωματική τεχνολογία μετάλλου-οξειδίου ημιαγωγού (CMOS) .

Μια τυπική αδυναμία της μεθόδου, είναι ότι το να ελεγχθεί το πάχος του φιλμ είναι δύσκολο και επίσης παρατηρείται σχηματισμός δευτερευόντων κρυστάλλων ,αν και έχει γίνει σημαντική πρόοδος για την δημιουργία ομοιόμορφων φύλλων γραφενίου μέσω της μεθόδου αυτής. Ένα ακόμα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ανάγκη για χρήση ακριβών υλικών υποστρωμάτων για την ανάπτυξη γραφενίου με αποτέλεσμα τον περιορισμό της εφαρμογής της για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Παρ' όλα αυτά όμως έχει χαρακτηριστεί σαν μια σημαντική μέθοδος για την σύνθεση γραφενίου. [29]

5.4.3.Χημική αναγωγή του οξειδίου του πυριτίου

Οι εικόνες των μεμονωμένων φύλλων του γραφενίου που λαμβάνονται μέσω της χημικής αναγωγής του οξειδίου του γραφενίου χρονολογούνται στις αρχές του 1960 (Dreyer et al,2010) .Σε αυτή την προσέγγιση ,ακατέργαστος γραφίτης οξειδώνεται χημικά αρχικά και στην συνέχεια γίνεται διασπορά του σε διάλυμα μέσω υπερήχων. Τα φύλλα του οξειδίου του γραφενίου που προκύπτουν ,υφίστανται χημική αναγωγή με αναγωγικό μέσο ,όπως για παράδειγμα την υδραζίνη.

Αν και αρκετά μεγάλες ποσότητες γραφενίου είναι δυνατόν να παραχθούν μέσω της προσέγγισης αυτής, συνήθως οι προκύπτουσες ποσότητες δεν είναι ποιοτικά ιδανικές, καθώς χαρακτηρίζονται από ελαττώματα και υψηλό βαθμό διαταραχής. [30]

5.4.4.Επιταξιακή ανάπτυξη (Epitaxial growth)

Με τον όρο επιταξιακή ανάπτυξη εννοούμε την ανάπτυξη μιας ενιαίας κρυσταλλικής ταινίας στην κορυφή ενός κρυσταλλικού υποστρώματος. Επιταξιακό γραφένιο σε καρβίδιο του πυριτίου (SiC) μπορεί να παραχθεί με την αποσύνθεση του καρβιδίου του πυριτίου. Επιβολή θερμοκρασιών αρκετά υψηλών (>1000 °C) σε υψηλές συνθήκες κενού οδηγεί στην μετουσίωση του πυριτίου ,με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός πλούσιου στρώματος άνθρακα, το οποίο στην συνέχεια ενδέχεται να υποστεί γραφίτιοποίηση (Riedl et al,2010) .Επειδή η ακατέργαστη μορφή του καρβιδίου του πυριτίου μπορεί να ληφθεί σε μια απομονωμένη κατάσταση ,αυτός ο

τύπος γραφενίου μπορεί να μετράται χωρίς να είναι αναγκαίο να μεταφέρεται σε άλλα υποστρώματα. Σε γενικές γραμμές, το επιταξιακό γραφένιο χαρακτηρίζεται από ισχυρές αλληλεπιδράσεις με το υποκείμενο υπόστρωμα.[30]

5.5.Εφαρμογές Γραφενίου

Το γραφένιο, δεδομένων των ιδιαίτερα σημαντικών ιδιοτήτων του, παρουσιάζει αρκετά μεγάλη συμμετοχή σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές.

Ειδικότερα παρατηρείται συμμετοχή στις ακόλουθες εφαρμογές:

- ❖ Στον χώρο της νανοηλεκτρονικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή εύκαμπτων ηλεκτρονικών διατάξεων ταχύτερων και μικρότερων τρανζίστορς με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και απώλεια θερμότητας σε σχέση με εκείνα από πυρίτιο.
- ❖ Στην κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής
- ❖ Στην κατασκευή πυκνωτών και μπαταριών
- ❖ Στα φωτοβολταϊκά συστήματα και τις διατάξει υγρών κρυστάλλων
- ❖ Στην ανίχνευση μεμονωμένων μορίων και ατόμων ,ως χημικοί αισθητήρες
- ❖ Στον τομέα των θερμικών υλικών διεπαφής ,ως πληρωτικό μέσο.
- ❖ Σε βιο-εφαρμογές για την κατασκευή βιο-διατάξεων για την ανίχνευση βακτηρίων και ως αισθητήρες DNA

5.6.Νανοδομές Γραφενίου (Graphene Nanoplatelets)



Εικόνα 40: Μορφή Νανοδομών γραφενίου(Graphene Nanoplatelets)

5.6.1.Ιδιότητες νανοδομών γραφενίου -Εφαρμογές

Οι νανοδομές του γραφενίου (Graphene Nanoplatelets) ή αλλιώς πολυστρωματικό γραφένιο έχουν μέσο πάχος 5 έως 10 nm και προσφέρονται σε μεγέθη έως και 50 μικρά. Πρόκειται για τρισδιάστατη (3D) μορφή γραφενίου που αποτελείται από δύο ή περισσότερα πλέγματα άνθρακα. Αυτά τα ενδιαφέροντα νανοσωματίδια αποτελούνται από μικρές στοίβες των platelets σε σχήμα φύλλων γραφενίου που είναι ταυτόσημα με εκείνα που βρέθηκαν στα τοιχώματα των νανοσωλήνων άνθρακα, αλλά σε μια επίπεδη μορφή. Συνήθως συναντάται σε μορφή φύλλων όπως αναφέρθηκε τα οποία κυμαίνονται από 2 έως 100 περίπου. Για πολυστρωματικό γραφένιο με περισσότερα από 100 φύλλα, χρησιμοποιείται ο όρος λεπτό φιλμ γραφίτη για την περιγραφή τους. Λόγω της μοναδικού μεγέθους νανοκλίμακας που διαθέτουν, του σχήματος και του υλικού οι νανοδομές του γραφενίου μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα πολυμερικών υλικών προκειμένου να συμβάλλουν στην βελτίωση των ιδιοτήτων των συγκεκριμένων υλικών. Φυσικά με την έννοια πολυμερή υλικά γίνεται λόγος τόσο για θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, φυσικά ή τεχνητά ελαστομερή, κόλλες, επιχρίσματα και χρώματα. Οι νανοδομές γραφενίου προσφέρονται σε κοκκώδη μορφή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνες τους είτε σε συνδυασμό με άλλα πρόσθετα. Σε περίπτωση χρήσης μόνο των νανοδομών χωρίς πρόσθετα είναι δυνατή η αντικατάσταση των συμβατικών σε νανοκλίμακα πρόσθετων. Σε περίπτωση

συνδυασμού με πρόσθετα τότε δημιουργούνται προϋποθέσεις για μείωση του κόστους και επέκταση των ιδιοτήτων τροποποίησης.

Κάνοντας χρήση λοιπόν ναοδομών γραφενίου είναι δυνατόν να επιτευχθούν τα παρακάτω.

- ✓ Αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα και σταθερότητα
- ✓ Αυξάνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα
- ✓ Μειώνεται η μάζα του σύνθετου υλικού με ταυτόχρονη διατήρηση ή βελτίωση των ιδιοτήτων του.
- ✓ Αυξάνεται η δυσκαμψία
- ✓ Αυξάνεται η αντοχή σε κρούση
- ✓ Μειώνεται η ευφλεκτότητα
- ✓ Βελτιώνεται η εμφάνιση

Όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες που βασίζονται στον άνθρακα, τα φύλλα γραφενίου που σχηματίζουν οι ναοδομές γραφενίου είναι τόσο θερμικά, όσο και ηλεκτρικά αγωγά. Η μορφολογία των platelets παρέχει χαμηλότερη θερμική αντίσταση επαφής σε χαμηλότερα επίπεδα φόρτωσης, με αποτέλεσμα υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα έναντι άλλων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής και την αύξηση των τιμών της απόλυτης θερμοκρασίας χρήσης στα πολυμερή υλικά. Επίσης, ο συνδυασμός τους με ένα φιλμ ή στερεό μέρος πολυμερούς έχει σαν αποτέλεσμα στην μείωση των συντελεστών διαπερατότητας και διάχυσης του υλικού της μήτρας. Το γεγονός ότι είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε φάρδος από ότι σε πάχος, τα καθιστά πολύ αποτελεσματικά σε χαμηλά επίπεδα πλήρωσης που συνεπάγεται σημαντική μείωση του κόστους. [31]

6.Μηχανική μονοστρωματικών σύνθετων

6.1.Μηχανική συμπεριφορά σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αρκετά χαρακτηριστικά όσον αφορά στην μηχανική τους συμπεριφορά, τα οποία διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από εκείνα τα

οποία διακρίνουν τα περισσότερα συμβατικά υλικά. Ορισμένα χαρακτηριστικά αποτελούν απλά τροποποίηση της συμβατικής συμπεριφοράς, ενώ άλλα είναι εντελώς καινούρια με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η εφαρμογή νέων τόσο πειραματικών όσο και αναλυτικών μεθόδων. Τα περισσότερα συμβατικά υλικά των οποίων γίνεται χρήση στην μηχανολογία είναι συνήθως τόσο ομοιογενή όσο και ισοτροπικά. Αντίθετα, όσον αφορά στα σύνθετα υλικά εκείνα συνήθως είναι ανομοιογενή και μη ισοτροπικά (ορθοτροπικά).

Λόγω της εγγενούς ετερογενούς φύσης των σύνθετων υλικών, συνήθως δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει προσέγγιση της συμπεριφοράς τους:

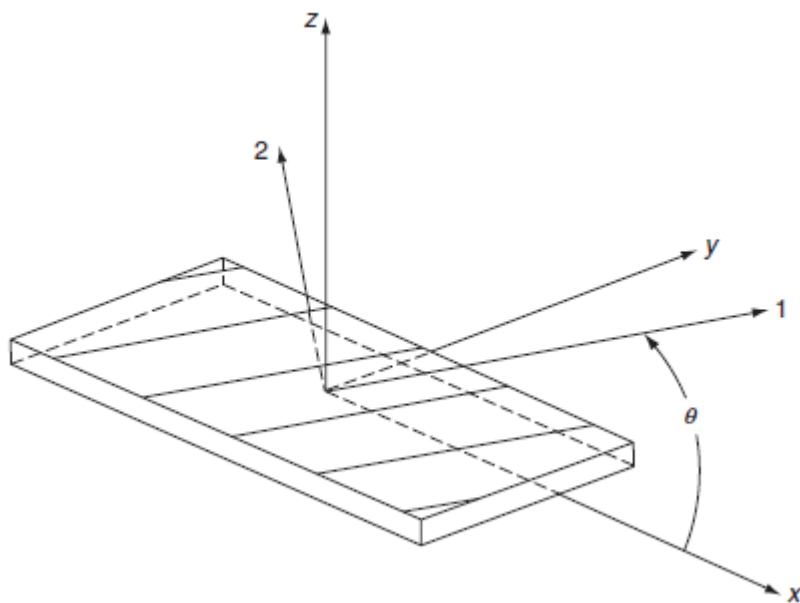
- ✚ **Μικρομηχανική (Micromechanics)** : Η μικρομηχανική αποτελεί την μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών, στην οποία η αλληλεπίδραση των συστατικών του σύνθετου εξετάζεται σε μικροσκοπική κλίμακα προκειμένου να διασαφηνιστεί η επίδρασή τους στις ιδιότητες του σύνθετου.
- ✚ **Μακρομηχανική (Macromechanics)** : Η μακρομηχανική αποτελεί την μελέτη της συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών, στην οποία το υλικό θεωρείται ομοιογενές και η επίδραση των συστατικών υλικών του σύνθετου εντοπίζεται μόνο ως η μέση τιμή των μακροσκοπικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. [32]

6.2.Χαρακτηριστικά ενός μονοστρωματικού σύνθετου ενισχυμένου με ίνες

6.2.1.Βασικές αρχές

6.2.1.1.Άξονες συντεταγμένων

Θεωρούμε ένα λεπτό μονοστρωματικό σύνθετο ενισχυμένο με ίνες, οι οποίες είναι τοποθετημένες παράλληλα μεταξύ τους μέσα σε μια μήτρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 41 που ακολουθεί.



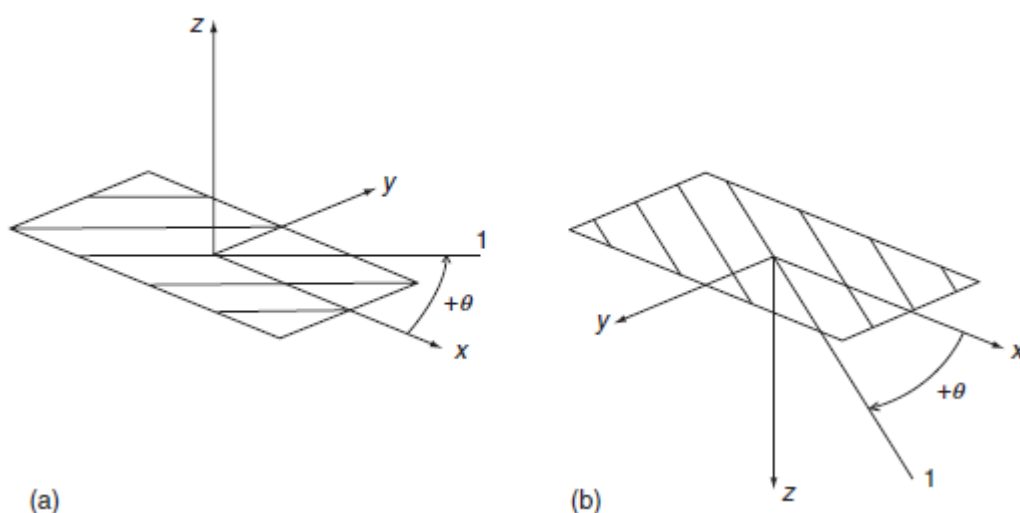
Εικόνα 41: Ορισμός των κύριων αξόνων του υλικού και των αξόνων φόρτισης για ένα μονοστρωματικό υλικό

Προκειμένου να γίνει περιγραφή των ελαστικών ιδιοτήτων του σύνθετου, είναι αναγκαίο πρώτα να οριστούν δύο συστήματα συντεταγμένων, ο ορισμός των οποίων βασίζεται στην εφαρμογή του κανόνα του δεξιού χεριού. Τα συστήματα αυτά τα ονομάζουμε 1-2-z και x-y-z συστήματα συντεταγμένων. Οι άξονες συντεταγμένων 1-2 και x-y είναι τοποθετημένοι στο επίπεδο του μονοστρωματικού σύνθετου, ενώ ο άξονας z έχει κατεύθυνση κάθετη στο εν λόγω επίπεδο.

Στο σύστημα συντεταγμένων 1-2-z , ο άξονας 1 είναι τοποθετημένος κατά μήκος των ινών και αντιπροσωπεύει την διαμήκη διεύθυνση του μονοστρωματικού. Ο άξονας 2 είναι τοποθετημένος κάθετα ως προς το μήκος των ινών και αντιπροσωπεύει την εγκάρσια διεύθυνση του μονοστρωματικού σύνθετου. Μαζί αποτελούν τις κύριες διευθύνσεις στο επίπεδο του μονοστρωματικού. Όσον αφορά στο σύστημα συντεταγμένων xyz, οι άξονες x και y αντιπροσωπεύουν τις διευθύνσεις φόρτισης του υλικού.

Η γωνία η οποία σχηματίζεται από τον άξονα x και τον άξονα 1 ονομάζεται γωνία προσανατολισμού των ινών και συμβολίζεται με θ . Το αν πρόκειται για γωνία θετικού ή αρνητικού πρόσημου, εξαρτάται από τον κανόνα δεξιού χεριού που εφαρμόζουμε ώστε να ορίσουμε το σύστημα των αξόνων συντεταγμένων. Εάν ο άξονας z είναι κάθετος και με φορά προς τα άνω ως προς το επίπεδο του μονοστρωματικού , η γωνία προσανατολισμού των ινών είναι θετική όταν

υπολογίζεται αριστερόστροφα από τον θετικό άξονα x (Εικόνα 42a) . Σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο άξονας z είναι κάθετος και με φορά προς τα κάτω ως προς το επίπεδο του μονοστρωματικού ,η γωνία προσανατολισμού των ινών είναι θετική όταν υπολογίζεται δεξιόστροφα από τον θετικό άξονα x (Εικόνα 42b) . Ακολουθεί σχετική εικόνα των γωνιών θ .



Εικόνα 42: Καθορισμός συστήματος συντεταγμένων με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού. Παρατηρείται διαφορά σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών μεταξύ των (a) και (b.)

6.2.1.2.Σημειογραφία-Συμβολισμοί

Προκειμένου να γίνει αναφορά στις ίνες και την μήτρα γίνεται χρήση των γραμμάτων f και m αντίστοιχα, ως δείκτες. Οι ιδιότητες του μονοστρωματικού σύνθετου όπως για παράδειγμα ο λόγος Poisson περιγράφονται κάνοντας χρήση δυο γραμμάτων ως δείκτες. Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται στην διεύθυνση φόρτισης, ενώ ο δεύτερος δείκτης αντιπροσωπεύει την διεύθυνση κατά την οποία μετράται κάποια από τις ιδιότητες του μονοστρωματικού σύνθετου. Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις επίσης συμβολίζονται κάνοντας χρήση δύο δεικτών. Από τους δύο δείκτες, ο πρώτος αφορά στην διεύθυνση της εξωτερικής κάθετης στο επίπεδο στο οποίο δρα η συνιστώσα της τάσης. Ο δεύτερος φορά στην διεύθυνση της συνιστώσας της τάσης.

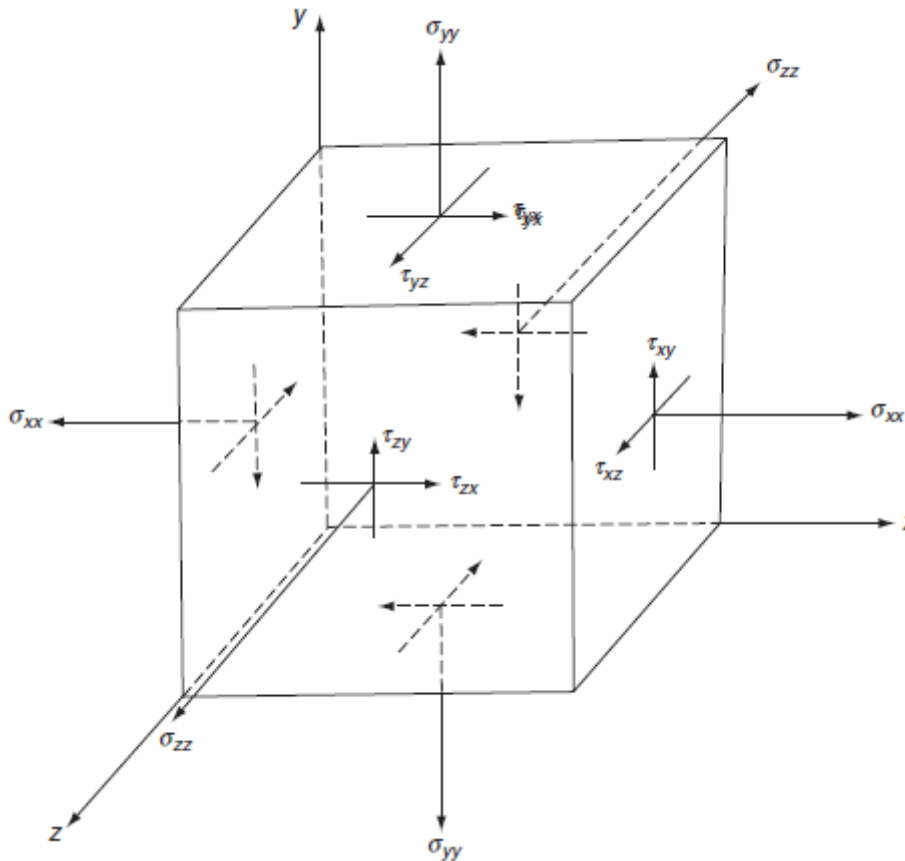
Υπάρχουν ορισμένοι τρόποι για να ξεχωρίσουν οι θετικές από τις αρνητικές συνιστώσες των τάσεων. Οι κανόνες είναι οι ακόλουθοι δύο:

1. Εάν η εξωτερική κάθετη προς το επίπεδο τάσεων έχει διεύθυνση προς τα θετικά του άξονα συντεταγμένων τότε έχουμε την δυνατότητα να αποκαλούμε το επίπεδο των τάσεων θετικό. Ένα αρνητικό επίπεδο τάσεων

έχει την εξωτερική, κάθετη σε αυτό να είναι στραμμένη προς τα αρνητικά του άξονα συντεταγμένων.

2. Μια συνιστώσα των τάσεων θα είναι θετική, εάν δρα σε θετική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων και σε θετικό επίπεδο τάσεων ή όταν δρα σε αρνητική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων, σε αρνητικό επίπεδο τάσεων.

Παρακάτω ακολουθεί εικόνα όλων των συνιστωσών των τάσεων οι οποίες είναι όλες θετικές, αν βασιστεί κανείς στους κανόνες που αναφέραμε παραπάνω.



Εικόνα 43: Σύνολο ορθών και διατμητικών τάσεων

6.2.1.3. Μετασχηματισμοί τάσεων και παραμορφώσεων ενός λεπτού μονοστρωματικού σύνθετου (under plane stress)

Σε ένα λεπτό μονοστρωματικό σύνθετο με γωνία προσανατολισμού ινών θ , είναι συνήθως επιθυμητό να μετασχηματίσουμε τις τάσεις από τις διευθύνσεις xy στις διευθύνσεις των αξόνων 12. Οι εξισώσεις μετασχηματισμού που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx}(\cos \theta)^2 + \sigma_{yy}(\sin \theta)^2 + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

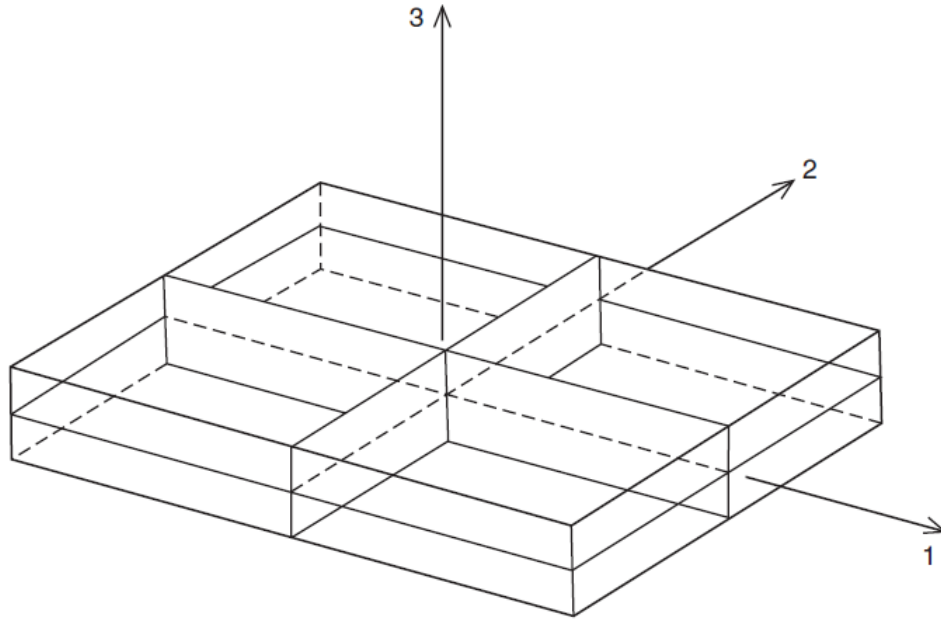
$$\begin{aligned}\sigma_{22} &= \sigma_{xx}(\sin \theta)^2 + \sigma_{yy}(\cos \theta)^2 + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{12} &= (-\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy}((\cos \theta)^2 - (\sin \theta)^2) \quad (6.1)\end{aligned}$$

Όπου οι τάσεις σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} είναι τάσεις που εφαρμόζονται στην διευθύνσεις x και y ενώ οι τάσεις σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} είναι μετασχηματισμοί τάσεων στις διευθύνσεις 1 και 2. Οι ίδιες εξισώσεις ισχύουν και για τους μετασχηματισμούς παραμορφώσεων με την διαφορά ότι αντί για σ συναντούμε το ε και όπου τ γίνεται αντικατάσταση του με $\frac{\gamma}{2}$. Οπότε ισχύουν οι επόμενες εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \varepsilon_{xx}(\cos \theta)^2 + \varepsilon_{yy}(\sin \theta)^2 + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \varepsilon_{22} &= \varepsilon_{xx}(\sin \theta)^2 + \varepsilon_{yy}(\cos \theta)^2 + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \gamma_{12} &= 2(-\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \sin \theta \cos \theta + \gamma_{xy}((\cos \theta)^2 - (\sin \theta)^2) \quad (6.2)\end{aligned}$$

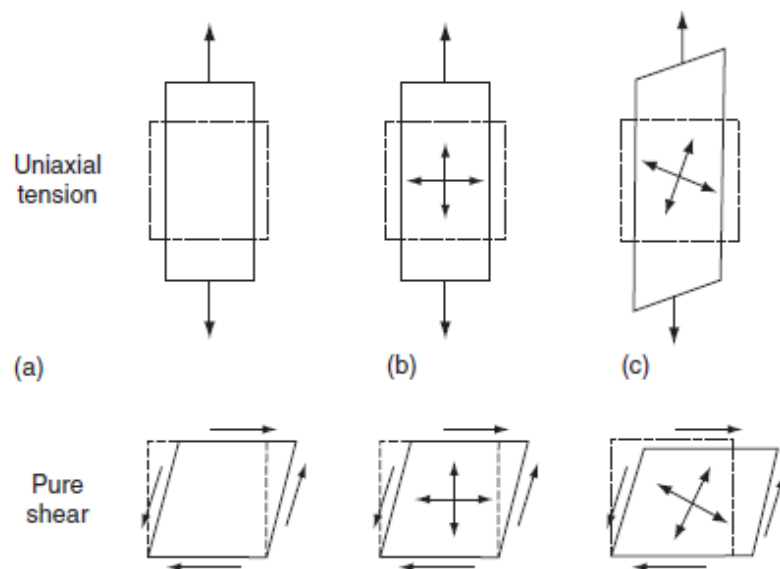
6.2.1.4. Ισοτροπικά, ανισοτροπικά και ορθοτροπικά υλικά

Σε ένα ισοτροπικό υλικό οι ιδιότητες είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις. Επομένως, το υλικό περιέχει έναν άπειρο αριθμό επιπέδων συμμετρίας των ιδιοτήτων του, τα οποία περνούν από ένα σημείο. Αντίθετα, σε ένα ανισοτροπικό υλικό, δεν παρατηρούνται όμοιες ιδιότητες προς κάθε κατεύθυνση και συνεπώς δεν υπάρχουν επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων του. Τα σύνθετα υλικά τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες, περιέχουν γενικά τρία ορθογώνια επίπεδα συμμετρίας τα οποία ονομάζονται επίπεδα 1-2, 2-3, 1-3 και ταξινομούνται στα ορθοτροπικά υλικά όπως φαίνεται στην εικόνα 44 που ακολουθεί.



Εικόνα 44: Μορφή τριών επιπέδων συμμετρίας σε ένα ορθοτροπικό υλικό

Οι τομές (intersections) των επιπέδων συμμετρίας γίνονται από τους άξονες 1,2,3 οι οποίοι ονομάζονται κύριες διευθύνσεις του υλικού. Διαφορές στην μηχανική συμπεριφορά ιστροπικών, ανισοτροπικών και ορθοτροπικών υλικών φαίνονται στην εικόνα 45 που ακολουθεί.



Εικόνα 45: Διαφοροποίηση όσον αφορά στην παραμόρφωση ιστροπικών (a) , ειδικά ορθοτροπικών (b) και ανισοτροπικών (c) υλικών που υφίστανται μονοαξονικό εφελκυσμό και διάτμηση.

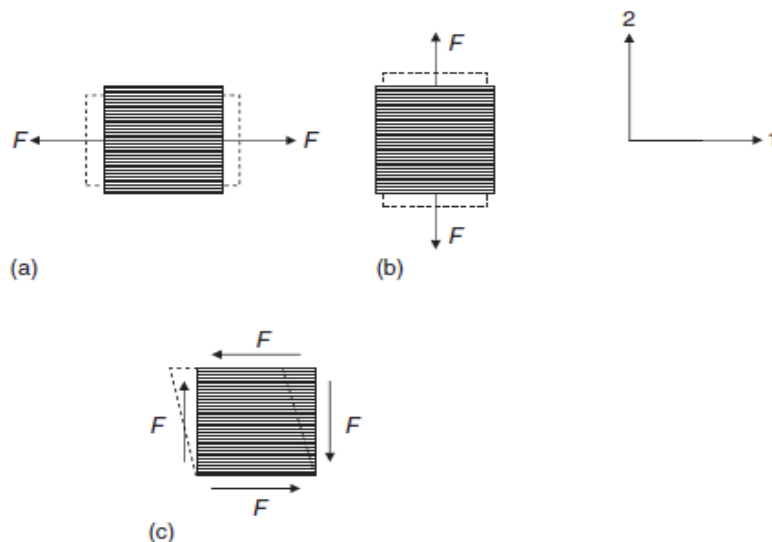
Οι εφελκυστικές ορθές τάσεις εφαρμόζονται προς κάθε κατεύθυνση σε ένα ιστροπικό υλικό και προκαλούν επιμήκυνση προς την κατεύθυνση που δρουν και συρρίκνωση στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις. Παρόμοια βέβαια συμπεριφορά

παρατηρείται και στα ορθοτροπικά υλικά με την προϋπόθεση να ασκούνται κάθετες τάσεις σε μια από τις κύριες διευθύνσεις του υλικού (principal material directions). Ωστόσο, η εφαρμογή κάθετων τάσεων σε οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση δημιουργεί τόσο διατμητικές όσο και εκτατικές (extensional) παραμορφώσεις. Σε ένα ανισοτροπικό υλικό, ο συνδυασμός των εκτατικών (extensional) και διατμητικών παραμορφώσεων με την εφαρμογή είτε κάθετων είτε διατμητικών τάσεων ονομάζεται σύζευξη επιμήκυνσης-διάτμησης (extension-shear coupling) και δεν παρατηρείται στα ισοτροπικά υλικά. Η διαφοροποίηση όσον αφορά στην συμμετρία των ιδιοτήτων στα ισοτροπικά, τα ανισοτροπικά και τα ορθοτροπικά υλικά αντικατοπτρίζεται τόσο από την μηχανική συμπεριφορά όσο και από τον σχεδιασμό των υλικών αυτών.

6.3.Ελαστικές ιδιότητες μονοστρωματικού σύνθετου

6.3.1.Μονοδιευθυντικά μονοστρωματικά σύνθετα συνεχών ινών και γωνία προσανατολισμού $\theta = 0^\circ$

Οι ελαστικές ιδιότητες ενός τέτοιου τύπου μονοστρωματικού σύνθετου υλικού (Εικόνα 46) υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:



Εικόνα 46: Εφαρμογή (a) διαμήκουσ εφελκυστικής τάσης, (b) εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης και (c) διατμητικής τάσης σε ένα μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο υλικό συνεχών ινών και γωνίας προσανατολισμού $\theta = 0^\circ$.

✚ Με αναφορά στην εικόνα (a) στην οποία η εφελκυστική τάση (tensile stress) εφαρμόζεται κατά την διεύθυνση 1 υπολογίζονται τα ακόλουθα:

Διάμηκες μέτρο ελαστικότητας (Longitudinal modulus):

$$E_{11} = E_f \nu_f + E_m \nu_m \quad (6.3)$$

Πρωτεύων λόγος Poisson:

$$\nu_{12} = \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m \quad (6.4)$$

Όπου $\nu_{12} = \frac{\text{παραμόρφωση στην κατεύθυνση 2}}{\text{παραμόρφωση στην κατεύθυνση 1}}$

✚ Με αναφορά στην εικόνα (b) στην οποία η εφελκυστική τάση εφαρμόζεται κατά την διεύθυνση 2 υπολογίζονται τα ακόλουθα:

Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας (Transverse modulus):

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{E_f \nu_m + E_m \nu_f} \quad (6.5)$$

Δευτερεύων λόγος Poisson:

$$\nu_{21} = \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12} \quad (6.6)$$

Όπου $\nu_{21} = \frac{\text{παραμόρφωση στην κατεύθυνση 1}}{\text{παραμόρφωση στην κατεύθυνση 2}}$

✚ Με αναφορά στην εικόνα 46(c) στην οποία η διατμητική τάση εφαρμόζεται στο επίπεδο 12 υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο και ισχύει ότι:

$$G_{12} = G_{21} = \frac{G_f G_m}{G_f \nu_m + G_m \nu_f} \quad (6.7)$$

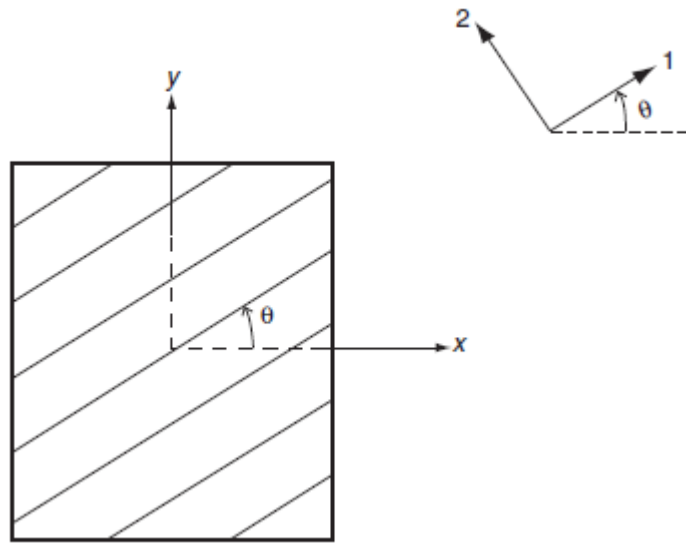
Οι παραπάνω εξισώσεις (6.3-6.7) προκύπτουν από την προσέγγιση της απλής μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραδοχές:

- ✓ Τόσο η μήτρα όσο και οι ίνες θεωρείται ότι είναι γραμμικά ελαστικά ισοτροπικά υλικά.
- ✓ Οι ίνες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στην μήτρα.
- ✓ Το μονοστρωματικό σύνθετο δεν παρουσιάζει καθόλου κενά.
- ✓ Παρατηρείται τέλειος δεσμός μεταξύ μήτρας και ινών.
- ✓ Οι ίνες είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες στην κατεύθυνση 1.

6.3.2.Μονοδιευθυντικά μονοστρωματικά σύνθετα συνεχών ινών υπό γωνία (angle-ply lamina)

Οι ακόλουθες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ελαστικών ιδιοτήτων των μονοστρωματικών σύνθετων, στα οποία οι ίνες είναι

ευθυγραμμισμένες υπό γωνία θ με την θετική κατεύθυνση του άξονα x όπως φαίνεται στην εικόνα 47 που ακολουθεί.



Εικόνα 47: Μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο υλικό, συνεχών ινών υπό γωνία (angle-ply)

$$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{(\cos \theta)^4}{E_{11}} + \frac{(\sin \theta)^4}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) (\sin 2\theta)^2 \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{E_{yy}} = \frac{(\sin \theta)^4}{E_{11}} + \frac{(\cos \theta)^4}{E_{22}} + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) (\sin 2\theta)^2 \quad (6.9)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) (\cos 2\theta)^2 \quad (6.10)$$

$$\nu_{xy} = E_{xx} \left[\frac{\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) (\sin 2\theta)^2 \right] \quad (6.11)$$

$$\nu_{yx} = \frac{E_{yy}}{E_{xx}} \nu_{xy} \quad (6.12)$$

Όπου τα E_{11} , E_{22} , ν_{12} και G_{12} υπολογίζονται από τις εξισώσεις 6.3-6.7.

6.4. Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για ένα λεπτό μονοστρωματικό σύνθετο

6.4.1. Ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

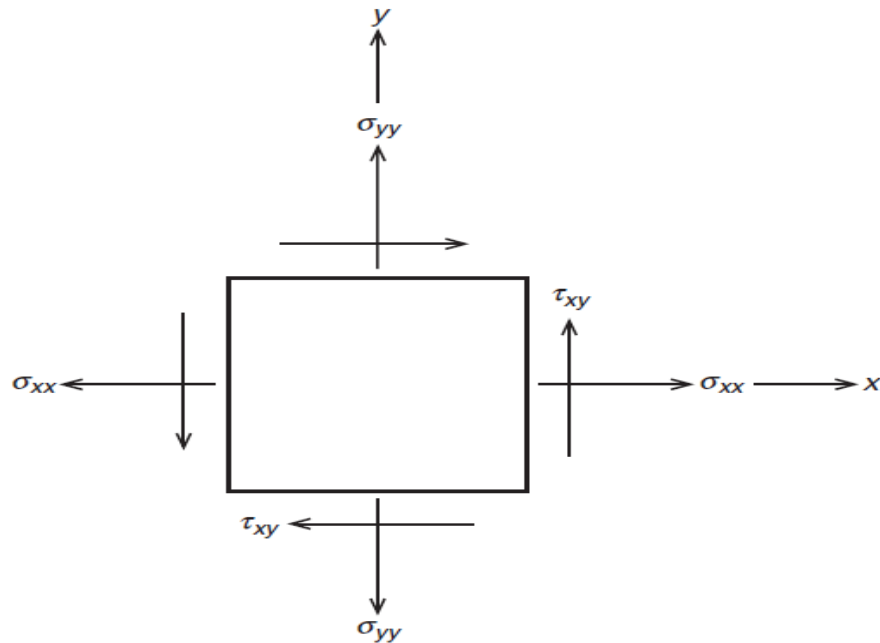
Για ένα λεπτό ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο (Εικόνα 48) στο επίπεδο των τάσεων ($\sigma_{xz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$), οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή είναι οι ακόλουθες:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu \sigma_{yy})$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} (-\nu \sigma_{xx} + \sigma_{yy})$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \quad (6.13)$$

Όπου E : Μέτρο του Young, G : Μέτρο Διάτμησης, ν : Λόγος Poisson



Εικόνα 48: Εφαρμογή τάσεων σε ένα ιστροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

Στην εξίσωση 6.13 παρατηρείται πως δεν υπάρχει καμία σύζευξη μεταξύ της διατμητικής τάσης τ_{xy} και των ορθών τάσεων σ_{xx} και σ_{yy} . Συνεπώς, η διατμητική τάση τ_{xy} δεν επηρεάζει τις ορθές παραμορφώσεις ϵ_{xx} και ϵ_{yy} όπως ακριβώς και οι ορθές τάσεις σ_{xx} και σ_{yy} δεν επηρεάζουν την διατμητική τάση γ_{xy} .

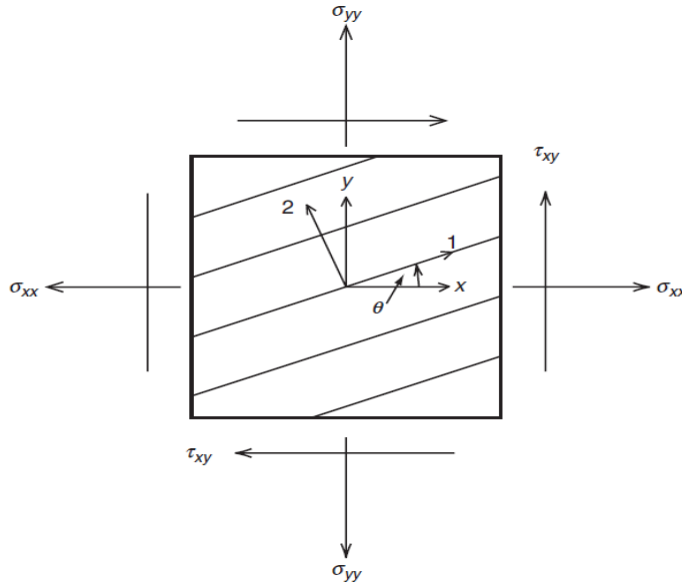
6.4.2.Ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

Για ένα λεπτό ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο στο επίπεδο των τάσεων ($\sigma_{xz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$) (Εικόνα 49), οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων στην ελαστική περιοχή είναι οι ακόλουθες:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E_{xx}} - \nu_{yx} \frac{\sigma_{yy}}{E_{yy}} - m_x \tau_{xy} \quad (6.14)$$

$$\varepsilon_{yy} = -\nu_{xy} \frac{\sigma_{xx}}{E_{xx}} + \frac{\sigma_{yy}}{E_{yy}} - m_y \tau_{xy} \quad (6.15)$$

$$\gamma_{xy} = -m_x \sigma_{xx} - m_y \sigma_{yy} + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \quad (6.16)$$



Εικόνα 49: Εφαρμογή τάσεων σε ένα γενικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

Όπου $E_{xx}, E_{yy}, G_{xy}, \nu_{xy}, \nu_{yx}$ είναι ελαστικές σταθερές για το μονοστρωματικό σύνθετο που υπολογίζονται από τις σχέσεις 6.8-6.12, ενώ τα m_x, m_y υπολογίζονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$m_x = (\sin 2\theta) \left[\frac{\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{2G_{12}} - (\cos \theta)^2 \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \right] \quad (6.17)$$

$$m_y = (\sin 2\theta) \left[\frac{\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{2G_{12}} - (\sin \theta)^2 \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \right] \quad (6.18)$$

Οι παραπάνω ελαστικές σταθερές ονομάζονται συντελεστές αμοιβαίας επίδρασης (coefficients of mutual influence).

Βασιζόμενοι στις εξισώσεις 6.14-6.18 είναι εφικτό να επισημανθούν ορισμένες παρατηρήσεις.

- ✚ Σε αντίθεση με το ιστροπικό μονοστρωματικό σύνθετο, παρατηρείται σύζευξη των εκτατικών και διατμητικών παραμορφώσεων σε ένα γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο.
- ✚ Για μονοστρωματικό σύνθετο με γωνία προσανατολισμού ινών $\theta=0^\circ$ και $\theta=90^\circ$ και οι δύο συντελεστές m_x, m_y είναι μηδενικοί και για το λόγο αυτό, για τις συγκεκριμένες γωνίες προσανατολισμού ινών δεν παρατηρείται καμία σύζευξη μεταξύ εκτατικών και διατμητικών τάσεων.

Ένα μονοστρωματικό σύνθετο λουπόν στο οποίο οι κύριοι άξονες (1 και 2) συμπίπτουν με τους άξονες φόρτισης (x και y) ονομάζεται ειδικά ορθοτροπικό (specially orthotropic) . Για ένα ειδικά ορθοτροπικό σύνθετο μονοστρωματικό (Εικόνα 50) ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης:

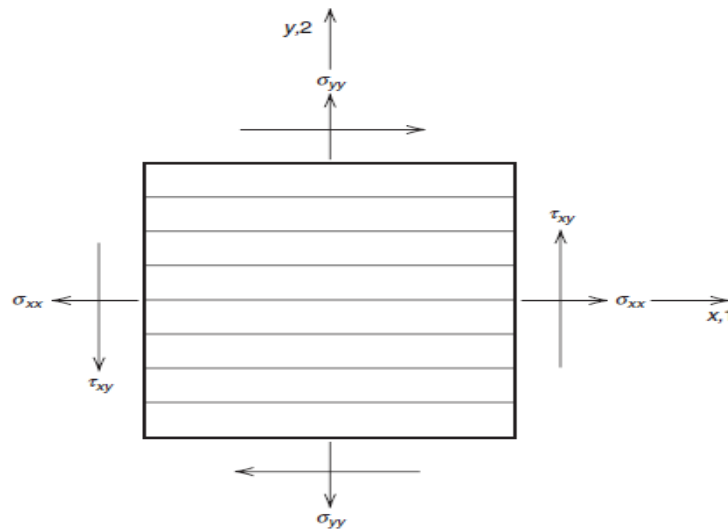
$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{xx}}{E_{11}} - \nu_{21} \frac{\sigma_{yy}}{E_{22}} \quad (6.19)$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{22} = -\nu_{12} \frac{\sigma_{xx}}{E_{11}} + \frac{\sigma_{yy}}{E_{22}} \quad (6.20)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \gamma_{12} = \gamma_{21} = \frac{\tau_{xy}}{G_{12}} \quad (6.21)$$

- ✚ Οι συντελεστές m_x, m_y εξαρτώνται από την γωνία προσανατολισμού θ των ινών και αποκτούν μέγιστες τιμές για γωνίες μεταξύ 0° και 90° .

Ακολουθεί σχετική εικόνα ειδικά ορθοτροπικού μονοστρωματικού σύνθετου με τις τάσεις που εφαρμόζονται να απεικονίζονται.



Εικόνα 50: Εφαρμογή τάσεων σε ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

6.5.Μητρώα συμβιβαστότητας (compliance matrix) και δυσκαμψίας (stiffness matrix)

6.5.1.Ισοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο

Για ένα μονοστρωματικό ιστροπικό σύνθετο οι εξισώσεις 6.13 μπορούν να γραφθούν σε μορφή μητρώου με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Όπου το μητρώο $[S]$ αντιπροσωπεύει το μητρώο συμβιβαστότητας και συσχετίζει παραμορφώσεις με γνωστές τάσεις. Το ανάστροφο μητρώο του μητρώου συμβιβαστότητας ορίζει το μητρώο δυσκαμψίας το οποίο συμβολίζεται με $[Q]$. Το μητρώο δυσκαμψίας συσχετίζει τάσεις με γνωστές παραμορφώσεις. Οπότε ισχύει η ακόλουθη σχέση για ένα ιστροπικό μονοστρωματικό σύνθετο:

$$[Q] = [S]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

6.5.2.Ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο (Specially Orthotropic Lamina) ($\theta=0^\circ$ ή 90°)

Τοποθετώντας τις εξισώσεις 6.19-6.21 σε μορφή μητρώου, είναι εφικτό να γραφτεί η σχέση τάσης-παραμόρφωσης για ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} = (S_{21}) & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

όπου

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}$$

$$S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_{22}}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (6.25)$$

Το μητρώο $[S]$ είναι εκείνο της συμβιβαστότητας για ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο. Αναστρέφοντας την εξίσωση 6.24 ,μπορούμε να γράψουμε τις σχέσεις τάσεις –παραμόρφωσης για ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} = (Q_{12}) & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Όπου $[Q]$ αντιπροσωπεύει το μητρώο δυσκαμψίας για ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο. Διάφορα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας $[Q]$ είναι τα ακόλουθα:

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = Q_{12} \quad (6.27)$$

6.5.3.Γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο (General orthotropic lamina, $\theta \neq 0^\circ$ ή $\theta = 0^\circ$)

Οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για ένα γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο ,σχέσεις 6.14-6.16, μπορούν να εκφραστούν σε μορφή μητρώων με την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{12} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{S}] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Όπου το μητρώο $[\overline{S}]$ αποτελεί το μητρώο συμβιβαστότητας για ένα μονοστρωματικό σύνθετο. Διάφορα στοιχεία του μητρώου $[\overline{S}]$ εκφράζονται με την μορφή στοιχείων του μητρώου $[S]$ για ένα ειδικά ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο. Οι εκφράσεις των εν λόγω στοιχείων παρατίθενται παρακάτω με τις εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned} \overline{S}_{11} &= \frac{1}{E_{xx}} = S_{11}(\cos \theta)^4 + (2S_{12} + S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{22}(\sin \theta)^4 \\ \overline{S}_{12} &= -\frac{\nu_{xy}}{E_{xx}} = S_{12}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 \\ \overline{S}_{22} &= \frac{1}{E_{yy}} = S_{11}(\sin \theta)^4 + (2S_{12} + S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{22}(\cos \theta)^4 \\ \overline{S}_{16} &= -m_x = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta (\cos \theta)^3 - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66})(\sin \theta)^3 \cos \theta \\ \overline{S}_{26} &= -m_y = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66})(\sin \theta)^3 \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta (\cos \theta)^3 \\ \overline{S}_{66} &= \frac{1}{G_{xy}} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + S_{66}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4) \end{aligned} \quad (6.29)$$

Με αναστροφή της εξίσωσης 6.28, οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης για ένα γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο μπορούν να γραφθούν με την μορφή μητρώων με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{Q}] \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

Όπου το μητρώο $[\overline{Q}]$ αποτελεί το μητρώο δυσκαμψίας για ένα μονοστρωματικό σύνθετο. Διάφορα στοιχεία του μητρώου $[\overline{Q}]$ εκφράζονται με την μορφή στοιχείων του μητρώου $[Q]$. Οι εκφράσεις των εν λόγω στοιχείων παρατίθενται παρακάτω με τις εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
\overline{Q_{11}} &= Q_{11}(\cos \theta)^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{22}(\sin \theta)^4 \\
\overline{Q_{12}} &= Q_{12}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 \\
\overline{Q_{22}} &= Q_{11}(\sin \theta)^4 + 2(Q_{11} + Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{22}(\cos \theta)^4 \\
\overline{Q_{16}} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta (\cos \theta)^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})(\sin \theta)^3 \cos \theta \\
\overline{Q_{26}} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})(\sin \theta)^3 \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta (\cos \theta)^3 \\
\overline{Q_{66}} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{66}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4) \quad (6.31)
\end{aligned}$$

Προκειμένου να γίνει χρήση των εξισώσεων 6.29 και 6.31, θα πρέπει να επισημανθούν τα ακόλουθα:

- Τα στοιχεία $\overline{S_{16}}$ και $\overline{S_{26}}$ του μητρώου $[\overline{S}]$ ή τα στοιχεία $\overline{Q_{16}}$ και $\overline{Q_{26}}$ του μητρώου $[\overline{Q}]$ δείχνουν την ύπαρξη σύζευξης εκτατικών-διατμητικών τάσεων.
- Από τις εξισώσεις 6.29 ή 6.31, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν 6 ελαστικές σταθερές που ορίζουν σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά του μονοστρωματικού σύνθετου ως προς τις τάσεις και παραμορφώσεις που υφίσταται. Ωστόσο, μια αναλυτικότερη εξέταση των εξισώσεων αυτών δείχνει ότι τα στοιχεία $\overline{S_{16}}$ και $\overline{S_{26}}$ του μητρώου $[\overline{S}]$ (ή τα στοιχεία $\overline{Q_{16}}$ και $\overline{Q_{26}}$ του μητρώου $[\overline{Q}]$) είναι γραμμικός συνδυασμός τεσσάρων ελαστικών σταθερών $\overline{S_{11}}, \overline{S_{22}}, \overline{S_{12}}, \overline{S_{66}}$ και για το λόγο αυτό δεν είναι ανεξάρτητα.
- Τα στοιχεία στα μητρώα $[\overline{S}]$ και $[\overline{Q}]$ εκφράζονται με όρους των ιδιοτήτων βασιζόμενες στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Οι όροι αυτοί είναι οι $E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}$ και μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά ή με την χρήση των εξισώσεων 6.3-6.7.
- Τα στοιχεία στα μητρώα $[\overline{S}]$ και $[\overline{Q}]$ μπορούν να εκφραστούν με όρους πέντε αμετάβλητων ιδιοτήτων του μονοστρωματικού σύνθετου, όπως φαίνεται παρακάτω.

Κάνοντας χρήση τριγωνομετρικών ταυτοτήτων, οι Tsai και Pagano, έδειξαν ότι τα στοιχεία στο μητρώο $[\overline{Q}]$ μπορούν να γραφθούν ως εξής:

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= U_1 + U_2 \cos 2\theta + U_3 \cos 4\theta \\
\bar{Q}_{12} &= \bar{Q}_{21} = U_4 - U_3 \cos 4\theta \\
\bar{Q}_{22} &= U_1 - U_2 \cos 2\theta + U_3 \cos 4\theta \\
\bar{Q}_{16} &= \frac{1}{2} U_2 \sin 2\theta + U_3 \sin 4\theta \\
\bar{Q}_{26} &= \frac{1}{2} U_2 \sin 2\theta - U_3 \sin 4\theta \\
\bar{Q}_{66} &= U_5 - U_3 \cos 4\theta
\end{aligned} \tag{6.32}$$

Όπου $U_1 - U_5$ αποτελούν σταθερές γωνίας προσανατολισμού (angle-invariant) ιδιότητες ενός μονοστρωματικού σύνθετου και υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{1}{8} (3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66}) \\
U_2 &= \frac{1}{2} (Q_{11} - Q_{22}) \\
U_3 &= \frac{1}{8} (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66}) \\
U_4 &= \frac{1}{8} (Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66}) \\
U_5 &= \frac{1}{2} (U_1 - U_4)
\end{aligned} \tag{6.33}$$

Από την εξίσωση 6.32 ισχύει ότι για γωνίες προσανατολισμού θ και $-\theta$ ορίζονται τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned}
\overline{Q}_{11}(-\theta) &= \overline{Q}_{11}(\theta) \\
\overline{Q}_{12}(-\theta) &= \overline{Q}_{12}(\theta) \\
\overline{Q}_{22}(-\theta) &= \overline{Q}_{22}(\theta) \\
\overline{Q}_{66}(-\theta) &= \overline{Q}_{66}(\theta) \\
\overline{Q}_{16}(-\theta) &= -\overline{Q}_{16}(\theta)
\end{aligned}$$

$$\overline{Q}_{26}(-\theta) = -\overline{Q}_{26}(\theta)$$

Παρόμοιες εξισώσεις ισχύουν για τα στοιχεία του μητρώου $[\overline{S}]$ και είναι οι ακόλουθες:

$$\overline{S}_{11} = V_1 + V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta$$

$$\overline{S}_{12} = \overline{S}_{21} = V_4 - V_3 \cos 4\theta$$

$$\overline{S}_{22} = V_1 - V_2 \cos 2\theta + V_3 \cos 4\theta$$

$$\overline{S}_{16} = V_2 \sin 2\theta + 2V_3 \sin 4\theta$$

$$\overline{S}_{26} = V_2 \sin 2\theta - 2V_3 \sin 4\theta$$

$$\overline{S}_{66} = V_5 - 4V_3 \cos 4\theta \quad (6.34)$$

Οπου

$$V_1 = \frac{1}{8}(3S_{11} + 3S_{22} + 2S_{12} + S_{66})$$

$$V_2 = \frac{1}{2}(S_{11} - S_{22})$$

$$V_3 = \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66})$$

$$V_4 = \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} + 6S_{12} - S_{66})$$

$$V_5 = 2(V_1 - V_4) \quad (6.35)$$

Αυτοί οι σταθεροί τύποι είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για τον υπολογισμό των στοιχείων στα μητρώα $[\overline{S}]$ και $[\overline{Q}]$ για τα μονοστρωματικά σύνθετα υλικά.

[33]

7. Πρόγνωση αστοχίας (Failure Prediction) σε μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο

Θεωρούμε συνθήκες τάσης στο επίπεδο (plane stress conditions) για ένα γενικευμένο ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο, το οποίο είναι ενισχυμένο με μονοδιευθυντικές ίνες (UD Fibers) με γωνία ινών προσανατολισμού θ σε σχέση με τον άξονα x . Τέσσερις ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές χρειάζονται για τον προσδιορισμό των ελαστικών χαρακτηριστικών του μονοστρωματικού σύνθετου και αυτές είναι οι $E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}$. Οι ιδιότητες αντοχής (strength properties) του χαρακτηρίζονται από 5 ανεξάρτητες τιμές αντοχής:

S_{Lt} = Διαμήκης εφελκυστική δύναμη (Longitudinal tensile strength)

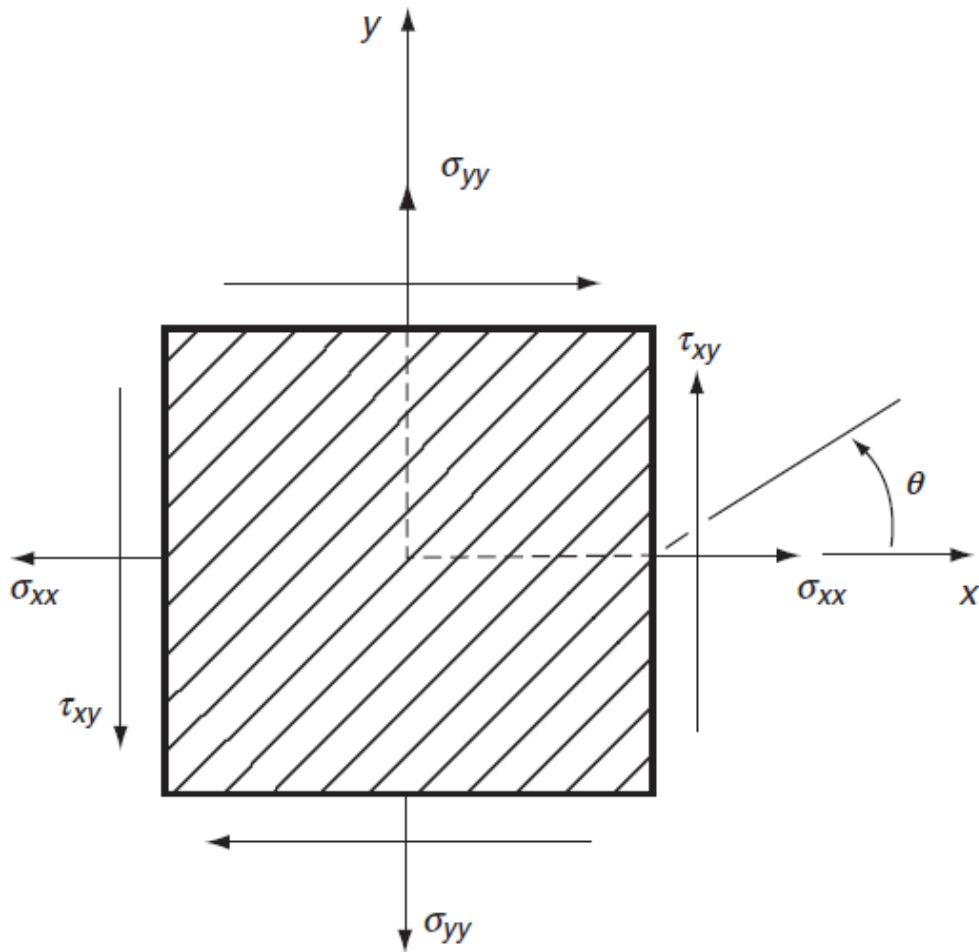
S_{Tt} = Εγκάρσια εφελκυστική δύναμη (Transverse tensile strength)

S_{Lc} = Διαμήκης θλιπτική δύναμη (Longitudinal compressive strength)

S_{Tc} = Εγκάρσια θλιπτική δύναμη (transverse compressive strength)

S_{LTs} = Διατμητική δύναμη στο επίπεδο (in-plane shear strength)

Να σημειωθεί ότι η διατμητική δύναμη στο επίπεδο S_{LTs} στις κύριες διευθύνσεις του υλικού, είναι ανεξάρτητη από την διεύθυνση της διατμητικής τάσης αν και τόσο οι διαμήκεις όσο και οι εγκάρσιες δυνάμεις ίσως παρουσιάσουν κάποια εξάρτηση από την διεύθυνση της ορθής τάσης είτε εκείνη είναι εφελκυστική είτε θλιπτική.



Εικόνα 51: Εφαρμογή τάσεων σε σύστημα δύο αξόνων σε ένα λεπτό ορθοτροπικό μονοστρωματικό υλικό.

Πολλές φαινομενολογικές θεωρίες έχουν προταθεί σχετικά με την πρόγνωση αστοχίας σε μονοδιευθυντικό μονοστρωματικό σύνθετο υλικό σε συνθήκες επιπέδου τάσης. Από αυτές οι πιο διαδεδομένες είναι εκείνες της μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης όπως και εκείνες των Tsai-Wu και Azzi-Tsai-Hill. Προκειμένου όμως να γίνει χρήση τους είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός στις κύριες διευθύνσεις του υλικού τόσο των εφαρμοζόμενων τάσεων όσο και των παραμορφώσεων. Οι μετασχηματισμένες τάσεις είναι οι σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} , ενώ οι τάσεις που εφαρμόζονται είναι οι σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} .

7.1.Θεωρία μέγιστης τάσης

Σύμφωνα με την θεωρία της μέγιστης τάσης, η αστοχία επέρχεται όταν κάθε τάση στις κύριες διευθύνσεις του υλικού είναι ίση ή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη δύναμη. Επομένως, προκειμένου να αποφευχθεί η περίπτωση αστοχίας, πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned}
-S_{Lc} &< \sigma_{11} < S_{Lt} \\
-S_{Tc} &< \sigma_{22} < S_{Tt} \\
-S_{LTs} &< \tau_{12} < S_{LTs} \quad (7.1)
\end{aligned}$$

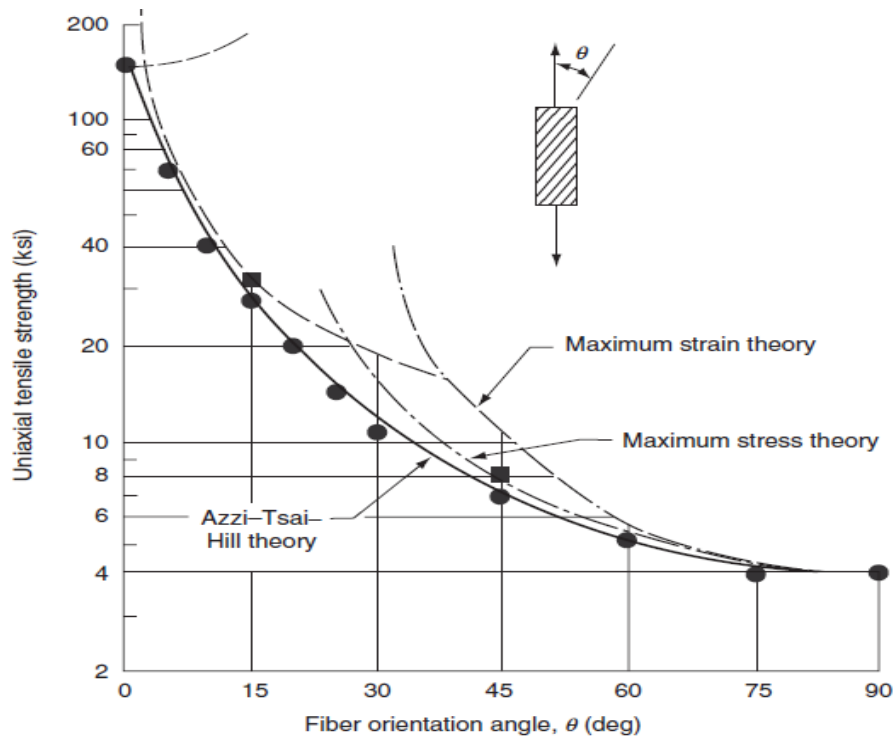
Στην απλή περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυστικού φορτίου στην κατεύθυνση x, μόνο η σ_{xx} είναι υπαρκτή, ενώ οι τάσεις σ_{yy}, τ_{xy} είναι μηδενικές. Οι μετασχηματισμένες τάσεις υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx}(\cos \theta)^2$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx}(\sin \theta)^2$$

$$\tau_{12} = -\sigma_{xx} \sin \theta \cos \theta$$

Συνεπώς, κάνοντας χρήση της θεωρίας μέγιστης τάσης, είναι εφικτό να γίνει πρόγνωση αστοχίας του υλικού εάν η τάση σ_{xx} υπερβαίνει την μικρότερη από τις τιμές των $\frac{S_{Lt}}{(\cos \theta)^2}, \frac{S_{Tt}}{(\sin \theta)^2}, \frac{S_{LTs}}{\sin \theta \cos \theta}$. Επομένως, η ασφαλής τιμή της τάσης σ_{xx} , εξαρτάται από την γωνία προσανατολισμού των ινών θ , όπως φαίνεται από το γράφημα της εικόνας που ακολουθεί. Για μικρές τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών θ , αναμένεται αστοχία κατά τον διαμήκη εφελκυσμό και το φορτίο που δέχεται η στρώση υπολογίζεται από την σχέση $\frac{S_{Lt}}{(\cos \theta)^2}$. Για υψηλές τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών θ , αναμένεται αστοχία κατά τον εγκάρσιο εφελκυσμό του μονοστρωματικού, και τότε το φορτίο υπολογίζεται από την σχέση $\frac{S_{Tt}}{(\sin \theta)^2}$. Για ενδιάμεσες τιμές της γωνίας θ , αναμένεται αστοχία στο επίπεδο διάτμησης και το φορτίο υπολογίζεται από την σχέση $\frac{S_{LTs}}{\sin \theta \cos \theta}$. Αλλαγή από αστοχία κατά τον διαμήκη εφελκυσμό σε αστοχία στο επίπεδο διάτμησης πραγματοποιείται όταν $\theta = \theta_1 = \left(\tan \frac{S_{LTs}}{S_{Lt}}\right)^{-1}$, ενώ αλλαγή από αστοχία στο επίπεδο διάτμησης σε αστοχία κατά τον εγκάρσιο εφελκυσμό συμβαίνει όταν ισχύει ότι $\theta = \theta_2 = \left(\tan \frac{S_{Tt}}{S_{LTs}}\right)^{-1}$.



Διάγραμμα 1: Σύγκριση θεωριών μέγιστης τάσης, μέγιστης παραμόρφωσης και Azzi-Tsai-Hill με δεδομένα μονοαξονικής εφελκυστικής δύναμης ενός σύνθετου υλικού εποξικής ρητίνης ενισχυμένο με υαλοϋφασμα.

7.2. Θεωρία μέγιστης παραμόρφωσης

Σύμφωνα με την θεωρία μέγιστης παραμόρφωσης, η αστοχία επέρχεται όταν κάθε παραμόρφωση στις κύριες διευθύνσεις του υλικού είναι ίση ή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση. Επομένως, προκειμένου να αποφευχθεί η περίπτωση αστοχίας, πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

$$-\epsilon_{Lc} < \epsilon_{11} < \epsilon_{Lt}$$

$$-\epsilon_{Tc} < \epsilon_{22} < \epsilon_{Tt}$$

$$-\gamma_{LTs} < \gamma_{12} < \gamma_{LTs} \quad (7.2)$$

Με αναφορά ξανά στην απλή περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυστικού φορτίου, στην οποία ασκείται μια τάση σ_{xx} σε ένα μονοστρωματικό σύνθετο, η ασφαλής τιμή της παραμόρφωσης υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο.

✚ Εάν γίνει χρήση των σχέσεων τάσης παραμόρφωσης, και των μετασχηματισμένων τάσεων, τότε οι παραμορφώσεις κατά τις κύριες διευθύνσεις του υλικού θα υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\varepsilon_{11} = S_{11}\sigma_{11} + S_{12}\sigma_{22} = (S_{11}(\cos \theta)^2 + S_{12}(\sin \theta)^2)\sigma_{xx}$$

$$\varepsilon_{22} = S_{12}\sigma_{11} + S_{22}\sigma_{22} = (S_{12}(\cos \theta)^2 + S_{22}(\sin \theta)^2)\sigma_{xx}$$

$$\gamma_{12} = S_{66}\tau_{22} = -S_{66} \cos \theta \sin \theta \sigma_{xx}$$

Όπου:

$$S_{11} = \frac{1}{E_{11}}$$

$$S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}}$$

$$S_{22} = \frac{1}{E_{22}}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

✚ Εάν γίνει χρήση της θεωρίας της μέγιστης παραμόρφωσης, είναι εφικτό να γίνει πρόγνωση της αστοχίας του μονοστρωματικού σύνθετου. Ειδικότερα, αυτό ελέγχεται εάν η τιμή της τάσης σ_{xx} υπερβαίνει την μικρότερη από τις ακόλουθες τιμές:

$$1. \frac{\varepsilon_{Lt}}{S_{11}(\cos \theta)^2 + S_{12}(\sin \theta)^2} = \frac{E_{11}\varepsilon_{Lt}}{(\cos \theta)^2 - \nu_{12}(\sin \theta)^2} = \frac{S_{Lt}}{(\cos \theta)^2 - \nu_{12}(\sin \theta)^2}$$

$$2. \frac{\varepsilon_{Tt}}{S_{12}(\cos \theta)^2 + S_{22}(\sin \theta)^2} = \frac{E_{22}\varepsilon_{Tt}}{(\sin \theta)^2 - \nu_{21}(\cos \theta)^2} = \frac{S_{Tt}}{(\sin \theta)^2 - \nu_{21}(\cos \theta)^2}$$

$$3. \frac{\gamma_{LTs}}{S_{66} \cos \theta \sin \theta} = \frac{G_{12}\gamma_{LTs}}{\cos \theta \sin \theta} = \frac{S_{LTs}}{\cos \theta \sin \theta}$$

Ασφαλής τιμή της τάσης σ_{xx} για διάφορες τιμές της γωνίας προσανατολισμού των ινών θ , φαίνεται επίσης από το διάγραμμα 1. Κάποιος εύκολα παρατηρεί πως εάν η γωνία προσανατολισμού των ινών θ προσεγγίζει την τιμή μηδέν τότε η θεωρία μέγιστης τάσης και μέγιστης παραμόρφωσης είναι παρόμοιες.

7.3.Θεωρία Azzi- Tsai- Hill

Βασιζόμενοι στο ανισοτροπικό κριτήριο διαρροής για μέταλλα του Hill, οι Azzi και Tsai πρότειναν ότι προκειμένου να επέλθει αστοχία σε ένα ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο είναι αναγκαίο να ικανοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\sigma_{11}^2}{S_{Lt}^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{S_{Lt}^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{S_{Tt}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{LTs}^2} = 1 \quad (7.3)$$

Όσον αφορά στην περίπτωση της μονοαξονικής εφελκυστικής τάσης για την οποία έγινε αναφορά παραπάνω, είναι δυνατό να γίνει πρόβλεψη αστοχίας εάν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_{xx} \geq \frac{1}{\left(\frac{\cos^4 \theta}{S_{Lt}^2} - \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{S_{Lt}^2} + \frac{\sin^4 \theta}{S_{Tt}^2} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{S_{LTs}^2} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Η παραπάνω εξίσωση φαίνεται και στο διάγραμμα 1 που παρατίθεται παραπάνω.

7.4.Θεωρία αστοχίας Tsai-Wu

Υπό συνθήκες τάσης στο επίπεδο, η θεωρία αστοχίας Tsai-Wu παρέχει την δυνατότητα πρόγνωσης της αστοχίας σε ένα ορθοτροπικό μονοστρωματικό σύνθετο εφόσον ικανοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_6\tau_{12} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} = 1 \quad (7.4)$$

Όπου F_1 και F_2 και ούτω ο καθεξής ονομάζονται συντελεστές αντοχής και δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$F_1 = \frac{1}{S_{Lt}} - \frac{1}{S_{Lc}}$$

$$F_2 = \frac{1}{S_{Tt}} - \frac{1}{S_{Tc}}$$

$$F_6 = 0$$

$$\mathbf{F}_{11} = \frac{1}{\mathbf{S}_{Lt}\mathbf{S}_{Lc}}$$

$$\mathbf{F}_{22} = \frac{1}{\mathbf{S}_{Tt}\mathbf{S}_{Tc}}$$

$$\mathbf{F}_{66} = \frac{1}{\mathbf{S}_{LTs}^2}$$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_{11}, \mathbf{F}_{22}$ μπορεί να γίνει χρήση των εφελκυστικών, διατμητικών, και θλιπτικών ιδιοτήτων των δυνάμεων στις κύριες διευθύνσεις του υλικού. Ο προσδιορισμός του συντελεστή \mathbf{F}_{12} απαιτεί τη χρήση ενός κατάλληλου διαζονικού τέστ. Ένα απλό παράδειγμα αποτελεί ένα τέστ διαζονικού εφελκυσμού στο οποίο την στιγμή της αστοχίας ισχύει ότι $\sigma_{11} = \sigma_{12} = \sigma$. Εάν γίνει χρήση της εξίσωσης (7.4), τότε μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$(\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2)\sigma + (\mathbf{F}_{11} + \mathbf{F}_{22} + 2\mathbf{F}_{12})\sigma^2 = 1$$

Οπότε εάν επιλύσουμε ως προς \mathbf{F}_{12} ισχύει ότι:

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{\mathbf{S}_{Lt}} - \frac{1}{\mathbf{S}_{Lc}} + \frac{1}{\mathbf{S}_{Tt}} - \frac{1}{\mathbf{S}_{Tc}} \right) \sigma - \left(\frac{1}{\mathbf{S}_{Lt}\mathbf{S}_{Lc}} + \frac{1}{\mathbf{S}_{Tt}\mathbf{S}_{Tc}} \right) \sigma^2 \right]$$

Επειδή όμως, δεν είναι εύκολο να διεξαχθούν αξιόπιστα διαζονικά τέστ ένα προσεγγιστικό εύρος τιμών για τον συντελεστή \mathbf{F}_{12} προτείνεται ακολούθως:

$$-\frac{1}{2}(\mathbf{F}_{11}\mathbf{F}_{22})^{\frac{1}{2}} \leq \mathbf{F}_{12} \leq 0 \quad (7.5)$$

[33]

II. Πειραματικό Μέρος

8.Πειραματική Διαδικασία

8.1.Υλικά για την παρασκευή των δοκιμών

8.1.1.Σύστημα εποξικής (εποξειδικής) ρητίνης

Για την παρασκευή όλων των απαραίτητων δοκιμών, κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας έγινε χρήση του συστήματος εποξικής ρητίνης ES 35A/B. Το συγκεκριμένο είδος ρητίνης ανήκει στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών και μάλιστα σε εκείνες των δύο συστατικών. Τα A και B αποτελούν τα συστατικά ανάμιξης του εποξικού συστήματος, με το A να αποτελεί την ρητίνη και το B τον σκληρυντή. Τα δύο αυτά συστατικά αναμιγνύονται με συγκεκριμένη αναλογία, η οποία είναι 2:1. Ειδικότερα, είναι απαραίτητη η ανάμιξη δύο μερών από το A και ενός μέρους από το B, πάντα κατά βάρος. Από την στιγμή που ολοκληρωθεί η ανάμιξη των δύο συστατικών διατίθενται 30 λεπτά προκειμένου να γίνει χρήση του έτοιμου μίγματος. Ο ίδιος χρόνος χρήσης συνίσταται και στην περίπτωση ανάμιξης γραφενικών νανοδομών (GNPs- Graphene Nanoplatelets). Όσον αφορά στον χρόνο πλήρους σκλήρυνσης του εποξικού συστήματος, αυτός ανέρχεται στις 24 ώρες από την στιγμή εφαρμογής της ρητίνης. Μετά το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος η ρητίνη θεωρείται πρακτικά ανενεργή και ακίνδυνη για τον χρήστη. Ακολουθεί εικόνα του εν λόγω συστήματος εποξικής ρητίνης.



Εικόνα 52: Σύστημα εποξικής ρητίνης ES35A/B

Εν συνεχεία παρατίθεται πίνακας σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εποξικής ρητίνης της οποίας έγινε χρήση κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.

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

Πίνακας 3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά συστήματος εποξικής ρητίνης ES 35A/B.

[34]

8.1.2.Νανοδομές Γραφενίου (GNPs-Graphene Nanoplatelets)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η επίδραση των νανοδομών γραφενίου στα μονοστρωματικά υλικά εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος. Επιλέχθηκε λοιπόν, να γίνει χρήση πιο συγκεκριμένα των Alfa Aesar™ Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micronparticles, S.A. 500m²/g

γραφενικών νανοδομών, οι οποίες βρίσκονται στην διάθεση του εργαστηρίου. Παρακάτω παρατίθεται σχετική εικόνα του εν λόγω δοχείου.



Εικόνα 53: Νανοδομές γραφενίου- Alfa Aesar™ Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micronparticles, S.A. 500m²/g

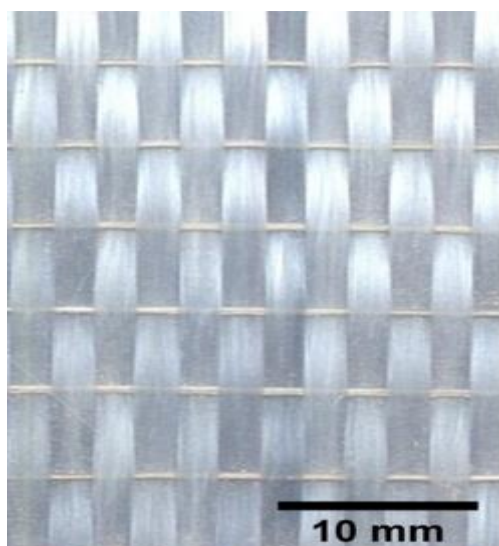
Οι νανοδομές γραφενίου των οποίων έγινε χρήση κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας για την παρασκευή των απαραίτητων δοκιμίων παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά. Πρόκειται για σωματίδια χρώματος μαύρου και επιφάνειας επαφής περί τα 500 m²/g. Το γεγονός ότι πρόκειται για σχετικά επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου σωματίδια, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας προτού γίνει χρήση τους. Ειδικότερα, ενδέχεται πιθανή επαφή τους με τον χρήστη να προκαλέσει σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα όπως και έντονο ερεθισμό στα μάτια. [35]

8.1.3.Υαλοϋφασμα

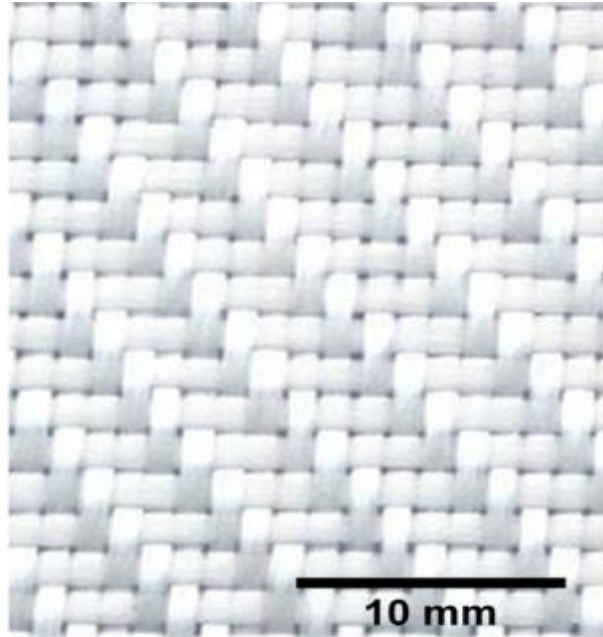
Η δημιουργία σύνθετων υλικών απαιτεί και την χρήση ενισχυτικών ινών πέρα από την ρητίνη, η οποία έχει τον ρόλο της πολυμερικής μήτρας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε επιλογή, ως μέσου ενίσχυσης, του υαλοϋφάσματος προκειμένου να αναλυθεί η επίδραση των γραφενικών νανοδομών στην αντοχή των προκυπτομένων μονοστρωματικών σύνθετων υλικών. Τα υαλοϋφάσματα επιλέχθηκαν με ορισμένα βασικά κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για τύπους ενίσχυσης ευρέως διαδεδομένους τα τελευταία χρόνια, αν λάβει κανείς υπόψη του ότι το κόστος τους είναι σχετικά προσιτό και συναντώνται σε ολοένα και περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές.

Δεδομένου ότι τα υαλοϋφάσματα παράγονται σε περισσότερους από έναν τύπους πλέξης, για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας έγινε επιλογή υαλοϋφασμάτων δύο τύπων πλέξης. Αυτές αφορούν στην πλέξη Twill 2x2 όπως και εκείνη των μονοδιευθυντικών πλέξεων (Unidirectional).

Παρακάτω παρατίθεται εικόνα των τύπων υαλοϋφασμάτων, των οποίων έγινε χρήση:



Εικόνα 54: Μορφή υαλοϋφάσματος ενίσχυσης μονοδιευθυντικής πλέξης (UD), του οποίου έγινε χρήση κατά την πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 55: Μορφή υαλοϋφάσματος ενίσχυσης πλέξης Twill 2x2, του οποίου έγινε χρήση κατά την πειραματική διαδικασία.

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα κατάλληλα πρότυπα, βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός δύο μεγεθών τα οποία προσδιορίζουν τα υαλοϋφάσματα των οποίων έγινε χρήση κατά την πειραματική διαδικασία ως υλικά ενίσχυσης. Ειδικότερα, υπολογίστηκε το βάρος του υφάσματος και η γραμμική πυκνότητα των ινών βάσει τύπων των προτύπων ASTM D3776-96 και ASTM D1577-01 αντίστοιχα.

ASTM D3776-96: Standard test method for mass per unit area (weight) of fabric

Το εν λόγω πρότυπο, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστεί το βάρος του υφάσματος. Ειδικότερα, με το πρότυπο δίνεται η δυνατότητα μέτρησης της μάζας υφασμάτων ανά μονάδα επιφάνειας (βάρος). Δεδομένης της ύπαρξης τεσσάρων διαφορετικών μεθοδολογιών, έγινε επιλογή εκείνης (B) που ήταν κατάλληλη για την μέτρηση πυκνότητας δειγμάτων (πλήρους πλάτους) πλεκτών υφασμάτων. Η μάζα του υφάσματος υπολογίζεται βάσει του τύπου που ακολουθεί:

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

Όπου G: βάρος του δοκιμίου [g]

L_s: μήκος του δοκιμίου [mm]

W: το πλάτος του δοκιμίου [mm]

[36]

ASTM D1577-01: Standard test methods for linear density of textile fabrics

Οι μέθοδοι του πρότυπου αυτού, αφορούν στην μέτρηση της μάζας ανά μονάδα μήκους νημάτων υφασμάτων και ινών. Έγινε επιλογή της μεθόδου (A), η οποία σχετίζεται με τον υπολογισμό της μέσης γραμμικής πυκνότητας ινών, μέσω της τομής και ζύγισης δοκιμίου. Πιο συγκεκριμένα, με τους τύπους που ακολουθούν, υπολογίζεται η μέση γραμμική πυκνότητα, σε μονάδες μέτρησης tex ή denier αντίστοιχα.

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

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

Όπου T: η μέση γραμμική πυκνότητας ίνας (dtex)

D: η μέση γραμμική πυκνότητα ίνας (denier)

W: το βάρος του νήματος (mg)

L: το μήκος του νήματος (mm)

N: ο αριθμός ινών μέσα στο νήμα

[37]

Στην συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των υαλοϋφασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία ως υλικά ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα:

Υαλοϋφασμα πλέξης Twill 2x2

Βάρος υφάσματος: 300 g/m²

Μέση γραμμική πυκνότητα ίνας: 1.9 dtex - 1.66 denier

Αριθμός ινών ανά νήμα: 1141 fibrils/yarns(1K)

Πάχος υφάσματος: 200 μm

Διάμετρος ινιδίου: 12 μm

Υαλοϋφασμα μονοδιευθυντικής πλέξης

Βάρος υφάσματος: 600 g/m^2

Μέση γραμμική πυκνότητα ίνας: 2.3 dtex - 2.03 denier

Αριθμός ινών ανά νήμα: 3230 fibrils/yarns(3K)

Πάχος υφάσματος: 250 μm

Διάμετρος ινιδίου: 9 μm

8.2.Παρασκευή μονοστρωματικών δοκιμίων

8.2.1.Λήψη μέτρων ασφαλείας

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην παρασκευή των μονοστρωματικών δοκιμίων, κρινόταν αναγκαίο, να τηρούνται σε πρώτη φάση όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας. Ειδικότερα, σε περίπτωση χρήσης είτε καθαρής ρητίνης είτε γραφενικών νανοδομών θεωρούταν αναγκαίο να γίνει χρήση ειδικών γαντιών, ειδικών προστατευτικών γυαλιών όπως επίσης και μάσκας, προκειμένου ο χρήστης να μην έρθει σε επαφή με οποιαδήποτε υλικό, να μην είναι εκτεθειμένος σε βλαβερές αναθυμιάσεις προερχόμενων από τις ρητίνες καθώς και να αποφευχθεί η παραμικρή πιθανότητα να εισπνεύσει σωματίδια γραφενικών νανοδομών κατά την διάρκεια χρήσης του. Σημαντική λοιπόν, ήταν και η λειτουργία του συστήματος εξαερισμού σε όλη τη διάρκεια παραμονής στο χώρο του εργαστηρίου.



Εικόνα 56: Ειδικά προστατευτικά γυαλιά.

Όσον αφορά στην μάσκα προστασίας, της οποίας έγινε χρήση κατά την διάρκεια επεξεργασίας της υγρής ρητίνης και των νανοδομών γραφενίου μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:

Πρόκειται για μάσκα μισού προσώπου για την προστασία του αναπνευστικού συστήματος του χρήστη με φίλτρα ΑΒΕΚ(2) και Ρ(3). Η επιλογή των συγκεκριμένων φίλτρων δεν ήταν τυχαία. Πιο συγκεκριμένα, ο κωδικός ΑΒΕΚ(2) αναφέρεται στην προστασία από τα ακόλουθα:

- Οργανικά αέρια και ατμούς (Α)
- Ανόργανα αέρια και ατμούς (Β)
- Διοξείδιο του θείου (Ε)
- Αμμωνία και οργανικά παράγωγα αμμωνίας (Κ)

Η ένδειξη 2 αναφέρεται στην ικανότητα απορρόφησης τοξικών ουσιών, με συγκέντρωση 0.5% κατ' όγκο (5000 ppm) στον αέρα (τιμή σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN14387). Στην περίπτωση μας η ικανότητα αυτή είναι μεσαία. Ο κωδικός Ρ αναφέρεται στην ικανότητα απορρόφησης στερεών μικροσωματιδίων με την ένδειξη 3, να αντιστοιχεί σε ικανότητα απορρόφησης σωματιδίων με συγκέντρωση 1,0 % κατ' όγκο (1000 ppm) στον αέρα. [38]



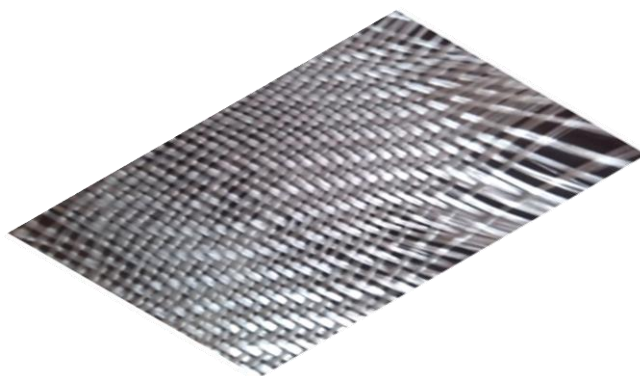
Εικόνα 57: Μάσκα μισού προσώπου με φίλτρα ΑΒΕΚ(2) και Ρ(3).

8.2.2. Προετοιμασία ξύλινων επιφανειών

Όλα τα δοκίμια τα οποία ήταν απαραίτητα για την πειραματικές δοκιμές δημιουργήθηκαν στο ειδικά διαμορφωμένο εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών. Έγινε χρήση τμημάτων καθαρών ξύλινων επιφανειών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, η κάθε ξύλινη επιφάνεια καθαριζόταν αρχικά και στην συνέχεια με την βοήθεια ειδικής σπάτουλας ξυνόταν σε όλη την επιφάνειά της. Στην συνέχεια, καθαριζόταν με την χρήση διαλυτικού (ασετόν) , ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη των οποιοδήποτε υπολειμμάτων. Τέλος, αφού η ξύλινη επιφάνεια δεχόταν μια στρώση αντικολλητικής ουσίας (κερί) , το οποίο παρεχόταν από το εργαστήριο, ήταν έτοιμη να δεχθεί το οποιοδήποτε δοκίμιο που θα παρασκευαζόταν πάνω στην επιφάνεια της.

8.2.3. Προετοιμασία υαλοϋφάσματος

Όσον αφορά στο υαλοϋφασμα, αρχικά γινόταν επιλογή των διαστάσεων που ήταν ιδανικές προκειμένου να γίνει παρασκευή των αναγκαίων σε αριθμό δοκιμίων. Τελικά, αποφασίστηκε πως τμήματα υαλοϋφάσματος διαστάσεων 250 x 200 [mm] ήταν επαρκή. Βέβαια, στην τελική επιλογή των διαστάσεων κρινόταν αναγκαίο να αναλογιστεί κανείς την πιθανότητα φθοράς του υφάσματος ενίσχυσης κατά την κοπή του. Πιο συγκεκριμένα, έπρεπε να υπάρχει περιθώριο για τυχόν φθορές στην πλέξη του εκάστοτε είδους υαλοϋφάσματος, η ύπαρξη των οποίων ενδέχεται να επηρέαζε την απόδοση του τελικού δοκιμίου κατά την δοκιμή του είτε σε εφελκυσμό είτε σε διάσχιση. Συνεπώς, χρειαζόταν αρκετή προσοχή κατά την κοπή του μονοστρωματικού σύνθετου, διασφαλίζοντας έτσι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα προέκυπταν με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας. Ακολουθεί εικόνα σχετικά με τις φθορές που υφίσταται η πλέξη του υφάσματος ενίσχυσης αμέσως μετά την κοπή του.



Εικόνα 58: Μορφή υφάσματος ενίσχυσης το οποίο έχει υποστεί φθορά στην πλέξη του λόγω κακής κοπής.

8.2.4. Προετοιμασία εποξικής ρητίνης

Κατά την προετοιμασία του μίγματος της εποξικής ρητίνης απαιτούταν ο χρήστης να είναι προσεχτικός, καθώς επίσης και να επιδιώκει ακρίβεια, σε σχέση με την ανάμιξη της. Επιπρόσθετα, ήταν αναγκαία η σχετική ταχύτητα των κινήσεων του, όσον αφορά στην επεξεργασία του μίγματος εποξικής ρητίνης, δεδομένου του μη απεριόριστου χρόνου επεξεργασιμότητάς (pot life) . Ειδικότερα, το πολύ μέχρι 30 λεπτά από την στιγμή που το μίγμα εποξικής ρητίνης και σκληρυντή ετοιμάστηκε, (μέχρι δηλαδή να αρχίσει ο πολυμερισμός της μονομερούς εποξικής ρητίνης) πραγματοποιήθηκε ο εμποτισμός σε κάθε περίπτωση. Το ίδιο φυσικά χρονικό διάστημα ίσχυε και στην περίπτωση, που ήταν αναγκαίος ο εμποτισμός με προσθήκη νανοδομών γραφενίου στο μίγμα.

Αναλυτικότερα, για τον πλήρη εμποτισμό κάθε τμήματος υφάσματος ενίσχυσης προσδιορίστηκε πως ένα μίγμα 20-25 gr ήταν αρκετό. Αρχικά, δεδομένου ότι πρόκειται για εποξικό σύστημα ρητίνης δύο συστατικών, αναλογίας κατά βάρος 2:1, με βάση τον κατασκευαστή, απαιτούνταν 2 μέρη του συστατικού Α και ένα μέρος του συστατικού Β. Συνεπώς, κάνοντας χρήση ζυγαριάς ακριβείας, υπολογίζονταν το απαραίτητο βάρος από κάθε συστατικό και τοποθετούταν σε γυάλινο δοχείο προκειμένου να γίνει πλήρης ανάδεδυσή του. Στην περίπτωση της προσθήκης νανοδομών γραφενίου, γινόταν ξανά χρήση ζυγαριάς ακριβείας προκειμένου να προστεθεί η απαραίτητη ποσότητά τους στο μίγμα καθαρής ρητίνης, ανάλογα με την κατά βάρος περιεκτικότητά, που ήταν επιθυμητή κάθε φορά, για την δημιουργία των τελικών δοκιμίων.

Προκειμένου να γίνει πιο σαφές, η ακριβής διαδικασία ανάδευσης ήταν η ακόλουθη. Αρχικά, πραγματοποιούταν ανάδευση της εποξικής ρητίνης (μονομερές) χωρίς την προσθήκη σκληρυντή και γραφενικών νανοδομών (GNPs). Το μίγμα εποξικής ρητίνης (μονομερές) αναδεύτηκε με την χρήση κατάλληλου εργαστηριακού αναδευτήρα χειρός για 25 λεπτά σε ταχύτητα 400 rpm, πριν την προσθήκη του σκληρυντή. Στην συνέχεια, με ταυτόχρονη ανάδευση γινόταν προσθήκη του σκληρυντή, σε αναλογία που υποδείκνυε ο κατασκευαστής (2:1 κ.β.). Στην περίπτωση, βέβαια, παρασκευής σύνθετων μονοστρωματικών υλικών με προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) , ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν ορισμένα ακόμα βήματα. Πιο συγκεκριμένα, προτού γίνει χρήση των GNPs, πραγματοποιήθηκε μηχανική ανάδευση τους για 2 ώρες σε ταχύτητα 2000 rpm. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να διαλυθούν τα συσσωματώματα GNPs χωρίς να μεταβληθεί η μορφολογία τους. Όταν έτοιμο λοιπόν το γραφένιο, γινόταν δυνατή η προσθήκη του στο μίγμα εποξικής ρητίνης, ενώ παράλληλα γινόταν συνεχής ανάδευση του. Από την στιγμή ενσωμάτωσης των GNPs, η ανάδευση συνεχιζόταν για 45 λεπτά σε ταχύτητα 400 rpm.



Εικόνα 59: Εργαστηριακός αναδευτήρας με μύτη ανάδευσης.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί πως η επιλογή του γυάλινου δοχείου ήταν πολύ βασική. Αφενός για να ζυγιστούν η εποξική ρητίνη και τα σωματίδια νανοδομών γραφενίου και αφετέρου να πραγματοποιηθεί η ανάδευση του μίγματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι σε περίπτωση χρήσης πλαστικού δοχείου για τον υπολογισμό της ποσότητας του γραφενίου που απαιτείται, υπάρχει πιθανότητα προσκόλλησης μέρους των γραφενικών σωματιδίων στα τοιχώματα του πλαστικού κυπέλλου με αποτέλεσμα την αστοχία στην ακρίβεια. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση

χρήσης πλαστικού κυπέλλου τα υπολείμματα του μίγματος στα τοιχώματα του με το πέρασμα του εμποτισμού θα προκαλούσαν πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας και επομένως το κύπελλο θα ήταν ευάλωτο σε αλλοιώσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι δημιουργείται μια ενδόθερμη αντίδραση μεταξύ των δύο συστατικών της εποξικής ρητίνης, με αποτέλεσμα την πρόκληση υψηλών θερμοκρασιών με το πέρασμα του χρόνου μέχρι την τελική σκλήρυνση.

Τέλος, έγινε αντιληπτό πως με την αύξηση της κατά βάρος περιεκτικότητας των γραφενικών νανοδομών στο μίγμα εποξικής ρητίνης παρατηρούταν όλο και περισσότερη αύξηση του ιξώδους της ρητίνης. Το ίδιο βέβαια, έγινε κατανοητό και κατά τον εμποτισμό των μονοστρωματικών τμημάτων του υφάσματος ενίσχυσης. Ειδικότερα, το ιξώδες του μίγματος παρουσίαζε διαφοροποίηση ανάλογα με το είδος της πλέξης του υφάσματος ενίσχυσης, του οποίου γινόταν χρήση.

8.2.5.Εμποτισμός υφασμάτων ενίσχυσης

Εφόσον το μίγμα της εποξικής ρητίνης έχει ετοιμαστεί όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι εφικτό να ξεκινήσει η διαδικασία εμποτισμού των υφασμάτων ενίσχυσης. Προκειμένου να προχωρήσει η διαδικασία ήταν αναγκαία η χρήση πινέλου όπως και ενός ειδικού ρολού. Ειδικότερα, μετά την τοποθέτηση στις ξύλινες επιφάνειες των τμημάτων υαλοϋφάσματος, κάνοντας χρήση πινέλου ξεκινούσε η διαδικασία εναπόθεσης υλικού εποξικής ρητίνης ώστε ολόκληρη η επιφάνεια του υφάσματος ενίσχυσης να καλυφθεί πλήρως. Στην συνέχεια, κάνοντας χρήση του ρολού ήταν δυνατός ο σωστός εμποτισμός. Πιο συγκεκριμένα, ασκώντας την κατάλληλη πίεση σε όλη την επιφάνεια εναπόθεσης της ρητίνης μέσω του ρολού επέλειψης μπορούσε κανείς να πετύχει τα εξής:

- Αποφυγή περίσσειας ρητίνης, που μπορούσε να οδηγήσει στην δημιουργία μη ιδανικών τελικών δοκιμίων.
- Πρόσδοση κατευθυντικότητας στις νανοδομές του γραφενίου που βρίσκονται διάσπαρτες στην μήτρα του υλικού.
- Ομοιόμορφη κατανομή του υλικού σε όλη την επιφάνεια του υφάσματος ενίσχυσης, αλλά κυρίως και από τις δύο πλευρές του. Ήταν σημαντικό η κάτω επιφάνεια του τελικού δοκιμίου να έχει εμποτιστεί πλήρως.

- Και τέλος, η αποφυγή ύπαρξης φυσαλίδων αέρα, οι οποίες έχουν εγκλωβιστεί τόσο κατά την προετοιμασία του μίγματος εποξικής ρητίνης-σκληρυντή- GNPS όσο και κατά τον εμποτισμό του υφάσματος ενίσχυσης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση του ρολού επάλειψης δεν γινόταν με τυχαίο τρόπο. Αντιθέτως, αναλόγως την γωνία προσανατολισμού των ινών ενίσχυσης του υαλοϋφάσματος όπως και τον τύπο πλέξης του, ο χρήστης εφαρμόζε πίεση μέσω του ρολού σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ο εμποτισμός να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα.

Από την στιγμή που ολοκληρώνόταν η διαδικασία εμποτισμού, τα μονοστρωματικά σύνθετα υλικά έπρεπε να αφεθούν όπως έχουν τουλάχιστον για 24 ώρες. Στο διάστημα αυτό κανείς δεν ήταν σε θέση να τα υποβάλλει σε οποιαδήποτε επεξεργασία. Με το πέρας των 24 ωρών, τα υλικά θα έχουν υποστεί πλήρη ξήρανση και μόνο τότε ο χρήστης θα είναι σε θέση να τα αξιοποιήσει χωρίς να τίθεται θέμα για την υγεία του, αφού η ρητίνη πλέον θα είναι ανενεργή.



Εικόνα 60: Μονοστρωματικά σύνθετα υλικά υαλοϋφάσματος, εμποτισμένα με μίγμα εποξικής ρητίνης και προσθηκών γραφενικών νανοδομών, τοποθετημένα σε ξύλινη επιφάνεια.

8.2.5.1. Ποιότητα εμποτισμού

Ίσως από τα πιο σημαντικά σημεία της διαδικασίας για την παρασκευή των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών, αποτελεί το σημείο στο οποίο ο χρήστης καλείται να ολοκληρώσει τον εμποτισμό. Πραγματικά, είναι αρκετά δύσκολη

διαδικασία, αν αναλογιστεί κανείς την πίεση χρόνου που ασκείται καθώς ο χρόνος επεξεργασιμότητας του μίγματος για τον εμποτισμό είναι περιορισμένος. Επιπρόσθετα, απαιτείται και κάποια εμπειρία προκειμένου να είναι σε θέση κάποιος να κρίνει το αν έχει πετύχει ένα σωστό εμποτισμό καθώς ενδέχεται να υπάρξει μια αρκετά καλή επιφάνεια εμποτισμού αλλά πιθανά το τελικό ποσοστό του να μην είναι ιδανικό, θέτοντας το τελικό δοκίμιο άχρηστο.

8.2.6.Οπτικός έλεγχος

Από την στιγμή που η ρητίνη είναι ανενεργή είναι σε θέση ο χρήστης να μπορέσει να αξιοποιήσει το οποιοδήποτε δοκίμιο είναι έτοιμο. Βέβαια, για να γίνει αυτό όπως προαναφέρθηκε θα πρέπει να έχει παρέλθει το λιγότερο ένα χρονικό διάστημα περίπου ενός εικοσιτετραώρου. Με την χρήση μιας σπάτουλας είναι δυνατό να αποκολληθεί το μονοστρωματικό υλικό από την ξύλινη επιφάνεια. Αυτό όμως θα ήταν αρκετά δύσκολο εάν προηγουμένως δεν είχε περαστεί ειδική αντικολλητική ουσία (κερί) πάνω στην ξύλινη επιφάνεια.

Ο οπτικός έλεγχος λοιπόν, είναι δυνατό να ξεκινήσει. Σε πρώτη φάση, μπορεί να ελεγχθεί η πίσω όψη του μονοστρωματικού υλικού. Ειδικότερα, είναι αναγκαίο να έχει εμποτιστεί πλήρως χωρίς να υπάρχουν κενά, παρουσιάζοντας μια λεία και ομαλή επιφάνεια. Σε περίπτωση που παρουσιάζονται μη ομαλά σημεία στην επιφάνεια μπορεί κανείς να συμπεράνει πως ο εμποτισμός δεν ήταν ιδανικός, με αποτέλεσμα την δημιουργία τελικά μη αποδεκτών δοκιμίων για περαιτέρω επεξεργασία όσον αφορά στις δοκιμές εφελκυσμού και διασχίσεων.



Εικόνα 61: Περιοχή ποιοτικά καλού εμποτισμού (βέλος) - Περιοχές μη ποιοτικά σωστού εμποτισμού (κύκλοι).

Όσον αφορά στην επάνω όψη του πάνελ, ο οπτικός έλεγχος μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, δείγματα πιθανού κακού εμποτισμού αποτελεί η όψη της επιφάνειας του μονοστρωματικού υλικού. Προκειμένου να γίνει πιο σαφές, σε περίπτωση που παρατηρείται αρκετή γυαλάδα και ανομοιομορφία όσον αφορά στην χρωματική όψη της επιφάνειας, αυτό σημαίνει πως υπάρχουν περίσσεια ρητίνης στο υλικό κατά τον εμποτισμό γεγονός που δεν είναι επιθυμητό. Το ιδανικό θα ήταν, να φαίνεται αρκετά καθαρά το ανάγλυφο της επιφάνειας του μονοστρωματικού υλικού, με το είδος των πλέξεων να διαγράφεται απόλυτα επάνω στην επιφάνεια.

Τέλος, είναι απαραίτητο κατά την διαδικασία του οπτικού ελέγχου να γίνεται προσπάθεια ανεύρεσης πιθανών φθορών στο υλικό, οι οποίες ενδέχεται να έχουν προκληθεί είτε κατά την κοπή του υαλοϋφάσματος είτε από την χρήση του ρολού. Πιο συγκεκριμένα, ενδέχεται λόγω υπερβολικής άσκησης πίεσης στο ρολό, να έχουν προκληθεί φθορές όσον αφορά στην πλέξη του υλικού. Στρέβλωση της αρχικής πλέξης δηλαδή δεν είναι επιθυμητή. Σε σχέση με την κοπή του υαλοϋφάσματος, πιθανά σημεία απόπλεξης είτε πλήρους καταστροφής του υλικού ενίσχυσης δεν είναι αποδεκτά και θέτουν τα σημεία αυτά της επιφάνειας του μονοστρωματικού υλικού εκτός περαιτέρω επεξεργασίας.

Με την ολοκλήρωση του οπτικού ελέγχου είναι δυνατή η συνέχιση της διαδικασίας τελικής παρασκευής των δοκιμίων. Πραγματοποιείται σχεδιασμός επάνω στο μονοστρωματικό υλικό των επί μέρους δοκιμίων με τις κατάλληλες διαστάσεις, τις οποίες απαιτούν τα πρότυπα τα οποία έχουν επιλεγεί για την κάθε δοκιμή στην

οποία επρόκειτο να υποβληθούν και οδηγούνται για κοπή. Ακολουθεί σχετική εικόνα δοκιμίων έτοιμων για κοπή.



Εικόνα 62: Σχεδιασμός επιφάνειας μονοστρωματικού σύνθετου υλικού για την τελική κοπή δοκιμίων στις κατάλληλες διαστάσεις.

8.2.7. Ποιοτικός Έλεγχος

8.2.7.1. Υπολογισμός πρότυπου βάρους

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρασκευής των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών και του σχεδιασμού τους για την τελική κοπή των επιθυμητών δοκιμίων, είναι εφικτή η περαιτέρω επεξεργασία τους. Ειδικότερα, για το κάθε δοκίμιο με την χρήση ζυγαριάς ακριβείας, υπολογίζεται το συνολικό του βάρος. Προηγουμένως όμως έχουν κοπεί κομμάτια υαλοϋφάσματος από κάθε τύπο πλέξης, στις ανάλογες διαστάσεις που απαιτεί το κάθε πρότυπο της εκάστοτε δοκιμής και υπολογίζονται τα πρότυπα βάρη. Βέβαια, τα πρότυπα βάρη αναφέρονται στο βάρος μονάχα του υλικού ενίσχυσης χωρίς να συνυπολογίζεται και το βάρος του υλικού της μήτρας. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο βάρος για τα τμήματα υαλοϋφάσματος τύπου πλέξης Twill 2x2 υπολογίστηκε στα 4.1 gr, ενώ τα τμήματα υαλοϋφάσματος

μονοδιευθυντικής πλέξης υπολογίστηκαν στα 5,8 gr. Όσον αφορά στο πρότυπο βάρος των τμημάτων υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης για την δημιουργία δοκιμίων, που θα υποστούν δοκιμή διάσχισης, αυτό υπολογίστηκε στα 4,7 gr.

8.2.7.2.Υπολογισμός βάρους-ποσοστού εμποτισμού ρητίνης

Εφόσον, λοιπόν υπολογίστηκε το πρότυπο βάρος της ενίσχυσης των μονοστρωματικών υλικών, ήταν δυνατός και ο υπολογισμός του βάρους του υλικού της μήτρας (εποξικής ρητίνης) . Με την αφαίρεση λοιπόν του πρότυπου βάρους από το συνολικό βάρος του εκάστοτε δοκιμίου υπολογίζεται με ακρίβεια η ποσότητα της ρητίνης που έχει απορροφηθεί κατά την διαδικασία του εμποτισμού. Βέβαια, είναι απαραίτητο το βάρος του υλικού της μήτρας να είναι ικανοποιητικό προκειμένου το τελικό δοκίμιο να μην κριθεί ακατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία όσον αφορά στις δοκιμές στις οποίες θα υποβληθεί. Σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού είναι αρκετά εύκολο να υπολογιστεί, αφού έχουν υπολογιστεί όλα τα παραπάνω μεγέθη μέσω μιας αριθμητικής πράξης. Ειδικότερα η πράξη που πραγματοποιείται είναι η ακόλουθη:

$$(\text{Ποσοστό εμποτισμού}) = \frac{[(\text{συνολικό βάρος}) - (\text{πρότυπο βάρος})]}{(\text{συνολικό βάρος})} * 100$$

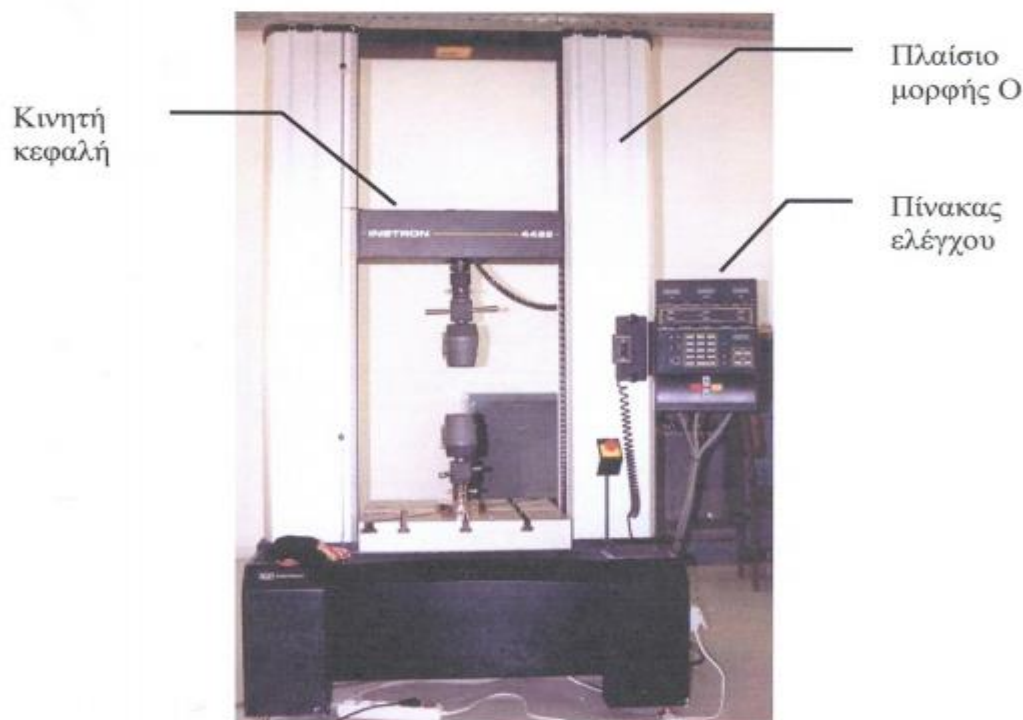
Επομένως, λόγω της πιθανότητας κακού εμποτισμού όπως παραπάνω αναφέρθηκε, παρασκευάζονται αρκετά σε αριθμό δοκίμια, ώστε να προκύψουν τα επαρκή σε αριθμό δοκίμια που πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές και κρίνονται κατάλληλα για τις δοκιμές στην μηχανική πρέσα δίνοντας τελικά μετρήσεις που διασφαλίζουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

9.Πειραματικές δοκιμές

9.1.Πρέσα Instron 4482

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διεξαγωγή τόσο των πειραματικών δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό όσο και των δοκιμών αντοχής σε διάσχιση έγινε χρήση μηχανικής πρέσας Instron 4482. Πρόκειται για πρέσα μηχανισμού κοχλία-περικόχλιου ονομαστικού φορτίου 10KNt.

Ακολουθεί φωτογραφία της εν λόγω διάταξης:



Εικόνα 63:Μηχανική πρέσα Instron 4482.

Τα βασικά μέρη τα οποία απαρτίζουν την πρέσα Instron 4482 είναι τα εξής:

- ✚ Ο μηχανισμός κινητής κεφαλής.
- ✚ Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρότυπο IEEE, συνδεδεμένη με παράλληλη θύρα με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την λήψη και καταγραφή των δεδομένων.
- ✚ Το πλαίσιο, το οποίο είναι μορφής O και περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης και τον μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσας Instron 4482 είναι τα ακόλουθα:

- ✚ Ονομαστική ισχύ : 10KNt
- ✚ Ταχύτητα επιστροφής της κεφαλής: 600mm/min
- ✚ Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής:500mm/min
- ✚ Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο:250mm/min
- ✚ Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα:7,5KNt

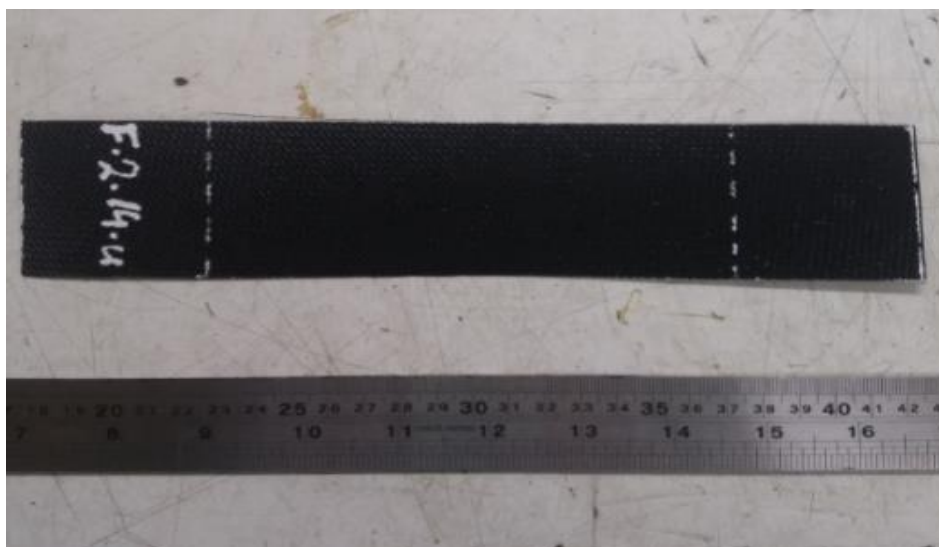
Να σημειωθεί στο σημείο αυτό, πως κατά την διεξαγωγή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε λήψη των απαραίτητων φωτογραφιών τους όπως και βιντεοσκόπηση τους. [39]

9.2.Δοκιμές εφελκυσμού



Εικόνα 64: Προσθευτικές απόψεις δοκιμής εφελκυσμού σε μονοστρωματικό δοκίμιο εποξικής ρητίνης με προσθήκη νανοδομών γραφενίου και ενίσχυση υαλοϋφάσματος.

9.2.1.Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης (UD)



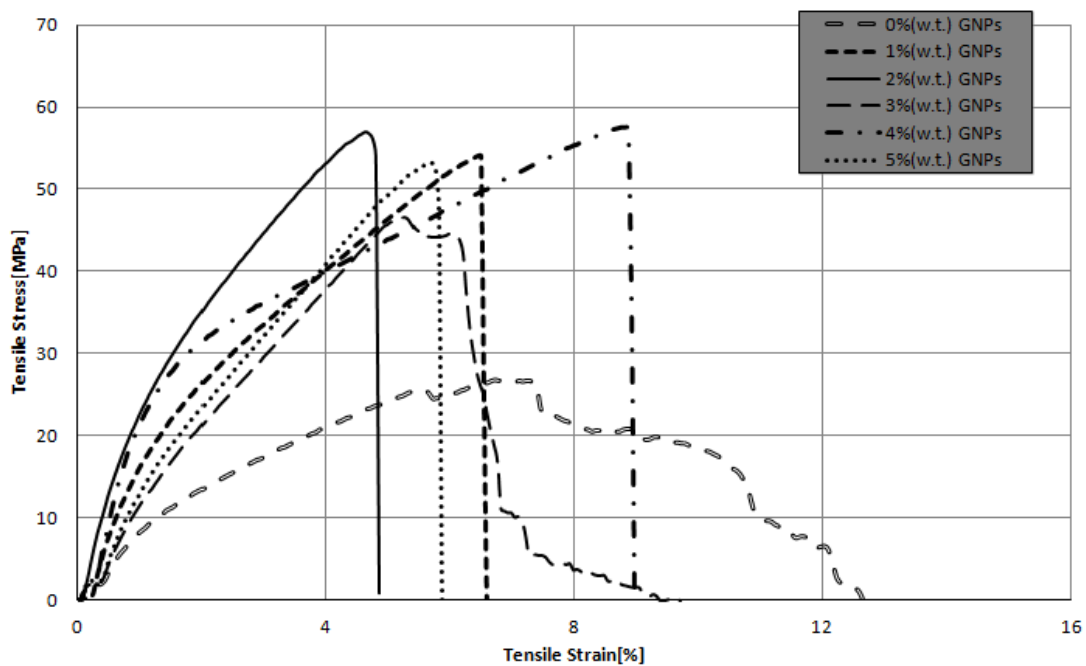
Εικόνα 65: Αρχική μορφή μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος, μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs

Για την δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό αυτής της κατηγορίας δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τόσο καθαρής ρητίνης όσο και δοκίμια στα οποία έγινε προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) σε περιεκτικότητα κατά βάρος 1%, 2%, 3%, 4% και 5% (w.t. GNPs). Αφού τα δοκίμια, βάσει του διεθνούς προτύπου ASTM D3039/D3039M-00, κόπηκαν σε διαστάσεις $250 \times 50 \times 0.36$ [mm], πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές στην μηχανική πρέσα Instron 4482 του εργαστηρίου και με την βοήθεια συνδεδεμένου ηλεκτρονικού υπολογιστή πραγματοποιήθηκε η αυτόματη καταγραφή των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να είναι αμελητέα η σχετική ολίσθηση του υλικού μέσα στις αρπάγες (δαγκάνες), επιλέχθηκε το μήκος 250 mm, όπως ορίζεται από το πρότυπο. Η περιοχή συγκράτησης στις δαγκάνες της μηχανικής πρέσας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 65, επιλέχθηκε να είναι στα 50 mm, ενώ η περιοχή ελέγχου ήταν στα 150mm. Σε σχέση με την ταχύτητα πραγματοποίησης των δοκιμών, βάσει του προτύπου, ορίστηκε στα 2 mm/min (0.05 in/min). [40] Αφού εκτελέστηκε επαρκής αριθμός δοκιμών από κάθε τύπο δοκιμίου διαφορετικής περιεκτικότητας σε νανοδομές γραφενίου (GNPs), λόγω πολύ καλής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστεί παρακάτω ένα αντιπροσωπευτικό δοκίμιο από κάθε κατηγορία. Στον πίνακα που παρατίθεται παρακάτω φαίνονται τα πλήρη στοιχεία του ποσοστού εμποτισμού των δοκιμίων που τελικά επιλέχθηκαν.

Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης	
%w.t. GNPs	Ποσοστό εμποτισμού[%]
0%	42-45
1%	42-45
2%	42-45
3%	42-45
4%	42-45
5%	42-45

Πίνακας 4: Πίνακας δεδομένων μονοστρωματικών δοκιμών ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, για πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού.

Στο παρακάτω διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κάθε δοκιμίου σε εφελκυσμό.



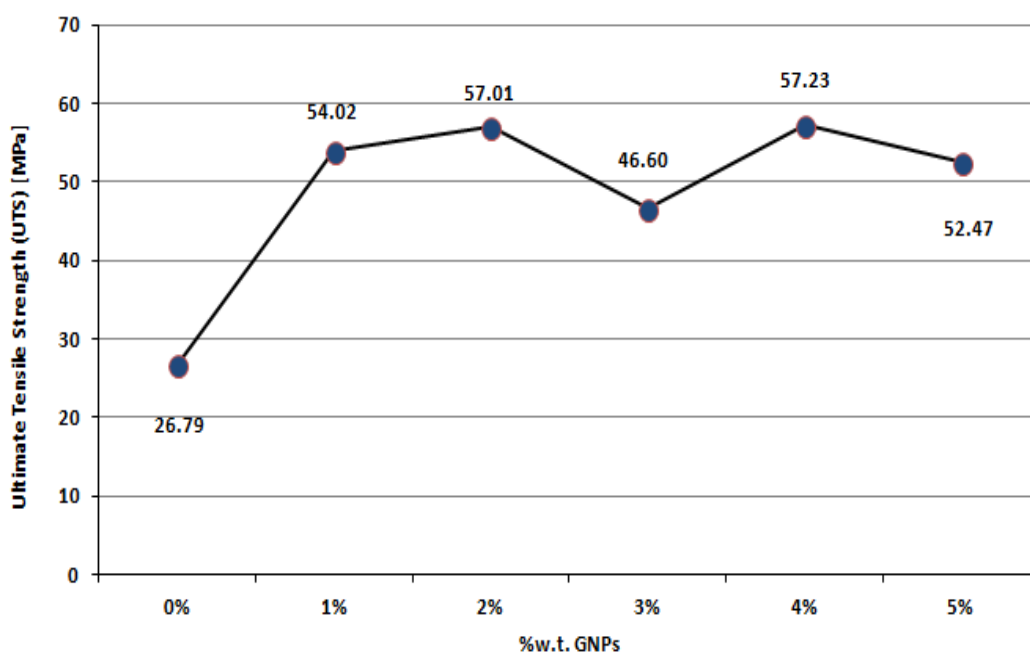
Διάγραμμα 2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, προσθήκης σε %w.t. GNPs από 0% έως 5%.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται μια προσπάθεια να προκύψουν ορισμένα βασικά συμπεράσματα σε σχέση με το πώς η προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) επηρεάζει την απόδοση των δοκιμών σε δοκιμές εφελκυσμού. Γίνεται σύγκριση λοιπόν με το δοκίμιο το οποίο δεν έχει δεχθεί προσθήκη γραφενικών νανοδομών και προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα και παρατηρήσεις:

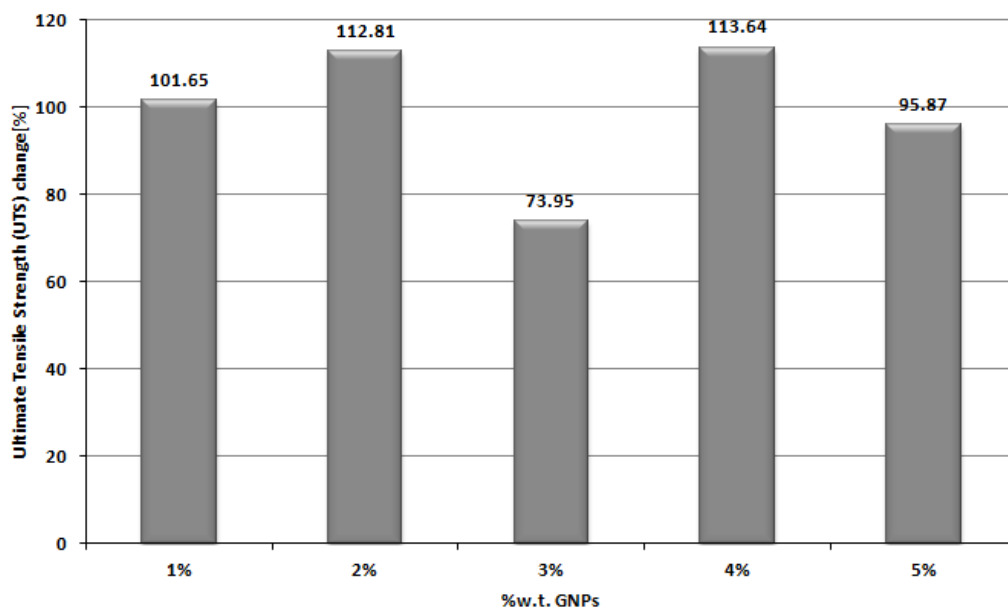
- ✚ Το δοκίμιο άνευ γραφενικών νανοπροσθηκών αστοχεί στα 26,79 MPa, με την παραμόρφωση θραύσης να βρίσκεται στο 7.42%.
- ✚ Σε όλες τις περιπτώσεις γραφενικών νανοπροσθηκών στην μήτρα του υλικού, από 1%-5% (w.t.) GNPs παρατηρείται σημαντική αύξηση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength-UTS) , το ίδιο όμως δεν παρατηρείται και με την παραμόρφωση θραύσης η οποία σημειώνει μείωση. Εξαιρείται το δοκίμιο περιεκτικότητας 4% (w.t.) GNPs, στο οποίο σημειώνεται σημαντική αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης, της τάξης του 18,65%.
- ✚ Η υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό παρατηρείται στην περιεκτικότητα 4% w.t. GNPs όπου και αγγίζει τα 57.23 MPa, σημειώνοντας ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 113,64% σε σχέση πάντα με το δοκίμιο χωρίς προσθήκες γραφενικών νανοδομών. Το ίδιο ισχύει και για την παραμόρφωση θραύσης η οποία υπολογίστηκε στο 8,86%.
- ✚ Πολύ καλή βέβαια αντοχή σε εφελκυσμό επέδειξε και η περιεκτικότητα 2% w.t. GNPs η οποία ανήλθε στα 57,01 MPa, πολύ κοντά με εκείνη της περιεκτικότητας των 4% w.t. GNPs, σημειώνοντας ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 112,81%. Διαφοροποιημένη συμπεριφορά παρατηρήθηκε όσον αφορά στην παραμόρφωση θραύσης της περιεκτικότητας 2%, η οποία υπολογίστηκε στο 4,81%, σημειώνοντας σημαντική πτώση.
- ✚ Η χαμηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό παρατηρήθηκε στην περιεκτικότητα 3% w.t. GNPs, αγγίζοντας την τιμή των 46.60 MPa, με την παραμόρφωση θραύσης να βρίσκεται στο 5,51%.

Συμπεραίνουμε λοιπόν με βάση όλα τα παραπάνω πως η προσθήκη νανοδομών γραφενίου σε σύνθετα μονοστρωματικά υλικά ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης οδηγεί αφενός σε σημαντική ενίσχυση της αντοχής σε εφελκυσμό, ιδίως στις περιεκτικότητες 2% w.t. και 4% w.t..

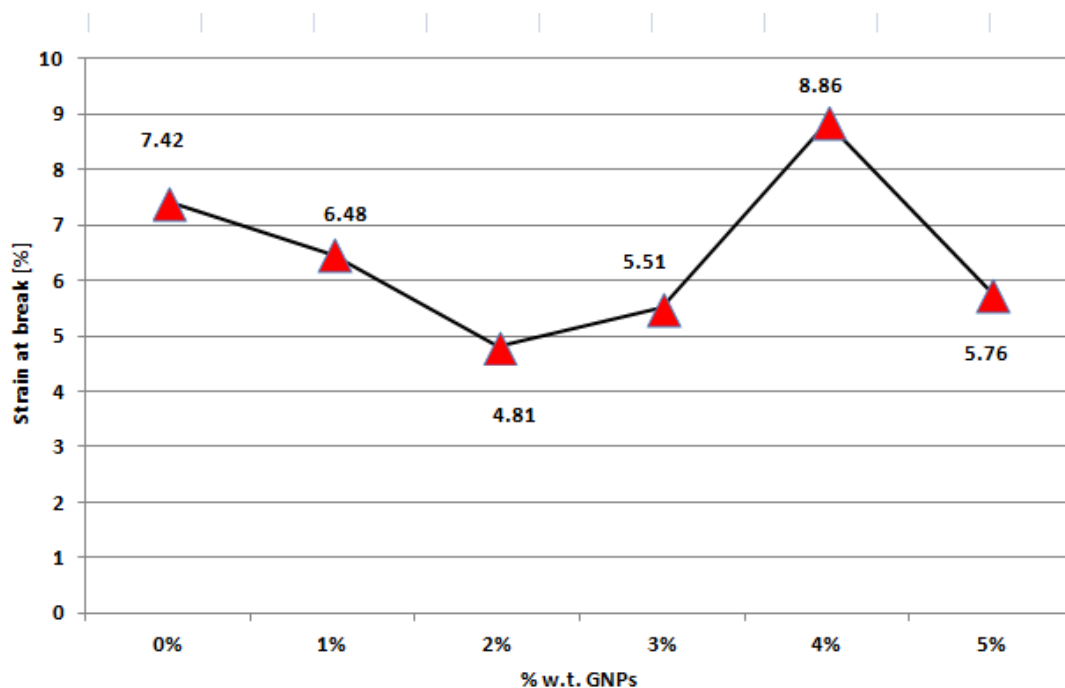
Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις και συμπεράσματα είναι δυνατόν να γίνουν περισσότερο κατανοητά από τα γραφήματα που ακολουθούν.



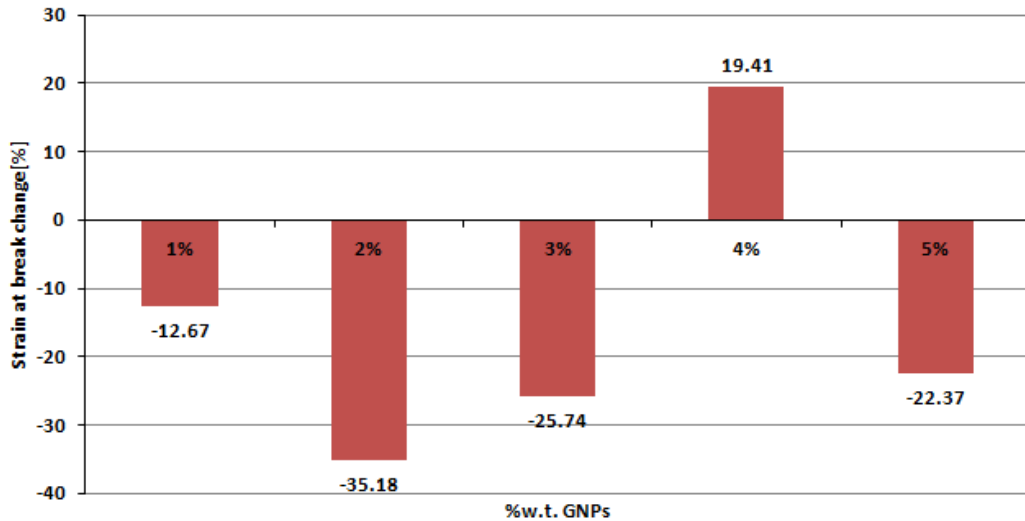
Διάγραμμα 3: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με την %w.t. GNPs (0%w.t. έως 5%w.t.).



Διάγραμμα 4: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μεταβολής μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t. -5%w.t.).

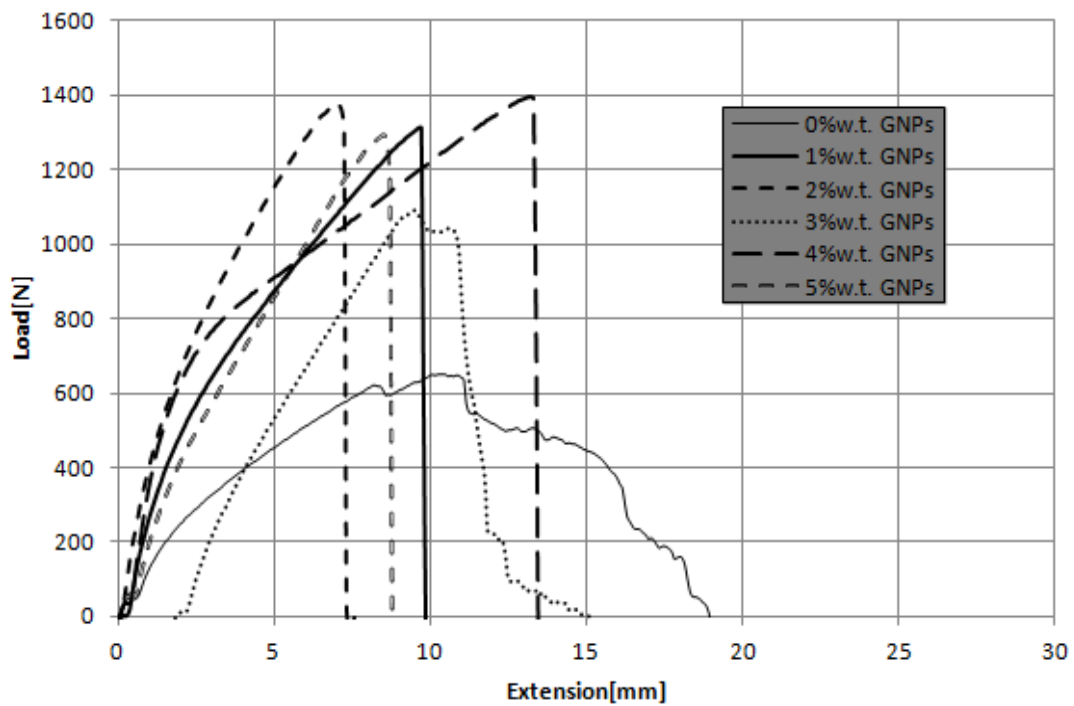


Διάγραμμα 5: Συγκριτικό γράφημα τιμών παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t.-5%w.t.).



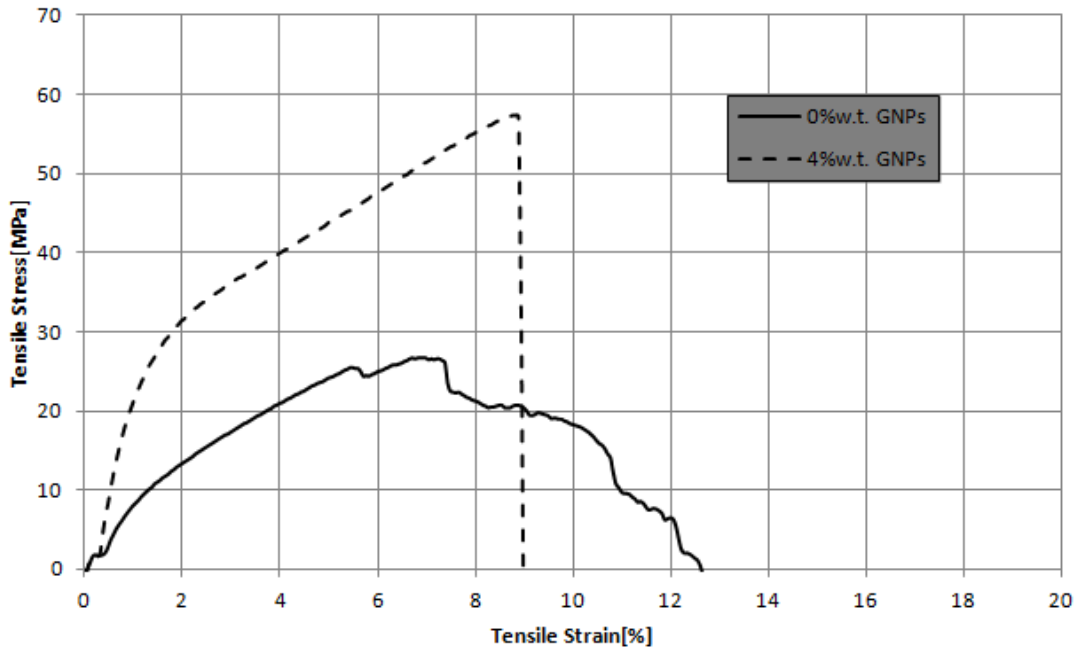
Διάγραμμα 6: Συγκριτικό γράφημα τιμών ποσοστιαίας μεταβολής παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης με βάση την %w.t. GNPs (0%w.t.-5%w.t.).

Στο παρακάτω διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης παρουσιάζεται η συμπεριφορά του κάθε δοκιμίου σε εφελκυσμό.

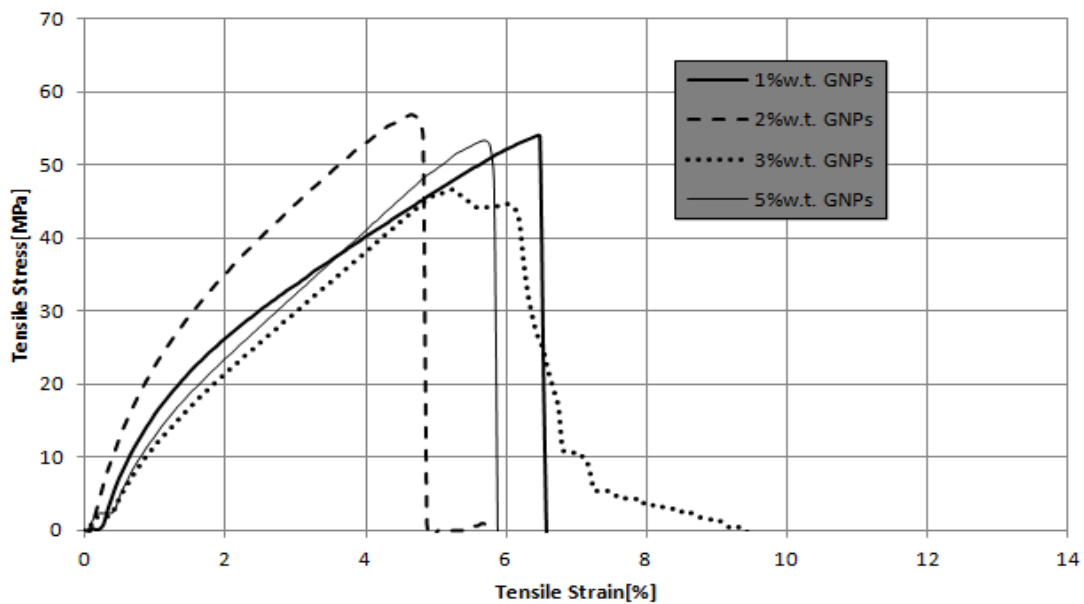


Διάγραμμα 7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/ υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, προσθήκης σε %w.t. GNPs από 0% έως 5%.

Στην συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού τους.

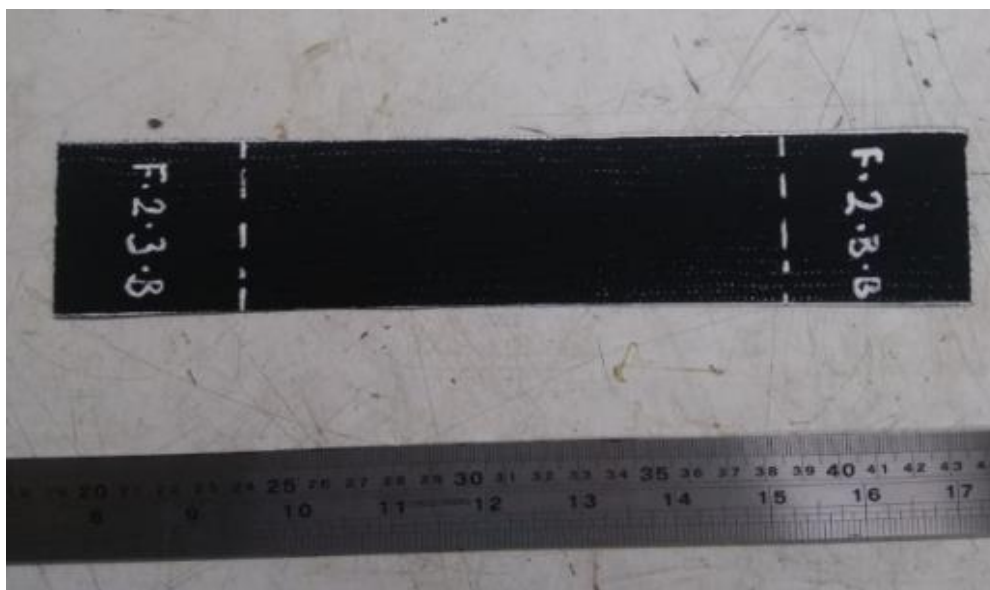


Διάγραμμα 8: : Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.



Διάγραμμα 9: : Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού.

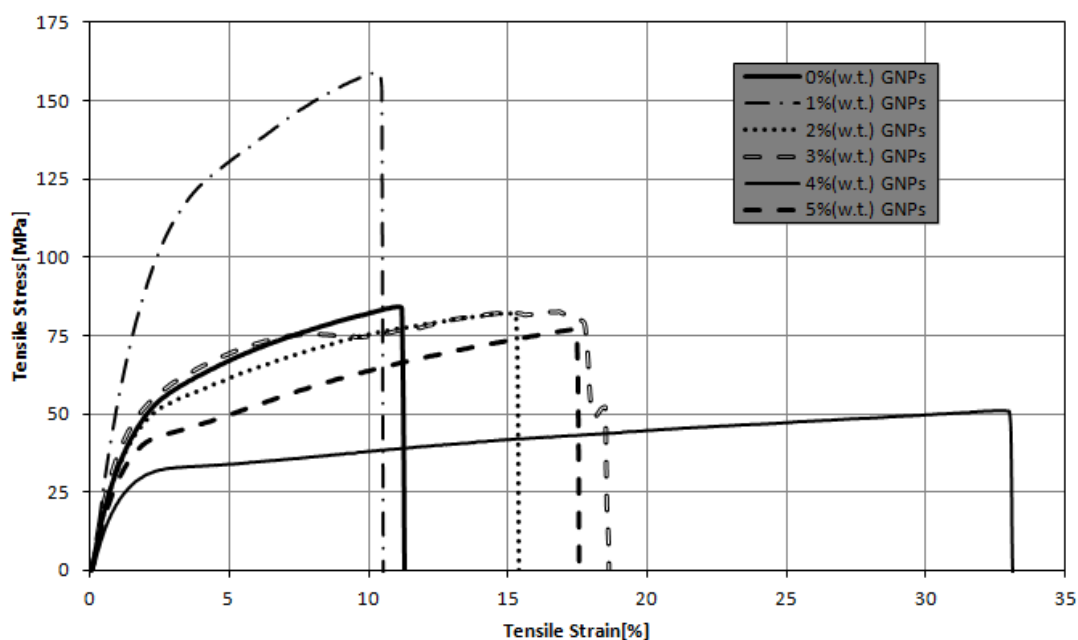
9.2.2. Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2



Εικόνα 66: Αρχική μορφή μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs.

Για την συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμών με ενίσχυση υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, έγιναν δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ASTM D3039/D3039M-00. Ειδικότερα, παρασκευάστηκαν δοκίμια μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου (GNPs), όπως επίσης και δοκίμια περιεκτικότητας κατά βάρος 1% w.t. GNPs έως και 5% w.t. GNPs. Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην μηχανική πρέσα Instron 4482 που διαθέτει το εργαστήριο, ήταν επαρκείς σε αριθμό, αλλά λόγω πολύ καλής επαναληψιμότητας έγινε επιλογή ενός μόνο δοκιμίου από κάθε περιεκτικότητα. Οι διαστάσεις των εν λόγω δοκιμών ήταν στα 250 x 50 x 0.3 [mm]. Και σε αυτήν την κατηγορία δοκιμών, επιλέχθηκε το μήκος 250 mm όπως ορίζεται από το σχετικό διεθνές πρότυπο, ώστε να είναι αμελητέα η σχετική ολίσθηση του υλικού μέσα στις αρπάγες της μηχανικής πρέσας. Επιπρόσθετα, επιλέχθηκε η περιοχή συγκράτησης τους να είναι στα 50 mm, ενώ η περιοχή ελέγχου στα 150 mm. Η ταχύτητα πραγματοποίησης των δοκιμών ορίστηκε στα 2 mm/min. Ταυτόχρονα, κατά την διάρκεια των δοκιμών στην μηχανική πρέσα, έγινε καταγραφή των απαραίτητων δεδομένων για την δημιουργία αναγκαίων διαγραμμάτων σε συνδεδεμένο ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Εν συνεχεία , στο παρακάτω διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης που διατίθεται, παρουσιάζεται η συμπεριφορά των δοκιμών σε πειραματική δοκιμή εφελκυσμού.

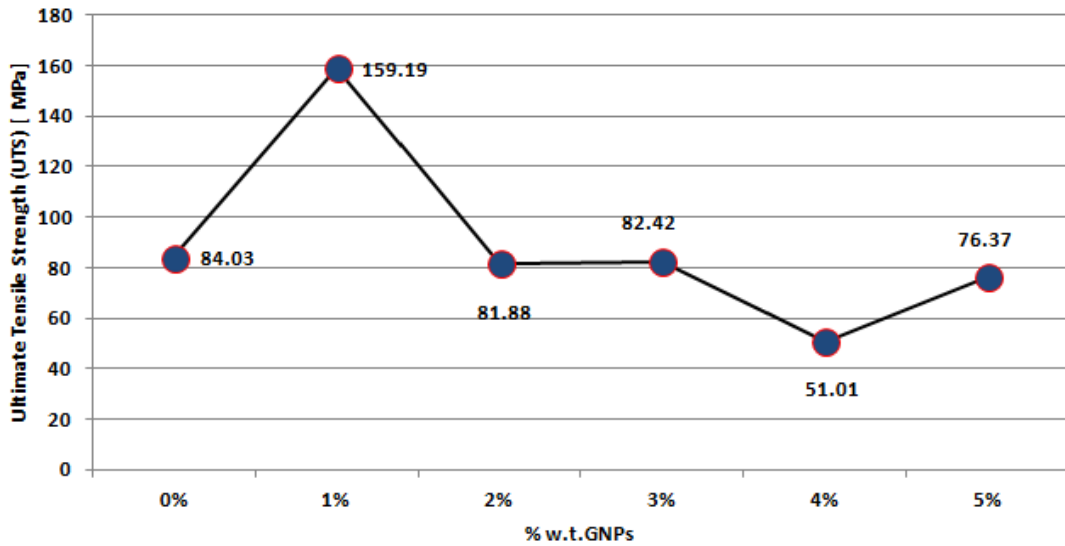


Διάγραμμα 10: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 , προσθήκης σε % w.t. GNPs από 0% έως 5%.

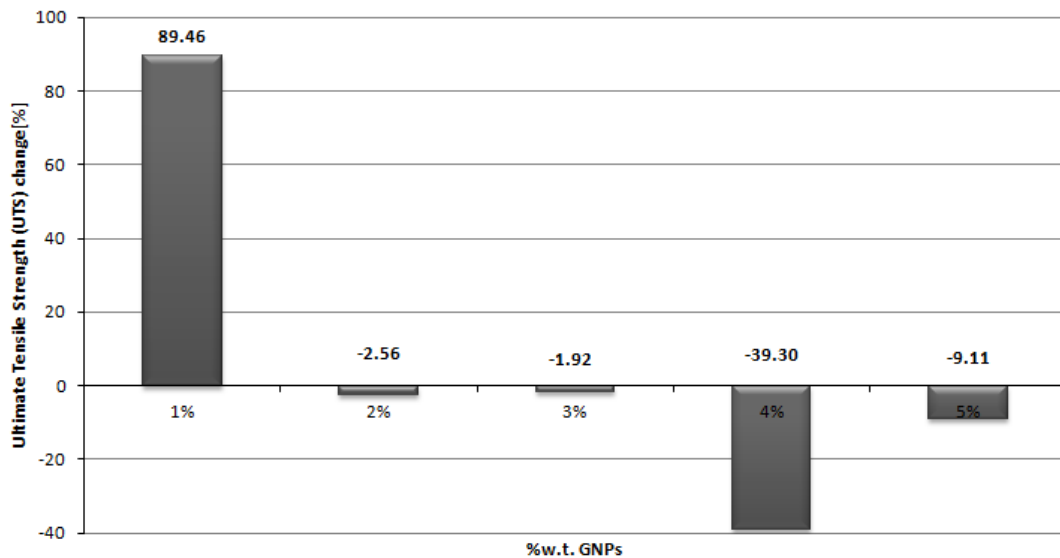
Από το παραπάνω διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης είναι εφικτό να προκύψουν τα παρακάτω συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με το πώς η προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) επηρεάζει την συμπεριφορά των δοκιμών ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 στον εφελκυσμό. Βέβαια, όλες οι συγκρίσεις γίνονται βάσει της απόδοσης δοκιμίου μηδενικής περιεκτικότητας σε GNPs. Ισχύουν λοιπόν, τα ακόλουθα:

- ✚ Το δοκίμιο στο οποίο δεν έγινε καμία προσθήκη νανοδομών γραφενίου, παρουσίασε μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 84,03 MPa, με την παραμόρφωση θραύσης να ανέρχεται στο 11,20%.
- ✚ Η υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό παρουσιάστηκε στην περιεκτικότητα 1% w.t. GNPs αγγίζοντας την τιμή των 159,19 MPa. Πιο συγκεκριμένα, σημειώθηκε σημαντική ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 89,46%. Σε σχέση με την παραμόρφωση θραύσης, παρατηρήθηκε σχετικά ελάχιστη μείωση, με την τιμή της να βρίσκεται στο 10,47%.
- ✚ Σε αντίθεση με τα δοκίμια μονοδιευθυντικής πλέξης, τα δοκίμια πλέξης Twill 2x2, δεν φάνηκε να επιδρούν θετικά στην προσθήκη νανοδομών γραφενίου. Με εξαίρεση την περιεκτικότητα του 1% w.t. GNPs, όλες οι υπόλοιπες περιεκτικότητες αντέδρασαν αρνητικά όσον αφορά στην μέγιστη αντοχή τους στον εφελκυσμό, σημειώνοντας πτώση.
- ✚ Την μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) παρουσίασε το δοκίμιο περιεκτικότητας 4% w.t. GNPs, σε μέγεθος που άγγιξε το 39,30%. Ειδικότερα, αστόχησε στα 51,01 MPa.
- ✚ Οι υπόλοιπες περιεκτικότητες (2%, 3%, 5% w.t. GNPs) παρουσίασαν μικρότερη πτώση της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό (UTS) που κυμάνθηκε από 1% έως 10%.
- ✚ Όσον αφορά στην παραμόρφωση θραύσης παρουσίασε σημαντική αύξηση σε όλες σχεδόν τις περιεκτικότητες σε νανοδομές γραφενίου, με εξαίρεση εκείνη του 1% w.t..Ειδικότερα την μεγαλύτερη παραμόρφωση θραύσης σημείωσε εκείνη του 4% w.t. GNPs με την τιμή της να βρίσκεται στο 33,03%.

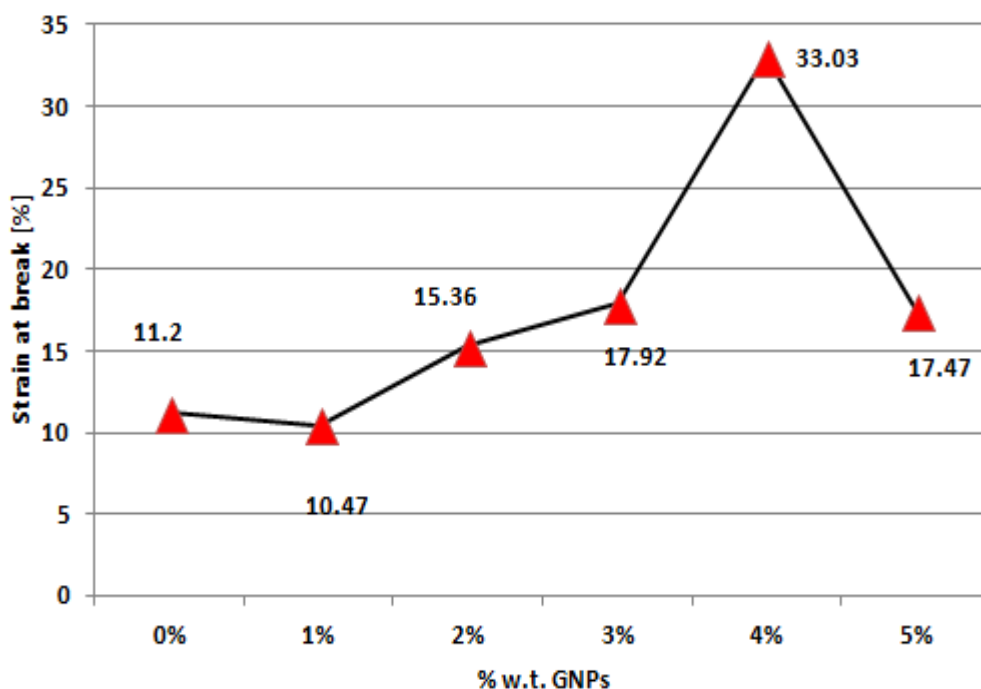
Στα διαγράμματα που ακολουθούν διαφαίνονται καλύτερα οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις.



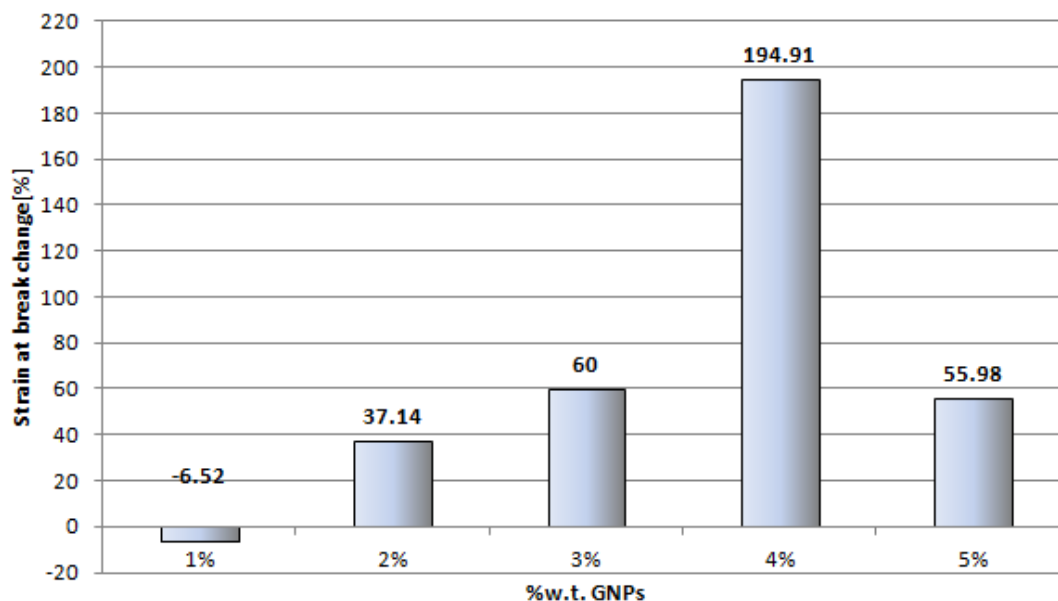
Διάγραμμα 11: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε σχέση με το ποσοστό περιεκτικότητας κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0% έως 5%).



Διάγραμμα 12: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μεταβολής μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (UTS) μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (1%-5%) σε σχέση με το δοκίμιο μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου.

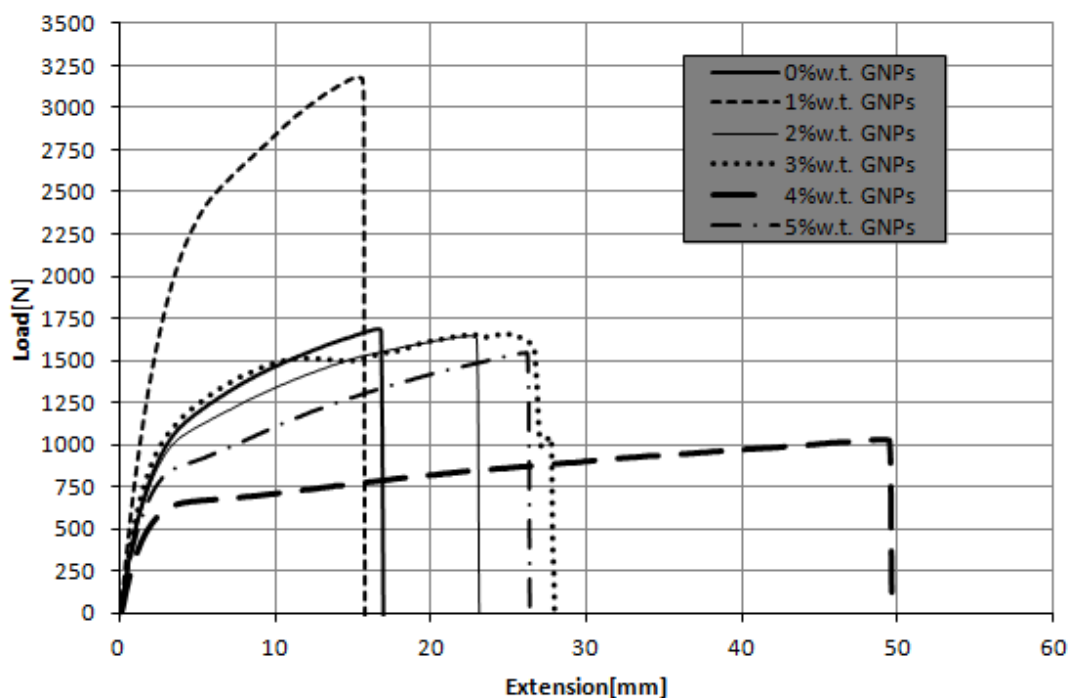


Διάγραμμα 13: Συγκριτικό γράφημα τιμών παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0%-5%).



Διάγραμμα 14: Συγκριτικό γράφημα ποσοστιαίας μεταβολής παραμόρφωσης θραύσης σε εφελκυσμό μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 με βάση την περιεκτικότητα κατά βάρος σε προσθήκη GNPs (0%-5%) σε σχέση με το δοκίμιο μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου.

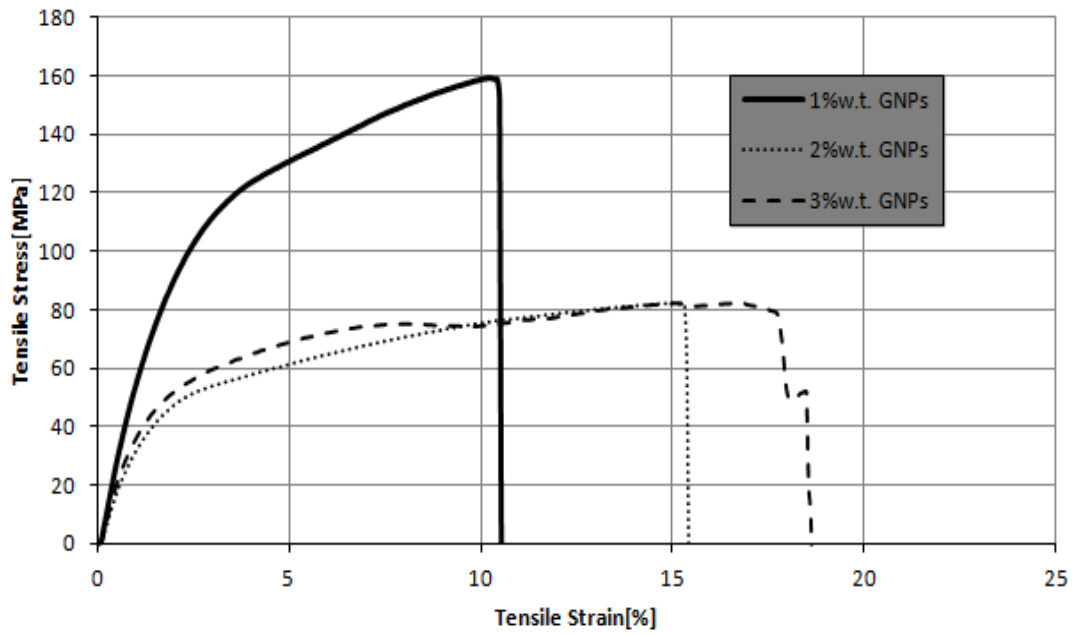
Στο παρακάτω διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης που διατίθεται, παρουσιάζεται η συμπεριφορά των δοκιμών σε δοκιμές εφελκυσμού.



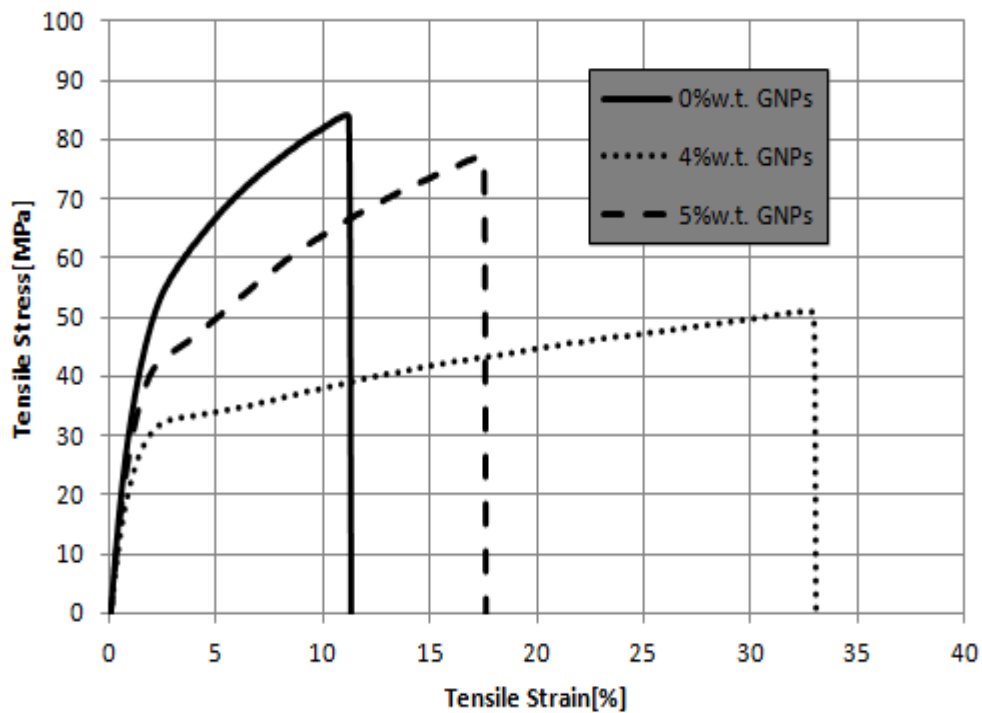
Διάγραμμα 15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/ υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 , προσθήκης σε % w.t. GNPs από 0% έως 5%.

Συμπεραίνουμε λοιπόν με βάση όλα τα παραπάνω πως η προσθήκη νανοδομών γραφενίου σε σύνθετα μονοστρωματικά υλικά ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, επιδρά γενικότερα αρνητικά όσον αφορά στην αντοχή σε εφελκυσμό. .

Στην συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2 σε σχέση με το ποσοστό εμποτισμού τους.



Διάγραμμα 16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, σε σχέση με το ποσοστό εμπροτισμού.



Διάγραμμα 17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, σε σχέση με το ποσοστό εμπροτισμού.

9.3. Δοκιμές εφελκυσμού μετά από την επίδραση δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (Post-Curing)



Εικόνα 67: Δοκίμια εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος 2% w.t. GNPs που έχουν υποστεί δοκιμή εφελκυσμού, κατόπιν επίδρασης δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing).

Ένας ακόμη στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν και η μελέτη της επίδρασης της δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing), όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών. Βέβαια, αρχικά τα δοκίμια υπέστησαν θερμική θεραπεία (curing), αφού αφέθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 7 ημέρες. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν, βάσει του διεθνούς προτύπου ASTM D3039/D3039M-00, σε διαστάσεις 250 x 50 x 0.36 [mm] (Unidirectional Weave) και 250 x 50 x 0.3 [mm] (Twill 2x2 Weave), χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές εφελκυσμού, αφού πρώτα υπέστησαν post-curing. Ειδικότερα, οι σειρές δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν είχαν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- ✚ Δοκίμια περιεκτικότητας σε γραφενικές νανοδομές (GNPs) 2% w.t. και ενίσχυσης από υαλοϋφασμα μονοδιευθυντικής πλέξης.

- ✚ Δοκίμια περιεκτικότητας σε γραφενικές νανοδομές (GNPs) 2% w.t. και ενίσχυσης από υαλοϋφασμα πλέξης Twill 2x2.

Όλα τα δοκίμια, προκειμένου να υποστούν post-curing, οδηγήθηκαν σε εργαστηριακό κλίβανο σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ακολουθεί εικόνα του εν λόγω εργαστηριακού κλίβανου.



Εικόνα 68: Εργαστηριακός Κλίβανος

Όσον αφορά στα δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, έγινε επιλογή παραμονής τους στον εργαστηριακό κλίβανο στους 50⁰C, 80⁰C, 100⁰C και 120⁰C για χρονικά διαστήματα 4, 8, 18 και 24 ωρών.

Σε σχέση με τα δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, εκείνα επιλέχθηκε να παραμείνουν στον εργαστηριακό κλίβανο στους 50⁰C για 1 και 4 ώρες.

Τελικά, κάθε δοκίμιο ήταν εφικτό να υποστεί δοκιμή εφελκυσμού στην μηχανική πρέσα Instron 4482, πάντα βασιζόμενοι στο κατάλληλο πρότυπο, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο παρατηρήθηκε επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων τους, αφού υπέστησαν post-curing. Βέβαια, για κάθε σειρά δοκιμών, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση δευτερογενούς θερμικής θεραπείας και να γίνει σύγκριση, έγινε χρήση και ενός επιπλέον δοκιμίου το οποίο δεν δέχτηκε δευτερογενή θερμική θεραπεία.

9.3.1. Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης (UD)

Όπως παραπάνω αναφέρθηκε, τα δοκίμια τα οποία υπέστησαν post-curing και κατόπιν εφελκυσμό αφορούν περιεκτικότητα σε νανοδομές γραφενίου 2% w.t. GNPs. Ο πίνακας που ακολουθεί περιγράφει με ακρίβεια τα πλήρη δεδομένα συνθηκών δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (Post-Curing).

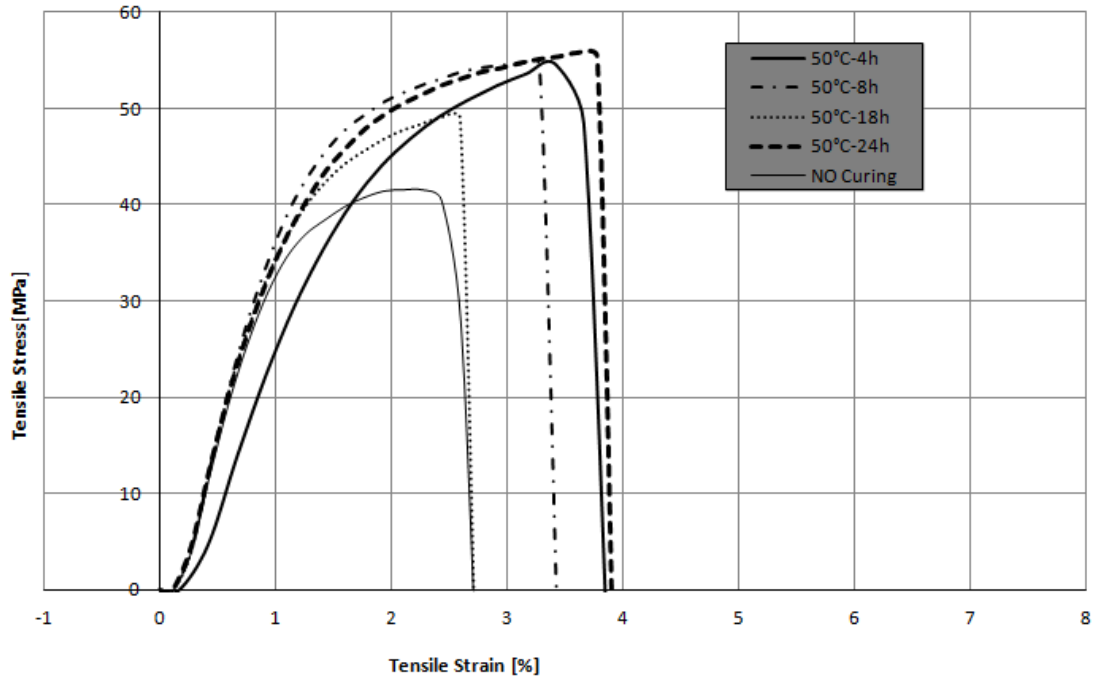
Δοκίμια ενίσχυσης υαλοφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2%w.t. GNPs
Συνθήκες post-curing
NO Curing
50°C-4h
50°C-8h
50°C-18h
50°C-24h
80°C-4h
80°C-8h
80°C-18h
80°C-24h
100°C-4h
100°C-8h
100°C-18h
100°C-24h
120°C-4h
120°C-8h
120°C-18h
120°C-24h

Πίνακας 5 :Πίνακας δεδομένων συνθηκών post-curing δοκιμών ενίσχυσης υαλοφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.

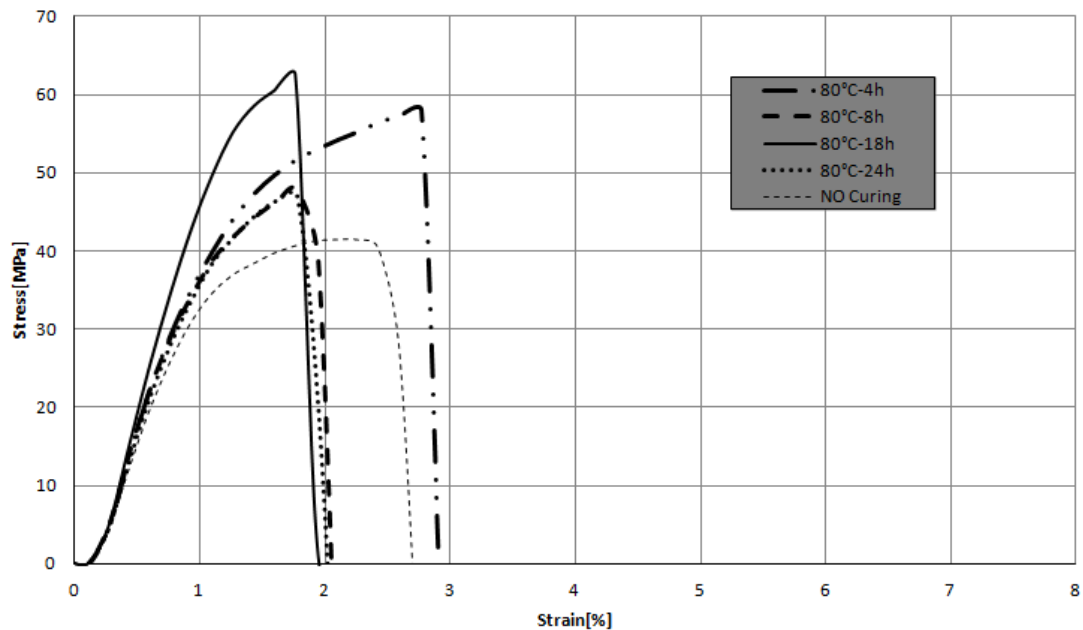
Εν συνεχεία, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν στην διάρκεια του post-curing. Ειδικότερα, με τα διαγράμματα αυτά γίνεται μια προσπάθεια να κατανοηθεί το πώς επιδρά στα δοκίμια η χρονική διάρκεια έκθεσης σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας κατά την επιβολή δευτερογενούς θερμικής θεραπείας στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών που υφίστανται εφελκυσμό.

Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης που ακολουθούν αναφέρονται σε δοκίμια τα οποία υπέστησαν post-curing στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C αντίστοιχα για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα (4h, 8h, 18h, 24h) παραμονής τους σε εργαστηριακό κλίβανο και πιο συγκεκριμένα στο πως αυτά συμπεριφέρονται σε

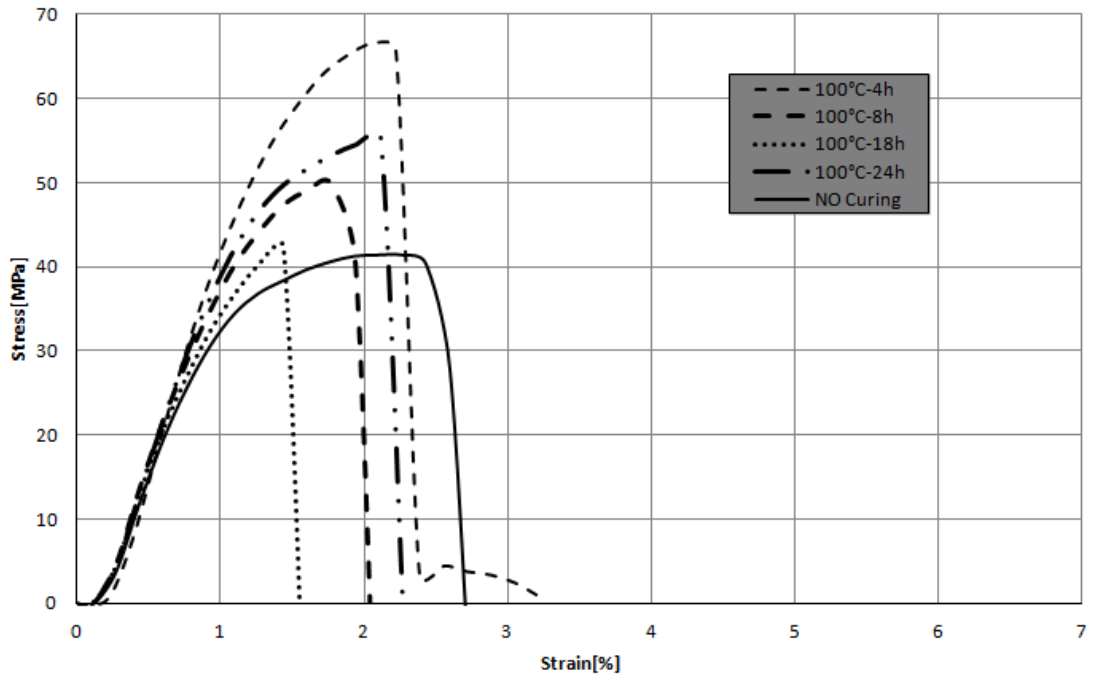
πειραματική δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό. Βέβαια, για να γίνει η αναγκαία σύγκριση έγινε χρήση και ενός δοκιμίου 2% w.t. GNPs το οποίο δεν υπέστη δευτερογενή θερμική θεραπεία (NO Curing).



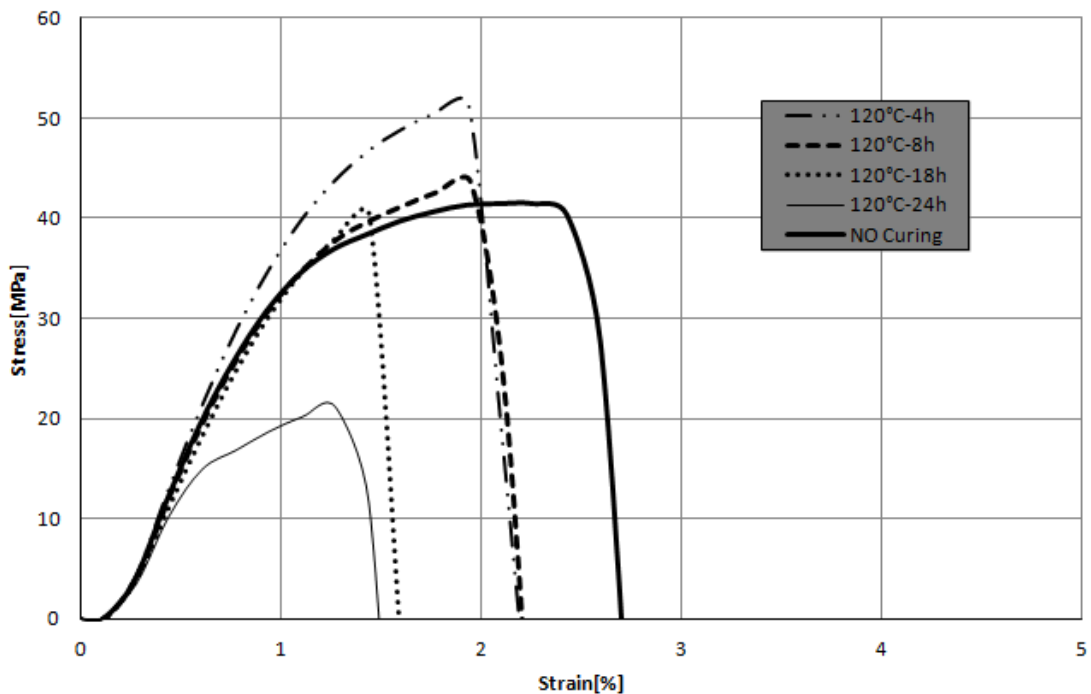
Διάγραμμα 18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 4h, 8h, 18h και 24h.



Διάγραμμα 19: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 80°C για 4h, 8h, 18h και 24h.

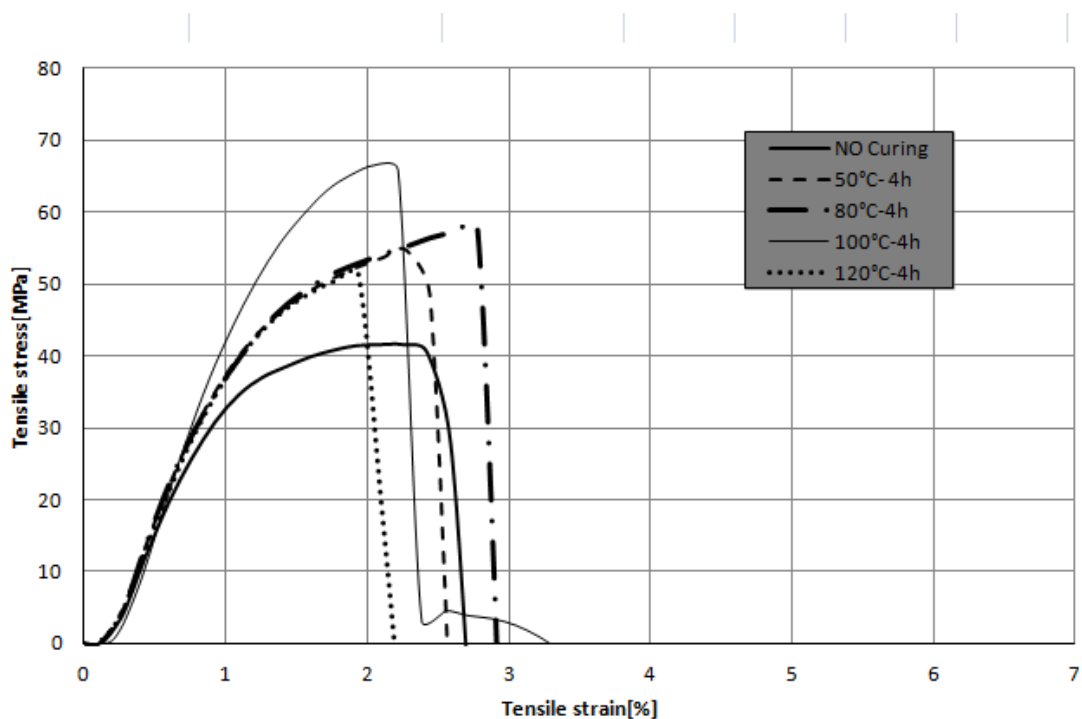


Διάγραμμα 20: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφέλκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 100°C για 4h, 8h,18h και 24h.

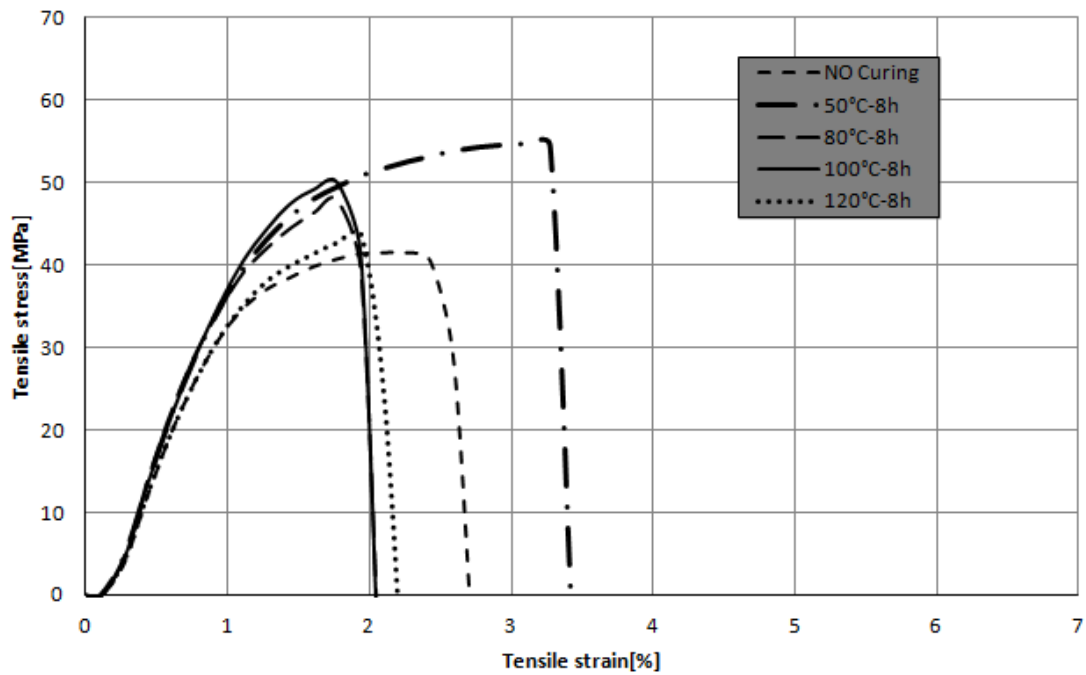


Διάγραμμα 21: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφέλκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 120°C για 4h, 8h,18h και 24h.

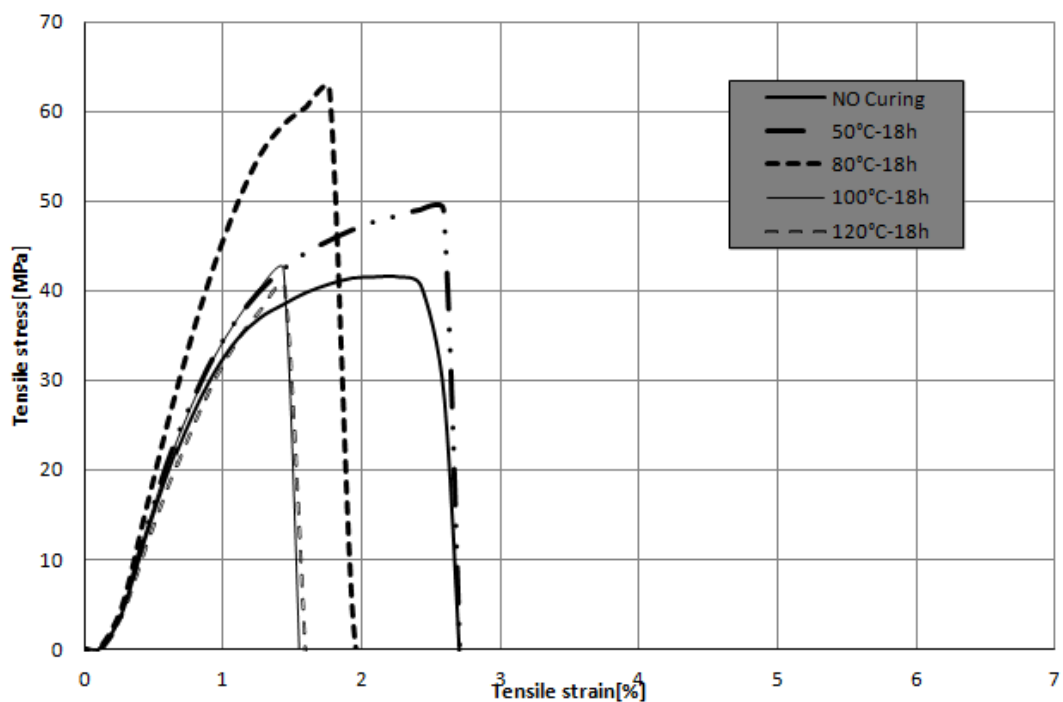
Τα συγκριτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης που ακολουθούν αναφέρονται στην θερμοκρασία επιβολής δευτερογενούς θερμικής θεραπείας. Ειδικότερα, εξετάζεται το πώς επιδρά η επιβολή δευτερογενούς θερμικής θεραπείας για 4 διαφορετικά σταθερά χρονικά διαστήματα σε δοκίμια τα οποία υπέστησαν post-curing στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C αντίστοιχα έπειτα από παραμονή τους σε εργαστηριακό κλίβανο και πιο συγκεκριμένα στο πως αυτά συμπεριφέρονται σε πειραματική δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό. Βέβαια, για να γίνει η αναγκαία σύγκριση έγινε χρήση και ενός δοκιμίου 2% w.t. GNPs το οποίο δεν υπέστη post-curing (NO Curing) .



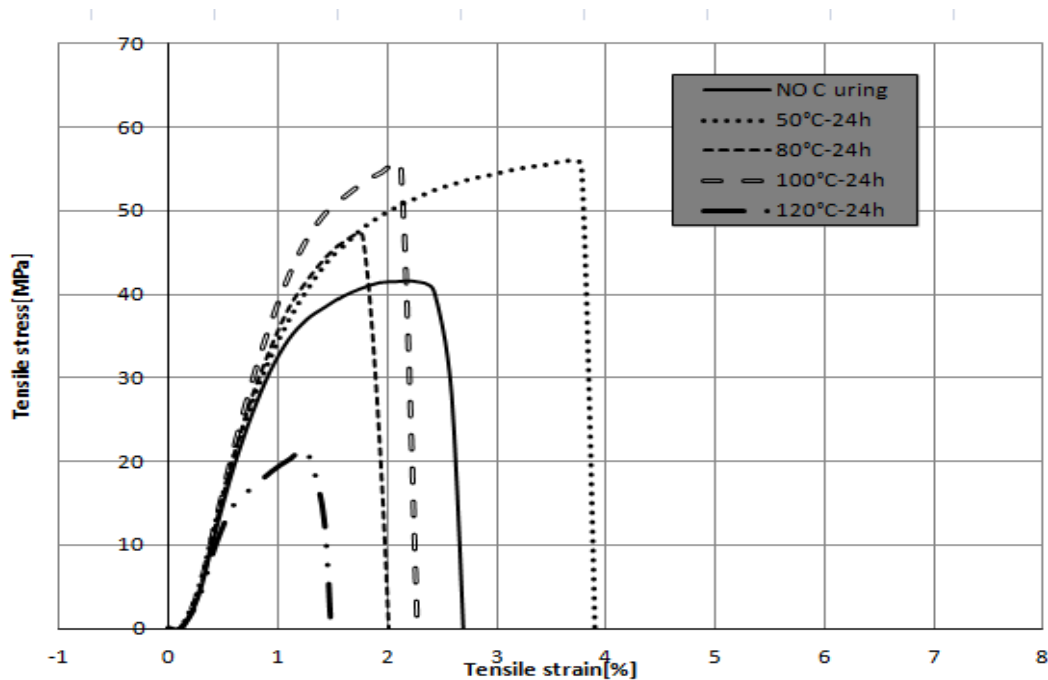
Διάγραμμα 22: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 4h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 23: Συγκεντρικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 8h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 24: Συγκεντρικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 18h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 25: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 24h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης που αφορούν στην συμπεριφορά των δοκιμών σε εφελκυσμό, έπειτα από επίδραση δευτερογενούς θερμικής θεραπείας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα και παρατηρήσεις σε σχέση πάντα με το δοκίμιο που δεν υπέστη post-curing:

- ✚ Το δοκίμιο που δεν υπέστη post-curing παρουσίασε μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (UTS) που ανήλθε στα 41,47 MPa, με την παραμόρφωση θραύσης να βρίσκεται στο 2,42%.
- ✚ Έπειτα από επίδραση post-curing στους 50°C παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:
 - Γενικότερα, τα δοκίμια για κάθε χρονικό διάστημα (4h, 8h, 18h, 24h), παρουσίασαν αύξηση σε σχέση με την μέγιστη τάση εφελκυσμού (UTS) . Το ίδιο παρατηρήθηκε και για την παραμόρφωση θραύσης.

- Η υψηλότερη UTS παρουσιάστηκε έπειτα από 24h post-curing αγγίζοντας την τιμή των 55,43 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση της UTS υπολογίστηκε στο 33,66%.
- Η υψηλότερη παραμόρφωση θραύσης σημειώθηκε έπειτα από επίδραση post-curing για 24h, με τιμή στο 3,76%.
- Η χαμηλότερη UTS σημειώθηκε έπειτα από post-curing 18h, με την τιμή της να υπολογίζεται στα 49,12 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση που σημειώθηκε ανήλθε στο 18,45%.
- Την χαμηλότερη τιμή παραμόρφωσης θραύσης παρουσίασε το δοκίμιο που υπέστη post-curing για 18h, με την τιμή του να υπολογίζεται στο 2,59%. Σχεδόν δεν έδειξε να επηρεάζεται καθόλου σε σχέση με το δοκίμιο που δεν υπέστη post-curing (2,26%).
- Γενικότερα, σε όλα τα χρονικά διαστήματα θερμικής θεραπείας δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές αποκλίσεις τόσο σε σχέση με την μέγιστη τάση σε εφελκυσμό όσο και με την παραμόρφωση θραύσης.

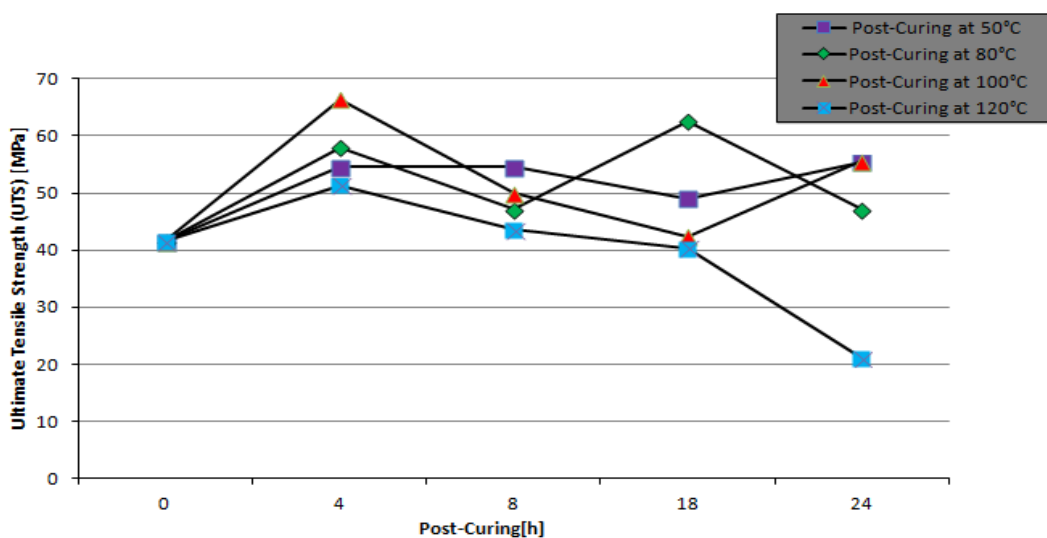
✚ Έπειτα από επίδραση post-curing στους 80°C παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- Γενικότερα, τα δοκίμια για κάθε χρονικό διάστημα (4h, 8h, 18h, 24h) , παρουσίασαν αύξηση σε σχέση με την μέγιστη τάση εφελκυσμού (UTS) . Το ίδιο όμως δεν παρατηρήθηκε και για την παραμόρφωση θραύσης, η οποία σημείωσε μείωση με εξαίρεση εκείνης των 4h επίδρασης post-curing.
- Η υψηλότερη UTS παρουσιάστηκε έπειτα από 18h post-curing, αγγίζοντας την τιμή των 62,55 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση της UTS υπολογίστηκε στο 50,83%.
- Αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης σημειώθηκε μόνο έπειτα από επίδραση δευτερογενούς θερμικής θεραπείας για 4h, με τιμή στο 2,77%.
- Η χαμηλότερη αύξηση της UTS σημειώθηκε έπειτα από θερμική θεραπεία 24h και 8h, με την τιμή της να υπολογίζεται στα 47,11 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση που σημειώθηκε ανήλθε στο 13,60%.

- Την χαμηλότερη τιμή παραμόρφωσης θραύσης παρουσίασαν τα δοκίμια που υπέστησαν post-curing για 18h και 24h με την τιμή της να υπολογίζεται στο 1,76% και 1,77% αντίστοιχα. Ποσοστιαία πτώση υπολογίστηκε στο 27,27% και 26,85% αντίστοιχα.
- ✚ Έπειτα από επίδραση post-curing στους 100°C παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:
- Γενικότερα, τα δοκίμια για κάθε χρονικό διάστημα (4h, 8h, 18h, 24h), παρουσίασαν αύξηση σε σχέση με την μέγιστη τάση εφελκυσμού (UTS). Διαφορετική συμπεριφορά όμως παρατηρήθηκε σε σχέση με την παραμόρφωση θραύσης, η οποία έδειξε να υποχωρεί για κάθε χρονικό διάστημα επιβολής δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.
 - Η υψηλότερη UTS παρουσιάστηκε έπειτα από 4h θερμικής θεραπείας αγγίζοντας την τιμή των 66,44 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση της UTS υπολογίστηκε στο 60,21%.
 - Η υψηλότερη παραμόρφωση θραύσης σημειώθηκε έπειτα από επίδραση post-curing για 4h, με τιμή στο 2,11%. Βέβαια, αν και υψηλότερη σε τιμή, η τιμή της είναι μικρότερη από εκείνη του δοκιμίου που δεν υπέστη post-curing.
 - Η χαμηλότερη UTS σημειώθηκε έπειτα από θερμική θεραπεία 18h, με την τιμή της να υπολογίζεται στα 42,41 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση που σημειώθηκε ανήλθε στο 2,27%.
 - Την χαμηλότερη τιμή παραμόρφωσης θραύσης παρουσίασε το δοκίμιο που υπέστη post-curing για 18h, με την τιμή του να υπολογίζεται στο 1,43%.
- ✚ Έπειτα από επίδραση post-curing στους 120°C παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:
- Γενικότερα, τα δοκίμια για κάθε χρονικό διάστημα (4h, 8h, 18h, 24h) έδειξαν να έχουν διαφοροποιημένη συμπεριφορά. Ειδικότερα, κάποια δοκίμια παρουσίασαν μείωση σε σχέση με την μέγιστη τάση εφελκυσμού (UTS), ενώ κάποια άλλα δοκίμια όμως σημείωσαν αύξηση της UTS. Μείωση παρατηρήθηκε για την παραμόρφωση θραύσης.

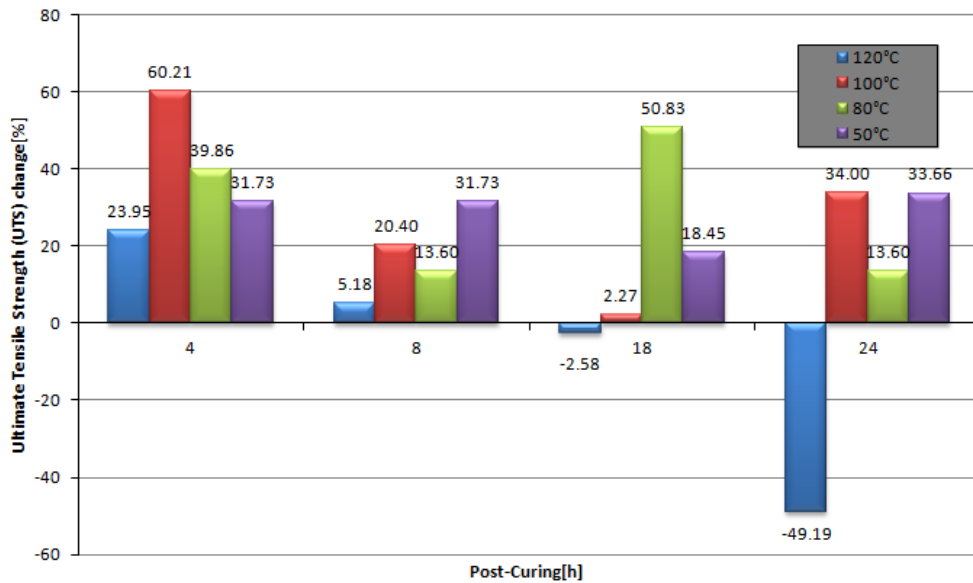
- Η υψηλότερη UTS παρουσιάστηκε έπειτα από 4h post-curing αγγίζοντας την τιμή των 51,40 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση της UTS υπολογίστηκε στο 23,95%.
- Η υψηλότερη παραμόρφωση θραύσης σημειώθηκε έπειτα από επίδραση post-curing για 8h, με τιμή στο 2,11%. Βέβαια, παρέμεινε μικρότερη σε σχέση με εκείνη του δοκιμίου που δεν υπέστη post-curing (2,42%) .
- Η χαμηλότερη UTS σημειώθηκε έπειτα από post-curing 24h, με την τιμή της να υπολογίζεται στα 21,07 MPa. Η ποσοστιαία μείωση που σημειώθηκε ανήλθε στο 49,19%.
- Την χαμηλότερη τιμή παραμόρφωσης θραύσης παρουσίασαν τα δοκίμια έπειτα από post-curing για 18h και 24h, με την τιμή της να υπολογίζεται στο 1,44%. Σχεδόν υποδιπλασιάστηκε σε σχέση με το δοκίμιο που δεν υπέστη δευτερογενή θερμική θεραπεία (2,42%)

Τα γραφήματα που ακολουθούν συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση των προαναφερθέντων σχολίων και παρατηρήσεων

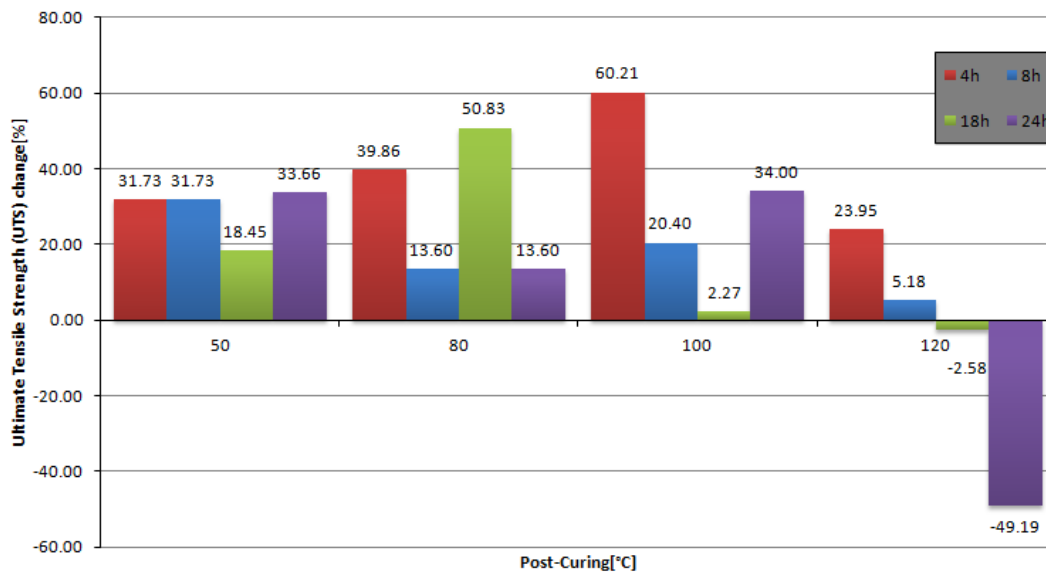


Διάγραμμα 26: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης (UTS) πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs,

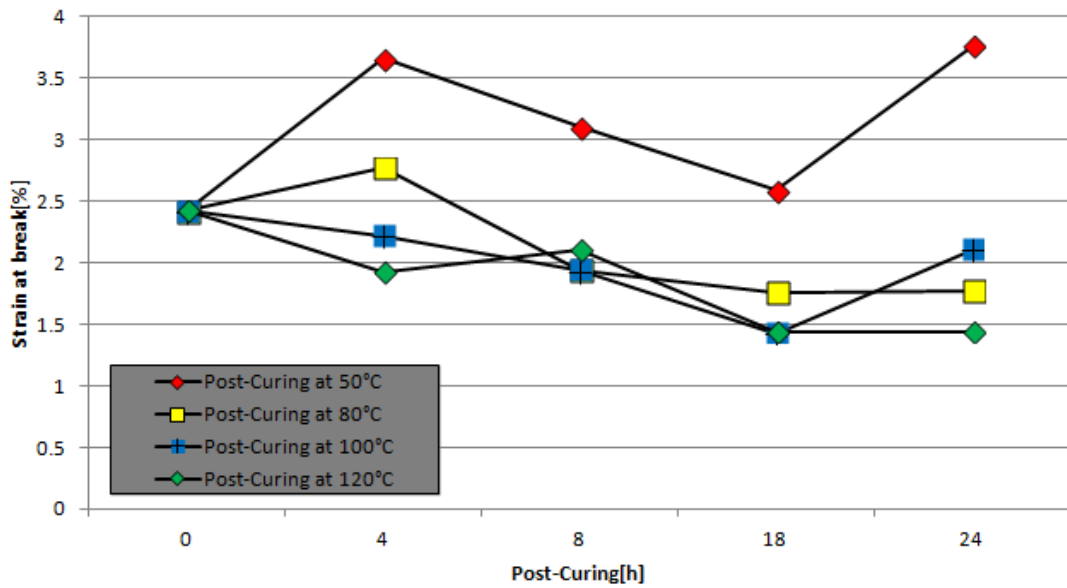
κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



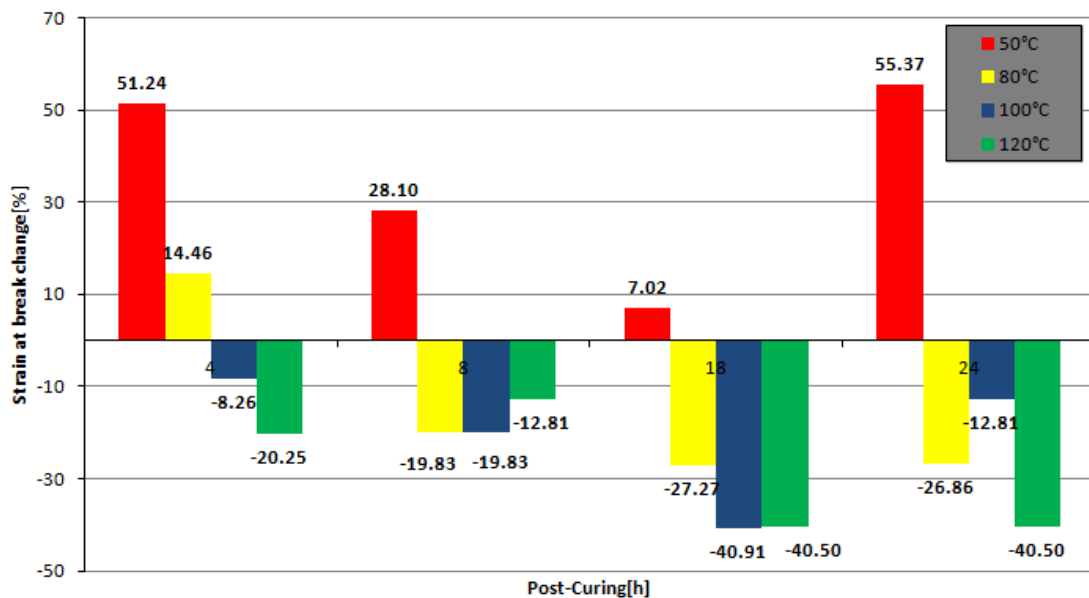
Διάγραμμα 27: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής τιμών μέγιστης τάσης(UTS)πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



Διάγραμμα 28: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής τιμών μέγιστης τάσης(UTS)πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για χρονική διάρκεια 4h, 8h, 18h και 24h σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.

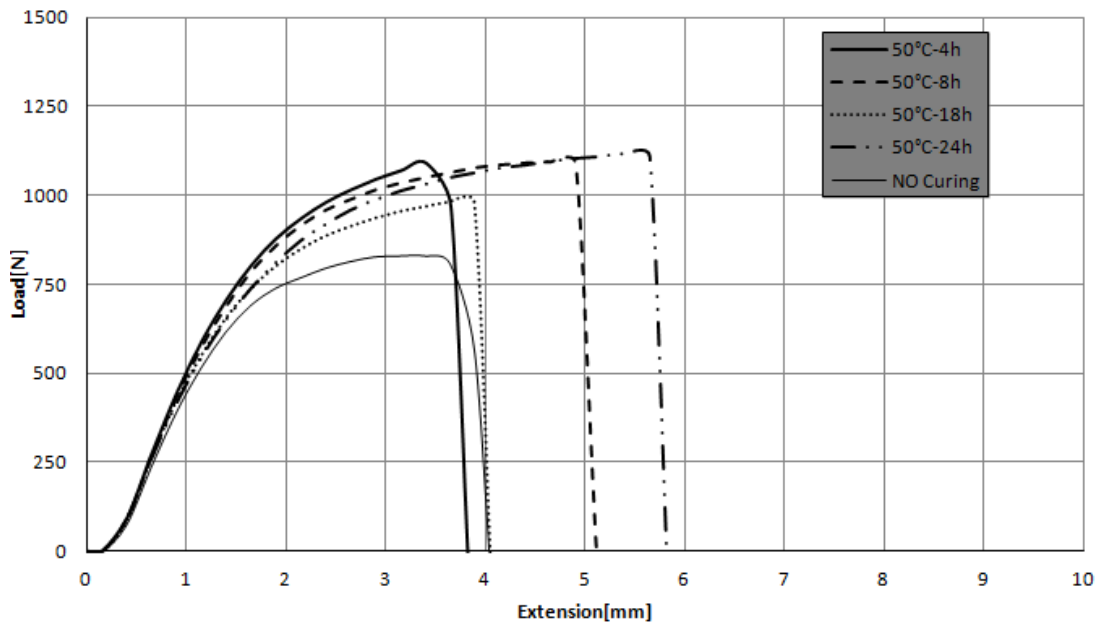


Διάγραμμα 29: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για χρονική διάρκεια 4h, 8h, 18h και 24h σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.

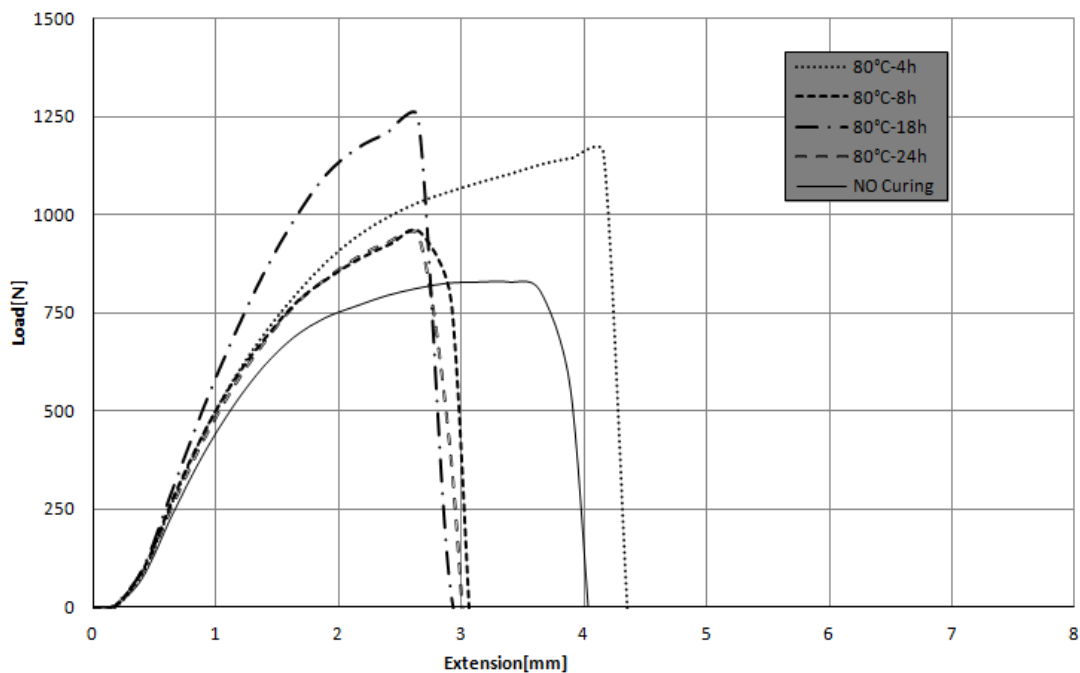


Διάγραμμα 30: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για χρονική διάρκεια 4h, 8h, 18h και 24h σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.

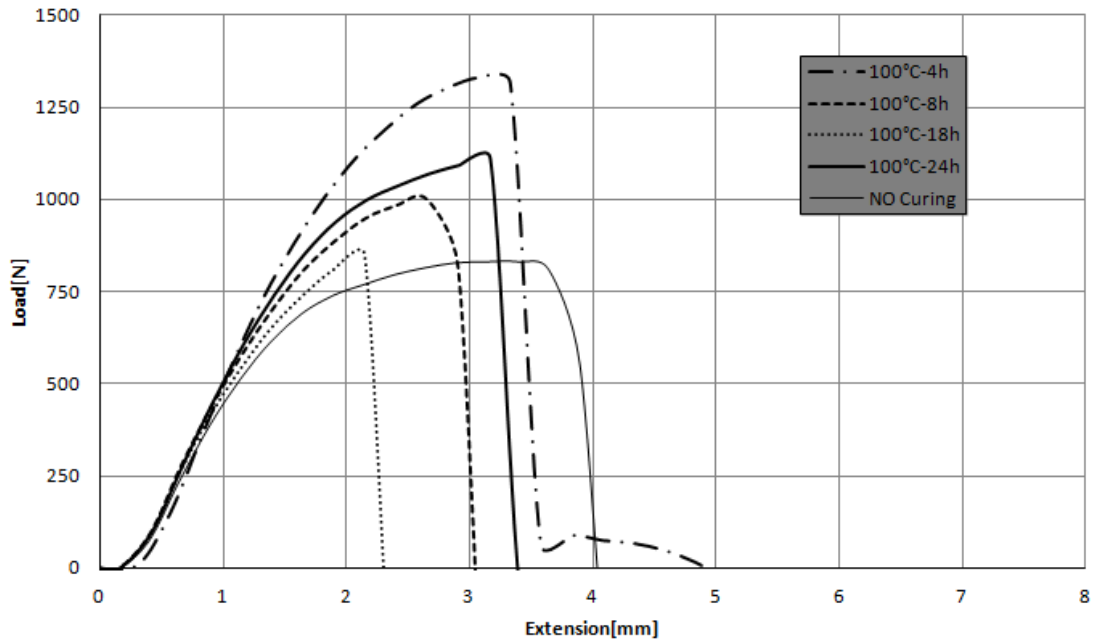
Όμοια, παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα φορτίου-επιμήκυνσης σε σχέση με την διάρκεια επιβολής δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



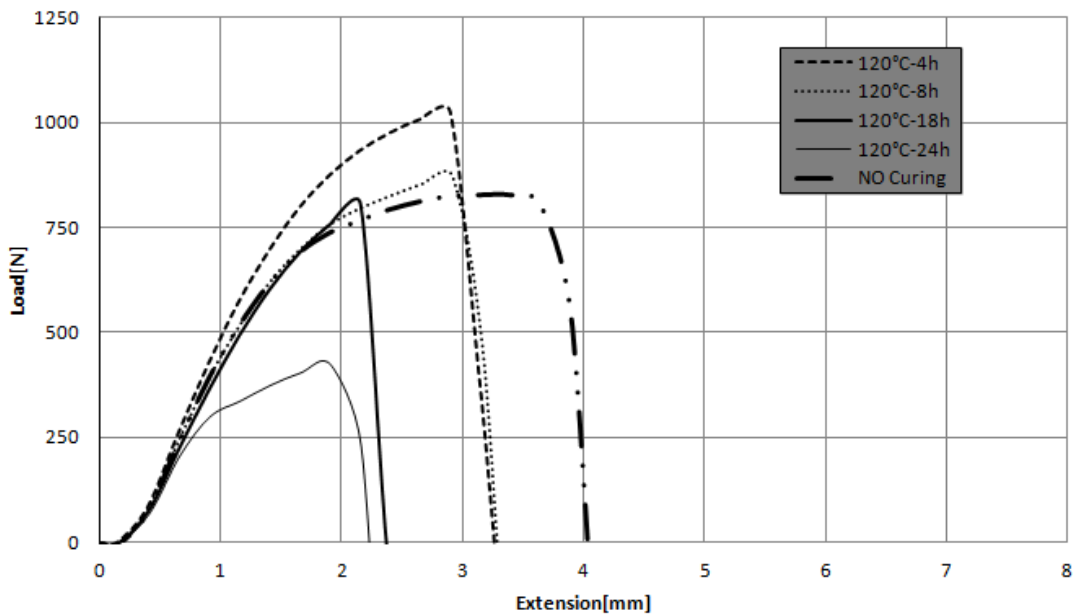
Διάγραμμα 31: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφέλκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 4h, 8h, 18h και 24h.



Διάγραμμα 32: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφέλκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 80°C για 4h, 8h, 18h και 24h.

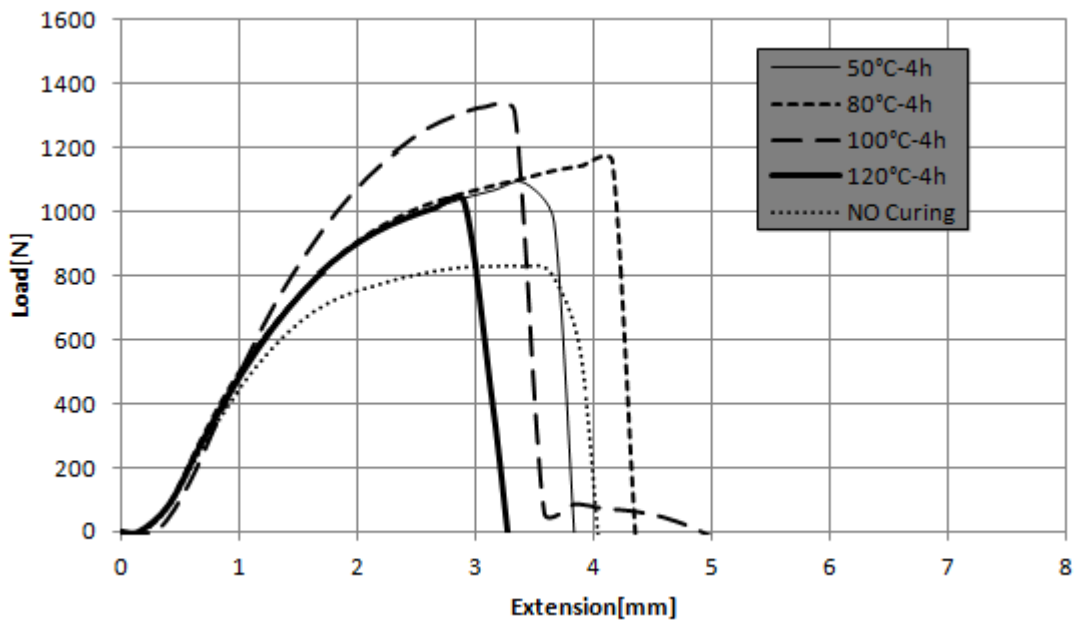


Διάγραμμα 33: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 100°C για 4h, 8h,18h και 24h.

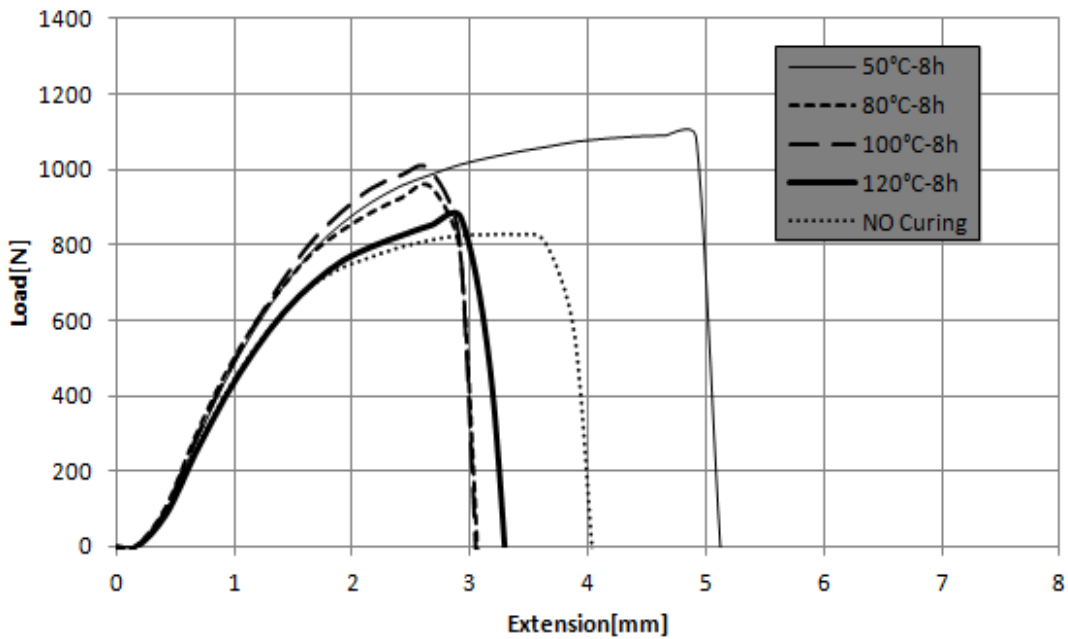


Διάγραμμα 34: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 120°C για 4h, 8h,18h και 24h.

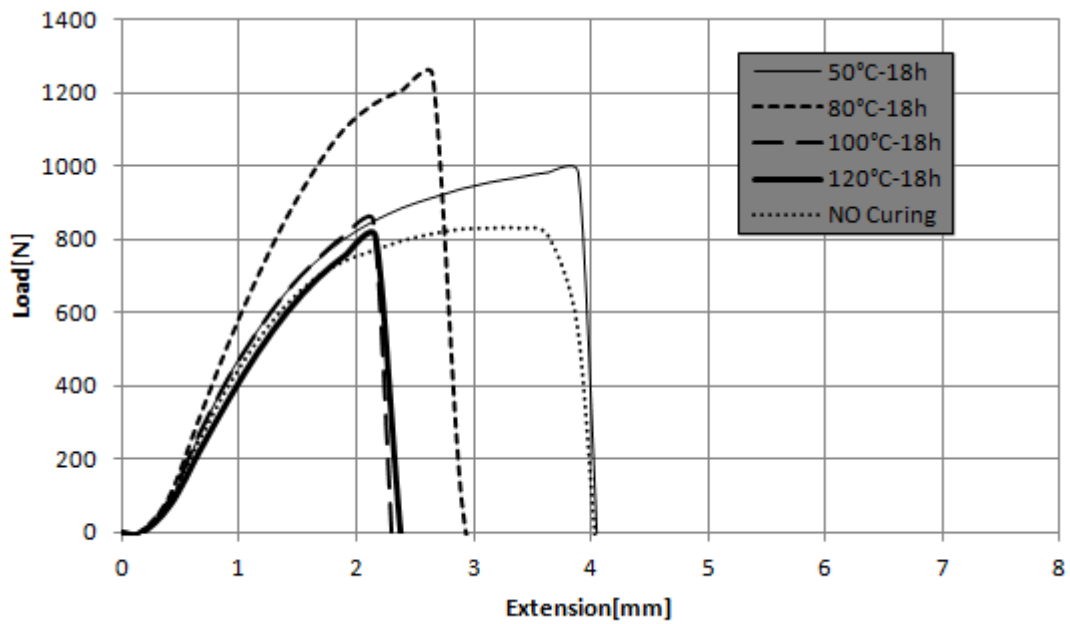
Τα διαγράμματα φορτίου-επιμήκυνσης που ακολουθούν αφορούν στην θερμοκρασία επιβολής δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



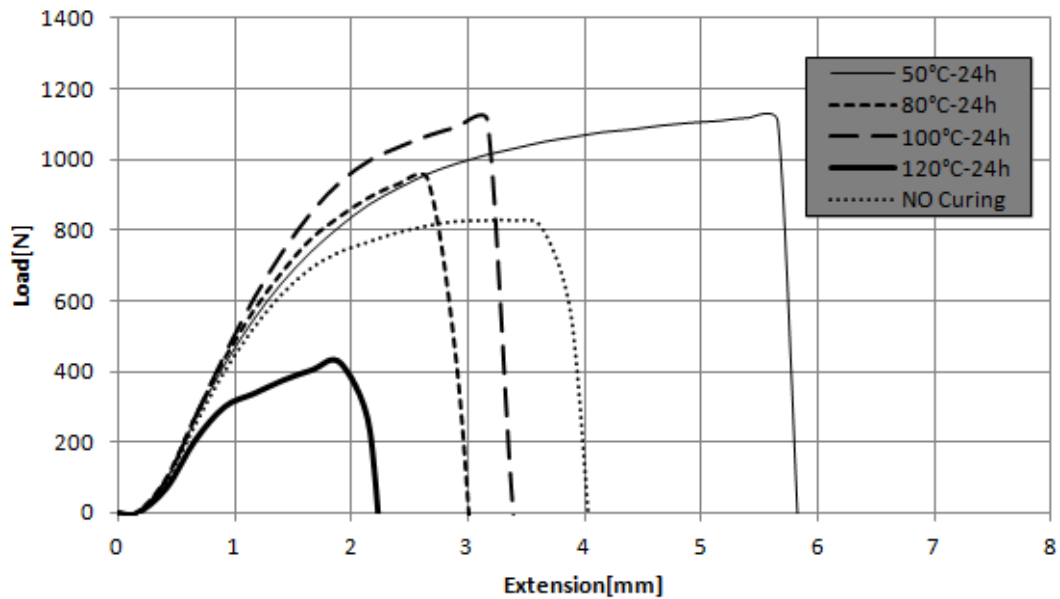
Διάγραμμα 35: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 4h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 36: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 8h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 37: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 18h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.



Διάγραμμα 38: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing για 24h στους 50°C, 80°C, 100°C και 120°C.

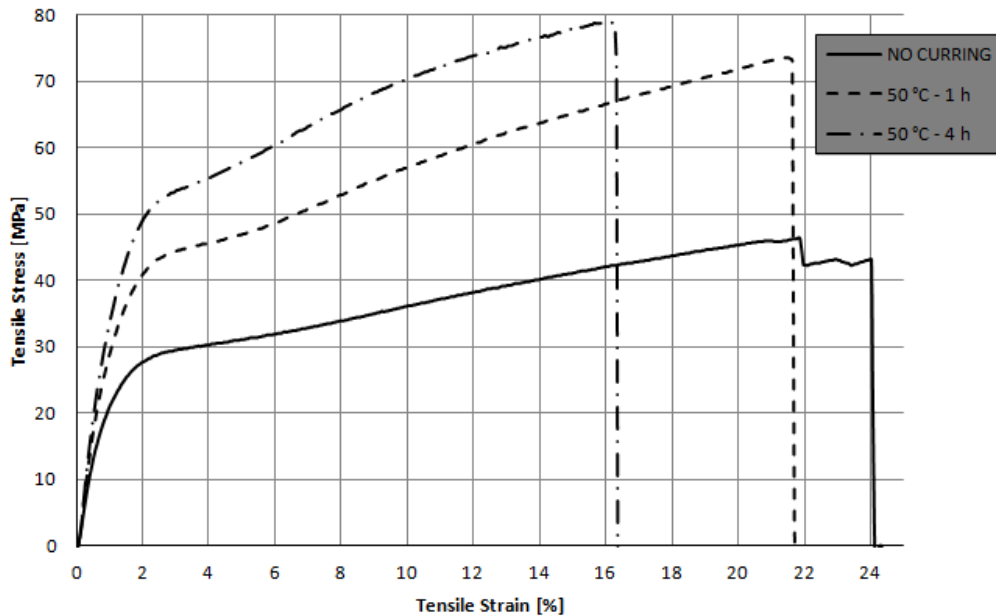
9.3.2. Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2

Όπως παραπάνω αναφέρθηκε, τα δοκίμια τα οποία υπέστησαν θερμική θεραπεία σε θερμοκρασία δωματίου για χρονική διάρκεια 7 ημερών, δευτερογενή θερμική θεραπεία (post-curing) και κατόπιν εφελκυσμό αφορούν περιεκτικότητα σε νανοδομές γραφενίου 2% w.t. GNPs. Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται με ακρίβεια τα πλήρη δεδομένα που αφορούν στο ποσοστό εμποτισμού κάθε δοκιμίου, όπως επίσης και οι συνθήκες δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (Post-Curing) των οποίων έγινε επιλογή.

Δοκίμια ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2%w.t. GNPs	
Συνθήκες Post-Curing	Ποσοστό εμποτισμού[%]
NO Curing	42-45
50°C-1h	42-45
50°C-4h	42-45

Πίνακας 6: Πίνακας δεδομένων μονοστρωματικών δοκιμίων ενίσχυσης υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, για πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού, κατόπιν post-curing (συνθήκες δευτερογενούς θερμικής θεραπείας) .

Το γράφημα τάσης – παραμόρφωσης που ακολουθεί δείχνει την συμπεριφορά των δοκιμίων σε εφελκυσμό, αφού έχει αρχικά προηγηθεί δευτερογενούς θερμική θεραπεία στους 50°C σε κλίβανο του εργαστηρίου για χρονικό διάστημα 1h και 4h. Για ακόμη μια φορά, η σύγκριση γίνεται σε σχέση με δοκίμιο το οποίο δεν έχει υποστεί post-curing, προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα.



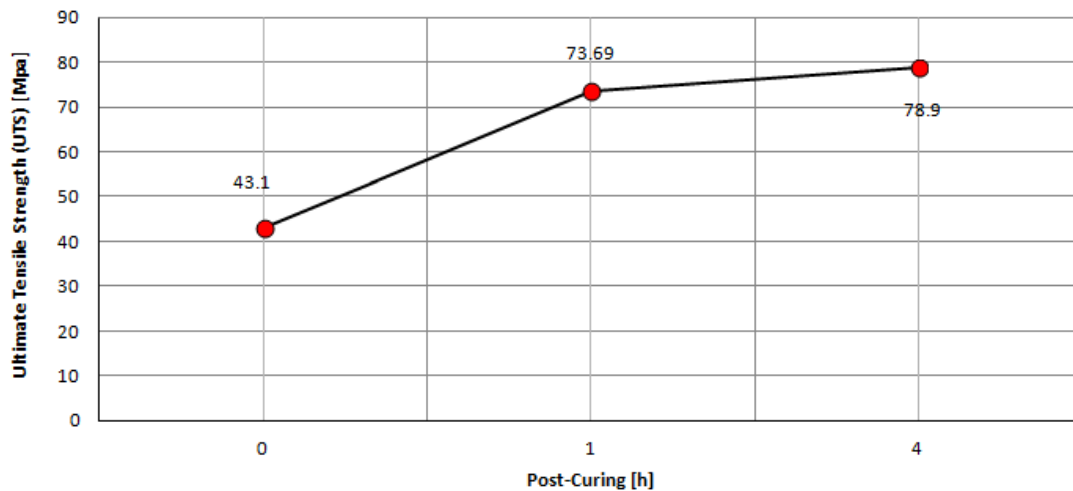
Διάγραμμα 39: Συγκεντρωτικό διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 1h και 4h.

Από το παραπάνω γράφημα είναι εφικτό να αντληθούν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με παρατηρήσεις και συμπεράσματα που παρατίθενται παρακάτω:

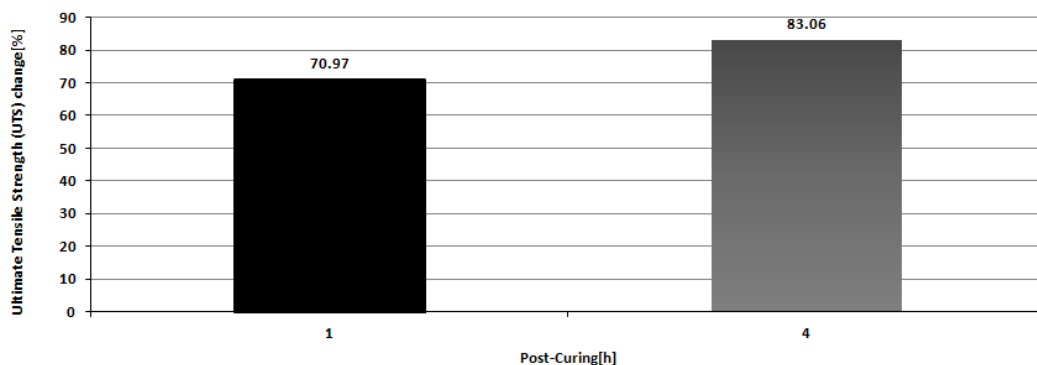
- ✚ Το δοκίμιο που δεν υπέστη post-curing, παρουσίασε υψηλή μέγιστη τάση σε εφελκυσμό (UTS) με τιμή ίση με 43,10 MPa. Η παραμόρφωση θραύσης διαμορφώθηκε στο 23,35%.
- ✚ Γενικά, παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση όσον αφορά στην συμπεριφορά των δοκιμών σε πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού μετά την επίδραση post-curing. Αυτό βέβαια, φάνηκε από την υψηλή αύξηση της UTS (Ultimate Tensile Strength).
- ✚ Την υψηλότερη αύξηση της UTS παρουσίασε το δοκίμιο το οποίο υπέστη post-curing για χρονική διάρκεια 4 ωρών, με τιμή που άγγιξε τα 78,9 MPa. Η ποσοστιαία αύξηση που σημειώθηκε ήταν στο 83,06%. Βέβαια, το ίδιο σημαντική ήταν και η απόδοση του δοκιμίου που υπέστη post-curing για 1 ώρα, με τιμή που ανήλθε στα 73,69 MPa.

✚ Η παραμόρφωση θραύσης γενικά σημείωσε φθίνουσα πορεία. Ειδικότερα, έπειτα από διάρκεια post-curing για 4 ώρες, η παραμόρφωση θραύσης μειώθηκε σε ποσοστό που άγγιξε το 30,19%, διαμορφώνοντας τιμή στο 16,30%.

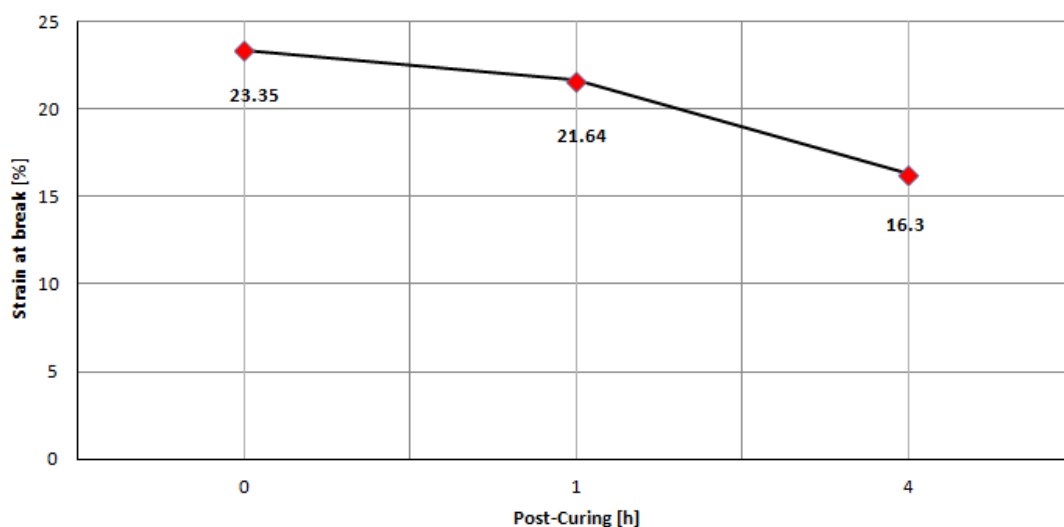
Τα παρακάτω γραφήματα βοηθούν στην κατανόηση των προαναφερθέντων.



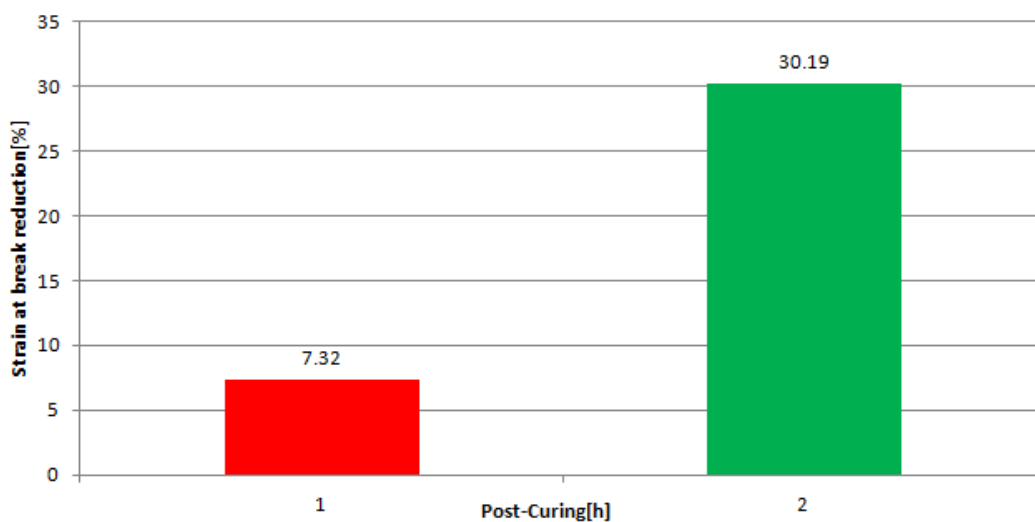
Διάγραμμα 40: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών μέγιστης τάσης (UTS) πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



Διάγραμμα 41: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής τιμών μέγιστης τάσης (UTS) πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



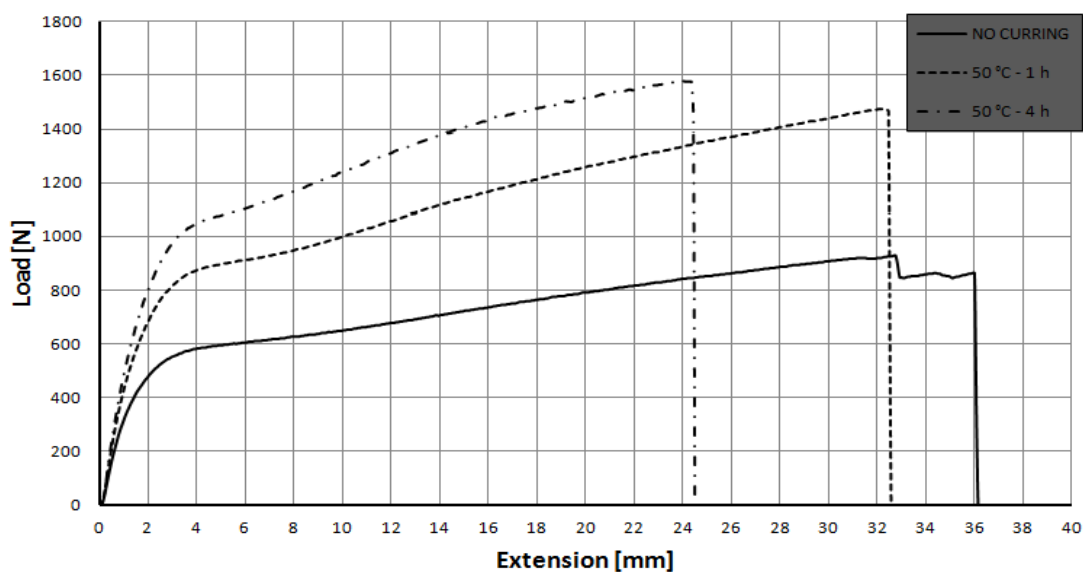
Διάγραμμα 42: Συγκριτικό διάγραμμα τιμών παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.



Διάγραμμα 43: Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού μείωσης παραμόρφωσης θραύσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για διάρκεια 1h και 4h, σε σχέση με το δοκίμιο άνευ δευτερογενούς θερμικής θεραπείας.

Το γράφημα φορτίου – επιμήκυνσης που ακολουθεί δείχνει την συμπεριφορά των δοκιμών σε εφελκυσμό, αφού έχει αρχικά προηγηθεί post-curing στους 50°C σε κλίβανο του εργαστηρίου για χρονικό διάστημα 1h και 4h. Για ακόμη μια φορά, η σύγκριση γίνεται σε σχέση με δοκίμιο το οποίο δεν έχει υποστεί

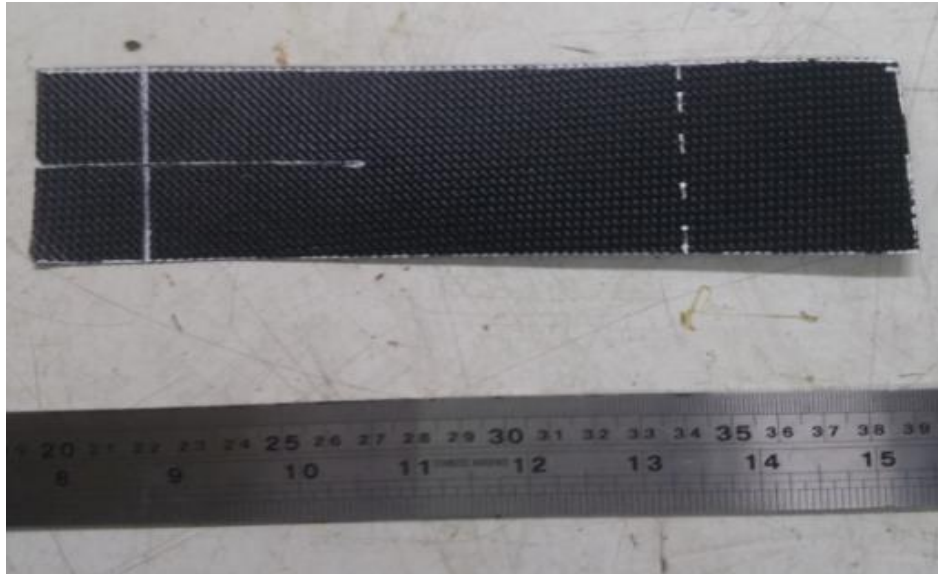
δευτερογενή θερμική θεραπεία, προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 44: Συγκεντρωτικό διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, 2% w.t. GNPs, κατόπιν επίδρασης post-curing στους 50°C για 1h και 4h.

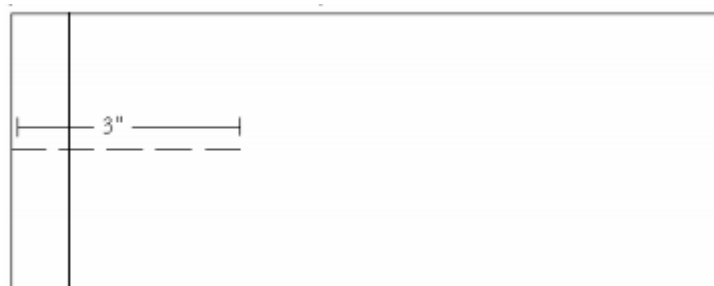
9.4.Δοκιμές διάσχισης

Για τις δοκιμές διασχίσεων αυτής της κατηγορίας δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τόσο καθαρής ρητίνης όσο και δοκίμια στα οποία έγινε προσθήκη νανοδομών γραφενίου (GNPs) σε περιεκτικότητα κατά βάρος 1%, 2%, 3%, 4% και 5%. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της δύναμης που απαιτείται για την διάσχιση υφασμάτων ενίσχυσης μέσω της διαδικασίας ρηγμάτωσης (tongue procedure) . Η ρηγμάτωση αφορά στην δημιουργία τομής με αποτέλεσμα την τελική ύπαρξη δύο χειλέων (trouser shaped) .



Εικόνα 69: Αρχική μορφή δοκιμίου προς δοκιμή διάσχιση.

Προκειμένου κάθε δοκίμιο να υποστεί διάσχιση είναι απαραίτητο να τηρηθούν ορισμένες προϋποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, βάσει του προτύπου ASTM D2261-96, τα δοκίμια κόβονται σε ορθογωνικό σχήμα. Επιλέγεται το κέντρο της μικρής διάστασης του υφάσματος ενίσχυσης και δημιουργείται μια τομή μήκους 75mm (3"). Είναι απαραίτητο να έχουμε απόλυτη ακρίβεια στην τομή που δημιουργούμε, διαφορετικά υπάρχει ενδεχόμενο να προκληθεί αλλοίωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Βέβαια, σημαντικό ακόμη είναι να σημειωθεί στο κάθε χείλος που δημιουργείται η απόσταση που απαιτείται προκειμένου να είναι σωστή η συγκράτηση του δοκιμίου στην μηχανική πρέσα Instron 4482. Το μήκος που επιλέγεται είναι στα 25 mm και είναι ιδανικό ώστε να έχουμε επιτυχή συγκράτηση κατά την άσκηση των εφελκυστικών δυνάμεων που απαιτούνται για την πλήρη διάσχιση των δοκιμίων.



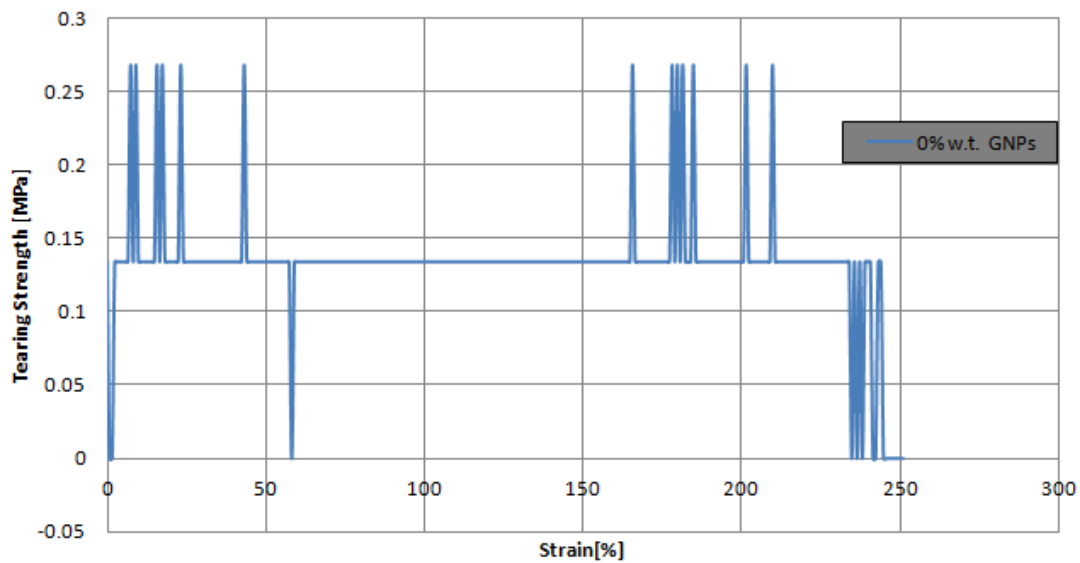
Εικόνα 70: Μορφή δοκιμίων προς διάσχιση. Σχεδιασμός τομής και περιοχής συγκράτησης.

Τέλος, είναι αρκετά σημαντικό να γίνει σωστή τοποθέτηση του κάθε δοκιμίου στην μηχανή δοκιμών. Πιο συγκεκριμένα είναι απαραίτητο η μεγάλη διάσταση του δοκιμίου να είναι παράλληλη στην εγκάρσια διεύθυνση της μηχανής (machine direction). Σχετικά με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν το λιγότερο 5 δοκιμές από κάθε κατηγορία δοκιμών βάσει της περιεκτικότητάς τους σε γραφενικές νανοπροσθήκες (GNPs) .

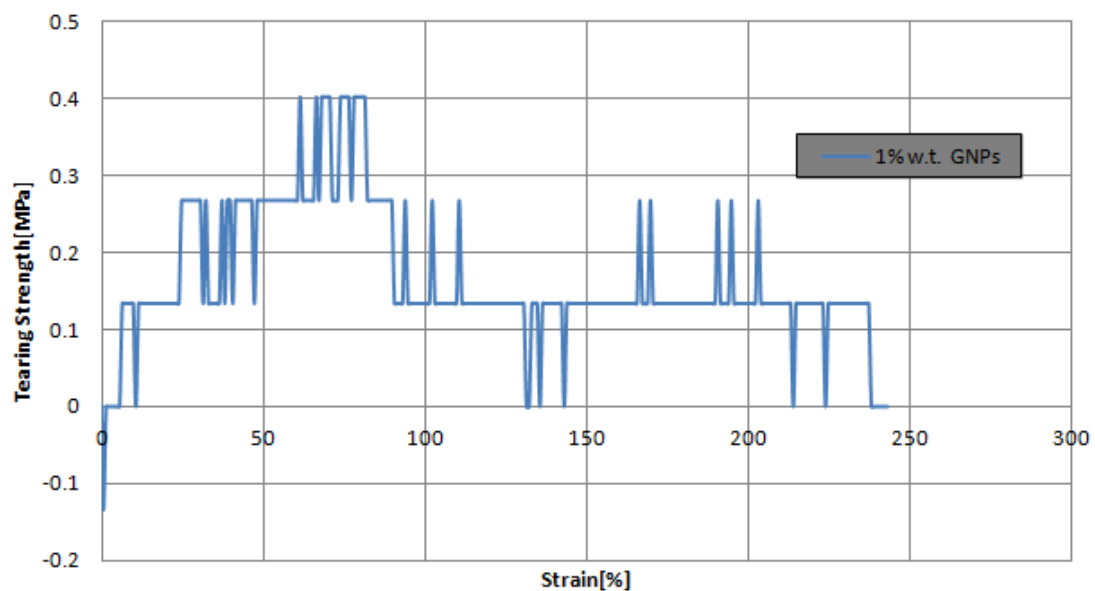
Προτού προχωρήσουμε στην διεξαγωγή των δοκιμών είναι αναγκαίο να προβούμε στις απαραίτητες ρυθμίσεις της μηχανικής πρέσας Instron 4482 της οποίας θα γίνει χρήση. Πιο συγκεκριμένα, πριν ξεκινήσει κάποια δοκιμή είναι βασικό να γίνει προσαρμογή της απόστασης μεταξύ των άκρων συγκράτησης στα 75 ± 1 mm. Επιπρόσθετα, σημαντικό είναι να γίνει ρύθμιση της απαιτούμενης ταχύτητας της κινητής κεφαλής της μηχανικής πρέσας μετρήσεων για την διάσχιση των δοκιμίων. Επιλέγεται λοιπόν, στα 50 ± 2 mm/min. [41]

Αφού εκτελέστηκε επαρκής αριθμός δοκιμών από κάθε τύπο δοκιμίου διαφορετικής περιεκτικότητας σε νανοδομές γραφενίου (GNPs) , λόγω πολύ καλής επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων θα παρουσιαστεί παρακάτω ένα αντιπροσωπευτικό δοκίμιο από κάθε κατηγορία.

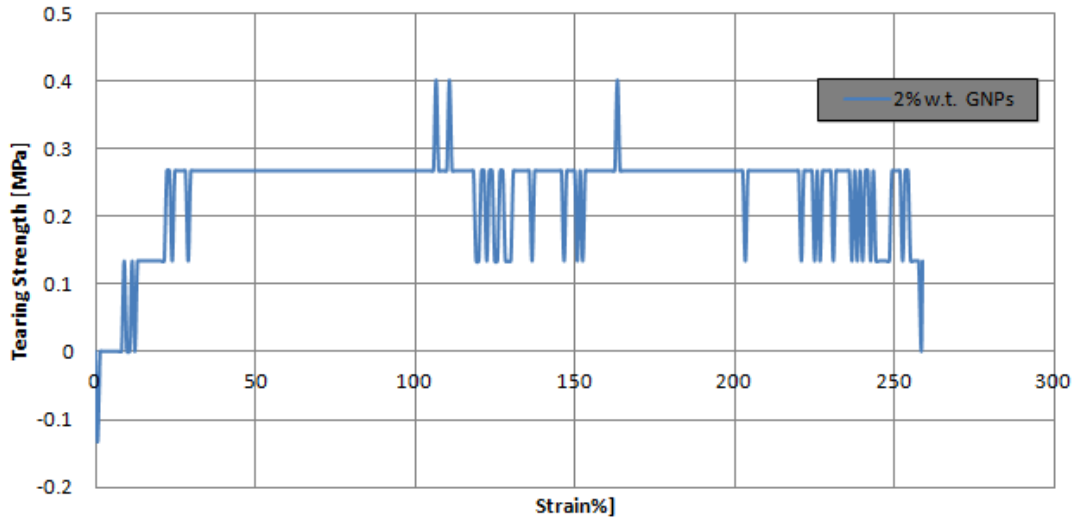
Τα διαγράμματα τάσης- παραμόρφωσης που ακολουθούν δείχνουν την συμπεριφορά των προαναφερθέντων μονοστρωματικών δοκιμίων σε πειραματική δοκιμή διάσχισης.



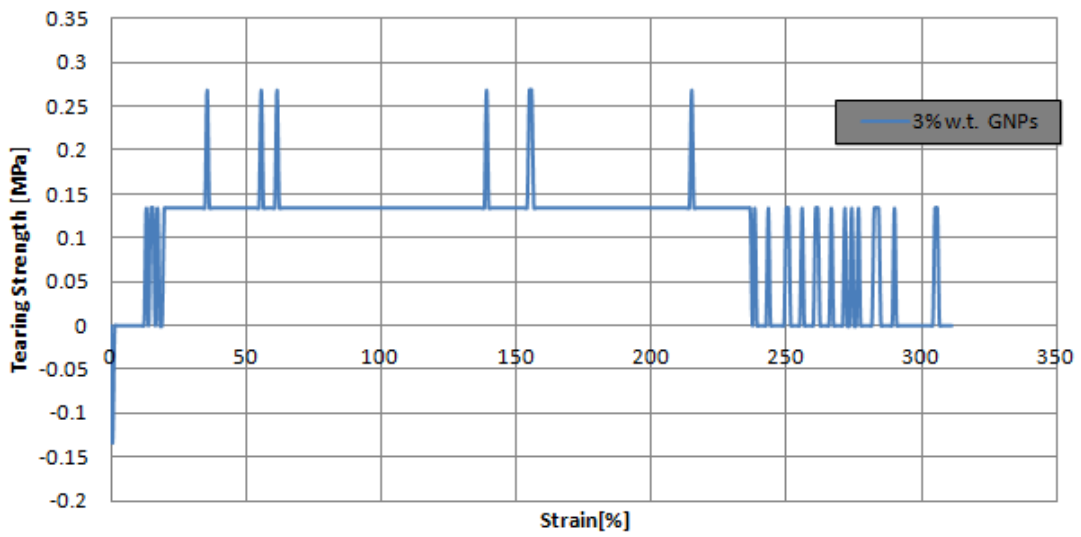
Διάγραμμα 45: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 0% w.t. GNPs.



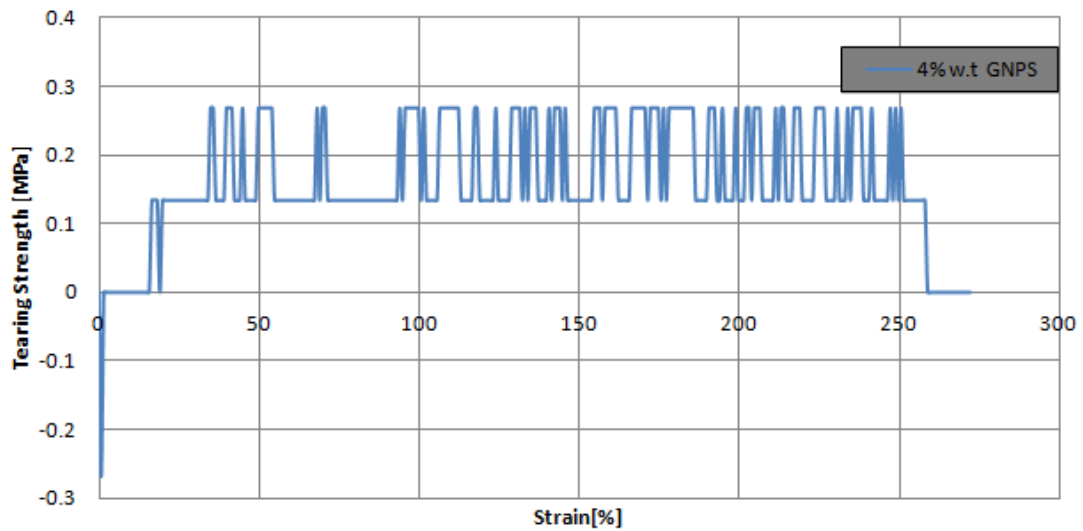
Διάγραμμα 46: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 1% w.t. GNPs.



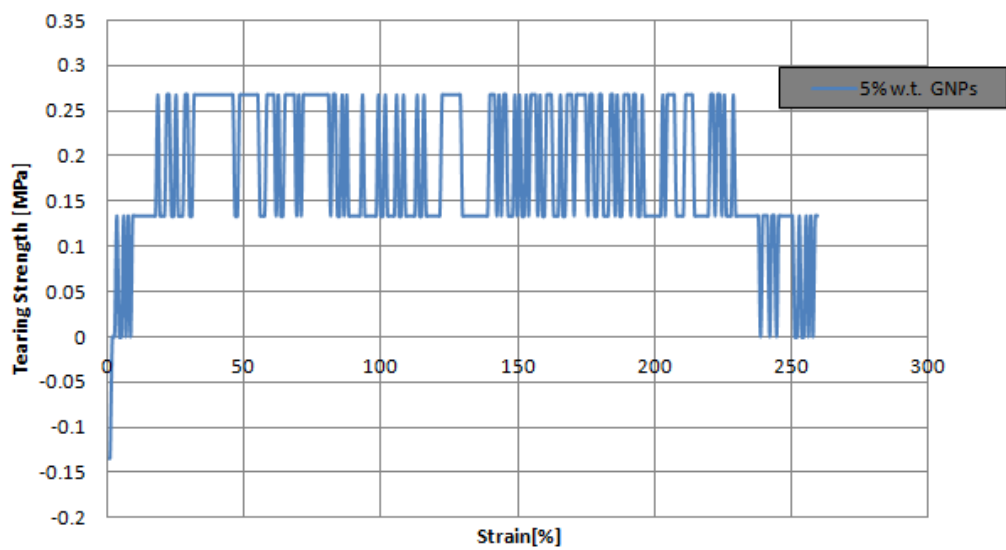
Διάγραμμα 47: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.



Διάγραμμα 48: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 3% w.t. GNPs.

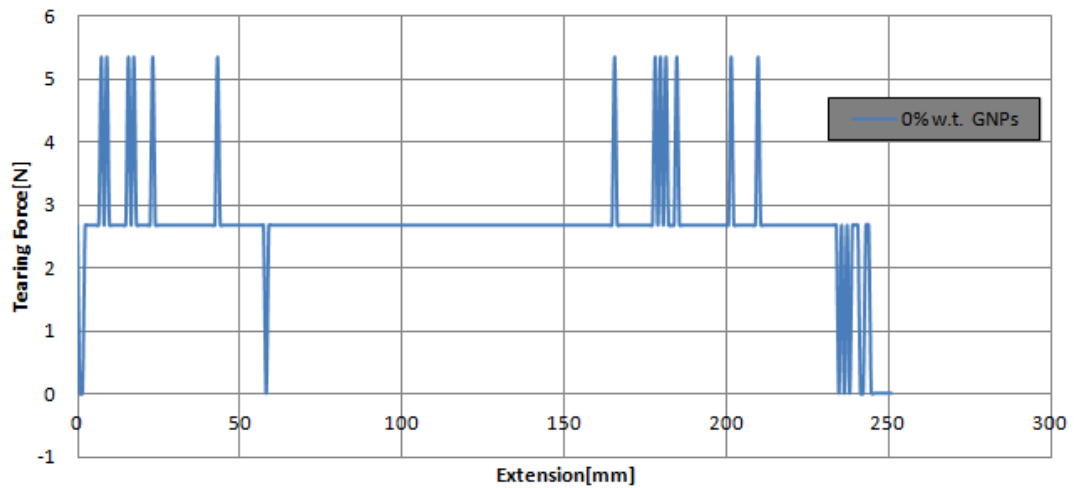


Διάγραμμα 49: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 4% w.t. GNPs.

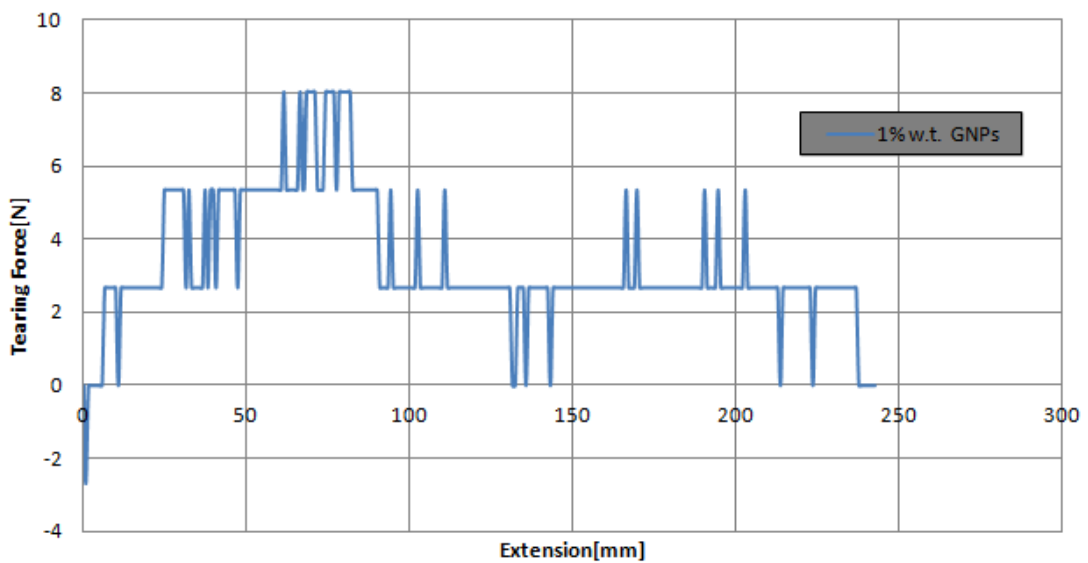


Διάγραμμα 50: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 5% w.t. GNPs.

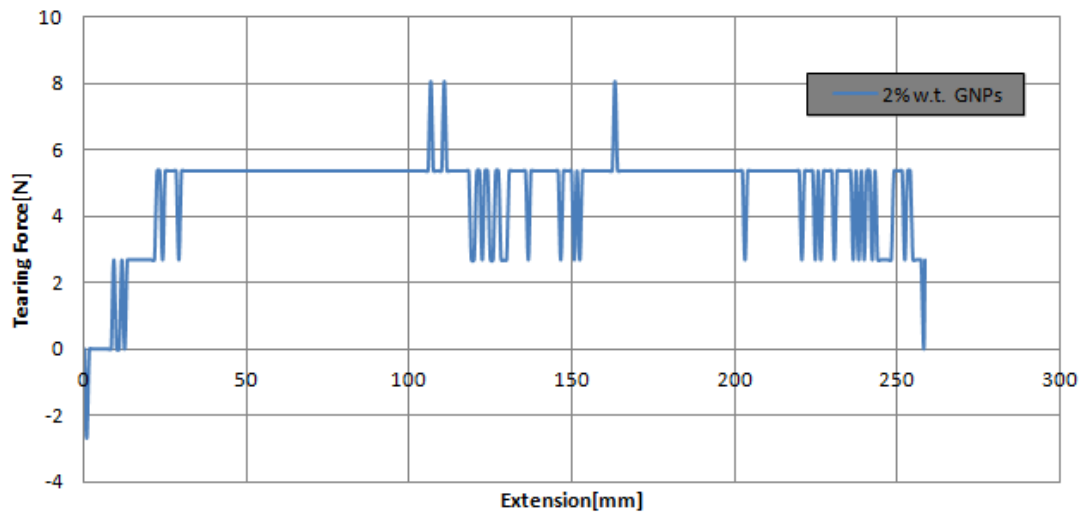
Τα διαγράμματα φορτίου- επιμήκυνσης που ακολουθούν δείχνουν την συμπεριφορά των προαναφερθέντων μονοστρωματικών δοκιμίων σε πειραματική δοκιμή διάσχισης.



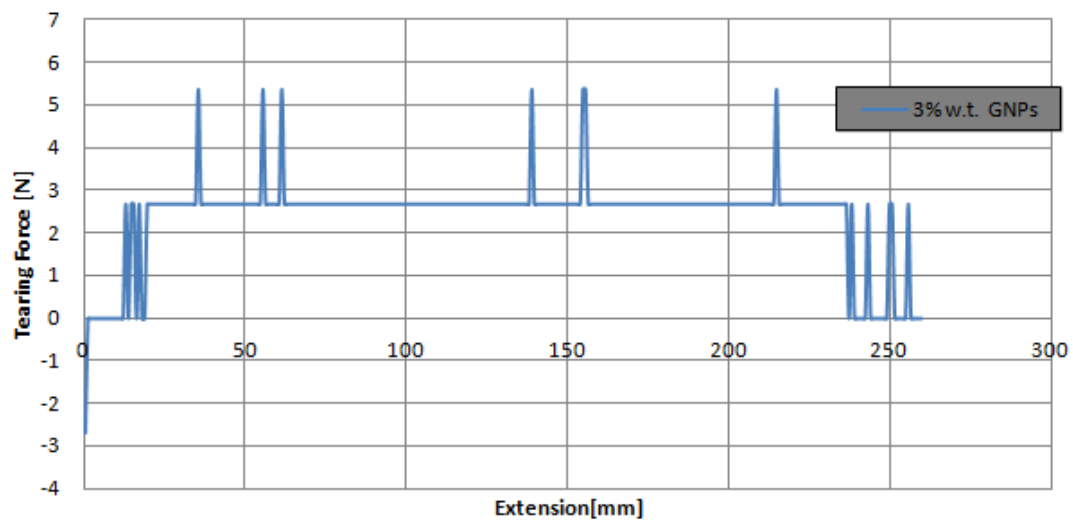
Διάγραμμα 51: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 0% w.t. GNPs.



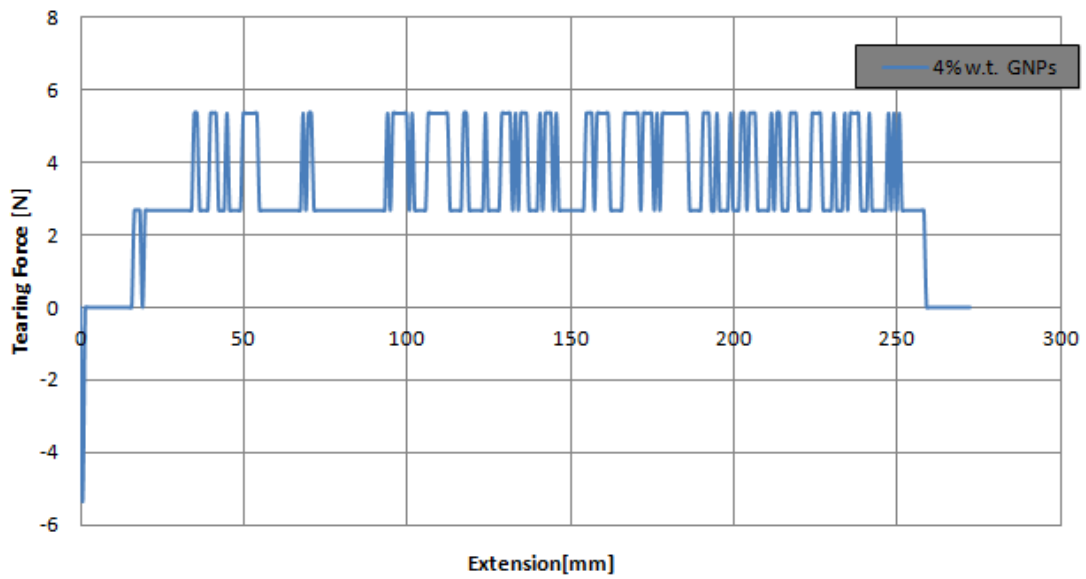
Διάγραμμα 52: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 1% w.t. GNPs.



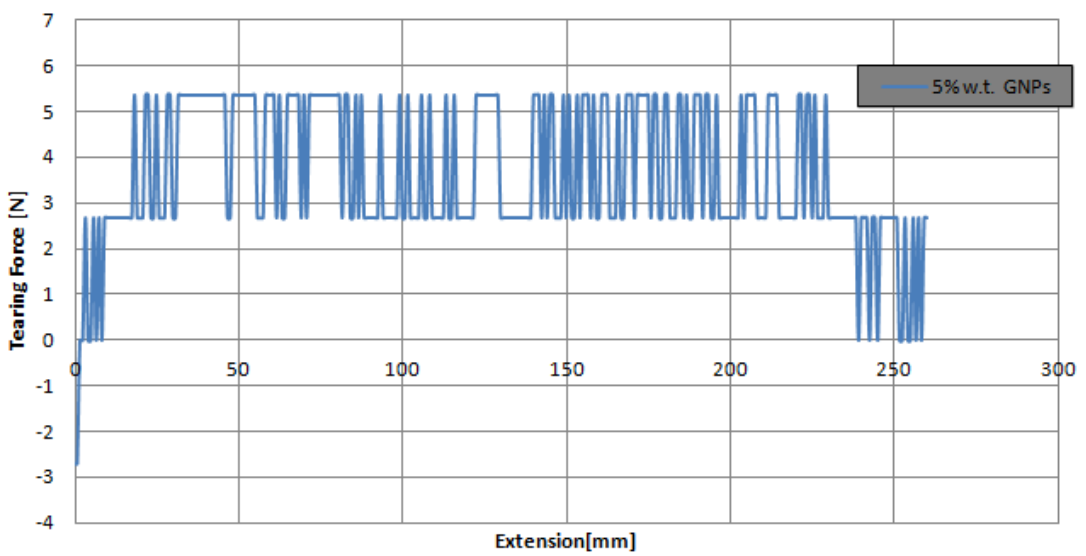
Διάγραμμα 53: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs.



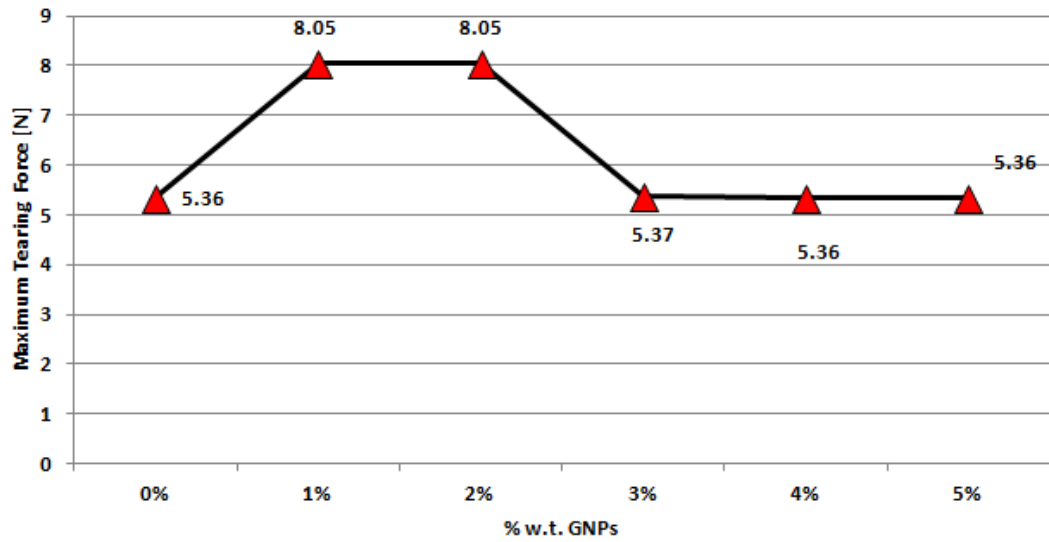
Διάγραμμα 54: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 3% w.t. GNPs.



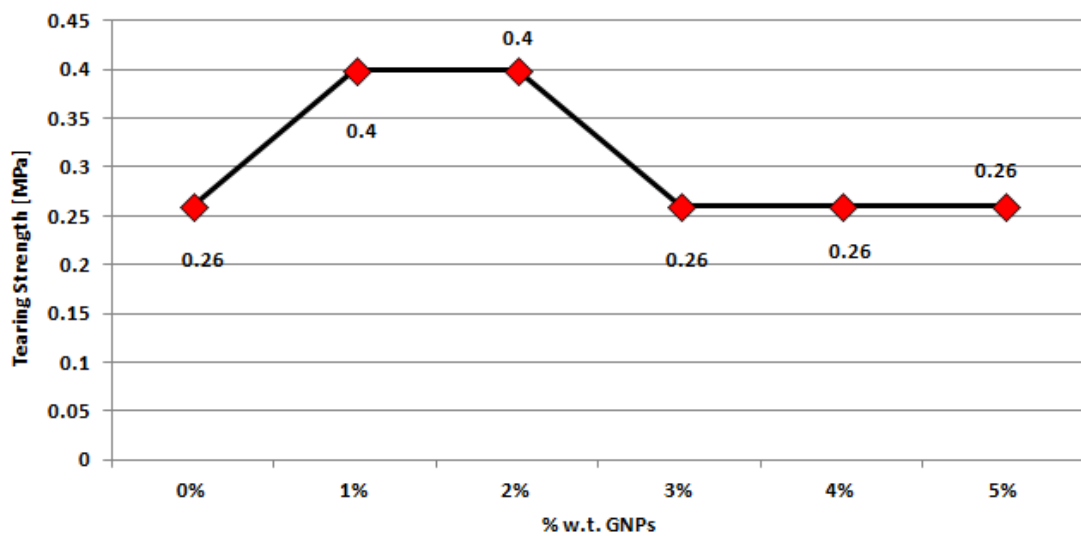
Διάγραμμα 55: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 4% w.t. GNPs.



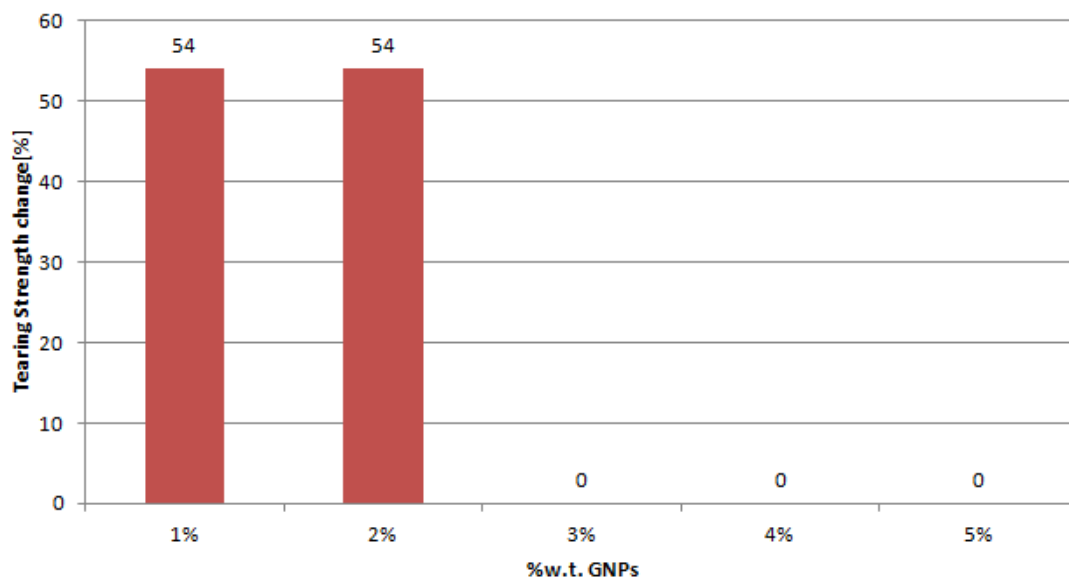
Διάγραμμα 56: Διάγραμμα φορτίου- επιμήκυνσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικού δοκιμίου εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, 5% w.t. GNPs.



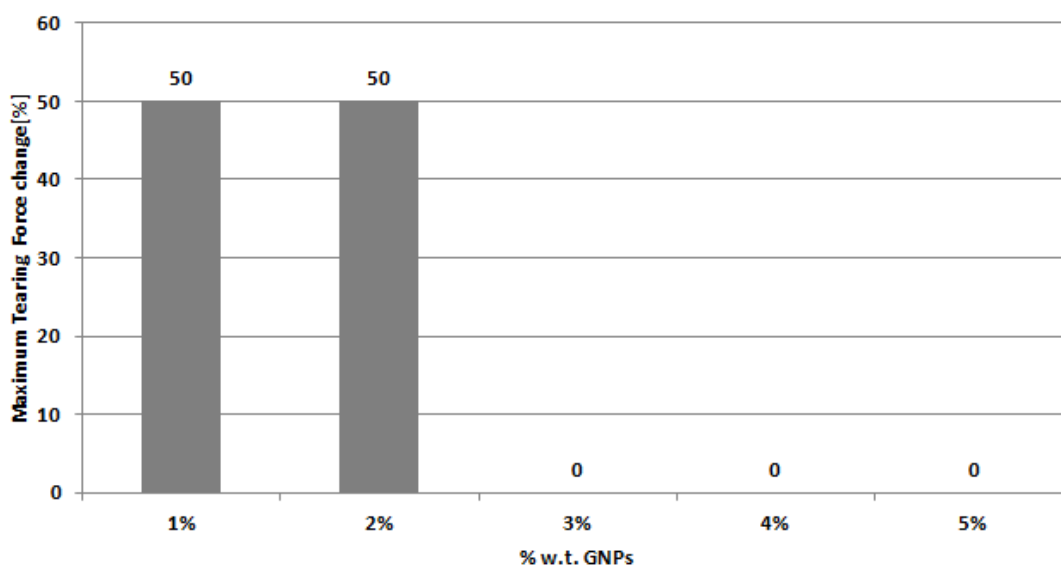
Διάγραμμα 57: Συγκριτικό γράφημα μέγιστων τιμών φορτίου διάσχισης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με την % w.t. GNPs (0%w.t. -5%w.t.).



Διάγραμμα 58: Συγκριτικό γράφημα μέγιστων τιμών τάσης διάσχισης μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, σε σχέση με την % w.t. GNPs (0%w.t. -5%w.t.).



Διάγραμμα 59: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της μέγιστης τάσης δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με το δοκίμιο άνευ προσθήκης γραφενικών νανοδομών.



Διάγραμμα 60: Διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής του μέγιστου φορτίου δοκιμής σε διάσχιση μονοστρωματικών δοκιμών εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης σε σχέση με το δοκίμιο άνευ προσθήκης γραφενικών νανοδομών.

10.Συμπεράσματα

Παρακάτω συνοψίζονται τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία:

- Σε σχέση με τις πειραματικές δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:
 - Στα μονοστρωματικά δοκίμια εποξικής ρητίνης /υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, περιεκτικότητας κατά βάρος σε νανοδομές γραφενίου από 1% έως 5% (% w.t.GNPs), παρατηρήθηκε αύξηση των επιδόσεων αυξανόμενου του ποσοστού GNPs. Ειδικότερα η ποσοστιαία αύξηση της UTS στην περίπτωση των 1% w.t. GNPs, 2% w.t. GNPs και 4% w.t. GNPs ξεπέρασε το 100%.
 - Στα μονοστρωματικά δοκίμια εποξικής ρητίνης /υαλοϋφάσματος πλέξης Twill 2x2, περιεκτικότητας κατά βάρος σε νανοδομές γραφενίου από 1% έως 5% (% w.t.GNPs), παρατηρήθηκε διαφορετική συμπεριφορά. Πιο συγκεκριμένα, με εξαίρεση την περίπτωση του 1% w.t. GNPs, οι υπόλοιπες περιεκτικότητες σημείωσαν αρνητικές ποσοστιαίες μεταβολές της UTS.
- Σε σχέση με τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού κατόπιν δευτερογενούς θερμικής θεραπείας (post-curing), μπορούμε να συνοψίσουμε τα ακόλουθα:
 - Γενικότερα, έγινε επιλογή μονοστρωματικών δοκιμίων εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος πλέξης τόσο Twill όσο και μονοδιευθυντικής πλέξης, 2% w.t. GNPs, τα οποία αφού υπέστησαν post-curing σε διαφορετικές συνθήκες δοκιμάστηκαν σε μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού.
 - Τα δοκίμια μονοδιευθυντικής πλέξης δέχτηκαν post-curing σε συνθήκες θερμοκρασίας (50°C, 80°C, 100°C, 120°C) και χρονικής διάρκειας (4h, 8h, 18h, 24h). Κάνοντας μια σύνοψη θα μπορούσαν να αναφερθούν τα εξής:

- ✓ Τα δοκίμια στα οποία επεβλήθη post-curing στους 50°C για 4 διαφορετικά χρονικά διαστήματα παραμονής σε εργαστηριακό κλίβανο (4h, 8h, 18h, 24h) παρουσίασαν αυξημένες επιδόσεις σε σχέση με την συμπεριφορά τους σε εφελκυσμό. Ειδικότερα, σημειώθηκε αύξηση της UTS. Το ίδιο παρατηρήθηκε και για την παραμόρφωση θραύσης.
- ✓ Τα δοκίμια στα οποία επεβλήθη post-curing τόσο στους 80°C όσο και τους 100°C για τα προαναφερθέντα χρονικά διαστήματα παραμονής σε εργαστηριακό κλίβανο παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα, σημειώθηκε αύξηση της UTS. Βέβαια, δεν παρατηρήθηκε το ίδιο με την παραμόρφωση θραύσης, η οποία σημείωσε πτώση σε σχέση με το δοκίμιο που δεν υπέστη δευτερογενή θερμική θεραπεία.
- ✓ Τα δοκίμια, στα οποία επεβλήθη post-curing στους 120°C, για τα προαναφερθέντα χρονικά διαστήματα, σε εργαστηριακό κλίβανο παρουσίασαν όχι ιδιαίτερα αυξημένες επιδόσεις κατά την εφαρμογή δοκιμών εφελκυσμού. Ειδικότερα, δεν παρατηρήθηκε αύξηση της UTS σε όλα τα δοκίμια, αντιθέτως υπήρχαν τόσο μειώσεις(24h,-49,19%) όσο και μηδαμινές διαφοροποιήσεις σε σχέση με την μη επιβολή post-curing (8h,+5,18%) . Και σε αυτήν την κατηγορία συνθηκών post-curing, σημειώθηκε μείωση της παραμόρφωσης.
- ✓ Τέλος, παρατηρώντας τα συγκριτικά διαγράμματα θερμοκρασίας και διάρκειας post-curing, παρατηρείται πως σε γενικές γραμμές αύξηση του χρόνου διάρκειας παραμονής στον εργαστηριακό κλίβανο, οδηγεί σε μείωση γενικά του ποσοστού αύξησης της μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό. Αυτό βέβαια δεν συνεπάγεται μειωμένες επιδόσεις των δοκιμών υπό εξέταση. Απλά, αν παρατηρηθεί για παράδειγμα η ποσοστιαία αύξηση της UTS στα δοκίμια που υπέστησαν δευτερογενή θερμική

θεραπεία στους 120°C φαίνεται πως έχει μια φθίνουσα τάση με την αύξηση της χρονικής διάρκειας επιβολής post-curing, φτάνοντας ακόμη και να υποχωρήσει σε αρνητικά ποσοστά μεταβολής. Επιπλέον, με την επιλογή αύξησης κάθε φορά την θερμοκρασίας από 50°C στους 120°C παρατηρήθηκε μια γενικότερη υποχώρηση των ποσοστιαίων αυξήσεων της UTS, σημειώνοντας αποκλίσεις, χωρίς αυτό βέβαια να σημαίνει πως η επιβολή post-curing δεν επέδρασε θετικά. Μόνο για επιβολή θερμικής θεραπείας σε θερμοκρασία 50°C υπάρχει ομοιομορφία στις ποσοστιαίες αυξήσεις της UTS για κάθε χρονικό διάστημα παραμονής στον εργαστηριακό κλίβανο. Το γεγονός αυτό βέβαια είναι εύλογο, αν ληφθεί υπόψη το ότι η θερμοκρασία θερμικής αντοχής της εποξικής ρητίνης της οποίας έγινε χρήση ανέρχεται στους 51°C, βάσει του κατασκευαστή.

- Τα δοκίμια πλέξης Twill 2x2, δέχτηκαν δευτερογενή θερμική θεραπεία σε συνθήκες θερμοκρασίας 50°C για χρονική διάρκεια 1 και 4 ωρών και παρουσίασαν ιδιαίτερα αυξημένες επιδόσεις, μετά την δοκιμή τους σε εφελκυσμό με την UTS να ξεπερνά σε ποσοστιαία αύξηση το 70%.
- Σε σχέση με τις δοκιμές διάσχισης παρατηρήθηκαν τα παρακάτω:
- Μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης γραφενικών νανοδομών σε δοκιμές διάσχισης και για το λόγο αυτό παρασκευάστηκαν μονοστρωματικά δοκίμια εποξικής ρητίνης/υαλοϋφάσματος μονοδιευθυντικής πλέξης, με περιεκτικότητα κατά βάρος σε GNPs από 1% έως 5% (% w.t. GNPs). Τα δοκίμια σημείωσαν σχετικά καλές επιδόσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ποσοστιαία αύξηση φορτίου και τάσης της τάξης του 50% και 54% αντίστοιχα για τις περιεκτικότητες 1% w.t. GNPs και 2% w.t. GNPs. Οι υπόλοιπες περιεκτικότητες του 3%, 4% και 5% w.t. GNPs παρουσίασαν σταθερή επίδοση σε σχέση με το δοκίμιο μηδενικής προσθήκης σε νανοδομές γραφενίου.

- Από το σύνολο των ελέγχων και των πειραματικών διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτει τελικά το συμπέρασμα ότι η προσθήκη σε νανοδομές γραφενίου σε ποσοστό 2%, για κάθε τύπο πλέξης ενίσχυσης υαλοϋφάσματος, δείχνει να επιδρά θετικότερα όσον αφορά στην επίδοση των μονοστρωματικών σύνθετων υλικών. Επιπρόσθετα, δευτερογενής θερμική θεραπεία στους 50°C αποδείχτηκε ιδανικότερη, σχετικά με τις επιδόσεις σε δοκιμές εφελκυσμού.

11.Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Μετά από την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και την εξαγωγή φυσικά των τελικών συμπερασμάτων είναι εφικτή η παράθεση περαιτέρω προτάσεων διερεύνησης όσον αφορά σε μελλοντική έρευνα.

Ειδικότερα, θα μπορούσε να διερευνηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα των εν λόγω σύνθετων υλικών και πιο συγκεκριμένα η επίδραση του ποσοστού του γραφενίου σε αυτήν.

Επιπρόσθετα, θα ήταν επιθυμητό να διερευνηθεί η επίδραση της προσθήκης άλλων γραφιτικών/γραφενικών μικρο/νανοδομών (όπως των Graphene Nanosheets και μικρο/νανοκρυσταλλινών γραφίτη).

Βέβαια, θα ήταν εξίσου σημαντικό να γίνει πλήρης διερεύνηση της επίδρασης γραφενικών νανοδομών (GNPs-Graphene Nanoplatelets) στο βέλτιστο προφίλ curing, καθώς επίσης και στις μηχανικές ιδιότητες προεμποτισμένων υφασμάτων με την μέθοδο Vacuum Infusion, με σκοπό την παρασκευή σύνθετων μονοστρωματικών υλικών σε συνθήκες κενού.

Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Παντελής, 1996, *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά: Δομή-Ιδιότητες-Τεχνολογία-Εφαρμογές*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [2] Ε. Δρακόπουλος, 2010, *Κατασκευή-Μοντελοποίηση και μελέτη της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένης με νανοσωλήνες άνθρακα*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [3] 'Λινοθώρακας, Ένα αρχαιολογικό μυστήριο.', viewed 05 May 2016, <<https://koryvantesstudies.org/studies-in-greek-language/page102-2/>>.
- [4] 'Η ιστορία του χαρτιού.', viewed 05 May 2016, <<https://sites.google.com/site/paperfil/Home/paper-history-1>>.
- [5] R.-M. Wang, S.-R. Zheng & Y.-P. Zheng, 2011, *Polymer matrix composites and technology*, 1st edn, Woodhead Publishing, China.
- [6] I. M. Daniel & O. Ishai, 2006, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, 2nd edn, Oxford University Press, New York.
- [7] Α. Μπόγρης, 2010, *Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών μετά από Επαναληπτική Κρούση*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [8] M. W. Hyer, 1998, *STRESS ANALYSIS of Fiber-Reinforced COMPOSITE Materials*, McGraw-Hill International Editions, Singapore.
- [9] Ε. Καρούτζογλου, 2014, *Μελέτη των ελαστικών σταθερών ινώδους σύνθετου υλικού με χρήση του επταφασικού μοντέλου με ενδιάμεση φάση*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ.
- [10] 'Net Composites', viewed 15 May 2016, <<http://netcomposites.com/guide-tools/guide>>.

- [11] M. A. Boyle , C. J. Martin & J. D. Neuner, 2001, *Epoxy Resins*, ASM International, vol. 21, p. 78-89.
- [12] ‘*What are the differences between Meta-Aramid and Para-Aramid yarns?*’, viewed on 19 May 2016, <
<http://www.servicethread.com/blog/what-are-the-differences-between-meta-aramid-and-para-aramid-yarns>>.
- [13] Ε. Μυστηρίδου, 2011, *Μέθοδοι Μορφοποίησης Υφασμάτων Ενίσχυσης Βασισμένων σε Τεχνικές Νηματουργίας*, Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [14] ‘*Design & Technology: Fabrics*’, viewed 25 May 2016, <
<http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/design/textiles/fabricsrev1.shtml> >
- [15] Γ. Μαθιουδάκης, 2013, *Ανάπτυξη ,Χαρακτηρισμός και Λειτουργική Συμπεριφορά Σύνθετων Συστημάτων Πολυμερικής Μήτρας-Νανοσωματιδίων Οξειδίου του Ψευδαργύρου(ZnO) και Καρβιδίου του Τιτανίου(TiC)*, Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [16] S. G. Advani & K.-T. Hsiao, 2012, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*, Woodhead Publishing Limited.
- [17] J. D. Menczel & R. B. Prime, 2009, *Thermal Analysis of Polymers, Fundamental and Applications*’, Wiley, New York.
- [18] D. D. L. Chung, 1994, *Carbon Fiber Composites*, Butterworth-Heinemann.
- [19] Α. Κρέτσης, 2013, *Διερεύνηση της υποστήριξης με λογισμικό κατασκευής περηνγίου υδροστροβίλου Francis από πολύστρωτα σύνθετα υλικά με τεχνική Vacuum Infusion*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π..
- [20] Γ. Παπανικολάου & Δ. Μουζάκης, 2007, *Σύνθετα Υλικά*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [21] ‘*GFRP- Glass Fiber Reinforced Polymer*’, viewed 02 June 2016, <
<https://www.strombergarchitectural.com/materials/gfrp>>
- [22] G. Brady, H. Clauser & J. Vaccari, 2002, *Materials Handbook*, 15th edn, McGraw-Hill Professional.

- [23] D. Bhattacharyya & S. Fakirov, 2012, *Synthetic Polymer-Polymer Composites*, Hanser Publishers, Munich.
- [24] M. A. Masuelli, ‘*Introduction of Fibre-Reinforced Polymers-Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes*’, viewed 10 June 2016, <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/41941.pdf>>
- [25] Α. Κρομμύδας, 2016, *Επίδραση νανοδομών γραφενίου στις μηχανικές ιδιότητες και την μικροδομή αλουμινίου καθαρότητας 96,66%*, Διπλωματική Εργασία, Μηχ. Μηχανικών ΕΜΠ.
- [26] V. Geogarakilas, 2014, *Functionalization of Graphene*, Wiley-VCH.
- [27] S. Alwarappan & A. Kumar, 2014, *Graphene-Based Materials, Science and Technology*, CRC Press.
- [28] E. Y. Andrei, G. Li & X. Du, 2012, ‘*Electronic properties of graphene: a perspective from scanning tunneling microscopy and magnetotransport*’, vol. 75.
- [29] Q. Zheng & J. -K. Kim, 2015, *Graphene for transparent conductors- Synthesis, Properties and Applications*, Springer.
- [30] V. Shakalova & A. B. Kaiser, 2014, *Graphene: Properties, preparation, characterisation and devices*, Woodhead Publishing.
- [31] STREM, ‘*Graphene Nanoplatelets*’, viewed on 25 June 2016, <https://secure.strem.com/uploads/resources/documents/graphene_nanoplatelets_copy1.pdf>.
- [32] R. M. Jones, 1999, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd edn, Taylor & Francis.
- [33] P. K. Mallick, 2007, ‘*FIBER-REINFORCED COMPOSITES: Materials, Manufacturing and Properties*’, 3rd edn, CRC Press.
- [34] Α. Ανδρέου, ‘*EPOXY SYSTEM ES 35A/B*’, viewed on 28 June 2016, <<http://www.aandreou.gr>>.
- [35] Alfa Aesar, ‘*Nanoparticles (tube, powder, etc.)*’, viewed on 28 June 2016, <<https://www.alfa.com/en/catalog/047132/>>

- [36] ASTM D 3776 – 96, 1996 (reapproved 2002), *Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of fabric*, ASTM International.
- [37] ASTM D 1577 – 01, 2001, *Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers*, ASTM International.
- [38] Dräger Safety AG, ‘*Guide for selection and use of filtering devices*’, viewed on 30 July 2016,
<http://www.draeger.com/sites/assets/PublishingImages/Products/com_xplore_1700/Attachments/9045782_AB_Selection_Guide_Atemschutz_en-121211-fin.pdf>.
- [39]Α. Κουντούρης, 2009, *ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛ(ΤΥΠΟΥ SANDWICH) ΥΠΟ ΣΥΝΘΕΤΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ*, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π.
- [40] ASTM D3039/D3039M-00, 2000, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM International.
- [41] ASTM D2261-96, 2002, *Standard Test Method for Tearing Strength of Fabrics by the Tongue (Single Rip) Procedure (Constant-Rate-of-Extension Tensile Testing Machine)*, ASTM International.

