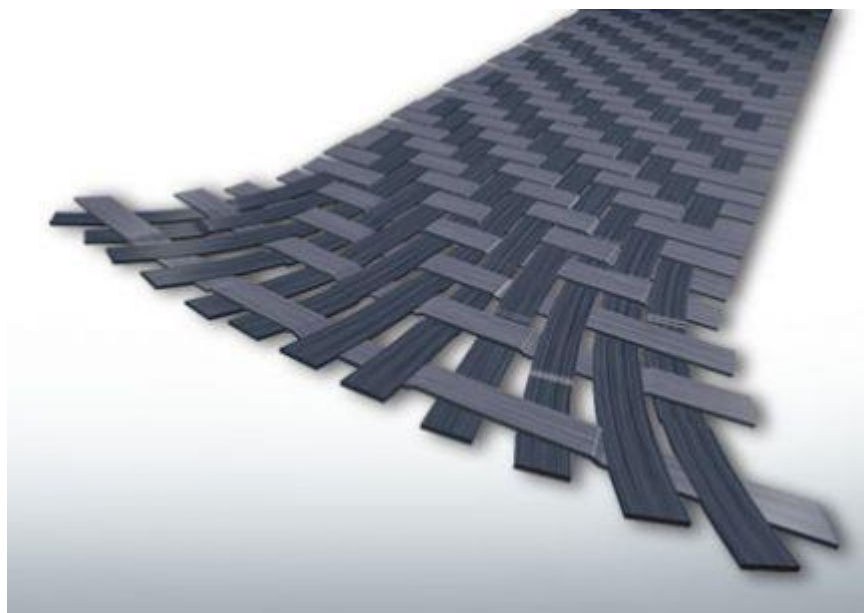




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Ανάπτυξη και χαρακτηρισμός σύνθετων δισδιάστατων
επιφανειών**



Βασίλειος Καραμιχάλης

Επιβλέπων Καθηγητής: Χριστοφόρου Ευάγγελος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν τα χρόνια της φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Χριστοφόρου Ευάγγελο που μου έδωσε την ευκαιρία να αναπτύξω τη διπλωματική εργασία, και την διδάκτορα κ. Βουρνα Πολυξένη, για την καθοδήγησή και υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας.

Τέλος, πρέπει να ευχαριστήσω, για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου προσέφερε, τον κ. Στεργίου Βασίλειο καθώς και την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία, προκειμένου να μπορέσω να πραγματοποιήσω τα πειράματα και ορισμένες εκ των μετρήσεων στο εργαστήριο προηγμένων συνθέτων υλικών της εταιρείας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο διακριτά μέρη: το θεωρητικό και το πειραματικό. Το θεωρητικό μέρος απαρτίζεται από τα κεφάλαια 1-3 και το πειραματικό από τα κεφάλαια 4 και 5.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια ανασκόπηση στον κόσμο των συνθέτων υλικών, ξεκινώντας από μια μικρή ιστορική αναδρομή και συνεχίζοντας με τους διάφορους τρόπους ταξινόμησή τους.

Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται οι ίνες που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την ενίσχυση της εκάστοτε μήτρας και τη δημιουργία συνθέτων υλικών με συγκεκριμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες και ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, την διάταξη πλέξης τους, καθώς και την ενίσχυση που προσφέρουν. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται εκτενέστερη περιγραφή των ινών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως πολυμερικές μήτρες για την κατασκευή συνθέτων υλικών με συγκεκριμένες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα, και σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτενέστερη περιγραφή των ρητινών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής, αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται ενδελεχής περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας (υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, πειραματική διαδικασία, οργανολογία) που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή αξιόπιστων πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 5 εξετάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από την έρευνα και διεξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα (αποτελέσματα χαρακτηρισμού υλικών και μηχανικών ιδιοτήτων, διεξαγωγή αντιπροσωπευτικών γραφικών παραστάσεων).

ABSTRACT

The present dissertation consists of two distinct parts: a theoretical one and an experimental one. The theoretical part consists of chapters 1-3 and the experimental part consists of the chapters 4 and 5.

Chapter 1 gives an overview of the world of composite materials, starting with a brief history and continuing with the various ways of classification.

Chapter 2 analyzes the fibers used worldwide to enhance specific matrices and creating composite materials with specific mechanical and thermal properties. The fibers are classified in categories according to their size, their weaving and the support they offer. More specifically, there is an extensive description of fibers used in the experimental procedure of this diploma.

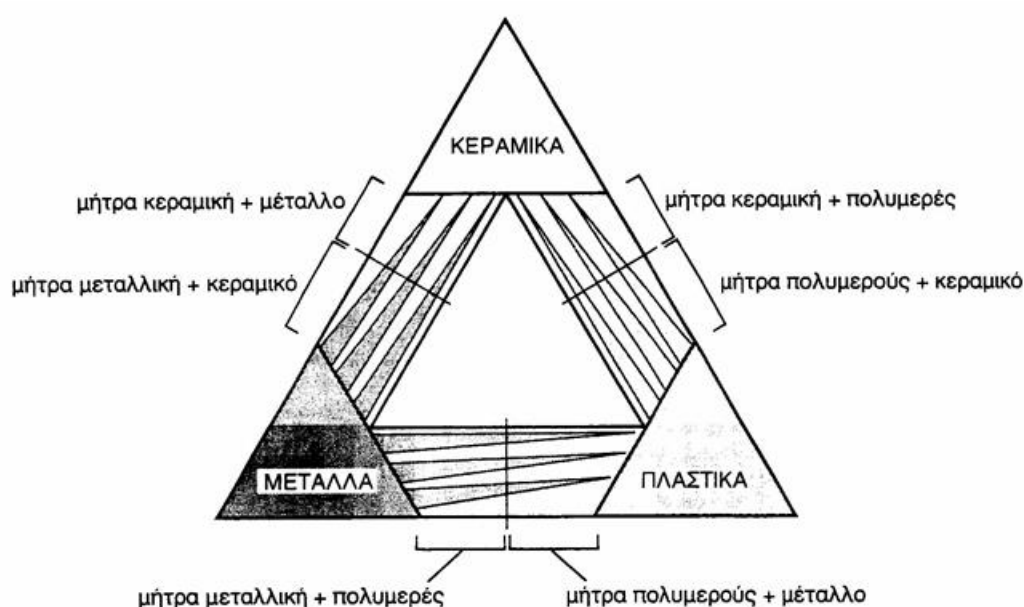
In Chapter 3 the resins used as polymeric matrices for the manufacture of composite materials with specific mechanical and thermal properties are illustrated. More specifically, in this chapter an extensive description of the resins used in the experimental procedure of this diploma, respectively carried out.

In chapter 4 a thorough description of the experimental procedure (materials used, experimental procedure, instrumentation) followed in order to conduct reliable experimental results is presented.

Chapter 5 examines the results obtained and the appropriate conclusions carried out (results of material characterization and mechanical properties, conducting representative graphs) from the entire research.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα μέχρι σήμερα έχει επηρεάσει σημαντικά μεταξύ άλλων τη βιομηχανία των υλικών. Τα υλικά ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες: τα μέταλλα, τα κεραμικά και τα πλαστικά (εικόνα 1-1). Υπάρχουν όμως υλικά όπως το ξύλο, τα οστά ή το οπλισμένο σκυρόδεμα, που δεν μπορούν να καταταχθούν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες [1-4]. Η ανάγκη κατηγοριοποίησης αυτού του είδους των υλικών, σε συνδυασμό με την ανάγκη για κατασκευές υψηλών προδιαγραφών σε συνδυασμό με την εξέλιξη της επιστήμης και τεχνολογίας των υλικών έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών και στη δημιουργία μιας νέας οικογένειας, αυτής των σύνθετων υλικών (εικόνα 1-1).



Εικόνα 0: Συνδυασμός των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.

Ως σύνθετο μπορεί να ορισθεί το υλικό εκείνο το οποίο προκύπτει από την ανάμιξη με φυσικό ή μηχανικό τρόπο, σε μακροσκοπική κλίμακα δύο ή περισσότερων ευδιάκριτων, μηχανικώς διαχωριζομένων και μη διαλυτών του ενός στο άλλο υλικών [1-5]. Οι τελικές ιδιότητες (μηχανικές και φυσικές) του σύνθετου υλικού παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις από αυτές των επιμέρους υλικών που το αποτελούν [1-5]. Ανάλογα με τις τεχνικές ανάμιξης των επιμέρους υλικών, αλλά και από την κατάλληλη επιλογή τους, μπορεί να

κατασκευαστεί ένα σύνθετο με επιθυμητές τελικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, το οποίο θα δύναται να έχει στοχευμένες τεχνολογικές, κατασκευαστικές ή βιομηχανικές εφαρμογές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	V
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	XIII
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	14
1.1 Ιστορική ανασκόπηση.....	14
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.....	16
1.2.1 Φάσεις σύνθετων υλικών.....	16
1.2.2 Τρόποι ταξινόμησης	17
<i>1.2.2.1 Ταξινόμηση βάσει του τύπου της μήτρας που αποτελεί το σύνθετο υλικό</i> 17	
<i>1.2.2.2 Ταξινόμηση βάσει του τύπου του εγκλείσματος</i>	20
<i>1.2.2.3 Ταξινόμηση βάσει της τάξης μεγέθους της ενίσχυσης</i>	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΝΩΔΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	24
2.1 Εισαγωγή	24
2.2 Ίνες γυαλιού.....	25
2.2.1 Τύποι ινών γυαλιού	27
<i>2.2.1.1 E-βαλοϋφασμα</i>	27
<i>2.2.1.2 S-βαλοϋφασμα</i>	28

2.2.1.3	<i>C-υαλοϋφασμα</i>	28
2.2.2	Παραγωγή ινών γυαλιού.....	28
2.3	Ίνες άνθρακα.....	29
2.3.1.1	<i>Παραγωγή ινών άνθρακα</i>	31
2.4	Ίνες αραμιδίου (Kevlar).....	32
2.4.1.1	<i>Παραγωγή πολυαμιδίων</i>	34
2.5	Σύγκριση ινών.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	ΕΠΟΞΙΔΕΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	37
3.1	Εισαγωγή	37
3.2	Ιδιότητες- Εφαρμογές	38
3.3	Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες Άνθρακα	40
3.4	Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες Γυαλιού.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	46
4.1	Εισαγωγή	46
4.2	Υλικά	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	55
5.1	Δοκιμές εφελκυσμού.....	55
5.1.1	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	55
5.1.2	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	60
5.1.3	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης.....	63
5.1.4	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (προεμποτισμένο).....	64

5.1.5	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικάμεινες γυαλιού (προεμποτισμένο).....	68
5.1.6	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (μέθοδος infusion).....	70
5.1.7	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (μέθοδος infusion).....	72
5.2	Εικόνες στερεοσκοπίου.....	73
5.2.1	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης	74
5.2.2	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικάμεινες αραμιδίου, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης.....	74
5.2.3	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικάμεινες άνθρακα	75
5.2.4	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικάμεινες γυαλιού	75
5.3	Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης.....	76
5.3.1	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης	77
5.3.2	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης.....	78
5.3.3	Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικάμεινες άνθρακα	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ		80
6.1	Συμπεράσματα	80
6.2	Μελλοντική έρευνα.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΦΟΡΕΣ		82

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 1-1: Συνδυασμός των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.</i>	<i>iii</i>
<i>Εικόνα 1-2: Ιστορία των υλικών.</i>	<i>14</i>
<i>Εικόνα 1-3: Ιστορική ανάπτυξη πολυμερικών σύνθετων υλικών.</i>	<i>15</i>
<i>Εικόνα 1-4: Κοκκώδη υλικά.</i>	<i>20</i>
<i>Εικόνα 1-5: Ίνώδη υλικά.</i>	<i>21</i>
<i>Εικόνα 1-6: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 1-7: Πολυστρωματικά υλικά.</i>	<i>22</i>
<i>Εικόνα 2-1: Ίνες γυαλιού.</i>	<i>25</i>
<i>Εικόνα 2-2: Υαλούφασμα.</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 2-3: Στάδια παραγωγής ενισχυτικών ινών γυαλιού.</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 2-4: Ανθρακούφασμα.</i>	<i>30</i>
<i>Εικόνα 2-5: Στάδια παραγωγής ενισχυτικών ινών άνθρακα.</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 2-6: Kevlar.</i>	<i>33</i>
<i>Εικόνα 2-7: Στάδια παραγωγής πολυαμιδίων.</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 2-8: Διάγραμμα Ειδικής Αντοχής-Ειδικού Μέτρου Ελαστικότητας για διάφορες ίνες.</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 3-1: Δομή εποξειδικών ρητινών.</i>	<i>37</i>
<i>Εικόνα 4-1: Προεμποτισμένο φύλλο γυαλιού εποξειδικής ρητίνης.</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 4-2: Πολύστρωτα σύνθετα υλικά.</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 4-3: Προετοιμασία σύνθετος υλικών πριν την εισαγωγή τους στον αυτόκλειστο φούρνο.</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 4-4: Αυτόκλειστος φούρνος.</i>	<i>48</i>
<i>Εικόνα 4-5: Εποξειδική ρητίνη.</i>	<i>49</i>

<i>Εικόνα 4-6:</i> Πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα	49
<i>Εικόνα 4-7:</i> Πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα τοποθετημένες στο εσωτερικό της διάταξης έγχυσης.....	50
<i>Εικόνα 4-8:</i> Πολυδιευθυντικές ίνες γυαλιού τοποθετημένες στο εσωτερικό της διάταξης έγχυσης.....	50
<i>Εικόνα 4-9:</i> Διάταξη έγχυσης	51
<i>Εικόνα 4-10:</i> Συσκευή για την διατήρηση του κενού και τον έλεγχο ροής της εποξειδικής ρητίνης στη διάταξη έγχυσης	51
<i>Εικόνα 4-11:</i> Πολύστρωτη πλάκα σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, με πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα, εντός της διάταξης έγχυσης.....	52
<i>Εικόνα 4-12:</i> Δείγματα σύνθετων υλικών που κατασκευάστηκαν, κομμένα σε λωρίδες. 53	
<i>Εικόνα 4-13:</i> Μηχανή εφελκυσμού INSTRON και το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού	53
<i>Εικόνα 4-14:</i> Τοποθέτηση των σύνθετων υλικών στη μηχανή εφελκυσμού INSTRON..	54
<i>Εικόνα 4-15:</i> Προετοιμασία των άκρων των δειγμάτων για την πραγματοποίηση των δοκιμών εφελκυσμού.....	54
<i>Εικόνα 5-1:</i> Δοκίμιο 1	55
<i>Εικόνα 5-2:</i> Δοκίμιο 2	56
<i>Εικόνα 5-3:</i> Δοκίμιο 3	56
<i>Εικόνα 5-4:</i> Δοκίμιο 4	57
<i>Εικόνα 5-5:</i> Δοκίμιο 5	57
<i>Εικόνα 5-6:</i> Δοκίμιο 6	58
<i>Εικόνα 5-7:</i> Δοκίμιο 7	58
<i>Εικόνα 5-8:</i> Δοκίμιο 8	59
<i>Εικόνα 5-9:</i> Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης.....	59
<i>Εικόνα 5-10:</i> Δοκίμιο 1	60

<i>Εικόνα 5-11: Δοκίμιο 2</i>	60
<i>Εικόνα 5-12: Δοκίμιο 3</i>	61
<i>Εικόνα 5-13: Δοκίμιο 4</i>	61
<i>Εικόνα 5-14: Δοκίμιο 5</i>	62
<i>Εικόνα 5-15: Δοκίμιο 6</i>	62
<i>Εικόνα 5-16: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης</i>	63
<i>Εικόνα 5-17: Δοκίμιο 1</i>	63
<i>Εικόνα 5-18: Δοκίμιο 2</i>	64
<i>Εικόνα 5-19: Δοκίμιο 1</i>	64
<i>Εικόνα 5-20: Δοκίμιο 2</i>	65
<i>Εικόνα 5-21: Δοκίμιο 3</i>	65
<i>Εικόνα 5-22: Δοκίμιο 4</i>	66
<i>Εικόνα 5-23: Δοκίμιο 5</i>	66
<i>Εικόνα 5-24: Δοκίμιο 7</i>	67
<i>Εικόνα 5-25: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (προεμποτισμένο)</i>	67
<i>Εικόνα 5-26: Δοκίμιο 1</i>	68
<i>Εικόνα 5-27: Δοκίμιο 2</i>	68
<i>Εικόνα 5-28: Δοκίμιο 3</i>	69
<i>Εικόνα 5-29: Δοκίμιο 4</i>	69
<i>Εικόνα 5-30: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (προεμποτισμένο)</i>	70
<i>Εικόνα 5-31: Δοκίμιο 1</i>	70
<i>Εικόνα 5-32: Δοκίμιο 2</i>	71

Εικόνα 5-33: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (μέθοδος <i>infusion</i>)	71
Εικόνα 5-34: Δοκίμιο 1	72
Εικόνα 5-35: Δοκίμιο 2	72
Εικόνα 5-36: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (μέθοδος <i>infusion</i>)	73
Εικόνα 5-37: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	74
Εικόνα 5-38: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	75
Εικόνα 5-39: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα	75
Εικόνα 5-40: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού	76
Εικόνα 5-41: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	77
Εικόνα 5-42: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	78
Εικόνα 5-43: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης	79
Εικόνα 5-44: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα	79

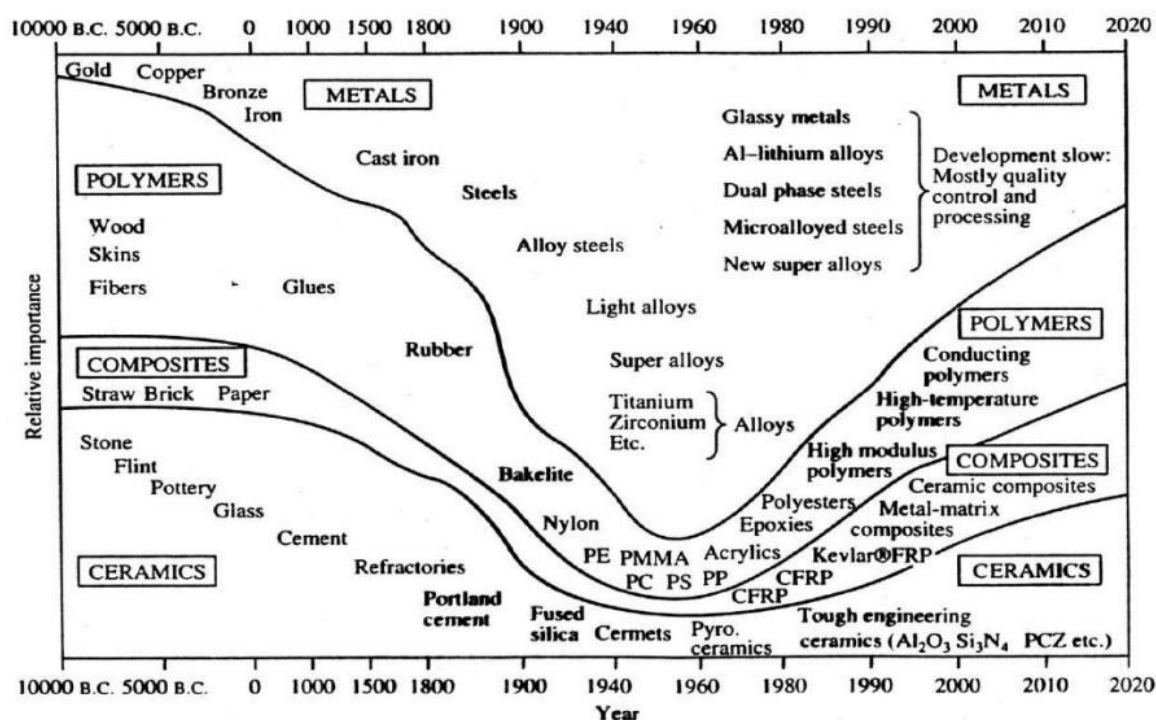
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των πολυμερικώνμητρών).	19
Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά ιών άνθρακα	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1 Ιστορική ανασκόπηση

Από τον ορισμό αυτό καταρρίπτεται ο μύθος που επικρατεί για τα σύνθετα υλικά ότι, δηλαδή, είναι αποτέλεσμα μιας πρόσφατης επιστήμης. Οι άνθρωποι πέτυχαν τεχνολογικά προηγμένες, για την εποχή τους, κατασκευές οι οποίες, αν και εμπειρικές και όχι στηριζόμενες στην επιστημονική γνώση, διακρίνονται για την ευρηματικότητά των (εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-1: Ιστορία των υλικών.

Από τα πρώτα σύνθετα υλικά που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος είναι ο πηλός, η ασφαλτος, και οι συνθετικές ρητίνες. Στην Αίγυπτο, υπάρχουν ενδείξεις χρησιμοποίησης τεχνικών ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχρωων που χρονολογούνται περί τω 5000 π.Χ. και είχαν ως στόχο τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Στην αρχαία Αίγυπτο είναι γνωστό ότι, τα νεκρά σώματα μετά από κατάλληλη επεξεργασία, τυλιγόταν με ταινίες λινού και στη συνέχεια εμποτιζόταν με υγρή ρητίνη που χρησίμευε για εξωτερική προστασία. Επίσης, την ίδια περίοδο σχεδιάστηκαν πλάκες από πολυστρωματικές βέργες ξύλου, με σκοπό την ενίσχυση της αντοχής έναντι της στρέβλωσης λόγω της απορρόφησης υγρασίας [1].

Σύμφωνα με τη Βίβλο, τα πρώτα ενισχυμένα πολυμερικά σύνθετα υλικά φαίνεται να έχουν χρησιμοποιηθεί από τους Βαβυλώνιους κατά την περίοδο 4000-2000 π.Χ. Το 3000 π.Χ. κατασκευάστηκαν στην Αίγυπτο και τη Μεσοποταμία σχεδίες από καλάμια παπύρου τα οποία είχαν εμβαπτισθεί σε πίσσα. Στη Μεσοποταμία, το 1000 π.Χ. εφαρμόστηκε η τεχνική της προστασίας των τούβλων και των πλακιδίων με βερνίκι, για να περιοριστεί η επιφανειακή φθορά [1].

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΥΛΙΚΟ
5000 π.Χ.	Μίγμα παπύρου-πίσσας
1500 π.Χ.	Επίστρωση ξύλου (καπλαμάς)
1909 μ.Χ.	Φαινολικά σύνθετα
1928 μ.Χ.	Σύνθετα ουρίας-φορμαλδεΐδης
1938 μ.Χ.	Σύνθετα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης
1942 μ.Χ.	Πολυεστέρας- ίνες υάλου
1946 μ.Χ.	Σύνθετα εποξειδικής ρητίνης
1946 μ.Χ.	Σύνθετα Nylon - ίνες υάλου
1951 μ.Χ.	Σύνθετα πολυστενίου-υάλου
1956 μ.Χ.	Σύνθετα φαινόλης-αμιάντου
1964 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα
1965 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα άνθρακα-υάλου
1972 μ.Χ.	Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες Aramid
1975 μ.Χ.	Υβριδικά σύνθετα aramid/γραφίτη

Εικόνα 1-2: Ιστορική ανάπτυξη πολυμερικών σύνθετων υλικών.

Ο πάπυρος υπήρξε η πιο διαδεδομένη γραφική ύλη σε όλη την αρχαιότητα, μέχρι το τέλος της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας. Αντικαταστάθηκε από την περγαμινή για πρώτη φορά το 197 π.Χ. από το βασιλιά της Περγάμου, Ευμένη Β', η οποία καθότι σπάνια και δαπανηρή αντικαταστάθηκε, με τη σειρά της, από το χαρτί. Το χαρτί είναι ένα φυσικό ινώδες σύνθετο υλικό η εφεύρεση του οποίου ανήκει στους Κινέζους και χρονολογείται στα 105 μ.Χ.

Κατά τους Ρωμαϊκούς χρόνους, η οδοποιία στηρίχθηκε στην ενίσχυση του οδοστρώματος με τρίμματα κεραμιδιών. Μέχρι και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα στην Ελλάδα οι άνθρωποι κατασκεύαζαν τα σπίτια τους από πέτρες και πλίνθες. Για το σκοπό αυτό ανάδευαν λεπτό άχυρο, άμμο, χώμα και νερό και στη συνέχεια το μίγμα τοποθετούνταν σε μεγάλα ξύλινα καλούπια για να στερεοποιηθεί. Από το στερεοποιημένο υλικό, αποκόβονταν σε μεγάλα

ορθογώνια κομμάτια (πλίθρες), τα οποία τοποθετούνταν πάνω από την πέτρινη βάση του σπιτιού, ώστε να παρεμποδιστεί το πέρασμα τη υγρασίας από το έδαφος στα τοιχώματα.

1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

1.2.1 Φάσεις σύνθετων υλικών

Από τις συνιστώσες φάσεις των σύνθετων υλικών, η συνεχής, ονομάζεται μήτρα, ενώ η ασυνεχής ή διασκορπισμένη φάση, αναφέρεται ως συστατικό ενίσχυσης ή έγκλεισμα.

Ο ρόλος με τον οποίο είναι επιφορτισμένη η μήτρα είναι πολλαπλός. Είναι χαμηλής πυκνότητας και παίζει το ρόλο της μεταφοράς των ασκούμενων φορτίων στο μέσο ενίσχυσης, το οποίο προσδίδει, εν γένει, στο σύνθετο υλικό τις βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως ιδιότητες. Ο τύπος της μήτρας καθορίζει και το βιομηχανικό εξοπλισμό που θα χρειαστεί.

Η μήτρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξης υψηλότερο από τη μέγιστη θερμοκρασία, στην οποία λειτουργεί το σύνθετο υλικό. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η συμβατότητα των ιδιοτήτων της με τις αντίστοιχες της φάσης της ενίσχυσης. Γενικά, ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συνδετικό ρόλο, ως συγκολλητική ουσία.
- Εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής συνοχής.
- Προστασία του εγκλείσματος από περιβαλλοντικούς φθορές και προσβολές.
- Συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.
- Μεταφορά-μεταβίβαση του ασκούμενου φορτίου μέσω της διεπιφάνειας στο έγκλεισμα
- Παρεμπόδιση της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση της ενισχυτικής φάσης.

Ο ρόλος του εγκλείσματος είναι διαφορετικός. Συνήθως, έχει υψηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τη μήτρα. Ενισχύει τις μακροσκοπικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, με τη γεωμετρία του να παίζει καθοριστικό ρόλο. Σε κάθε περίπτωση τα εγκλείσματα συμβάλουν στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού (μηχανικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές, θερμικές, οπτικές κ.α.), ενώ παράλληλα καθορίζουν τη

θραυστομηχανική συμπεριφορά του. Να σημειωθεί ότι, η καλή πρόσφυση ενίσχυσης και μήτρας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού.

Σαν μία τρίτη, ξεχωριστή φάση μπορεί να θεωρηθεί επίσης μια μη μηδενικοί πάχους ανισότροπη περιοχή μεταξύ της μήτρας και του ενισχυτικού μέσου, η οποία έχει μεταβλητές ιδιότητες και σχηματίζεται κατά τη διάρκεια κατασκευής του σύνθετου υλικού [1,2].

1.2.2 Τρόποι ταξινόμησης

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες βάσει

1. του τύπου της μήτρας που το αποτελεί
2. του τύπου του εγκλείσματος
3. της τάξης μεγέθους της ενίσχυσης

1.2.2.1 Ταξινόμηση βάσει του τύπου της μήτρας που αποτελεί το σύνθετο υλικό

- **Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (PolymerMatrixComposites, PMC):** Ησυγκεκριμένη κατηγορία υλικών έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο σύνθετων υλικών, λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής και του απλούστερου τρόπου κατασκευής. Ανάλογα με το είδος της πολυμερικής μήτρας που χρησιμοποιείται, η κατηγορία αυτή υποδιαιρείται περαιτέρω σε:

Θερμοσκληρυνόμενες: Τα θερμοκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος, από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Ο πολυμερισμός των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών, λαμβάνει χώρα με η θέρμανσή τους και η διαδικασία αυτή είναι μη αντιστρεπτή. Η αύξηση της θέρμανσης αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα. Κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού, δημιουργούνται σταυροδεσμοί μεταξύ των μακρομορίων (crosslinks), οι οποίοι επιβάλλουν περιορισμούς στη κινητικότητά τους, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να είναι στερεό και άκαμπτο. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το ζητούμενο είναι οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.

Συνηθισμένα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι οι εποξειδικές ρητίνες (EP), οι ακόρεστοι πολυεστέρες (UP), τα πολυιμίδια (PI), οι φαινολοπλάστες (PF), κ.α.

Θερμοπλαστικές: Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Σε αυτού του είδους τα πολυμερή, οι μοριακές αλυσίδες συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς Vander Waals, οι οποίοι λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, μια διαδικασία που είναι όμως αντιστρεπτή. Χαρακτηριστικό των θερμοπλαστικών είναι πως μαλακώνουν και ρέουν σε περίπτωση που εφαρμοστεί σε αυτά, συνδυασμός θερμοκρασίας και πίεσης. Συνεπώς, τα περισσότερα θερμοπλαστικά μπορούν να επαναμορφοποιηθούν πολλές φορές, γεγονός που τα καθιστά και ανακυκλώσιμα. Αντιπροσωπευτικά θερμοπλαστικά είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), ο πολυμεθακρυλικός μεθυλεστέρας (PMMA), το πολυαμίδιο (NYLON) κ.α.

Ελαστομερικές: Αποτελούνται από γραμμικά μακρομόρια με διακλαδωμένες αλυσίδες. Τα ελαστομερή είναι μια ενδιάμεση κατάσταση σε σχέση με τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και αποτελούν μια πολύ ξεχωριστή κατηγορία των πολυμερών καθώς χαρακτηρίζονται όχι μόνο για τη πολύ μεγάλη ελαστική παραμορφωσιμότητα (υπερελαστικότητα) αλλά και για τη μεγάλη βισκοελαστική παραμορφωσιμότητα. Κάτω από καθεστώς φόρτισης, τα μακρομόρια τείνουν να ευθυγραμμιστούν, μιας και οι αλυσίδες ξεδιπλώνονται και στη συνέχεια “τεντώνονται” οι μεταξύ τους δεσμοί. Όταν η φόρτιση παύσει να υφίσταται, τότε τα ελαστομερή επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, λόγω της δομής τους. Στην κατηγορία των ελαστομερών ανήκουν το φυσικό καουτσούκ (NR), το συνθετικό πολυισοπρένιο (IR), κ.α. [1-2].

- **Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC):** Τα υλικά αυτά αποτελούν μια σημαντική κατηγορία στον τομέα των συνθέτων υλικών. Κλασσικά μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το νικέλιο και το τιτάνιο χρησιμοποιούνται ως μήτρα προς ενίσχυση. Οι τύποι ενίσχυσης για μεταλλικές μήτρες περιορίζονται κυρίως σε κεραμικά υλικά μορφής κόκκων ή ινών. Το βασικό πλεονέκτημα μιας μεταλλικής μήτρας έναντι μιας πολυμερικής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα μεγαλύτερες από 300 °C, θερμοκρασία στην οποία οι οργανικές μήτρες οξειδώνονται. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής

μήτρας παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι των πολυμερικών, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 1-1.

Πίνακας 1-1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών μητρών (έναντι των πολυμερικώνμητρών).

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΜΑΤΑ
Υψηλότερη ολκιμότητα. Καλύτερες μηχανικές ιδιότητες .	Δημιουργία εύθραυστων μεσο-μεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μμετάλλου - ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από τη μήτρα που οδηγεί στη μικρορωγμάτωση και τη θραύση των ινών.
Βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού, σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διαφορετικές διευθύνσεις από αυτές του προσανατολισμού των ινών.	
Βελτίωση ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού.	Υψηλότερη πυκνότητα, άρα και βάρος της συνολικής κατασκευής.
Μείωση της ευαισθησίας του σύνθετου υλικού στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του.	Φαινόμενα διάλυσης ινών στη μήτρα, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (π.χ. διάλυση ινών SiO ₂ σε μήτρα Al).
Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σύνθετου για ειδικές εφαρμογές.	Ασυνέχεια της καμπύλης εφελκυσμού του σύνθετου υλικού στο όριο διαρροής της μήτρας.
Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων του σύνθετου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	Δύσκολη παραγωγή του σύνθετου υλικού και υψηλότερο κόστος.

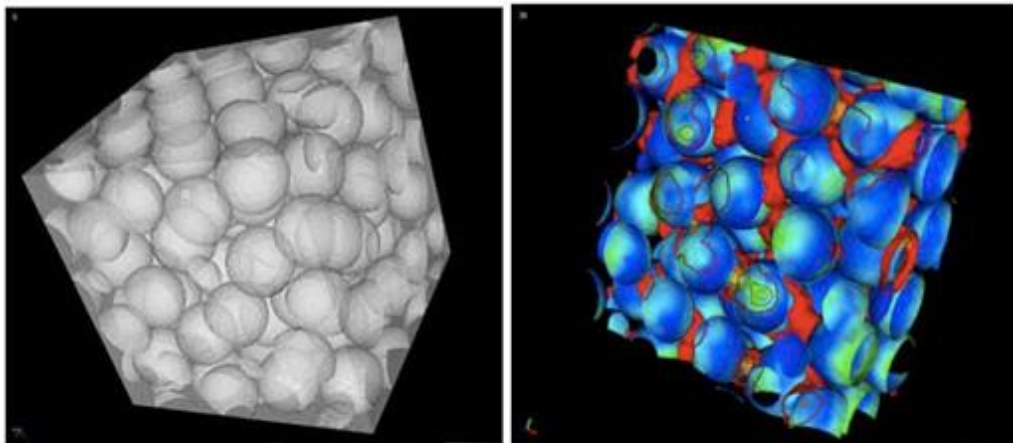
- Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (CeramicMatrixComposites, CMC):**
 Ως κεραμικά ορίζονται «όλα τα ανόργανα, μη μεταλλικά υλικά τα οποία έχουν υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (>1000 °C)». Τα κεραμικά είναι υλικά δύσκαμπτα, εμφανίζουν μεγάλη σκληρότητα, έχουν μεγάλη αντοχή σε θλίψη και πολύ μικρή σε εφελκυσμό, έχουν χαμηλή πυκνότητα. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι ότι παρουσιάζουν υψηλότερη πυρίμαχη, αντιδιαβρωτική και αντιτριβική συμπεριφορά. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι ότι η μικροδομή τους επηρεάζει σημαντικά τη μακρομηχανική συμπεριφορά τους. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως ατέλειες που μπορεί να υπάρχουν ή να δημιουργηθούν στο υλικό, όπως κενά ή μικρορωγμές, θα οδηγήσουν σε ταχεία διάδοση των ρωγμών όταν θα υποστεί κάποια φόρτιση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά ίνες ή κόκκοι. Το πλέον διαδεδομένο σύνθετο υλικό κεραμικής μήτρας είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο συνδυάζει την πολύ καλή αντοχή σε θλίψη του

σκυροδέματος και την πολύ καλή αντοχή σε εφελκυσμό του χάλυβα. Παραδοσιακά κεραμικά υλικά είναι ο πυλός, το τσιμέντο, η άργιλος και το γυαλί. Σήμερα, κυκλοφορούν κεραμικά τα οποία χαρακτηρίζονται ως προηγμένα, καθότι παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές, οπτικές ή μαγνητικές ιδιότητες και προορίζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω μερικά από τα προηγμένα κεραμικά υλικά:

- Οξειδία (Al_2O_3 , ZrO_2 , UO_2 , πυριτικά γυαλιά)
- Καρβίδια (B_4C , SiC , TiC , WC)
- Νιτρίδια (Si_3N_4 , TiN , AlN , BN)
- Βορίδια (ZrB_2 , TiB_2)
- Πυριτίδια ($MoSi_2$, $TiSi_2$)
- Φθορίδια (CaF_2 , LiF)

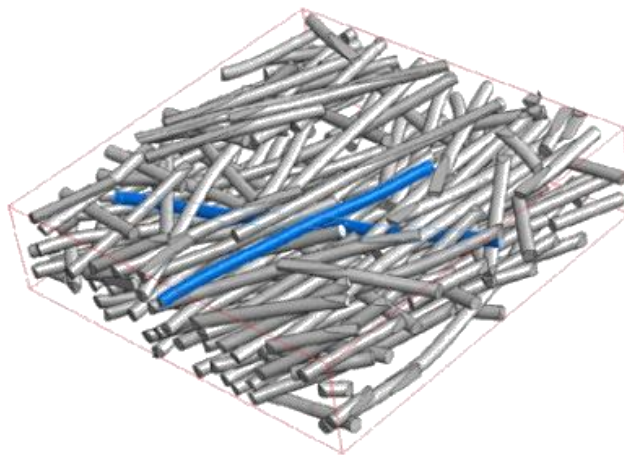
1.2.2.2 Ταξινόμηση βάσει του τύπου του εγκλείσματος

- **Κοκκώδη Υλικά (Particulates):** Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν μήτρα οποιασδήποτε από τις παραπάνω κατηγορίες και εγκλείσματα αποτελούνται από πολύ μικρά σωματίδια σε σχήμα κόκκου, κάποιου ισχυρού και ανθεκτικού υλικού, τα οποία είναι διεσπαρμένα μέσα στη μήτρα, η οποία είναι από διαφορετικό υλικό. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως επίσης και η μήτρα. Τα κοκκώδη υλικά έχουν υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα ινώδη, μιας και η συνεισφορά των σωματιδίων στη μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου είναι μικρότερη από αυτή των ινών. Ένα σημαντικό γνώρισμα των κοκκωδών σύνθετων υλικών είναι η χαμηλή συνήθως πυκνότητα σε σωματίδια, πράγμα που προσδίδει αρκετά καλές ειδικές ιδιότητες σε αυτά τα υλικά.



Εικόνα 1-3: Κοκκώδη υλικά.

- Ινώδη Υλικά (FibreReinforced Materials):** Σε αυτού του τύπου τα υλικά, η μήτρα ενισχύεται με ίνες τυχαίου ή μη προσανατολισμού, κάποιου ισχυρότερου υλικού. Οι ίνες μπορεί να είναι κεραμικές, πολυμερικές ή και μεταλλικές. Τα ινώδη είναι ένας από τους πιο απλούς τύπους σύνθετων υλικών και παρουσιάζουν εξαιρετική ανάπτυξη, με ολοένα και περισσότερες εφαρμογές να τα χρησιμοποιούν. Αυτή τους η επιτυχία βασίζεται στο γεγονός ότι συνδυάζουν ιδανικά το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλή ειδική αντοχή που παρουσιάζουν, με την ευκολία στο σχεδιασμό τους, εκτοπίζοντας τα παραδοσιακά υλικά σε πολλές εφαρμογές.

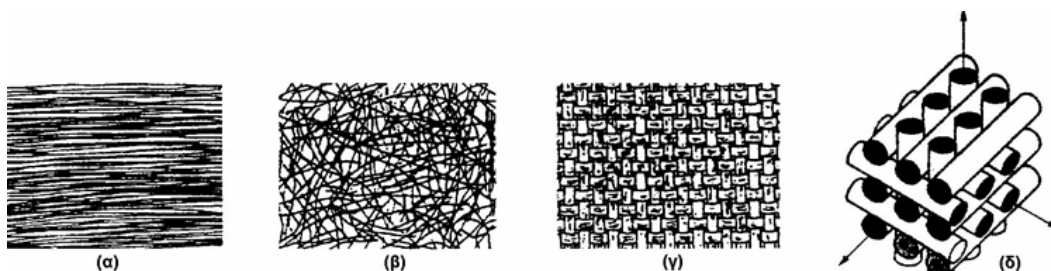


Εικόνα 1-4: Ινώδη υλικά.

Ο προσανατολισμός και η διάταξη των ινών παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των συνθέτων και βάσει αυτών διακρίνονται σε:

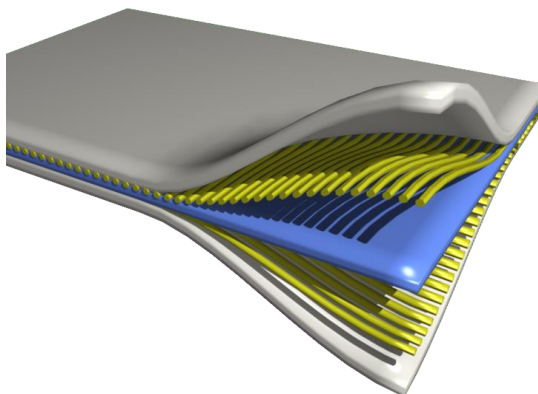
Μονοδιευθυντικά, στα οποία οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση και

Πολυδιευθυντικά, τα οποία μπορεί να είναι σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης και με ίνες σε πλέξη ύφανσης δύο ή τριών διαστάσεων. Οι πλέον διαδεδομένες είναι οι ίνες άνθρακα, γυαλιού και Kevlar καθότι βρίσκουν πολύ μεγάλη εφαρμογή.



Εικόνα 1-5: Τύποι διάταξης των ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης και (δ) ίνες σε τρισορθογώνια πλέξη.

- **Πολύστρωματικά Υλικά (Laminates - Sandwiches):** Σε αυτά τα υλικά η μήτρα, αλλά και το έγκλεισμα έχουν τη μορφή φύλλων και αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό. Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες όπως η αντοχή, η ακαμψία, η αντίσταση στη φθορά και στη διάβρωση, η θερμική και ακουστική μόνωση, και άλλα. Τα πολύστρωτα υλικά κατηγοριοποιούνται περαιτέρω στα διμέταλλα, τα επιμεταλλωμένα μέταλλα, την ύαλο ασφαλείας και τα υλικά με επίστρωση πλαστικού.



Εικόνα 1-6: Πολύστρωματικά υλικά.

1.2.2.3 Ταξινόμηση βάσει της τάξης μεγέθους της ενίσχυσης

- **Νανοσύνθετα:** το μέγεθος του εγκλείσματος είναι της τάξης των 10^{-9} m. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι ενίσχυσης στην κλίμακα του νανομέτρου είναι τα carbonblack, τα σωματίδια πυριτιούχων ενώσεων (silicas), τα σωματίδια από πηλό (clays), οι νανο-ίνες άνθρακα (carbonnanofibers), καθώς και οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbonnanotubes).
- **Μικροσύνθετα:** το μέγεθος του εγκλείσματος είναι της τάξης των 10^{-6} m. Τα υλικά που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι τα μεταλλικά κράματα, τα θερμοπλαστικά ενισχυμένα με λάστιχο και τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά.
- **Μακροσύνθετα:** το μέγεθος του εγκλείσματος είναι μεγαλύτερο των 10^{-6} m. Σε αυτή την κατηγορία απαντώνται υλικά όπως το ενισχυμένο σκυρόδεμα και ο γαλβανισμένος χάλυβας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΙΝΩΔΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες αποτελούνται από εγκλείσματα υπό μορφή ινών μέσα σε μια συνεχή μήτρα. Οι ίνες αποτελούν το συνηθέστερο πληρωτικό μέσο των πολυμερικών μητρών και μπορεί να είναι κεραμικές, πολυμερικές ή μεταλλικές και χαρακτηρίζεται από έναν πολύ μεγάλο λόγο μήκος/διάμετρο.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους είναι:

- Το μικρό βάρος.
- Η υψηλή αντοχή σε μηχανικές ιδιότητες.
- Η ελαστικότητα και οι σταθερές διαστάσεις.
- Η ανθεκτικότητα σε χημικές προσβολές.
- Οι καλές ηλεκτρικές ιδιότητες.
- Η διατήρηση των ιδιοτήτων τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Η αποφυγή αλλοιώσεων λόγω επαφής με το νερό.
- Αντιδιαβρωτικές ιδιότητες.
- Ανθεκτικότητα στο αλάτι, στη ρύπανση και σε αλκαλικό περιβάλλον και στις υψηλές και στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα καθιστούν τις ίνες ιδιαίτερα δημοφιλείς, ως μέσο πλήρωσης. Οι λόγοι για τους οποίους οι ίνες οφείλουν τις σπουδαίες μηχανικές τους ιδιότητες μπορούν να αναζητηθούν στη διαδικασία παρασκευής αλλά και στη γεωμετρία τους. Έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες των διαφόρων υλικών είναι πολύ πιο εύκαμπτες και ανθεκτικές από τα αντίστοιχα υλικά που είναι κατασκευασμένες. Αυτό οφείλεται στην τελειότητα της δομής της ίνας. Πιο συγκεκριμένα, οι κρύσταλλοι του υλικού της ίνας είναι ευθυγραμμισμένοι κατά το διαμήκη άξονά της, ενώ οι εσωτερικές δομικές ατέλειες μπορούν να περιοριστούν με κατάλληλες μεθόδους παρασκευής.

Προκειμένου να προσφέρουν οι ίνες την απαιτούμενη ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται ανάμεσα σε τεράστιο φάσμα πανιών, έτσι ώστε να παρουσιάζει της κατάλληλες ιδιότητες για την κατασκευή, με βάση τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής (υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή μέγιστη

εφελκυστική τάση θραύσης (UTS), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness), χαμηλή πυκνότητα (ρ), κ.α.).

Οι ενισχυτικές ίνες που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα και οι ίνες αραμιδίου. Εξ' αυτών, οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται κατά συντριπτική πλειοψηφία, αφού κοστίζουν λιγότερο από τις προαναφερθείσες, οι οποίες επιλέγονται να χρησιμοποιούνται σε κατασκευές υψηλών προδιαγραφών. Τα υφάσματα με ίνες άνθρακα κοστίζουν περίπου πέντε φορές περισσότερο από αυτά με αραμιδικές ίνες, τα οποία με τη σειρά τους κοστίζουν περίπου τρεις φορές περισσότερο από τα υαλοϋφασμα.

2.2 Ίνες γυαλιού

Το γυαλί είναι αδρανές υλικό, δεν αλλοιώνεται με το χρόνο και δεν απορροφά νερό και ως εκ τούτου δε διογκώνεται και διαβρώνεται. Επίσης, έχει υψηλή αντοχή στη θερμότητα και δεν αναφλέγεται. Επίσης, έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας.



Εικόνα 2-1: Ίνες γυαλιού.

Γι' αυτό οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα υλικά πρώτης γενιάς και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας και θεωρούνται από τα φθηνά ενισχυτικά υλικά για σύνθετες κατασκευές, ενώ διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων.

Για την κατασκευή των ινών έχουν δοκιμαστεί διάφοροι συνδυασμοί ορυκτών γυαλιών. Ο βασικός τύπος ινών γυαλιού βασίζεται στο διοξείδιο του πυριτίου με προσθήκη οξειδίων ασβεστίου, βορίου, νατρίου, σιδήρου και αλουμινίου. Τα γυαλιά αυτά είναι συνήθως άμορφα, ενώ αν θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα

εμφανίζουν κάποια κρυσταλλικότητα. Όταν περιέχονται υψηλά ποσοστά διοξειδίου του πυριτίου παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της θερμοκρασίας λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες υπό υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.

Το ποσοστό των οξειδίων που περιέχεται στο γυαλί επηρεάζεται από τη διαδικασία παρασκευής του (τήξη), τη διαδικασία μορφοποίησής του, δηλαδή τη μέθοδο μετατροπής του γυαλιού σε ίνες, και από το περιβάλλον που βρίσκεται. Οι διαφορές που εμφανίζονται στην περιεκτικότητα των οξειδίων δε μεταβάλλουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των γυαλιών.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή. Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε σχέση με μικρό βάρος τους, καθώς έχουν πολύ μικρότερη πυκνότητα από το αλουμίνιο και το χάλυβα και σχεδόν την ίδια αντοχή σε εφελκυσμό με αυτά τα υλικά. Έτσι, χρησιμοποιώντας fiberglass σε μια κατασκευή είναι δυνατόν να επέλθει μείωση του βάρους κατά 350% .

Στα κύρια μειονεκτήματά τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκτριβής. Εγγαράξεις και εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην επιφάνεια της ίνας, με αποτέλεσμα την ταχεία υποβάθμιση των μηχανικών τους ιδιοτήτων και της ικανότητας πρόσφυσης τους στην πολυμερική μήτρα.

Οι ίνες γυαλιού αρχικά παράγονται μία προς μία και οι διάμετροί τους ποικίλλουν από 4 έως 20 μm . Μετά την παραγωγή τους υπόκεινται σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να τους δοθεί η μορφή που απαιτείται για την εκάστοτε χρήση. Οι πολύ καλές αυτές ιδιότητες καθιστούν τα υαλοφάσματα αναντικατάστατα κατασκευαστικά υλικά σε χιλιάδες εφαρμογές για όλους τους τομείς κατασκευών στα ενισχυμένα πλαστικά. Ταυτόχρονα όμως τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής των fiberglass μέσα από τα ερευνητικά τους προγράμματα σχεδιάζουν και παράγουν νέα προϊόντα εξελιγμένης κατασκευαστικής φιλοσοφίας ανοίγοντας καινούριους δρόμους και επηρεάζοντας σημαντικά την εξέλιξη.

2.2.1 Τύποι ινών γυαλιού

Το τύπος γυαλιού A ή νατρίου-ασβεστίου ήταν το πρώτο είδος ινών γυαλιού που χρησιμοποιήθηκε. Αν και ήταν φθηνός και παρουσίαζε καλή αντίσταση στα οξέα, δεν είχε αρκετή αντοχή στα αλκάλια.

Η ανάγκη για ειδικές ηλεκτρικές ιδιότητες, σε εφαρμογές όπως τα κελύφη των ραντάρ, οδήγησε στην ανάπτυξη του γυαλιού τύπου E ή αλούμινο-βόριο-πυριτικού γυαλιού. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου τύπου E (Electrical), τύπου S (Structural) και τύπου C (Corrosion), οι οποίες και στις ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή, ολκιμότητα κτλ).



Εικόνα 2-2: Υαλοϋφασμα.

2.2.1.1 E-υαλοϋφασμα

Είναι το συνηθέστερο υλικό (ανόργανο) που χρησιμοποιείται στις σύνθετες κατασκευές. Έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη (σ - ϵ) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης και παρουσιάζει καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία. Αν και έχει πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, παρουσιάζει μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια. Βρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ριναίου κώνου, κτλ.

2.2.1.2 S-υαλοϋφασμα

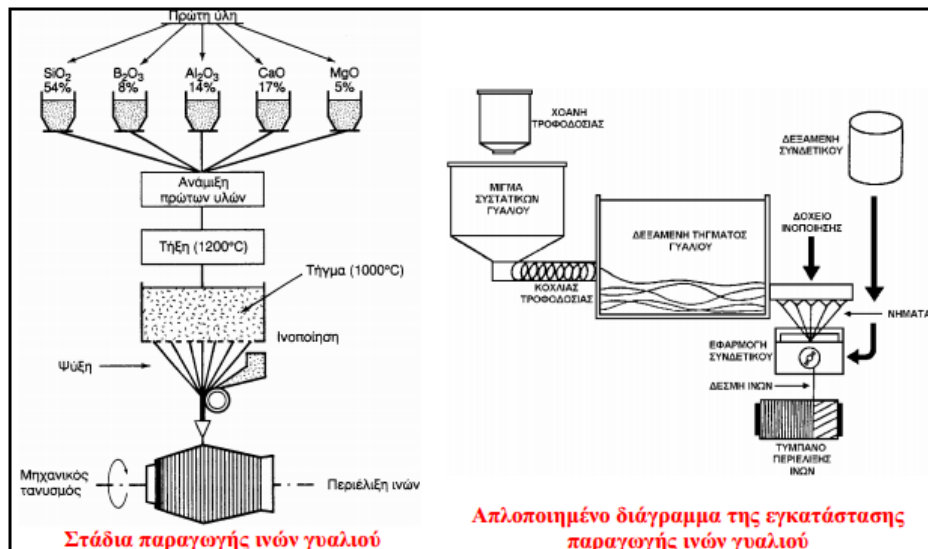
Είναι ακριβότερο υλικό από το E-υαλοϋφασμα, καθώς παρουσιάζει υψηλότερη αντοχή, μέτρο ελαστικότητας, δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Ο τύπος S είναι ελαφρότερος από τον E και παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην κρούση. Χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία κυρίως στη βιομηχανία των αεροσκαφών, ενώ σε συνδυασμό με το E βρίσκεται εφαρμογή σε εξωτερικές δεξαμενές, σε δοχεία καυσίμων, σε δοχεία υψηλής πίεσης, σε ριναίους κώνους κτλ.

2.2.1.3 C-υαλοϋφασμα

Παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, είναι όμως ακριβότερα. Χρησιμοποιείται σε πλαστικά που περιέχουν όξινα υλικά.

2.2.2 Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή των ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου τήκεται. Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα και το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο (1-15 μm) και ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη). Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizes) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλλίτερη πρόσφυση ινών-μήτρας. Τέλος, οι ίνες περιτυλίσσονται ανά δέσμες (strand ή end) των 204 νηματίων (τυπική τιμή) γύρω από τύμπανο, που περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα (της τάξης των 50 m/s). Οι ρόλοι υαλονήματος υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.



Εικόνα 2-3: Στάδια παραγωγής ενισχυτικών ινών γυαλιού.

Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τάγματος μέσα στη δεξαμενή, της πυκνότητας του, της διαμέτρου των οπών και της ταχύτητας περιστροφής του τυμπάνου. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ινών, πρέπει να αποφεύγεται η επαφή ινών μεταξύ τους, καθώς και με άλλα αντικείμενα, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακές κακώσεις στην ίνα. Τα χημικά πρόσθετα (sizes) διακρίνονται σε προσωρινά και συμβατά. Τα προσωρινά πρόσθετα έχουν κύριο στόχο αφενός την προστασία της ίνας έναντι μείωσης της αντοχής λόγω τριβής της με τις άλλες ίνες και αφετέρου τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους στην περίπτωση που διαμορφωθούν σε πλέξη ύφανσης και ακόμη προσδίδουν στην ίνα αντιστατικές ιδιότητες.

2.3 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως η υψηλή αντοχή (3-7 GPa), το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (200-500 GPa), η θλιπτική αντοχή (1-3 GPa), το μέτρο διάτμησης (10-15 GPa) και η χαμηλή πυκνότητα (1,75-2,00 g/cm³). Οι ίνες άνθρακα προέρχονται από διάφορες πρόδρομες ουσίες, συμπεριλαμβανομένων των ισότροπων και των μεσοφασικών υλικών, αλλά και των πολυακρυλονιτριλίων (PAN). Τα ανθρακονήματα καθώς και τα υφάσματά τους είναι υλικά (οργανικά) τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, δηλαδή υψηλή τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας (E/γ).



Εικόνα 2-4: Ανθρακούφασμα.

Οι ίνες άνθρακα διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ίνες υψηλής αντοχής (highstrength) και τις ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας (highmodulus), με τις δεύτερες να είναι ακριβότερες από τις πρώτες. Οι ίνες υψηλής αντοχής έχουν σύνηθες μέτρο ελαστικότητας 230 GPa ενώ στις δεύτερες το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται από 440 έως 640 GPa.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ινών άνθρακα είναι ότι ανθίστανται σε αλκαλικό και όξινο περιβάλλον, στην υπεριώδη ακτινοβολία, έχουν υψηλή αντοχή σε κόπωση και χαμηλό συντελεστή διαστολής. Επιπλέον δεν υποφέρουν από διάβρωση υπό τάση. Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα.

Οι αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα που έχουν ανακαλυφθεί είναι ο αδάμαντας, ο γραφίτης και τα φουλερένια. Ο ισχυρός προσανατολισμός των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και το χαμηλό συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες εξαγωνικές στρώσεις του γραφίτη οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο ασθενής τύπου VanderWaals δεσμός, που υφίσταται μεταξύ των γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση αυτή.

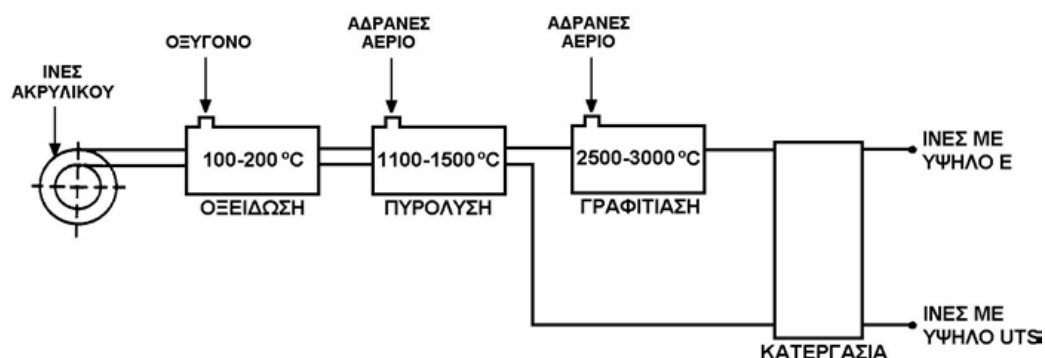
Είναι πιθανόν, να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτες ύλες μία μεγάλη ποικιλία υλικών, όπως ρητίνη φανικού οξέος, διάφορα πολυμερή, συνθετικό μετάξι και υδρογονάνθρακες. Αυτά όλα έχουν χρησιμοποιηθεί, αλλά τώρα χρησιμοποιούνται μόνο το P.A.N (πολυ-ακρυλονιτρίλιο) και η πίσσα από πετρέλαιο ή κάρβουνο. Σε εξέλιξη βρίσκεται η παραγωγή

κοντών ινών από αέριους υδρογονάνθρακες και μπορούν να παραχθούν άλλα εμπορικά προϊόντα, που θα είναι διαθέσιμα σε μερικά χρόνια. Το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δέκα φορές τουλάχιστον υψηλότερο από το κόστος παραγωγής των ινών γυαλιού.

Τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ισχυρών δομικών στοιχείων, για την κατασκευή των δοκών της πτέρυγας, στα αεροδιαστημικά οχήματα, ενώ η χρήση τους σε αυτοκίνητα, αθλητικά είδη και άλλες βιομηχανίες συνεχίζει να κατακτά όλο και περισσότερο έδαφος όσο το κόστος τους εξακολουθεί να μειώνεται.

2.3.1.1 Παραγωγή ινών άνθρακα

Η παραγωγή των ινών γραφίτη από ίνες ολοκληρώνεται σε τρία στάδια (εικόνα 2-5). Η διαδικασία ξεκινά με την οξείδωση των ινών στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200 °C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς. Ακολουθεί το στάδιο της πυρόλυσης, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100- 1500°C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000 MPa. Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high module carbonfibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400 GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10 μm.



Εικόνα 2-5: Στάδια παραγωγής ενισχυτικών ινών άνθρακα.

Πίνακας 2-1:Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα

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

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500 °C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας. Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες, δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία. Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιλίασης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιλίασης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.

2.4 Ίνες αραμιδίου (Kevlar)

Οι ίνες αραμιδίου κατατάσσονται στην κατηγορία των πολυμερών ινών, είναι ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες και η ονομασία Aramid αποτελεί συντομογραφία των λέξεων “Aromatic Polyamide”. Συμπεριλαμβάνουν τις ίνες Kevlar, Nomex που δημιουργήθηκαν από την εταιρεία DuPont (1973), καθώς και τις ίνες Twaron που δημιουργήθηκαν από την εταιρεία Teijin (1987). Το κόστος των ινών Aramid είναι αρκετά υψηλότερο από το κόστος των ινών γυαλιού και λίγο μεγαλύτερο από των ινών άνθρακα.

Η χημική σύσταση των ινών Kevlar είναι το παραφαινυλενιοτερεφθαλαμίδιο, έχουν το χρώμα του χρυσού και είναι δύσκολο να κοπούν με ατσαλένια λεπίδα. Οι ίνες Aramid παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά

- καλή αντίσταση στην τριβή,
- μεγάλη αντοχή σε κόπωση
- καλή αντίσταση σε οργανικούς διαλύτες,
- χαμηλή ευφλεκτότητα,
- μεγάλο μέτρο ελαστικότητας
- υψηλή πυκνότητα
- ευαισθησία σε οξέα και άλατα,
- ευαισθησία σε υπεριώδη ακτινοβολία,
- υψηλή ειδική αντοχή σε εφελκυσμό, λόγω μικρού ειδικού βάρους,
- υψηλό συντελεστή απόσβεσης σε κραδασμούς,
- πλέκονται εύκολα δημιουργώντας υφάσματα πυκνής πλέξης (RovingMat)
- μερική απώλεια αντοχής σε θερμό περιβάλλον με υψηλό ποσοστό υγρασίας, λόγω υδροφιλικότητας.



Εικόνα 2-6: Kevlar

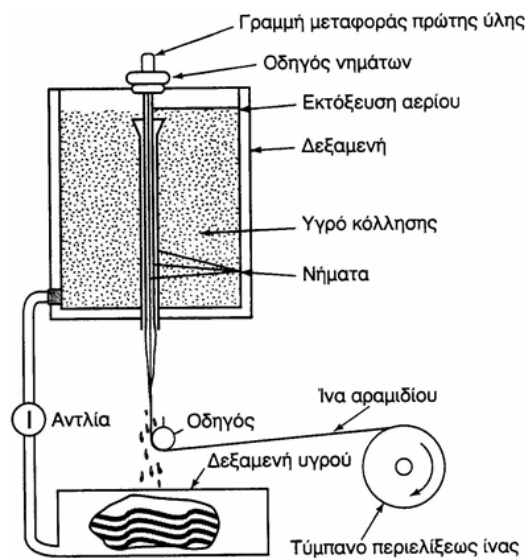
Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι αυτές καθ' αυτές πιο ισχυρές και συντάσσονται έτσι, ώστε να δημιουργούν ένα σταθερότερο πλέγμα, σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική

καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kinkbands).

Κύρια εφαρμογή τους αποτελεί η θωράκιση κατασκευών από κρουστικά φορτία.

2.4.1.1 Παραγωγή πολυαμιδίων

Στην εικόνα 2-7 φαίνεται η διαδικασία παραγωγής ενισχυτικών ινών πολυαμιδίου. Οι μέθοδοι παραγωγής είναι η εκβολή (extrusion) ή περιδίνηση (spinning). Το όξινο διάλυμα πολυμερούς υποβάλλεται σε εκβολή μέσω θερμαινόμενου καλουπιού που φέρει πολλές μικρές οπές για τη διευκόλυνση της εξαέρωσης του διαλύτη.



Εικόνα 2-7: Στάδια παραγωγής πολυαμιδίων.

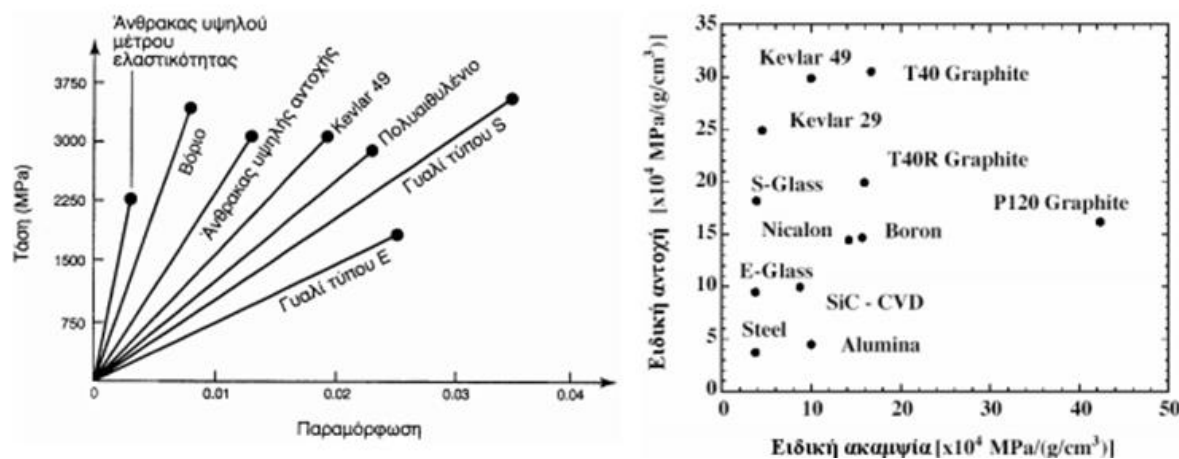
Η αντοχή και η ακαμψία του προϊόντος βελτιώνονται με σύγχρονη επιβολή έκτασης (stretching).

2.5 Σύγκριση ινών

Οι ίνες που αναπτύχθηκαν παραπάνω παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές, που κυρίως οφείλονται στη διαφορετική δομή τους. Πιο αναλυτικά οι διαφορές αυτές έχουν ως εξής:

Ειδικές Ιδιότητες: Ο σημαντικότερος παράγοντας που οδηγεί στην ταχεία ανάπτυξη των συνθέτων υλικών είναι η εξοικονόμηση μάζας που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ινών μικρής πυκνότητας και υψηλού μέτρου αντοχής. Ως «ειδικό μέτρο ελαστικότητας» και

«ειδική αντοχή σε εφελκυσμό» ορίζονται ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας (μέτρο του Young) και της αντοχής προς την πυκνότητα αντίστοιχα. Μερικές τιμές διαφόρων ινών δίνονται στο διάγραμμα της εικόνας 2-8 με βάση το ειδικό μέτρο ελαστικότητας παρατηρούμε ότι οι ίνες άνθρακα είναι πολύ ανώτερες των ινών E-υάλου, ενώ οι ίνες Kevlar βρίσκονται κάπου ανάμεσα.



Εικόνα 2-8: Διάγραμμα Ειδικής Αντοχής-Ειδικού Μέτρου Ελαστικότητας για διάφορες ίνες.

Θερμική σταθερότητα: Σε μη οξειδωτική ατμόσφαιρα, οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες σε υψηλές θερμοκρασίες, ακόμη και πάνω από τους 2000°C. Στις εφαρμογές όμως, όπου οι ίνες άνθρακα χρησιμεύουν ως ενισχυτικά των πολυμερών, η ιδιότητα αυτή δεν έχει και τόσο μεγάλη σημασία, δεδομένου ότι τα περισσότερα πλαστικά χάνουν τις ιδιότητές τους πάνω από 200°C.

Το γυαλί μαλακώνει περίπου στους 850°C αλλά το μέτρο και η αντοχή του ελαττώνονται πολύ γρήγορα πάνω από τους 250°C. Αν και η θερμική σταθερότητα του Kevlar είναι κατώτερη τόσο του γυαλιού όσο και του άνθρακα, είναι αρκετή για να χρησιμεύσει σαν ενισχυτικό στις περισσότερες πολυμερικές μήτρες. Εκείνο που μας ενδιαφέρει σε όλους τους τύπους των ινών είναι να διατηρούν τις ιδιότητές τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών, καθώς επίσης οι ιδιότητες να μην υποβαθμίζονται κατά το στάδιο της παραγωγής.

Οι ιδιότητες του γυαλιού επανακτώνται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ενώ η μεταβολή των ιδιοτήτων των ινών Kevlar με τη θερμοκρασία δεν είναι αντιστρεπτή. Τέλος, οι ίνες Kevlar επηρεάζονται από το ηλιακό φως, τόσο το ορατό όσο και το υπεριώδες, και

αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή του χρώματός τους και τη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Συμπεριφορά σε εφελκυσμό: Οι ίνες άνθρακα σπάνε πιο εύκολα αν εφελκυστούν από ότι οι ίνες αραμιδίου. Αντίθετα, οι ίνες υάλου τεντώνονται αρκετά μέχρι να σπάσουν. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι για ίδια τιμή εξασκούμενης τάσης εφελκυσμού παρατηρείται μικρότερη παραμόρφωση στις ίνες άνθρακα πριν τη θραύση τους, ενώ στις ίνες υάλου μεγαλύτερη.

Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν τέλεια ελαστική συμπεριφορά σχεδόν μέχρι την τάση θραύσεως. Οι ίνες άνθρακα με υψηλό μέτρο ελαστικότητας έχουν μικρότερη παραμόρφωση θραύσης σε αντίθεση με τις ίνες υψηλής αντοχής. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική δομή αυτών των ινών.

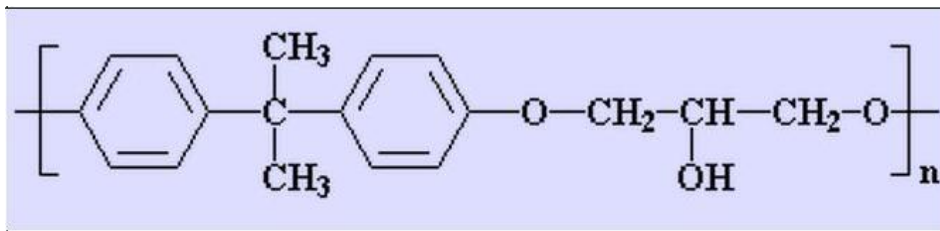
Θραύση: Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού παρουσιάζουν ψαθυρή θραύση, ενώ οι αραμιδικές ίνες παρουσιάζουν όλκιμη θραύση (λαιμό). Η διάμετρος των ινών παίζει ρόλο και στον τρόπο που κάμπτονται οι ίνες.

Κριτήρια	Ίνες Ινοπλιωμένων Πολυμερών		
	Άνθρακα	Αραμίδιο	Υάλου Τύποι Ε
Ανθεκτικότητα στο χρόνο	Πολύ Καλό	Καλό	Επαρκές
Κόπωση	Άριστο	Καλό	Επαρκές
Αλκαλικό Περιβάλλον	Πολύ Καλό	Καλό	Ανεπαρκές
Κρούση	Χαμηλό	Πολύ Καλό	Καλό
Διάβρωση υπό τάση	Χαμηλό	Μέτριο	Υψηλό
Φθορά εκτριβής	Επαρκές	Πολύ Καλό	Καλό
Παθητική Ενίσχυση	(X)	(X)	X
Ενεργητική Ενίσχυση	X	W	-
Ενίσχυση Ρηγματούμενης Ζώνης	X	(X)	-
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα/ Γαλβανικό Φαινόμενο	Ναι	Όχι	Όχι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΟΞΙΔΕΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Η εποξειδική ρητίνη (EP) είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, το οποίο αποτελείται από αλυσίδες που φέρουν την ομάδα του εποξειδίου. Τα προπολυμερή των συνηθέστερων εποξειδικών ρητινών παράγονται από την αντίδραση συμπύκνωσης της διφαινόλης A [2,2'-δι(4-υδροξυφαινυλο)-προπάνιο] και της επιχλωρυδρίνης. Εάν το προπολυμερές συμμετέχει στη δημιουργία του τρισδιάστατου δικτύου με τις δύο δραστικές ομάδες ονομάζεται τελοδομικόπροπολυμερές (structoterminalprepolymer), εάν όμως δε μπαίνει στο τρισδιάστατο πλέγμα μέσω ομάδων ευρισκομένων κατά μήκος της αλυσίδας του, τότε ονομάζεται πλευροδομικόπροπολυμερές (structopendantprepolymer).



Εικόνα 3-1: Δομή εποξειδικών ρητινών

Από πλευράς σύστασης οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Μελετώντας την δομή των εποξειδικών ρητινών με κάποιο πρόσθετο όπως σκληρυντής, πλαστικοποιητής με την βοήθεια ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, παρατηρούμε ότι οι ρητίνες αποτελούνται από σχεδόν μικρού μεγέθους μακρομόρια τρισδιάστατα διακλαδωμένα δίκτυα ή συσσωματώματα, μέτριου μοριακού βάρους, τοποθετημένα σε ένα πλαίσιο από μόρια μικρού μοριακού βάρους.

Από πλευράς φυσικής κατάστασης το προπολυμερές μπορεί να είναι ρευστό υγρό ή στερεό και αντιδρώντας με κατάλληλο αντιδραστήριο, το οποίο ονομάζεται σκληρυντής (curing agent ή hardener), μετατρέπεται σε ένα άκαμπτο στερεό λόγω του σχηματισμού σταυροδεσμών (crosslinks) ανάμεσα στις μακρομοριακές αλυσίδες,

με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού τρισδιάστατου δικτύου το οποίο περιορίζει την κινητικότητα των μακρομορίων και δεν καταστρέφεται.

Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να πολυμεριστούν από μια ευρεία γκάμα σκληρυντών, όπως είναι οι διαμίνες, οι διανυδρίτες του τετρακαρβοξυλικού οξέος, και άλλοι. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων που έχουν να κάνουν με τις συνθήκες σκλήρυνσης, τις επιθυμητές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς, όπως επίσης και με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζεται. Η ποσότητα του σκληρυντή που θα προστεθεί στο μίγμα με το προπολυμερές επηρεάζει ως ένα βαθμό την ταχύτητα πολυμερισμού, καθώς και το πλήθος των σταυροδεσμών που θα σχηματιστούν. Η διαδικασία του πολυμερισμού (curing) μπορεί να επηρεαστεί από τη θερμοκρασία, αλλά και από τη φύση της ρητίνης και του σκληρυντή που θα επιλεγθούν, με τη διαδικασία να μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά έως και ώρες.

3.2 Ιδιότητες- Εφαρμογές

Οι εποξειδικές ρητίνες πρωτοεμφανίστηκαν το 1947 στις Η.Π.Α. και αποτελούν τη βάση των υλικών που χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, καθώς επίσης και σύνθετων υλικών, όπως αυτά που είναι ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) και ίνες γυαλιού (GFRP). Η χημική δομή των εποξειδικών ρητινών επιτρέπει την ύπαρξη μιας μεγάλης γκάμας εμπορικά διαθέσιμων ρητινών, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τα τελικά προϊόντα να ποικίλουν ως προς τις τελικές τους ιδιότητες, επιτρέποντας στον κατασκευαστή να διαλέγει την κατάλληλη ρητίνη για την επιθυμητή εφαρμογή. Η ευρεία χρήση τους σε μοντέρνες εφαρμογές δεν είναι καθόλου τυχαία και εξετάζοντας παρακάτω μια σειρά παραμέτρων, θα γίνει εύκολα κατανοητό γιατί οι εποξειδικές προτιμούνται περισσότερο, σε σχέση με άλλες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως οι πολυεστερικές ή οι βινυλεστερικές.

Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν άριστη αντίσταση σε φωτιά και σε χημική προσβολή, γεγονός που συνέβαλε τα μάλα στην ανάδειξη των εποξειδικών συστημάτων κατάλληλων στον τομέα των χρωμάτων και των επικαλυπτικών υλικών. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε χρώματα της ναυπηγικής και της

αυτοκινητοβιομηχανίας, βελτιώνοντας τη συνάφειά τους, αλλά και για την επικάλυψη των επιφανειών σε μεταλλικές κατασκευές, τις οποίες προστατεύουν από την UV ακτινοβολία και την περιβαλλοντική διάβρωση.

Μια άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα των εποξειδικών ρητινών είναι η καλή τους θερμοσταθερότητα, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη διατήρηση των ιδιοτήτων της τελικής εφαρμογής σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, εν συγκρίσει με άλλες ρητίνες. Έτσι αυτή η ικανότητα της κατασκευής, την καθιστά χρηστικότερη και επιμηκύνει τον χρόνο ζωής της, αφού δεν υπάρχει υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού σε βάθος χρόνου.

Όσον αφορά τη μηχανική συμπεριφορά των εποξειδικών συστημάτων, δύο σημαντικές ιδιότητές τους, είναι η αντοχή σε εφελκυσμό και η δυσκαμψία τους. Σημαντική ιδιότητα, απόρροια της οποίας είναι η εξαιρετική μηχανική συμπεριφορά που έχουν τα σύνθετα υλικά, είναι η πρόσφυση που προσφέρουν τα εποξειδικά συστήματα στις ενισχύσεις, όταν αυτά χρησιμοποιούνται σαν μήτρα. Η χημική σύνθεση των εποξειδικών ρητινών με την παρουσία των πολικών υδροξυλομάδων και των αιθερομάδων, προσφέρουν την καλύτερη δυνατή πρόσφυση σε σχέση με τις άλλες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Η συμβατότητα της μήτρας με το έγκλεισμα είναι επίσης ζωτικής σημασίας για το σύνθετο υλικό και οδηγεί σε περαιτέρω βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του.

Αυξημένης σημασίας για το σχεδιασμό και την κατασκευή ενός σύνθετου υλικού είναι ο χαμηλός βαθμός συρρίκνωσης των εποξειδικών ρητινών, κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά τη διαδικασία του πολυμερισμού. Η συρρίκνωση αυτή συμβαίνει λόγω της επαναδιάταξης και επαναπροσανατολισμού των μορίων της ρητίνης, κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης του μίγματος της ρητίνης με το σκληρυντή. Ενώ οι συνήθεις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες μετά το πέρας του πολυμερισμού, συρρικνώνονται σε ένα ποσοστό της τάξεως άνω του 8%, οι εποξειδικές συρρικνώνονται περίπου στο 2%. Εν τω μεταξύ, όσο μικρότερος είναι ο βαθμός συρρίκνωσης του τελικού προϊόντος, τόσο μειώνεται και η ύπαρξη εσωτερικών τάσεων μέσα στο υλικό, πράγμα που συμβάλλει στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του και διατήρηση της σταθερότητας των διαστάσεών του.

Λόγω της εξαιρετικής τους πρόσφυσης, τα εποξειδικά συστήματα βρίσκουν εφαρμογές και στον τομέα των συγκολλητικών, χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε αεροπορικές κατασκευές, σε σκάφη θαλάσσης και οπουδήποτε

αλλού απαιτείται η ύπαρξη ισχυρού μηχανικού δεσμού. Η διατήρηση του μηχανικού δεσμού σε βάθος χρόνου σε τέτοιου είδους εφαρμογές, είναι θέμα ύψιστης σημασίας και είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η παράμετρος της απορρόφησης υγρασίας, ειδικά σε θαλάσσιο περιβάλλον. Όλες οι ρητίνες απορροφούν ένα ποσοστό υγρασίας και έχει νόημα να ελεγχθεί κατά πόσο υποβαθμίζονται κάποιες ιδιότητες του τελικού σύνθετου υλικού, μιας και τα μόρια του νερού αυξάνουν την κινητικότητα των μακρομορίων της πολυμερικής μήτρας, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η διεπιφάνεια της μήτρας με την ενίσχυση. Οι εποξειδικές ρητίνες απορροφούν μικρότερο ποσοστό υγρασίας σε σχέση με άλλες ρητίνες.

Τέλος, οι εποξειδικές ρητίνες είναι επίσης σημαντικές και για τη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρονικών συστημάτων, μιας και είναι άριστοι μονωτές και προστατεύουν ηλεκτρονικά κυκλώματα από βραχυκυκλώματα, σκόνη και υγρασία. Συχνές εφαρμογές σε τέτοιες περιπτώσεις έχουν σε κινητήρια σύνολα, γεννήτριες ρεύματος, μετασχηματιστές, κ.α.

3.3 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες Άνθρακα

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) έκαναν την εμφάνισή τους για πρώτη φορά τη δεκαετία του '50 και μέσα στα επόμενα χρόνια επέτυχαν να καθιερωθούν ως δομικά κατασκευαστικά στοιχεία σε πολλές κατασκευές, ενώ σήμερα, μαζί με τα σύνθετα που είναι ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες, λογίζονται ως “σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης” (high performance composites). Στη συντριπτική πλειοψηφία των CFRP, το τίμημα για την εξασφάλιση της υψηλής απόδοσης αυτών των συνθέτων, είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, αλλά τα τελευταία χρόνια με την ύπαρξη μιας μεγάλης ποικιλίας εμπορικά διαθέσιμων ινών άνθρακα, καθώς και πολλών πολυμερικών υλικών που προορίζονται για χρήση μήτρας, το αποτέλεσμα ήταν να μειωθεί το κόστος αυτών των υλικών και να γίνουν ελκυστικότερα για χρήση σε περισσότερες και ευρύτερες εφαρμογές.

Στα CFRP υλικά η επιλογή της μήτρας έχει σοβαρή επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι εποξειδικές ρητίνες είναι το συνηθέστερο μητρικό υλικό που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους σύνθετα υλικά, ενώ χρησιμοποιούνται και άλλες ρητίνες όπως είναι οι πολυεστερικές ή οι πολυιμιδικές. Επίσης, πέραν των πολυμερών, μπορεί να χρησιμοποιηθούν επίσης μεταλλικές και κεραμικές μήτρες ή ακόμα και μήτρες

από γυαλί, ενώ υπάρχουν και οι μήτρες από άνθρακα, οι οποίες είναι μια πολύ σημαντική υποκατηγορία των κεραμικών μητρών.

Ανάλογα με την τελική εφαρμογή για την οποία προορίζεται το σύνθετο με ίνες άνθρακα, υπάρχει μια ποικιλία από τρόπους παρασκευής του υλικού. Μια συνηθισμένη μέθοδος παρασκευής, είναι η εναπόθεση στρώσεων υφάσματος από ίνες άνθρακα, μέσα σε ένα καλούπι, το οποίο έχει το σχήμα του τελικού προϊόντος και κατόπιν ο εμποτισμός τους από εποξειδική ρητίνη, η οποία πολυμερίζεται θερμαίνοντας το σύστημα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία ή σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η ευθυγράμμιση ή το πλέξιμο των στρώσεων του υφάσματος είναι μια επιλογή η οποία προσδίδει βελτιωμένη αντοχή ή δυσκαμψία στο τελικό υλικό. Συνήθως με μια τέτοια διαδικασία κατασκευάζονται μέρη κατασκευών από τα οποία η “υψηλή απόδοση” δεν είναι το κύριο ζητούμενο, μιας υπάρχει η πιθανότητα παραμονής στο εσωτερικό του υλικού, ακαθαρσιών ή φυσαλίδων αέρα, οι οποίες μπορεί να αποτελέσουν σημεία συγκέντρωσης τάσεων, με σημαντικές επιπτώσεις κυρίως στην αντοχή του συνθέτου. Για την κατασκευή προϊόντων που είναι περισσότερο απαιτητικά από το σύνθετο υλικό, η μέθοδος που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει και τη χρήση κενού, ή ακόμα και αυτόκλειστου κλίβανος, όπου εφαρμόζονται ταυτόχρονα στο καλούπι και στο υπό πολυμερισμό σύνθετο, συνθήκες πίεσης κενού και θερμοκρασίας, βάσει μιας χαρακτηριστικής, για το υλικό, καμπύλης μορφοποίησης.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα εξαρτώνται από μια σειρά παραμέτρων όπως το είδος του πολυμερικού υλικού ή των ινών, το πλήθος των ινών, την κατεύθυνσή τους, τη μέθοδο κατασκευής, τη θερμοκρασία πολυμερισμού κ.α..

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω τα CFRP υλικά θεωρούνται ως σύνθετα υλικά υψηλής απόδοσης και ένας τομέας όπου κυρίως έχουν εφαρμογή είναι η αεροδιαστημική. Σε αυτό τον τομέα η χρήση ελαφρών κατασκευαστικών υλικών μπορεί να σημαίνει είτε αύξηση του ωφέλιμου φορτίου, είτε μείωση του κόστους λειτουργίας της εφαρμογής. Επιπλέον ο συντελεστής θερμικής διαστολής αυτών των υλικών, κατά μήκος των ινών, εξασφαλίζει μεγάλη σταθερότητα σχήματος, ιδιαίτερα όταν έχουμε να κάνουμε με κατασκευαστικά ή λειτουργικά στοιχεία διαστημοπλοίων ή δορυφόρων, τα οποία είναι εκτεθειμένα σε υψηλές θερμοκρασιακές μεταβολές.

Στην αεροναυπηγική, τομέα κοντινό στην αεροδιαστημική, τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα έχουν βρει πολλές εφαρμογές επίσης, με ολοένα και αυξανόμενη τάση

αντικατάστασης διαφόρων άλλων υλικών. Διάφορα μέρη πολεμικών και μη αεροσκαφών, όπως τα φτερά, το περύγιο, μέρη της ατράκτου, αλλά και μέρη του εσωτερικού όπως δάπεδα, πλαίσια καθισμάτων κ.α., κατασκευάζονται από τέτοια υλικά με στόχο την καλύτερη απόδοση των αεροσκαφών, μέσω της εξοικονόμησης βάρους ή της εξοικονόμησης χώρου. Βέβαια, όσον αφορά τη χρήση των συνθέτων σε τέτοιες εφαρμογές, λόγω του κρίσιμου χαρακτήρα τους, γίνεται μεγάλη προσπάθεια για τον προσεκτικό σχεδιασμό τους, αλλά και την ενδελεχή μελέτη της συνολικής τους συμπεριφοράς, μιας και σε περίπτωση αστοχίας διακυβεύεται η απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Μια ακόμα εφαρμογή που αναμένεται τα επόμενα χρόνια να πάρει μεγαλύτερες διαστάσεις, είναι η χρήση των CFRP στην αυτοκινητοβιομηχανία. Σήμερα, αυτά τα σύνθετα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε αγωνιστικό επίπεδο και κυρίως στην Formula 1, αλλά και σε μεμονωμένες περιπτώσεις ακριβών αυτοκινήτων δρόμου. Σε αγωνιστικό επίπεδο, η ανάγκη για αυξημένη αντοχή και μικρότερο βάρος υπερτερούν κατά πολύ του κόστους και συνεισφέρουν τα μέγιστα στην υψηλή απόδοση του οχήματος. Αντίθετα στα αυτοκίνητα δρόμου, τέτοιες ανάγκες υπερκαλύπτονται από ελαφρά κράματα, καθιστώντας μέχρι στιγμής τη χρήση των CFRP ασύμφορη οικονομικά.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα είναι στο κατασκευαστικό-οικοδομικό τομέα. Σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως γέφυρες, οι οποίες είχαν κατασκευαστεί με χαμηλότερες προδιαγραφές από τις σημερινές ή κατασκευές που έχουν υποστεί ζημιές, είναι δυνατό να επέμβει ο κατασκευαστής και να τις ενισχύσει. Το οπλισμένο σκυρόδεμα που χρειάζεται να ενισχυθεί, τυλίγεται ή καλύπτεται με υφάσματα από ίνες άνθρακα, τα οποία μετά με τη σειρά τους εμποτίζονται με ρητίνη, με αποτέλεσμα μετά το πέρας του πολυμερισμού να έχει σχηματιστεί ένας “μανδύας” στην περιοχή που θέλουμε να βελτιώσουμε ή να διορθώσουμε. Αυτή η τεχνική έχει σοβαρό αντίκτυπο στην αντοχή της κατασκευής σε κάμψη, η οποία μερικές φορές αυξάνει σε ποσοστό 100%, ενώ έως 10% δύναται να αυξηθεί και η δυσκαμψία της περιοχής αυτής. Επίσης μπορεί να βελτιωθεί αρκετά και η αντοχή σε διάτμηση, γεγονός σημαντικό για κατασκευές που βρίσκονται σε ιδιαίτερα σεισμογενείς περιοχές.

Επιπλέον, εφαρμογές των CFRP υλικών μπορούν να εντοπιστούν σε αθλητικά είδη όπως ρακέτες, ποδήλατα ή πέδιλα σκι, στην ιατρική σαν μέρη προσθετικών μελών του ανθρώπινου σώματος, σε ηλεκτρικές συσκευές ήχου, όπως ηχεία ή πικαπ, σαν επικάλυψη

επιφανειών, όπου ζητούμενο είναι η αντίσταση στην ανάπτυξη φωτιάς ή θερμότητας, καθώς και σε άλλες εφαρμογές.

3.4 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας Ενισχυμένα με Ίνες Γυαλιού

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP) ξεκίνησαν να εξελίσσονται περίπου στα μέσα της δεκαετίας του '30 και γρήγορα έγιναν ένα προϊόν σταθερής ζήτησης, ιδιαίτερα στον κατασκευαστικό και αρχιτεκτονικό τομέα, ενώ μερικές δεκαετίες αργότερα και πιο συγκεκριμένα στα τέλη αυτής των '60, τα GFRP ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται και σε άλλες κατηγορίες, αξιοποιώντας έτσι τις πολλές τους και ενδιαφέρουσες ιδιότητες.

Ο τύπος των πολυμερών που χρησιμοποιούνται στη κατασκευή των συνθέτων με ενίσχυση ινών γυαλιού, μπορεί να είναι είτε θερμοπλαστικά, είτε θερμοσκληρυνόμενα, με τα δεύτερα να επικρατούν των πρώτων, έχοντας ως κυριότερους εκπροσώπους τις πολυεστερικές, τις βινυλεστερικές ή τις εποξειδικές ρητίνες, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής και το τελικό κόστος που επιθυμεί να έχει ο κατασκευαστής.

Τα σύνθετα υλικά αυτής της κατηγορίας κατασκευάζονται με την εμπέδωση υφάσματος πλεγμένου με ίνες γυαλιού ή υφάσματος από πεπιεσμένες ίνες μεταξύ τους. Οι καλύτερες ιδιότητες των δύο συστατικών συνδυάζονται, κάνοντας αυτό το υλικό άκαμπτο, με τη ρητίνη να το καθιστά ιδιαίτερα στεγανό. Μερικές συνηθισμένες μέθοδοι παραγωγής είναι η επίστρωση με χέρι του πολυμερούς πάνω στις ίνες γυαλιού, η επίστρωση με ψεκασμό πάνω στις ίνες ή η παραγωγή συνεχών στοιχείων με ευθύγραμμη διέλαση και εξέλαση.

Ένας τομέας όπου βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή τα πολυμερικά σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού, είναι αυτός της ναυπηγικής. Τα παραδοσιακά υλικά έχουν αντικατασταθεί πλήρως από τα GFRP, κυρίως για τη χαμηλή τους πυκνότητα, τη μεγάλη τους αντοχή στη διάβρωση, ειδικά στο θαλασσινό νερό και την ευκολία στην παραγωγή τους, ακόμα και ολόκληρου του κελύφους ενός σκάφους με χύτευση σε ειδικά καλούπια. Επιπλέον, το γεγονός ότι σαν υλικό έχει υψηλή αντοχή και είναι αρκετά ελαφρύ, ενώ σύμφωνα με έρευνες διατηρεί τις ιδιότητές του σε βάθος χρόνου, ακόμα και μετά από 30 χρόνια, είναι μερικές παράμετροι που το κάνουν ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές.

Η αντοχή σε διάβρωση και το μικρό βάρος των GFRP είναι δύο ιδιότητες που οδήγησαν στην ευρεία χρήση αυτών των συνθέτων και στον τομέα των οικοδομικών κατασκευών,

μιας και καθιστούν τη μεταφορά και συναρμολόγησή τους στον τόπο κατασκευής, αρκετά εύκολη και οικονομική. Μεγάλες ποσότητες GFRP υλικών χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ορόφων και θόλων σε μεγάλα οικοδομικά συγκροτήματα, όπως είναι τα στάδια, τα οποία λόγω του μικρού τους βάρους, έχουν σαν αποτέλεσμα την οικονομία στο σχεδιασμό και την κατασκευή των στοιχείων υποστήριξής τους. Σε τέτοιου είδους κατασκευές τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού κερδίζουν επιπρόσθετους πόντους, εξαιτίας του χαμηλού κόστους συντήρησής τους, αλλά και της αρχιτεκτονικής που μπορεί ο σχεδιαστής εύκολα να τους προσδώσει.

Τα GFRP υλικά έχουν την τιμητική τους και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενισχυμένων πλαισίων, σε μικρή όμως κλίμακα προς το παρόν, όπως και στην κατασκευή αγωνιστικών αυτοκινήτων, όπου οι κατασκευαστές, πέραν από το χαμηλό τους βάρος, εκμεταλλεύονται τις παραμέτρους των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων τους, αλλά και την μεγάλη ευελιξία που προσφέρουν στο σχεδιασμό τους. Στον ίδιο τομέα, τα GFRP χρησιμοποιούνται στην κατασκευή καμπίνων σε φορτηγά οχήματα, σε προφυλακτήρες και σε πολλά ακόμα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διάφορους τύπους, ένας εκ των οποίων είναι ο τύπος E-Glass, όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο "electrical". Αυτός ο τύπος γυαλιού έχει κατασκευαστεί συγκεκριμένα για ηλεκτρικές εφαρμογές και ειδικά εκεί που χρειάζεται ηλεκτρική μόνωση. Έτσι, όταν οι ίνες E-Glass ενσωματωθούν στην πλαστική μήτρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων τα οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένα, όπως ηλεκτρικοί διακόπτες, ηλεκτρικοί διανομείς, υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων, και άλλα.

Τα GFRP σύνθετα χρησιμοποιούνται εκτενέστατα και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς, λόγω του χαμηλού τους ειδικού βάρους, αλλά και της εξαιρετικής τους αντίστασης σε διάβρωση. Χαρακτηριστικές εφαρμογές σε αυτή την κατηγορία είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για τη μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενές αποθήκευσης νερού, αλλά και κατασκευή ειδικών εγκαταστάσεων για την παραγωγή χημικών ουσιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά σε εφελκυσμό, τριών διαφορετικών σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με πολυδιευθετιμές ίνες είτε άνθρακα, είτε υάλου, είτε Kevlar, καθώς επίσης και με μονοδιευθετιμένα άνθρακονίματα και ίνες γυαλιού. Το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε ήταν εποξειδική ρητίνη (EP), ενώ τα σύνθετα υλικά είναι αυτά της πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου.

Η παρασκευή των δοκιμών καθώς και οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της Ελληνικής Αεροπορικής Βιομηχανίας, στον Τομέα Έρευνας και Ανάπτυξης Προηγμένων Συνθέτων Υλικών. Για να μελετηθεί η επαναληψιμότητα των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων, σε κάθε τύπο πολυμερικού σύνθετου υλικού πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και ελήφθηκε ο μέσος όρος των παραμέτρων των δοκιμών εφελκυσμού.

4.2 Υλικά

Για την κατασκευή της πολύστρωτης πλάκας σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, χρησιμοποιήθηκαν προεμποτισμένα φύλλα εποξειδικής ρητίνης (pre-preg), ενισχυμένα, κατά τη μία διεύθυνση, είτε με συνεχείς ίνες άνθρακα, είτε με μονοδιευθυμένες ίνες γυαλιού. Η εμπορική ονομασία των ενισχυμένων ινών άνθρακα ήταν CarbonPrepreg και τα φύλλα ήταν κατασκευασμένα από την εταιρία CYTEC Engineered Materials, με κωδικό όνομα 997-2. Αντίστοιχα, η εμπορική ονομασία των ενισχυμένων ινών γυαλιού ήταν glassprepreg, με το ενισχυμένο ύφασμα ινών γυαλιού να είναι τύπου S-GlassFabric.

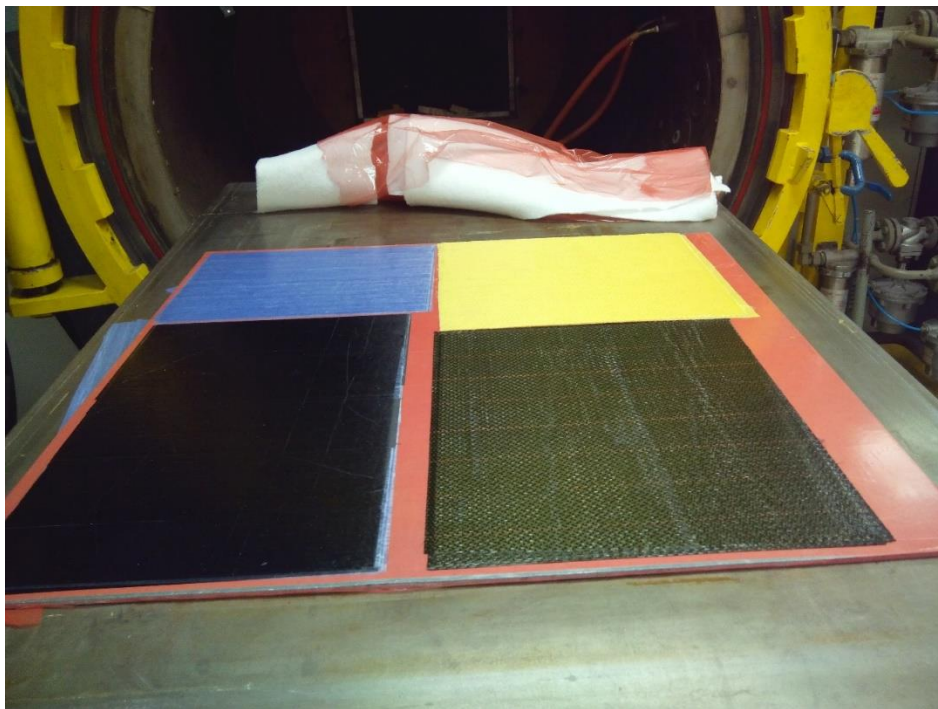
Κατασκευάστηκαν επίσης και πολύστρωτες πλάκες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας με τη χρήση προεμποτισμένα φύλλα εποξειδικής ρητίνης, ενισχυμένα, πολυδιευθυντικά με συνεχείς ίνες αραμιδίου, με εμπορικό όνομα Kevlar Prepreg. Τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας Eurocopter.

Όλες οι παραπάνω πολύστρωτες πλάκες κατασκευάστηκαν με την τεχνική της επίστρωσης με το χέρι (handlay-up) και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε θερμική

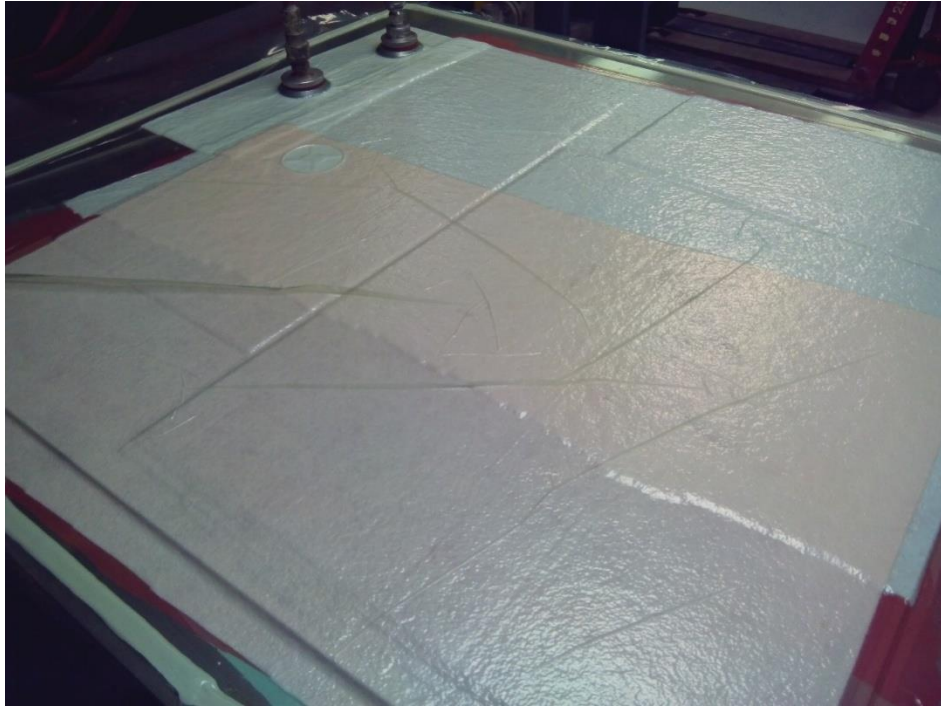
κατεργασία πολυμερισμού σε αυτόκλειστο φούρνο (autoclave), της γερμανικής εταιρίας Scholz.



Εικόνα 4-1: Προεμποτισμένο φύλλο γυαλιού εποξειδικής ρητίνης



Εικόνα 4-2: Πολύστρωτα σύνθετα υλικά



Εικόνα 4-3: Προετοιμασία σύνθετος υλικών πριν την εισαγωγή τους στον αυτόκλειστο φούρνο



Εικόνα 4-4: Αυτόκλειστος φούρνος

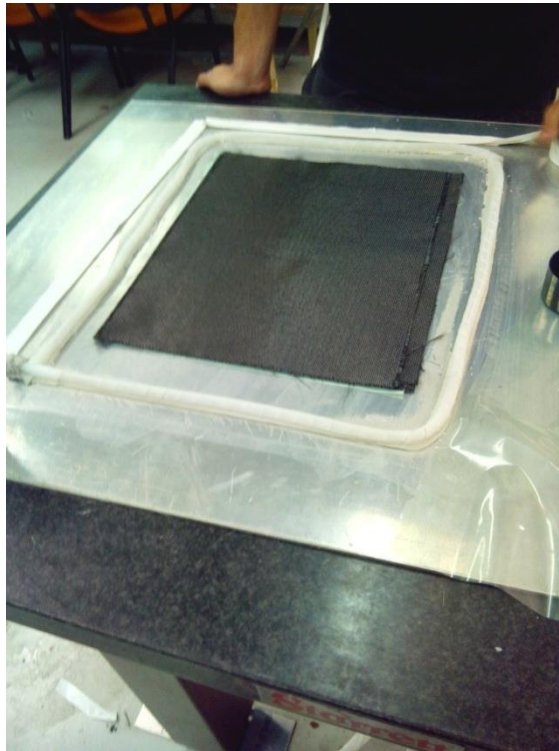
Κατασκευάστηκαν επίσης και σύνθετα υλικά με τη μέθοδο της έκχυσης (infusion). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν είτε πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα, είτε πολυδιευθυντικές ίνες γυαλικού. Η εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας Ciba Speciality Chemicals με κωδικό όνομα LY 5138-2. Ο καταλύτης ήταν της ίδιας εταιρίας με κωδικό HY 5138. Κατά την διαδικασία του πολυμερισμού της εποξειδικής ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε στην έκχυση η πλακά παρέμενε σε θερμοκρασία δωματίου για 8 ώρες, υπό συνθήκες κενού.



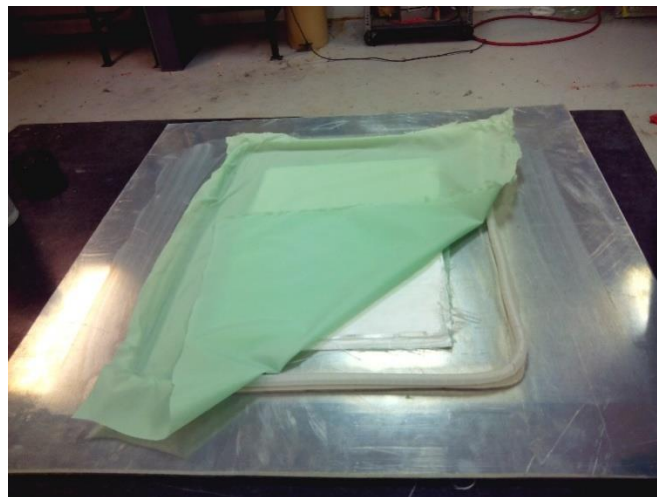
Εικόνα 4-5: Εποξειδική ρητίνη



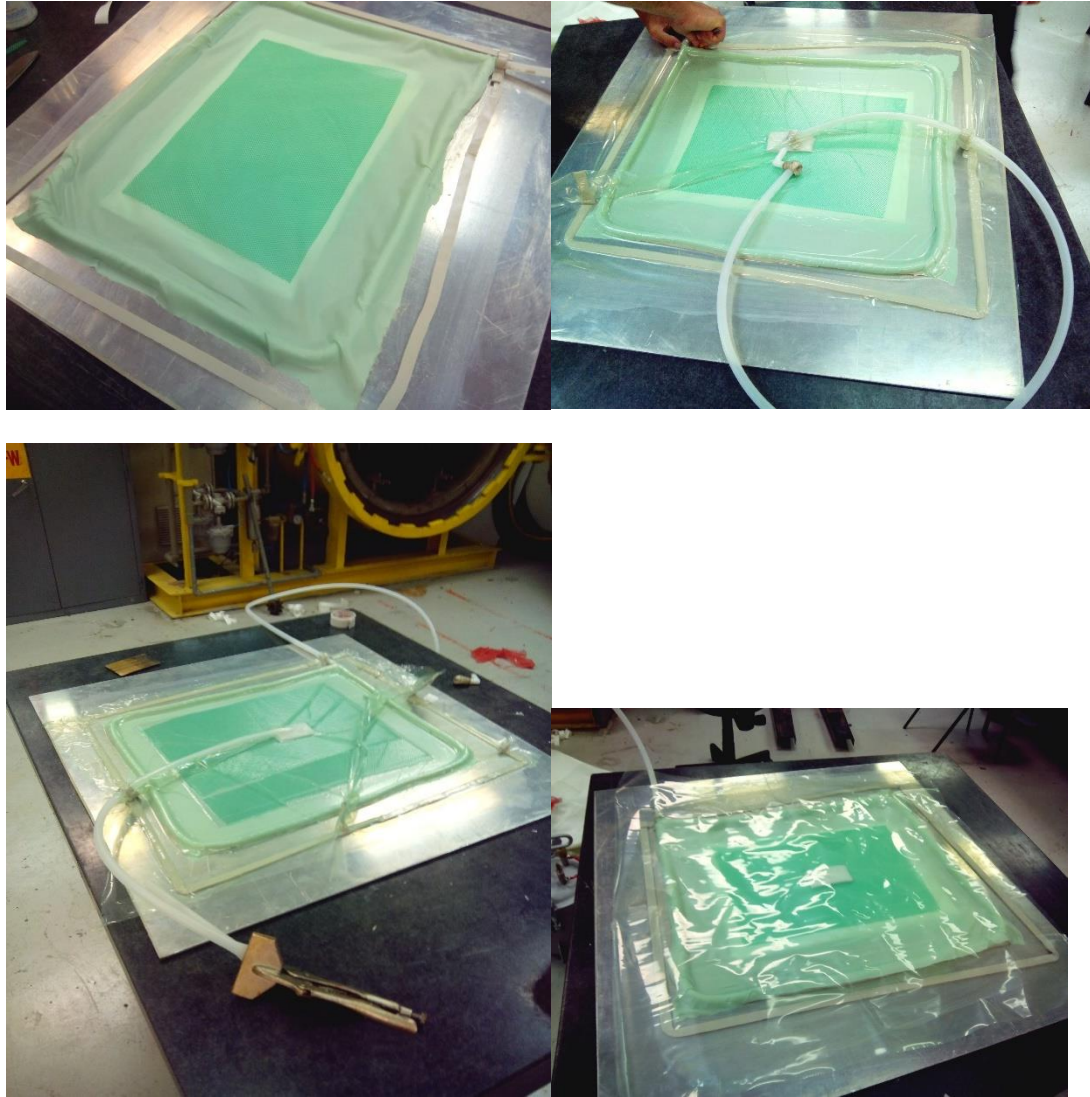
Εικόνα 4-6: Πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα



Εικόνα 4-7: Πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα τοποθετημένες στο εσωτερικό της διάταξης έγχυσης



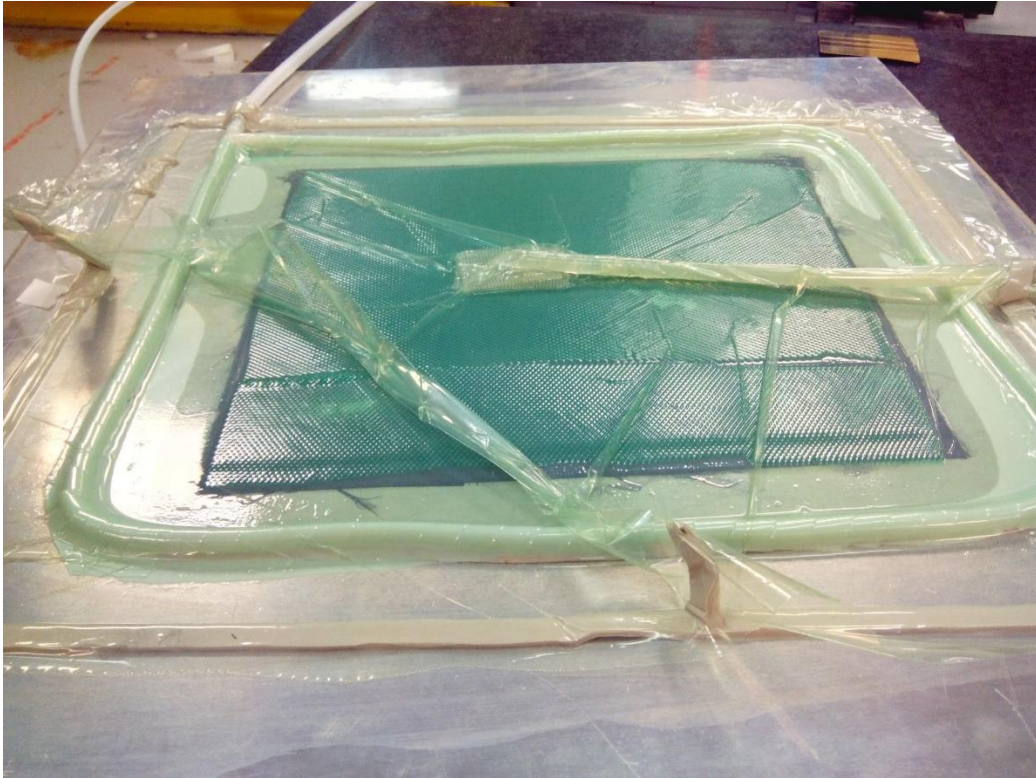
Εικόνα 4-8: Πολυδιευθυντικές ίνες γυαλιού τοποθετημένες στο εσωτερικό της διάταξης έγχυσης



Εικόνα 4-9: Διάταξη έγχυσης



Εικόνα 4-10: Συσκευή για την διατήρηση του κενού και τον έλεγχο ροής της εποξειδικής ρητίνης στη διάταξη εγχυσης



Εικόνα 4-11: Πολύστρωτη πλάκα σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, με πολυδιευθυντικές ίνες άνθρακα, εντός της διάταξης εγχυσης

Τα σύνθετα υλικά που κατασκευάστηκαν στη συνέχεια κόπηκαν σε λωρίδες και υποβλήθηκαν σε μονοαξονική εφελκυστική καταπόνηση, σε θερμοκρασία δωματίου. Η μηχανή εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν η INSTRON 8801 με λογισμικό BlueHill. Μετά το πέρας αρκετών δοκιμών εφελκυσμού του μονοδιευθυντικού προεμποτισμένο άνθρακα (Carbon Prepreg) καταλήξαμε στην δημιουργία ειδικών επικαλυπτικών ταινιών στα άκρα των δοκιμίων εφελκυσμού (Tabs) προκειμένου να αποφευχθεί η ολίσθηση των δειγμάτων. Αυτά ήταν κατασκευασμένα από Prepreg Fiber glass με πλέξη Twill 2x2 κομμένα σε λωρίδες στο πλάτος. Οι διαστάσεις τους ήταν κοινές με αυτές των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού και το μήκος τους αρκετό για να πραγματοποιηθούν 4 περιελίξεις των δοκιμίων.



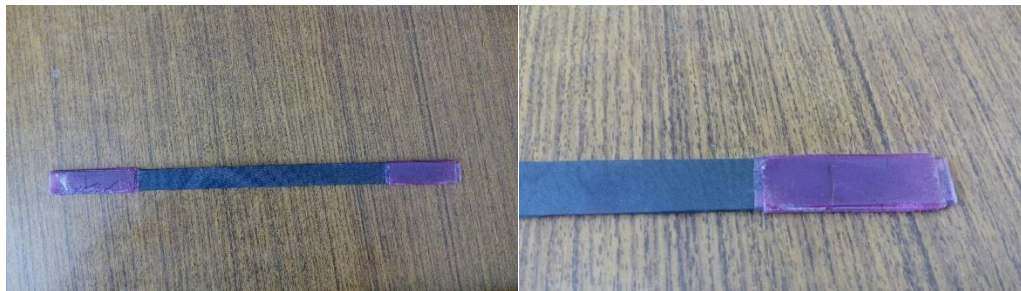
Εικόνα 4-12: Δείγματα σύνθετων υλικών που κατασκευάστηκαν, κομμένα σε λωρίδες



Εικόνα 4-13: Μηχάνη εφελκυσμού INSTRON και το σύστημα ελέγχου και καταγραφής των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοαξονικού εφελκυσμού



Εικόνα 4-14: Τοποθέτηση των σύνθετων υλικών στη μηχανή εφελκυσμού INSTRON



Εικόνα 4-15: Προετοιμασία των άκρων των δειγμάτων για την πραγματοποίηση των δοκιμών εφελκυσμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

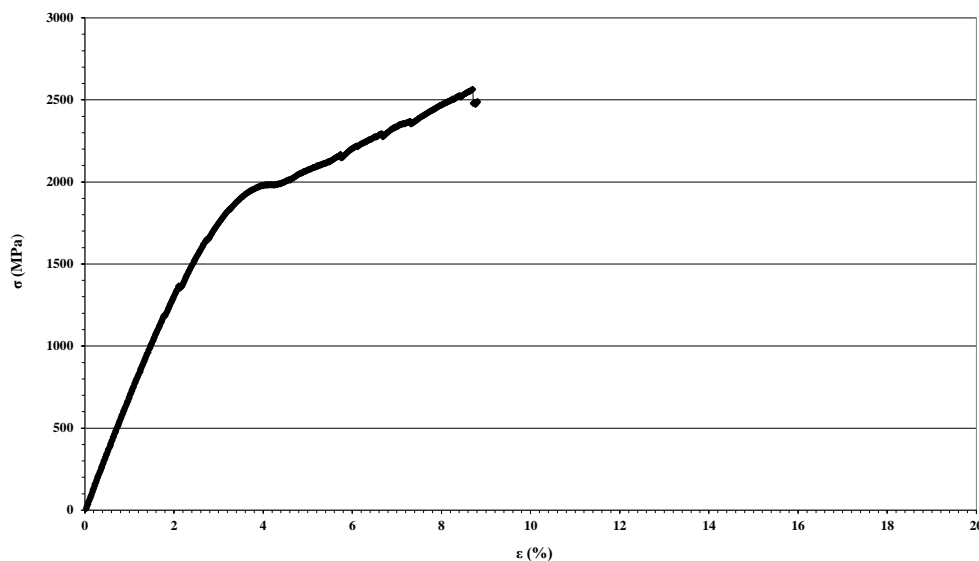
5.1 Δοκιμές εφελκυσμού

Ο σημαντικότερος παράγοντας που οδηγεί στην ταχεία ανάπτυξη των σύνθετων υλικών είναι η εξοικονόμηση μάζας που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ινών μικρής πυκνότητας και υψηλής αντοχής. Με βάση την αντοχή στον εφελκυσμό παρατηρήθηκε ότι οι ίνες άνθρακα είναι πολύ ανώτερες από του γυαλιού, ενώ οι ίνες Kevlar είναι ανώτερες από του γυαλιού αλλά κατώτερες του άνθρακα.

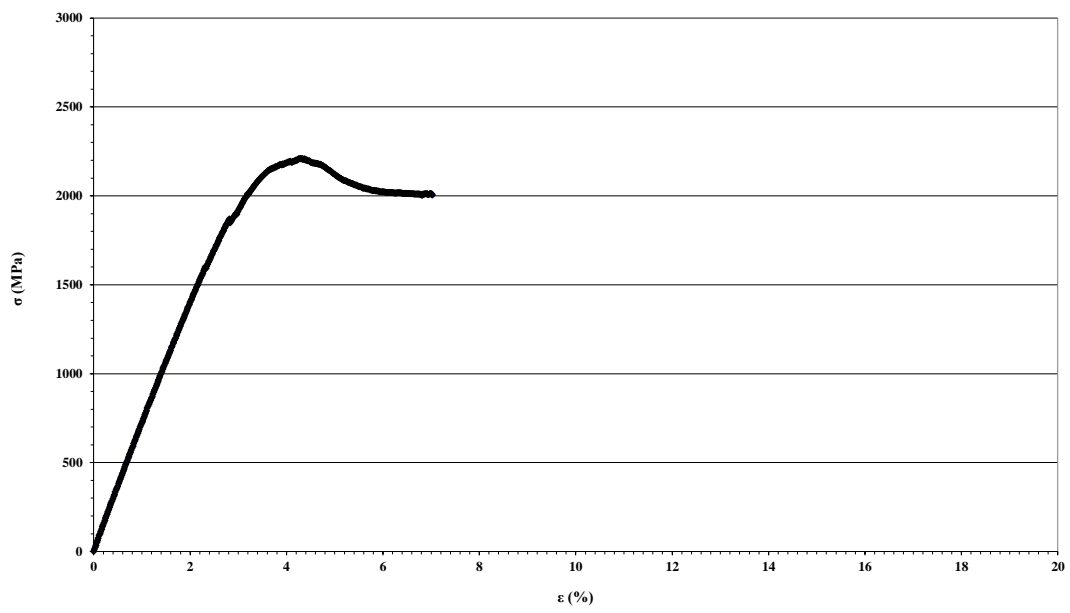
Όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί, τα περισσότερα σύνθετα υλικά συμπεριφέρονταν ως πλήρως ελαστικά μέχρι την αστοχία τους. Η έλλειψη πλαστικής συμπεριφοράς, που συνεπάγεται και αδυναμία απορρόφησης ενέργειας από το υλικό αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματά τους.

Από τις τυπικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης, σε εφελκυσμό, που ακολουθούν παρατηρήθηκε επίσης μια μη γραμμική συμπεριφορά των στρώσεων με εύκαμπτη μήτρα ρητίνης, λόγω της βισκοελαστικής ή πλαστικής ροής της ρητίνης. Οι παραμορφώσεις σε αστοχία της μήτρας φαίνεται ότι δε συνδέονται με εκείνες της μήτρας.

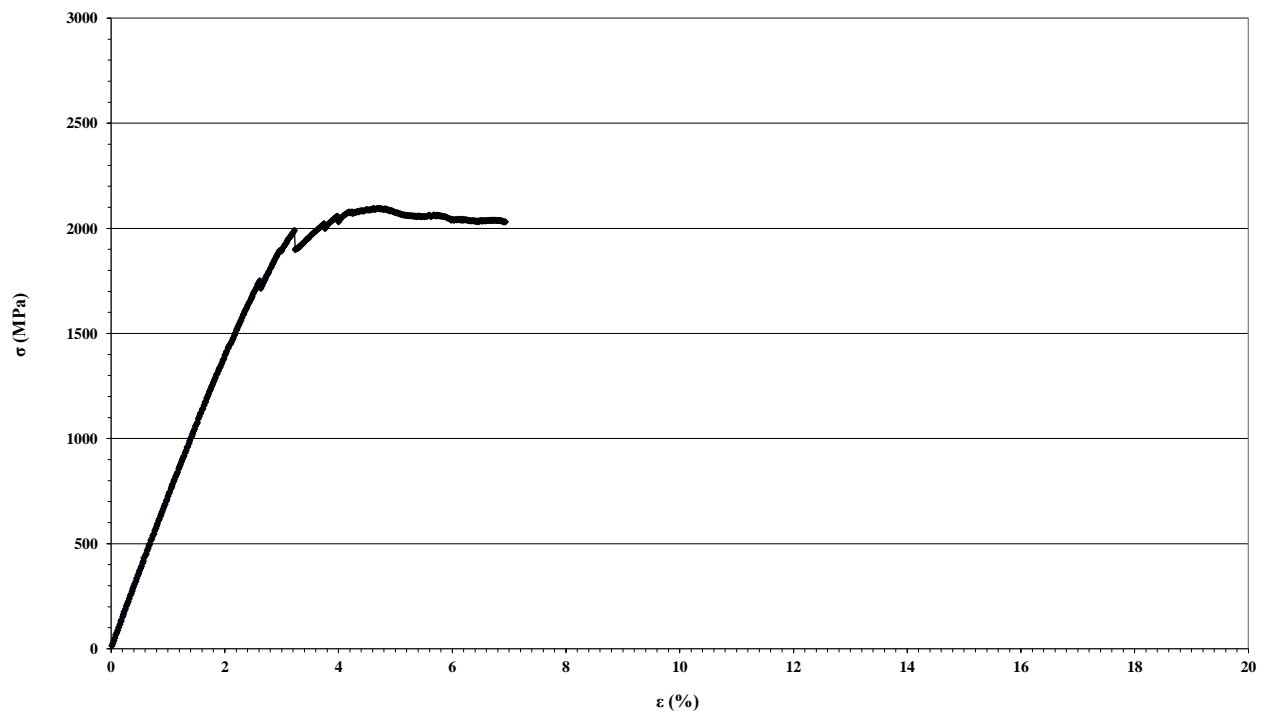
5.1.1 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης



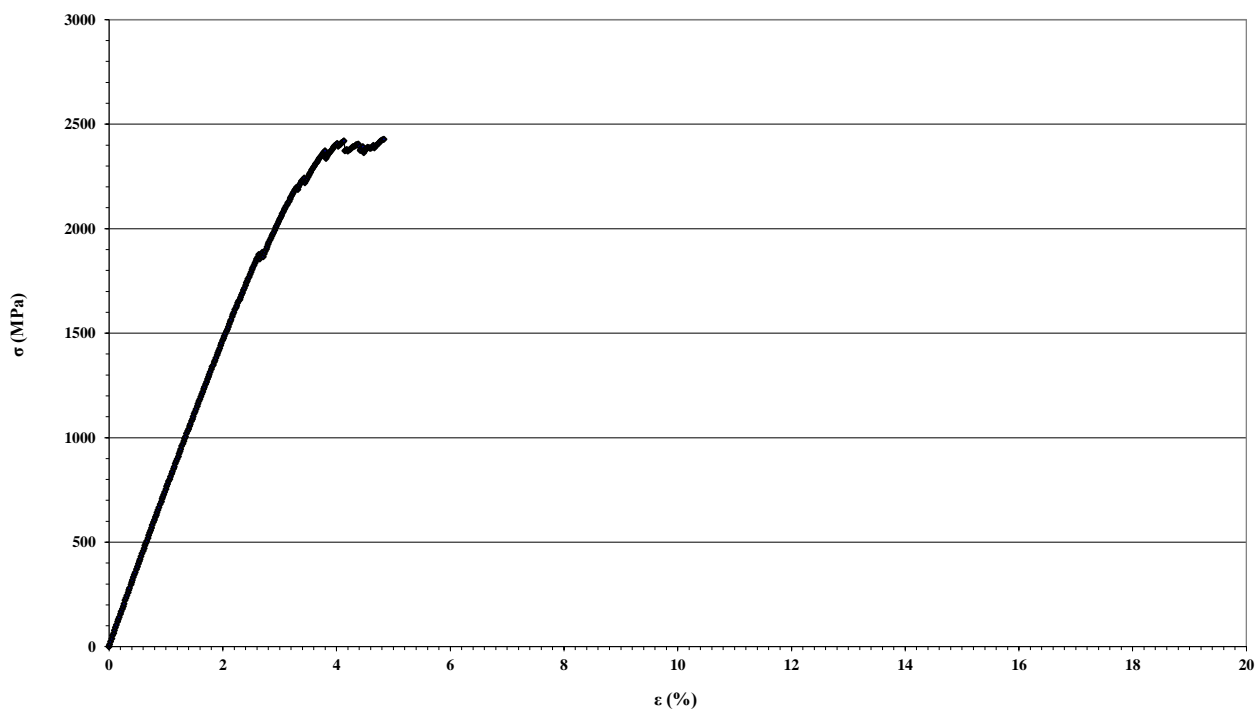
Εικόνα 5-1: Δοκίμιο 1



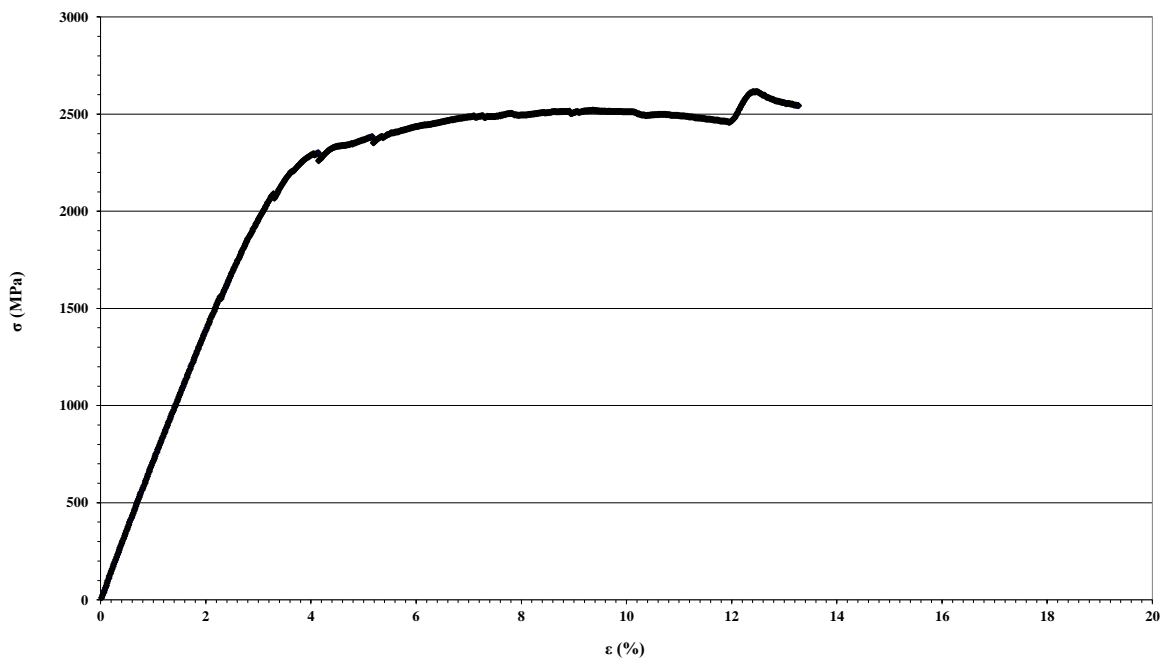
Εικόνα 5-2: Δοκίμιο 2



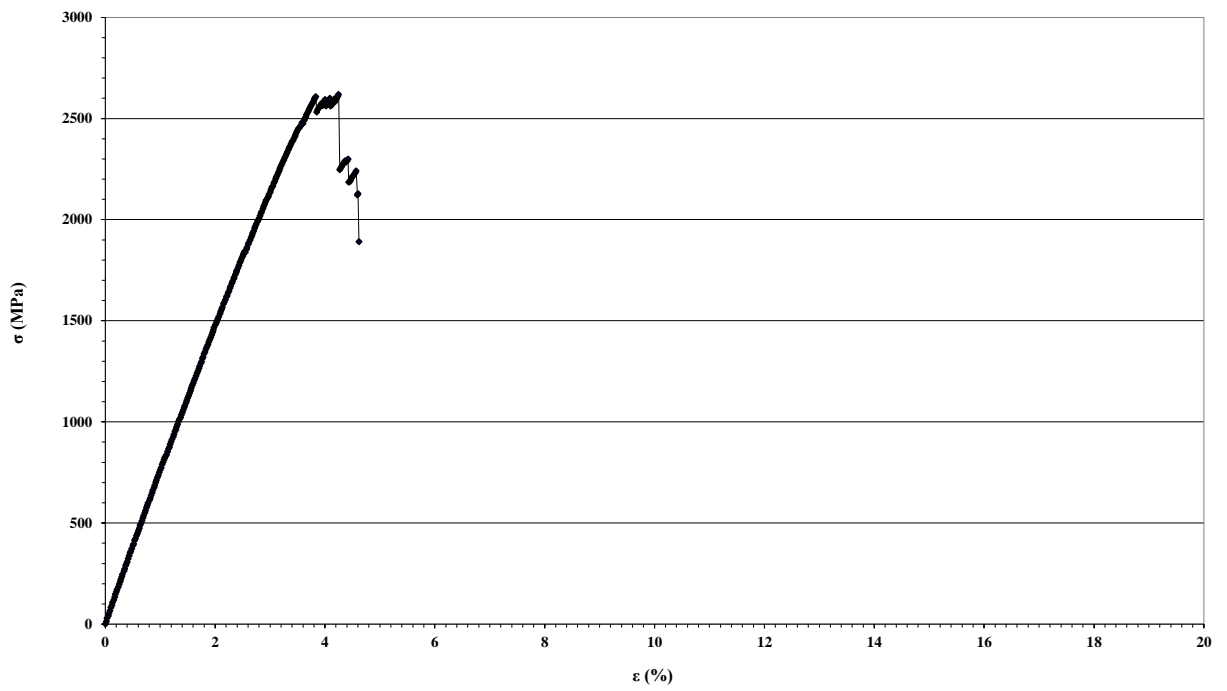
Εικόνα 5-3: Δοκίμιο 3



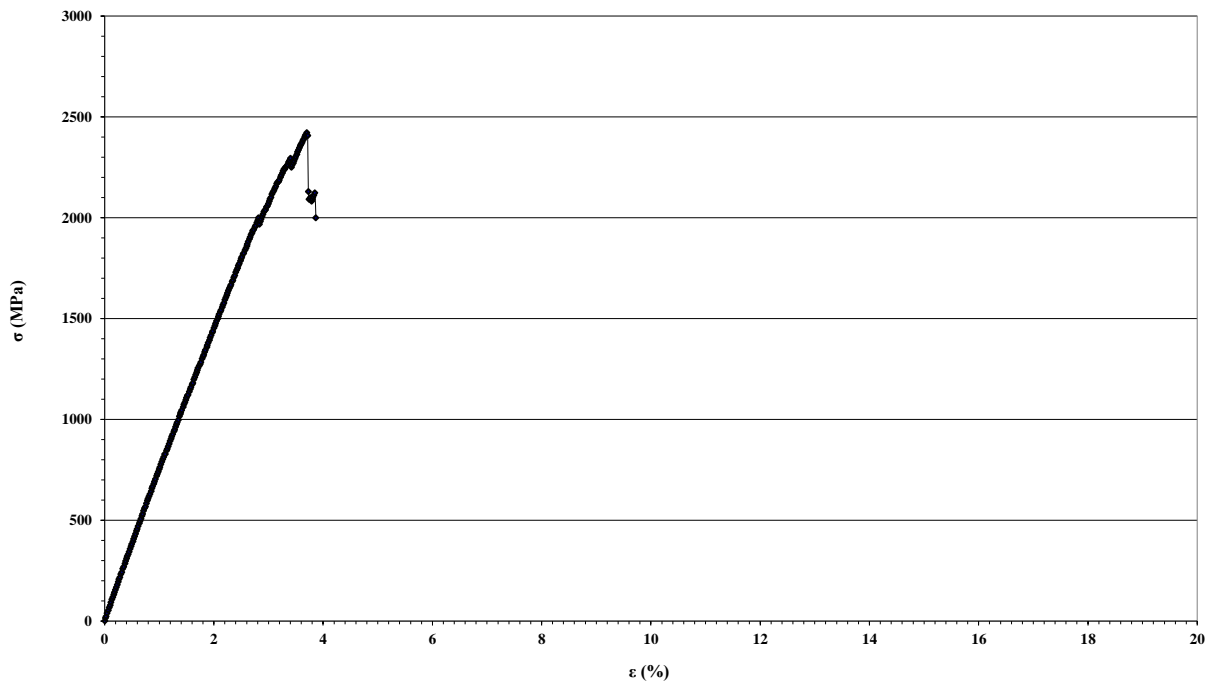
Εικόνα 5-4: Δοκίμιο 4



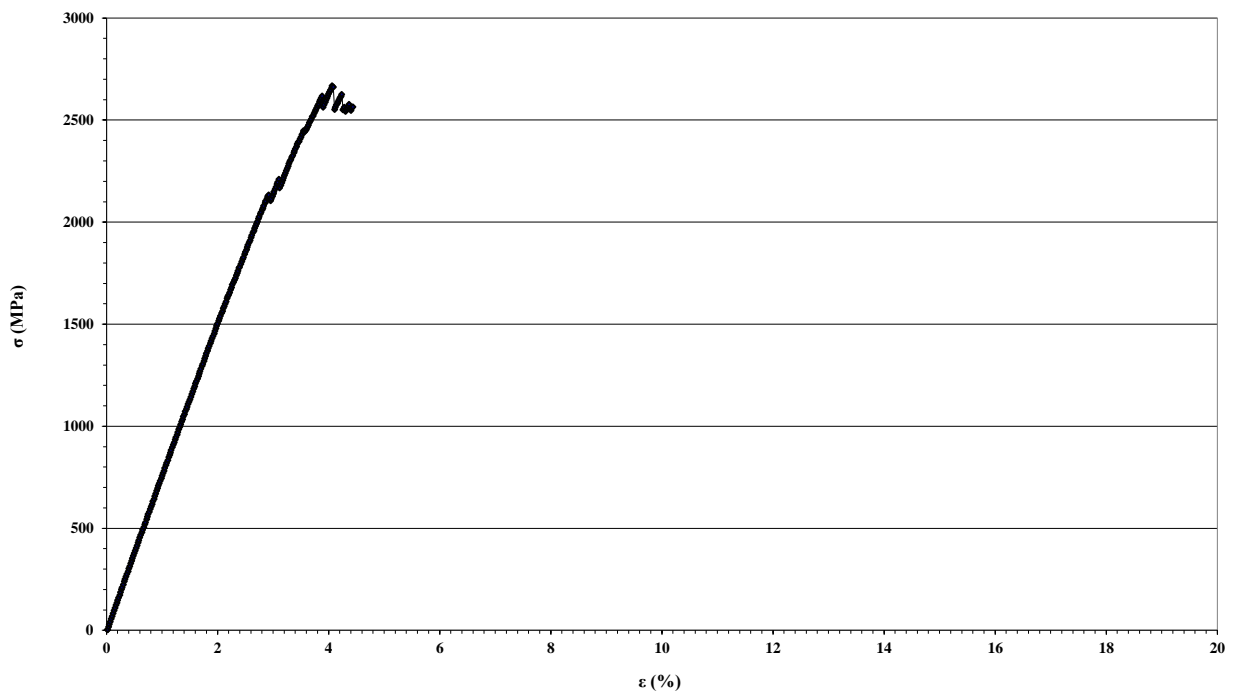
Εικόνα 5-5: Δοκίμιο 5



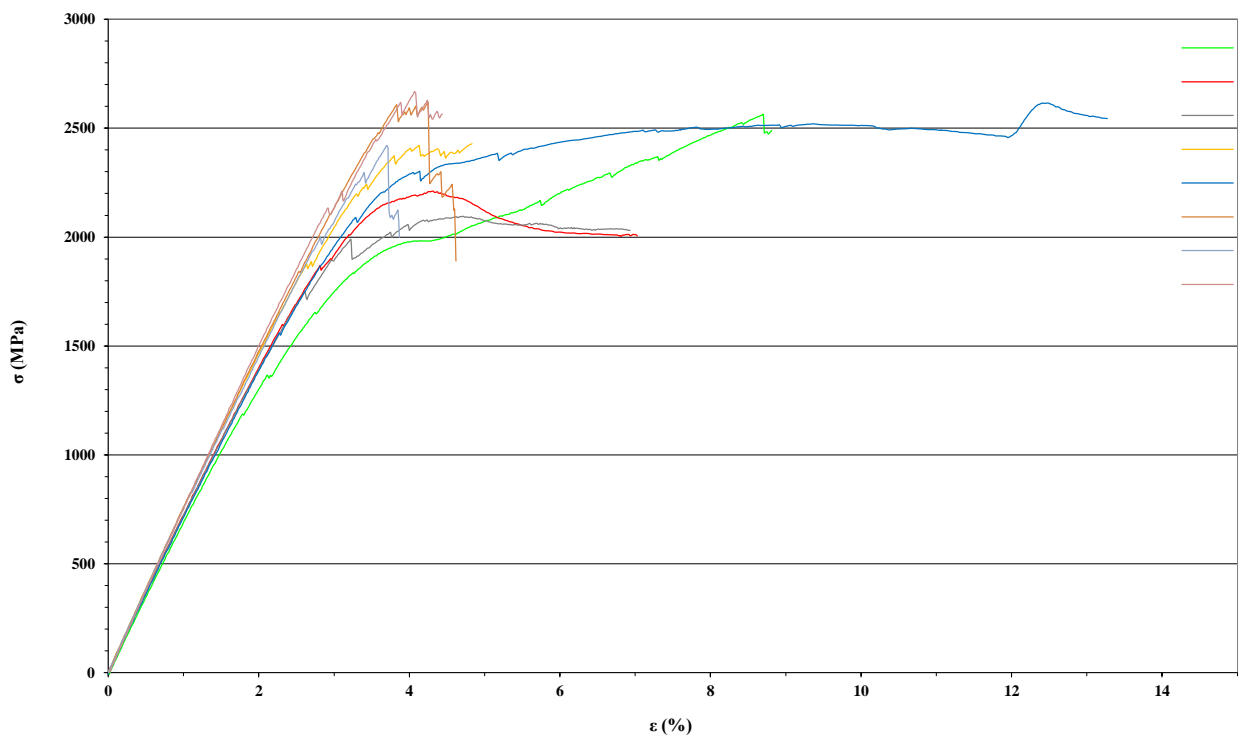
Εικόνα 5-6: Δοκίμιο 6



Εικόνα 5-7: Δοκίμιο 7

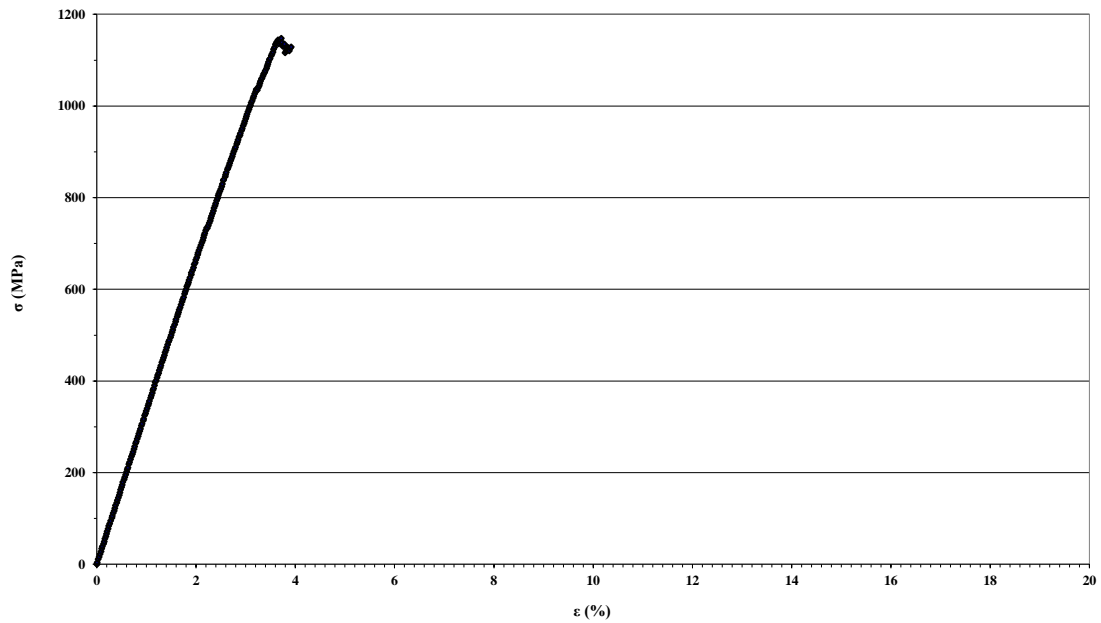


Εικόνα 5-8: Δοκίμιο 8

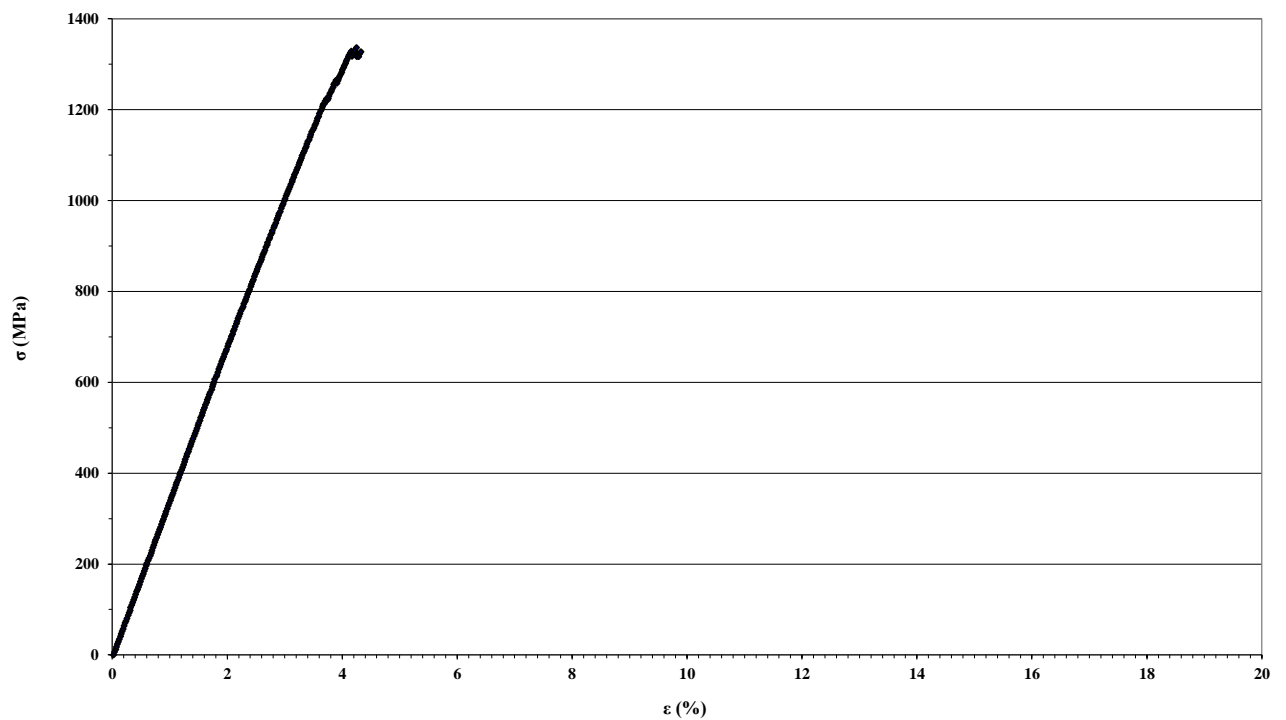


Εικόνα 5-9: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμποτισμένων φύλλων ρητίνης

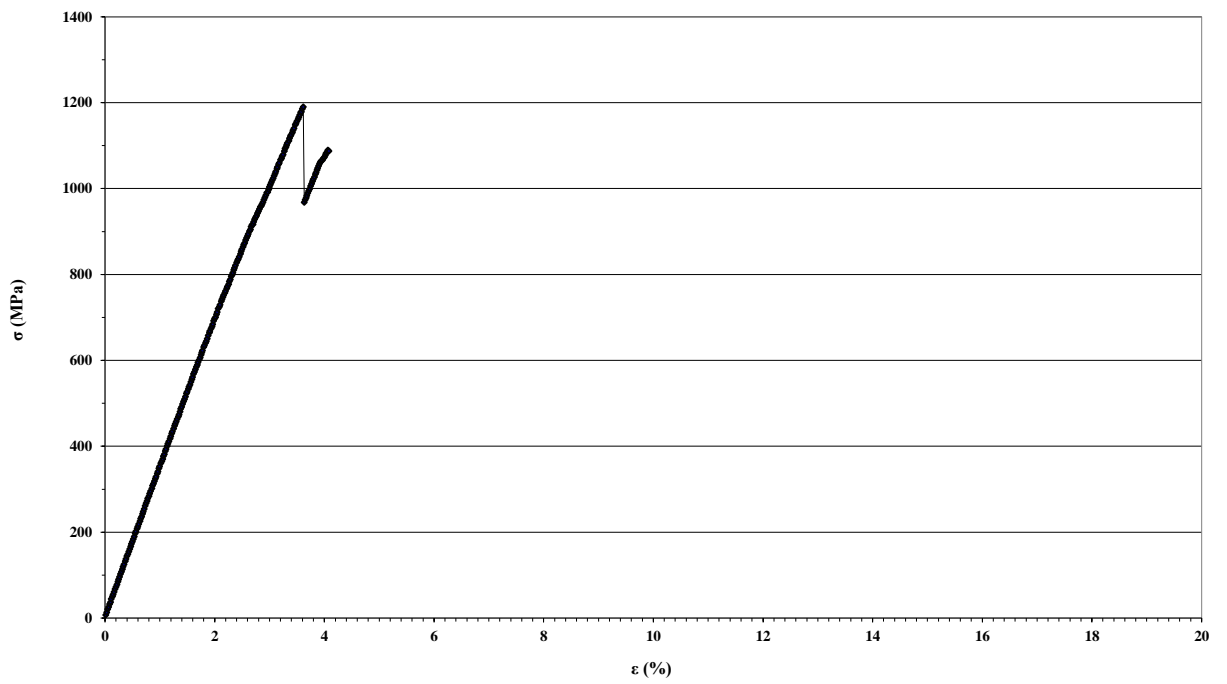
5.1.2 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης



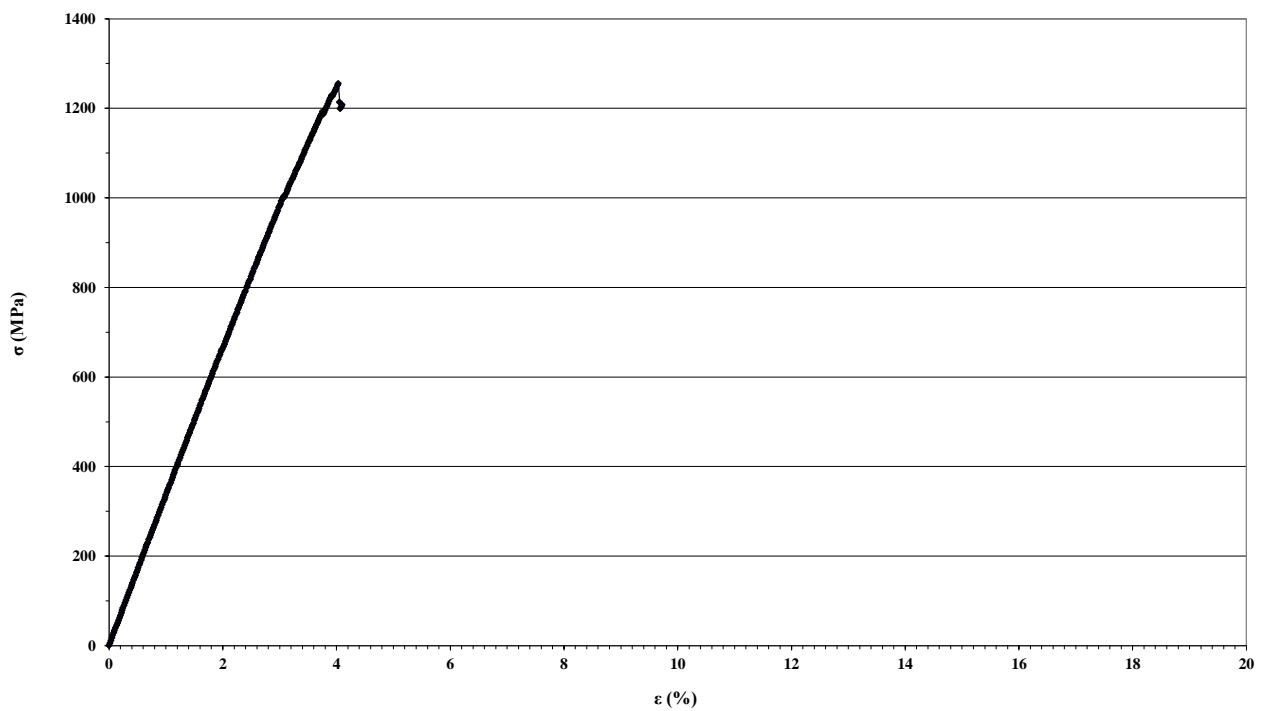
Εικόνα 5-10: Δοκίμιο 1



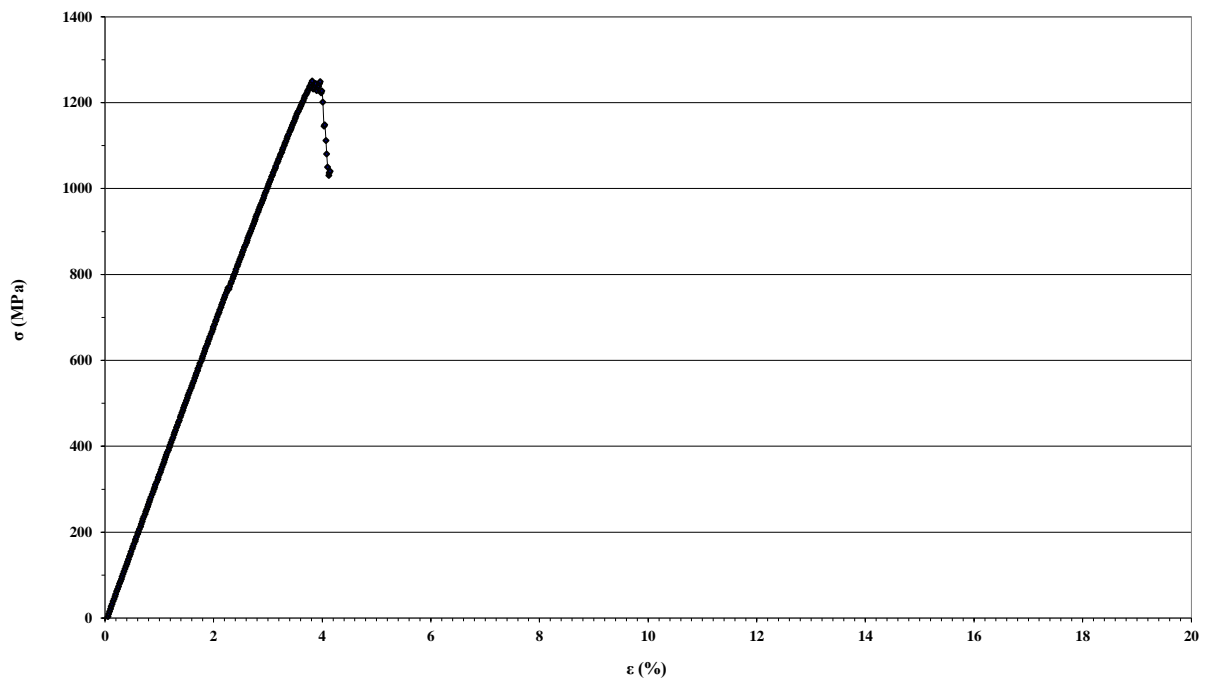
Εικόνα 5-11: Δοκίμιο 2



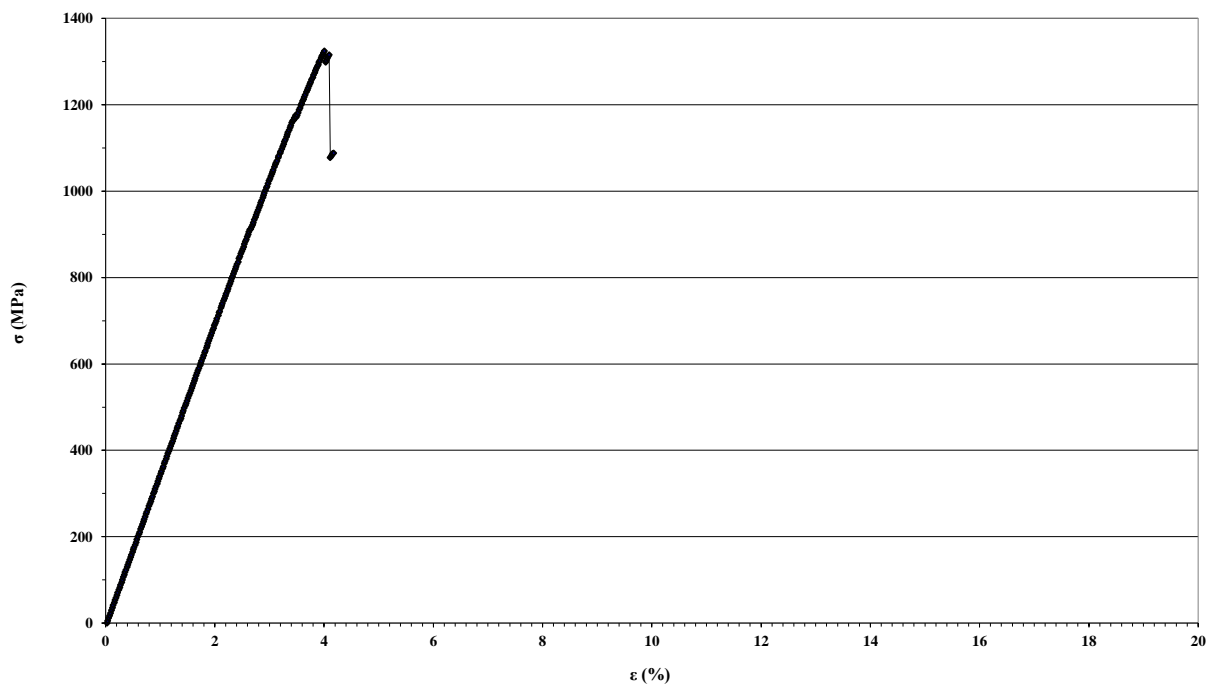
Εικόνα 5-12: Δοκίμιο 3



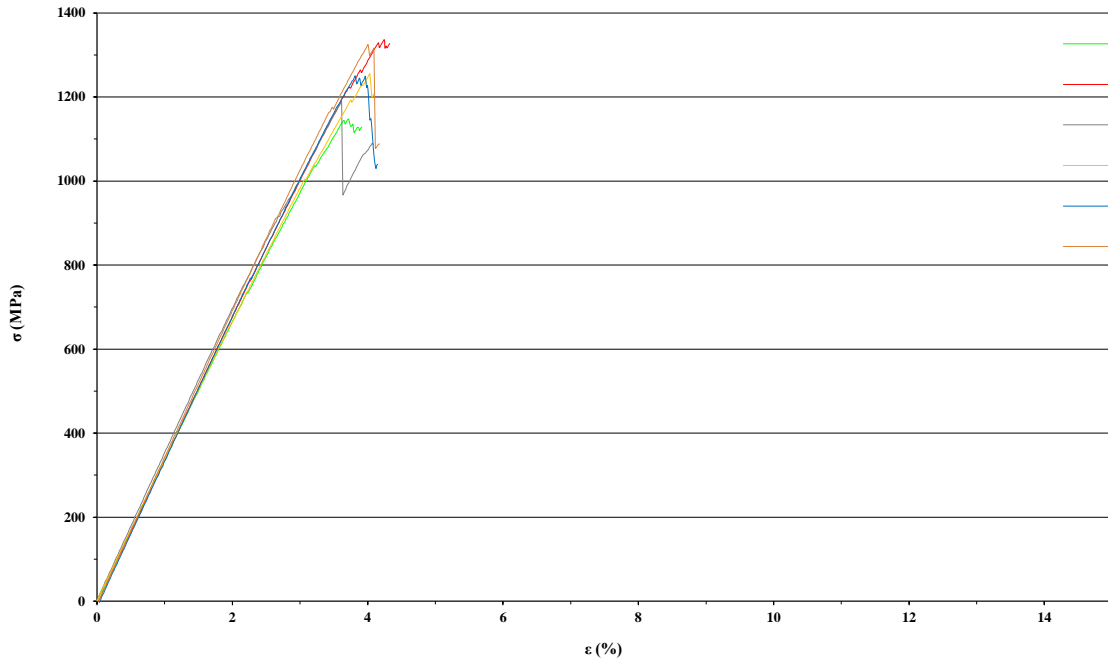
Εικόνα 5-13: Δοκίμιο 4



Εικόνα 5-14: Δοκίμιο 5

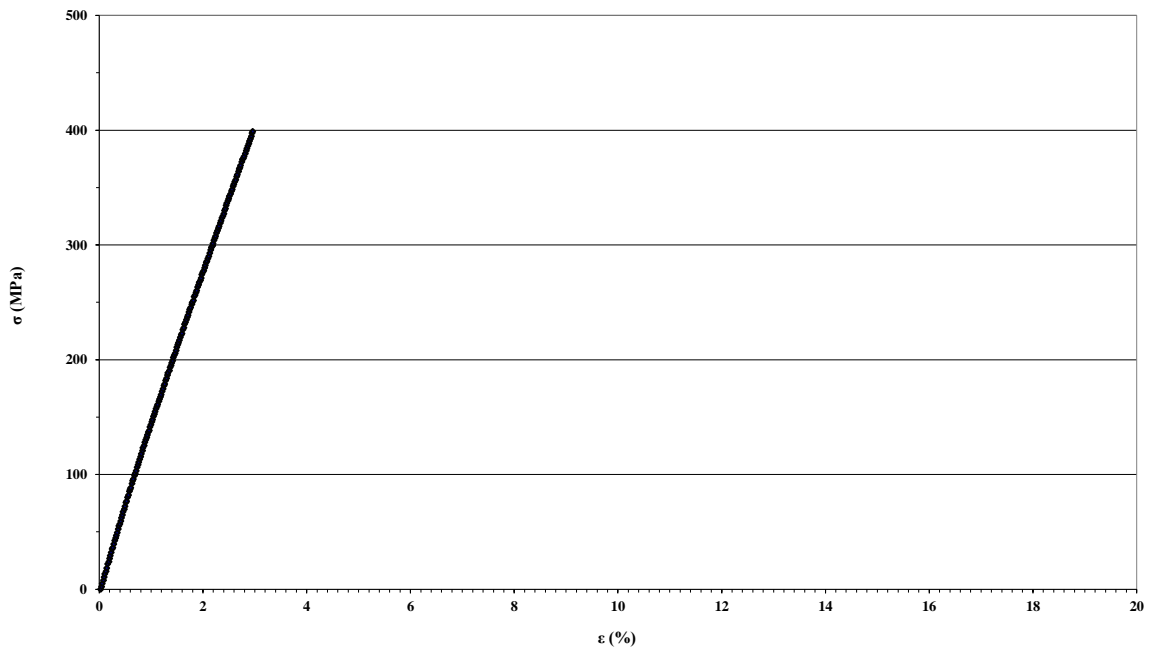


Εικόνα 5-15: Δοκίμιο 6

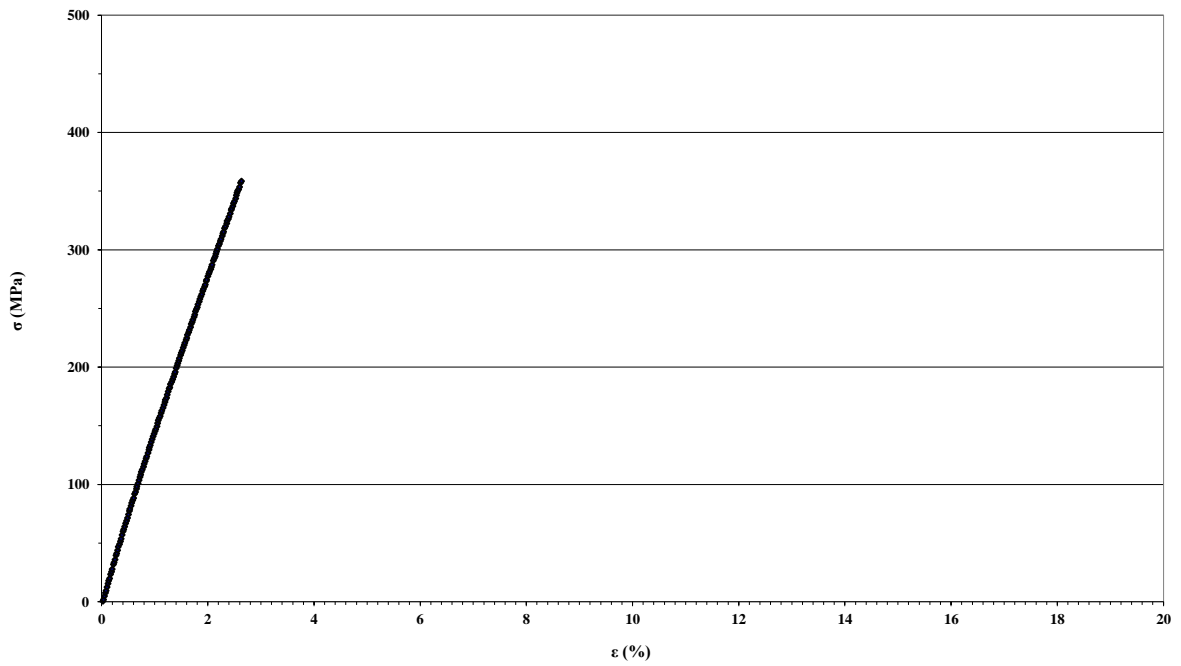


Εικόνα 5-16: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

5.1.3 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

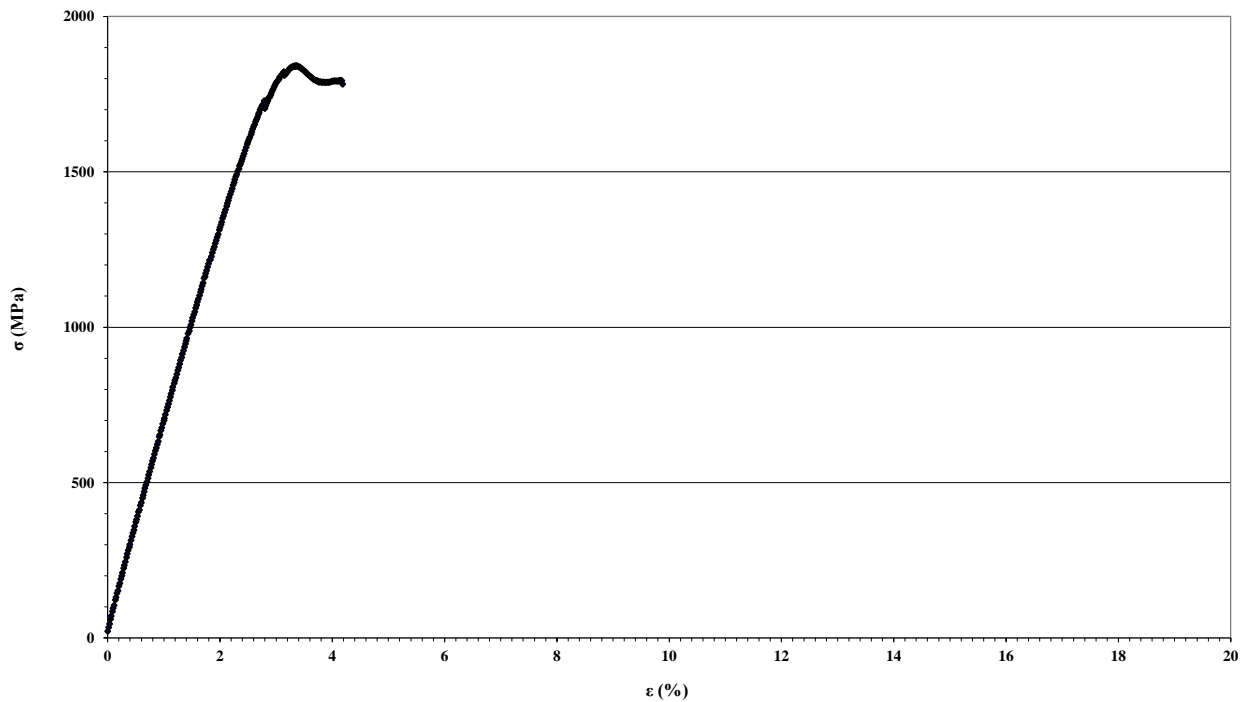


Εικόνα 5-17: Δοκίμιο 1

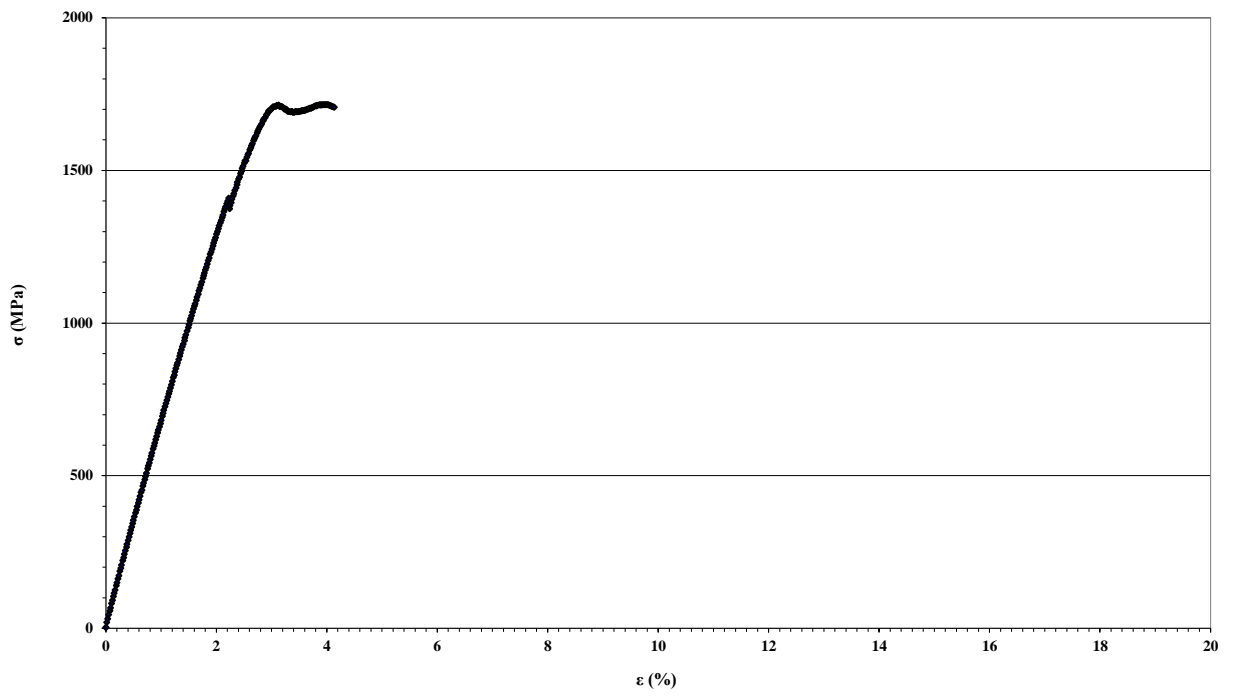


Εικόνα 5-18: Δοκίμιο 2

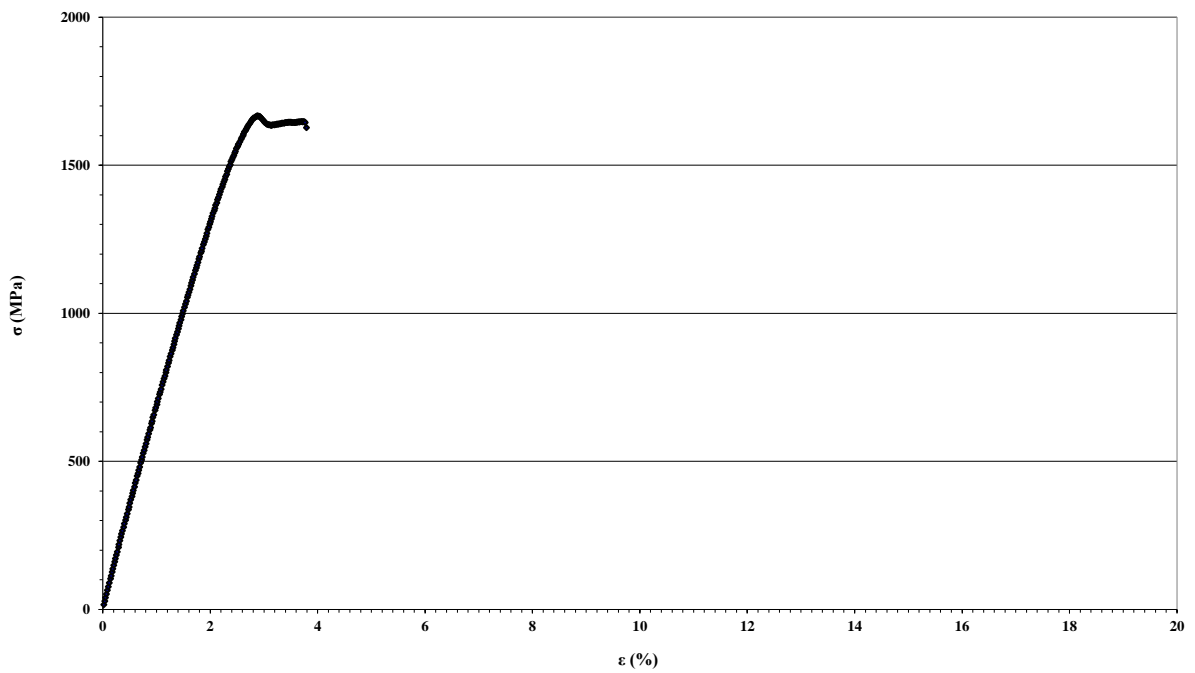
5.1.4 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθοντικά με ίνες άνθρακα (προεμποτισμένο)



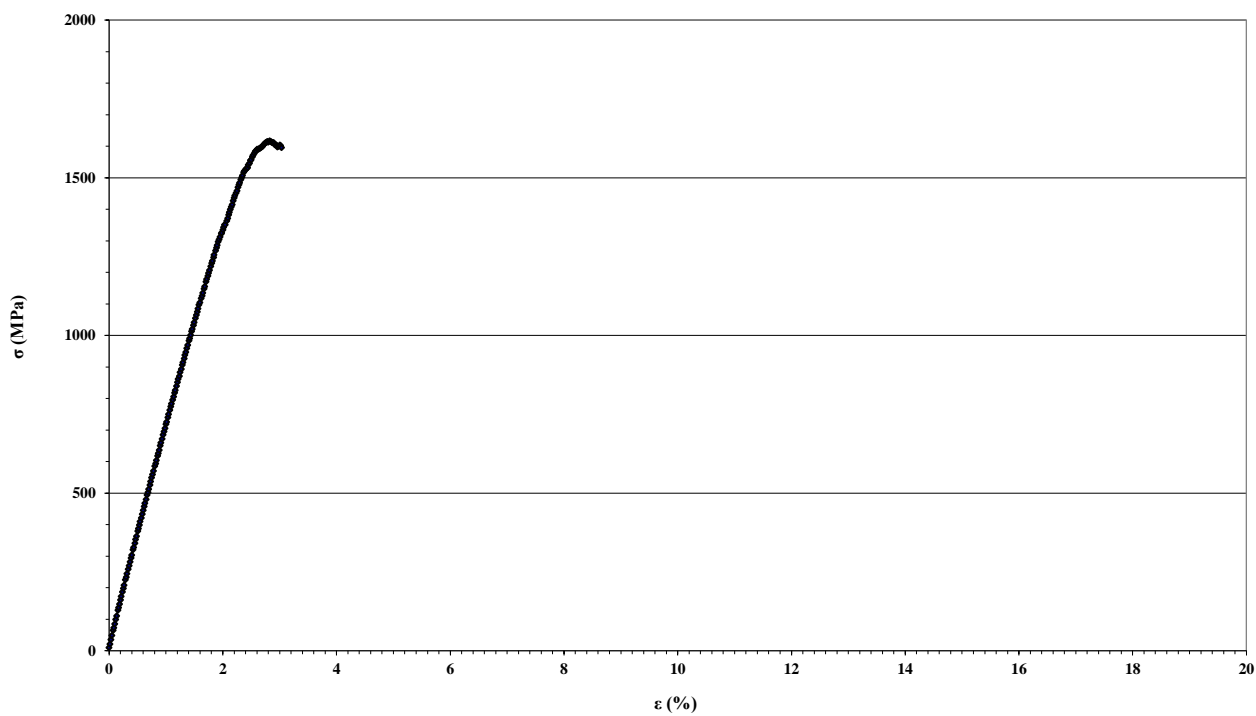
Εικόνα 5-19: Δοκίμιο 1



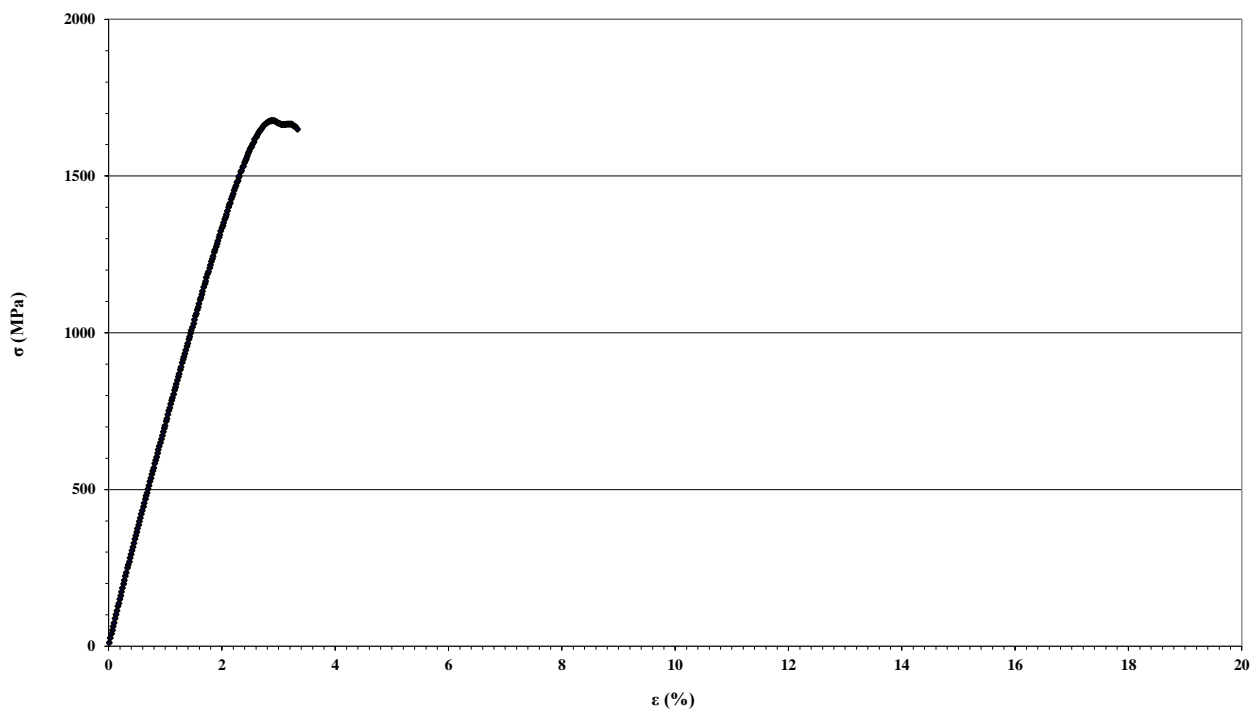
Εικόνα 5-20: Δοκίμιο 2



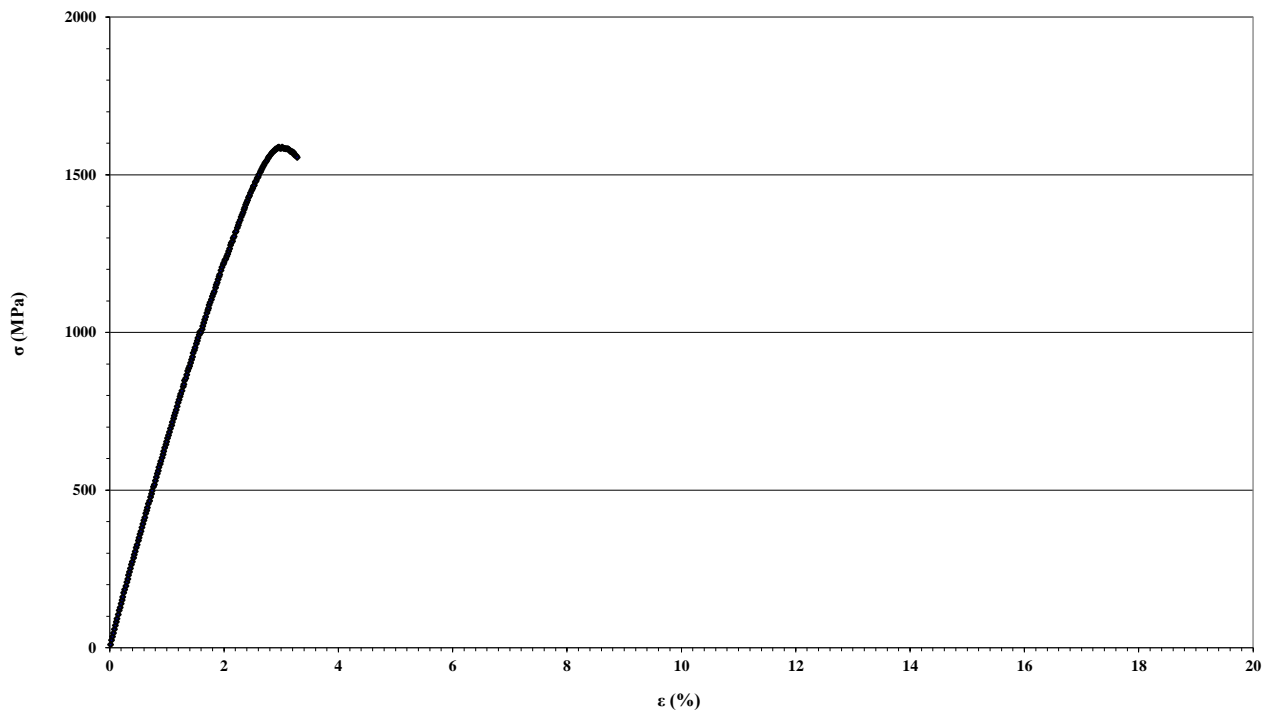
Εικόνα 5-21: Δοκίμιο 3



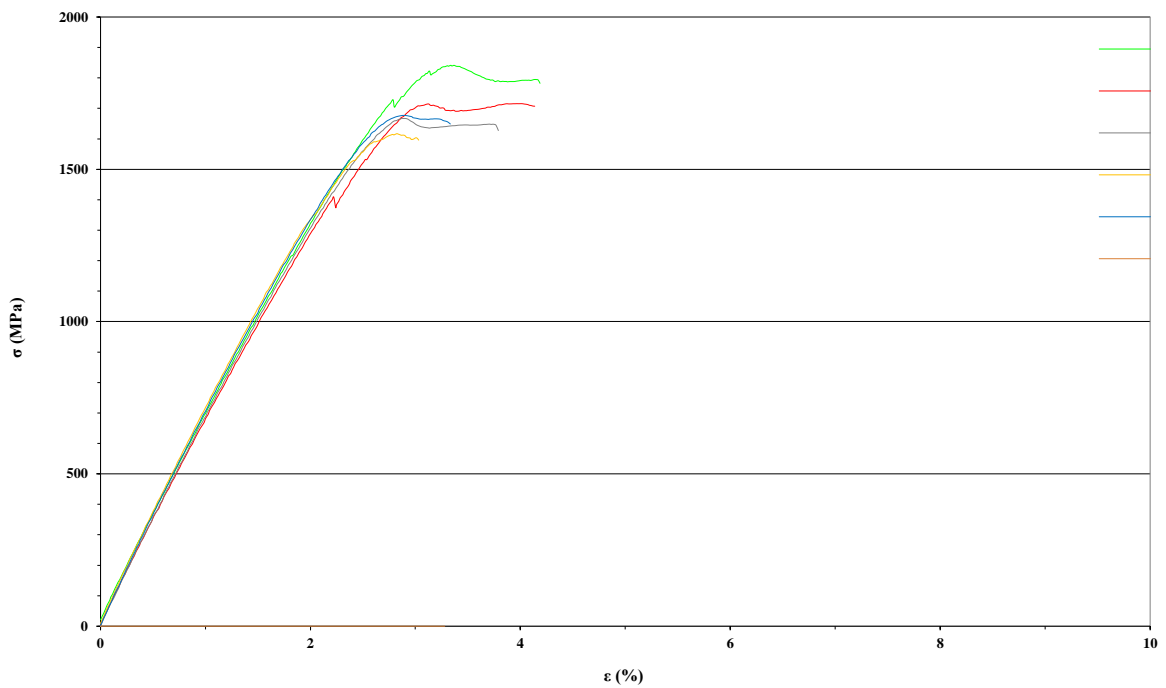
Εικόνα 5-22: Δοκίμιο 4



Εικόνα 5-23: Δοκίμιο 5

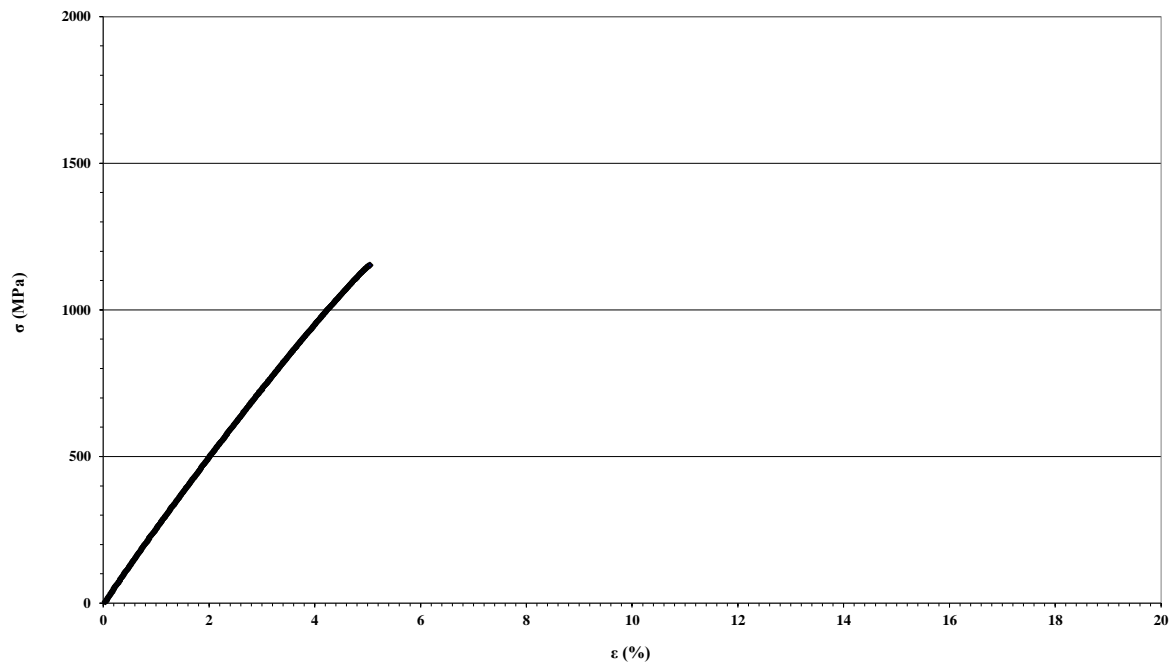


Εικόνα 5-24: Δοκίμιο 7

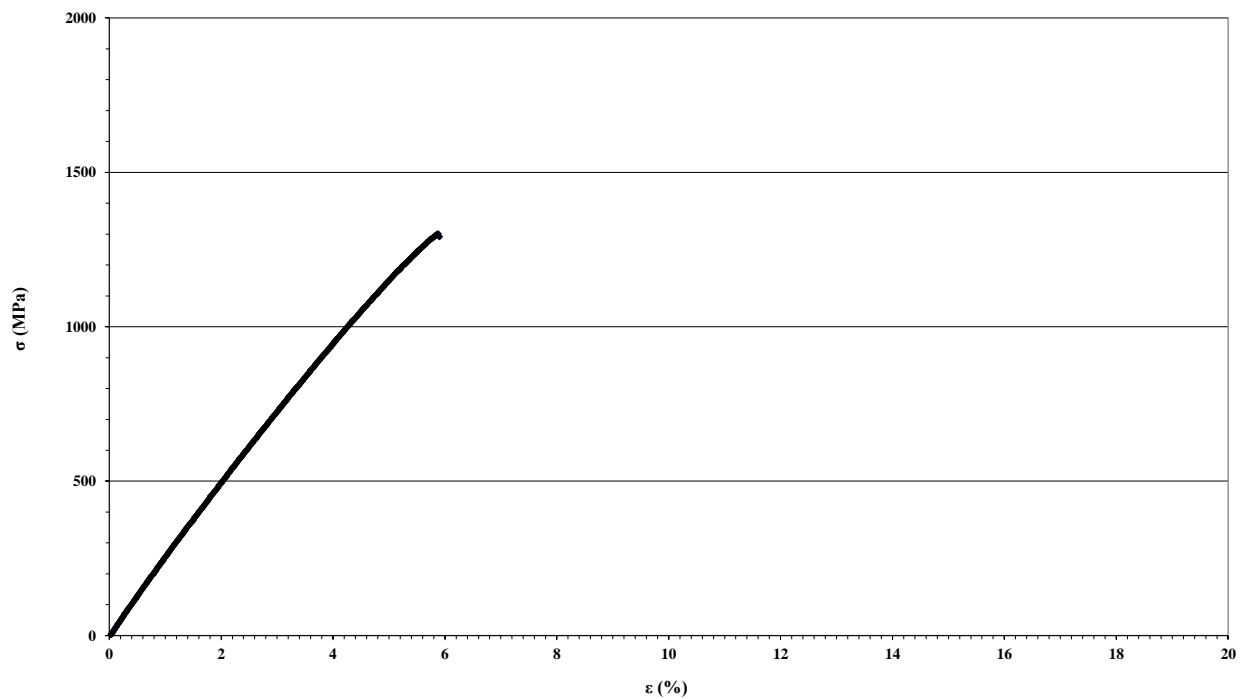


Εικόνα 5-25: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (προεμποτισμένο)

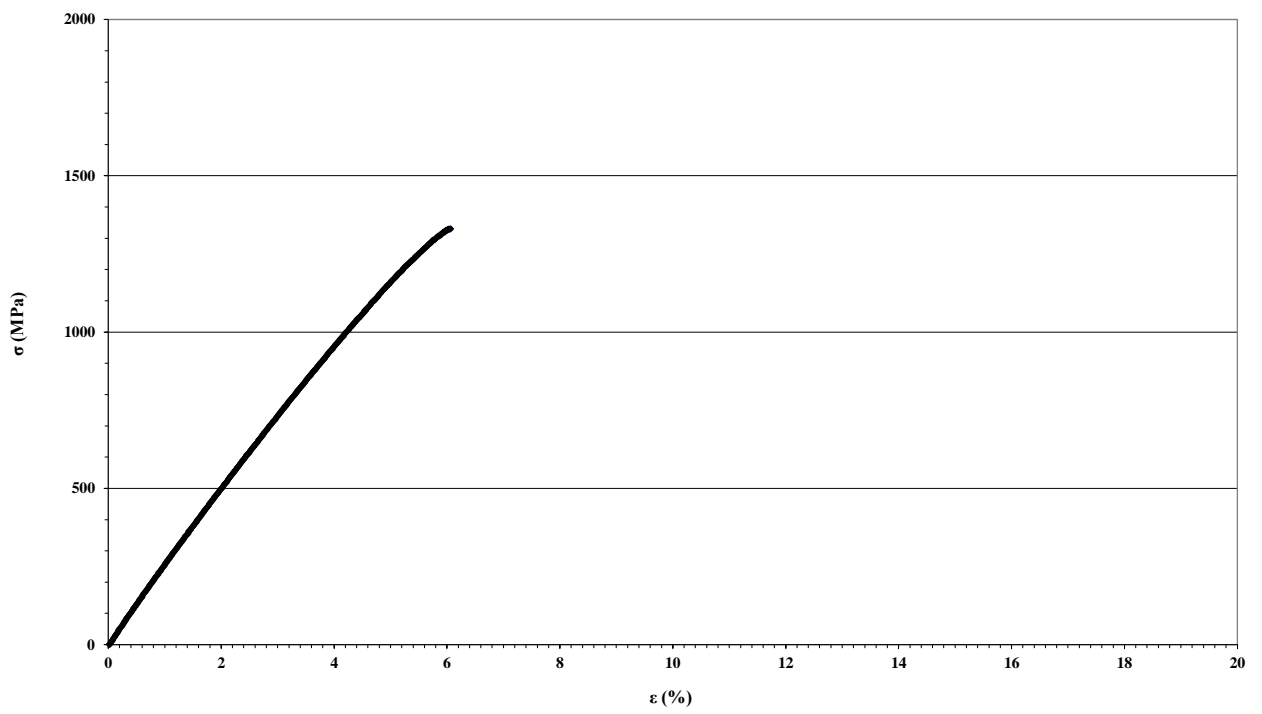
5.1.5 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικάμείνες γυαλιού (προεμποτισμένο)



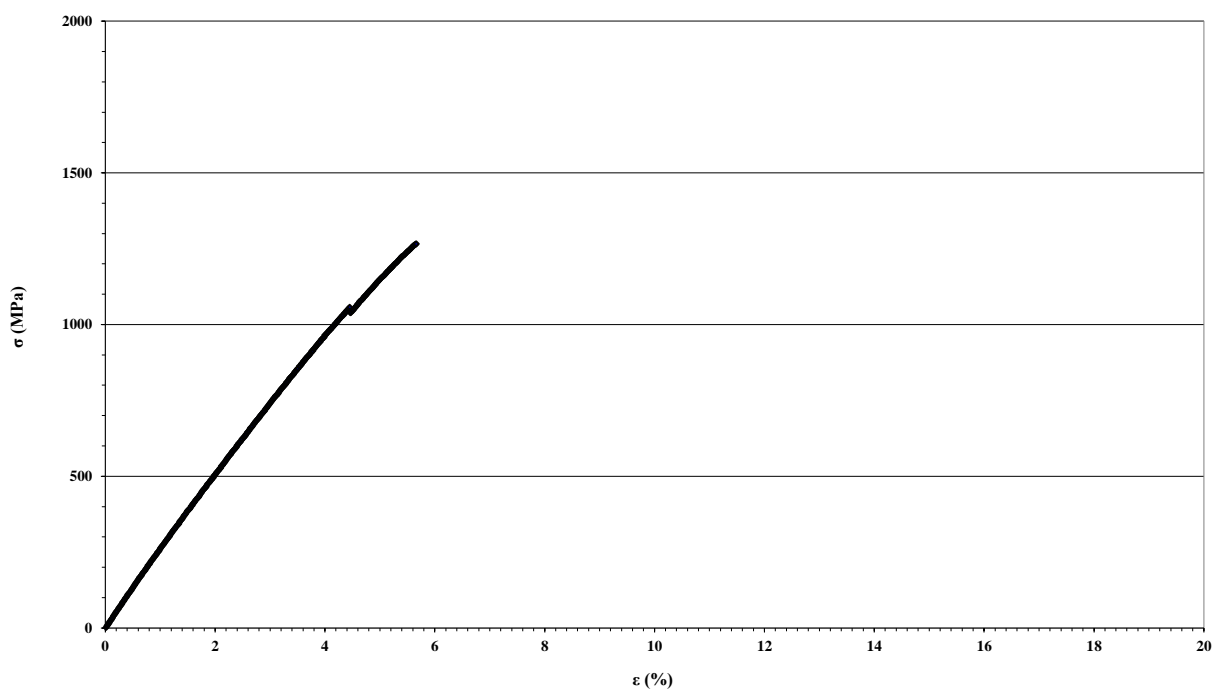
Εικόνα 5-26: Δοκίμιο 1



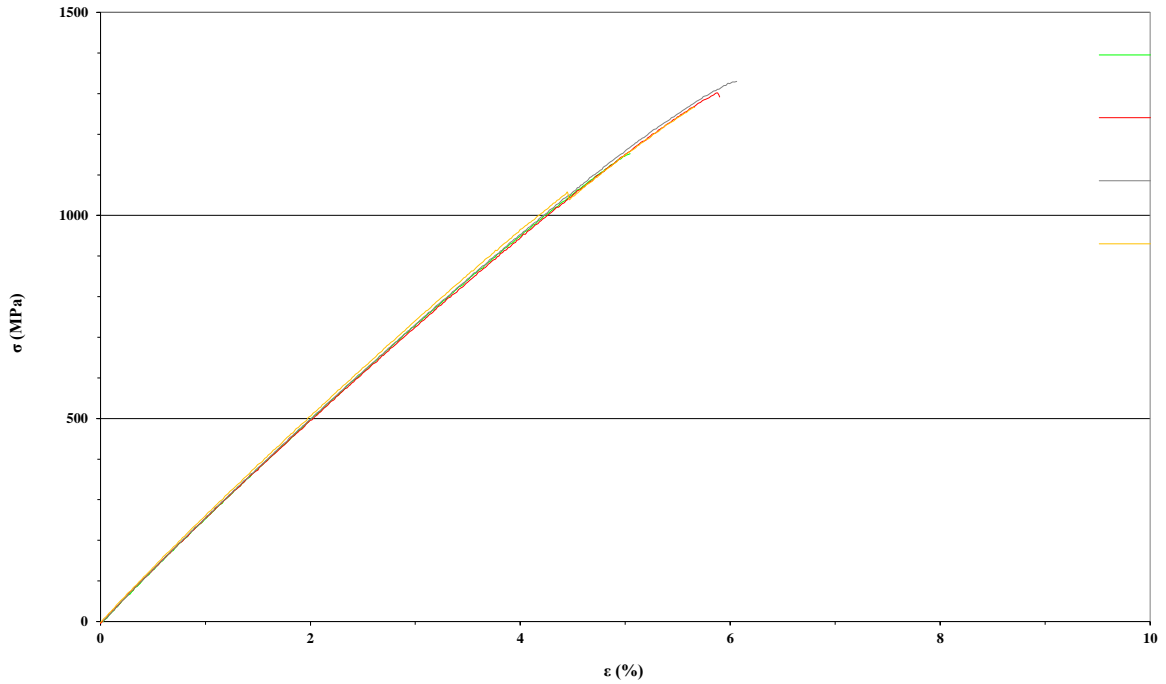
Εικόνα 5-27: Δοκίμιο 2



Εικόνα 5-28: Δοκίμιο 3

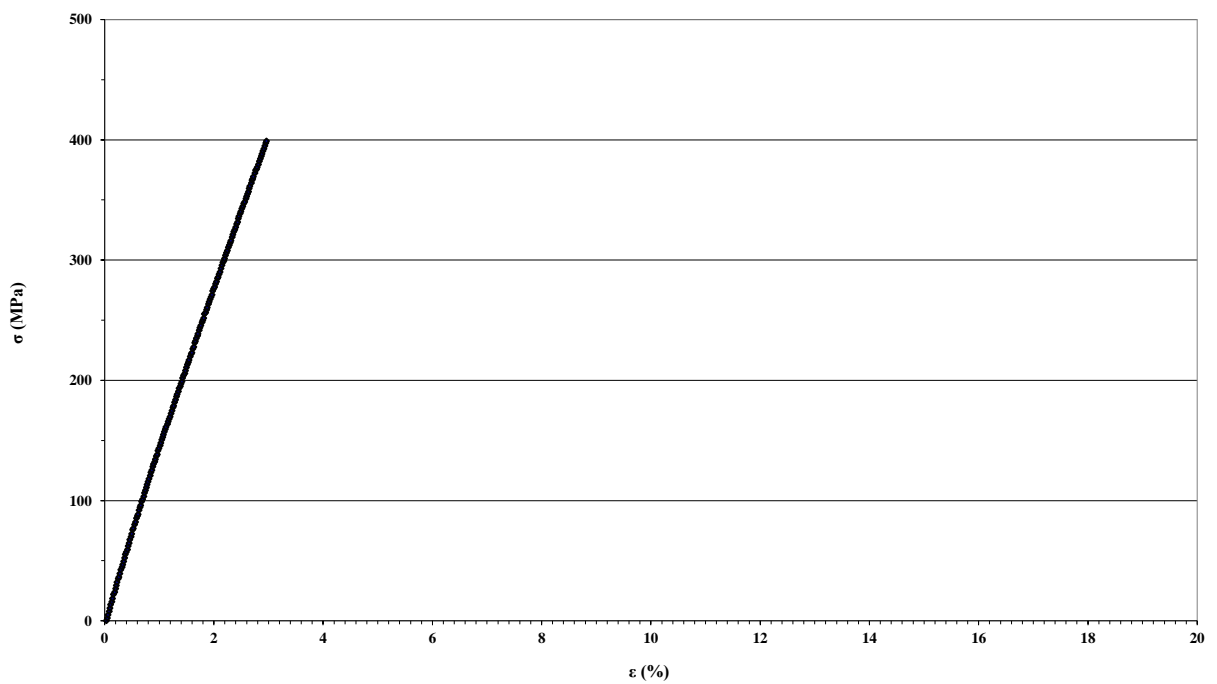


Εικόνα 5-29: Δοκίμιο 4

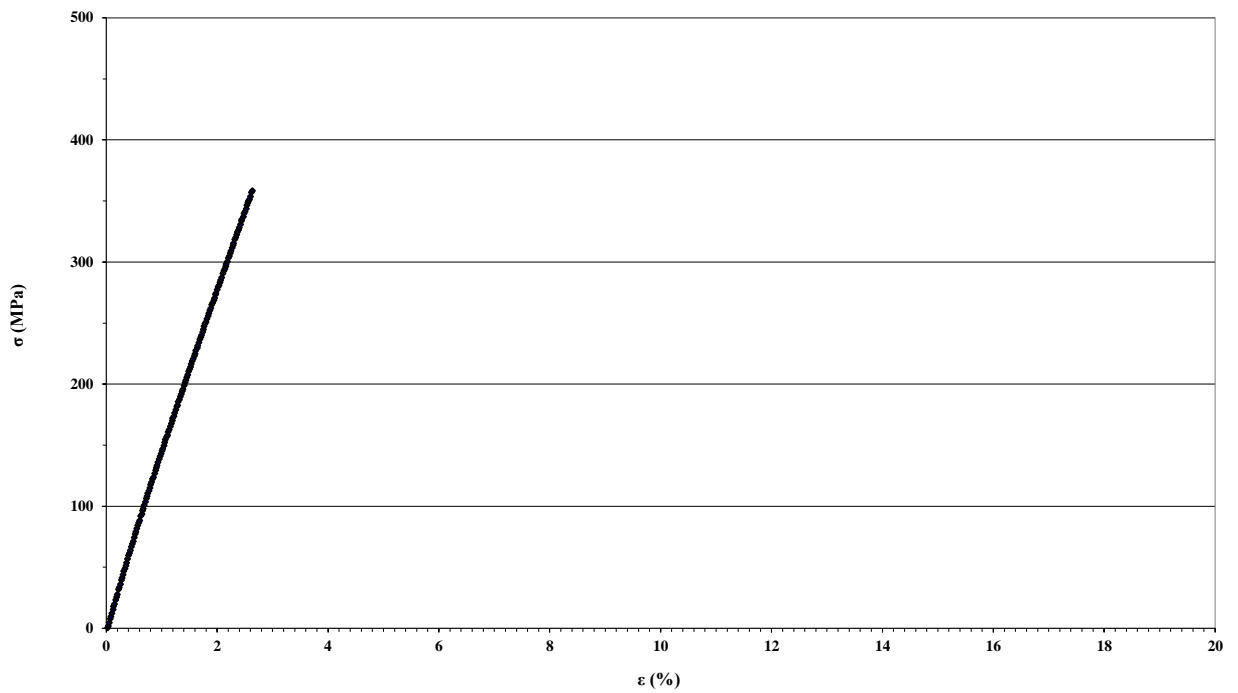


Εικόνα 5-30: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο μονοδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (προεμποτισμένο)

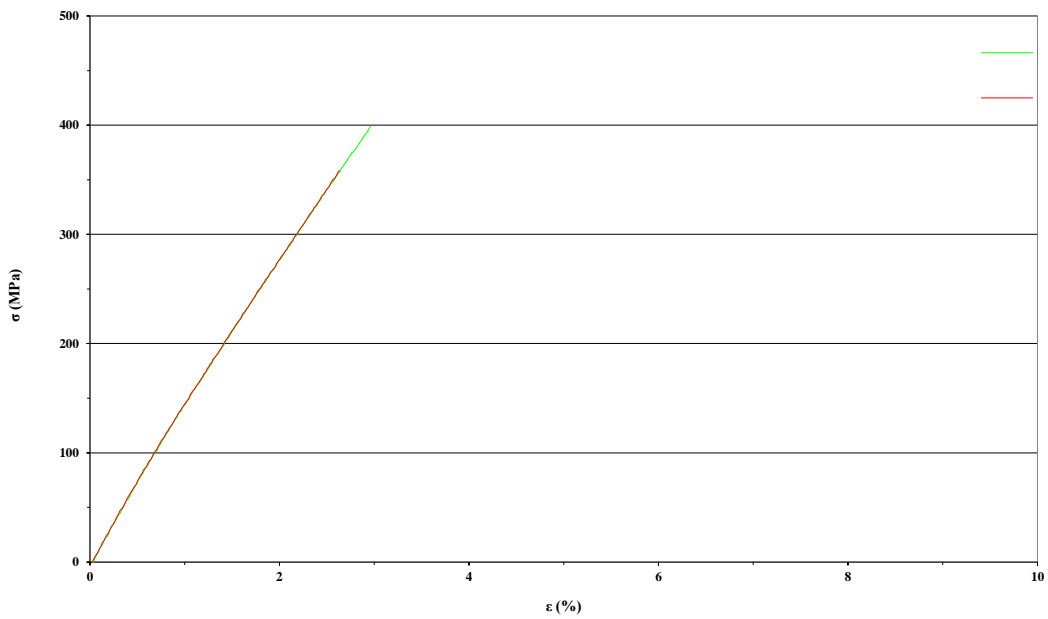
5.1.6 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (μέθοδος infusion)



Εικόνα 5-31: Δοκίμιο 1

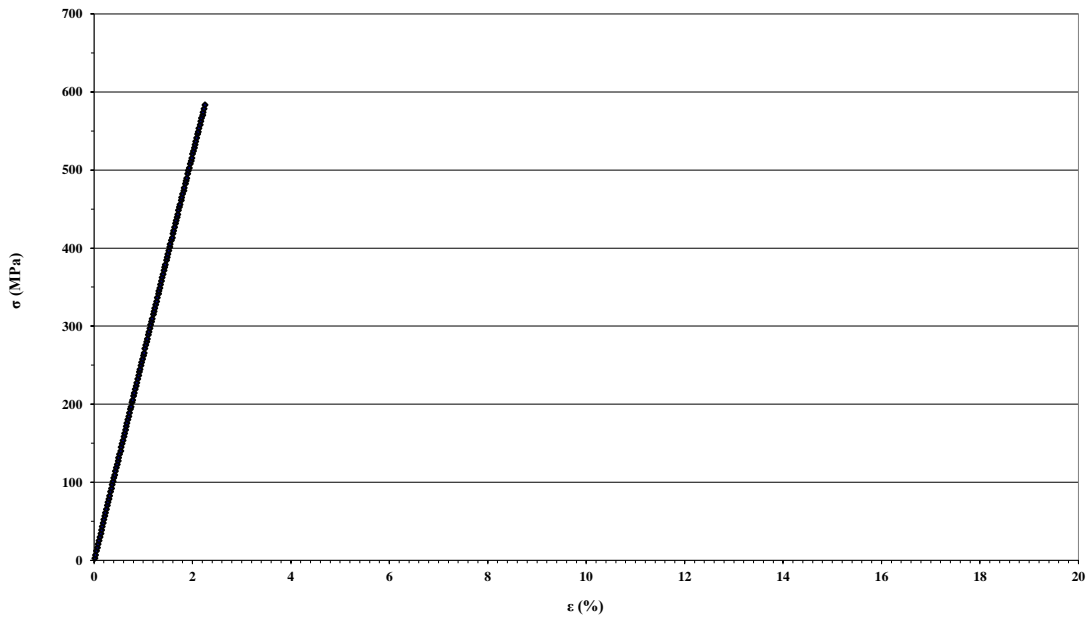


Εικόνα 5-32: Δοκίμιο 2

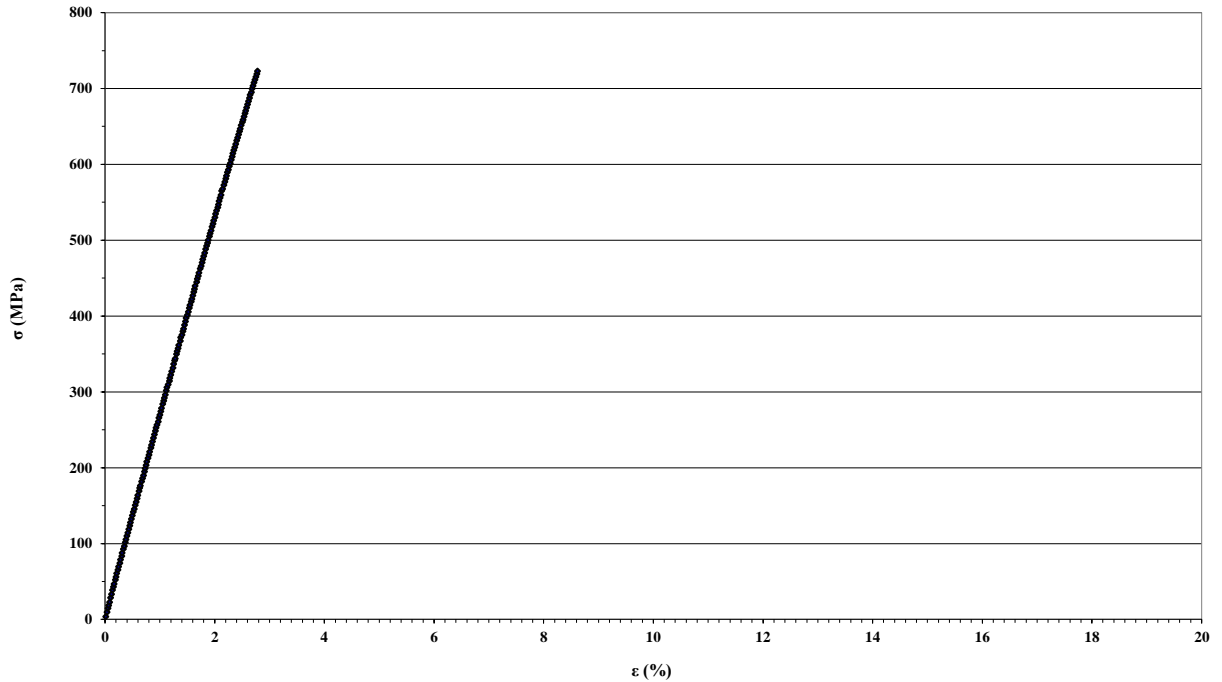


Εικόνα 5-33: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού (μέθοδος infusion)

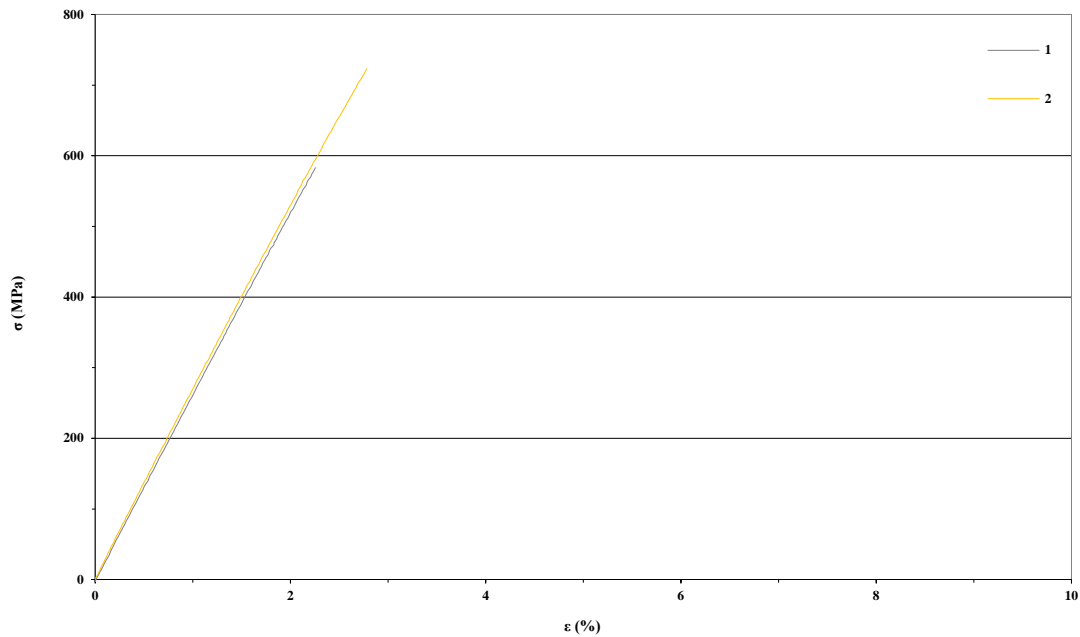
5.1.7 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες ανθρακα (μέθοδος infusion)



Εικόνα 5-34: Δοκίμιο 1



Εικόνα 5-35: Δοκίμιο 2



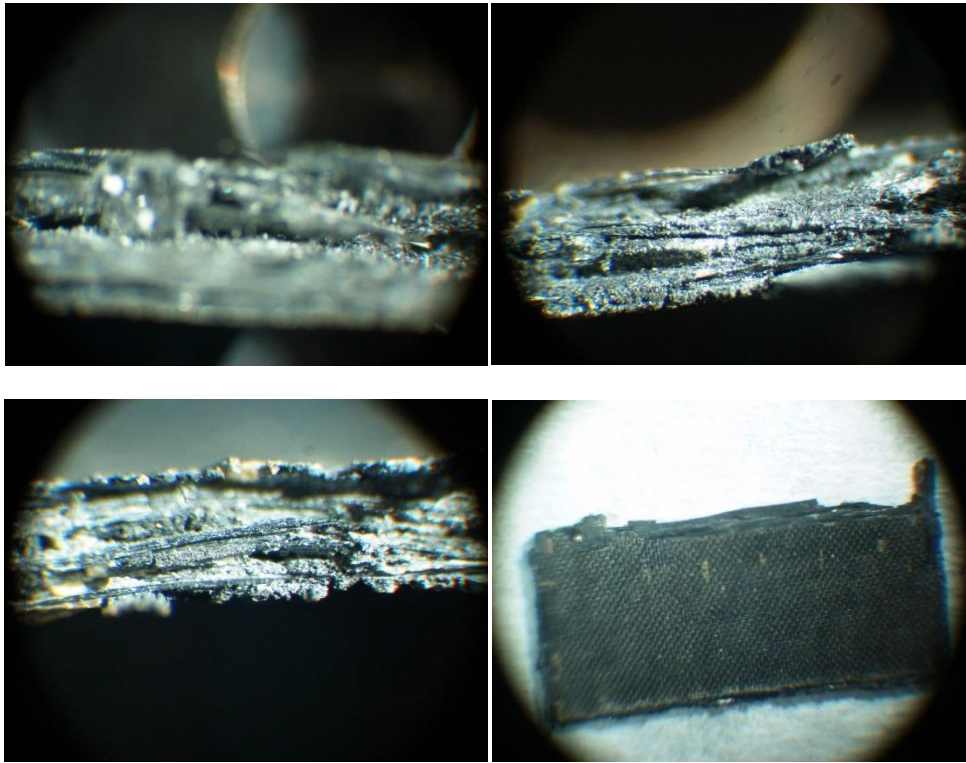
Εικόνα 5-36: Συγκριτικό διάγραμμα καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα (μέθοδος infusion)

5.2 Εικόνες στερεοσκοπίου

Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού παρουσιάζουν ψαθυρή θραύση, ενώ οι ίνες Kevlar παρουσιάζουν όλκιμη θραύση. Να σημειωθεί ότι, η πιθανότητα παρουσίας υψηλών αξονικών εφελκυστικών τάσεων, που μπορούν να αναπτυχθούν στο στάδιο της παρασκευής των ινών, αυξάνουν και την πιθανότητα θραύσης.

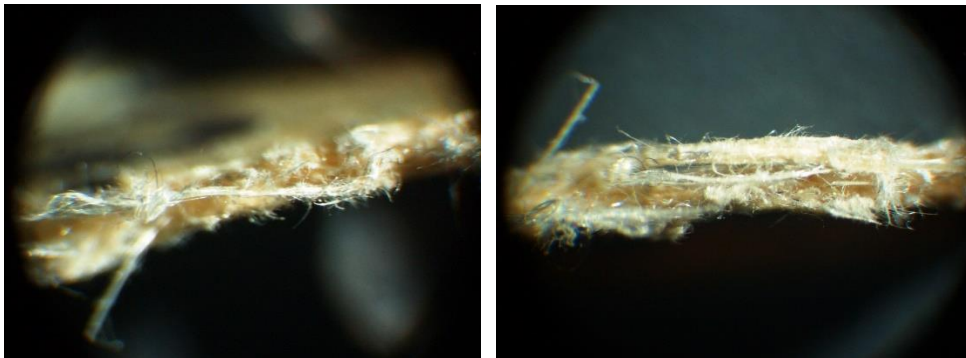
Η χαμηλή ανάλυση του στερεοσκοπίου κατέδειξε την ανάγκη μελέτης των θραυσιγενών επιφανειών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

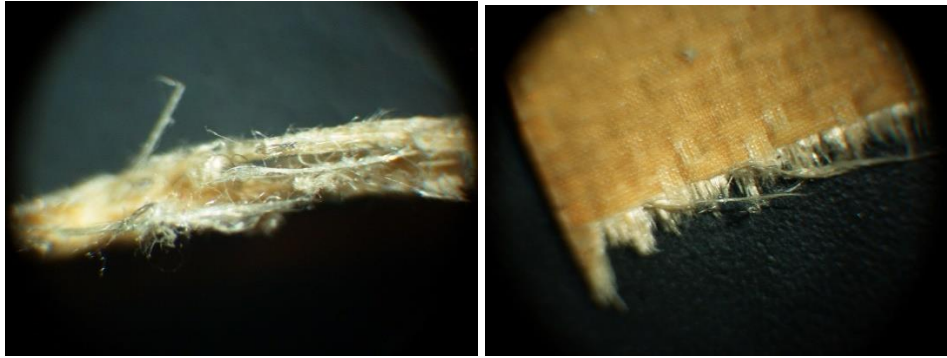
5.2.1 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης



Εικόνα 5-37: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

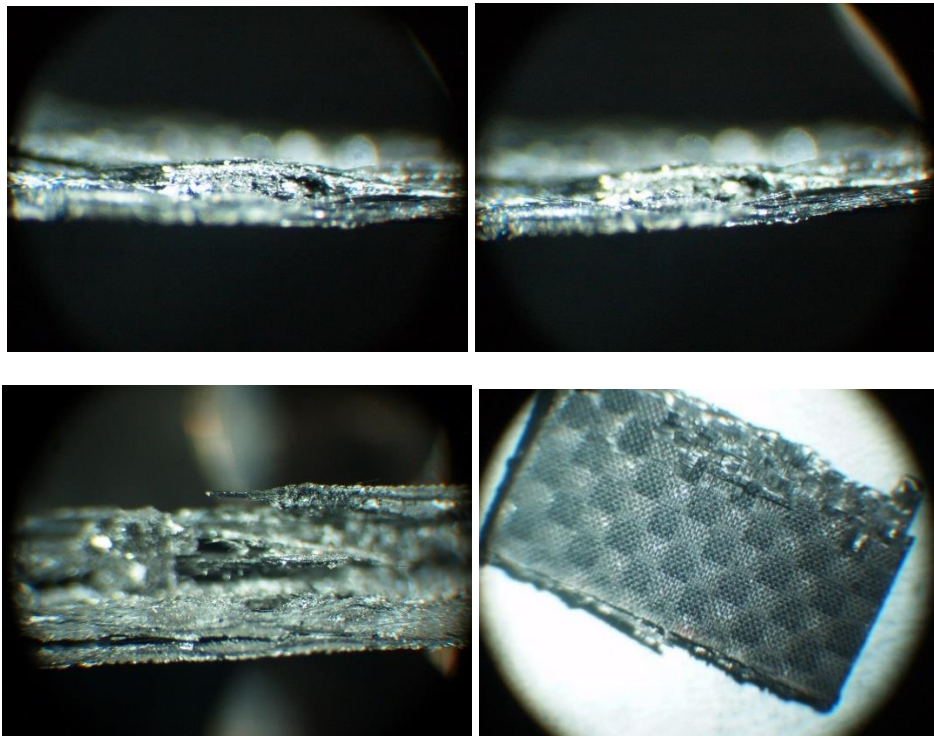
5.2.2 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης





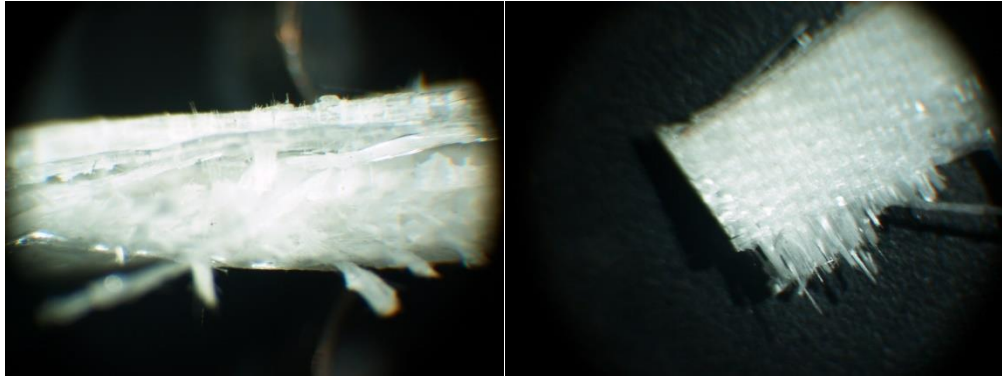
Εικόνα 5-38: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

5.2.3 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα



Εικόνα 5-39: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα

5.2.4 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού

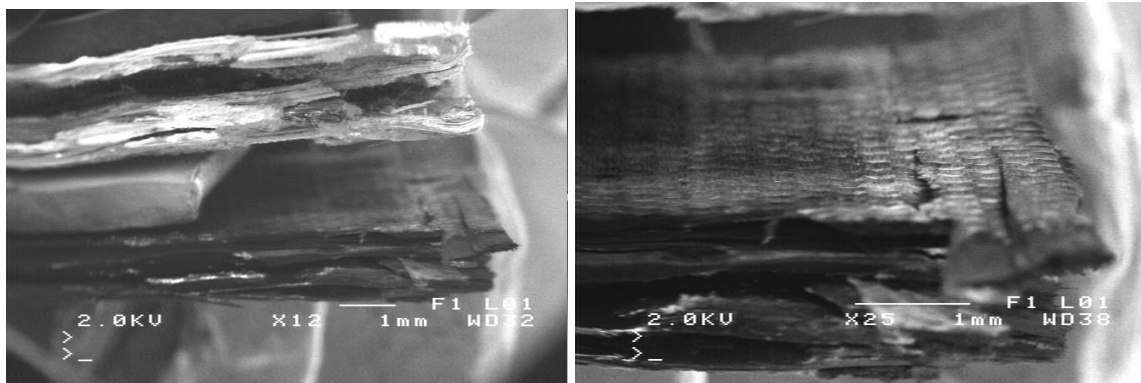


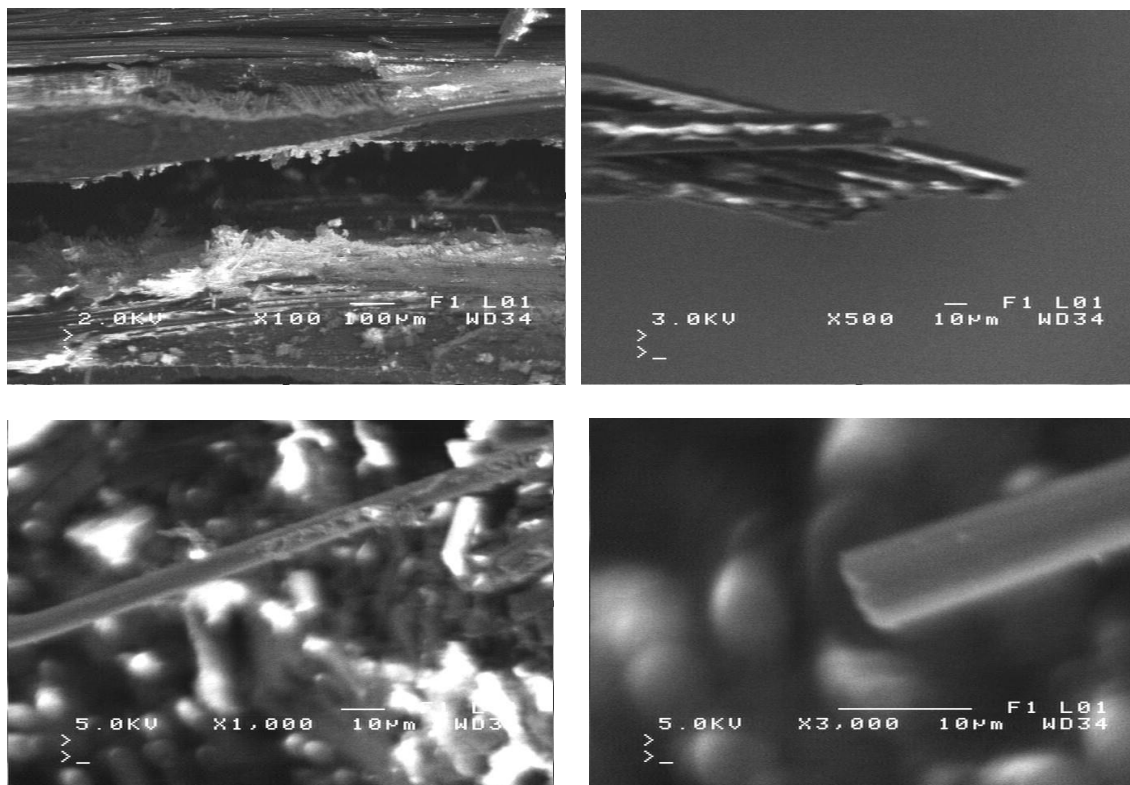
Εικόνα 5-40: Εικόνες στεροσκοπίου στο σύνθετο υλικό υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού

5.3 Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

Από τη μελέτη των μικρογραφιών του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, της επιφάνειας θραύσης σε αξονικό εφελκυσμό παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

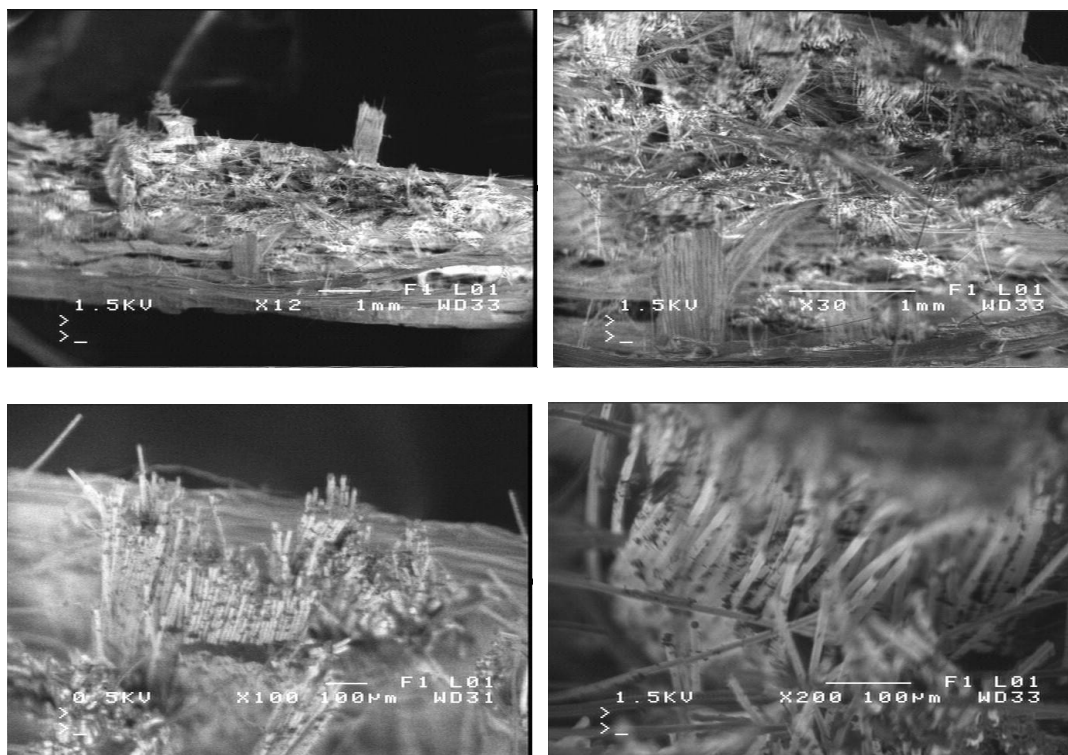
- Το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης παρουσίασε μια λεία σχεδόν επιφάνεια, η οποία αποτελείται από ένα σύνολο ανισουψών ινών και ρητίνης.
- Το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης παρουσίασε ίνες μορφής «βούρτρας» γεγονός που οφείλεται στην εκτεταμένη εξόγκληση των ινών.
- Το σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης παρουσίασε ίνες με έντονα χαρακτηριστικά λαιμού, ενώ σε μεγάλες μεγεθύνσεις ήταν εμφανείς οι αποσχίσεις της ίνας σε μικρότερα ινίδια καθώς και η κάμψη των ινιδίων.





Εικόνα 5-41: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιεθυνοτικά με ίνες άνθρακα, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

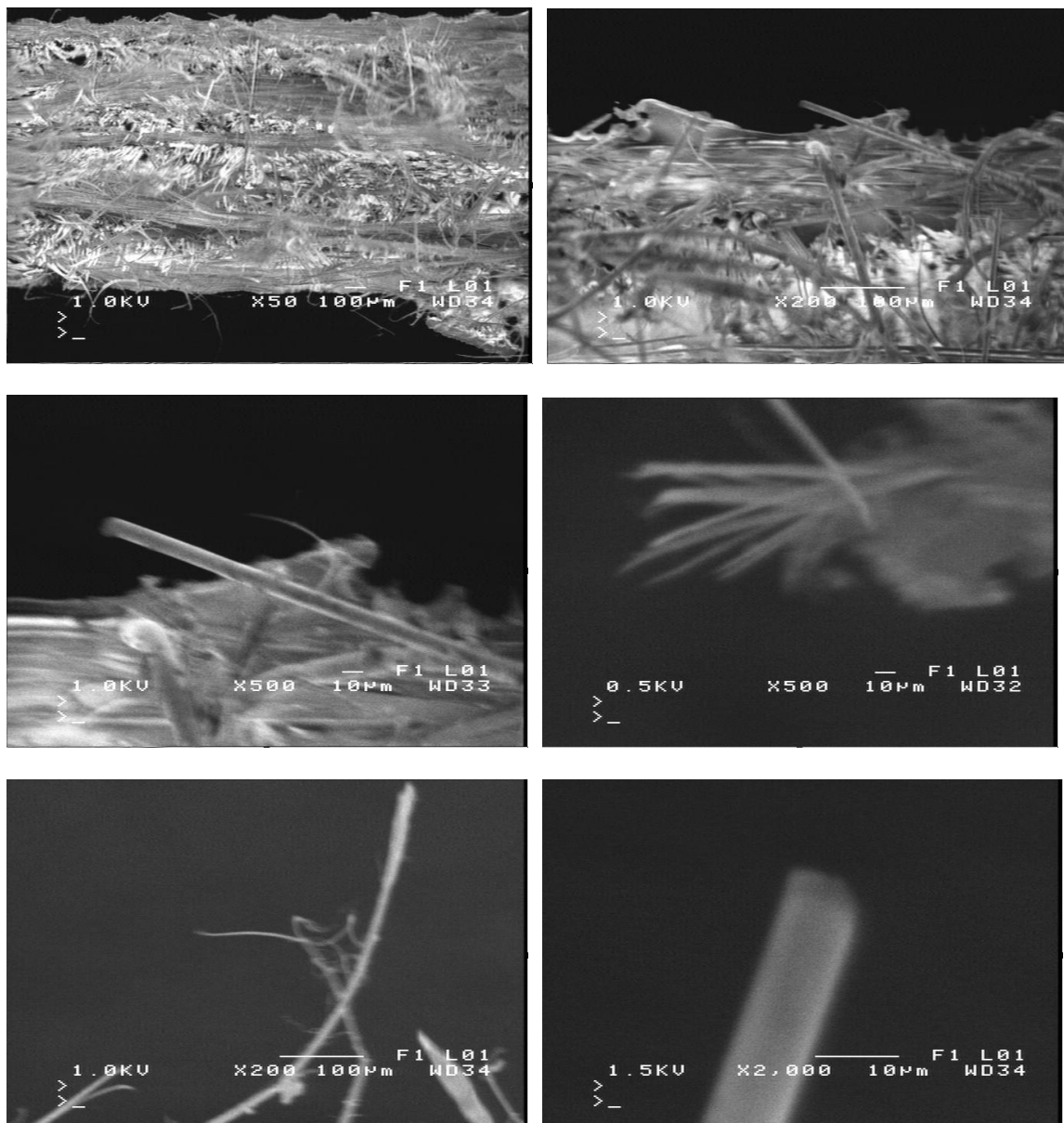
5.3.1 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιεθυνοτικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης





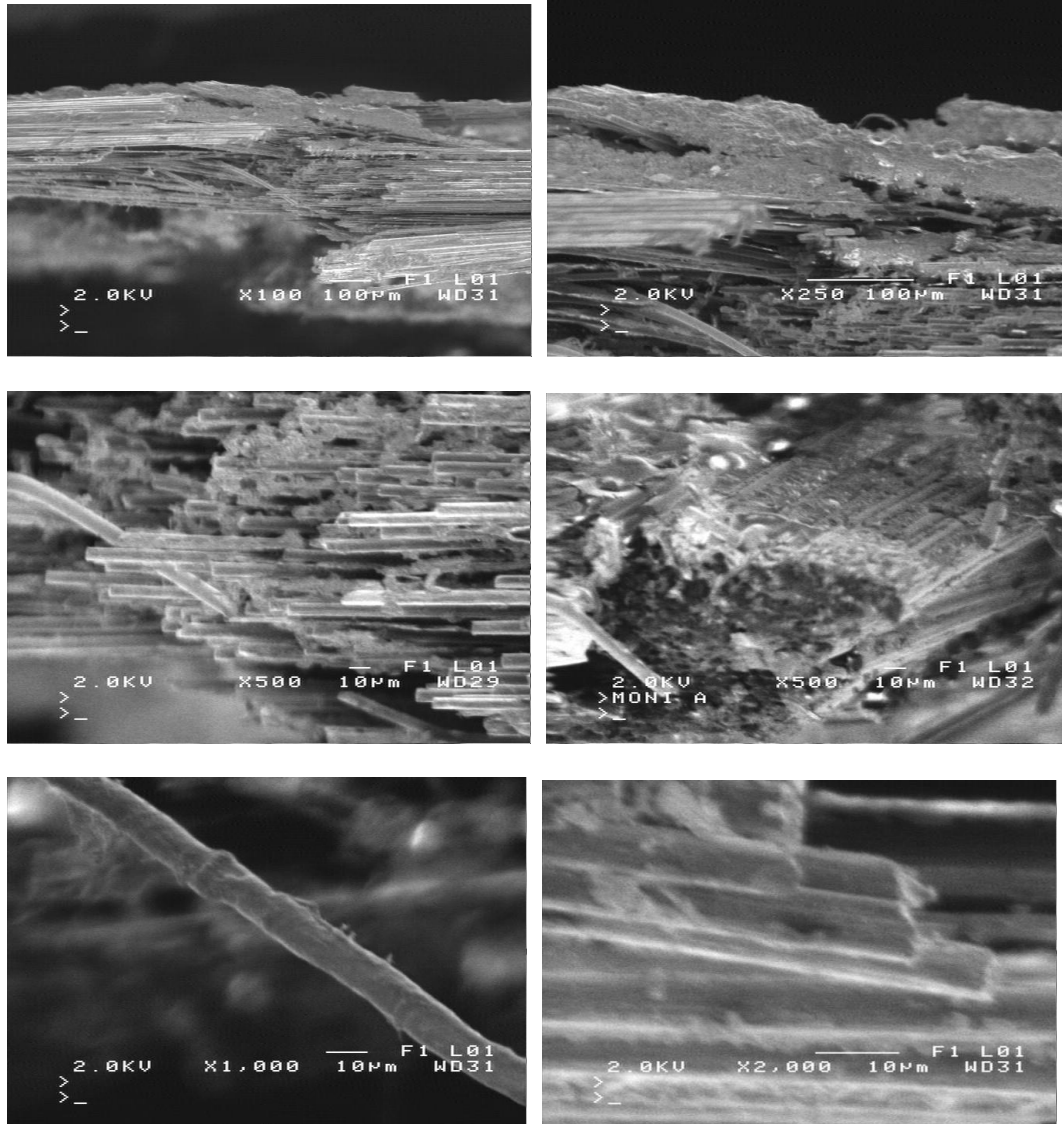
Εικόνα 5-42: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες γυαλιού, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

5.3.2 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης



Εικόνα 5-43: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες αραμιδίου, με τη χρήση προεμπορισμένων φύλλων ρητίνης

5.3.3 Σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα



Εικόνα 5-44: Μικρογραφίες σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας, ενισχυμένο πολυδιευθυντικά με ίνες άνθρακα

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**6.1 Συμπεράσματα**

- Συγκριτικά για τις μεθόδους
 - ✓ Το UTS για τα prepreg δοκίμια βρέθηκε σημαντικά μεγαλύτερο από τα από τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με infusion
 - ✓ Ο εξοπλισμός και τα υλικά που χρειάζονται για την κατασκευή κατασκευών μέσω infusion είναι πολύ φθηνότερα από τα αντίστοιχα για prepreg-autoclave
- Συγκριτικά για την πλέξη της ενίσχυσης
 - ✓ Τα UD εμφανίζουν πάρα πολύ μεγάλη αντοχή στην επιμήκη (στη διεύθυνση των ινών) επιβολή μηχανικής τάσης. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται στην ανισοτροπία των υλικών
 - ✓ Τα twill εμφανίζουν παρεμφερή αντοχή στην επιμήκη (στη διεύθυνση των ινών) επιβολή μηχανικής τάσης με την εγκάρσια. Αυτή η ιδιότητα οφείλεται στην μείωση της ανισοτροπίας των υλικών λόγω εισαγωγής της twill πλέξης
- Συγκριτικά με το υλικό του οπλισμού
 - ✓ Όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο UTS εμφανίστηκε για τα δοκίμια CFRP UD prepreg
 - ✓ Το μικρότερο UTS εμφανίστηκε για τα δοκίμια Kevlar twill prepreg
 - ✓ Τα δοκίμια GFRP εμφάνισαν ενδιάμεσο UTS

6.2 Μελλοντική έρευνα

Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, ο τομέας των συνθέτων υλικών είναι ένας πρόσφατα αναπτυσσόμενος τομέας. Οι δυνατότητες των υλικών αυτών είναι πολλές, και από μηχανικής άποψης, πολλά υποσχόμενες. Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν μονοδιάστατες και πολυδιάστατες (twill 2x2) πλέξεις για σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα, γυαλιού και kevlar.

Προτεινόμενη μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να αποτελέσει η μελέτη των διαφορετικών δυνατών τύπων πλέξεων όσον αναφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες και στη συμπεριφορά του εκάστοτε συνθέτου υλικού σε επιβολή εφελκυστικών τάσεων.

Επίσης θα μπορούσαν να μελετηθούν διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω, σε διαφόρων ειδών φορτίσεις (ερπυσμός, κάμψη κ.α.)

Τα αποτελέσματα της θραυσομηχανικής θα μπορούσαν επίσης να μελετηθούν και να συγκριθούν με τα αποτελέσματα όλων των εφαρμόσιμων μη καταστροφικών ελέγχων και να πραγματοποιηθεί προτυποποίηση των αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα, ως προς κάποιες ιδιαίτσες συμπεριφορές των υλικών που παρατηρήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Τέτοιες συμπεριφορές είναι ο πιθανός μηχανισμός της δημιουργίας μιας μορφής «ψαλίδας» στην άκρη της θραυσμένης ίνας που παρατηρήθηκε στα δοκίμια του συνθέτου με ενίσχυση kevlar, καθώς και η δημιουργία «λαιμού» στις ίνες του άνθρακα στο επίπεδο της θραύσης στα prepreg CFRP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Πααπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007
- [2] Calister W.D. Jr., Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών, Τζιόλα, 2004
- [3] Μπέλτσιος Κ., Επιστήμη και Τεχνολογία Σύνθετων Υλικών, Τζιόλα, 2004
- [4] Παντελής Δ., Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά: Δομή – Ιδιότητες – Τεχνολογία - Εφαρμογές, Παπασωτηρίου, 1996
- [5] Hull D., An introduction to composite materials, Cambridge University, 1981