



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επίδραση δυσμενών περιβαλλοντικών
παραγόντων (υγρασία και θερμοκρασία)
στη μηχανική συμπεριφορά GFRP
σύνθετων υλικών.**

Συγγραφή:

ΜΑΘΙΟΥΔΑΚΗΣ ΜΑΝΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

ΑΘΗΝΑ (Οκτώβριος 2019)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	5
1.1 Τα σύνθετα υλικά	5
1.2 Μέσα ενίσχυσης.....	6
1.2.1 Σύνθετα υλικά με τεμαχίδια	6
1.2.2 Σύνθετα υλικά με δομή πολυστρώματος.....	7
1.2.3 Σύνθετα υλικά με ινώδη μέσα ενίσχυσης	7
1.3 Υλικά ινών.....	10
1.4 Ίνες γυαλιού.....	10
1.5 Παραγωγή ινών γυαλιού	12
1.6 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics).....	13
1.7 Ταξινόμηση των υαλονημάτων	14
1.8 Παρασκευή συνθέτων υλικών GFRP.....	16
1.8.1 Μέθοδος κατασκευής με χρήση καλουπιού από σιλικόνη	18
1.8.2 Μέθοδος χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από χύτευση με συμπίεση	18
1.8.3 Μέθοδος θερμής συμπίεσης.....	18
1.8.4 Μίξη και χύτευση	19
1.8.5 Χύτευση με συμπίεση	19
1.8.6 Μέθοδος χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από υδραυλική πίεση	19
1.9 Μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών GFRP	20
1.10 Θερμικές ιδιότητες των σύνθετων ουσιών GFRP	21
1.11 Συμπεράσματα.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	23
2.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	23
2.2 Πειραματικός εξοπλισμός - πρέσα INSTRON 4482	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	31
3.1 Πειραματικά αποτελέσματα.....	31
3.2 Θερμοκρασία 40° C.....	31
3.2.1 Δοκίμιο G1.....	31
3.2.2 Δοκίμιο G2.....	32
3.2.3 Δοκίμιο G3.....	33
3.2.4 Δοκίμιο G4.....	34
3.2.5 Δοκίμιο H1	35

3.2.6 Δοκίμιο Η2.....	37
3.3 Θερμοκρασία 60° C.....	38
3.3.1 Δοκίμιο Η3.....	38
3.3.2 Δοκίμιο Η4.....	39
3.3.3 Δοκίμιο Ι1.....	41
3.3.4 Δοκίμιο Ι2.....	42
3.3.5 Δοκίμιο Ι3.....	43
3.3.6 Δοκίμιο Ι4.....	44
3.4 Θερμοκρασία 80° C.....	45
3.4.1 Δοκίμιο J1.....	45
3.4.2 Δοκίμιο J2.....	46
3.4.3 Δοκίμιο J3.....	47
3.4.4 Δοκίμιο J4.....	48
3.4.5 Δοκίμιο Κ1.....	49
3.4.6 Δοκίμιο Κ2.....	51
3.5 Θερμοκρασία 100° C.....	52
3.5.1 Δοκίμιο Κ3.....	52
3.5.2 Δοκίμιο Κ4.....	53
3.5.3 Δοκίμιο L1.....	54
3.5.4 Δοκίμιο L2.....	55
3.5.5 Δοκίμιο L3.....	56
3.5.6 Δοκίμιο L4.....	57
3.6 Πρωτότυπο.....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο.....	59
4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	59
4.2 Μέγιστο φορτίο κάμψης.....	60
4.3 Μεταβολή Τάσης (MPa) στο μέγιστο φορτίο κάμψης.....	66
4.4 Μεταβολή βάρους δοκιμίων.....	68
4.5 Μήκος διαδρομής εμβόλου στο μέγιστο φορτίο κάμψης.....	70
4.6 Μέτρο Ελαστικότητας.....	72
4.7 Υγροθερμική γήρανση.....	74
4.8 Γενικά συμπεράσματα.....	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση των δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων (υγρασίας και θερμοκρασίας) στη μηχανική συμπεριφορά των GFRP συνθέτων υλικών. Για την ανωτέρω μελέτη δημιουργήθηκαν δοκίμια σύνθετου υλικού GFRP και κατάλληλη πειραματική διάταξη για προσομοίωση των καταπονήσεων θερμοκρασίας και υγρασίας και ακολούθως εκτελέστηκε μέτρηση μέγιστου φορτίου κάμψης για το σύνολο των δοκιμίων μετρήσεις οι οποίες συγκρίθηκαν με αυτές ενός πρωτοτύπου το οποίο δεν υποβλήθηκε σε καμία καταπόνηση. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται γενική αναφορά για τα σύνθετα υλικά καθώς επίσης και για τους τρόπους ενίσχυσής τους με ιδιαίτερη έμφαση στα GFRP σύνθετα υλικά. Επίσης γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για τους τρόπους κατασκευής των ανωτέρω υλικών. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε καθώς επίσης περιγράφονται και όλα τα επιμέρους συστήματα της ανωτέρω διάταξης. Ακολούθως στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ληφθέντα αποτελέσματα για το σύνολο των δοκιμίων που μελετήθηκαν. Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των ανωτέρω αποτελέσματα και εξάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών αναλόγως της εκάστοτε καταπόνησης που εφαρμόστηκε.

ABSTRACT

In this thesis, the effect of adverse environmental factors (humidity and temperature), on the mechanical behavior of GFRP composites, has been studied. For the purposes of the thesis, GFRP composite material specimens and a suitable experimental set up were created to simulate temperature and humidity stresses. Then a maximum bending load measurement was performed for all test specimens compared with those of a non-stressed prototype. The first chapter gives a general overview of composites as well as ways to enhance them, with particular emphasis on GFRP composites. A bibliographical review of the ways in which the above materials are made is also provided. In the second chapter the experimental device manufactured is analyzed and also all the individual systems of the above device are described. The following chapter presents the results obtained for all the studied specimens. In the fourth chapter, the results are analyzed and conclusions are drawn on the behavior of the specific composites depending on the stress applied.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Τα σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά αποτελούν μια ευρεία και σημαντική κατηγορία υλικών με πολλές τεχνικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση ενισχυμένων υλικών με ίνες σε πολλές εφαρμογές και υπάρχουν πολλές ενδείξεις ότι κάτι τέτοιο θα συνεχιστεί.

Η ραγδαία ανάπτυξη οφείλεται κυρίως στην αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών και κυρίως των μετάλλων. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες (όπως ακαμψία, σκληρότητα, χαμηλή πυκνότητα κλπ.) σε σχέση με τις ιδιότητες των παραδοσιακών υλικών τα οποία αντικαθιστούν. Οι ιδιότητες αυτές δεν μπορούν να επιτευχθούν από τη χρήση των μεμονωμένων συστατικών τους [2].

➤ Ορισμός : Σύνθετο υλικό είναι ένα σύστημα που συνίσταται από ένα μείγμα ή συνδυασμό μιγμάτων δύο ή περισσότερων διαφορετικών υλικών (που διαφέρουν είτε στη συγκεκριμένη κατάσταση που βρίσκονται, είτε στη χημική σύσταση) και που είναι αδιάλυτα το ένα στο άλλο. Οι ιδιότητες του συνθέτου είναι διαφορετικές από εκείνες των συστατικών του και διαφοροποιούνται εντονότερα όταν ένα από τα συστατικά: (1) είναι σε ινώδη μορφή, (2) έχει κ.ο. περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 10% και (3) παρουσιάζει ιδιότητες με τιμές σημαντικά υψηλότερες (> 5 φορές) του άλλου [2].

Ένα σύνθετο υλικό που προορίζεται για κατασκευαστικές εφαρμογές θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Να περιέχει δύο ή περισσότερα φυσικά και μηχανικά διαχωριζόμενα υλικά.
2. Να μπορεί να δημιουργηθεί από την ανάμειξη διαφορετικών υλικών με τρόπο τέτοιο, ώστε η διασπορά του ενός στο άλλο υλικό να είναι ελεγχόμενη, με φυσικό επακόλουθο την επίτευξη των βέλτιστων ιδιοτήτων.
3. Οι ιδιότητες του να είναι ανώτερες και σε μερικές περιπτώσεις μοναδικές σε σχέση με τις ιδιότητες των μεμονωμένων συστατικών.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται συνήθως από μία μήτρα και το μέσο ενίσχυσης ή το πληρωτικό υλικό. Η μήτρα είναι το κύριο συστατικό που χρησιμεύει στο να συγκρατηθεί το σύνθετο και του δίνει την κύρια μορφή του. Το μέσο ενίσχυσης αποτελεί το δομικό συστατικό και καθορίζει τη δομή και τη μηχανική αντοχή του συνθέτου. Άλλα συστατικά όπως ο καταλύτης, ο σταθεροποιητής και κάποια άλλα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες. Τα σύνθετα κατατάσσονται αναλόγως της φύσης της μήτρας σε τρεις κύριες κατηγορίες, ως ακολούθως:

- Σύνθετα με μεταλλική μήτρα.
- Σύνθετα με πολυμερική μήτρα.
- Σύνθετα με κεραμική μήτρα.

Ανάλογα με το μέσο ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε 4 ακόμα κατηγορίες:

- Σύνθετα ενισχυμένα με τεμαχίδια (particulate fillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με ίνες (fibres).
- Σύνθετα ενισχυμένα με φύλλα (laminar fillers).
- Σύνθετα ενισχυμένα με δομικά στοιχεία (π.χ. δομικό αφρό ή κυψελλωτά στρώματα - honeycomb panels).

1.2 Μέσα ενίσχυσης

Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά σε διάφορες μορφές που ενσωματώνονται στη μάζα του πολυμερούς προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να βρίσκονται σε μορφή κόκκων, νιφάδων, ασυνεχών ινών, συνεχών ινών και κυψελωδών φύλλων κ.α. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν:

1.2.1 Σύνθετα υλικά με τεμαχίδια

Αυτά τα υλικά αποτελούνται από τεμαχίδια ενός ή και πολλών υλικών που βρίσκονται διάχυτα σε μια μήτρα διαφορετικού υλικού. Τα σωματίδια αυτά έχουν ασυνεχή μορφή και μικρές διαστάσεις. Μπορεί να είναι μεταλλικά ή αμέταλλα. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων υλικών είναι το σκυρόδεμα (αμέταλλα σωματίδια σε αμέταλλο υλικό), τα καύσιμα των πυραύλων που αποτελούνται από σκόνη αλουμινίου και άλλες οξειδωτικές ουσίες μέσα σε

εύκαμπτη οργανική μήτρα, χρώματα και κόλλες με αιωρήματα μετάλλων, κράματα μετάλλων και τέλος η περίπτωση αμέταλλων σωματιδίων όπως κεραμικά υλικά σε μεταλλικές μήτρες, που κυρίως προορίζονται για κατασκευή εργαλείων.

1.2.2 Σύνθετα υλικά με δομή πολυστρώματος

Τα πολυστρώματα αποτελούνται από στρώματα δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών σε επαφή και συνεργάζονται μεταξύ τους. Είναι διφασικά υλικά και αποτελούνται από δύο συνεχείς φάσεις, μια του πολυμερούς και μια του μέσου ενίσχυσης, που εναλλάσσονται κανονικά, η μία επί της άλλης, στη κατά το ύψος οργάνωση του υλικού. Οι ιδιότητες που βελτιώνονται μέσω ενός πολυστρώματος είναι η αντοχή στη θραύση, η ακαμψία, οι ειδικές ιδιότητες, η αντοχή στη διάβρωση, η αντοχή στην τριβή, η αντοχή σε εφελκυσμό κ.α. Βέβαια, οι ιδιότητες κάθε κατασκευής επηρεάζονται από τις ιδιότητες των υλικών που την αποτελούν.

1.2.3 Σύνθετα υλικά με ινώδη μέσα ενίσχυσης

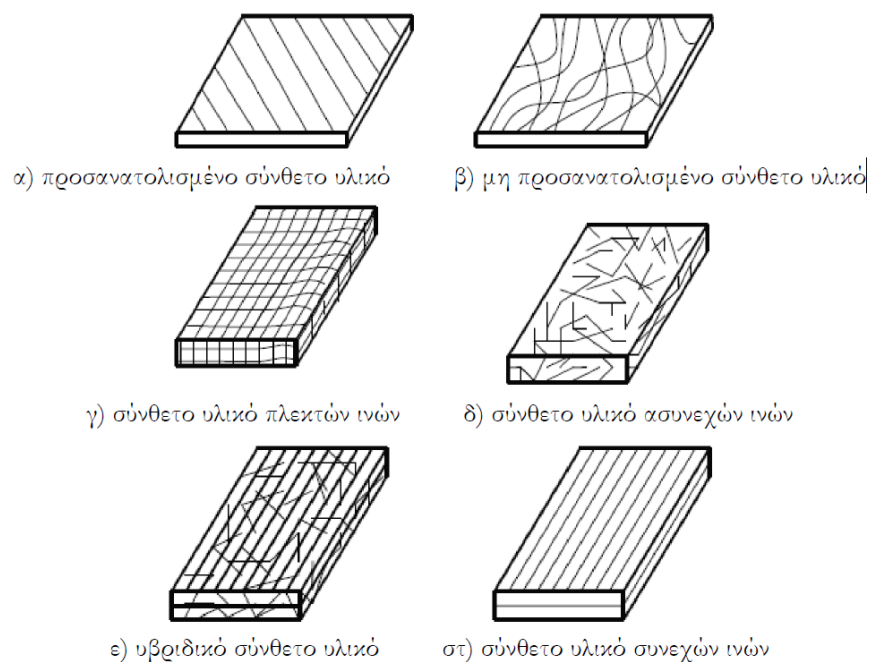
Από τις διάφορες μορφές ενίσχυσης, αυτή της ίνας δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αύξηση των μηχανικών αντοχών. Έτσι εξηγείται και η μεγάλη προτίμηση προς τα ινώδη μέσα ενίσχυσης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν, σε αυτή την κατεύθυνση οι αποκαλούμενες ίνες υψηλής τεχνολογίας, οι οποίες διαθέτουν πολύ υψηλή αντοχή και πολύ υψηλή ακαμψία σε συνδυασμό με χαμηλή πυκνότητα.

Μία διάκριση των ινωδών συνθέτων στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως [3]:

- Συνεχείς μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers). Όταν $l/d > 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers). Όταν $l/d < 100$
- Νημάτια ή τριχίτες (whiskers). Με $d < 1 \mu\text{m}$ και l περίπου ίσο με $100 \mu\text{m}$ (λεπτοί μονοκρυσταλλοί κεραμικού υλικού).

Βάση του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες ινοπλισμένων σύνθετων υλικών [2].

- Προσανατολισμένα (directional), των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση (Εικ. 1α).
- Μη προσανατολισμένα (random), των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό (Εικ. 1β).



Εικ. 1. Τύποι σύνθετων υλικών με ινώδη μέσα ενίσχυσης [10].

Οι ίνες των σύνθετων υλικών τοποθετούνται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Η ανάπτυξη της κατηγορίας των σύνθετων υλικών με ενίσχυση τύπου υφάσματος προέκυψε εξαιτίας της απλούστερης διαδικασίας κατασκευής τους. Βάσει του τρόπου τοποθέτησης (ύφανση) και του συνδυασμού των ινών στο συνδετικό υλικό, τα σύνθετα υλικά ινών κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες [1]:

- Υφασμένες ίνες (woven mat), τα οποία αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε και δε παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης (Εικ. 1γ). Η γωνία ανάμεσα στις δύο κυρίαρχες κατευθύνσεις των νημάτων είναι 90° .

- Συνεχείς ίνες πλεγμένες με διάφορους τρόπους που χρησιμοποιούνται και στην υφαντουργία. Ο προσανατολισμός του νήματος αλλάζει συνεχώς (knitted fabrics)
- Μη υφασμένα συνεχή νήματα χωρίς προσανατολισμό (non-woven mats)
- Στρώματα ασυνεχών ινών (chopped strand fiber), τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες μέσα σε συνδετικό υλικό και μη προσανατολισμένες (Εικ. 1δ). Οι μηχανικές τους αντοχές είναι κατά κανόνα κατώτερες των αντίστοιχων με συνεχείς ίνες.
- Υβριδικά (hybrid), τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες (Εικ. 1ε) είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών (π.χ. ύαλο και γραφίτη). Χρησιμοποιούνται όταν το σύνθετο υλικό ινών μόνο του δεν έχει τις επιθυμητές ιδιότητες.
- Συνεχών ινών (continuous fiber) όπου στρώματα συνεχών ινών–ρητίνης τοποθετούνται στην επιθυμητή διεύθυνση και συνδέονται αποτελώντας ένα σώμα (Εικ. 1στ). Παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, αλλά αποκόλληση μεταξύ των στρωμάτων είναι πιθανή.

Μία κατηγοριοποίηση των συνθέτων υλικών με ενίσχυση υφάσματος γίνεται αρχικά σε δισδιάστατα, 2D, και τρισδιάστατα, 3D, ανάλογα με το αν η υφασμένη δομή απουσία της μήτρας μπορεί να παραλάβει φορτία σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια τα 2D χωρίζονται ανάλογα με το πρότυπο της ύφανσης σε plain, satin, triaxial, ή uniweave, ενώ τα 3D ανάλογα με τη γωνία ενίσχυσης στην z-διεύθυνση [5].

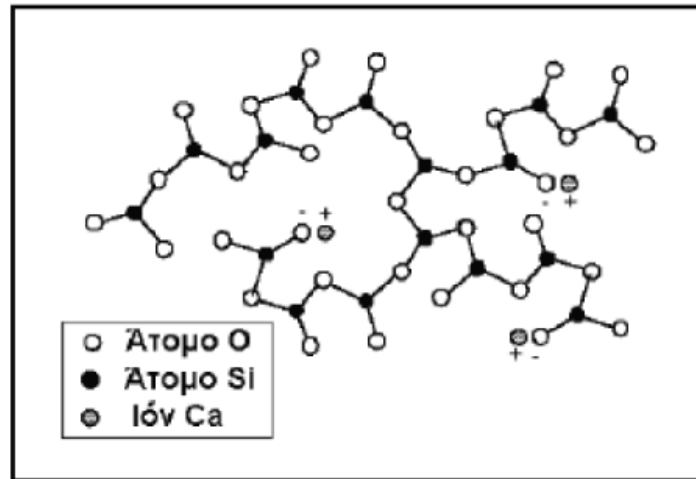
Για την παραγωγή του υφάσματος, το πρώτο στάδιο είναι ο σχηματισμός των δεσμών ινών (yarns). Ακολούθως οι δεσμίδες ινών υφαίνονται ώστε να σχηματισθεί η δομή υφάσματος. Η ομάδα ινών κατά το μήκος της ύφανσης ονομάζεται στημόνι (warp) ενώ κατά το πλάτος ονομάζεται υφάδι (weft ή fill). Τελικά το σύνθετο μορφοποιείται μετά την εμβάπτιση της ενίσχυσης στο μητρικό υλικό σε ειδικά καλούπια. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε ινώδη μέσα ενίσχυση και ειδικότερα υαλοϋφάσματα (E-glass 2-D woven fibers) με απλή (plain) ύφανση.

1.3 Υλικά ινών

Οι τρεις συνηθέστεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών είναι τα υαλονήματα, τα ανθρακονήματα και οι ίνες του πολυαραμιδίου (Kevlar ή Twaron). Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάζει υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E), υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (σ^*), μεγάλη ακαμψία (stiffness), χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness) και επιπλέον να έχει χαμηλή πυκνότητα (ρ). Τα περισσότερα ενισχυτικά υλικά βασίζονται κυρίως σε στοιχεία που βρίσκονται στη 2η και 3η περίοδο του Περιοδικού Συστήματος. Στα προηγμένα σύνθετα υλικά, οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

1.4 Ίνες γυαλιού

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939, και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι και σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.α.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στην εικόνα 2 [6]. Οι ίνες γυαλιού παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό της υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή, αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων με μικρές διαφορές στη χημική τους σύσταση, τα τρία από τα οποία είναι τα κάτωθι.



Εικ. 2 Η άμορφη δομή του κοινού γυαλιού

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

Οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών είναι η ύαλος-E και η ύαλος-S. Αν και η ύαλος-S έχει μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από την ύαλο-E, λόγω του υψηλού της κόστους έχει η ύαλος-S περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με την ύαλο-E. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υάλων αυτών είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς από τριβή (λύση της συνέχειας της επιφάνειας τους). Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία. Οι ίνες υάλου, αν και ανθεκτικές στους

περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Η ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολύ-αραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, η ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυσμό, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς, και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

1.5 Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού μέσα από μήτρα με διάτρητο πυθμένα (Εικ. 3) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

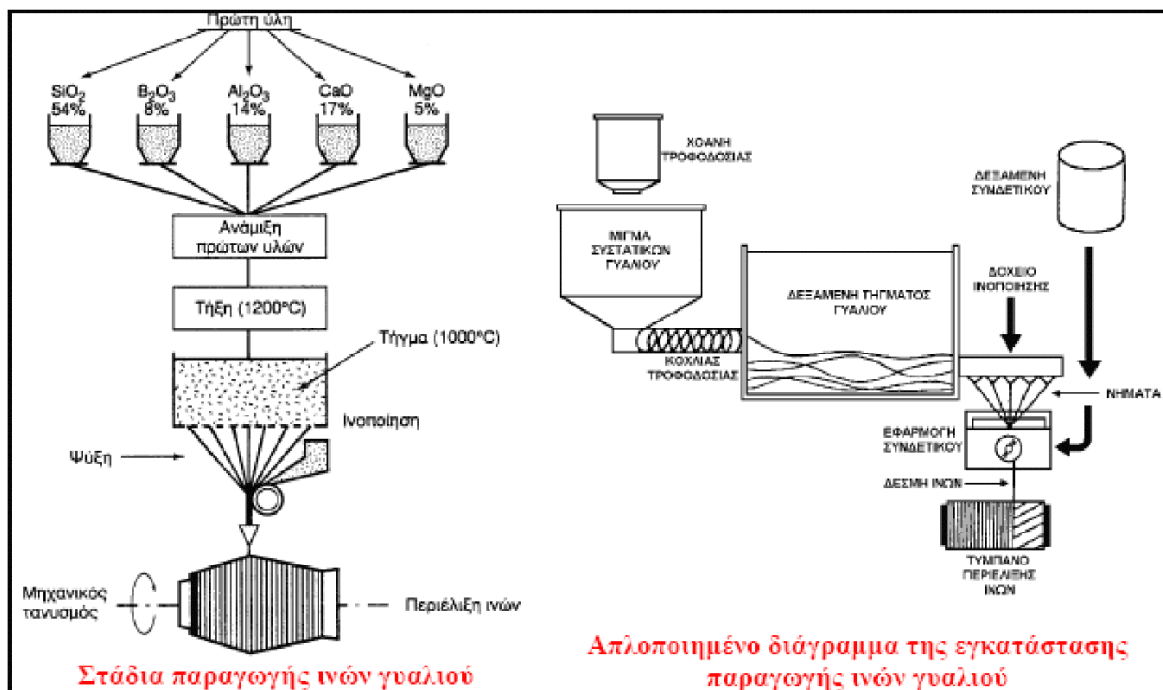
[1] Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου και τήκεται.

[2] Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.

[3] Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύζονται μηχανικά μέχρι να αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο και ακολουθεί η ψύξη τους.

[4] Ακολούθως οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizings) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις για την καλύτερη πρόσφυση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας,

[5] Τέλος περιτυλίσσονται ανά δέσμες γύρω από τύμπανο που περιστρέφεται και τα ρολά ινών υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.



Εικ. 3: Διεργασίες παραγωγής υαλονημάτων [6]

1.6 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics)

➤ Ναυπηγική: Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τομέα όπου τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics) έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι παράμετροι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής ενώ η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον ευρύτερο τομέα της ναυπηγικής [7].

➤ Μεταφορές Περίπου 60.000 tn/year GRP σε διάφορες μορφές χρησιμοποιούνται στις χερσαίες μεταφορές στη δυτική Ευρώπη, ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη συνολική κατανάλωση GRP στον τομέα των χερσαίων μεταφορών είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Ο λόγος της χρήσης των GRP στις χερσαίες μεταφορές οφείλεται κατά ένα μέρος στην μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (καυσίμων). Η χρήση ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων για την κατασκευή αμαξωμάτων (αυτοκινήτων), περιορίζεται προς το παρόν σε μικρή κλίμακα και ιδιαίτερα για την κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων. Εκτός όμως από την Παρασκευή αμαξωμάτων, τα GRP χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καμπινών στα

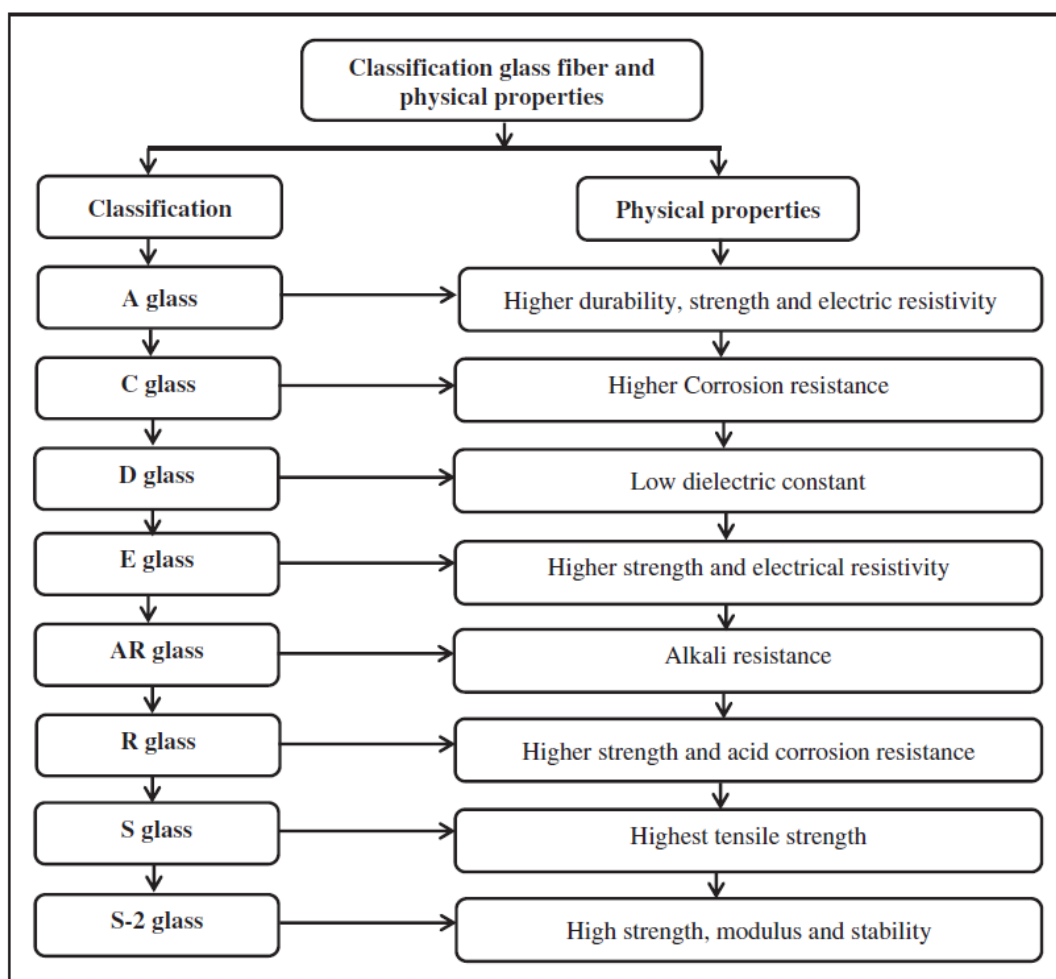
φορτηγά αυτοκίνητα, στην κατασκευή προφυλακτήρων και σε πολλά άλλα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας [7].

➤ Ηλεκτρικά είδη: Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διάφορους τύπους. Ένας από αυτούς είναι ο τύπος E-glass, όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο electrical. Ο τύπος αυτός έχει κατασκευασθεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για εφαρμογές όπου απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Έτσι, αυτός ο τύπος γυαλιού όταν αναμιχθεί με πλαστική μήτρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος που να είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Τέτοια είδη είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς, οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα. Καλωδιακοί αγωγοί σταθερής διατομής και σχήματος για μόνωση μετασχηματιστών κατασκευάζονται από GRP με τη μέθοδο Pultrusion [8].

➤ Αντιδιαβρωτικές κατασκευές: Εφαρμογές στην παραγωγή κατασκευών ανθεκτικών σε χημική διάβρωση. Γενικά, οι εφαρμογές των GRP στην γεωργία και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς (χημική βιομηχανία) βασίζεται στον συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού αυτού. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των GRP είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενών νερού και κρασιού καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για τη παραγωγή χημικών ουσιών, όπως στην παραγωγή χλωρίου [8].

1.7 Ταξινόμηση των υαλονημάτων

Η κύρια ταξινόμηση των υαλονημάτων και οι φυσικές ιδιότητες παρουσιάζονται στην Εικ. 4. Επίσης, οι χημικές συνθέσεις των GF σε% κ.β. παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των GF φαίνονται στον Πίνακα 2



Εικ. 4. Ταξινόμηση και φυσικές ιδιότητες διαφόρων υαλονημάτων.

Πίνακας 1 Χημικές συνθέσεις υαλονημάτων σε % κ.β.

Τύπος	(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	TiO ₂	B ₂ O ₃	(CaO)	(MgO)	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ref.
E-glass	55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	–	17
C-glass	64.6	4.1	–	5.0	13.4	3.3	9.6	0.5	–	
S-glass	65.0	25.0	–	–	–	10.0	–	–	–	
A-glass	67.5	3.5	–	1.5	6.5	4.5	13.5	3.0	–	
D-glass	74.0	–	–	22.5	–	–	1.5	2.0	–	
R-glass	60.0	24.0	–	–	9.0	6.0	0.5	0.1	–	

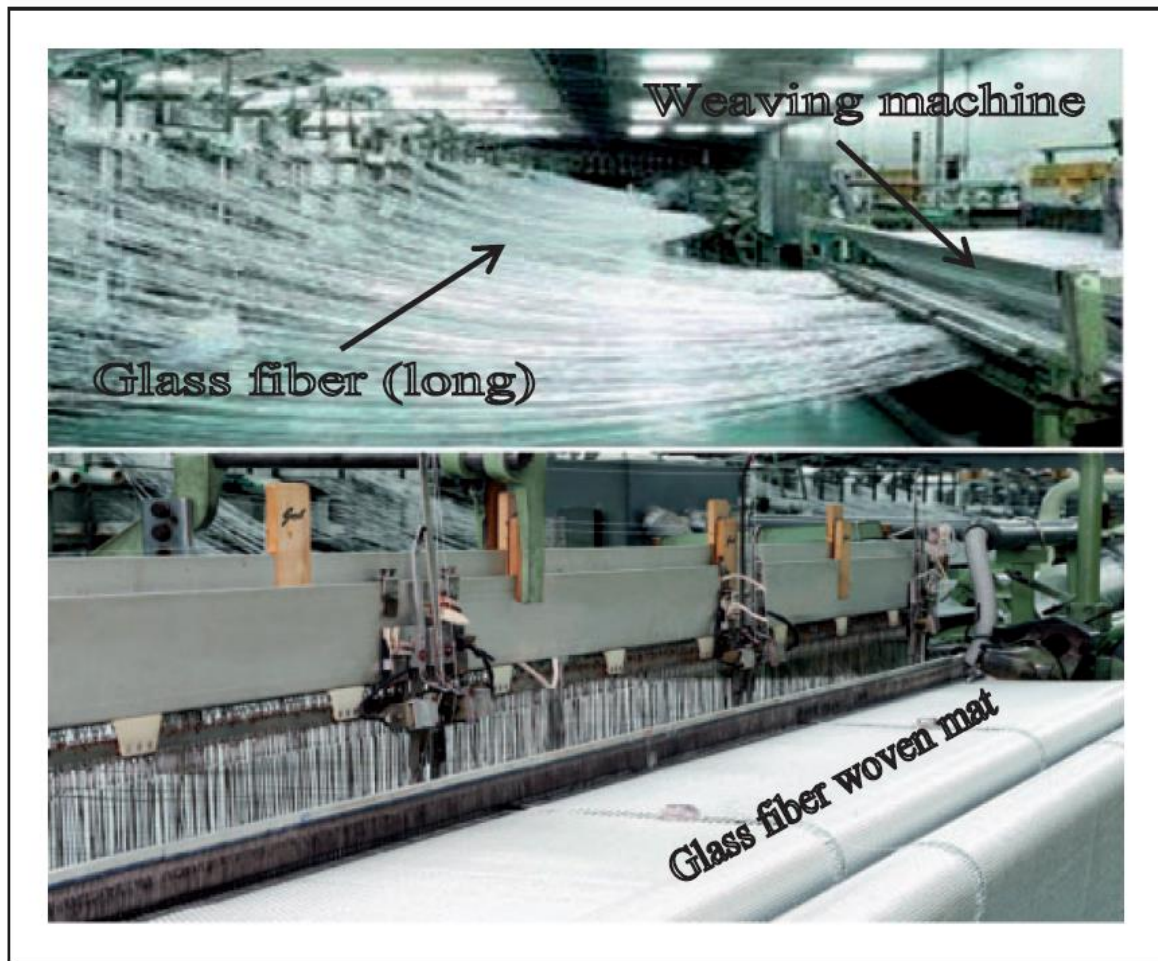
EGR-glass	61.0	13.0	–	–	22.0	3.0	–	0.5	–	
Basalt	52.0	17.2	1.0	–	8.6	5.2	5.0	1.0	5.0	

Πίνακας 2 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υαλονημάτων.

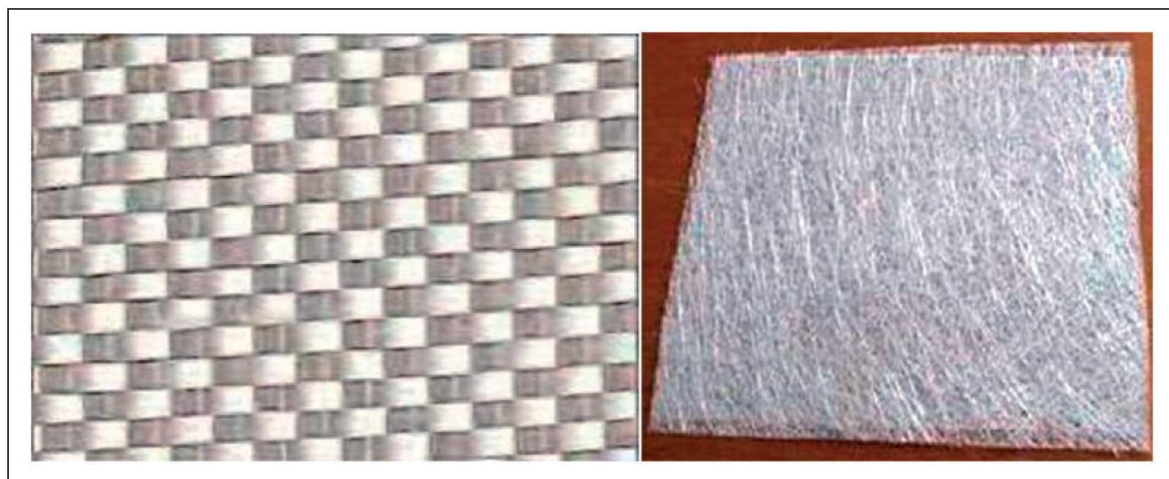
Τύπος	Πυκνότητα (g/cm ³)	Αντοχή εφελκυσμού GPa	Μέτρο του Young (GPa)	Συντελεστής θερμικής διαστολής / Επιμήκυνση (%) (10 ⁻⁷ /°C)	Λόγος Poisson	Δείκτης διάθλασης	Αναφ.
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8 54	0.2	1.558	17
C-glass	2.52	3.310	68.9	4.8 63	–	1.533	
S₂-glass	2.46	4.890	86.9	5.7 16	0.22	1.521	
A-glass	2.44	3.310	68.9	4.8 73	–	1.538	
D-glass	2.11–2.14	2.415	51.7	4.6 25	–	1.465	
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8 33	–	1.546	
EGR-glass	2.72	3.445	80.3	4.8 59	–	1.579	
AR glass	2.70	3.241	73.1	4.4 65	–	1.562	

1.8 Παρασκευή συνθέτων υλικών GFRP

Τα σύνθετα GFRP παρασκευάζονται υιοθετώντας διάφορες τεχνικές κατασκευής όπως αναλύεται παρακάτω. Η προετοιμασία τους φαίνεται στις εικόνες 5 και 6



Εικ. 5. Προετοιμασία υφασμένων νημάτων υαλονήματος .



Εικ. 6. Υφασμένο (Αρ) και τυχαίας πλέξης (Δε) νήμα.

1.8.1 Μέθοδος κατασκευής με χρήση καλουπιού από σιλικόνη

Οι Aramide et al. [9] προετοίμασαν ένα σύνθετο υλικό πλεκτού στρώματος ενισχυμένο με υαλονήματα χρησιμοποιώντας ένα καλούπι από σιλικόνη. Για να χρησιμοποιηθεί το καλούπι καθαρίστηκε και ξηράνθηκε. Η επιφάνεια του καλουπιού επικαλύφθηκε με παράγοντα κεριού για την εύκολη αφαίρεση του υλικού. Αρχικά, στην επιφάνεια του καλουπιού εφαρμόστηκαν ρητίνες ακόρεστου πολυεστέρα. Τα υαλονήματα τοποθετήθηκαν σε αυτή την ρητίνη για εμποτισμό. Ένας χαλύβδινος κύλινδρος χρησιμοποιήθηκε για τον πλήρη εμποτισμό των ινών στην ρητίνη. Ένα τελικό στρώμα ρητίνης τοποθετήθηκε στην ίνα. Με την πάροδο του χρόνου, το ελασματοποιημένο σύνθετο υλικό σκληρύνθηκε πλήρως και απομακρύνθηκε από το καλούπι.

1.8.2 Μέθοδος χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από χύτευση με συμπίεση

Οι Erden et al. [11] προετοίμασαν το σύνθετο υλικό το οποίο μελέτησαν με την μέθοδο χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από χύτευση με συμπίεση σε πίεση 120 bar, σε θερμοκρασία δωματίου για 120 λεπτά με κλάσμα όγκου ινών 37% (Vf) και πάχους των φύλλων 3,5 mm.

1.8.3 Μέθοδος θερμής συμπίεσης

Οι Atas et al. [15] προετοίμασαν τα σύνθετα υλικά που μελέτησαν χρησιμοποιώντας τεχνική θερμής συμπίεσης. Ένα μη ορθογώνιο πλεκτής ύφανσης υλικό προετοιμάστηκε με διάσταση 305 mm x 305 mm και ένα ορθογώνιο ύφασμα μετασχηματίστηκε σε μη ορθογώνιο χρησιμοποιώντας διαδικασία διάτμησης με διάφορες γωνίες. Η αναλογία βάρους εποξειδικής ρητίνης προς σκληρυντικό ήταν 10: 3. Τα φύλλα του σύνθετου υλικού σκληρύνθηκαν στους 60°C για 2 ώρες και στους 93°C για 4 ώρες. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης εφαρμόστηκε 0,35 MPa πίεση.

Επίσης οι Aktas et al. [16] κατασκεύασαν ένα GFRP σύνθετο υλικό χρησιμοποιώντας την ανωτέρω μέθοδο. Τα φύλλα είχαν κλάσμα βάρους 65% και κατασκευάστηκαν σε δύο διαφορετικές αλληλουχίες συστοιχίας $[0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ]$ και $[0^\circ / 90^\circ / +45^\circ / -45^\circ]$. Εποξειδική ρητίνη CY225 και σκληρυντής HY225 αναμείχθηκαν. Το ανωτέρω μίγμα και 509

g / m² υαλονήματος, σκληρύνθηκαν με τεχνική θερμής συμπίεσης υπό σταθερή πίεση 15 MPa και θερμοκρασία 120 ° C για 2 ώρες. Το πάχος σύνθετης πλάκας που προέκυψε ήταν 3 mm.

1.8.4 Μίξη και χύτευση

Οι Gupta et al. [13] προετοίμασαν τα ασυνεχή εποξειδικά σύνθετα υλικά που μελέτησαν με την μέθοδο της μίξης και χύτευσης. Η διάμετρος του υαλονήματος ήταν 10 mm το οποίο κόπηκε σε μήκος 2,54 cm. Η αναλογία εποξειδικής ρητίνης και σκληρυντικού ήταν γύρω στο 100 : 10. Οι δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις πληρωτικού flyash επιλέχθηκαν ως 2,5 και 5% κατ 'όγκο, μαζί με πληρωτικά ανθρακικού ασβεστίου που προστέθηκαν κατά την ανάμιξη ρητίνης και σκληρυντικού. Το μικρό μέγεθος και το σφαιρικό σχήμα των σωματιδίων flyash διευκολύνουν την καλή ανάμειξη και διαβροχή των ινών και της μήτρας. Το καλούπι παρασκευάστηκε με διάσταση 154x78x12 mm. Η ίνα και η μήτρα μεταφέρθηκαν στο καλούπι και αυτό αφέθηκε να σκληρυνθεί σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες.

1.8.5 Χύτευση με συμπίεση

Οι Hameed et al. [14] προετοίμασαν το εποξειδικό σύνθετο ενισχυμένο υλικό, με EGF, χρησιμοποιώντας τεχνική χύτευσης με συμπίεση με διάφορα Vfs ινών (10% έως 60%). Τα υφάσματα των ινών κόπηκαν στο επιθυμητό μέγεθος και θερμάνθηκαν σε φούρνο αέρα στους 150 ° C για να απορριφθεί το σύνολο της υγρασία. Ο σκληρυντής αναμείχθηκε σε εποξική ρητίνη. Χρησιμοποιήθηκε προκατασκευασμένο στρώμα ινών και ρητίνης για να επιτευχθεί πάχος 3 mm σύνθετου υλικού. Τα ελάσματα συμπιέστηκαν σε καλούπι και σκληρύνθηκαν στους 180 ° C για 3 ώρες. Το σύνθετο υλικό θερμάνθηκε περαιτέρω στους 200 ° C για 2 επιπλέον ώρες και στη συνέχεια ψύχθηκε αργά σε θερμοκρασία δωματίου για να ληφθούν τα τελικά σύνθετα υλικά.

1.8.6 Μέθοδος χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από υδραυλική πίεση

Οι Suresha et al. [17] κατασκεύασαν ένα GFRP σύνθετο υλικό χρησιμοποιώντας την μέθοδο χειροκίνητης ολίσθησης ακολουθούμενη από υδραυλική πίεση. Η εποξική ρητίνη αναμείχθηκε με το σκληρυντικό στην αναλογία βάρους 100: 12. Η ρητίνη και οι ίνες αναμίχθηκαν για να κατασκευασθεί πάχος 3 mm δείγματος με εφαρμογή υδραυλικής πίεσης 0,5 MPa. Το δείγμα αφέθηκε να σκληρυνθεί για μία ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά την αφαίρεση του

καλουπιού η τελική σκλήρυνση πραγματοποιήθηκε στους 120 ° C για 2 ώρες χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρικό φούρνο. Το μέγεθος του ελάσματος που δημιουργήθηκε ήταν 250 mm x 250 mm x 3 mm.

1.9 Μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών GFRP

Οι Aramide et al. [9] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών GFRP με διαφορετικό κλάσμα όγκου ινών (5, 10, 15, 20, 25 και 30%). Η αντοχή εφελκυσμού, το μέτρο Young και η ελαστική καταπόνηση αυξανόταν με την αύξηση του Vf (fiber volume fraction) του υαλονήματος. Η δύναμη πρόσκρουσης μειώθηκε με αύξηση του Vf κατά 25%. Οι μέγιστες ιδιότητες εφελκυσμού και κάμψης βρέθηκαν στο 30% Vf του υαλονήματος. Η μέγιστη τάση βρέθηκε στο 25% Vf.

Οι Al-alkawi et al. [18] διερεύνησαν την συμπεριφορά κόπωσης των σύνθετων υλικών GFRP υπό μεταβλητές συνθήκες θερμοκρασίας (40 ° C, 50 ° C και 60 ° C). Η καμπύλη S-N έδειξε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και κόπωση μειώθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας έως και 60°C σε ένα Vf 33%. Ο ποσοστιαίος συντελεστής μείωσης για την αντοχή σε κόπωση ήταν υψηλότερος από τον συντελεστή ποσοστού μείωσης για αντοχή σε εφελκυσμό για όλα τα επίπεδα θερμοκρασίας.

Οι Awan et al. [12] διερεύνησαν τις ιδιότητες εφελκυσμού του σύνθετου ακόρεστου πολυεστέρα ενισχυμένου με GF με διάφορες διατομές ινών και σε διάφορα στρώματα ενός (1) φύλλου, (2) φύλλων και (3) φύλλων. Βρέθηκε ότι υψηλότερο ποσοστό βάρους σε υαλονήματα στα σύνθετα υλικά δίνει ισχυρότερη ενίσχυση. Ο αριθμός των στρωμάτων, το πάχος και η επιφάνεια διατομής ήταν διαφορετικό για κάθε δείγμα. Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό παρατηρείται σε ενίσχυση τριών στρωμάτων. Επίσης υψηλότερος Vf των ινών αύξανε τη δύναμη και την ακαμψία του σύνθετου υλικού.

Οι Chen et al. [19] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες του πλέγματος πολυαμιδίου 66 (σφαιρίδια) / πολυφαινολενοσουλφίδιο με διαφορετικές περιεκτικότητες όγκου υαλονημάτων όπως 5%, 10%, 20% και 30% αντίστοιχα. Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό βρέθηκε στο 30% Vf της ίνας και η αντοχή στην κάμψη βρέθηκε στο 25% Vf. Η μέγιστη αντοχή σε κρούση βρέθηκε σε 20% Vf ινών. Κατά τη δοκιμή φθοράς, ο ελάχιστος συντελεστής τριβής (0,35) βρέθηκε στο 20% Vf των ινών και ο όγκος φθοράς ήταν χαμηλότερος σε 30% Vf ινών.

Οι Yuanjian et al. [20] διερεύνησαν τις ιδιότητες πρόσκρουσης χαμηλής ταχύτητας και κόπωσης εφελκυσμού των σύνθετων υλικών GFRP με δύο γεωμετρίες ινών όπως [45 °] σε 42% Vf ίνας και [0 ° / 90 °] σε 47% Vf ίνας. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι η αντοχή σε εφελκυσμό και ακαμψία μειώθηκε με την αύξηση της ενέργειας κρούσης από 0 έως 25 J σε βήματα των 5 J. Οι μέγιστες ιδιότητες διατηρήθηκαν μέχρι τη δοκιμή των 10 J και οι παραπάνω ιδιότητες μειώθηκαν πολύ λόγω της αύξησης της ενέργειας δοκιμής από 10 σε 20 J. Η ζημιά πρόσκρουσης ήταν παρόμοια για τις δύο γεωμετρίες. Η χαμηλή ενέργεια κρούσης των σύνθετων ενισχυμένων με GF προκαλεί ζημιά στη μήτρα.

Οι Karakuzu et al. [22] διερεύνησαν τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών μήτρας ενισχυμένων με GF βινυλεστέρα με κυκλική οπή και 63% ινών Vf, ο λόγος των διαφορετικών απόστασεων από την ελεύθερη άκρη οπών (E) έως διάμετρο οπής (D) είναι 1, 2, 3, 4 και 5.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος το φορτίο εφαρμόζεται σε διαμήκη κατεύθυνση του δείγματος, το πειραματικό αποτέλεσμα του τρόπου έντασης έδειξε ότι το μέτρο του Young ήταν 20.769 MPa. Το μέτρο διάτμησης (G12) βρέθηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (1),

Μέτρο διάτμησης:

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}}$$

όπου $E_1 = E_2$ είναι το μέτρο του Young των σύνθετων υλικών. Από την παραπάνω εξίσωση βρέθηκε ότι ο συντελεστής διάτμησης ήταν 4133 MPa .

1.10 Θερμικές ιδιότητες των σύνθετων ουσιών GFRP

Οι Hameed et al. (14) διερεύνησαν τη θερμική συμπεριφορά σύνθετων υλικών GFRP με διαφορετικό Vf (10%, 20%, 30%, 40%, 50% και 60%). Η δοκιμή διεξήχθη σε ατμόσφαιρα αζώτου σε θερμοκρασία από 30 ° C έως 900 ° C. Η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA) έδειξε ότι για Vf 60% υπήρχε μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα και η θερμοκρασία αποικοδόμησης μετατοπίστηκε από 357 ° C σε 390°C.

Επίσης βρέθηκε ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε GF των σύνθετων υλικών καθυστέρησε τη θερμο-οξειδωτική αποσύνθεση. Οι Lopez et al. [10] διερεύνησαν τη θερμοανάλυση του σύνθετου E-GF waste polyester. Η καμπύλη TGA / διαφορικής θερμογραμμομετρίας (DTG) έδειξε ότι η θερμοκρασία αποικοδόμησης μετατοπίστηκε από 209,8 ° C σε 448,7 ° C και η απώλεια μάζας μετατοπίστηκε από 1,8% κατά βάρος σε 4,4% κατά βάρος.

1.11 Συμπεράσματα

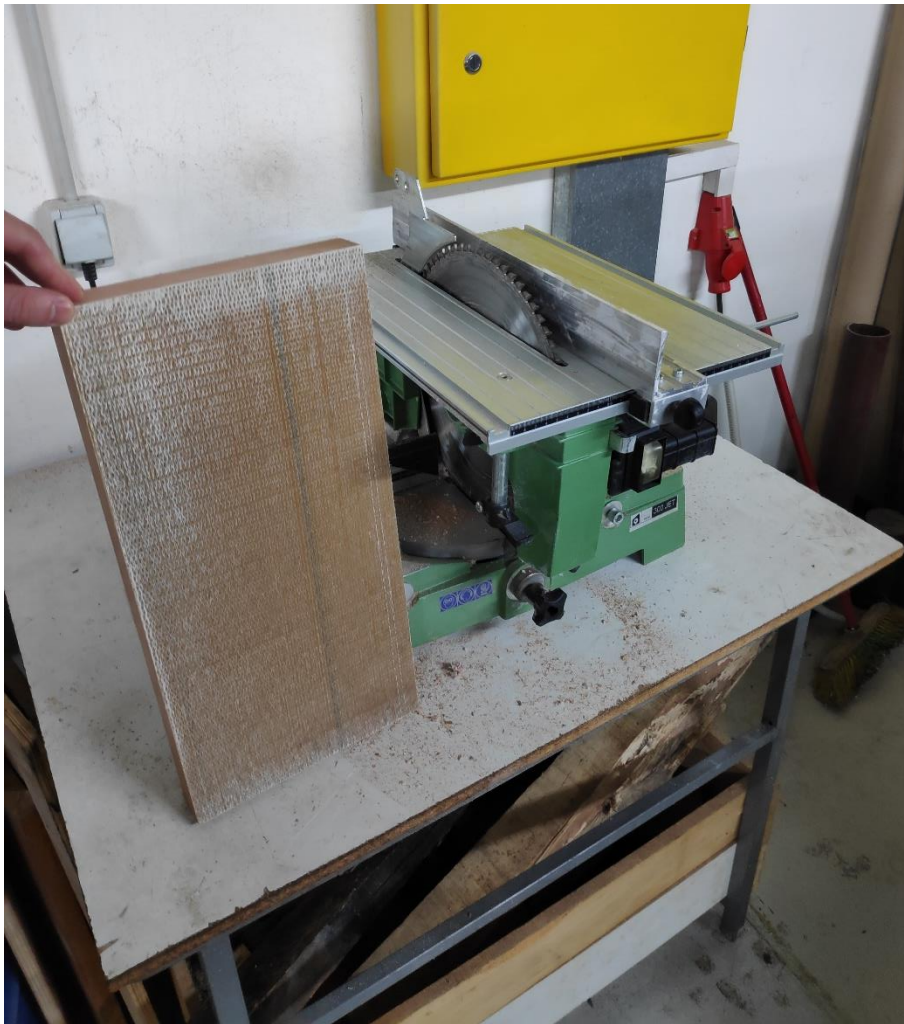
Οι μηχανικές, δυναμικές, θερμικές και απορροφητικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών GFRP συζητήθηκαν παραπάνω μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η σημασία της εφαρμογής αυτών των σύνθετων υλικών επίσης επισημάνθηκε. Από τα πειραματικά αποτελέσματα η τελική αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή στην κάμψη των σύνθετων υλικών αυξήθηκε με την αύξηση του όγκου Vf των κλασμάτων βάρους ινών. Η ελαστική τάση του σύνθετου υλικού αυξήθηκε με την αύξηση του Vf έως 0,25 και στη συνέχεια μειώθηκε με περαιτέρω αύξηση του Vf. . Το μέτρο ελαστικότητας του Young αυξήθηκε με την αύξηση του Vf. Οι ιδιότητες απόσβεσης των GRP βελτιώθηκαν αυξάνοντας την περιεκτικότητα GF και μετρήθηκε η φυσική συχνότητα για όλες τις συνθήκες. Η απορρόφηση νερού μείωσε τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Για να βελτιωθούν οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών, οι ίνες υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με διάφορα χημικά και μείγμα μήτρας με κατάλληλο χημικό για την κατασκευή των σύνθετων υλικών GRP. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές και θερμικές, ιδιότητες των σύνθετων υλικών GRP.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκε πειραματική διάταξη και εκτελέστηκαν μετρήσεις με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων (υγρασία, θερμοκρασία) στη μηχανική συμπεριφορά των GFRP συνθέτων υλικών.

Για την εκτέλεση του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν είκοσι τέσσερα (24) κατασκευασμένα δοκίμια οι διαστάσεις των οποίων ήταν 140 x 19 x 3.5 mm.



Εικ. 7 Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων



Εικ. 8 Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων

Αρχικά τα δοκίμια χωρίστηκαν σε τέσσερις διαφορετικές ομάδες των έξι (6) δοκιμίων κάθε μια από τις οποίες υποβλήθηκε σε διαφορετική θερμοκρασία. Η διαφορά θερμοκρασίας επιτεύχθηκε με χρήση φούρνου (Εικόνα 9) και οι τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες ήταν 40,60,80 και 100 °C.



Εικ. 9 Φούρνος στον οποίο εκτελέστηκε το πείραμα

Τα δοκίμια πριν μπουν στον φούρνο τοποθετούνταν μέσα σε ένα δοχείο (Εικ. 10 και 11) το οποίο ήταν γεμάτο με νερό βρύσης. Πριν τα δοκίμια μπουν στον φούρνο αλλά και αμέσως μόλις έβγαιναν καταγραφόταν το βάρος τους.



Εικ. 10 Δοκίμια τοποθετημένα στο δοχείο



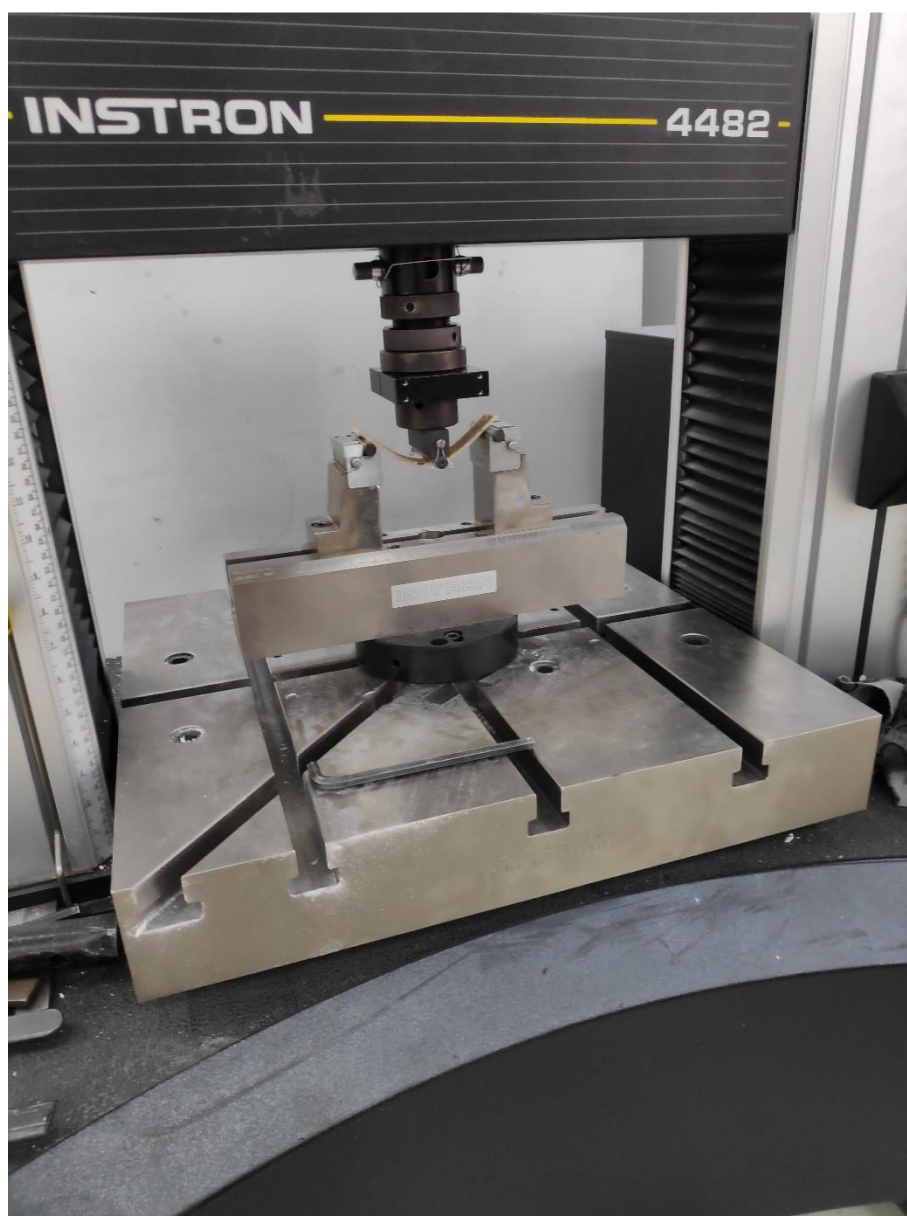
Εικ. 11 Δοχείο τοποθετημένο σε φούρνο

Κάθε ομάδα δοκιμίων τοποθετούταν στο δοχείο με το νερό και ακολούθως το δοχείο που περιείχε τα έξι δοκίμια τοποθετούταν στον φούρνο. Τα πρώτα δυο (2) δοκίμια έμεναν στον φούρνο 24 ώρες, τα επόμενα δυο (2) δοκίμια 48 ώρες ενώ τα τελευταία δυο (2) δοκίμια για συνολικά επτά (7) ημέρες. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλήφθηκε για το σύνολο των τεσσάρων (4) ομάδων.

Κατόπιν της ολοκλήρωσεως της διαδικασίας θέρμανσης των δοκιμίων στον φούρνο τα 24 δοκίμια (συν ένα πρότυπο το οποίο δεν είχε μπει στον φούρνο), τοποθετήθηκαν στην πρέσα του εργαστηρίου και με ταχύτητα 5mm/min και απόσταση 110mm μεταξύ των δύο άκρων που ακουμπούσε το δοκίμιο, εκτελέστηκε δοκιμή κάμψης.



Εικ. 12 Πρέσα εργαστηρίου.

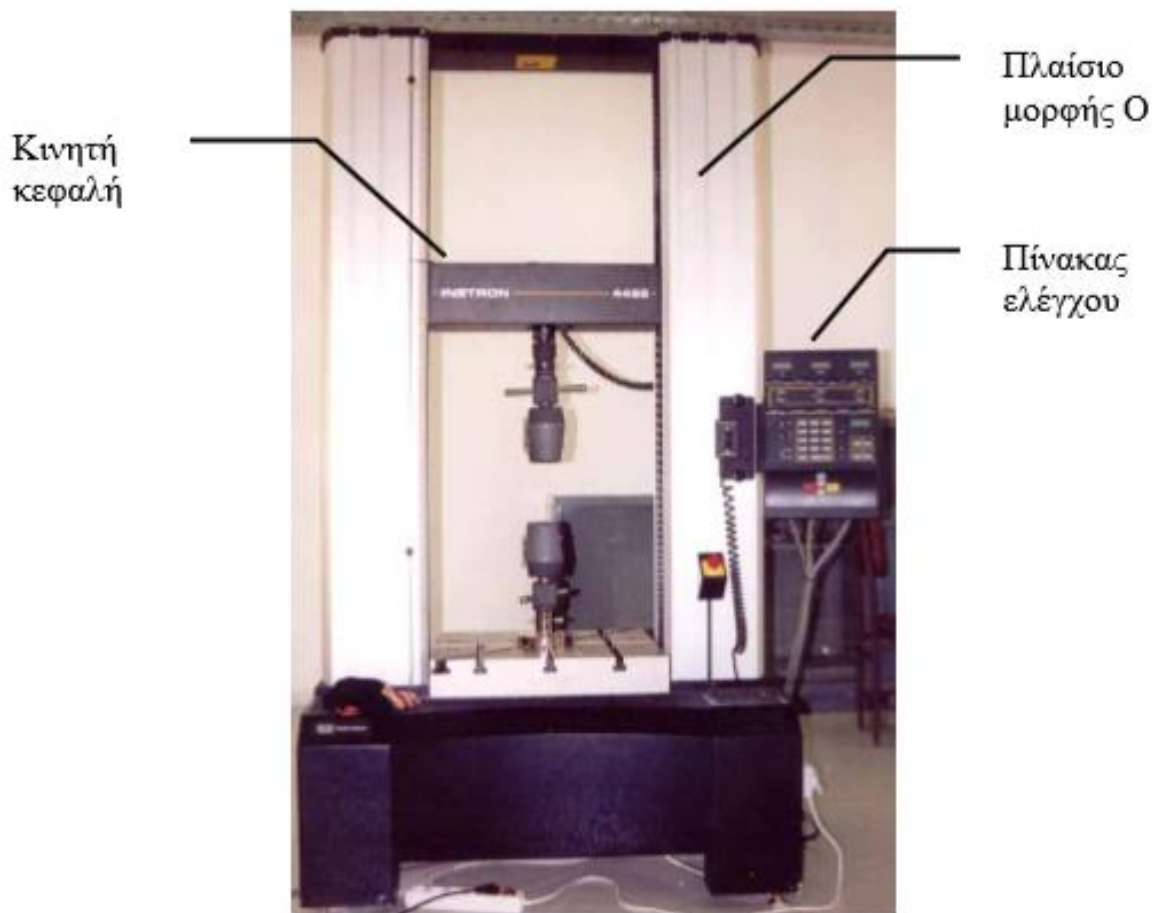


Εικ. 13 Πρέσα εργαστηρίου.

Τέλος μετά τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη, το πρότυπο δοκίμιο και ένα δοκίμιο από κάθε θερμοκρασία το οποίο τοποθετήθηκε στον φούρνο για επτά (7) ημέρες (οι πιο ακραίες περιπτώσεις δηλαδή) φωτογραφήθηκαν στο στερεοσκόπιο και το μικροσκόπιο.

2.2 Πειραματικός εξοπλισμός - πρέσα INSTRON 4482

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου (Εικ. 14). Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού, κοχλία -περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10 KN.



Εικόνα 14 Πρέσα δοκιμών *INSTRON 4482*.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής O (περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης)
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 10 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm/ min
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm /min.
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm/ min.
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV/ V.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Πειραματικά αποτελέσματα

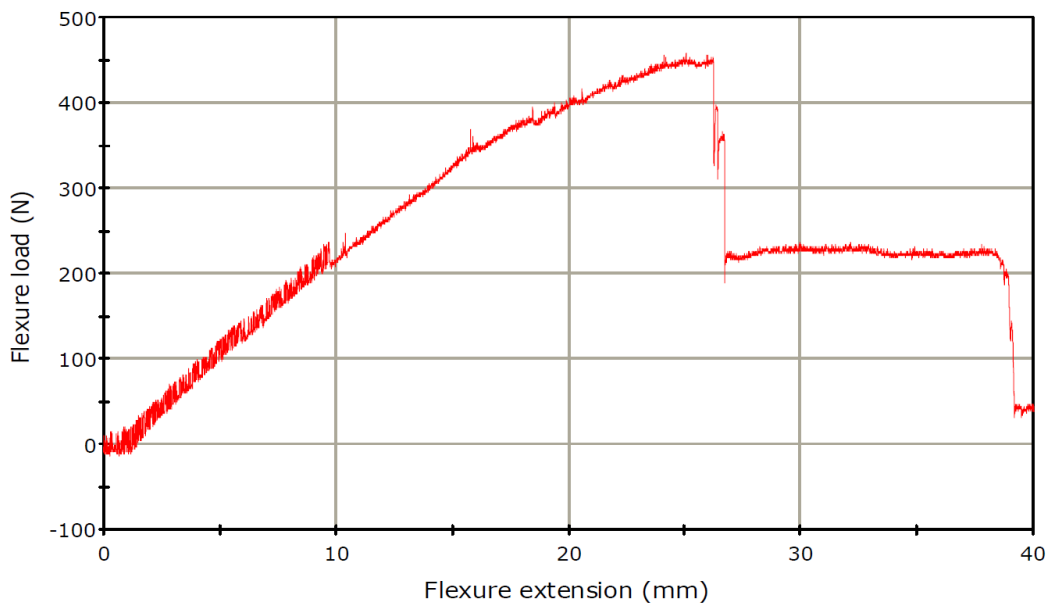
Στο παρών κεφάλαιο αναλύονται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του πειράματος που αναφέρθηκε παραπάνω.

3.2 Θερμοκρασία 40° C

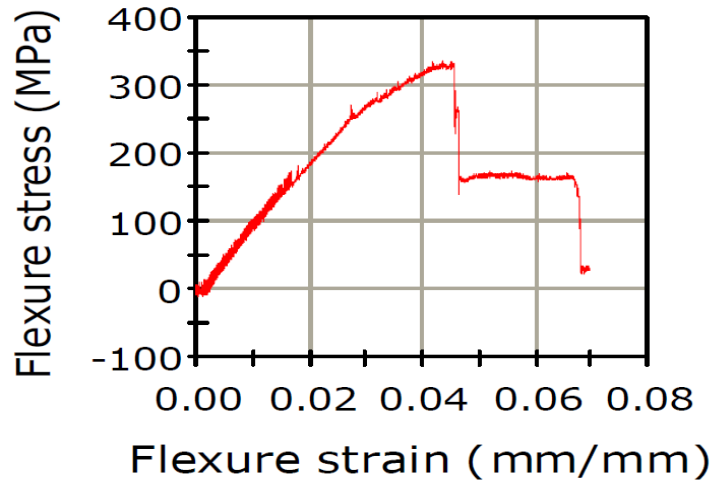
Στην θερμοκρασία των 40° C υποβλήθηκαν τα δοκίμια G1, G2, G3, G4, H1 και H2. Κάτωθι παρατίθενται τα διαγράμματα κάμψης για την εκάστοτε περίπτωση.

3.2.1 Δοκίμιο G1

Το δοκίμιο G1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40° C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -1- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο G1



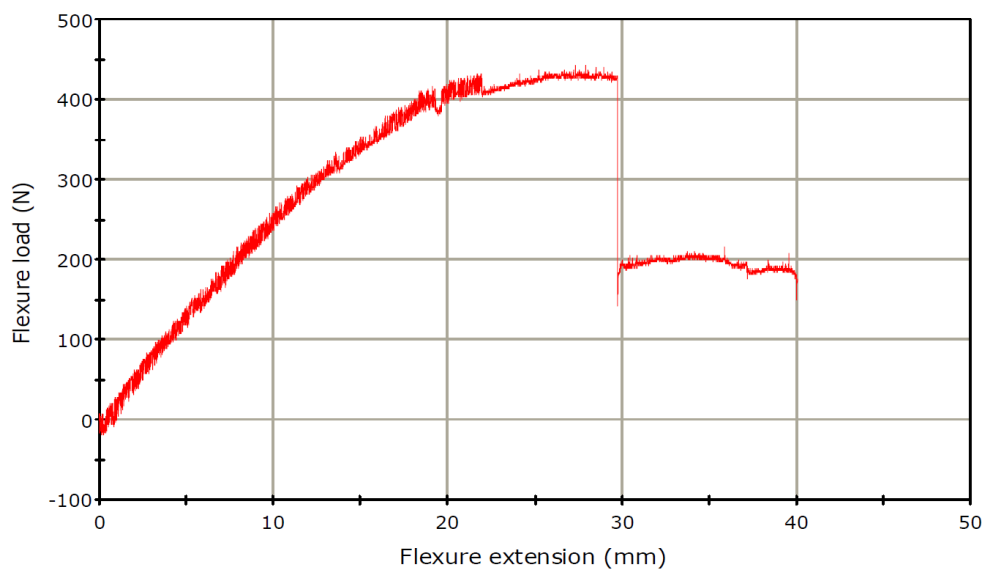
Διάγραμμα -2- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο G1

Πίνακας 3 Αποτελέσματα για δοκίμιο G1

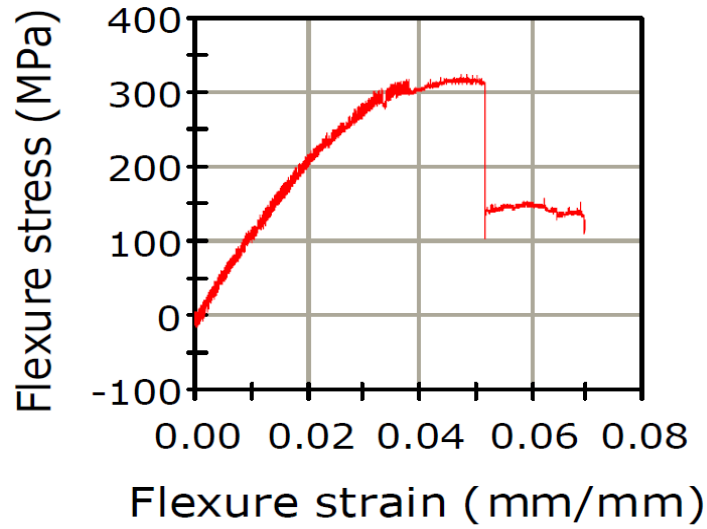
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-458.16669	-25.03	335.39267	0.06940

3.2.2 Δοκίμιο G2

Το δοκίμιο G2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -3- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο G2



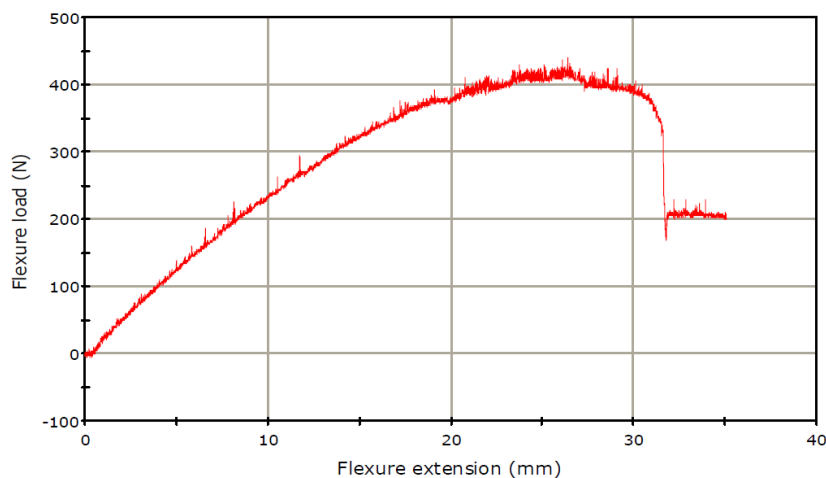
Διάγραμμα -4- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο G2

Πίνακας 4 Αποτελέσματα για δοκίμιο G2

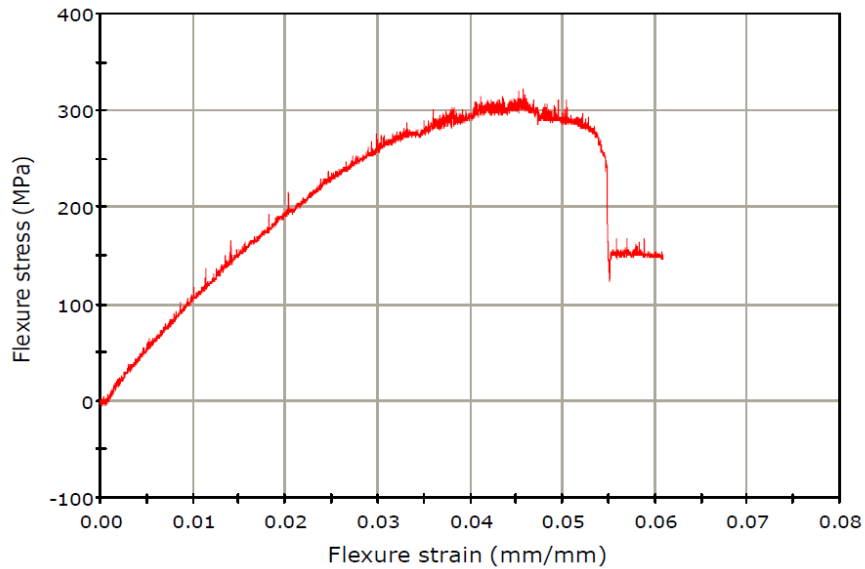
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-442.37798	-27.9	323.83481	0.06946

3.2.3 Δοκίμιο G3

Το δοκίμιο G3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -5- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο G3



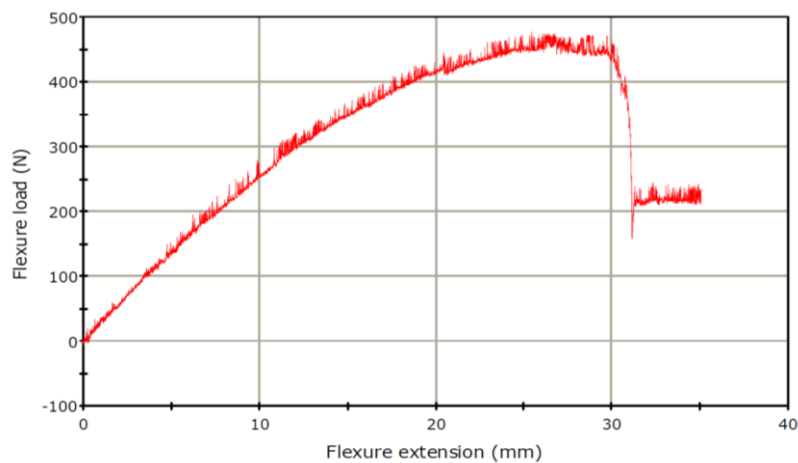
Διάγραμμα -6- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο G3

Πίνακας 5 Αποτελέσματα για δοκίμιο G3

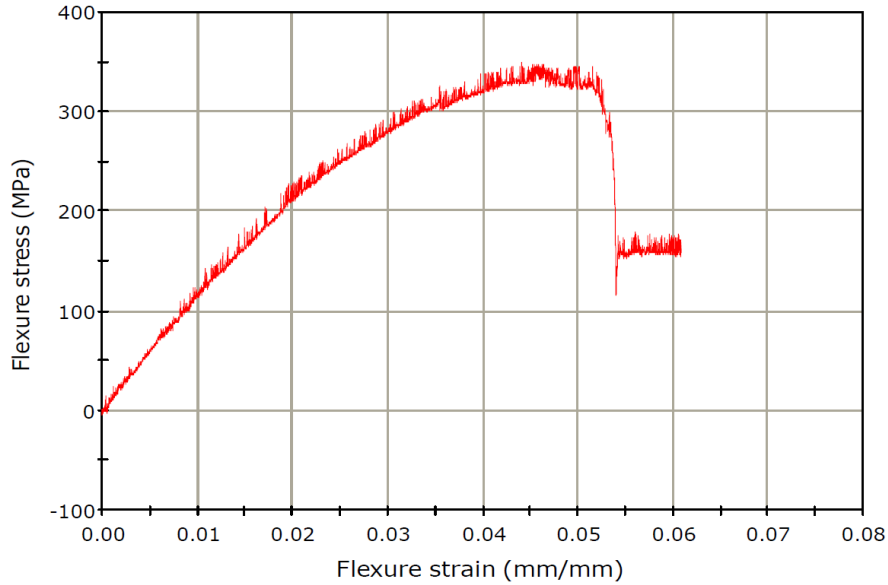
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-439.73019	-26.37000	321.89655	0.06081

3.2.4 Δοκίμιο G4

Το δοκίμιο G4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -7- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο G4



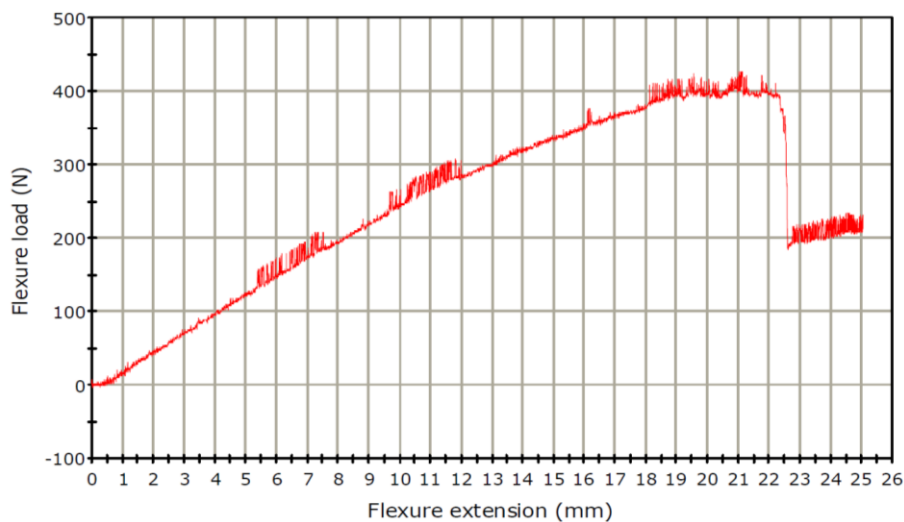
Διάγραμμα -8- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο G4

Πίνακας 6 Αποτελέσματα για δοκίμιο G4

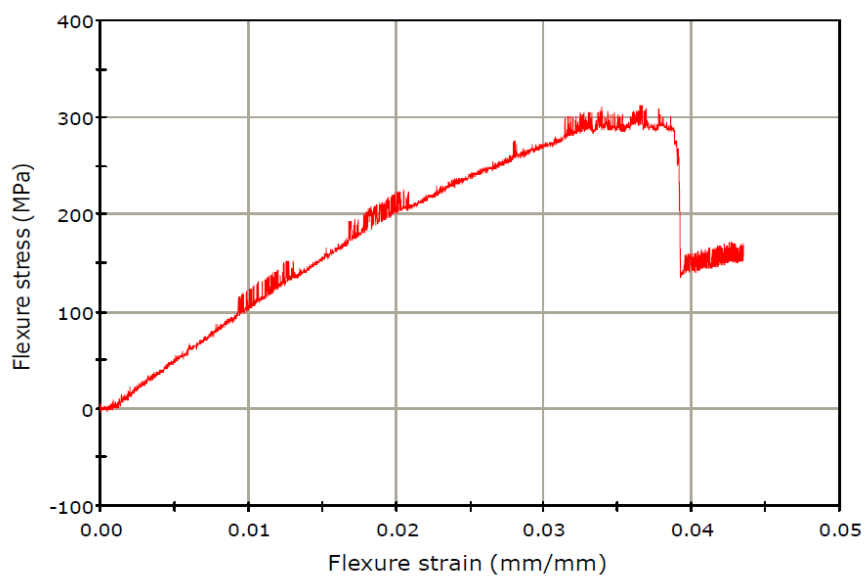
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-476.60319	-25.41000	348.88876	0.06080

3.2.5 Δοκίμιο H1

Το δοκίμιο H1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -9- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο H1



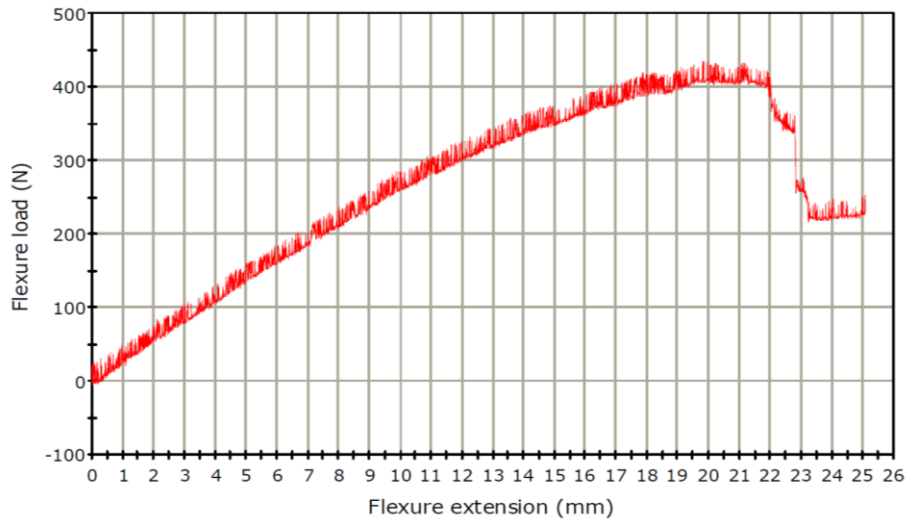
Διάγραμμα -10- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο H1

Πίνακας 7 Αποτελέσματα για δοκίμιο H1

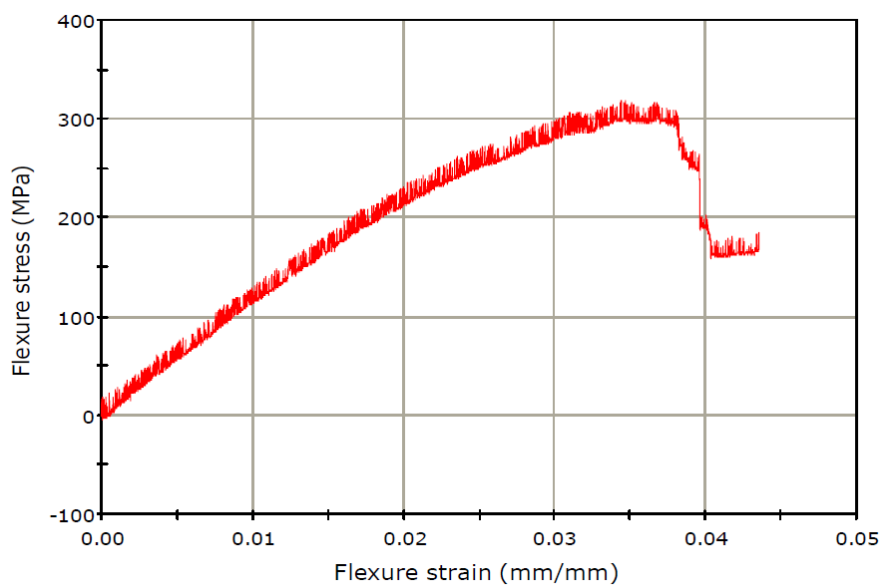
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-426.49121	-21.10000	312.20517	0.04344

3.2.6 Δοκίμιο Η2

Το δοκίμιο Η2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 40°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -11- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο Η2



Διάγραμμα -12- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Η2

Πίνακας 8 Αποτελέσματα για δοκίμιο H2

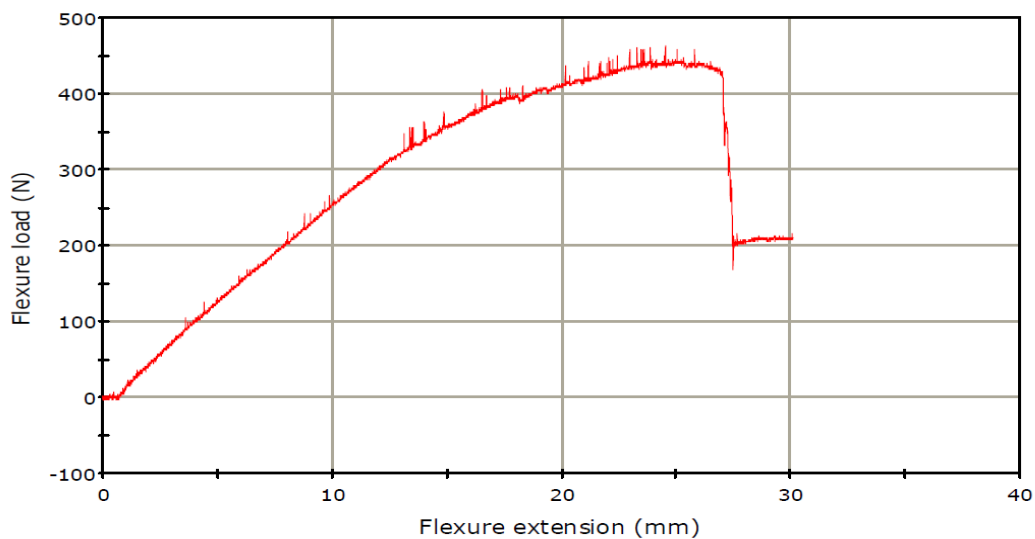
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-434.43459	-19.96000	318.02002	0.04350

3.3 Θερμοκρασία 60° C

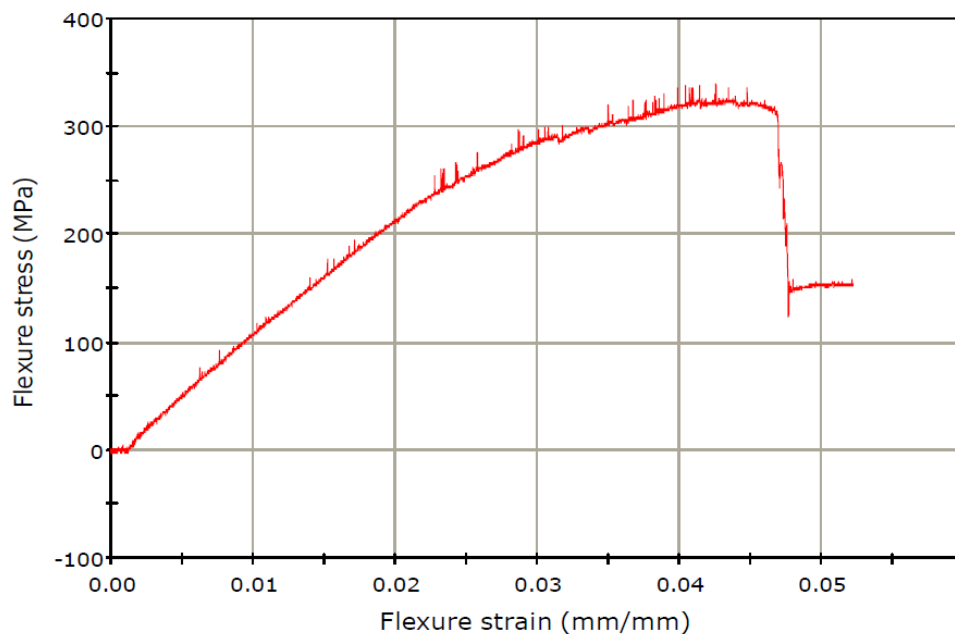
Στην θερμοκρασία των 60° C υποβλήθηκαν τα δοκίμια H3, H4, I1, I2, I3 και I4. Κάτωθι παρατίθενται τα διαγράμματα κάμψης για την εκάστοτε περίπτωση.

3.3.1 Δοκίμιο H3

Το δοκίμιο H3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -13- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο H3



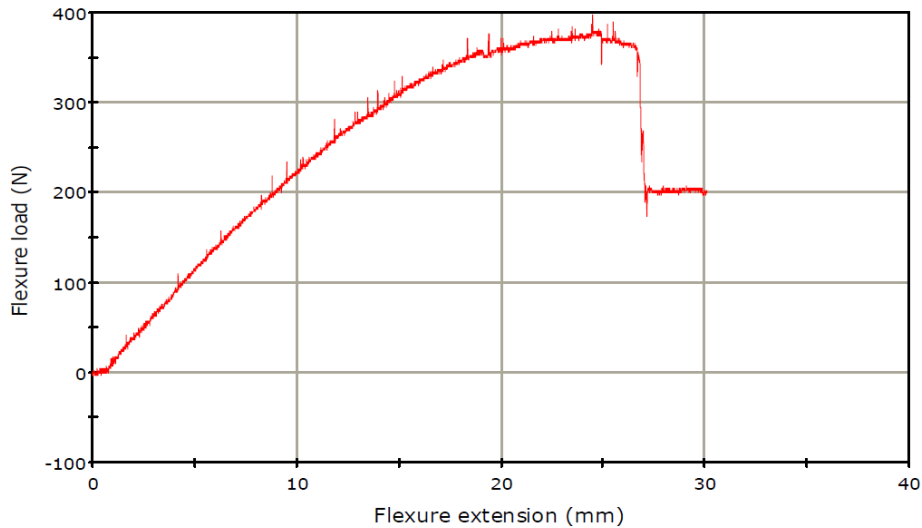
Διάγραμμα -14- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο H3

Πίνακας 9 Αποτελέσματα για δοκίμιο H3

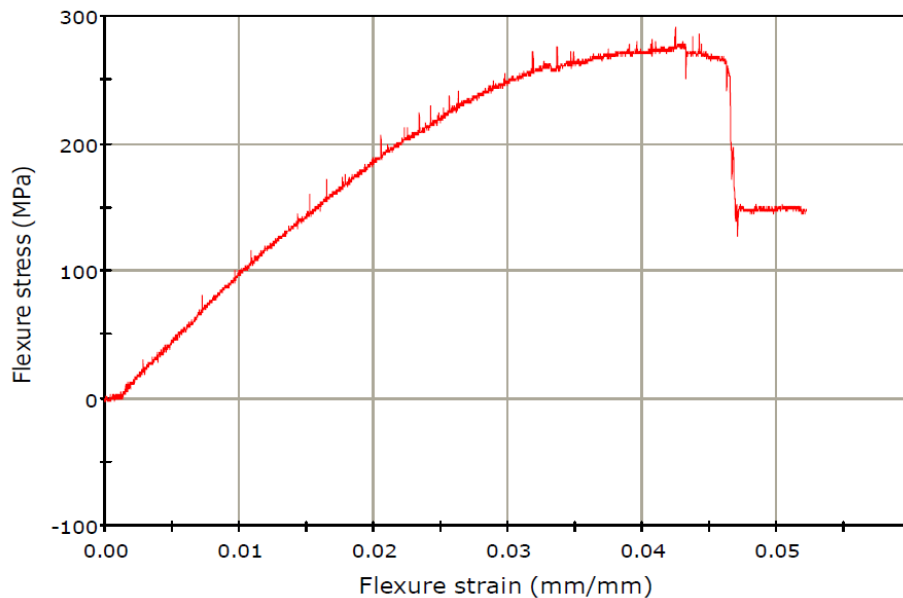
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-463.36421	-24.50000	339.19739	0.05219

3.3.2 Δοκίμιο H4

Το δοκίμιο H4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -15- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο H4



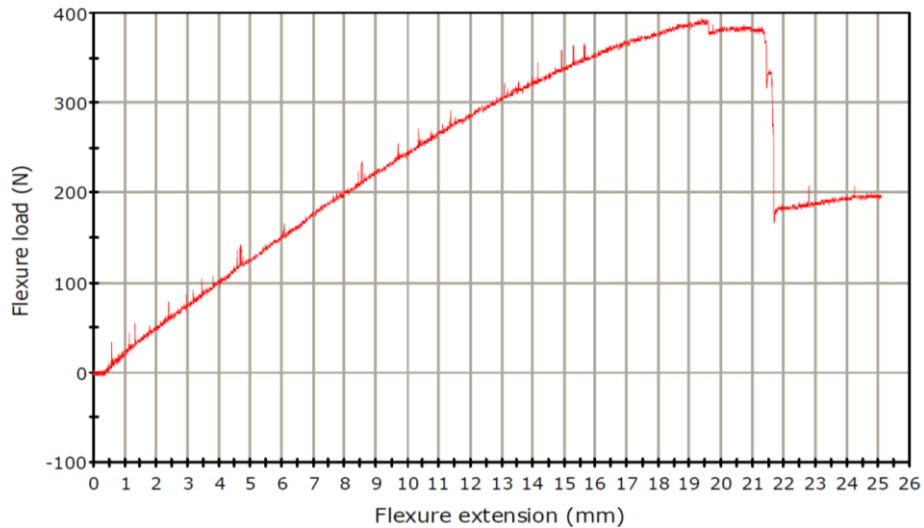
Διάγραμμα -16- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο H4

Πίνακας 10 Αποτελέσματα για δοκίμιο H4

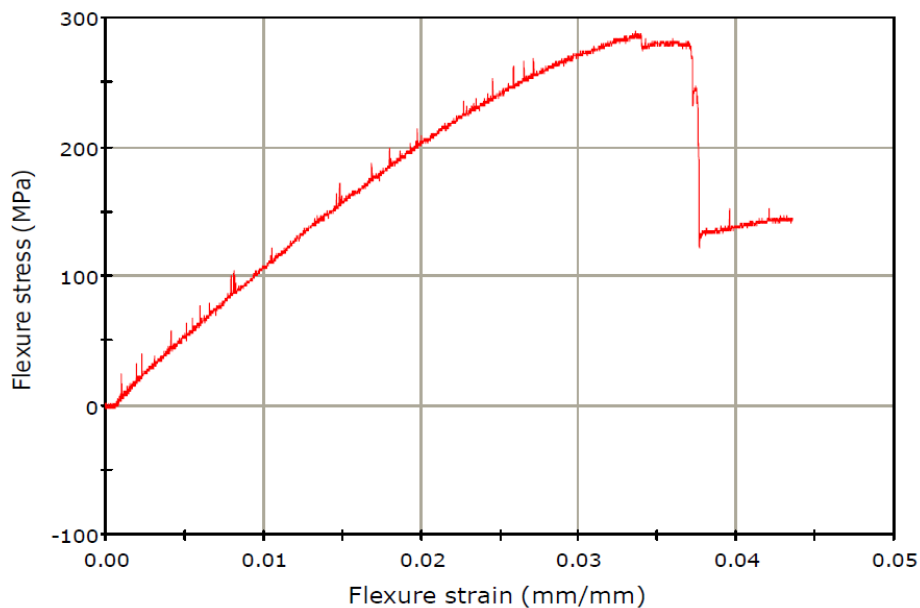
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-397.56159	-24.47000	291.02780	0.05214

3.3.3 Δοκίμιο Ι1

Το δοκίμιο Ι1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -17- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο Ι1



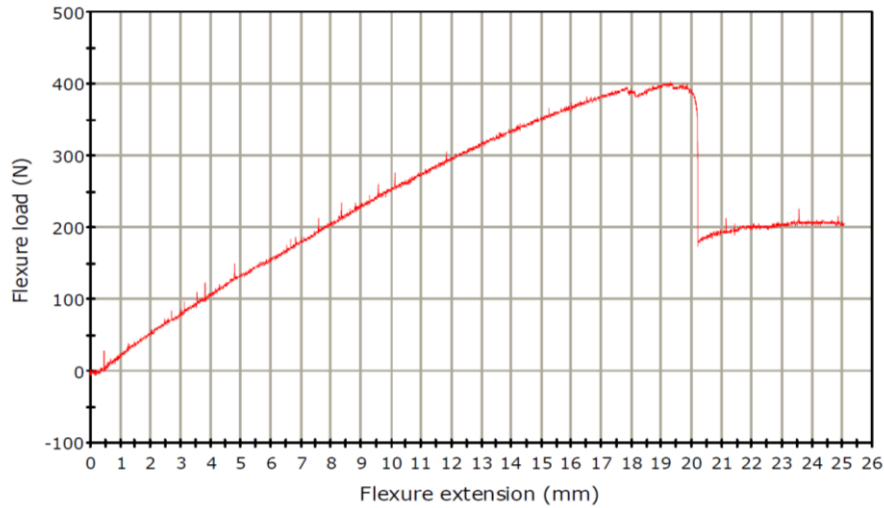
Διάγραμμα -18- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Ι1

Πίνακας 11 Αποτελέσματα για δοκίμιο Ι1

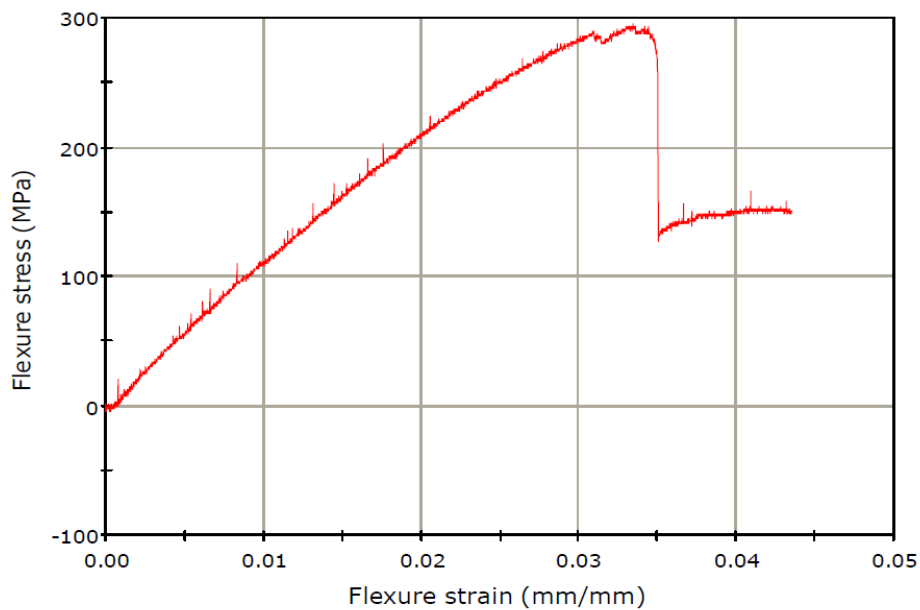
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-394.91380	-19.35000	289.08954	0.04353

3.3.4 Δοκίμιο I2

Το δοκίμιο I2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -19- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο I2



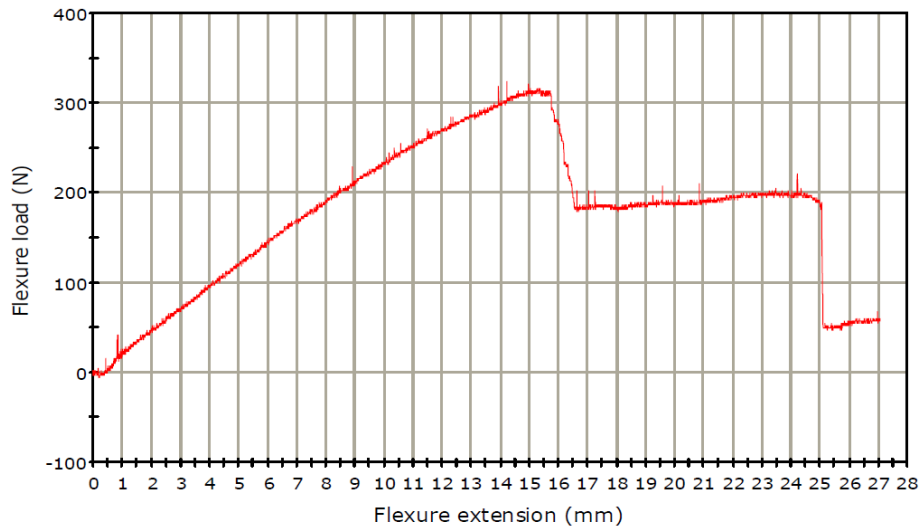
Διάγραμμα -20- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο I2

Πίνακας 12 Αποτελέσματα για δοκίμιο I2

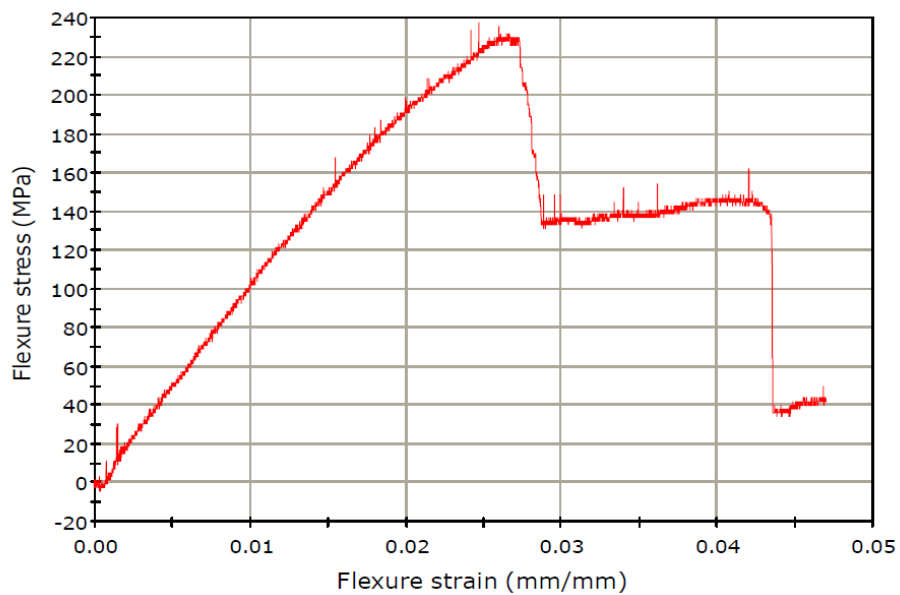
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-402.85718	-19.27000	294.90433	0.04350

3.3.5 Δοκίμιο I3

Το δοκίμιο I3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -21- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο I3



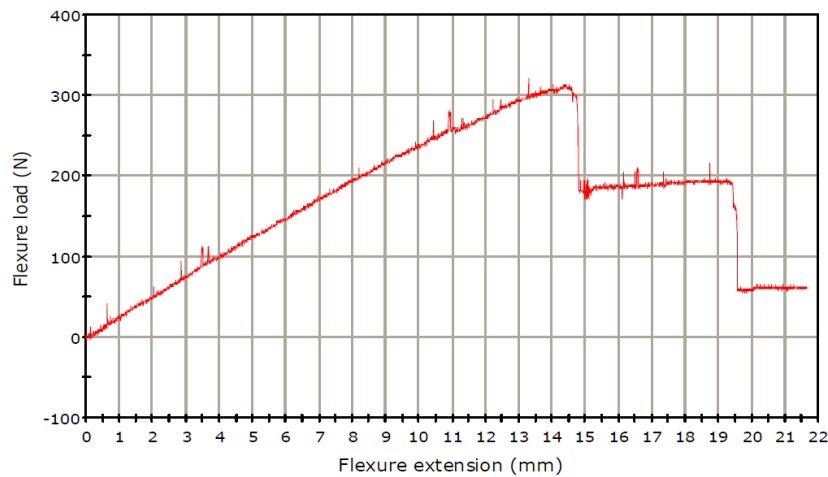
Διάγραμμα -22- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο I3

Πίνακας 13 Αποτελέσματα για δοκίμιο I3

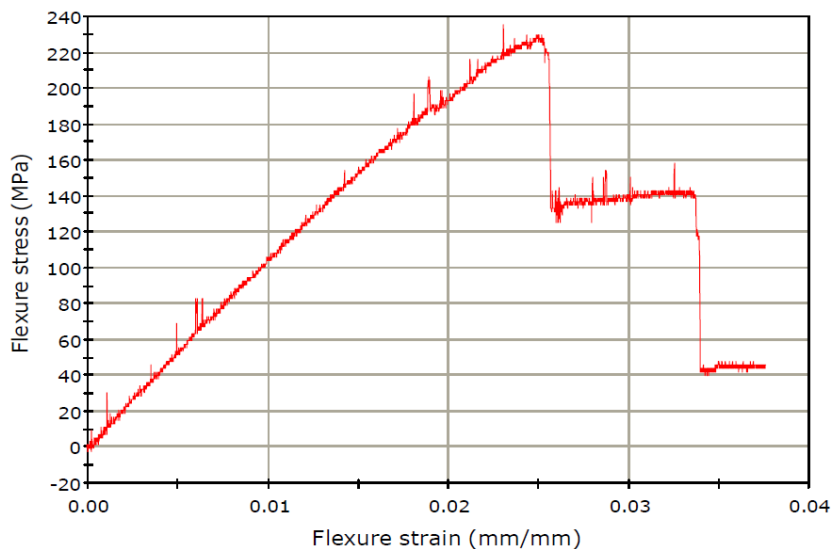
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-323.91365	-14.22000	237.11513	0.04693

3.3.6 Δοκίμιο I4

Το δοκίμιο I4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 60°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -23- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο I4



Διάγραμμα -24- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο I4

Πίνακας 14 Αποτελέσματα για δοκίμιο I4

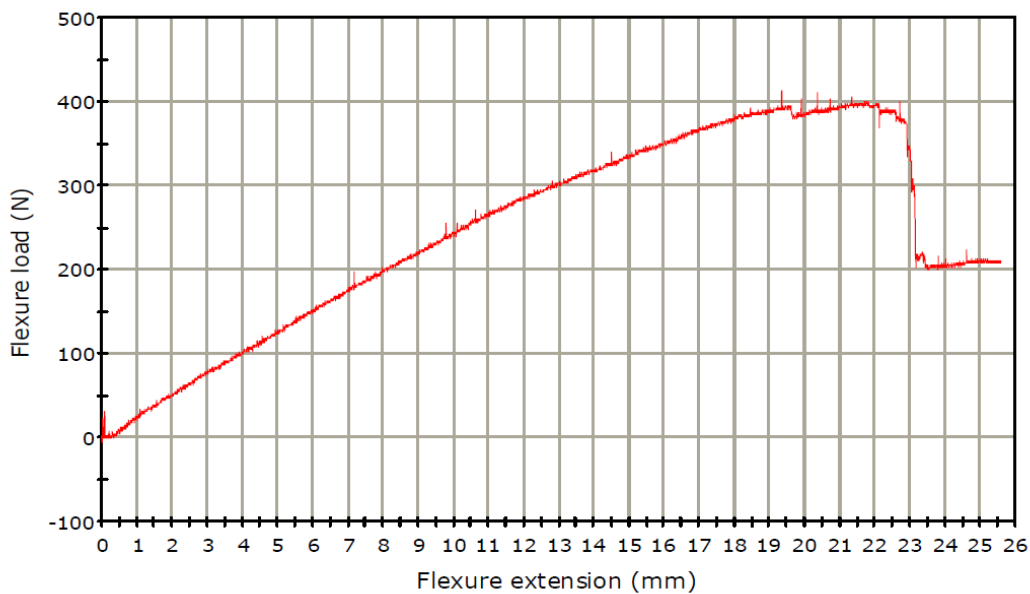
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-321.26585	-13.29000	235.17688	0.03756

3.4 Θερμοκρασία 80° C

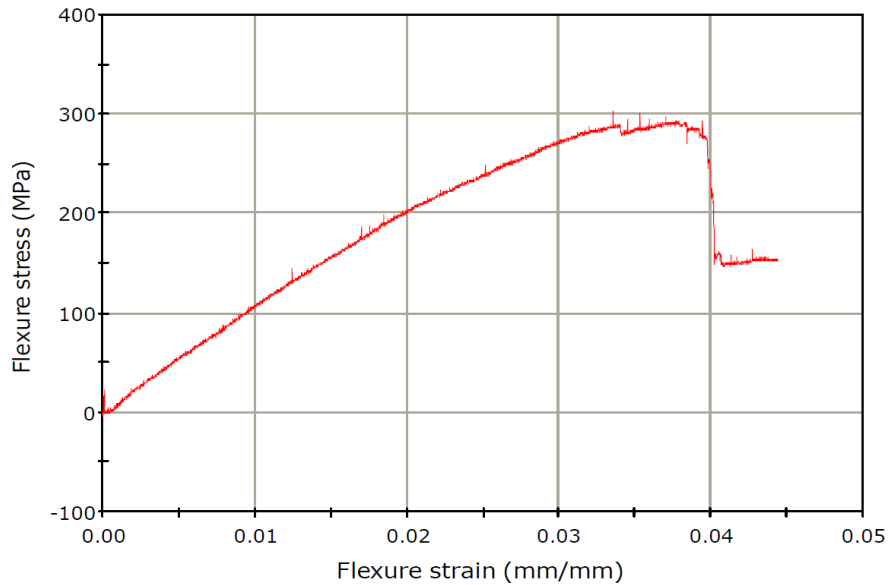
Στην θερμοκρασία των 80° C υποβλήθηκαν τα δοκίμια J1, J2, J3, J4, K1 και K2. Κάτωθι παρατίθενται τα διαγράμματα κάμψης για την εκάστοτε περίπτωση.

3.4.1 Δοκίμιο J1

Το δοκίμιο J1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -25- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο J1



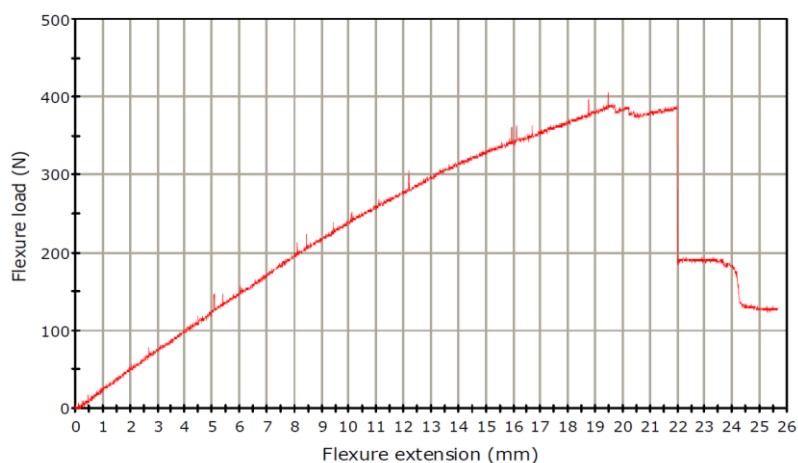
Διάγραμμα -26- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο J1

Πίνακας 15 Αποτελέσματα για δοκίμιο J1

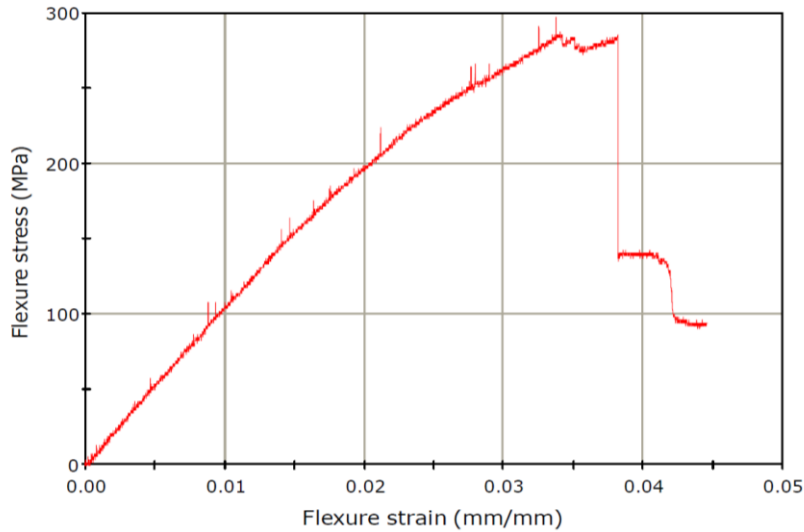
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-413.35030	-19.33000	302.58563	0.04436

3.4.2 Δοκίμιο J2

Το δοκίμιο J2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -27- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο J2



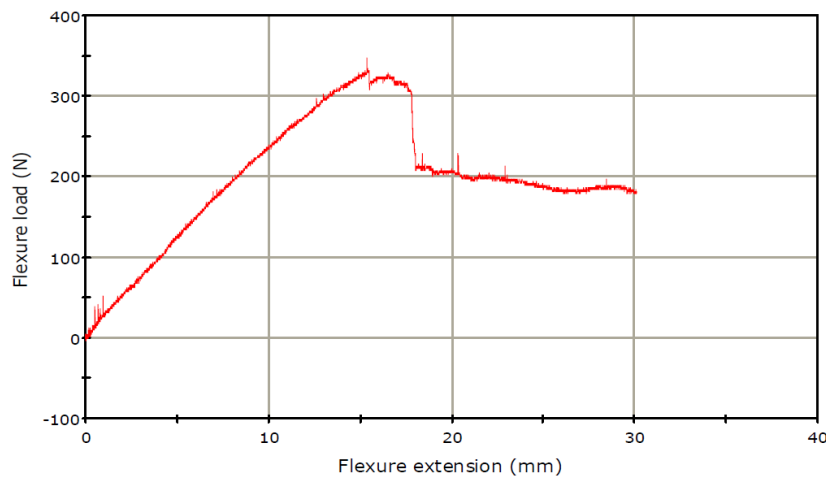
Διάγραμμα -28- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο J2

Πίνακας 16 Αποτελέσματα για δοκίμιο J2

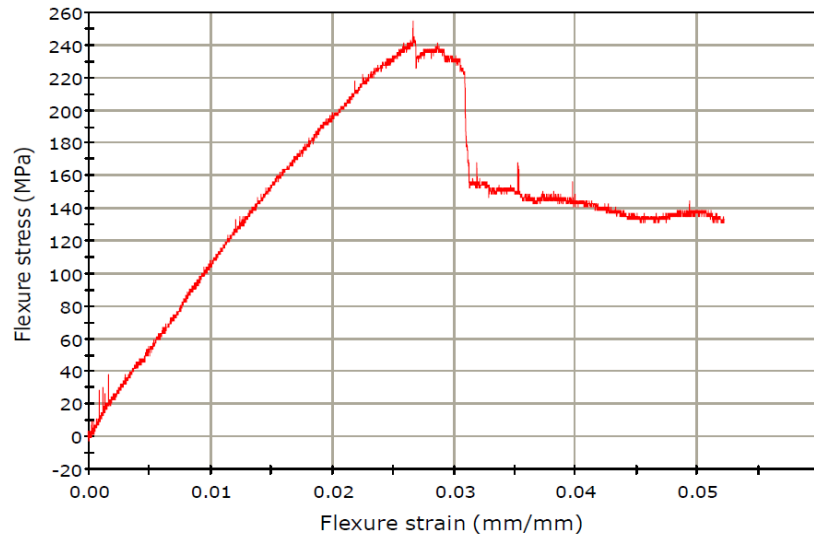
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-405.50498	-19.44000	296.84259	0.04457

3.4.3 Δοκίμιο J3

Το δοκίμιο J3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -29- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο J3



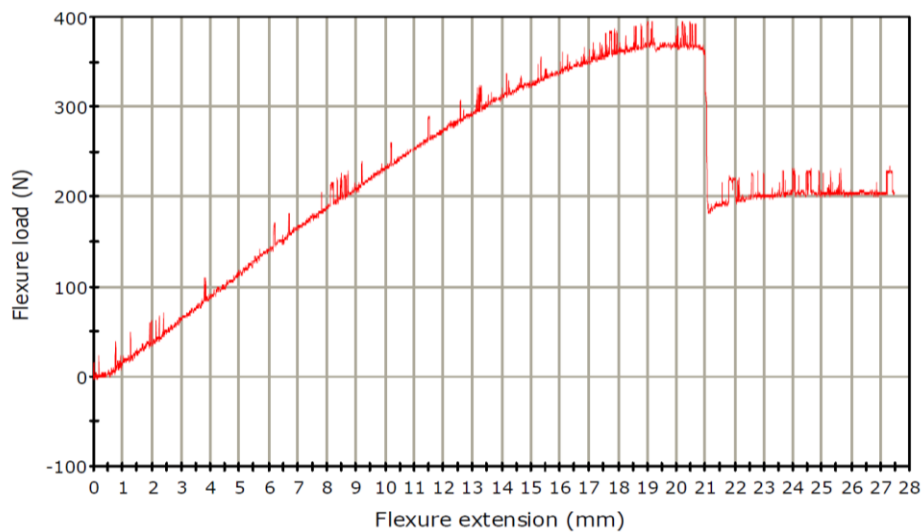
Διάγραμμα -30- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο J3

Πίνακας 17 Αποτελέσματα για δοκίμιο J3

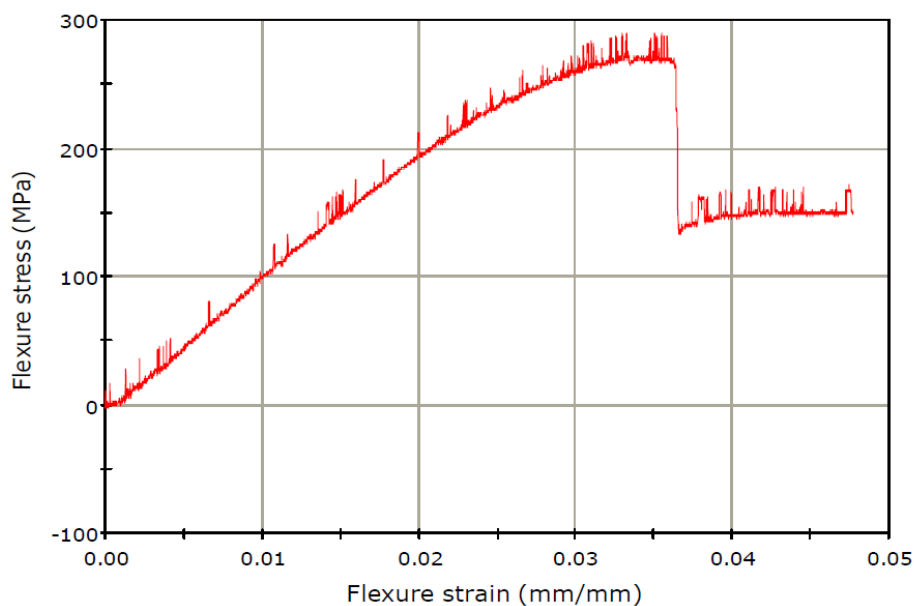
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-347.54768	-15.36000	254.41600	0.05218

3.4.4 Δοκίμιο J4

Το δοκίμιο J4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -31- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο J4



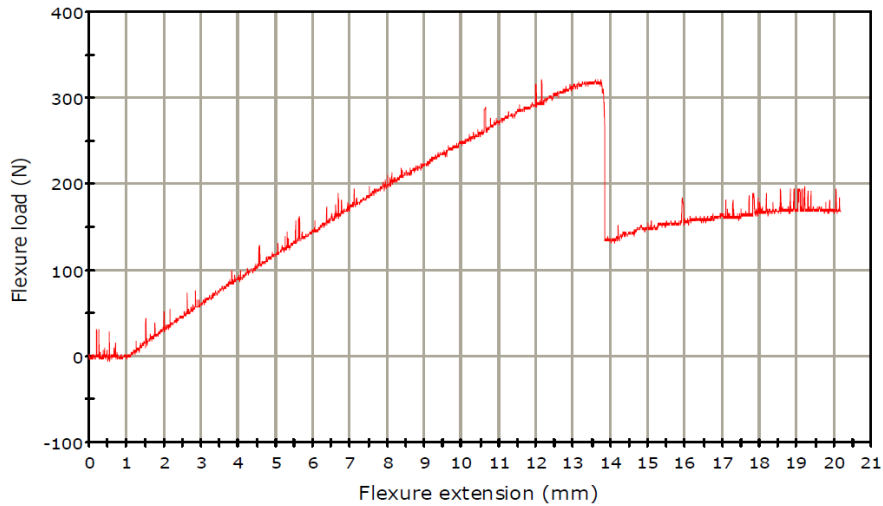
Διάγραμμα -32- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο J4

Πίνακας 18 Αποτελέσματα για δοκίμιο J4

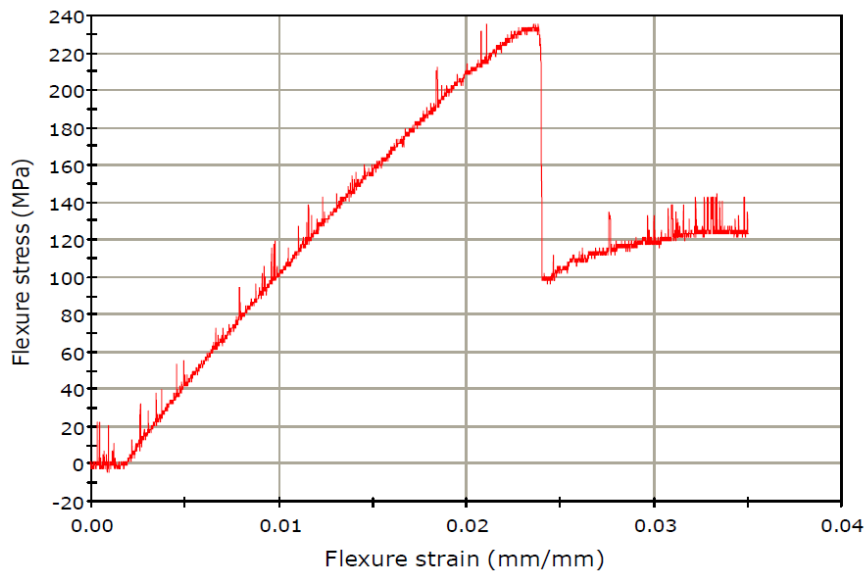
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-394.91380	-20.44000	289.08954	0.04766

3.4.5 Δοκίμιο K1

Το δοκίμιο K1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -33- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο K1



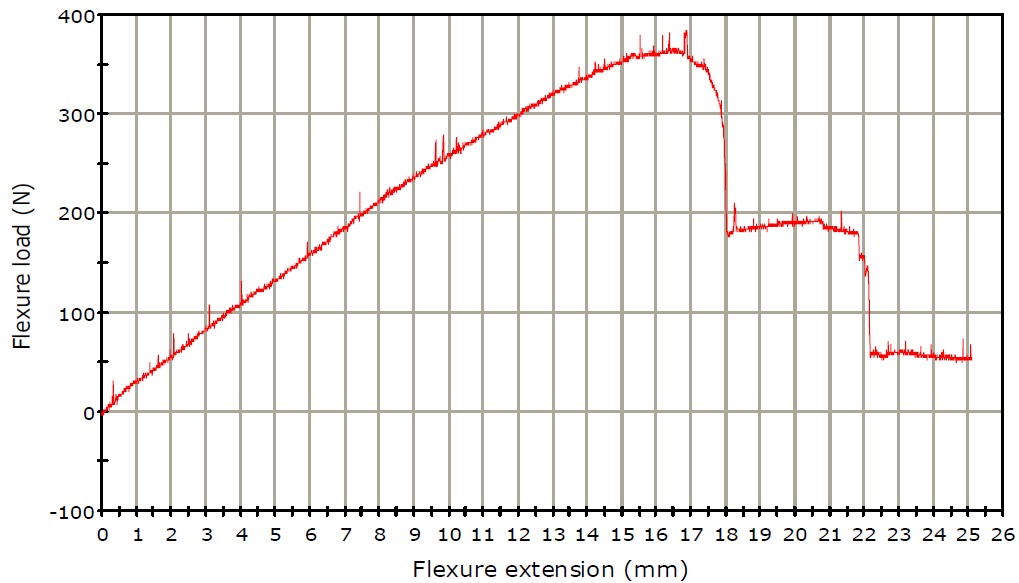
Διάγραμμα -34- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο K1

Πίνακας 19 Αποτελέσματα για δοκίμιο K1

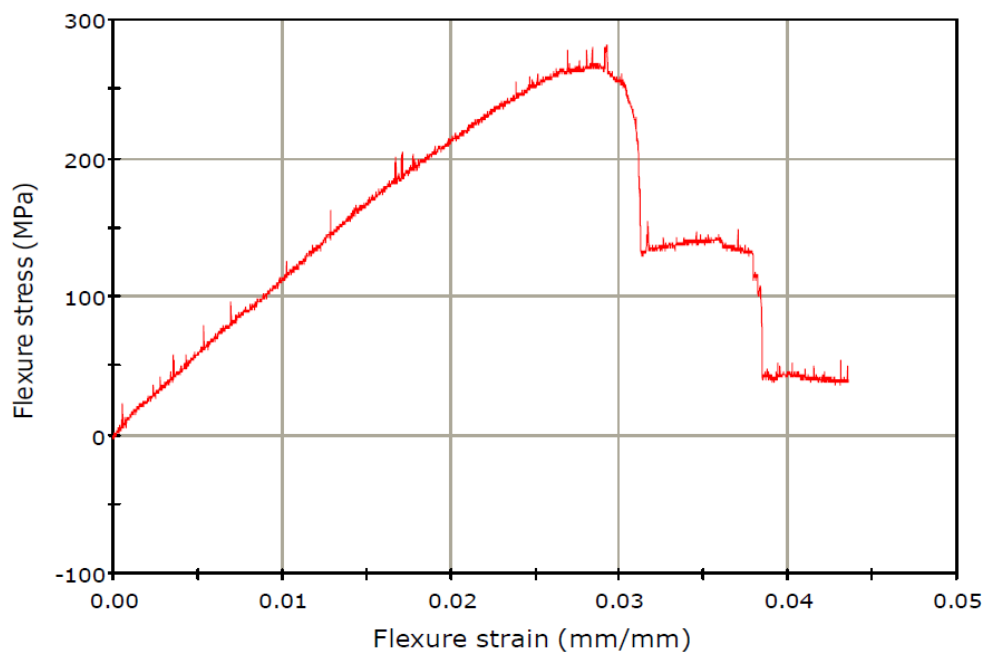
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-321.26585	-13.73000	235.17688	0.03500

3.4.6 Δοκίμιο K2

Το δοκίμιο K2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 80°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -35- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο K2



Διάγραμμα -36- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο K2

Πίνακας 20 Αποτελέσματα για δοκίμιο K2

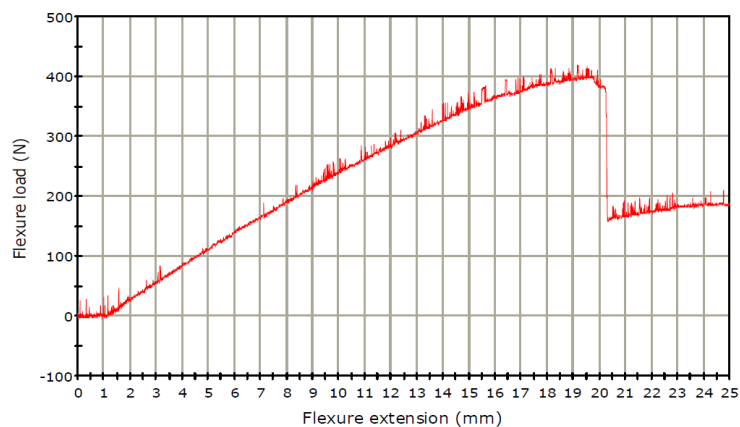
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-384.42068	-16.85000	281.40823	0.04352

3.5 Θερμοκρασία 100° C

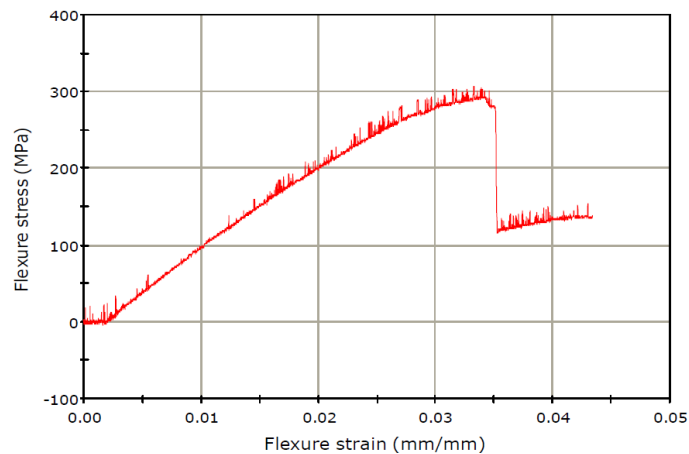
Στην θερμοκρασία των 100° C υποβλήθηκαν τα δοκίμια K3, K4, L1, L2, L3 και L4. Κάτωθι παρατίθενται τα διαγράμματα κάμψης για την εκάστοτε περίπτωση.

3.5.1 Δοκίμιο K3

Το δοκίμιο K3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -37- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο K3



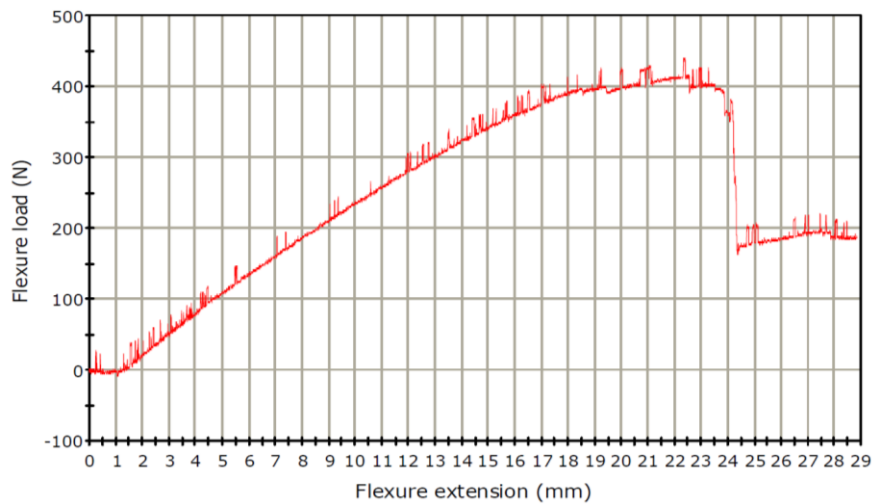
Διάγραμμα -38- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο K3

Πίνακας 21 Αποτελέσματα για δοκίμιο Κ3

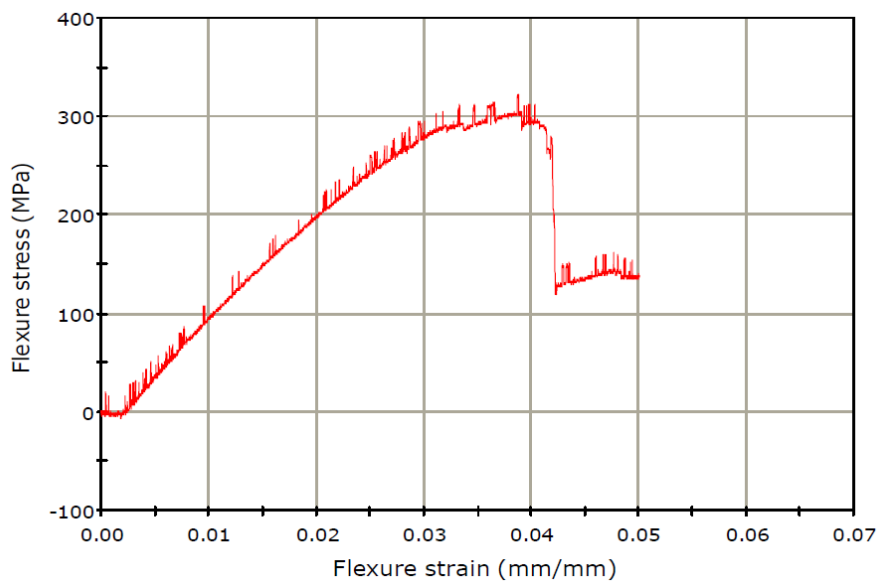
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-418.64589	-19.17000	306.46219	0.04334

3.5.2 Δοκίμιο Κ4

Το δοκίμιο Κ4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για είκοσι τέσσερις (24) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -39- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο Κ4



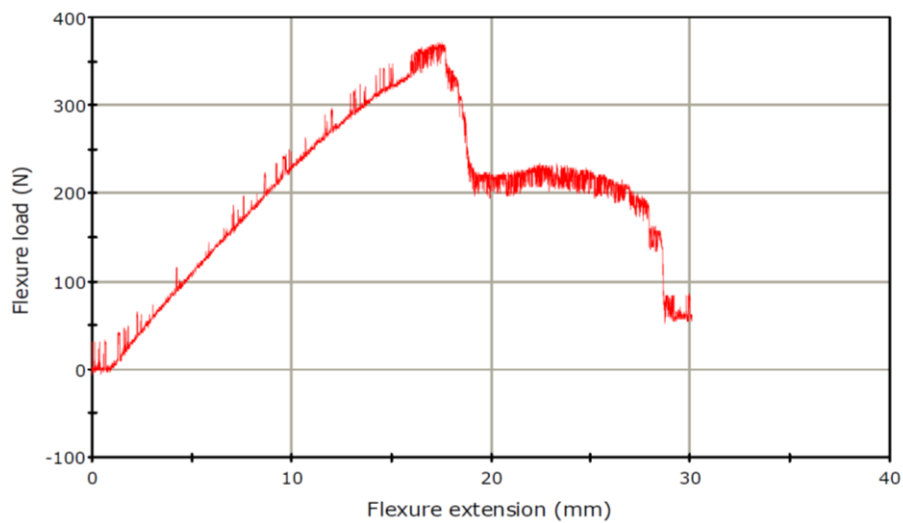
Διάγραμμα -40- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Κ4

Πίνακας 22 Αποτελέσματα για δοκίμιο Κ4

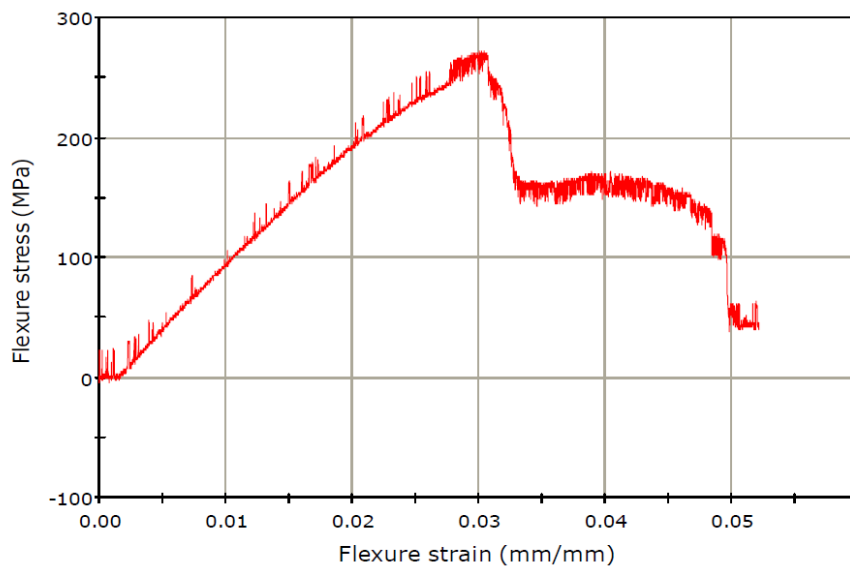
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-439.73019	-22.37000	321.89655	0.05005

3.5.3 Δοκίμιο L1

Το δοκίμιο L1 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -41- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο L1



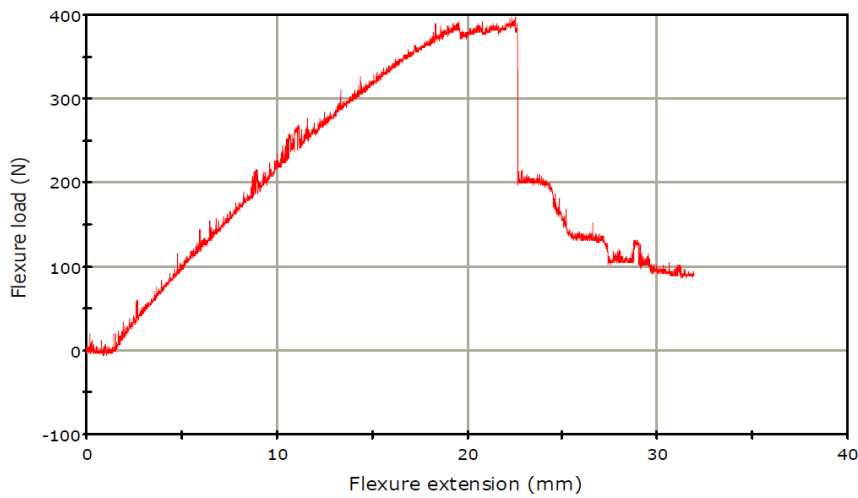
Διάγραμμα -42- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο L1

Πίνακας 23 Αποτελέσματα για δοκίμιο L1

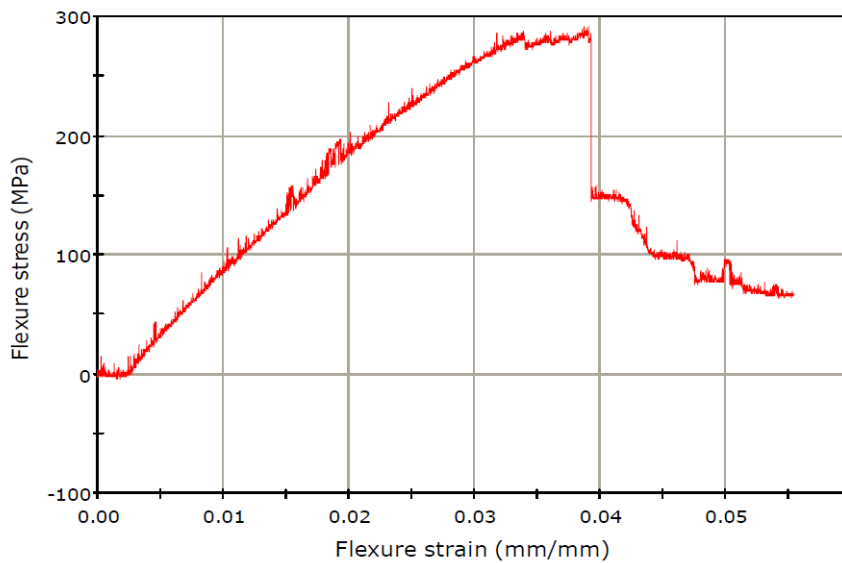
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-371.27977	-17.53000	271.78864	0.05212

3.5.4 Δοκίμιο L2

Το δοκίμιο L2 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για σαράντα οκτώ (48) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα



Διάγραμμα -43- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο L2



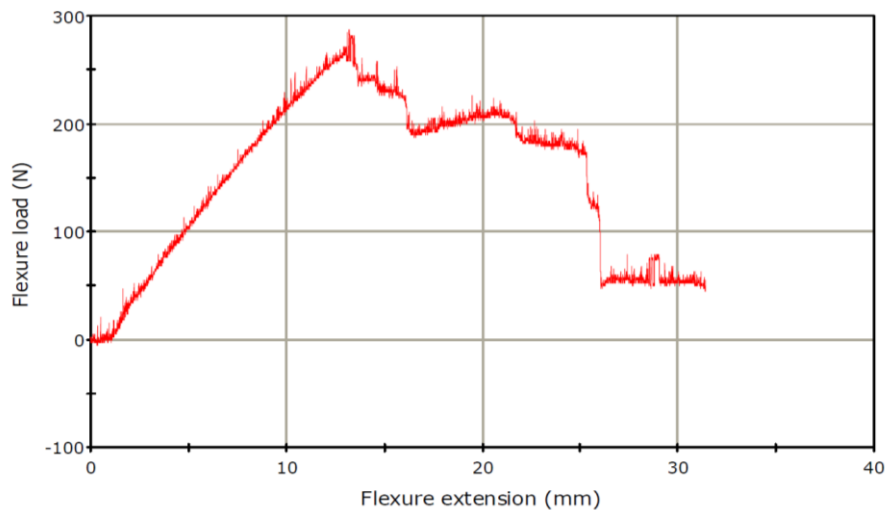
Διάγραμμα -44- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο L2

Πίνακας 24 Αποτελέσματα για δοκίμιο L2

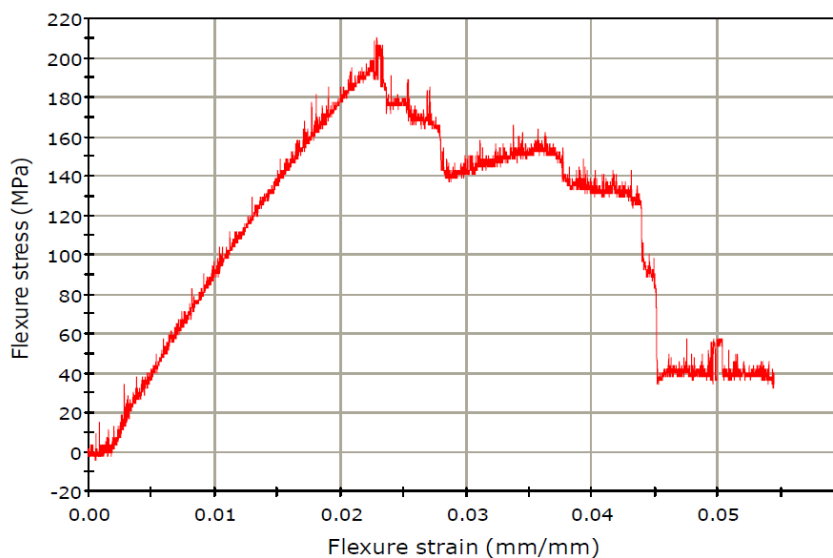
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-397.56159	-22.51000	291.02780	0.05533

3.5.5 Δοκίμιο L3

Το δοκίμιο L3 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -45- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο L3



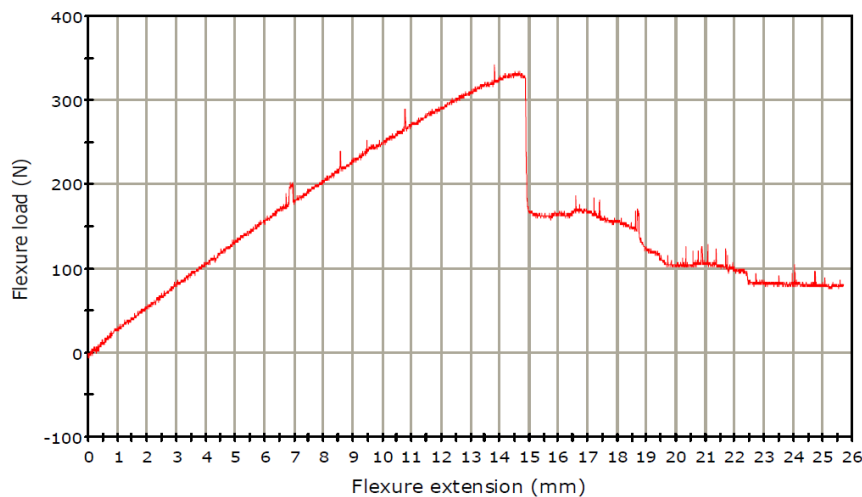
Διάγραμμα -46- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο L3

Πίνακας 25 Αποτελέσματα για δοκίμιο L3

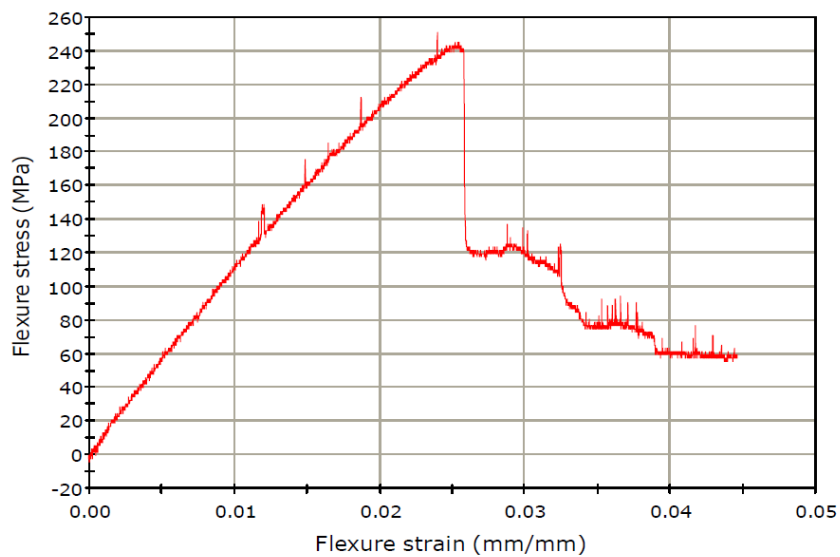
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-287.04065	-13.19000	210.12291	0.05440

3.5.6 Δοκίμιο L4

Το δοκίμιο L4 υποβλήθηκε στην θερμοκρασία των 100°C για εκατόν εξήντα οκτώ (168) ώρες. Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -47- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για δοκίμιο L4



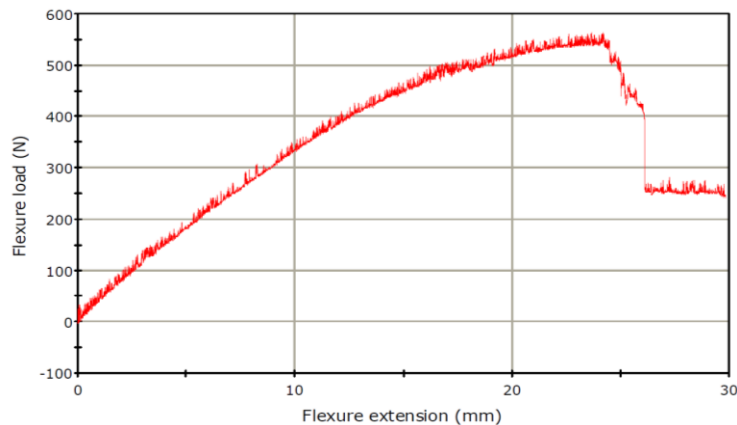
Διάγραμμα -48- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο L4

Πίνακας 26 Αποτελέσματα για δοκίμιο L4

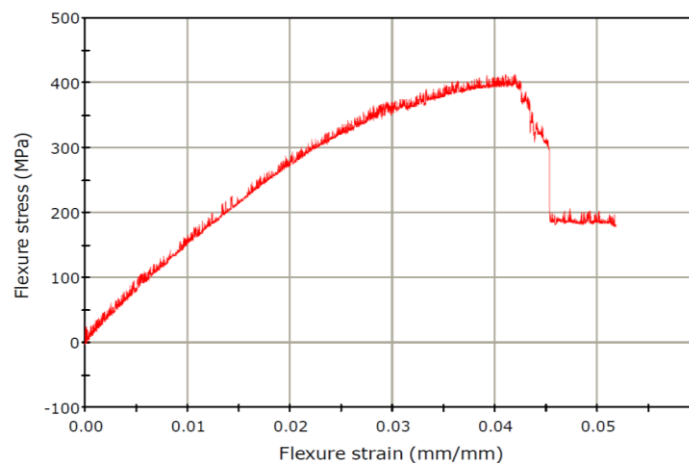
Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-342.25208	-13.81000	250.53944	0.04455

3.6 Πρωτότυπο

Στην συνέχεια εκτελέστηκαν οι ανωτέρω ρυθμίσεις και στο πρωτότυπο δοκίμιο το οποίο δεν είχε υποβληθεί σε καμιά καταπόνηση (υγρασία- θερμοκρασία). Τα αποτελέσματα που ληφθήκαν φαίνονται στα κάτωθι διαγράμματα και πίνακα.



Διάγραμμα -49- Διάγραμμα φορτίου κάμψης για πρωτότυπο



Διάγραμμα -50- Διάγραμμα Τάσης (MPa) – Παραμόρφωσης (%) για πρωτότυπο

Πίνακας 27 Αποτελέσματα για πρωτότυπο δοκίμιο

Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-563.39204	-24.16	412.42102	0.05174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το πείραμα που εκτελέστηκε καθώς επίσης και αναλυτική παρουσίαση των διαγραμμάτων τα οποία δημιουργήθηκαν.

Αρχικά στον κάτωθι πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι μετρήσεις που αφορούν το σύνολο των δοκιμών σε όλες τις περιπτώσεις καταπόνησης αλλά και οι μετρήσεις που αφορούν το πρωτότυπο δοκίμιο.

Πίνακας 28 Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων πειράματος για σύνολο δοκιμών και πρωτοτύπου

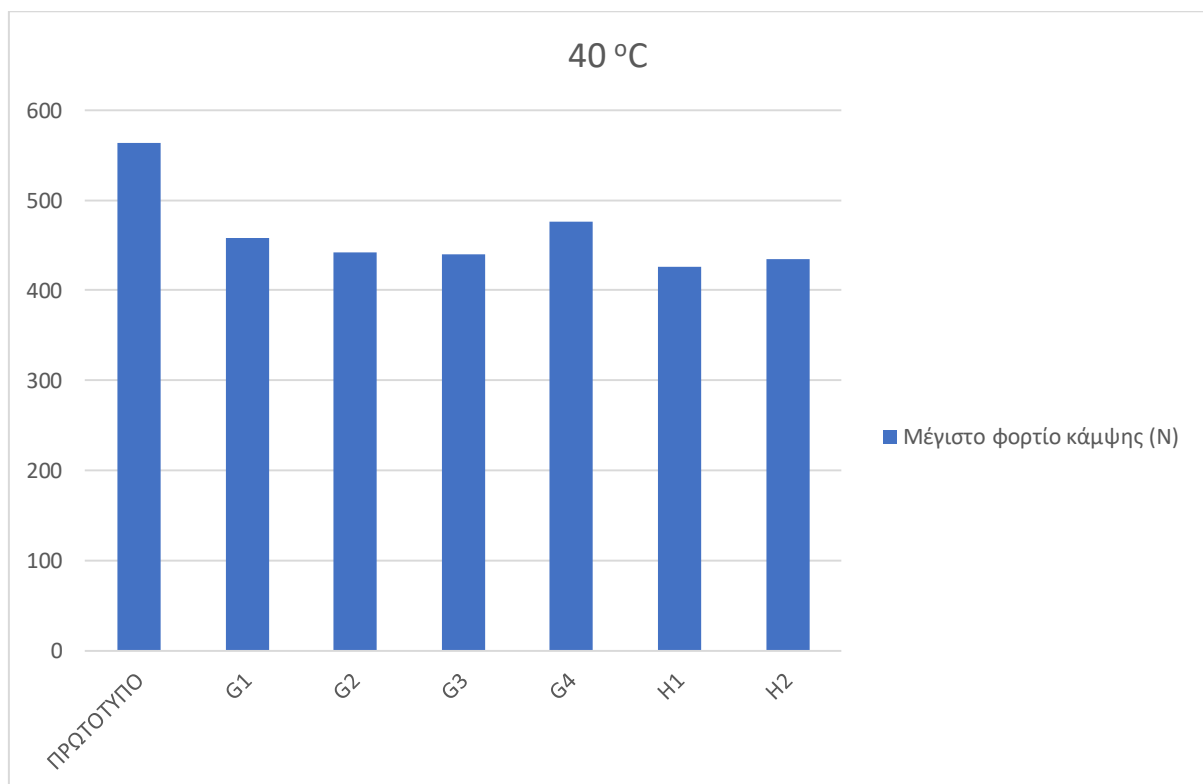
Θερμοκρασία	Χρονική Διάρκεια (Ωρες)	Δοκίμιο	Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)	Flexure strain at maximum flexure extension (mm/mm)
-	-	ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	563,39204	24,16	412,42102	0,05174
40 °C	24 hr	G1	458,16669	25,03	335,39267	0,0694
		G2	442,37798	27,9	323,83481	0,06946
	48 hr	G3	439,73019	26,37	321,89655	0,06081
		G4	476,60319	25,41	348,88876	0,0608
	168 hr	H1	426,49121	21,1	312,20517	0,04344
		H2	434,43459	19,96	318,02002	0,0435
60 °C	24 hr	H3	463,36421	24,5	339,19739	0,05219
		H4	397,56159	24,47	291,0278	0,05214
	48 hr	I1	394,9138	19,35	289,08954	0,04353
		I2	402,85718	19,27	294,90433	0,0435
	168 hr	I3	323,91365	14,22	237,11513	0,04693
		I4	321,26585	13,29	235,17688	0,03756
80 °C	24 hr	J1	413,3503	19,33	302,58563	0,04436
		J2	405,50498	19,44	296,84259	0,04457
	48 hr	J3	347,54768	15,36	254,416	0,05218
		J4	394,9138	20,44	289,08954	0,04766
	168 hr	K1	321,26585	13,73	235,17688	0,035

		K2	384,42068	16,85	281,40823	0,04352
100 °C	24	K3	418,64589	19,17	306,46219	0,04334
		K4	439,73019	22,37	321,89655	0,05005
		L1	371,27977	17,53	271,78864	0,05212
	48	L2	397,56159	22,51	291,0278	0,05533
		L3	287,04065	13,19	210,12291	0,0544
	168	L4	342,25208	13,81	250,53944	0,04455

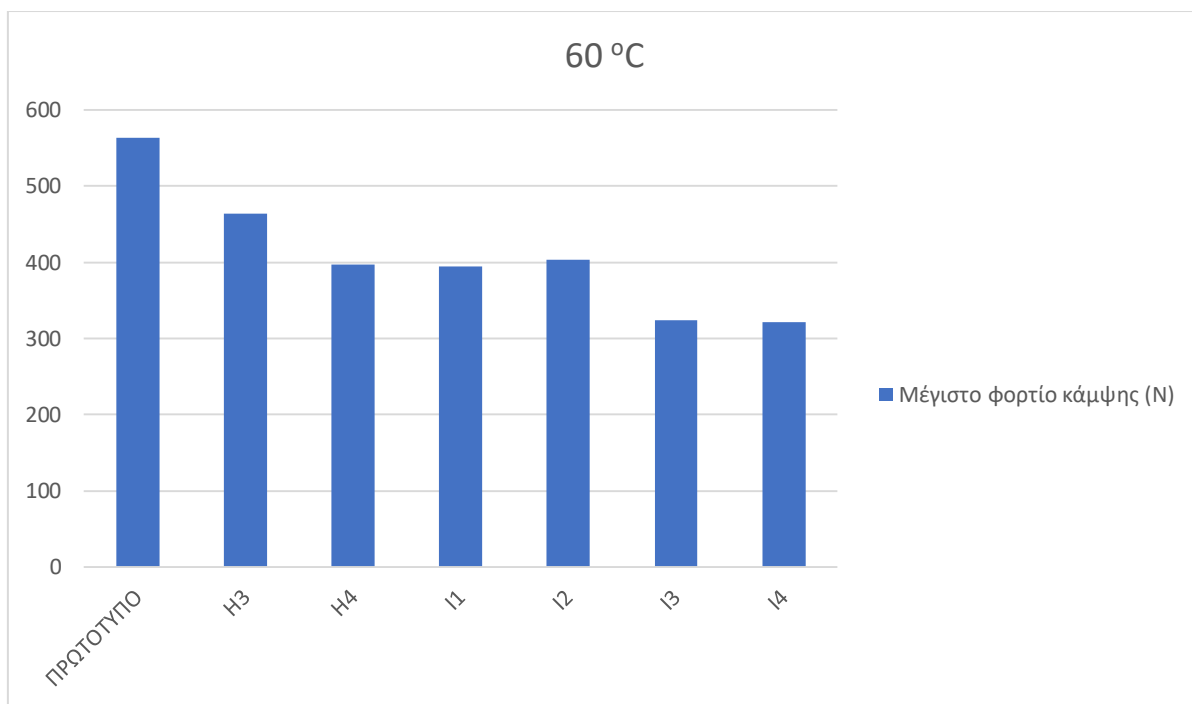
4.2 Μέγιστο φορτίο κάμψης

Κάτωθι παρουσιάζονται τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν για τις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής εργασίας τα οποία αφορούν την επίδραση που είχαν οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στα δοκίμια όσον αφορά το μέγιστο φορτίο κάμψης αυτών.

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα ομαδοποιημένα ανά θερμοκρασία ελέγχου (40,60,80 και 100 °C) σε συνάρτηση με τις μετρήσεις του αρχικού δοκιμίου (πρωτότυπο). Ακολούθως παρουσιάζεται συγκεντρωτικό διάγραμμα όπου φαίνονται συνολικά όλα τα δοκίμια σε σχέση με το πρωτότυπο.



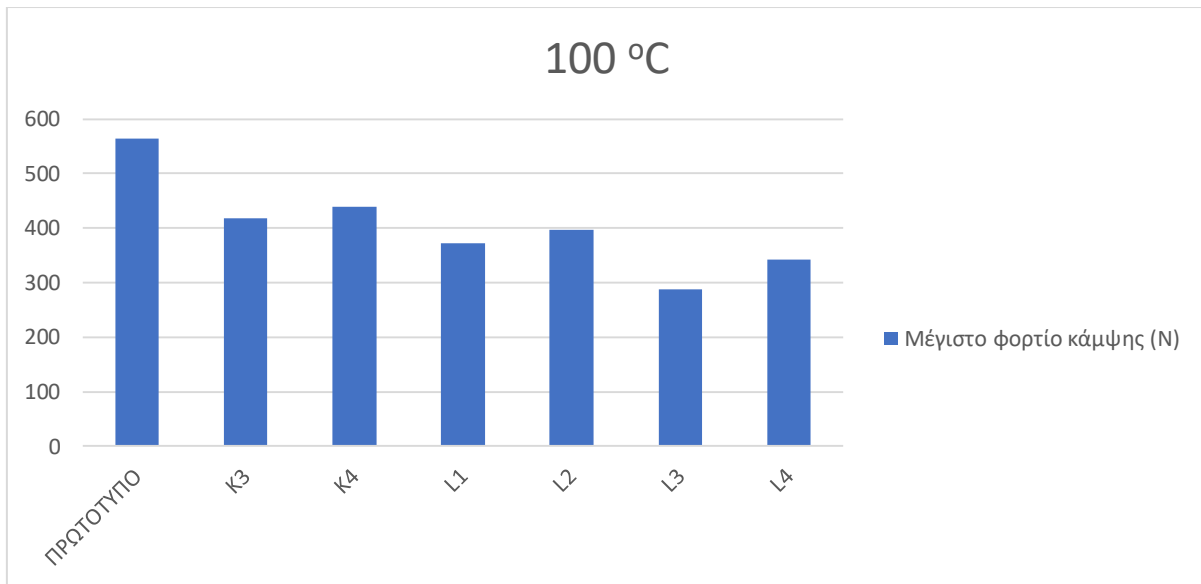
Διάγραμμα -51- Μέγιστο φορτίο κάμψης (N) για δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμοκρασία 40°C. Τα δοκίμια G1,G2 καταπονήθηκαν κατά 24 ώρες. Τα δοκίμια G3,G4 κατά 48 ώρες και τέλος τα H1, H2 κατά 168 ώρες.



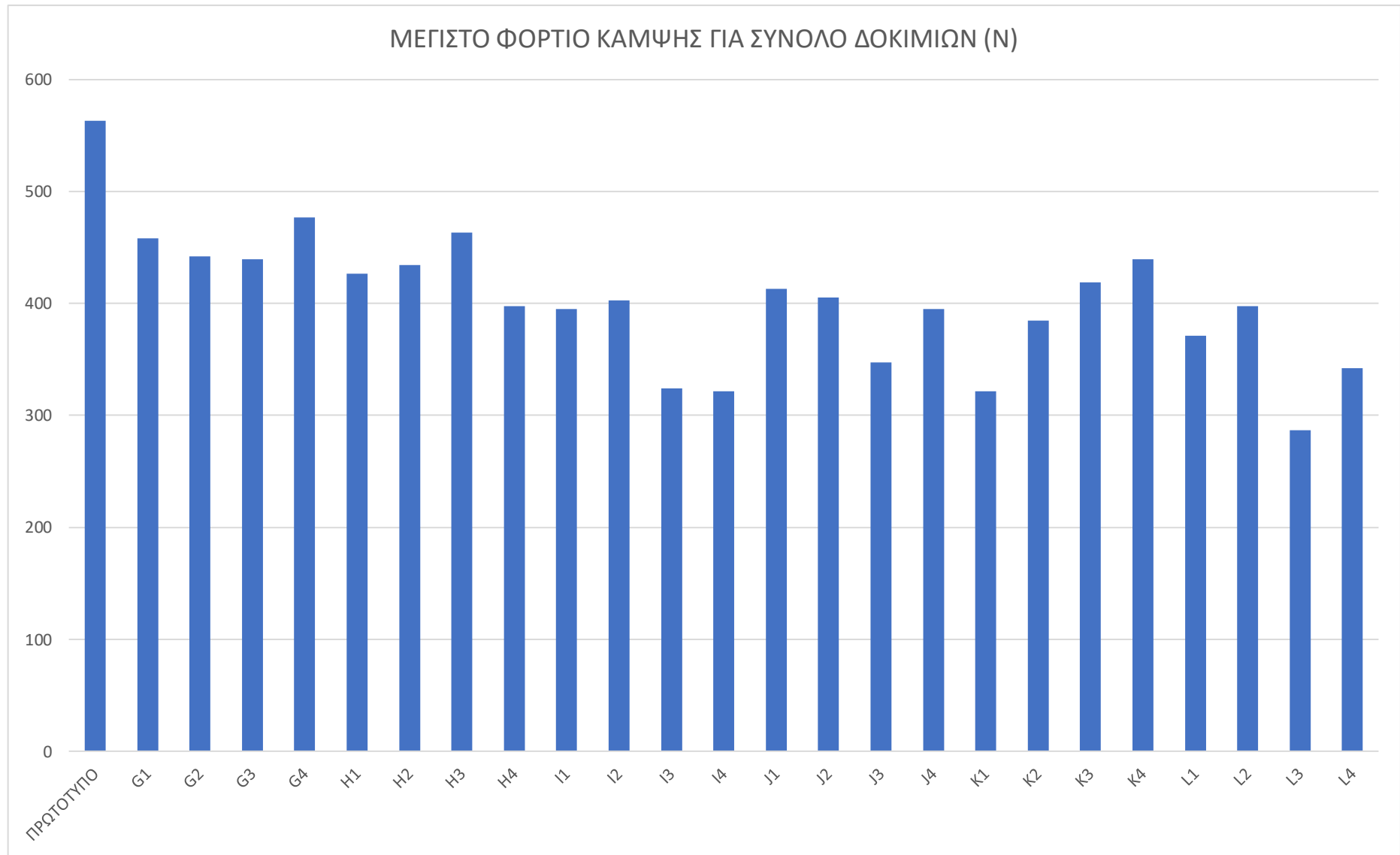
Διάγραμμα -52- Μέγιστο φορτίο κάμψης (N) για δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμοκρασία 60°C. Τα δοκίμια Η3, Η4 καταπονήθηκαν κατά 24 ώρες. Τα δοκίμια Ι1, Ι2 κατά 48 ώρες και τέλος τα Ι3, Ι4 κατά 168 ώρες.



Διάγραμμα -53- Μέγιστο φορτίο κάμψης (N) για δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμοκρασία 80°C. Τα δοκίμια Ι1, Ι2 καταπονήθηκαν κατά 24 ώρες. Τα δοκίμια Ι3, Ι4 κατά 48 ώρες και τέλος τα Κ1, Κ2 κατά 168 ώρες.



Διάγραμμα -54- Μέγιστο φορτίο κάμψης (N) για δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θερμοκρασία 100°C. Τα δοκίμια Κ3, Κ4 καταπονήθηκαν κατά 24 ώρες. Τα δοκίμια L1,L2 κατά 48 ώρες και τέλος τα L3,L4 κατά 168 ώρες.



Διάγραμμα -55- Μέγιστο φορτίο κάμψης (N) για όλα τα δοκίμια.

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα ανωτέρω παρατηρούμε ότι η αντοχή σε κάμψη του συνθέτου υλικού εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα τόσο από την διάρκεια αλλά και από τη θερμοκρασία καταπόνησης. Δηλαδή όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία και η διάρκεια καταπόνησης τόσο μικρότερη η αντοχή του δοκιμίου σε κάμψη σε σχέση πάντα με το πρωτότυπο το οποίο δεν υποβλήθηκε σε καμία καταπόνηση.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για την δυσμενέστερη περίπτωση η οποία αφορά τα δοκίμια L3 και L4 (θερμοκρασία 100°C και 168 ώρες παραμονής σε αυτή την θερμοκρασία) η αντοχή των δοκιμίων σε κάμψη μειώθηκε από 563,39204 N (του πρωτότυπου) σε 287,04065 N (δοκίμιο L3) και 342,25208 N (δοκίμιο L4) αντίστοιχα. Δηλαδή βλέπουμε μια μείωση αντοχής σε κάμψη κατά 49,05% για το L3 και 39,25% για το L4.

Συγκεντρωτικά στον κάτωθι πίνακα φαίνεται το ποσοστό της μείωσης της αντοχής σε κάμψη του συνόλου των δοκιμίων.

Πίνακας 29 Ποσοστό μείωσης αντοχής σε κάμψη σε σχέση με πρωτότυπο σύνολο δοκιμίων.

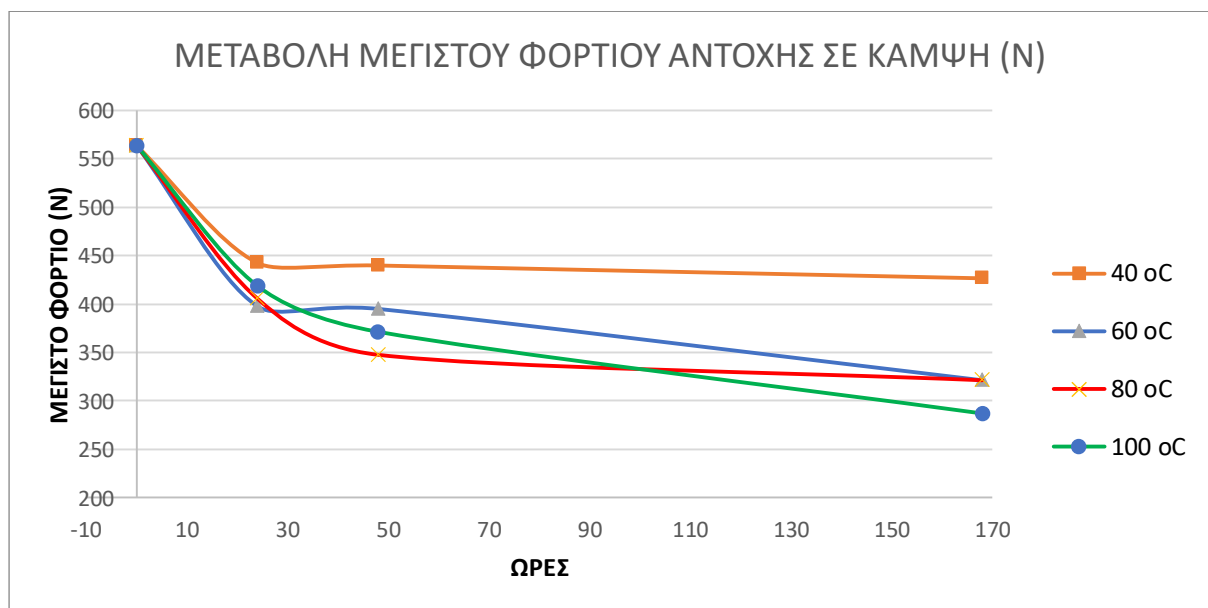
Θερμοκρασία	Διάρκεια (ώρες)	Δοκίμια	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
40 °C	24	G1	18,68 %
		G2	21,48 %
	48	G3	21,95 %
		G4	15,40 %
	168	H1	24,30 %
		H2	22,89 %
60 °C	24	H3	17,75 %
		H4	29,43 %
	48	I1	29,90 %
		I2	28,49 %
	168	I3	42,51 %
		I4	42,98 %
80 °C	24	J1	26,63 %
		J2	28,02 %
	48	J3	38,31 %
		J4	29,90 %
	168	K1	42,98 %
		K2	31,77 %
100 °C	24	K3	25,69 %
		K4	21,95 %
	48	L1	34,10 %
		L2	29,43 %
	168	L3	49,05 %
		L4	39,25 %



Διάγραμμα -56-

Από τον ανωτέρω πίνακα και διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη μεταβολή – μείωση αντοχής σε κάμψη είναι για το δοκίμιο L3 με μείωση της τάξης του 49,05 %.

Από τις ληφθείσες μετρήσεις μπορούμε να δημιουργήσουμε και ένα διάγραμμα στο οποίο να φαίνεται σε ισοθερμοκρασιακές γραμμές η μείωση της αντοχής σε κάμψη συναρτήσει του χρόνου καταπόνησης. Κάτωθι παρουσιάζεται αυτό το διάγραμμα:



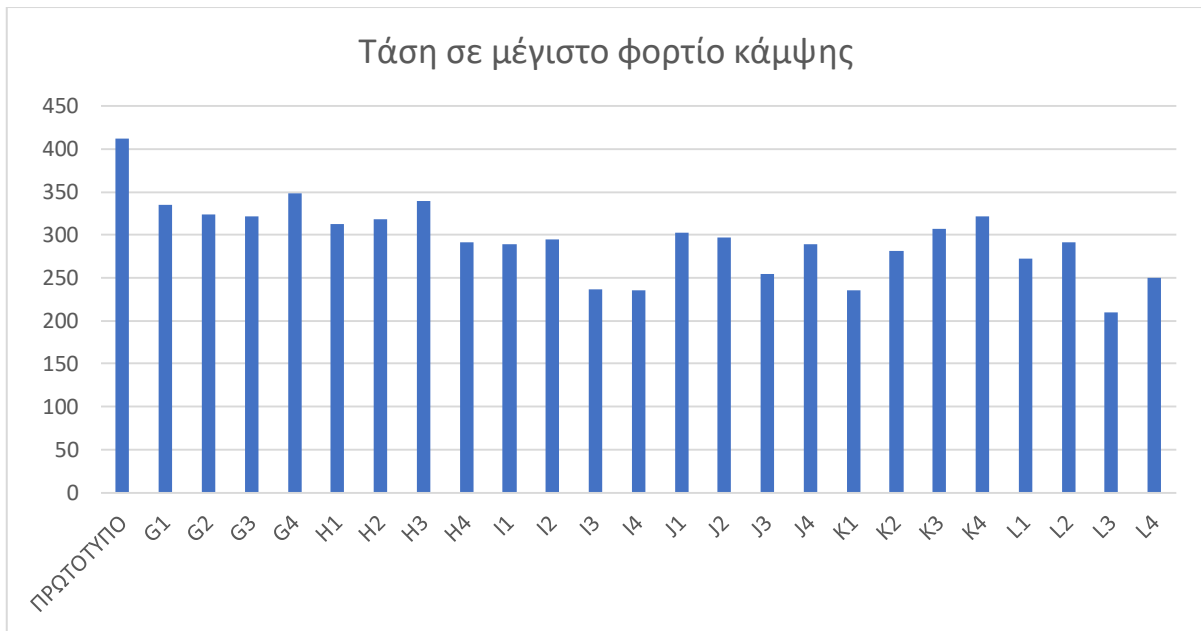
Διάγραμμα-57-

4.3 Μεταβολή Τάσης (MPa) στο μέγιστο φορτίο κάμψης

Από τις ληφθείσες μετρήσεις κατά την διάρκεια του πειράματος μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα και για την μεταβολή της Τάσης στο μέγιστο φορτίο κάμψης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον κάτωθι πίνακα και στο ακόλουθο διάγραμμα.

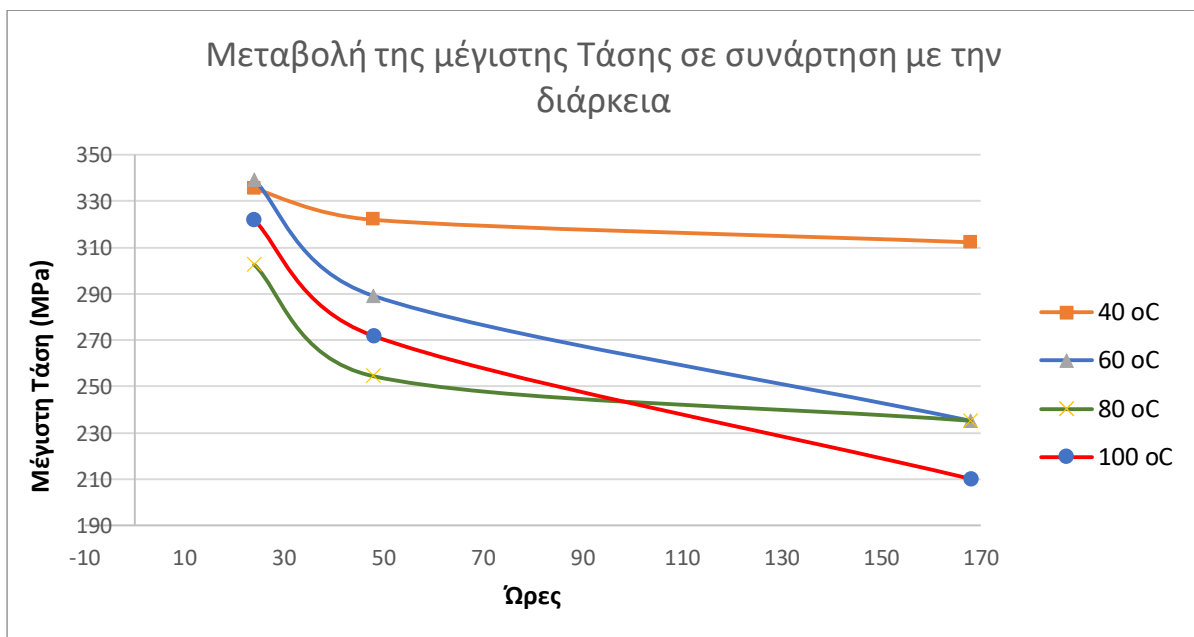
Πίνακας 30

Θερμοκρασία	Διάρκεια	Δοκίμιο	Load at machine peak load (N)	ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΠΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	Flexure stress at maximum flexure load (Mpa)
		ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	563,39204		412,42102
40 οC	24	G1	458,16669	-0,87	335,39267
		G2	442,37798	-3,74	323,83481
	48	G3	439,73019	-2,21	321,89655
		G4	476,60319	-1,25	348,88876
	168	H1	426,49121	3,06	312,20517
		H2	434,43459	4,2	318,02002
60 οC	24	H3	463,36421	-0,34	339,19739
		H4	397,56159	-0,31	291,0278
	48	I1	394,9138	4,81	289,08954
		I2	402,85718	4,89	294,90433
	168	I3	323,91365	9,94	237,11513
		I4	321,26585	10,87	235,17688
80 οC	24	J1	413,3503	4,83	302,58563
		J2	405,50498	4,72	296,84259
	48	J3	347,54768	8,8	254,416
		J4	394,9138	3,72	289,08954
	168	K1	321,26585	10,43	235,17688
		K2	384,42068	7,31	281,40823
100 οC	24	K3	418,64589	4,99	306,46219
		K4	439,73019	1,79	321,89655
	48	L1	371,27977	6,63	271,78864
		L2	397,56159	1,65	291,0278
	168	L3	287,04065	10,97	210,12291
		L4	342,25208	10,35	250,53944



Διάγραμμα -58 -

Όπως παρατηρούμε από το ανωτέρω διάγραμμα η τιμή της μέγιστης τάσης μειώνεται με την αύξηση της διάρκειας κατά οποία ήταν τοποθετημένα τα δοκίμια στο φούρνο αλλά επίσης και με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι βλέπουμε πως για την δυσμενέστερη περίπτωση καταπόνησης δοκίμιου (δοκίμια L3 και L4) η μέγιστη τάση είναι 210 MPa και 250 MPa αντίστοιχα ενώ αντίστοιχα η μέγιστη τάση για το πρωτότυπο ήταν 412 MPa. (Διαφορά της τάξης του 49% για το L3 και 39% για το L4).



Διάγραμμα -59-

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης τάσης στο σημείο του μέγιστου καμπτικού φορτίου. Παρατηρούμε πως με την αύξηση του χρόνου καταπόνησης είναι εμφανής η μείωση της μέγιστης τάσης στα δοκίμια.

4.4 Μεταβολή βάρους δοκιμίων

Κατά την διάρκεια του πειράματος εκτελέστηκε μέτρηση του βάρους των δοκιμίων πριν από την τοποθέτηση στο νερό και στον φούρνο. Επίσης η ίδια μέτρηση εκτελέστηκε και μετά την ολοκλήρωση της καταπόνησης για το σύνολο των δοκιμίων.

Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 31 Αποτελέσματα μέτρησης βάρους για σύνολο δοκιμίων

		ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (GR)	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΒΑΡΟΥΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΑΡΟΥΣ
40 οC	24	G1	15	15,187	0,187	1,2467%
		G2	14,865	15,037	0,172	1,1571%
	48	G3	14,667	14,838	0,171	1,1659%
		G4	14,907	14,988	0,081	0,5434%
	168	H1	14,548	14,719	0,171	1,1754%
		H2	15,083	15,366	0,283	1,8763%
60 οC	24	H3	14,762	14,868	0,106	0,7181%
		H4	14,32	14,469	0,149	1,0405%
	48	I1	14,94	15,266	0,326	2,1821%
		I2	14,99	15,341	0,351	2,3416%
	168	I3	14,806	14,998	0,192	1,2968%
		I4	14,844	15,034	0,19	1,2800%
80 οC	24	J1	15,58	16,08	0,5	3,2092%
		J2	15,058	15,443	0,385	2,5568%
	48	J3	15,394	15,956	0,562	3,6508%
		J4	15,572	16,268	0,696	4,4696%
	168	K1	16,051	16,36	0,309	1,9251%
		K2	15,838	16,231	0,393	2,4814%
100 οC	24	K3	15,619	15,917	0,298	1,9079%
		K4	15,101	15,279	0,178	1,1787%
	48	L1	15,539	15,96	0,421	2,7093%
		L2	15,213	15,578	0,365	2,3993%
	168	L3	15,509	15,877	0,368	2,3728%
		L4	15,978	16,399	0,421	2,6349%

Όπως φαίνεται και από τα ανωτέρω αποτελέσματα σε όλα τα δοκίμια έχουμε αύξηση βάρους η οποία είναι διαφορετικής τάξης αναλόγως της χρονικής διάρκειας έκθεσης στην υγρασία και στην θερμοκρασία. Στον κάτωθι πίνακα φαίνεται η μέση μεταβολή βάρους αναλόγως των τριών χρονικών διαστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

Πίνακας 32 Μέση μεταβολή βάρους αναλόγως των τριών χρονικών διαστημάτων

ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ (ΩΡΕΣ)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (οC)	ΔΟΚΙΜΙΟ	ΑΡΧΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΤΕΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΒΑΡΟΥΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΑΡΟΥΣ	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΑΥΞΗΣΗΣ ΒΑΡΟΥΣ
24 Hr	40 οC	G1	15	15,187	0,187	1,2467%	1,6269%
		G2	14,865	15,037	0,172	1,1571%	
	60 οC	H3	14,762	14,868	0,106	0,7181%	
		H4	14,32	14,469	0,149	1,0405%	
	80 οC	J1	15,58	16,08	0,5	3,2092%	
		J2	15,058	15,443	0,385	2,5568%	
	100 οC	K3	15,619	15,917	0,298	1,9079%	
		K4	15,101	15,279	0,178	1,1787%	
48 Hr	40 οC	G3	14,667	14,838	0,171	1,1659%	2,4327%
		G4	14,907	14,988	0,081	0,5434%	
	60 οC	I1	14,94	15,266	0,326	2,1821%	
		I2	14,99	15,341	0,351	2,3416%	
	80 οC	J3	15,394	15,956	0,562	3,6508%	
		J4	15,572	16,268	0,696	4,4696%	
	100 οC	L1	15,539	15,96	0,421	2,7093%	
		L2	15,213	15,578	0,365	2,3993%	
168 Hr	40 οC	H1	14,548	14,719	0,171	1,1754%	1,8803%
		H2	15,083	15,366	0,283	1,8763%	
	60 οC	I3	14,806	14,998	0,192	1,2968%	
		I4	14,844	15,034	0,19	1,2800%	
	80 οC	K1	16,051	16,36	0,309	1,9251%	
		K2	15,838	16,231	0,393	2,4814%	
	100 οC	L3	15,509	15,877	0,368	2,3728%	
		L4	15,978	16,399	0,421	2,6349%	

Από τον ανωτέρω πίνακα παρατηρούμε πως τα δοκίμια των οποίων η διάρκεια του πειράματος ήταν 48 ώρες είχαν το μεγαλύτερο μέσο ποσοστό αύξησης βάρους (της τάξης του 2,4327%). Στο κάτωθι διάγραμμα παρουσιάζεται το ποσοστό αύξησης βάρους για το σύνολο των δοκιμών.



Διάγραμμα -60-

Τελικά από την μελέτη των αποτελεσμάτων παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη αύξηση βάρους παρατηρείται στα δοκίμια J3 και J4 τα οποία υποβλήθηκαν σε καταπόνηση 48 ωρών στους 80οC.

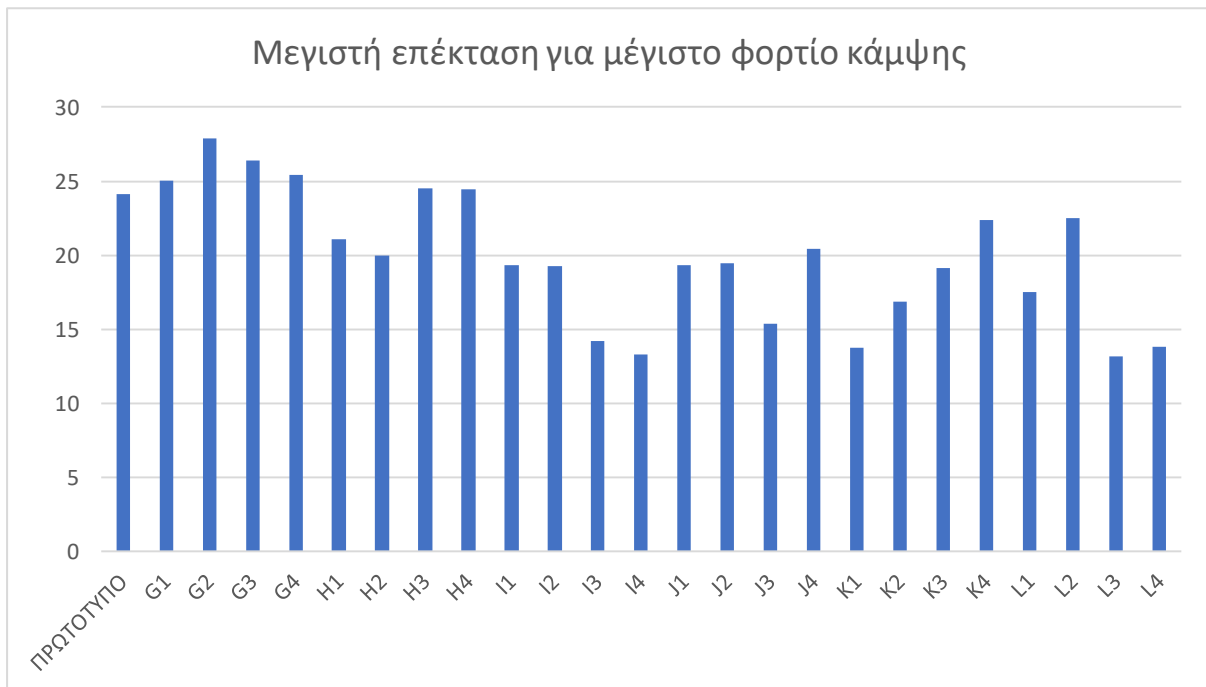
4.5 Μήκος διαδρομής εμβόλου στο μέγιστο φορτίο κάμψης

Κάτωθι παρουσιάζεται ο πίνακας στον οποίο φαίνεται για το σύνολο των δοκιμών το μήκος της μέγιστης επέκτασης στο σημείο του μέγιστου φορτίου κάμψης. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα.

Πίνακας 33 Μήκος διαδρομής εμβόλου στο μέγιστο φορτίο κάμψης

Θερμοκρασία	Διάρκεια	Δοκίμιο	Load at machine peak load (N)	Extension at machine peak load (mm)
		ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ	563,39204	24,16
40 οC	24	G1	458,16669	25,03
		G2	442,37798	27,9

	48	G3	439,73019	26,37
		G4	476,60319	25,41
	168	H1	426,49121	21,1
		H2	434,43459	19,96
60 οC	24	H3	463,36421	24,5
		H4	397,56159	24,47
	48	I1	394,9138	19,35
		I2	402,85718	19,27
	168	I3	323,91365	14,22
		I4	321,26585	13,29
80 οC	24	J1	413,3503	19,33
		J2	405,50498	19,44
	48	J3	347,54768	15,36
		J4	394,9138	20,44
	168	K1	321,26585	13,73
		K2	384,42068	16,85
100 οC	24	K3	418,64589	19,17
		K4	439,73019	22,37
	48	L1	371,27977	17,53
		L2	397,56159	22,51
	168	L3	287,04065	13,19
		L4	342,25208	13,81



Διάγραμμα -61-

4.6 Μέτρο Ελαστικότητας

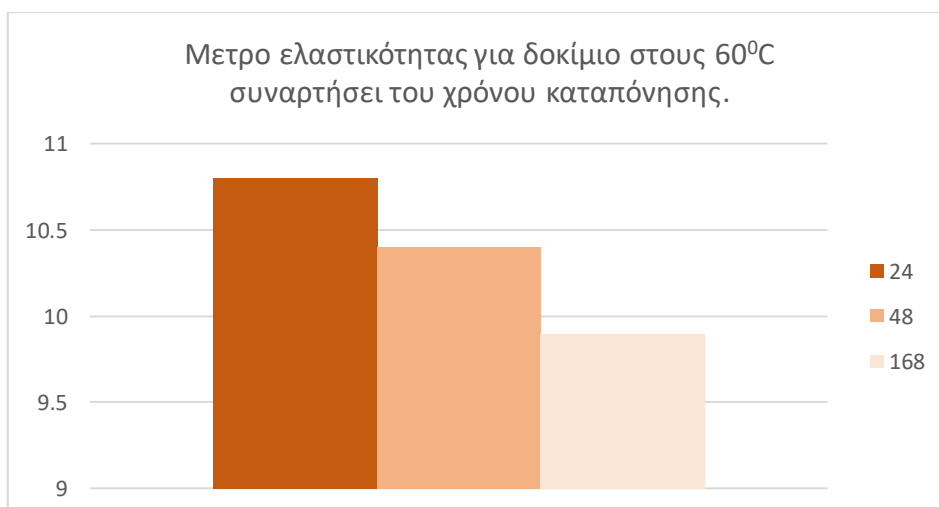
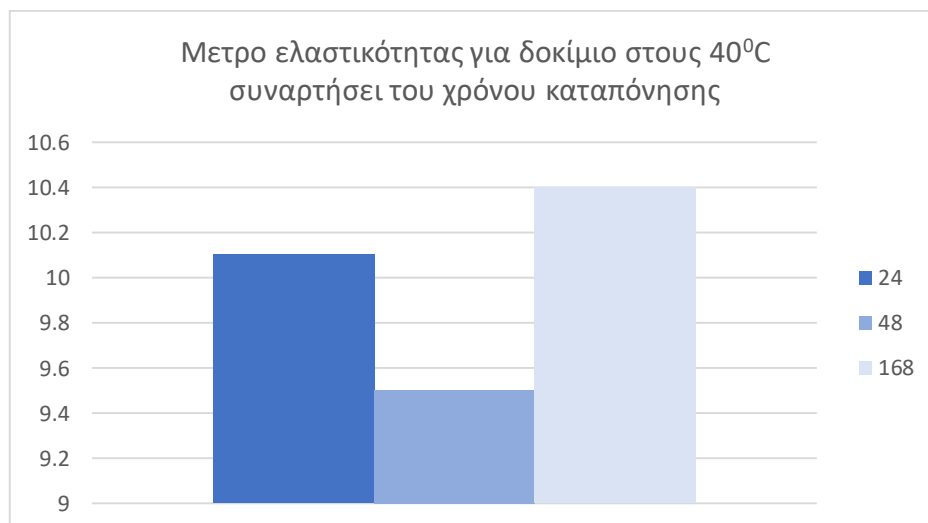
Το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τον κάτωθι τύπο:

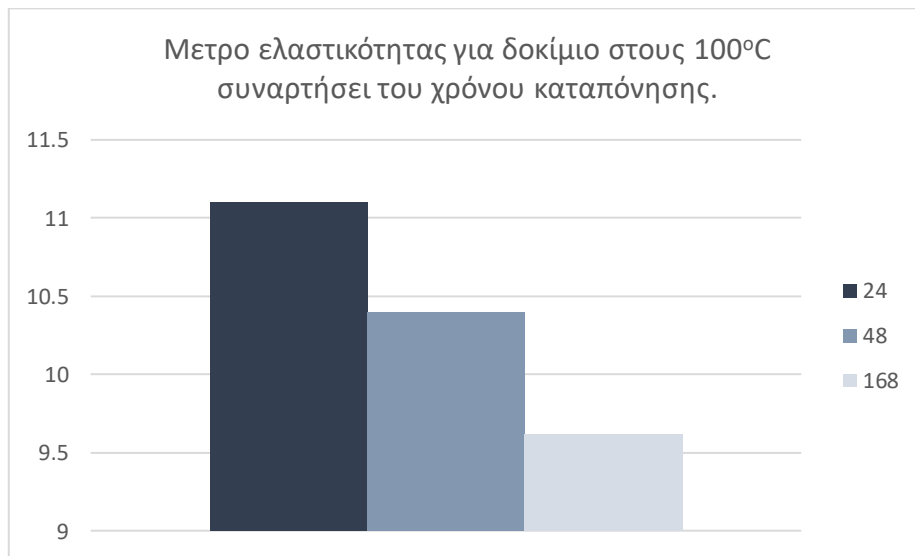
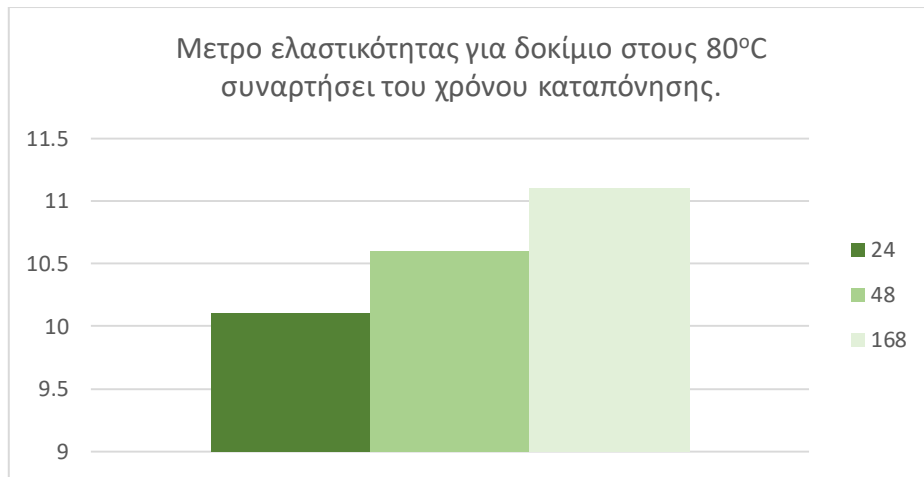
$$E_B = L^3 m / 4bd^3$$

Όπου :

- E_B : Το μέτρο ελαστικότητας σε Μρα
- L : Το μήκος μεταξύ των σημείων στήριξης του δοκιμίου κατά την κάμψη (mm)
- b : Το πλάτος του δοκιμίου (mm)
- d : Το βάθος του δοκιμίου (mm)
- m : Η κλίση της εφαπτομένης στο αρχικό (ευθύγραμμο) τμήμα του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης (N/mm)

Από τα αποτελέσματα του πειράματος προκύπτουν τα κάτωθι διαγράμματα:





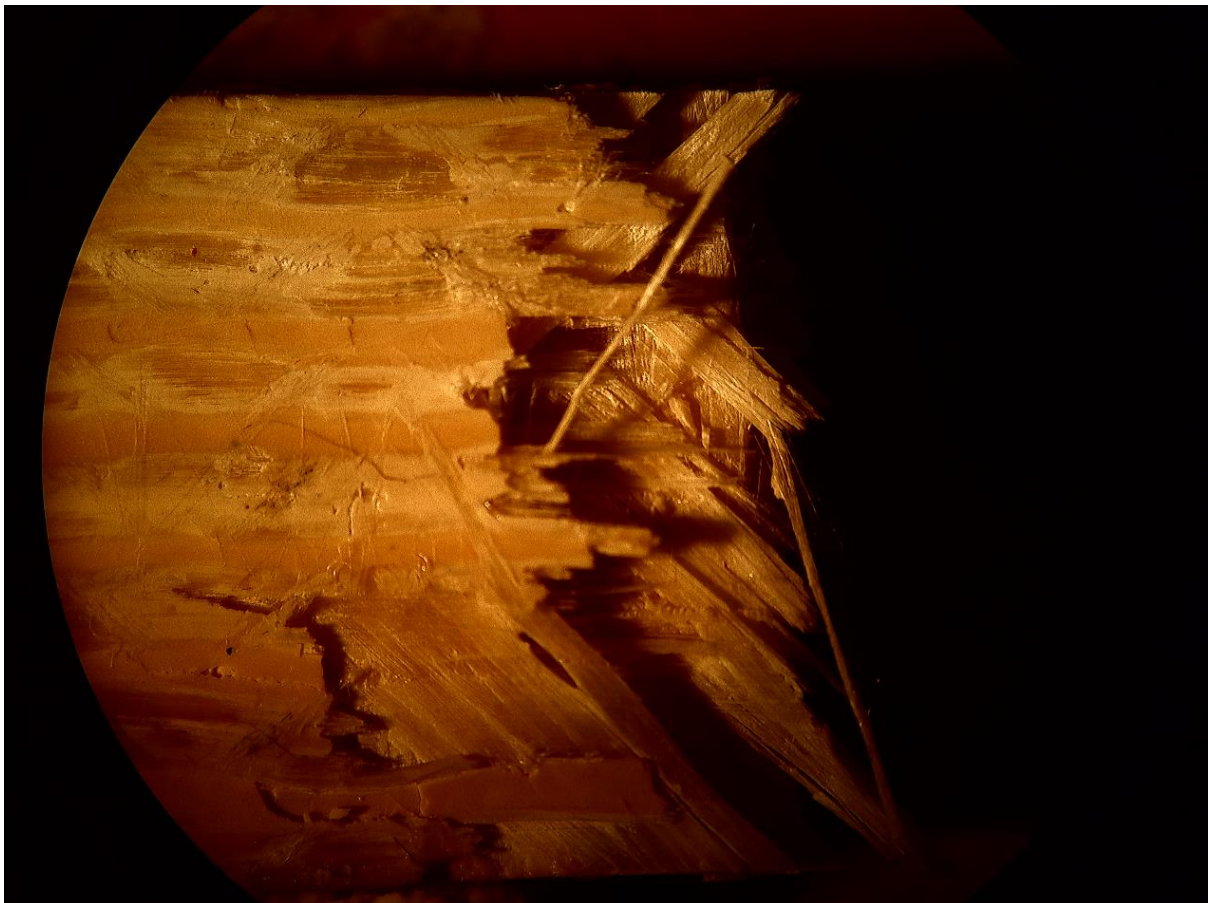
ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ (ΩΡΕΣ)	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (Gpa)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ
24	10.1	40 °C
48	9.5	
168	10.4	
24	10.8	60 °C
48	10.4	
168	9.9	
24	10.1	80 °C
48	10.6	
168	11.1	
24	11.1	100 °C
48	10.4	
168	9.62	

Παρατηρούμε ότι το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων μετά την υγροθερμική γήρανση όπως ήταν αναμενόμενο έχει μειωθεί. Υπάρχουν όμως δοκίμια που είτε έχει παραμείνει σταθερό είτε έχει αυξηθεί ελάχιστα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι σε αυτά τα δοκίμια, τα μόνια του νερού καλύπτουν κενά και ατέλειες της ρητίνης μέσω της διάχυσης, κάνοντας το υλικό πιο συνεχές και τελικά δεν λειτουργούν υποβαθμιστικά αλλά ενισχυτικά.

4.7 Υγροθερμική γήρανση

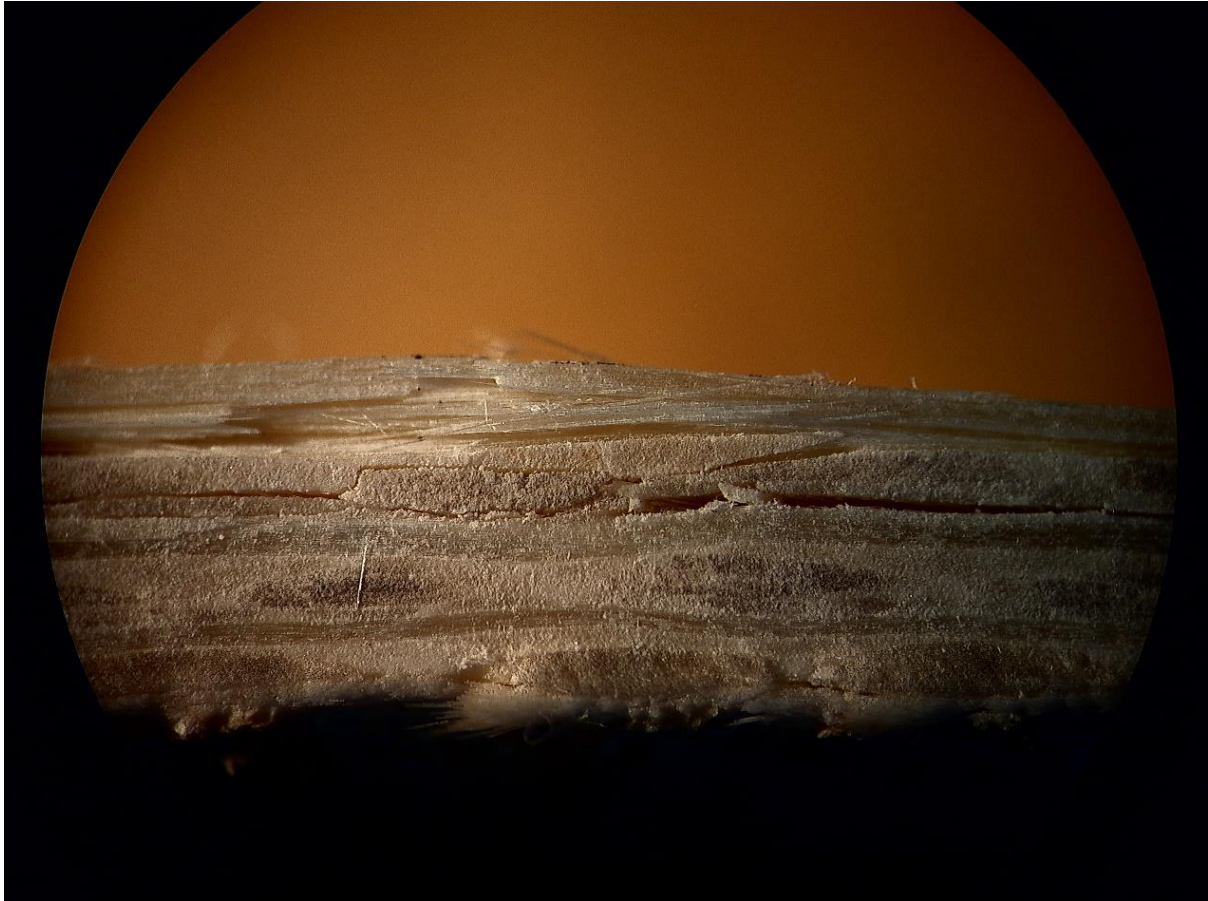
4.7.1 Δοκιμή κάμψης

Τα συγκεκριμένα δοκίμια έχουν υποστεί υγροθερμική γήρανση 168 ωρών και δοκιμή κάμψης. Τα δοκίμια αυτά καταπονούνται θλιπτικά στα ανώτερα στρώματα και εφελκυστικά στα κατώτερα. Παρατηρείται πως αρχικά πραγματοποιείται αποκόλληση στρώσεων μεταξύ των στρώσεων των 90° και των γειτονικών τους και έπειτα διάσπαση των στρώσεων $\pm 45^\circ$ συνοδευόμενη από αποστρωμάτωση (delamination). Μία άποψη των αποκολλήσεων αυτών από στερεοσκόπιο δίνεται στην εικόνα 15.

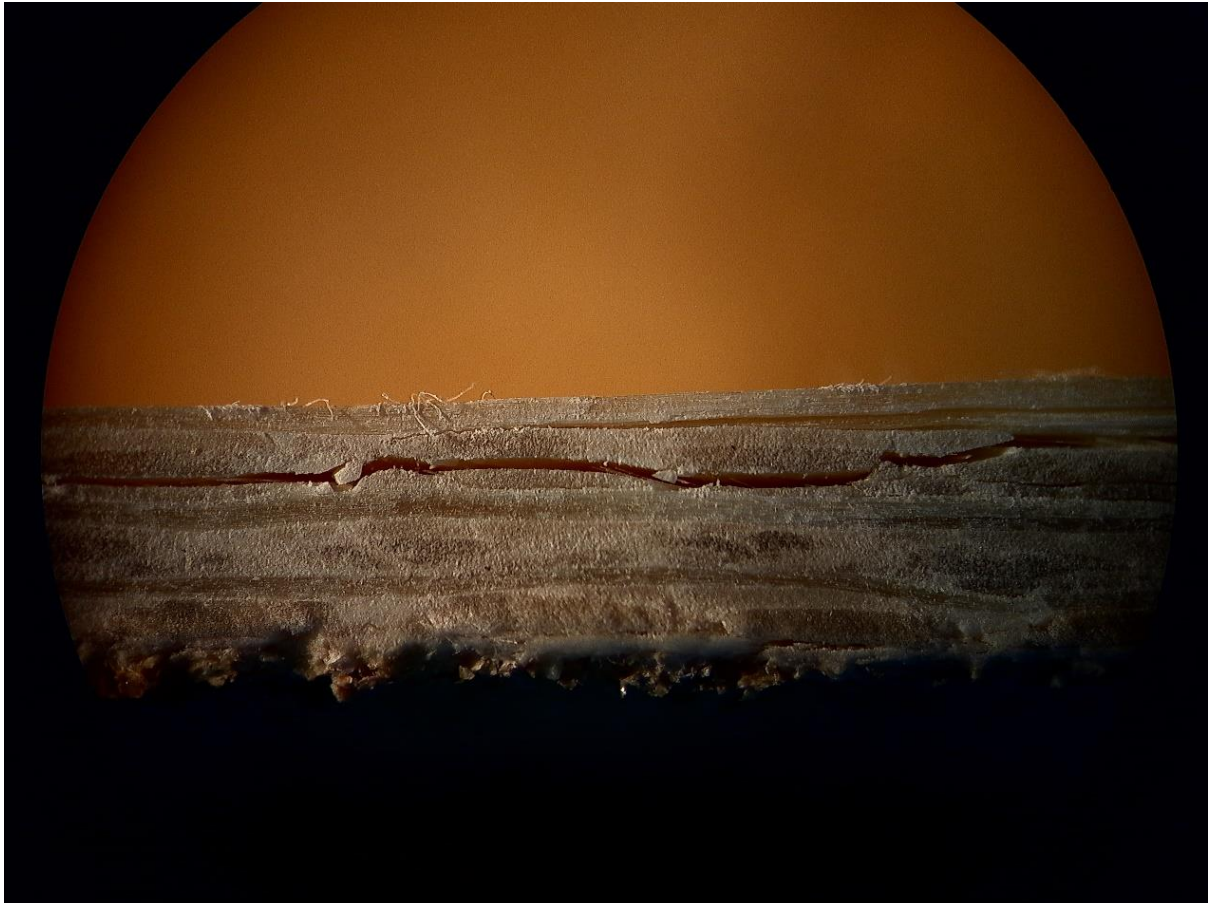


Εικόνα 15

Στην περίπτωση της υγροθερμικής γήρανσης παρατηρούνται εκτεταμένες αποκολλήσεις στρώσεων στην περιοχή του εφελκυσμού, όπως φαίνεται στις εικόνες 16 και 18(β). Λόγω της υδρόλυσης και πλαστικοποίησης της μήτρας, η αστοχία του πολύστρωτου κατά τη δοκιμή κάμψης είναι πιο εκτεταμένη και κυρίως στα κατώτερα εφελκυόμενα στρώματα. Επίσης, από τις εικόνες 2 και 3 παρατηρούνται φαινόμενα λυγισμού (buckling) κυρίως στα ανώτερα στρώματα που δέχονται τα φορτία της κάμψης.

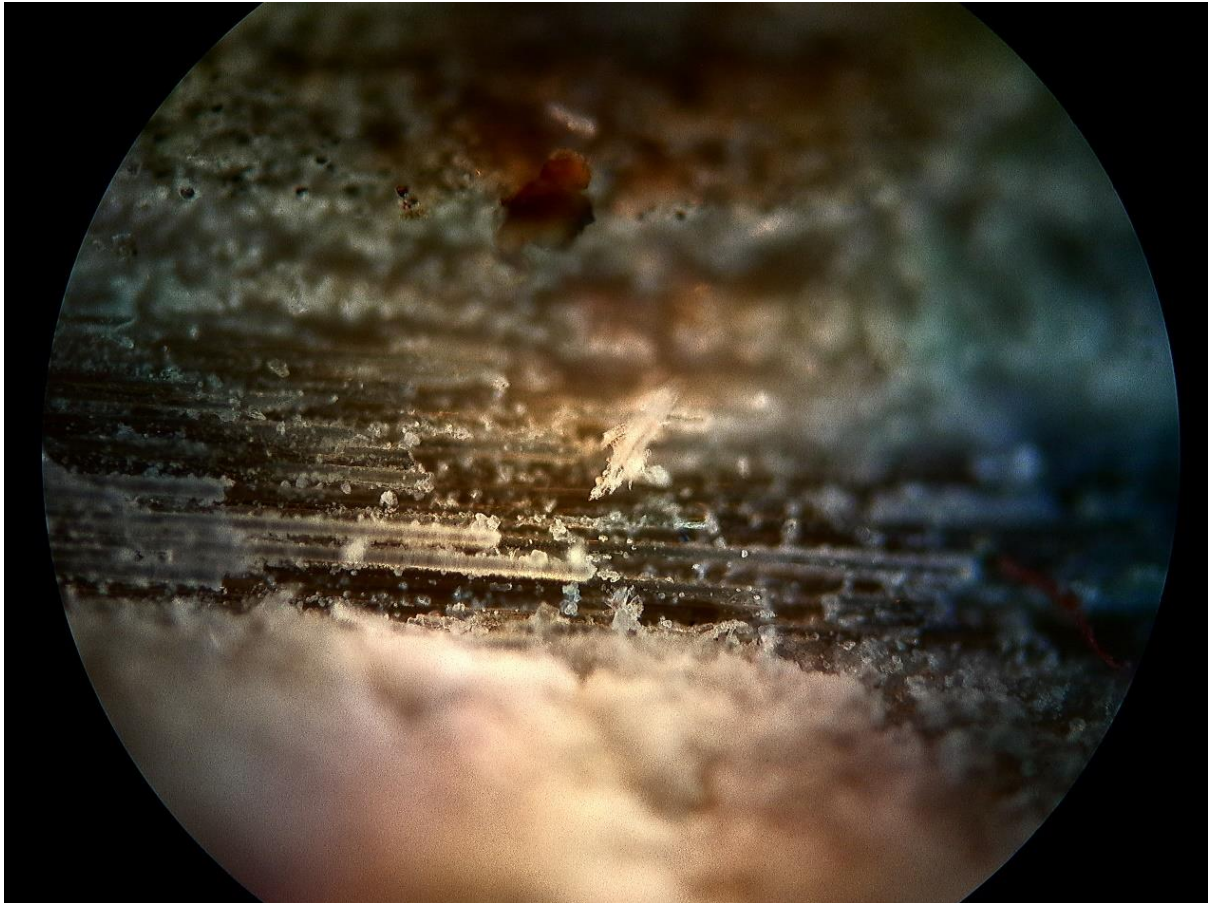


Εικόνα 16

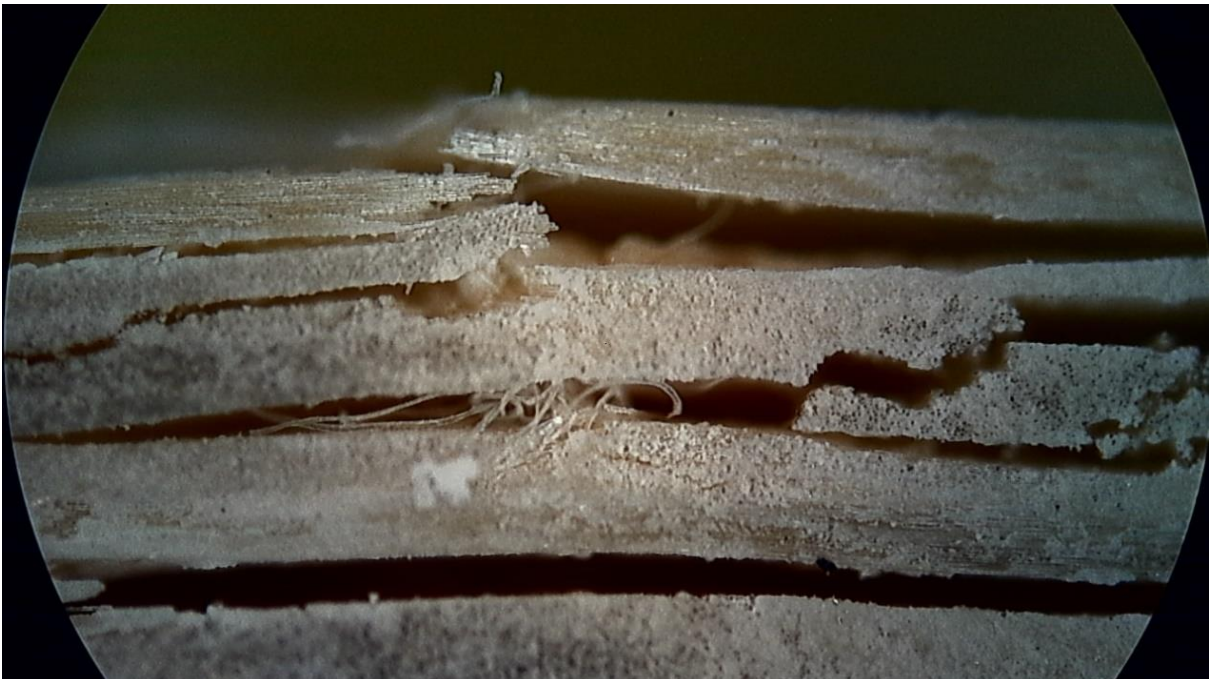


Εικόνα 17

Στις παρακάτω μικροφωτογραφίες οπτικού μικροσκοπίου παρουσιάζονται στην εικόνα 18 (α) εσωτερική θραύση ινών μετά από τη δοκιμή κάμψης, με αρκετά υπολείμματα θραυσμάτων ρητίνης πάνω στην επιφάνειά τους. Ενώ στην εικόνα 18(β) φαίνεται το μέγεθος της αποκόλλησης των στρώσεων μεταξύ τους, καθώς και η περίπτωση της εκρίζωσης ινών από τη μήτρα (pull out) λόγω προηγούμενης θραύσης τους.



Εικόνα 18α



Εικόνα 18 (β)

4.8 Γενικά συμπεράσματα

Από το σύνολο των μετρήσεων που αναλύθηκαν παραπάνω μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση των δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων (υγρασίας και θερμοκρασίας) στη μηχανική συμπεριφορά των GFRP συνθέτων υλικών.

Σαν βασική αρχή παρατηρούμε πως όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια καταπόνησης τόσο περισσότερο επηρεάζεται η μηχανική συμπεριφορά (δηλαδή η μείωση της αντοχής του υλικού σε κάμψη). Χαρακτηριστικά έχουμε ότι:

➤ Στους 40°C :

G1 (24 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=458,16 N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 18.5 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

H1 (168 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=426,49 N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 24.3 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

➤ Στους 60°C :

H3 (24 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=463,36 N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 17.7 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

I4 (168 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=321,26N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 42.97 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

➤ Στους 80°C :

J1 (24 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=413,35 N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 26.63 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

K1 (168 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=321,27N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 42.98% (σε σχέση με το πρωτότυπο)

➤ Στους 100°C :

K3 (24 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=418,64N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 25.69 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

L3 (168 ώρες) Μέγιστο φορτίο κάμψης=287,04 N

➤ Μείωση της τάξης περίπου 49.05 % (σε σχέση με το πρωτότυπο)

Επίσης όσον αφορά την θερμοκρασία καταπόνησης βλέπουμε πως σε υψηλότερη θερμοκρασία έχουμε υψηλότερη μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης.

Συγκεκριμένα:

Για το δοκίμιο H1 το οποίο υποβλήθηκε σε θερμοκρασία 40°C για 168 ώρες βλέπουμε πως η μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης σε σχέση με το πρωτότυπο το οποίο δεν υποβλήθηκε σε καμία καταπόνηση είναι της τάξης του 24,3 % (Μέγιστο φορτίο κάμψης πρωτότυπου (563,39 N) ενώ του H1 (426.49N).

Για το δοκίμιο L3 το οποίο υποβλήθηκε σε θερμοκρασία 100°C για 168 ώρες βλέπουμε πως η μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης σε σχέση με το πρωτότυπο είναι της τάξης του 49,05 %. (Μέγιστο φορτίο κάμψης πρωτότυπου (563,39 N) ενώ του L3 (287.04N).

Τέλος όσον αφορά την αύξηση του βάρους στα δοκίμια λόγω της τοποθέτησής τους σε νερό βρύσης δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς από τις μετρήσεις παρατηρούμε πως:

- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία τοποθετήθηκαν στους 40°C παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 1,19%
- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία τοποθετήθηκαν στους 60°C παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 1,47%
- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία τοποθετήθηκαν στους 80°C παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 3,04%
- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία τοποθετήθηκαν στους 100°C παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 2,2%

Επίσης εάν λάβουμε υπόψιν τον χρόνο καταπόνησης προκύπτει ότι :

- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία καταπονήθηκαν για 24 ώρες παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 1,62%
- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία καταπονήθηκαν για 48 ώρες παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 2,43%
- Το σύνολο των δοκιμίων τα οποία καταπονήθηκαν για 48 ώρες παρουσίασαν μια μέση τιμή αύξησης βάρους 1,88%

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Α.Δ. Γκότσης. Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών. Εκδ. Πολυτεχνείου Κρήτης, 2007.
- [2]. Κ. Μπέλτσιος. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. Εκδ. Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2003.
- [3]. D. Hull and T.W. Clyne. An Introduction to Composite Materials. Cambridge University Press, 2003.
- [4]. Παπαδόπουλος Α. Χρήστος. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- [5]. Brian N. Cox and Gerry Flanagan. Handbook of analytical methods for textile composites. NASA Contractor Report 4750, 1997. URL [http://www.tpub.com/content/nasa1997/NASA-97-cr4750/.](http://www.tpub.com/content/nasa1997/NASA-97-cr4750/)
- [6]. ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σημειώσεις για το μάθημα: Εφαρμογές προηγμένων υλικών. 2004. URL http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf.
- [7]. Κ. Παπανικολάου. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. εκδ. Κλειδάριθμος, 2008.
- [8]. Ιορδανίδου Ευλαλία. Βελτιστοποίηση ενισχυμένων δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, 2010.
- [9]. Aramide FO, Atanda PO and Olorunniwo OO. Mechanical properties of a polyester fiber glass composite. Int J Compos Mater 2012; 2: 147–151.
- [10]. Lopez FA, Martin MA, Alguacil FJ, et al. Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass ceramic material. J Anal Appl Pyrolysis 2012; 93: 104–112.
- [11]. Erden S, Sever K, Seki Y, et al. Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. Fibers Polym 2010; 11: 732–737.
- [12]. Awan GH, Ali L, Ghauri KM, et al. Effect of various forms of glass fiber reinforcements on tensile properties of polyester matrix composite. J Faculty Eng techno 2009; 16: 33–39.
- [13]. Gupta N, Balrajsinghbrar and Eyassuwoldesenbet. Effect of filler addition on the compressive and impact properties of glass fibre reinforced epoxy. Bull Mater Sci 2001; 24: 219–223.

- [14]. Hameed N, Sreekumar PA, Francis B, et al. Morphology, dynamic mechanical and thermal studies on poly (styrene-co-acrylonitrile) modified epoxyresin/glass fibre composites. *Compos Part A* 2007; 38: 2422–2432.
- [15]. Atas C and Liu D. Impact response of woven composites with small weaving angles. *Int J Impact Eng* 2008; 35: 80–97.
- [16]. Aktas M, Atas C, Icten BM, et al. An experimental investigation of the impact response of composite laminates. *Compos Struct* 2009; 87: 307–313.
- [17]. Suresha B, Chandramohan G, Prakash JN, et al. The role of fillers on friction and slide wear characteristics in glass- epoxy composite systems. *J Minerals Mater Characterization Eng* 2006; 5: 87–101.
- [18]. Hussain Al-alkawi J, Dhafir Al-Fattal S and Abdul-Jabar Ali H. Fatigue behavior of woven glass fiber reinforced polyester under variable temperature. *Elixir mech Eng* 2012; 53: 12045–12050.
- [19]. Chen Z, Liu X, Lu R, et al. Mechanical and tribological properties of PA66/PPS blend. III. Reinforced with GF. *J Appl Polym Sci* 2006; 102: 523–529.
- [20]. Yuanjian T and Isaac DH. Combined impact and fatigue of glass fiber reinforced composites. *Compos Part B* 2008; 39: 505–512.
- [21]. Husic S, Javni I, Zoran S and Petrovic. Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based poly- urethane composites. *Compos Sci Techno* 2005; 65: 19–25.
- [22]. Karakuzu R, Gulem T and Icten BM. Failure analysis of woven laminated glass–vinylester composites with pin- loaded hole. *Compos Struct* 2006; 72: 27–32.