

# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

## **ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ**

Διπλωματική Εργασία

του

Κωνσταντίνου Βρυωνίδα

**Επιβλέπων Καθηγητής:** Νικόλαος Γ. Τσούβαλης , Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 22/06/2021

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μέρος του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών (Σ.Ν.Μ.Μ.) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.). Αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η εξέταση της επίδρασης της επιβολής θερμότητας και του χρόνου επιβολής αυτής στην εφελκυστική αντοχή των σύνθετων υλικών. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκαν σύνθετα υλικά, διαφορετικών μεταξύ τους παραμέτρων, τα οποία υποβλήθηκαν σε διαφορετικά σενάρια θέρμανσης και κατόπιν διερευνήθηκε πειραματικά η αντοχή τους σε εφελκυσμό.

Οι πειραματικές αυτές δοκιμές οδηγούν σε αποτελέσματα τα οποία είναι ικανά να δώσουν απαντήσεις στον πιο πάνω προβληματισμό. Επίσης, πέραν της θερμοκρασίας και του χρόνου έκθεσης εξετάζονται και άλλες παράμετροι κατασκευής των υλικών αυτών οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν τα αποτελέσματα των δοκιμών. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει αναλυτικά την όλη διαδικασία, αρχής γενομένης, από την κατασκευή των δοκιμίων, τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού, τα συμπεράσματα που εξάγονται και τέλος, προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Τόσο η προεργασία όσο και η προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (Ε.Ν.Τ.) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω θερμά το δάσκαλο και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή της Σ.Ν.Μ.Μ. κ. Νικόλαο Τσούβαλη, του οποίου η καθοδήγηση και οι πολύτιμες συμβουλές αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα ως προς την επίτευξη και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στο προσωπικό του Ε.Ν.Τ. και συγκεκριμένα στους κυρίους Θανάση Μαρκουλή και Χάρη Ξάνθη για τη σημαντική συμβολή τους στην όλη διαδικασία, από την κατασκευή των δοκιμίων μέχρι και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Η συνεργασία όλων των πιο πάνω αποτέλεσε για μένα ξεχωριστή εμπειρία και καταλυτικό παράγοντα περάτωσης της διπλωματικής μου μελέτης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Σύνθετα υλικά και χρήση τους στη ναυπηγική .....	1
1.2 Εφαρμογές χρήσης σύνθετων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες .....	3
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας .....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ</b> .....	<b>6</b>
2.1 Πρόλογος.....	6
2.2 Επιλογή παραμέτρων κατασκευής – Ονοματολογία Αιτιολόγηση .....	6
2.3 Διαδικασία κατασκευής .....	9
2.3.1 Προετοιμασία υφασμάτων για την κατασκευή.....	9
2.3.2 Κατασκευή πλακών .....	10
2.3.3 Post Curing.....	12
2.3.4 Κοπή πλακών - Οριοθέτηση – Αρίθμηση.....	13
2.4 Σενάρια θέρμανσης .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>16</b>
3.1 Πειραματική δοκιμή εφελκυσμού .....	16
3.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	17
3.2.1 Γραφήματα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) .....	17
3.2.2 Μέγιστη εφελκυστική αντοχή.....	46
3.2.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b> .....	<b>49</b>
4.1 Ανασκόπηση.....	49
4.1.1 Γενική εικόνα.....	49
4.2 Συμπεράσματα πειραματικών δοκιμών.....	50
4.2.1 Συμπεράσματα που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας (E) .....	50
4.2.2 Συμπεράσματα που αφορούν τη τάση θραύσης ( $\sigma$ -max) .....	50
4.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και επέκταση εργασίας.....	52
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>53</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σύνθετα υλικά και χρήση τους στη ναυπηγική

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν τεράστια δημοφιλία σε πλείστες κατασκευαστικές εφαρμογές τις τελευταίες δεκαετίες. Το γεγονός ότι τα υλικά αυτά μπορούν να κατασκευαστούν έτσι ώστε να εξυπηρετήσουν κάποια πολύ συγκεκριμένη ανάγκη, είτε αυτή αφορά τη σχεδίαση είτε αφορά μηχανικά χαρακτηριστικά, τα καθιστά την αιχμή του δόρατος στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία.

Χαρακτηριστικές ιδιότητες όπως το χαμηλό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντιδιαβρωτική συμπεριφορά, οι πολύ καλές θερμικές, μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, η άριστη συμπεριφορά σε κόπωση, οι σχετικά εύκολες και φθηνές μέθοδοι κατασκευής και τέλος, το χαμηλό κόστος συντήρησης αποτελούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών (Cardon, και Verchery 1985). Τα πιο πάνω γνωρίσματα δικαίως, θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι, τα κατατάσσουν ως κορυφαία επιλογή χρήσης σε πλείστες εφαρμογές στη ναυπηγική βιομηχανία. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, οφείλουν να καταγραφούν και ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία παρατηρήθηκαν κατά τα πρώιμα στάδια χρησιμοποίησης των σύνθετων υλικών. Για παράδειγμα, τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανικές φθορές, η ιδιαίτερη συμπεριφορά στις δύσκολες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος, το αρκετά υψηλό κόστος κατασκευής, καθώς και η δυσκολία επιθεώρησης και συγκόλλησης φαίνεται να γίνονται ολοένα και μικρότερης σημασίας λόγω των συνεχών βελτιώσεων όσον αφορά την παραγωγή καινούργιων και βελτιωμένων ινών και ρητινών, καθώς και μη καταστρεπτικών μεθόδων επιθεώρησης ( Παπανικολάου, και Μουζάκης 2007).

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στην επιλογή των ινών μεταξύ γυαλιού, άνθρακα, γραφίτη, Kevlar, καθώς και των υλικών μήτρας μεταξύ πολυεστερικής ρητίνης, εποξειδικής ή εποξικής, βινυλεστερικής, φαινολικής κ.λπ. Πέραν αυτού, υπάρχει επίσης δυνατότητα επιλογής της περιεκτικότητας (κατ' όγκο ή και κατά βάρος) και του είδους πλέξης (μονοαξονικά U.D., πεπλεγμένα W.R., κ.λπ.) των ενισχυτικών ινών, του αριθμού και προσανατολισμού των στρώσεων του πολύστρωτου, της μεθόδου κατασκευής (με το χέρι H.L-U., με ψεκασμό SPRAY-UP, μορφοποίηση με πίεση V.B., περιέλιξης ινών κ.λπ.) και τέλος, η δυνατότητα θέρμανσης του πολύστρωτου αμέσως μετά τη δημιουργία και πριν τη χρήση του (post curing) (Τσούβαλης 1998). Βάσει των πιο πάνω και παρά το γεγονός ότι το πολύστρωτο καθίσταται αρκετά πολύπλοκο υλικό ως προς τη δημιουργία, είναι ικανό να εξυπηρετήσει εξειδικευμένες απαιτήσεις κατασκευής, προερχόμενες από το μέγεθος και τη φύση του τασικού πεδίου, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το κόστος κατασκευής και τη σχεδίαση του προϊόντος.

Όσον αφορά την ναυπηγική βιομηχανία, πιο συγκεκριμένα, τα σύνθετα υλικά άρχισαν να εμφανίζονται κατά τη δεκαετία του 1950 στην κατασκευή μικρών σκαφών (π.χ. σωσίβιες λέμβοι, μικρά σκάφη αναψυχής, κ.ά.). Πλέον στις μέρες μας φτιάχνονται κατασκευές των οποίων η μάζα φτάνει τις εκατοντάδες τόνων. Οι εφαρμογές δεν αφορούν μόνο κατασκευαστικά στοιχεία μεγάλης κλίμακας (όπως για παράδειγμα, γάστρες, υπερκατασκευές, ή τμήματα υποθαλάσσιων και παράκτιων κατασκευών, κ.λπ.), αλλά και μικρότερα στοιχεία – εξαρτήματα (λ.χ. θόλους ραντάρ, κατάρτια).

Αναφορικά με το είδος των σύνθετων υλικών (F.R.P. - Fabric Reinforced Plastics) το οποίο χρησιμοποιείται στη ναυπηγική, τη μεγαλύτερη χρήση έχουν τα G.R.P. (Glass Reinforced Plastics). Αυτό παρατηρείται λόγω του χαμηλότερου κόστους που παρουσιάζουν τα G.R.P. σε κατασκευές με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις, όπως για παράδειγμα μικρά σκάφη αναψυχής, σωσίβιες λέμβοι και αλιευτικά (βλ. σχήμα 1.1), κλπ. Σε άλλες περιπτώσεις όπου απαιτούνται βελτιωμένες ιδιότητες όπως μεγαλύτερη αντοχή και μειωμένο βάρος χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα αντί γυαλιού (C.F.R.P. - Carbon Fiber Reinforced Plastics), όπως για παράδειγμα σε “super yachts”, αγωνιστικά σκάφη, πλοία του πολεμικού ναυτικού (βλ. σχήμα 1.1 **Error! Reference source not found.**) κ.ά.



**Σχήμα 1.1:** Αριστερά: Σουηδικό ναρκαλιευτικό κατασκευασμένο από CFRP. (L=72.7m), τιμή \$184 εκατομμύρια.  
Δεξιά: Αλιευτικό σκάφος κατασκευασμένο από GRP. (L=42m).

## 1.2 Εφαρμογές χρήσης σύνθετων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες

Εκτός από τις συνηθισμένες χρήσεις των σύνθετων υλικών σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία λειτουργίας του εν λόγω υλικού ξεπερνά κατά πολύ τις θερμοκρασίες αυτές. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις αυτές είναι οι εποξικές και προϋποθέτουν post curing. Οι ιδιότητες των εποξικών ρητινών μπορούν να μεταλλαχτούν σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιώντας μια ευρεία ποικιλία εποξειδίων, παραγόντων σκλήρυνσης και προσθέτων σωματιδίων. Οι θερμικές ιδιότητες των εποξικών ρητινών ποικίλουν ανάλογα με τη χημική σύνθεση. Για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες, οι εποξικές ρητίνες γενικά περιέχουν αρωματικές ή ετεροκυκλικές ενώσεις. Για παράδειγμα, το Ciba Geigy's Epoxy MY720™ με το μέσο σκλήρυνσης διαμινοδιφαινυλοσουλφόνης έχει Tg (Glass Transition Temperature) 180°C και υψηλό μέτρο ελαστικότητας και ακαμψία μέχρι τους 163°C (Tant, McManus και Rogers 1995). Η Tg είναι η θερμοκρασία όπου ένα μέρος του υλικού ξεκινά να λιώνει, να αλλάζει δηλαδή από κρυσταλλική κατάσταση σε άμορφη. Η Tg λοιπόν μας λέει μέχρι ποια θερμοκρασία μπορεί το υλικό να διατηρεί της μηχανικές του ιδιότητες και να είναι λειτουργικό.

Σημαντική θέση στη χρήση των Σ.Υ για υψηλές θερμοκρασίες κατέχει η αεροναυπηγική. Στα κατασκευαστικά μέρη των μαχητικών αεροσκαφών και ελικοπτέρων όπως φτερά, πτερύγια, πηδάλια και πόρτες χρησιμοποιείται προ-εμποτισμένο ύφασμα άνθρακα – εποξικής ρητίνης που του υποβλήθηκε Post Curing στους 175°C. Στην περίπτωση των πλαισίων, των ενισχυτικών και των πτερυγίων του ρότορα χρησιμοποιείται προ-εμποτισμένο ύφασμα άνθρακα – εποξικής ρητίνης με προσμίξεις ρητίνης Bismaleimide (BMI) (Mangalgi, 1999).

Εδώ αξίζει να γίνει αναφορά σε ορισμένες περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 200°C. Ο HICTAC, (High Performance Composites for Demanding High Temperature Applications) ένας οργανισμός ο οποίος χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση έχει πέτυχει να δημιουργήσει μια ρητίνη με Tg πάνω από 360°C και αρκετά χαμηλό κινηματικό ιξώδες. Η ρητίνη αυτή με ονομασία NEXIMID® MHT-R της Nexam Chemical κυκλοφορεί στην αγορά από το 2016.

Άλλη μια περίπτωση είναι αυτή της NASA η οποία έχει δημιουργήσει μια καινοτόμα μέθοδο που κατασκευάζει έμβολα μηχανής από σύνθετα υλικά. Αυτά σε σύγκριση με τα συμβατικά έμβολα χάλυβα ή κράματος αλουμινίου έχουν μειωμένο συνολικό βάρος του κινητήρα, επιτρέπουν την λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες χωρίς απώλεια αντοχής, παρουσιάζουν πιο αθόρυβη λειτουργία, μειώνουν την απώλεια θερμότητας και τέλος περιορίζουν το επίπεδο των εκπομπών υδρογονανθράκων. Συγκεκριμένα, τα κράματα αλουμινίου και τα χαλύβδινα έμβολα χάνουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή θερμοκρασίες λειτουργίας πάνω από 325 °C, ενώ τα σύνθετα έμβολα άνθρακα-άνθρακα διατηρούν την αντοχή τους σε συνθήκες λειτουργίας που υπερβαίνουν τους 650°C (Northam, Ransone, Schwind, Rivers 1999).

Μία περίπτωση η οποία χρήζει αναφοράς είναι αυτή της εταιρίας Spyros Panopoulos Automotive Perfection. Πρόκειται για ελληνική εταιρεία που ειδικεύεται στην κατασκευή και προσαρμογή των Hyper – Cars. Ο ιδρυτής/ιδιοκτήτης της Σπύρος Πανόπουλος κάνει την Ελλάδα γνωστή κατέχοντας παγκόσμιο ρεκόρ στους αγώνες Drag Racers που διεξάγονται ετησίως στις Η.Π.Α. Η συγκεκριμένη εταιρία έχει κατασκευάσει καλύμματα υπερπληρωτή κινητήρα εσωτερικής καύσης από υφάσματα άνθρακα (βλέπε σχήμα 1.2). Η θερμοκρασία στον υπερπληρωτή των Hyper Cars μπορεί να φτάσει και στους 700°C. Πέραν αυτού έχει κατασκευαστεί επίσης και μπιέλα από προ-εμποτισμένο ύφασμα άνθρακα για θερμοκρασίες λειτουργίας κοντά στους 600°C, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.



**Σχήμα 1.2:** Κάλυμμα υπερπληρωτή Μ.Ε.Κ κατασκευασμένο εν κενό.



**Σχήμα 1.3:** Μπιέλα μηχανής εσωτερικής καύσης από Σύνθετο Υλικό άνθρακα.

### 1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η μειωμένη αντοχή που παρουσιάζουν τα περισσότερα συμβατικά σύνθετα υλικά σε καταπονήσεις εν θερμώ, ή και κατόπιν θέρμανσης, δημιουργεί την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη (Hilado 1990). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σύνθετα υλικά εξετάζονται ως προς την εφελκυστική συμπεριφορά τους μετά από επιβολή θερμότητας, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία θα βοηθήσουν στη σύνδεση όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων κατασκευής και σεναρίων θέρμανσης με την εφελκυστική τους αντοχή. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι είναι εξαιρετικά δύσκολο τα συμπεράσματα τα οποία εξάγονται να ισχύουν καθολικά και σε πανομοιότυπα σύνθετα υλικά. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ δύσκολο να δημιουργήσει κανείς σύνθετα υλικά, εξ ολοκλήρου ίδια, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που υπάρχουν στο E.N.T.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρατίθεται η όλη διαδικασία κατασκευής των δοκιμών που θα χρησιμοποιηθούν (βλ. Κεφάλαιο 2). Έπειτα, περιγράφονται αναλυτικά οι πειραματικές δοκιμές και τα αποτελέσματα αυτών υπό μορφή πινάκων (βλ. Κεφάλαιο 3). Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των πειραματικών δοκιμών και των αποτελεσμάτων τους ενώ εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα επί του θέματος της παρούσας μελέτης (βλ. Κεφάλαιο 4).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

### 2.1 Πρόλογος

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων, η οποία ξεκινά από την επιλογή των παραμέτρων κατασκευής που λήφθηκαν υπόψη. Έπειτα, γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο καθορίστηκε η ονοματολογία των δοκιμίων και στον τρόπο σχεδίασης – κοπής των υφασμάτων των ενισχυτικών ινών. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής του πολύστρωτου, η χάραξη και κοπή των πλακών και τέλος, το post curing και τα σενάρια επιβολής θερμότητας.

### 2.2 Επιλογή παραμέτρων κατασκευής – Ονοματολογία Αιτιολόγηση

Το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διαθέτει υφάσματα ενισχυτικών ινών, ρητίνες και μεθόδους κατασκευής, τα οποία παρατίθενται στον πίνακα 2.1. Πέραν αυτού, υπάρχουν ορισμένες άλλες παράμετροι κατασκευής οι οποίες λήφθηκαν υπόψη, όπως το επιθυμητό πάχος του πολύστρωτου, η δυνατότητα να γίνει ή όχι post curing και το σενάριο επιβολής θερμοκρασίας.

**Πίνακας 2.1:** Διαθέσιμα Υλικά – Μέθοδοι στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Ρητίνες/Καταλύτες	1) Epoxy R9430/H8433 2) Epoxy R9730/H9831 3) Polyester UPR IS 970 TA/MEKP 50	
Ενίσχυση – Είδος υφάσματος	<u>Glass Fiber</u> 1) UD 600 gr/m <sup>2</sup> 2) CSM 300 gr/m <sup>2</sup> 3) WR 500 gr/m <sup>2</sup> 4) ±45° 300 gr/m <sup>2</sup> 5) WR 600 gr/m <sup>2</sup> + CSM 300 gr/m <sup>2</sup>	<u>Carbon Fiber</u> 1) UD 322 gr/m <sup>2</sup> 2) UD 190 gr/m <sup>2</sup> 3) Twill 193 gr/m <sup>2</sup>
Μέθοδος Κατασκευής	1) Hand Lay-Up (H.L-U) 2) Vacuum Bagging (V.B)	

Πρωταρχικός στόχος κατά την έναρξη του σχεδιασμού της μελέτης υπήρξε ο συνδυασμός όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων κατασκευής. Αρχικά, σχετικά με το είδος υφασμάτων επιλέχθηκαν τα U.D. υφάσματα γυαλιού 600 gr/m<sup>2</sup> και άνθρακα 322 gr/m<sup>2</sup> καθώς και το συνδυασμένο ύφασμα W.R. 600 gr/m<sup>2</sup> + C.S.M. 300 gr/m<sup>2</sup>. Επιπρόσθετα, επιλέχθηκαν οι συνδυασμοί ρητίνης/καταλύτη Epoxy R9430/H8433 και Polyester UPR IS 970 TA/MEKP 50, των οποίων τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στο παράρτημα Α. Οι μέθοδοι κατασκευής που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι H.L-U. και V.B. Στον πίνακα 2.2. παρουσιάζονται οι έξι διαφορετικοί συνδυασμοί ρητινών-υφασμάτων-μεθόδων κατασκευής που επιλέχθηκαν. Το πάχος των πολύστρωτων καθορίστηκε στα 2,5-3 mm εντός των ορίων που απαιτούνται από το πρότυπο ISO 527-4 (1997) που αφορά τις συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξάγεται το πείραμα εφελκυσμού στα σύνθετα υλικά.

**Πίνακας 2.2:** Πολύστρωτα που κατασκευάστηκαν.

Είδος υφάσματος	Glass U.D 600 gr/m <sup>2</sup>	Carbon U.D 322 gr/m <sup>2</sup>	Glass WR 600 gr/m <sup>2</sup> +C.S.M. 300 gr/m <sup>2</sup>
-	-	-	-
Είδος ρητίνης	Epoxy R9430/H8433	Epoxy R9430/H8433	Polyester UPR IS 970 TA / MEKP 50
Μέθοδος κατασκευής	Hand lay-up	Hand lay-up	Hand lay-up
	Vacuum bagging	Vacuum bagging	Vacuum bagging

Ακολούθως, γνωρίζοντας ότι η θερμοκρασία εντός μηχανοστασίου μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 100°C και λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά ρητινών που επιλέχθηκαν, κρίθηκε αναγκαία η διαδικασία post curing. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η Glass Transition Temperature (T<sub>g</sub>) της εποξικής ρητίνης είναι 90°C και η Heat Distortion Temperature (HDT) της πολυεστερικής είναι 87°C. Με τον όρο HDT εννοούμε τη θερμοκρασία στην οποία ένα δοκίμιο κάμπτεται με συγκεκριμένο βέλος κάμψης, υπό την επιβολή συγκεκριμένου φορτίου όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Σημειώνεται ότι η T<sub>g</sub> και η HDT είναι διαφορετικές έννοιες, αλλά είναι και οι 2 δείκτες αντίστασης των υλικών στην επιβολή θερμότητας. Όλα τα δοκίμια στα οποία χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός Epoxy R9430/H8433 μπήκαν στον φούρνο στους 80°C για 8 ώρες ενώ αυτά που χρησιμοποιήθηκε ο Polyester UPR IS 970 TA / MEKP 50 μπήκαν στο φούρνο στους 80°C για 3 ώρες, όπως προνοούν οι κατασκευαστές (βλέπε Παράρτημα Α σελίδες 52 και 59 για το χρόνο Post Curing που απαιτείται για τους συνδυασμούς Polyester UPR IS 970 TA / MEKP 50 και Epoxy R9430/H8433). Το προαναφερθέν γεγονός καθόρισε επίσης και τα έξι σενάρια επιβολής θερμοκρασίας τα οποία παρατίθενται στον πίνακα 2.3. Επιλέχθηκε μια θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από την T<sub>g</sub> (100°C) και μια αρκετά μεγαλύτερη (130°C). Εκτός από τη θερμοκρασία σημαντικό ρόλο παίζει και ο χρόνος έκθεσης σε αυτή και για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι 3 χρόνοι (1, 2, 5 ώρες).

**Πίνακας 2.3:** Σενάρια θέρμανσης.

A/A		Temperature			
		Ambient	70°C	100°C	130°C
Time	1h	-	Yes	-	-
	2h	-	Yes	Yes	Yes
	5h	-	Yes	-	-
	∞	Yes	-	-	-

**Σημείωση:** Τα έξι κελιά με πράσινο χρώμα είναι όσα και τα σενάρια θέρμανσης που αποφασίστηκαν.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι κρίθηκε αναγκαίο να κατασκευαστούν επτά δοκίμια από κάθε συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων, λόγω του ότι ορισμένα από αυτά πιθανόν να παρουσίαζαν κατασκευαστικές ατέλειες και κατ' επέκταση δεν θα προορίζονταν για δοκιμή. Εδώ σημειώνεται ότι χρειάζονται κατ' ελάχιστον 5 δοκίμια από κάθε διαφορετική περίπτωση, εκ των οποίων τα 3 θα πρέπει να σπάσουν στη μέση όπως προνοείται στο πρότυπο ISO527-4 (1997). Συνοψίζοντας, θα πρέπει να κατασκευαστούν τουλάχιστον 252 δοκίμια όπως προκύπτουν από την εξίσωση 2.1.

$$6(\text{σενάρια θέρμανσης}) \times 6(\text{διαφορετικά πολύστρωτα}) \times 7(\text{δοκίμια προς κατασκευή}) = 252 \quad (2.1)$$

Δεδομένου του γεγονότος ότι επιλέχθηκε ο συνδυασμός πολλών παραμέτρων κατασκευής, ήταν επόμενο να παρουσιάζεται μια δυσκολία αναφορικά με την ονοματολογία. Για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος τρόπος ονοματολογίας. Ο κωδικός ονομασίας περιλαμβάνει τα αρχικά, με τη σειρά με την οποία αναγράφονται παρακάτω, των παραμέτρων κατασκευής των δοκιμίων, δηλαδή του είδους υφάσματος, του είδους ρητίνης, της μεθόδου κατασκευής, του χρόνου επιβολής θερμοκρασίας σε ώρες και της θερμοκρασίας επιβολής σε βαθμούς Κελσίου. Για παράδειγμα, ο κωδικός ονομασίας CPV\_2@70 αφορά δοκίμιο Carbon Polyester Vacuum Bagging το οποίο θερμάνθηκε επί 2 ώρες στους 70°C . Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που το σενάριο θέρμανσης αφορά τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ambient Temperature), ο κωδικός ονομασίας γράφεται με τα αρχικά AT, όπως για παράδειγμα το GEHAT (Glass Epoxy Hand Lay-Up Ambient Temperature). Ακολουθεί ο πίνακας 2.4 με τις 36 διαφορετικές περιπτώσεις που διερευνήθηκαν και όλες τις αντίστοιχες ονοματολογίες.

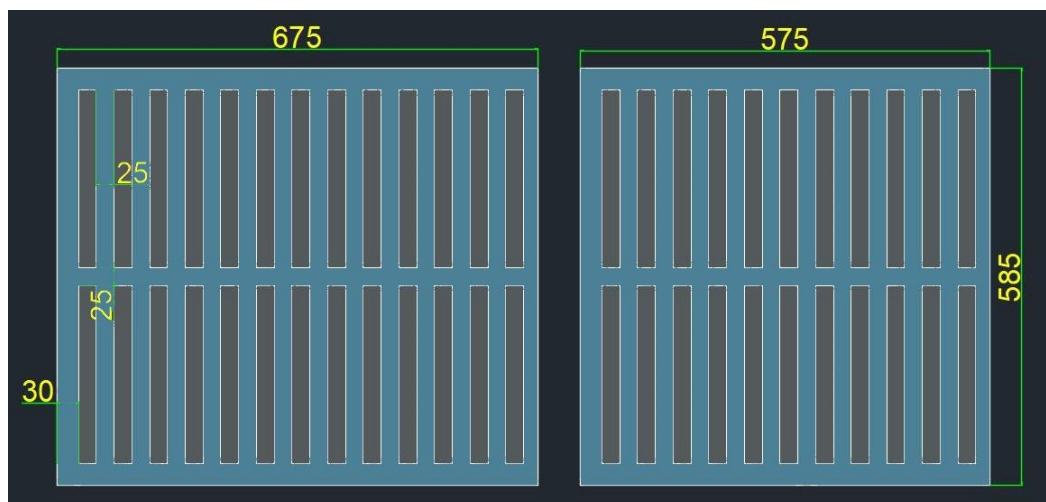
**Πίνακας 2.4:** Ονοματολογίες.

GEH_1@70	GEV_1@70	CEH_1@70	CEV_1@70	GPH_1@70	GPV_1@70
GEH_2@70	GEV_2@70	CEH_2@70	CEV_2@70	GPH_2@70	GPV_2@70
GEH_5@70	GEV_5@70	CEH_5@70	CEV_5@70	GPH_5@70	GPV_5@70
GEH_2@100	GEV_2@100	CEH_2@100	CEV_2@100	GPH_2@100	GPV_2@100
GEH_2@130	GEV_2@130	CEH_2@130	CEV_2@130	GPH_2@130	GPV_2@130
GEHAT	GEVAT	CEHAT	CEVAT	GPHAT	GPVAT

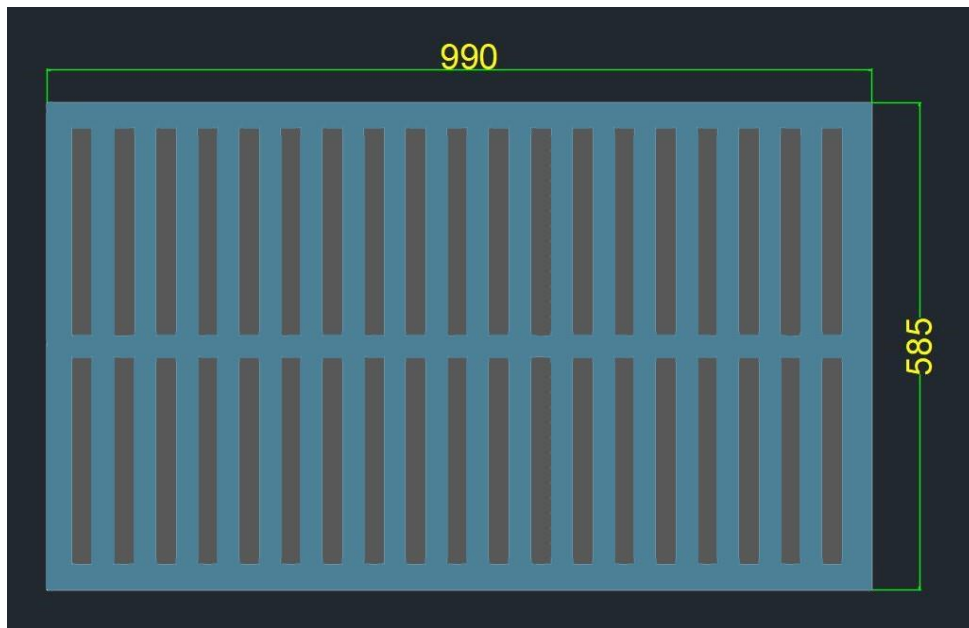
## 2.3 Διαδικασία κατασκευής

### 2.3.1 Προετοιμασία υφασμάτων για την κατασκευή

Τα υφάσματα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας είναι υπό μορφή ρολών διαφορετικού πλάτους. Επομένως, έγινε μελέτη για τον τρόπο με τον οποίο θα έπρεπε να κοπούν τα εν λόγω υφάσματα ούτως ώστε να γίνει εκμετάλλευση όσο το δυνατόν περισσότερου υφάσματος και ταυτόχρονα να είναι διαχειρίσιμες οι αντίστοιχες πολύστρωτες πλάκες στο δίσκο κατά τη κοπή τους. Όσον αφορά το επιθυμητό πάχος των δοκιμίων, μετρήθηκε χωρίς ρητίνη το πάχος μιας στρώσης υφάσματος καθώς και πολλών στρώσεων μαζί και κατόπιν υπολογίστηκε εμπειρικά ο αριθμός στρώσεων που απαιτείται για κάθε ύφασμα ούτως ώστε να πετύχουμε συνολικό πάχος μεταξύ 2.5-4mm. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι είναι σημαντικό να έχουμε ίδιο αριθμό στρώσεων στις πλάκες, έτσι ώστε να γίνει ορθή σύγκριση. Είναι επομένως λογικό να υπάρχει μια διαφορά στο πάχος μεταξύ πλακών που κατασκευάστηκαν με H.L-U. και V.B. Όσον αφορά τη διαφορά πάχους μεταξύ διαφορετικών υλικών που κατασκευάστηκαν με την ίδια μέθοδο, έγινε προσπάθεια να επιτευχθεί ίδιο πάχος, όσο αυτό το επιτρέπουν τα πάχη των υφασμάτων. Υπολογίστηκε έτσι να δημιουργηθούν πλάκες επτά στρώσεων υφάσματος άνθρακα (U.D.), πέντε στρώσεων υφάσματος γυαλιού (U.D.) και τριών στρώσεων του συνδυασμένου υφάσματος γυαλιού (W.R.&C.S.M.). Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν λήφθηκε υπόψη μια περιοχή πλάτους 30 mm στα άκρα των υφασμάτων διότι στο σημείο αυτό υπάρχει αλλοίωση στη διάταξη, στη σύσταση και στον προσανατολισμό των ινών. Για το λόγο αυτό προνοείται κενό 30 mm περιμετρικά. Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι 250x25x3 mm και η απόσταση των δοκιμίων είναι 25mm. Τα σχήματα που ακολουθούν (2.1 και 2.2) δείχνουν τον τρόπο κοπής που αποφασίστηκε. Με μπλε χρώμα τα υφάσματα και με γκρι ο τρόπος που θα οροθετηθούν τα δοκίμια για να κοπούν. Οι διαστάσεις στα σχήματα είναι σε mm.



**Σχήμα 2.1:** Σκαρίφημα υφασμάτων UD γυαλιού και συνδυασμένου WR με CSM.



**Σχήμα 2.2:** Σκαρίφημα υφάσματος UD άνθρακα.

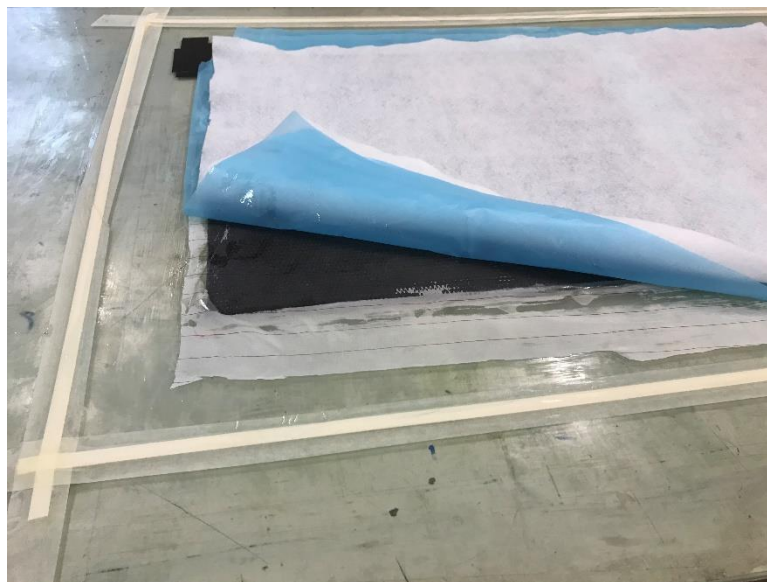
Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι κατασκευάστηκαν 96 δοκίμια από U.D. γυαλιού, 96 δοκίμια από το συνδυασμένο ύφασμα γυαλιού W.R. & C.M.S. και 78 δοκίμια U.D. άνθρακα. Πληροφοριακά χρησιμοποιήθηκαν  $7.31 \text{ m}^2$  υφάσματος γυαλιού (UD),  $4.38 \text{ m}^2$  από το συνδυασμένο ύφασμα γυαλιού (W.R. & C.M.S.) και  $8.1 \text{ m}^2$  υφάσματος άνθρακα (U.D.).

### 2.3.2 Κατασκευή πλακών

Στο υποεδάφιο αυτό αναφέρεται η διαδικασία κατασκευής των πλακών. Αρχικά έγινε καθαρισμός της επιφάνειας που θα στρωθεί η πλάκα από τυχόν ακαθαρσίες και ανωμαλίες που μπορεί να επηρέαζαν την εξωτερική της επιφάνεια, με τη χρήση σπάτουλας. Έπειτα, μετρήθηκε και σχεδιάστηκε η επιφάνεια που θα χρειαστεί για να στρωθούν τα υφάσματα και τοποθετήθηκε κερί για εύκολη αποκόλληση της πλάκας όταν αυτή θα ήταν έτοιμη. Μετά ζυγίστηκαν τα υφάσματα και υπολογίστηκε η κατά βάρος αναλογία του μίγματος ρητίνης-καταλύτη, όπως προνοούν τα T.D.S. (Technical Data Sheets) του κατασκευαστή (βλ. παράρτημα Α). Όσον αφορά το μείγμα Epoxy R9430/H8433, η κατά βάρος αναλογία ρητίνης/καταλύτη είναι 73% - 27%. Η αντίστοιχη κατά βάρος αναλογία του μίγματος Polyester UPR IS 970 TA / MEKP 50 είναι 98,5% - 1,5%. Για τη κατασκευή των δοκιμίων χρειάστηκαν συνολικά 5.652 kg εποξικής ρητίνης R9430, 3.866 kg πολυεστερικής ρητίνης, 2.090 kg καταλύτη H8433 και 60 g καταλύτη MEKP 50. Στη συνέχεια ετοιμάστηκαν τα εργαλεία και τα υφάσματα που θα χρησιμοποιηθούν και τοποθετήθηκαν όσον το δυνατόν πιο κοντά στο χώρο εργασίας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η διαδικασία της επίστρωσης είχε περιορισμένο χρόνο υλοποίησης, αφού αυτός καθορίζεται από το χρόνο υλοποίησης του μίγματος ρητίνης-καταλύτη. Συγκεκριμένα στο TDS του μίγματος Epoxy R9430/H8433 αναγράφεται ο χρόνος Pot Life (20°C) 174 min. Ο χρόνος Pot Life αφορά το χρόνο που

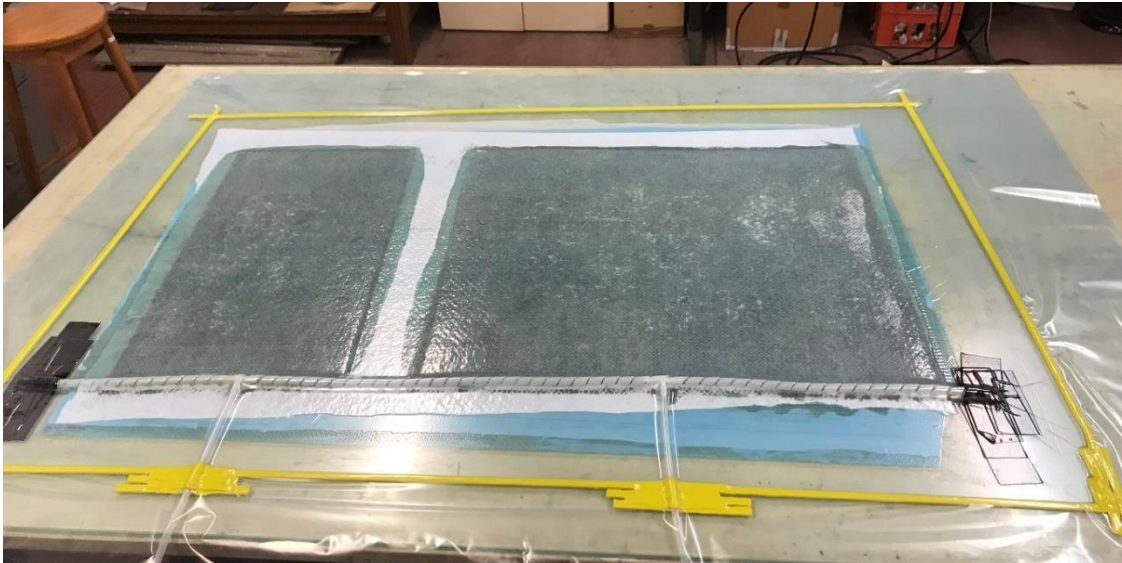
χρειάζεται το μίγμα να διπλασιάσει τη τιμή του κινηματικού ιξώδους του σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Στο TDS του μείγματος UPR IS 970 TA / MEKP 50 αναγράφεται ο χρόνος Gel Time (20°C) 20-30 min και αφορά το χρόνο κατά τον οποίον το μείγμα είναι διαχειρίσιμο προτού σφίξει. Εφόσον ήταν όλα τα υλικά έτοιμα και βρίσκονταν κοντά μεταξύ τους, ρίξαμε τον καταλύτη στη ρητίνη και αναδεύσαμε αργά και προσεκτικά για να αποφύγουμε τη δημιουργία φυσαλίδων στο μείγμα.

Αρχικά τοποθετήθηκε ρητίνη στην κερωμένη επιφάνεια που θα έμπαινε το πρώτο ύφασμα και απλώθηκε με τη σπάτουλα κατά το μήκος και πλάτος της. Έπειτα τοποθετήθηκε το πρώτο ύφασμα και το πατήσαμε με τη βοήθεια του ρολού έτσι ώστε να εμπλουτιστεί με ρητίνη παντού. Το ρολό είχε τέτοιο σχήμα που βοήθησε τον αέρα να απομακρυνθεί καθώς η ρητίνη εισχωρούσε στο ύφασμα. Σημειώνεται εδώ ότι η πίεση που προστίθεται στο πολύστρωτο με το ρολό δεν πρέπει να είναι ούτε μεγάλη διότι θα απομακρύνει τη ρητίνη, αλλά ούτε μικρή γιατί θα υπάρχει περίσσια ρητίνης στο υπό κατασκευή σύνθετο υλικό. Αφού αυτό πατήθηκε με το ρολό όσο χρειαζόταν, τοποθετήθηκε ξανά ρητίνη και απλώθηκε στην επιφάνεια για να τοποθετηθεί η επόμενη στρώση. Η διαδικασία επαναλήφθηκε μέχρι και την τελευταία στρώση. Αφού τοποθετήθηκε η τελευταία ποσότητα ρητίνης έγινε ένα τελευταίο πέρασμα με το ρολό, προσέχοντας να εισχωρήσει η ρητίνη ώστε να μην υπάρχουν κενά αέρος. Εδώ τελείωσε η διαδικασία H.L.U. ενώ η διαδικασία του V.B. είναι η ίδια μέχρι αυτό το σημείο. Στην συνέχεια, η δημιουργία κενού έγινε αφού κλείστηκε αεροστεγώς η πλάκα, με τη χρήση ενός υφάσματος νάιλον και συνδέθηκε απορροφητήρας αέρα, ούτως ώστε να δημιουργηθεί εσωτερική πίεση 0 bar. Σημειώνεται επίσης ότι τοποθετήθηκαν και κάποια επιπρόσθετα υφάσματα που σκοπό είχαν να απορροφήσουν την περίσσια ρητίνης χωρίς να επηρεάσουν την εξωτερική επιφάνεια του πολύστρωτου (βλέπε σχήμα 2.3).



**Σχήμα 2.3:** Προετοιμασία των υφασμάτων για V.B.

Το σχήμα 2.4 δείχνει το τελευταίο στάδιο της διαδικασίας V.B. Στο σημείο αυτό, το μόνο που απέμεινε είναι να περάσει ο χρόνος που χρειάζεται η ρητίνη για να στερεοποιηθεί.



**Σχήμα 2.4:** Πλάκες UD άνθρακα που κατασκευάστηκαν εν κενό.

### 2.3.3 Post Curing

Με τον όρο Post Curing εννοούμε την διαδικασία θέρμανσης των Σύνθετων Υλικών σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μετά την κατασκευή τους, που σκοπό έχει να βελτιώσει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Το Post Curing έγινε σε ειδικό φούρνο που διαθέτει το E.N.T. του E.M.Π. ο οποίος διοχετεύει τη θερμότητα με ακρίβεια καθολικά του όγκου του. Τοποθετήθηκαν οι πλάκες ως είχαν στο φούρνο και χρησιμοποιήθηκε ο απορροφητήρας που υπάρχει στην αίθουσα σύνθετων υλικών για αποφυγή έντονων οσμών που απελευθερώνονται κατά τη θέρμανση. Οι θερμοκρασίες και ο χρόνος του Post Curing αποφασίστηκαν αφού λήφθηκαν υπόψιν τα Technical Data Sheets των ρητινών που χρησιμοποιήθηκαν (Παράρτημα Α, σελίδα 52 για την πολυεστερική ρητίνη και σελίδα 58 για την εποξική). Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι χρόνοι έκθεσης και οι αντίστοιχες θερμοκρασίες.

**Πίνακας 2.5:** Πρόγραμμα Post Curing.

UD Glass - Epoxy R9430/H8433	UD Carbon - Epoxy R9430/H8433	WR-CSM Glass - Polyester UPR IS 970 TA / MEKP 50
8 ώρες στους 80°C	8 ώρες στους 80°C	3 ώρες στους 80°C

### 2.3.4 Κοπή πλακών - Οριοθέτηση – Αρίθμηση

Μετά από το Post Curing οι πλάκες κόπηκαν στο δίσκο κοπής που διαθέτει το Ε.Ν.Τ. με τη βοήθεια πίδακα νερού για την αποφυγή εισπνοής της σκόνης άνθρακα και γυαλιού που απελευθερώνεται κατά τη κοπή. Έπειτα οριοθετήθηκαν με τρόπο όπως καθορίζει το ISO 527-4 (1997), που αφορά τη δοκιμή εφελκυσμού για τα δοκίμια τύπου Β. Ζωγραφίστηκαν λοιπόν 3 γραμμές, οι 2 απείχαν 50mm από το κάθε άκρο του δοκιμίου και η τελευταία απείχε 125mm από το άκρο του δοκιμίου δηλαδή στο κέντρο αυτού. Τέλος αριθμήθηκαν σύμφωνα με την προκαθορισμένη ονοματολογία. Στο σχήμα 2.5 φαίνονται τα δοκίμια σε αυτή τη φάση (κομμένα, οριοθετημένα και αριθμημένα). Στον πίνακα 2.6 αναγράφονται το αρχικά υποτεθέν και το τελικό πάχος όλων των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν.



**Σχήμα 2.5:** Δοκίμια από γυαλί συνδυασμένο CSM / WR και UD.



Πίνακας 2.6: Πάχη δοκιμίων σε mm

GLASS EPOXY HAND LAY-UP						
A/A	GEH2@70	GEH2@100	GEH2@130	GEH1@70	GEH5@70	GEHAT
1	3.7	3.9	3.9	3.9	4.0	3.8
2	3.8	3.7	3.7	3.7	3.8	3.6
3	3.8	3.8	3.8	3.9	3.9	3.7
4	3.6	3.9	3.9	3.7	3.9	3.7
5	3.5	3.6	4.0	3.7	3.6	3.8
GLASS EPOXY VACUUM BAGGING						
A/A	GEV2@70	GEV2@100	GEV2@130	GEV1@70	GEV5@70	GEVAT
1	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
2	3.2	3.2	3.5	3.2	3.2	3.4
3	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3
4	3.2	3.3	3.2	3.1	3.3	3.2
5	3.2	3.2	3.2	3.2	3.3	3.3
CARBON EPOXY HAND LAY-UP						
A/A	CEH2@70	CEH2@100	CEH2@130	CEH1@70	CEH5@70	CEHAT
1	4.5	4.4	3.7	4.5	4.4	3.9
2	4.4	3.6	4.0	3.8	3.6	4.4
3	3.5	4.3	4.1	4.4	3.3	3.6
4	3.8	3.9	4.2	3.9	3.9	4.1
5	3.8	3.6	4.5	4.2	3.8	4.2
CARBON EPOXY VACUUM BAGGING						
A/A	CEV2@70	CEV2@100	CEV2@130	CEV1@70	CEV5@70	CEVAT
1	2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.5
3	2.4	2.6	2.4	2.5	2.5	2.4
4	2.5	2.4	2.6	2.5	2.5	2.6
5	2.5	2.3	2.5	2.5	2.5	2.6
GLASS POLYESTER HAND LAY-UP						
A/A	GPH2@70	GPH2@100	GPH2@130	GPH1@70	GPH5@70	GPHAT
1	3.5	3.4	3.2	3.3	3.4	3.3
2	3.2	3.2	3.4	3.5	3.5	3.3
3	3.5	3.3	3.5	3.4	3.6	3.5
4	3.4	3.4	3.3	3.7	3.7	3.7
5	3.3	3.7	3.5	3.3	3.1	3.6
GLASS POLYESTER VACUUM BAGGING						
A/A	GPV2@70	GPV2@100	GPV2@130	GPV1@70	GPV5@70	GPVAT
1	2.5	2.5	2.3	2.7	2.8	2.5
2	2.4	2.6	2.7	2.9	2.6	2.3
3	3.0	2.7	2.8	2.8	2.6	2.5
4	2.3	2.6	2.4	2.8	2.3	2.4
5	2.4	2.4	2.9	2.6	2.5	2.5

## 2.4 Σενάρια θέρμανσης

Τα δοκίμια αφού αριθμήθηκαν τοποθετήθηκαν σε σχάρες ανά ομάδες του ίδιου σεναρίου και έπειτα στο φούρνο όπως δείχνει το σχήμα 2.6 που ακολουθεί.



**Σχήμα 2.6:** Δοκίμια από όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων στο σενάριο θέρμανσης 5 ώρες στους 70 °C.

Για την αποφυγή ανεπιθύμητων αερίων στο Ε.Ν.Τ. χρησιμοποιήθηκε απορροφητήρας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του φούρνου (βλέπε σχήμα 2.7).



**Σχήμα 2.7:** Προσαρμογή απορροφητήρα στο στόμιο του φούρνου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 3.1 Πειραματική δοκιμή εφελκυσμού

Η διαδικασία των δοκιμών έλαβε χώρα στο Ε.Ν.Τ. και χρησιμοποιήθηκε υδραυλική μηχανή δοκιμών της MTS με μέγιστη δυνατότητα τα 250 KN. Οι δοκιμές έγιναν όπως καθορίζει το ISO\_527-4 για δοκίμια 'τύπου 2' όπως αναφέρονται στο εν λόγω πρότυπο. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε κατακόρυφα. Αρχικά έγινε ευθυγράμμιση κατά την κατακόρυφο και έπειτα στερεώθηκε κλείνοντας την κάτω αρπάγη. Στη συνέχεια, έκλεισε και η πάνω αρπάγη αφού μεταφέρθηκε χειροκίνητα στο σωστό ύψος από τον χειριστή. Τέλος, τοποθετήθηκε το επιμηκυσιόμετρο, τέθηκε σε λειτουργία απορροφητήρας για αποφυγή εισπνοής πολύ μικρών σωματιδίων και ξεκίνησε η δοκιμή μέχρι να σπάσει το δοκίμιο. Το σχήμα 3.1 που ακολουθεί δείχνει την τοποθέτηση του δοκιμίου, καθώς και τον απορροφητήρα στο πίσω μέρος.



**Σχήμα 3.1:** Δοκίμιο UD άνθρακα έτοιμο για το πείραμα εφελκυσμού.

## 3.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Στο εδάφιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών υπό μορφή γραφημάτων, αρχικά «Τάσης – Παραμόρφωσης» και έπειτα ακολουθούν πίνακες που δείχνουν την μέγιστη αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας και των 180 δοκιμών που εξετάστηκαν (5 δοκίμια για κάθε μία από τις 36 περιπτώσεις).

### 3.2.1 Γραφήματα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ )

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος εφελκυσμού και χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των γραφημάτων είναι η δύναμη –  $F$  (KN) και η παραμόρφωση - $\epsilon$  (microstrains). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 3.1 και αφού το εμβαδόν της εκάστοτε διατομής είχε ήδη μετρηθεί, υπολογίστηκαν οι τάσεις που χρειάζονται για τη δημιουργία των γραφημάτων. Στον πίνακα 3.1 αναγράφονται τα εμβαδά διατομής όλων των δοκιμών.

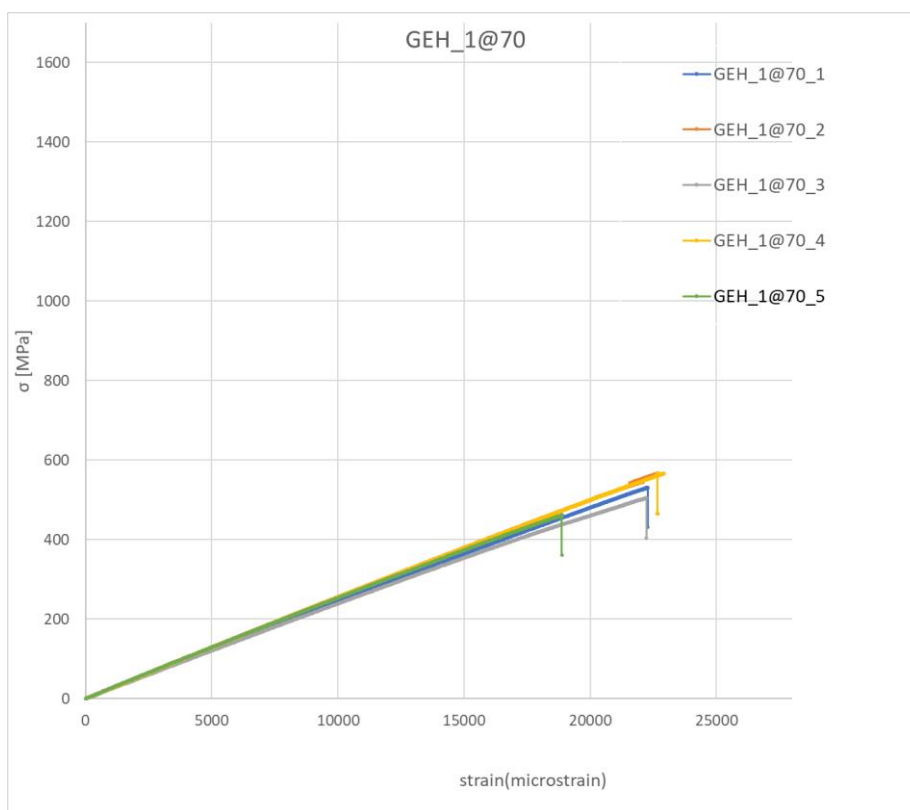
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Έπειτα αποτυπώθηκαν τα ζεύγη τιμών τάσης – παραμόρφωσης και για τα πέντε δοκίμια του ίδιου σεναρίου στον ίδιο ηλεκτρονικό καμβά. Ακολουθούν τα τριάντα έξι γραφήματα, όσες δηλαδή και οι συνολικές περιπτώσεις.

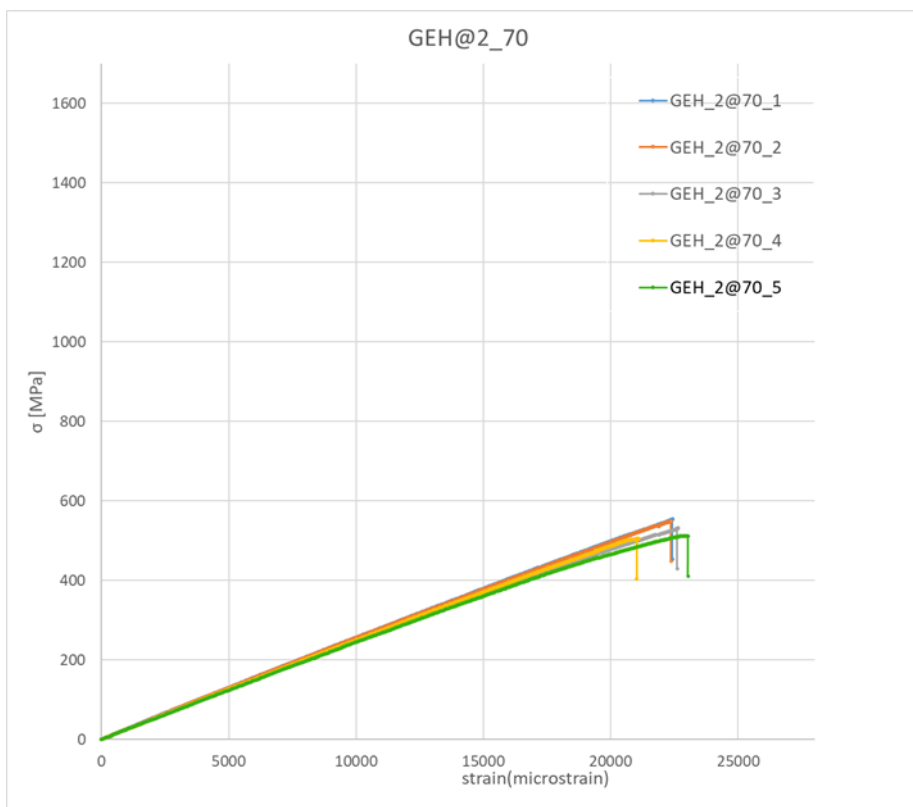
Πίνακας 3.1:Εμβαδά διατομής δοκιμών σε mm.

GLASS EPOXY HAND LAY-UP						
A/A	GEH2@70	GEH2@100	GEH2@130	GEH1@70	GEH5@70	GEHAT
1	101	102	104	100	105	97
2	104	96	98	100	99	93
3	100	100	100	101	104	97
4	94	104	106	97	101	99
5	90	95	109	97	96	99
GLASS EPOXY VACUUM BAGING						
A/A	GEV2@70	GEV2@100	GEV2@130	GEV1@70	GEV5@70	GEVAT
1	84	81	86	88	82	85
2	86	78	94	88	79	87
3	82	83	83	81	80	87
4	83	86	79	80	85	82
5	85	83	82	84	82	85
CARBON EPOXY HAND LAY-UP						
A/A	CEH2@70	CEH2@100	CEH2@130	CEH1@70	CEH5@70	CEHAT
1	117	112	93	111	116	103
2	119	95	105	101	92	116
3	94	106	100	117	84	97
4	97	99	102	99	101	106
5	99	96	114	112	98	102
CARBON EPOXY VACUUM BAGING						
A/A	CEV2@70	CEV2@100	CEV2@130	CEV1@70	CEV5@70	CEVAT
1	58	66	67	69	68	70
2	65	63	64	68	64	69
3	62	70	65	68	70	68
4	68	66	72	67	73	68
5	69	60	71	69	69	72
GLASS POLYESTER HAND LAY-UP						
A/A	GPH2@70	GPH2@100	GPH2@130	GPH1@70	GPH5@70	GPHAT
1	91	86	84	81	89	84
2	81	79	84	92	88	88
3	88	84	88	89	89	87
4	87	90	82	95	93	93
5	82	92	91	88	80	94
GLASS POLYESTER VACUUM BAGING						
A/A	GPV2@70	GPV2@100	GPV2@130	GPV1@70	GPV5@70	GPVAT
1	64	63	55	66	69	66
2	60	64	67	72	66	60
3	73	68	72	69	68	65
4	59	66	59	70	57	61
5	61	62	75	64	63	65

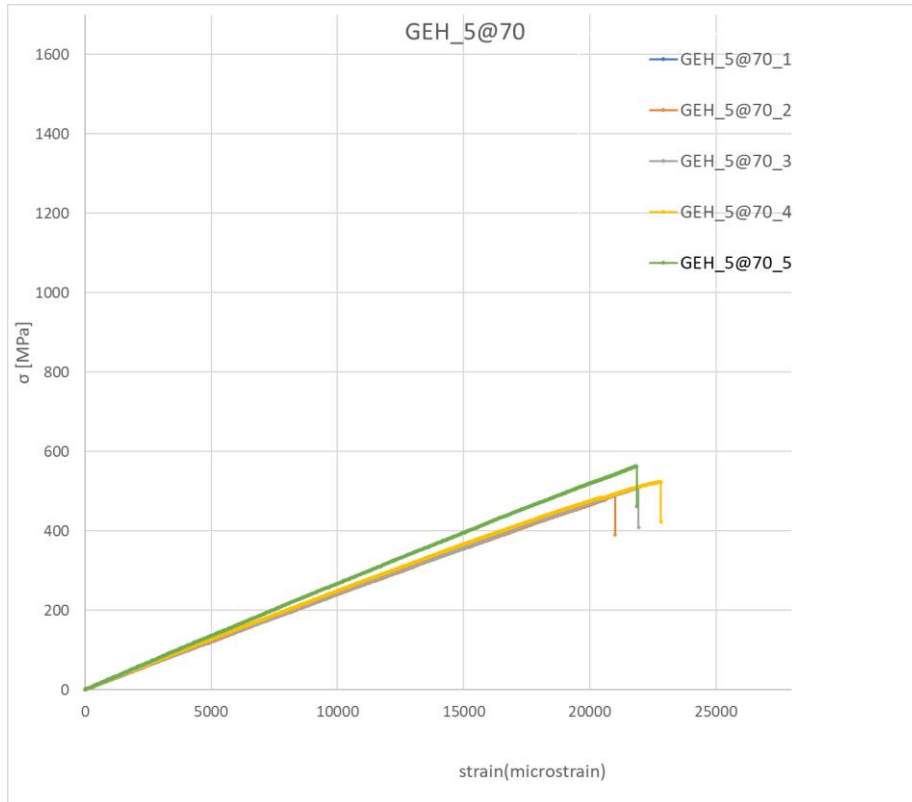
### Δοκίμια GEH (Glass Epoxy Hand Lay - Up)



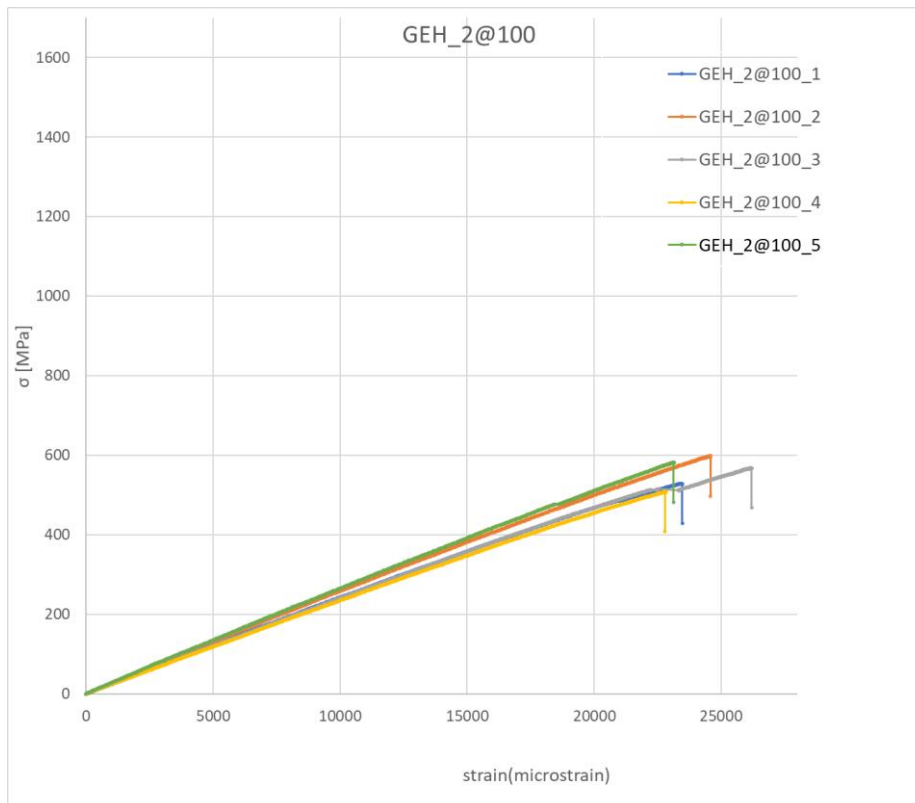
**Σχήμα 3.2:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEH\_1@70.



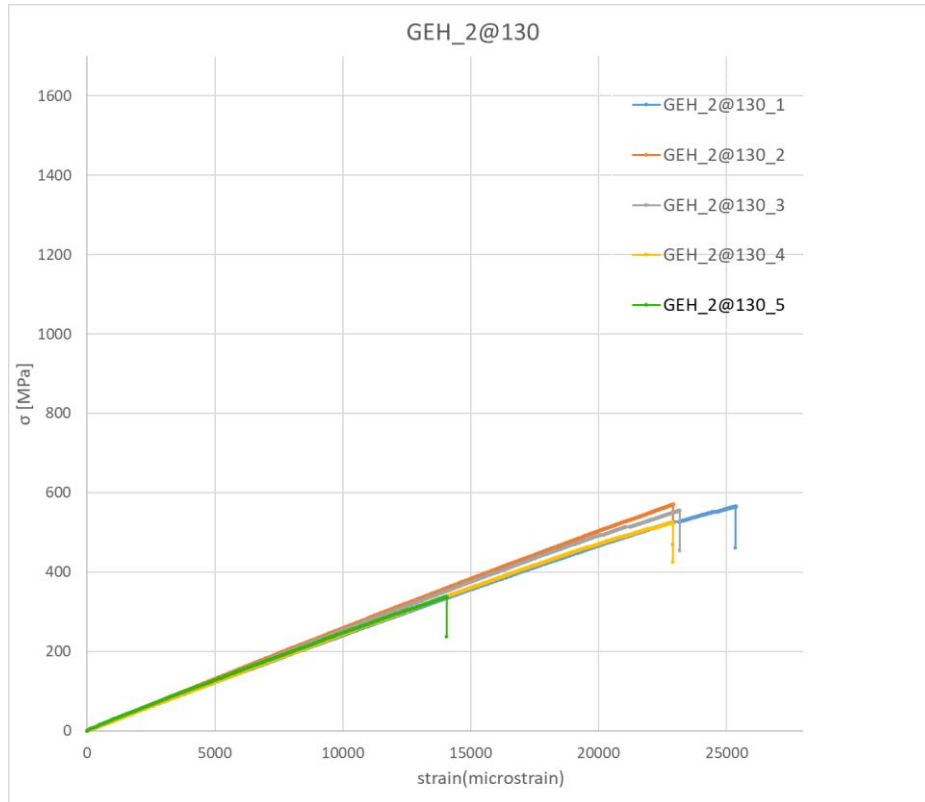
**Σχήμα 3.3:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEH\_2@70.



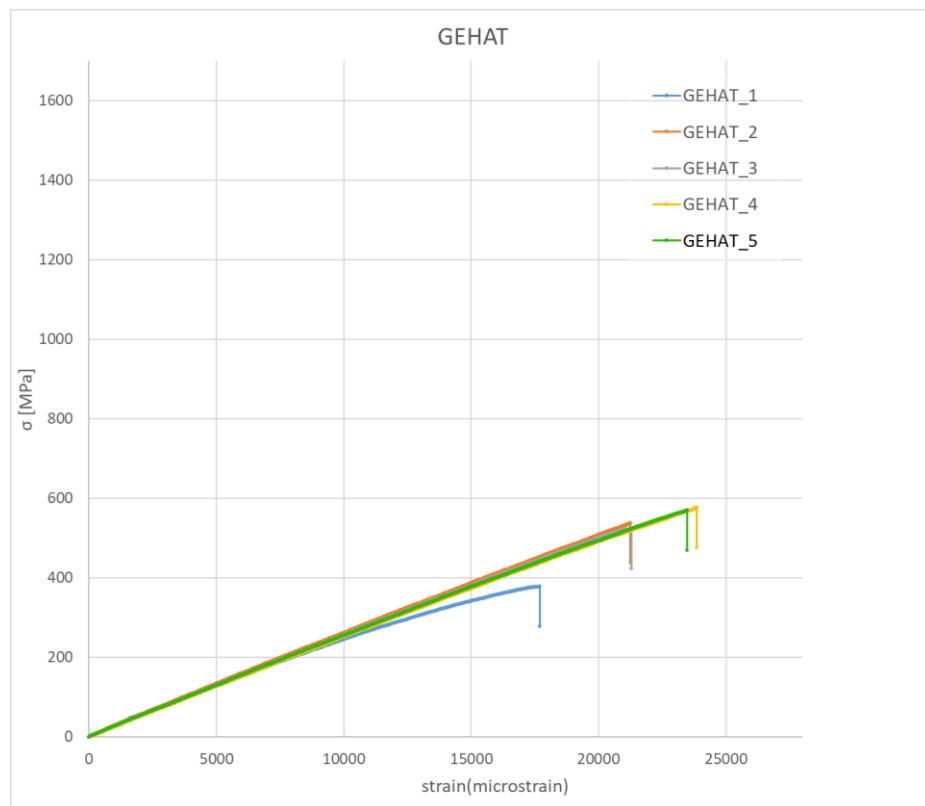
**Σχήμα 3.4:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEH\_5@70.



**Σχήμα 3.5:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEH\_2@100.



**Σχήμα 3.6:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEH\_2@130.

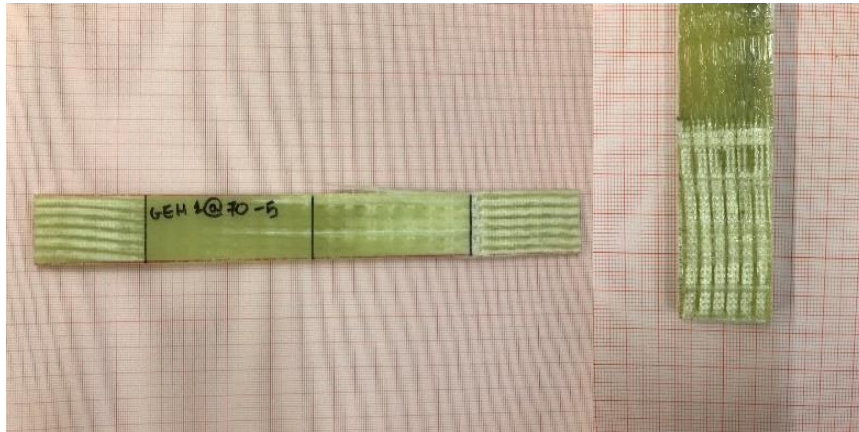


**Σχήμα 3.7:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEHAT.



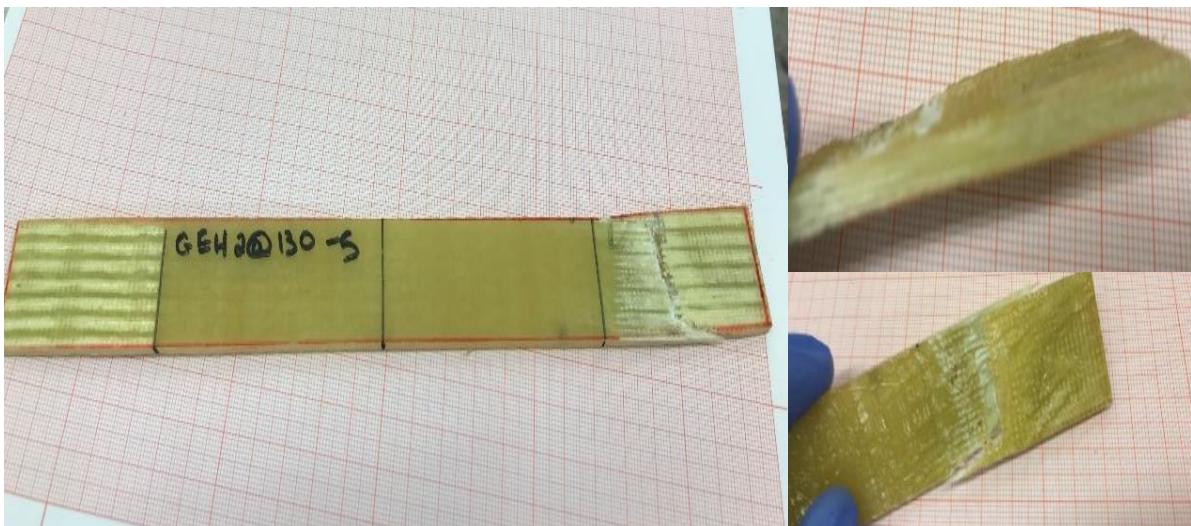
### Αστογίες – Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο GEH\_1@70\_5 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 του ίδιου σεναρίου. Εδώ το σφάλμα είναι ότι δεν έγινε ορθή ευθυγράμμιση κατά τη δοκιμή με αποτέλεσμα να σπάσει στα άκρα αμέσως μετά τις αρπάγες (βλέπε σχήμα 3.8).



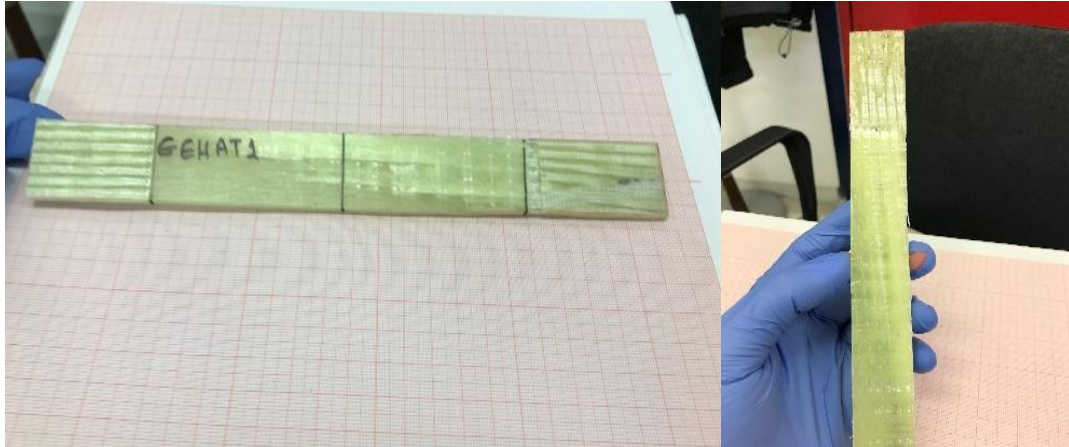
Σχήμα 3.8: Δοκίμιο GEH\_1@70\_5 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο GEH\_2@130\_5 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 του ίδιου σεναρίου. Αυτό οφείλεται στο ότι υπήρχε τοπική ανομοιομορφία πάχους στο άκρο του δοκιμίου με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη επιφάνεια σύσφιξης και η θραύση να αρχίσει από το μέσο της αρπάγης (βλέπε σχήμα 3.9).



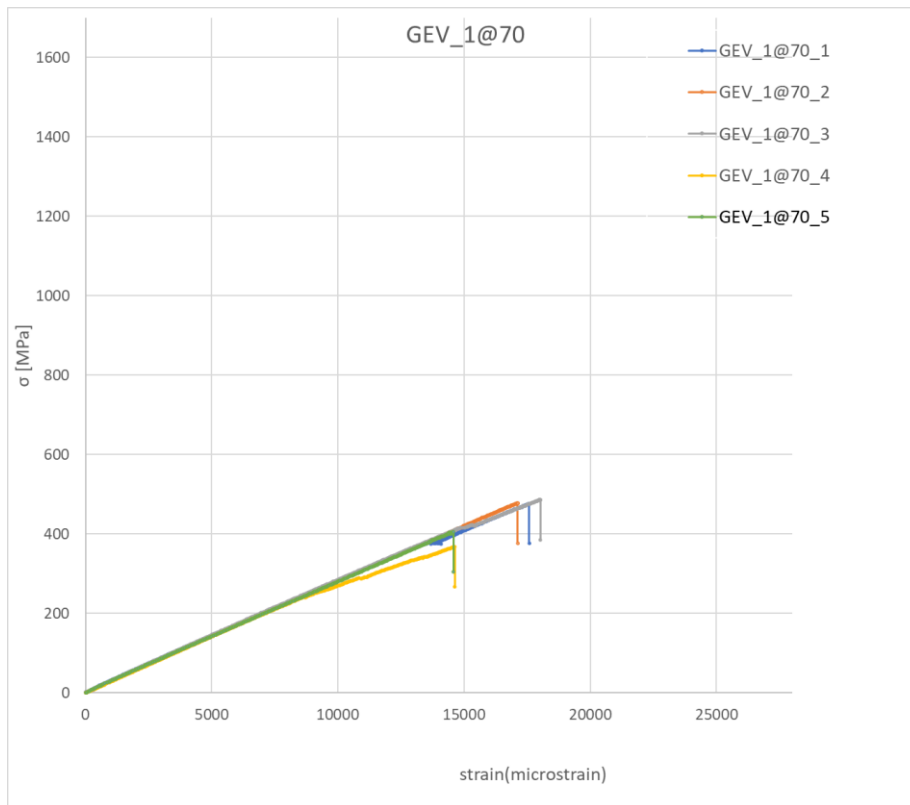
Σχήμα 3.9: Δοκίμιο GEH\_2@130\_5 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο GEHAT\_1 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 του ιδίου σεναρίου. Στην περίπτωση αυτή οι ίνες δεν είναι παράλληλες με τις πλευρές του δοκιμίου. Αυτό οφείλεται σε σφάλμα κατά την επίστρωση καθώς στα άκρα των τελευταίων δύο στρώσεων μετακινήθηκε το ύφασμα. Ως αποτέλεσμα δεν παρέλαβαν όλες οι ίνες το επιβληθέν φορτίο και έσπασαν πρόωρα (βλέπε σχήμα 3.10).

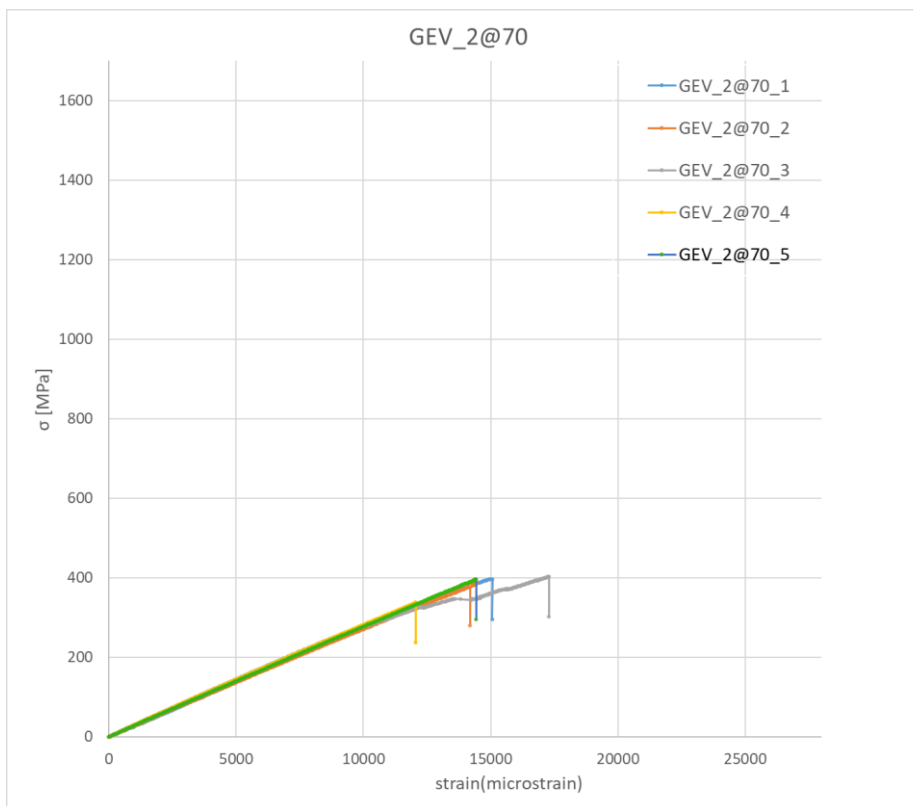


**Σχήμα 3.10:** Δοκίμιο GEHAT\_1 μετά τη θραύση.

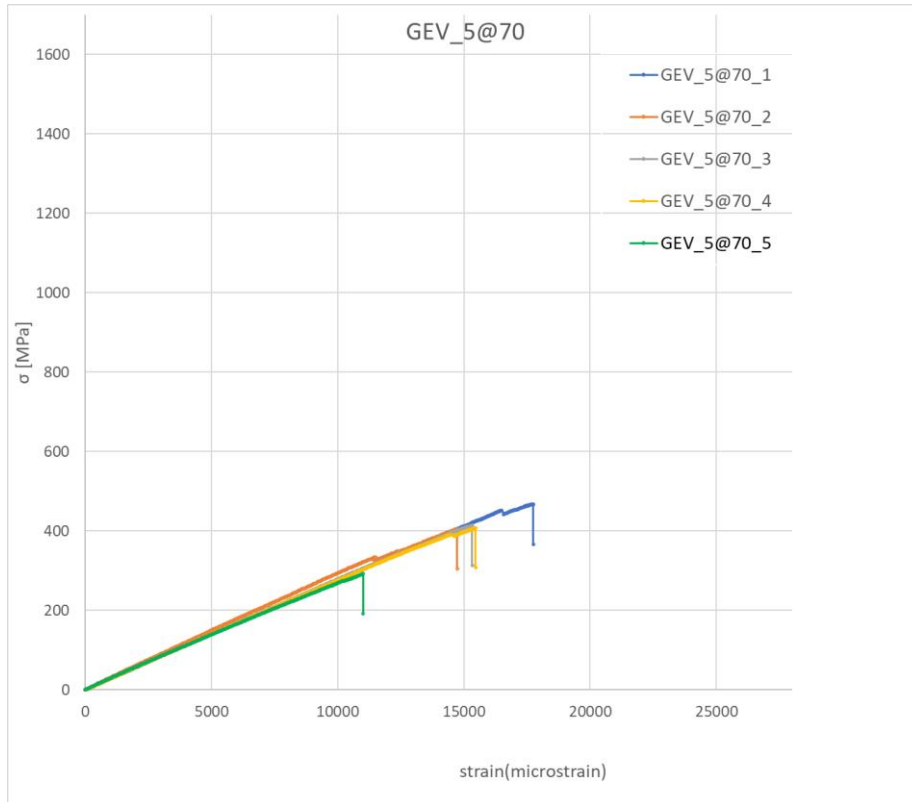
### Δοκίμια GEV (Glass Epoxy Vacuum Bagging)



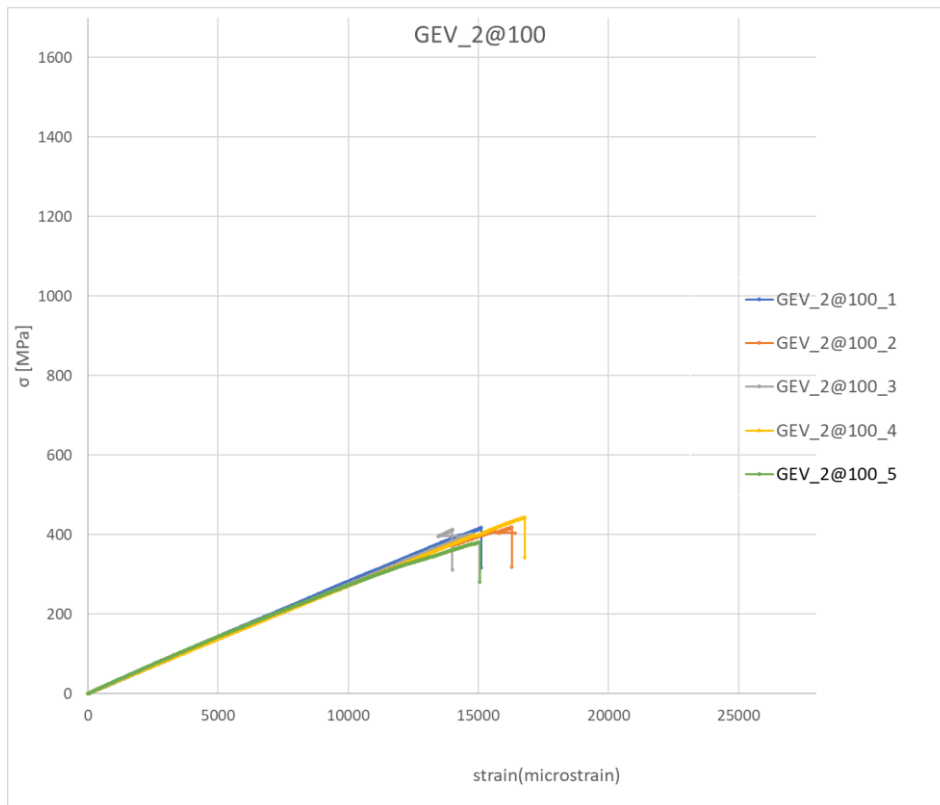
**Σχήμα 3.11:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEV\_1@70.



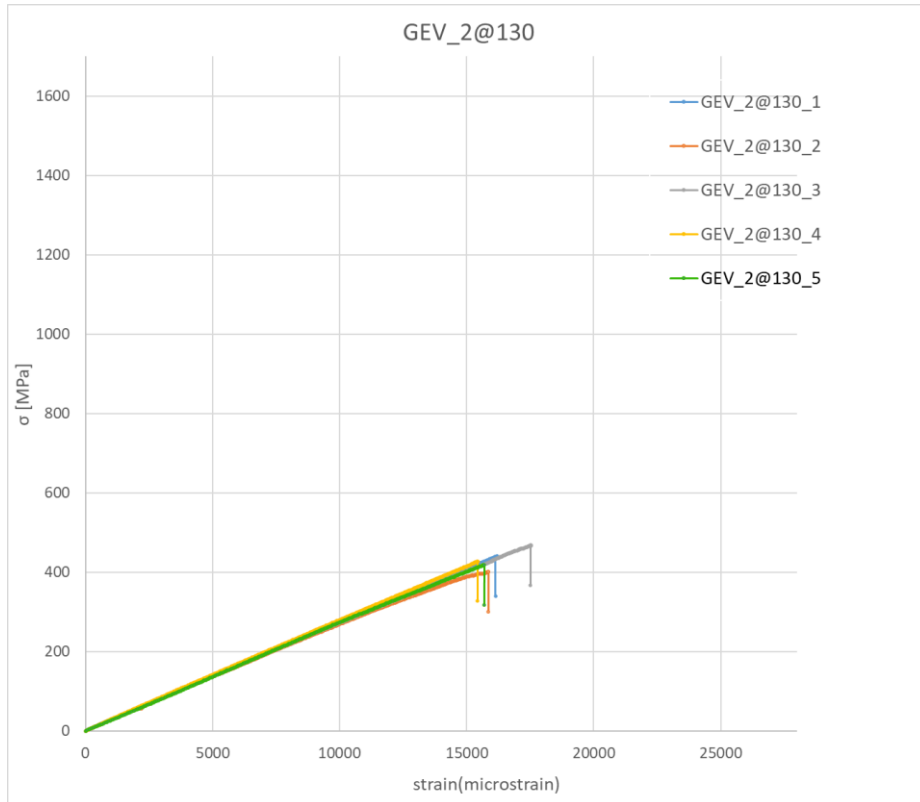
**Σχήμα 3.12:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEV\_2@70.



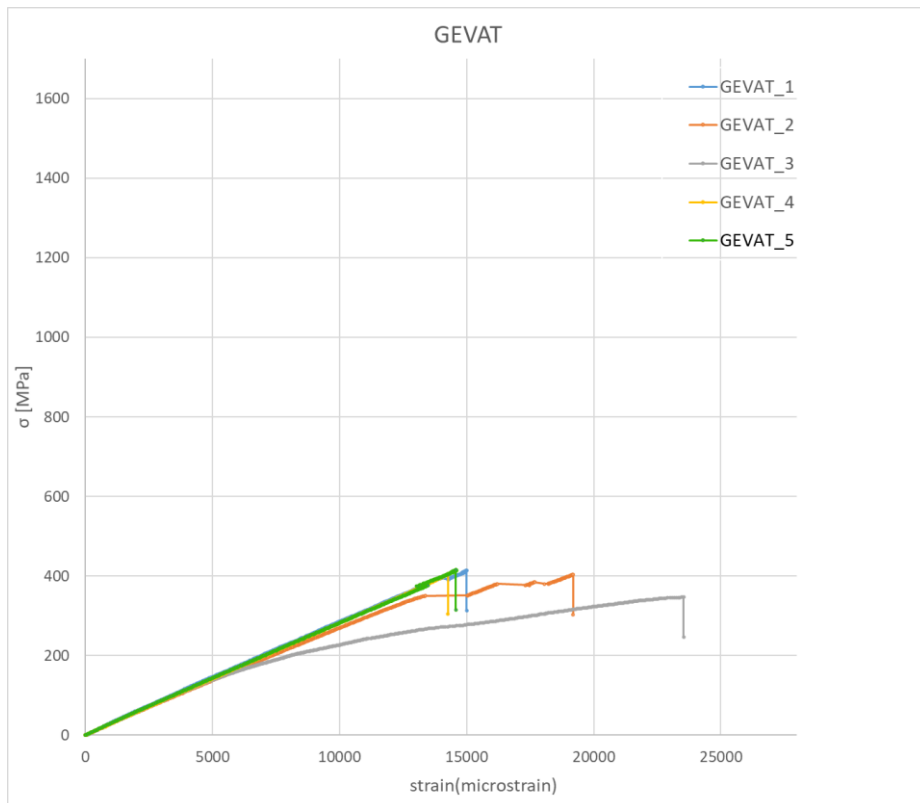
**Σχήμα 3.13:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEV\_5@70.



**Σχήμα 3.14:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEV\_2@100.



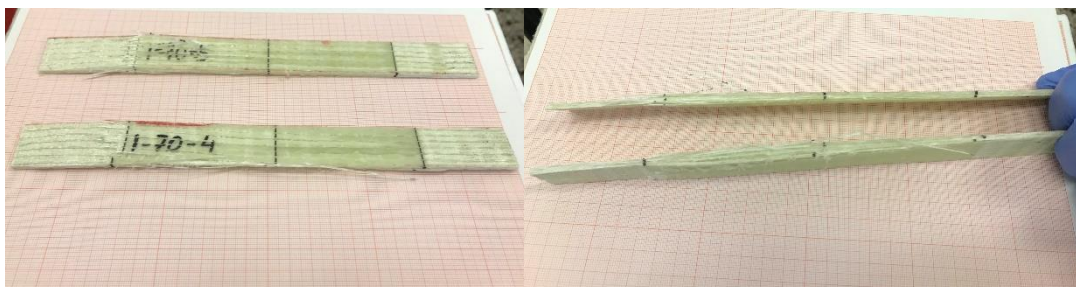
**Σχήμα 3.15:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEV\_2@130.



**Σχήμα 3.16:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GEVAT.

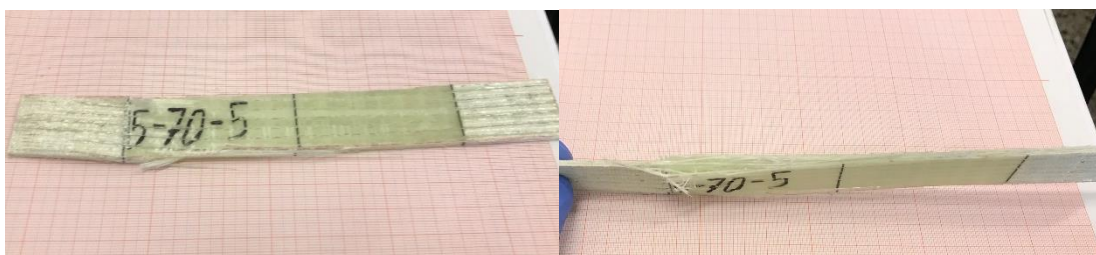
### Αστογίες – Επεξηγήσεις

Τα δοκίμια GEV\_1@70\_4 και GEV\_1@70\_5 παρουσίασαν μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 3 του ίδιου σεναρίου. Τα δοκίμια αυτά φαίνεται να έχουν μεγαλύτερη σύσφιξη από ότι θα έπρεπε στις αρπάγες με αποτέλεσμα να ξεκινά η θραύση αμέσως μετά τις αρπάγες (βλέπε σχήμα 3.17).



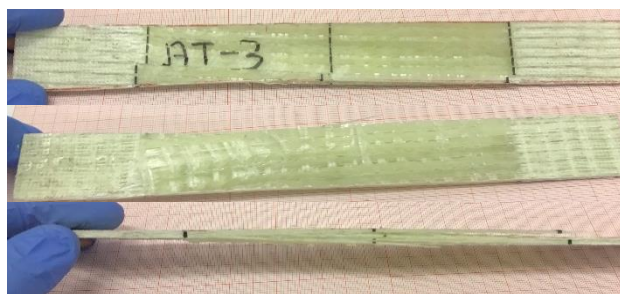
**Σχήμα 3.17:** Δοκίμια GEV\_1@70\_4 και GEV\_1@70\_5 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο GEV\_5@70\_5 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 του ίδιου σεναρίου. Στο δοκίμιο αυτό παρατηρήθηκε κακή ευθυγράμμιση των ινών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.18, με αποτέλεσμα το δοκίμιο να σπάσει υπό γωνία .



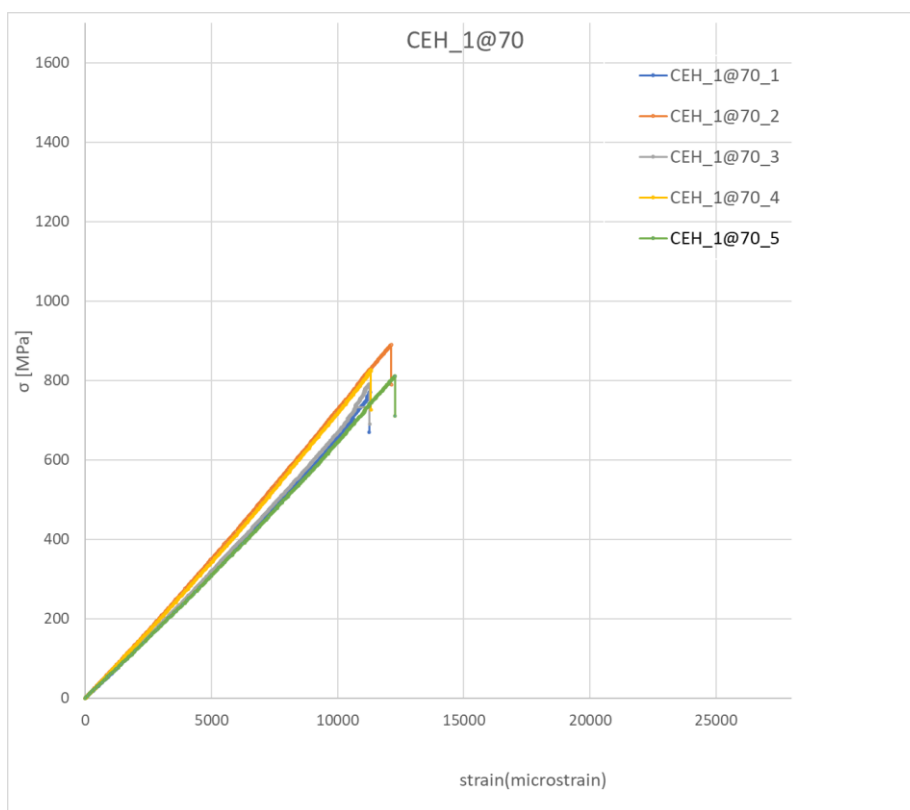
**Σχήμα 3.18:** Δοκίμιο GEV\_5@70\_5 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο GEVAT\_3 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 καθώς επίσης και μετακίνηση του strain gage. Όπως και στο προηγούμενο υπήρξε σφάλμα κατά τη κατασκευή και οι ίνες δεν ήταν ευθύγραμμες σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Όσον αφορά την μετακίνηση του strain gage, αυτή οφείλεται στη μερική θραύση του δοκιμίου αφού έσπασαν ορισμένες ίνες πριν προλάβουν οι υπόλοιπες να λάβουν το μέγιστο φορτίο που μπορούν να αντέξουν (βλέπε σχήμα 3.19).

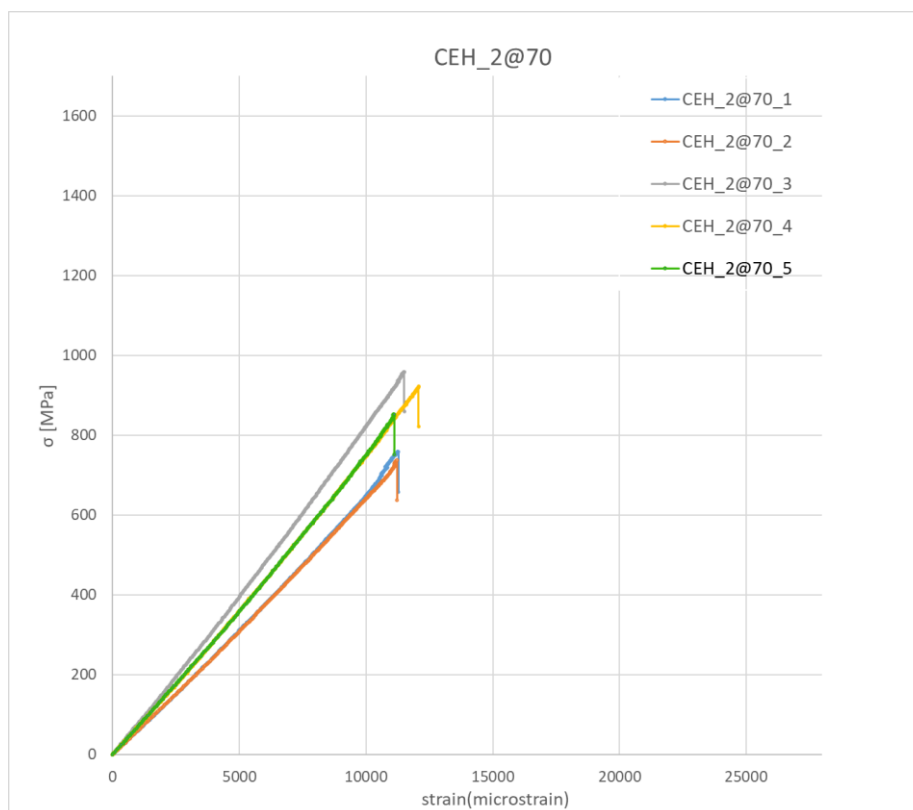


**Σχήμα 3.19:** Δοκίμιο GEVAT\_3 μετά τη θραύση.

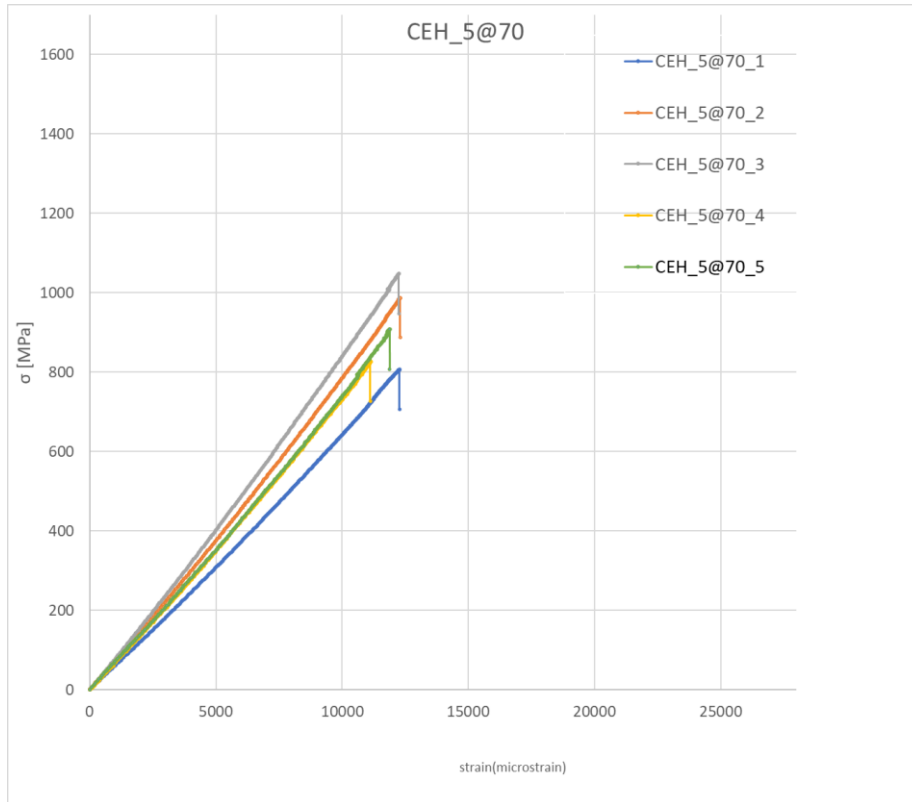
### Δοκίμια CEH (Carbon Epoxy Hand Lay - Up)



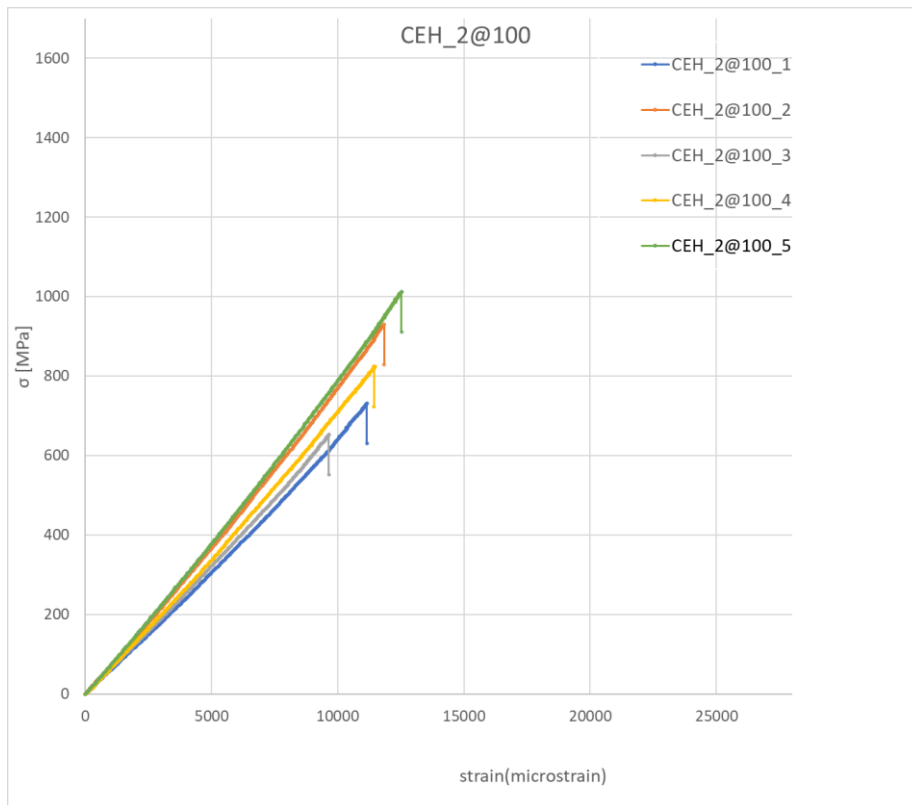
**Σχήμα 3.20:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEH\_1@70.



**Σχήμα 3.21:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEH\_2@70.

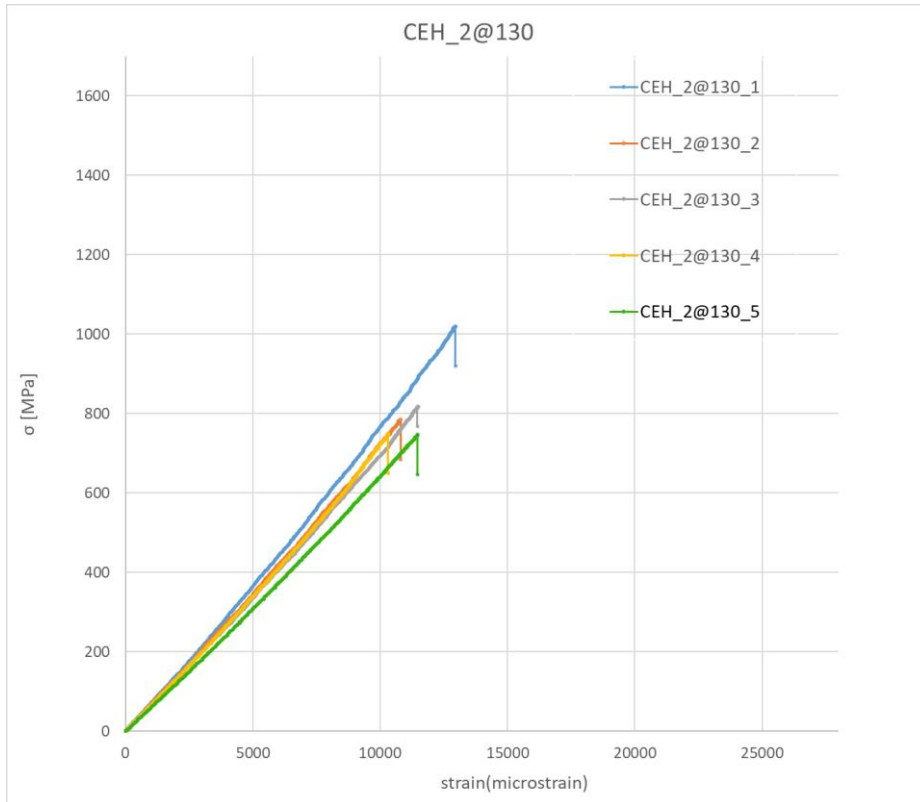


**Σχήμα 3.22:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEH\_5@70 .

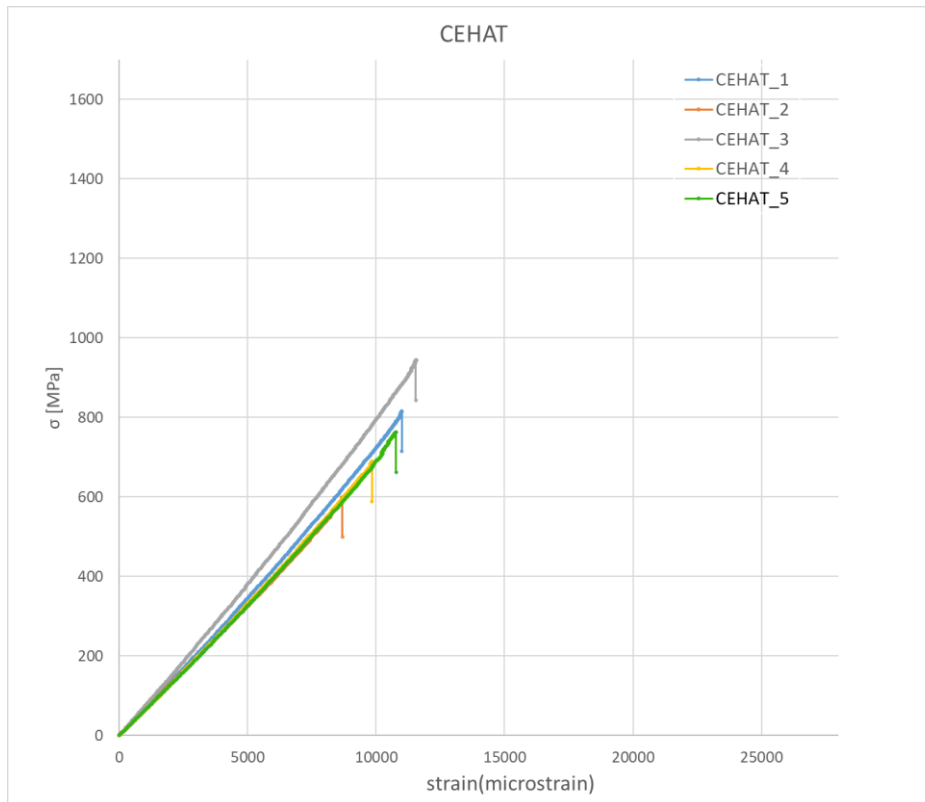


**Σχήμα 3.23:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEH\_2@100.





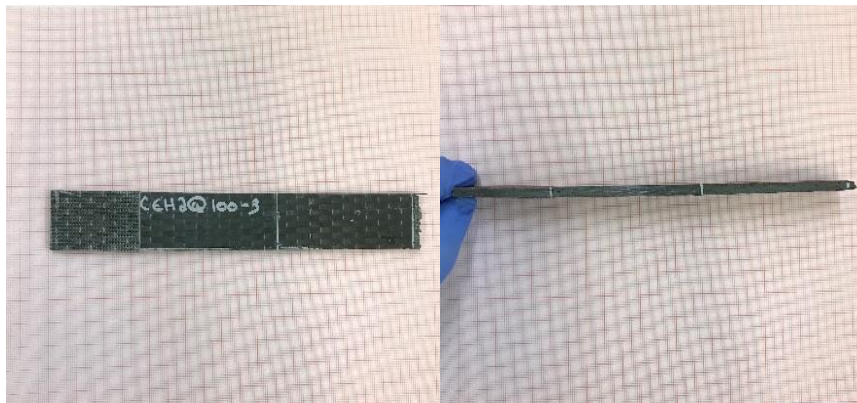
**Σχήμα 3.24:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEH\_2@130.



**Σχήμα 3.25:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEHAT.

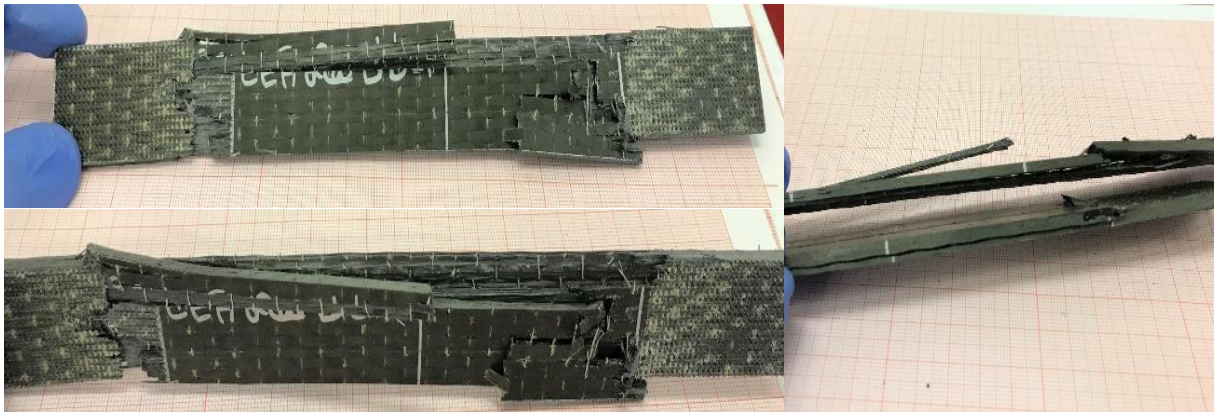
### Αστογίες – Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο CEH\_2@100\_3 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4. Όταν μελετήθηκε μετά τη θραύση παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζει διαφορετικό πάχος καθ' όλο το μήκος του (βλέπε σχήμα 3.26). Αυτό είχε ως αντίκτυπο να γίνει μερική σύσφιξη στα άκρα του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την ύπαρξη συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα των αρτάγων και τη θραύση σε εκείνο το σημείο.



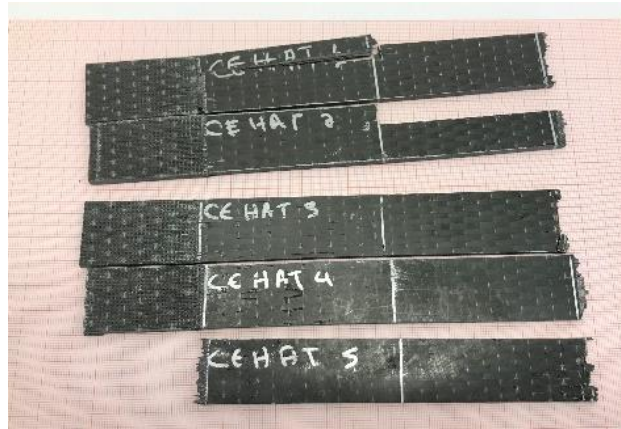
**Σχήμα 3.26:** Δοκίμιο CEH\_2@100\_3 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο CEH\_2@130\_1 παρουσίασε μεγαλύτερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4. Ο λόγος είναι ότι το πάχος του δοκιμίου είναι μικρότερο από αυτό των υπολοίπων (βλέπε σχήμα 3.27).



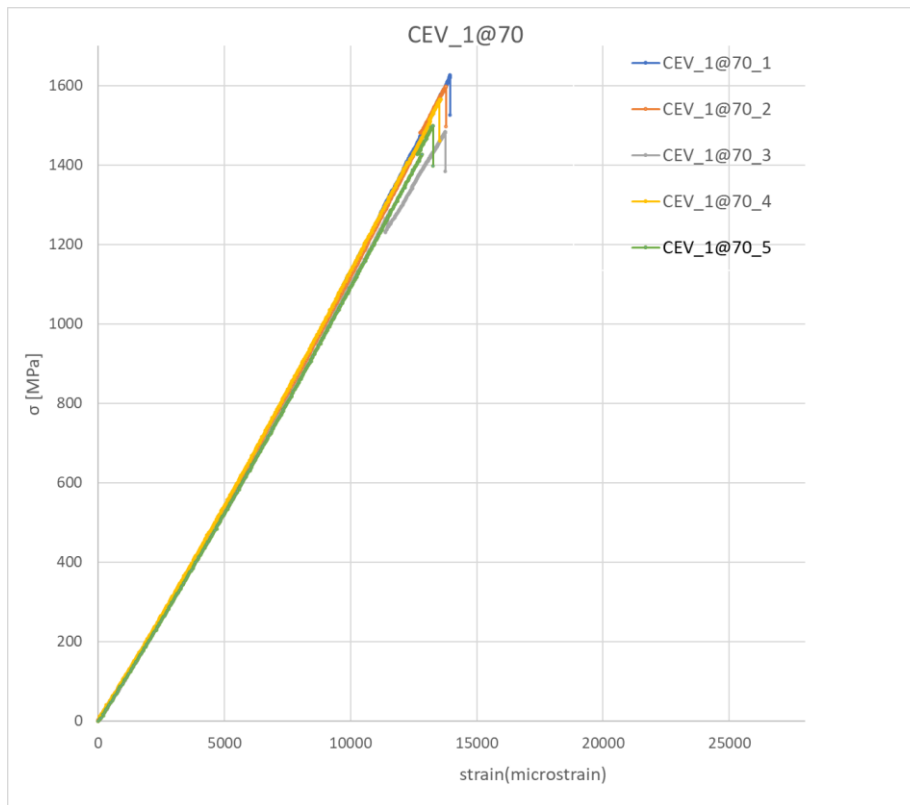
**Σχήμα 3.27:** Δοκίμιο CEH\_2@130\_1 μετά τη θραύση.

Τα δοκίμια CEHAT παρουσιάζουν αισθητή απόκλιση μεταξύ των τιμών της τάσης θραύσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα τα δοκίμια παρουσίασαν πολλαπλές θραύσεις και σε αυτό οφείλεται η απόκλιση αυτή (βλέπε σχήμα 3.28).

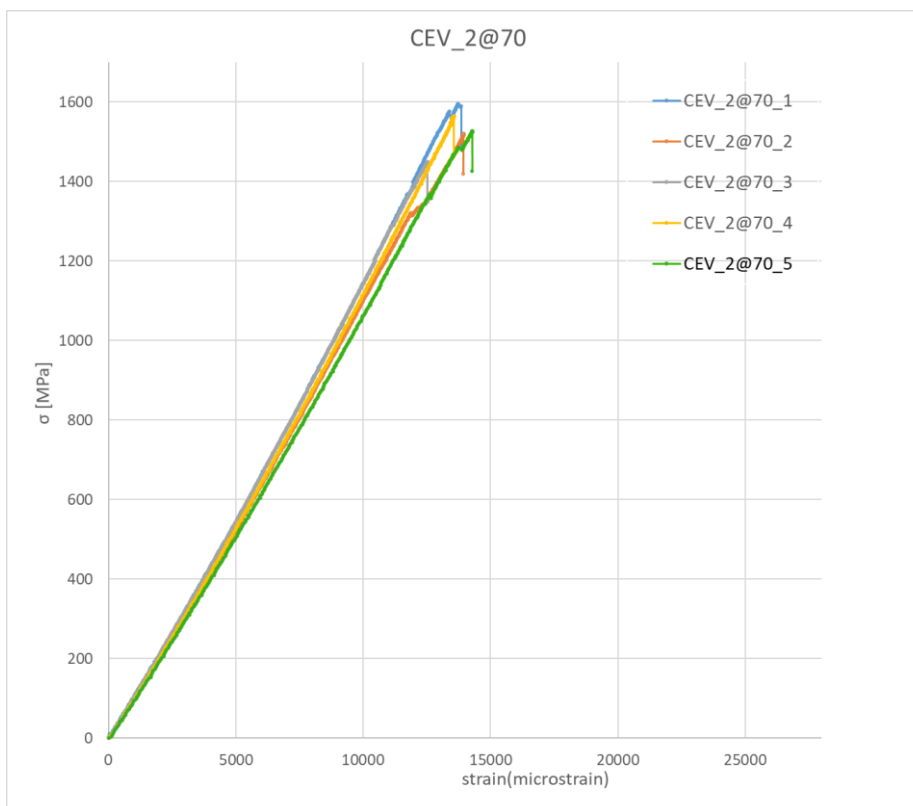


**Σχήμα 3.28:** Δοκίμια CEHAT μετά τη θραύση .

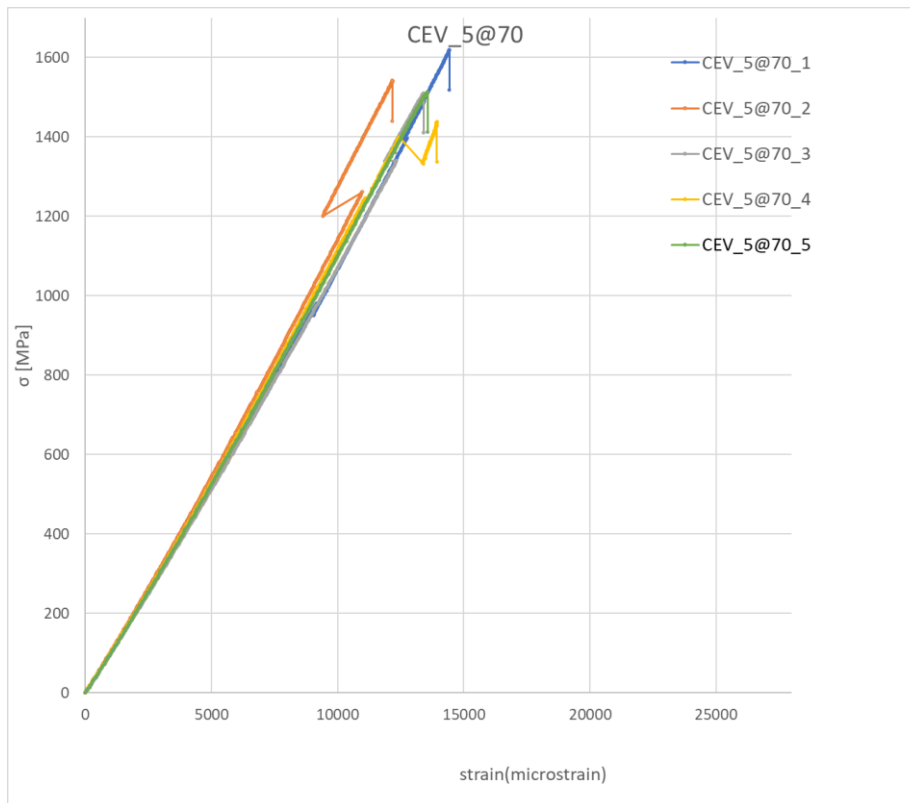
### Δοκίμια CEV (Carbon Epoxy Vacuum Bagging)



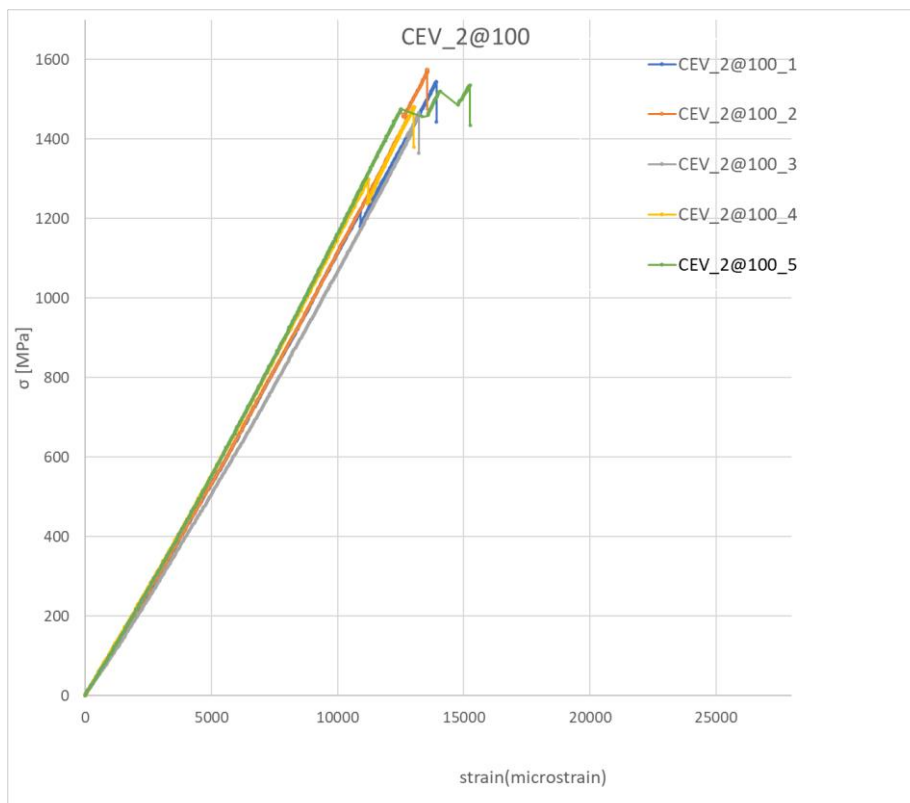
**Σχήμα 3.29:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEV\_1@70.



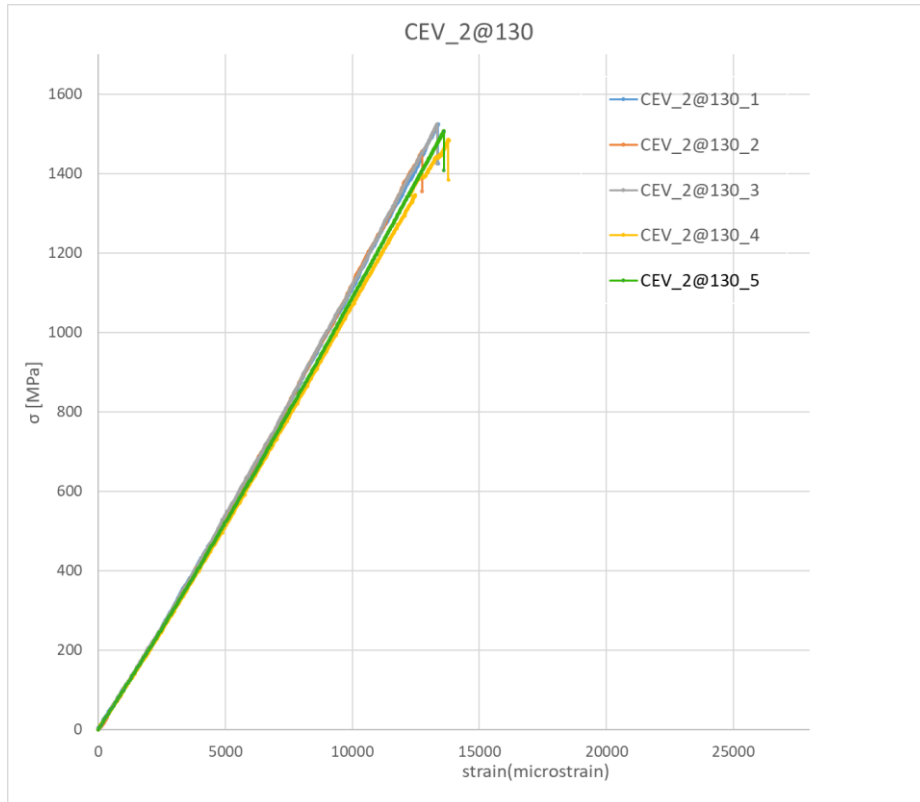
**Σχήμα 3.30:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEV\_2@70.



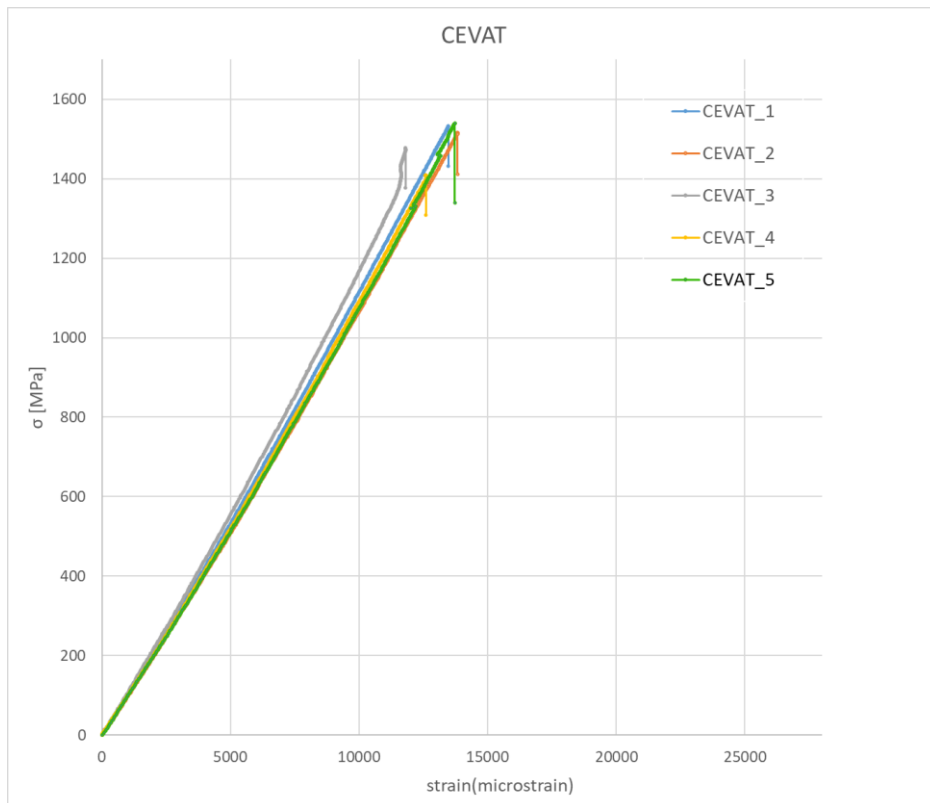
**Σχήμα 3.31:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEV\_5@70.



**Σχήμα 3.32:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEV\_2@100.

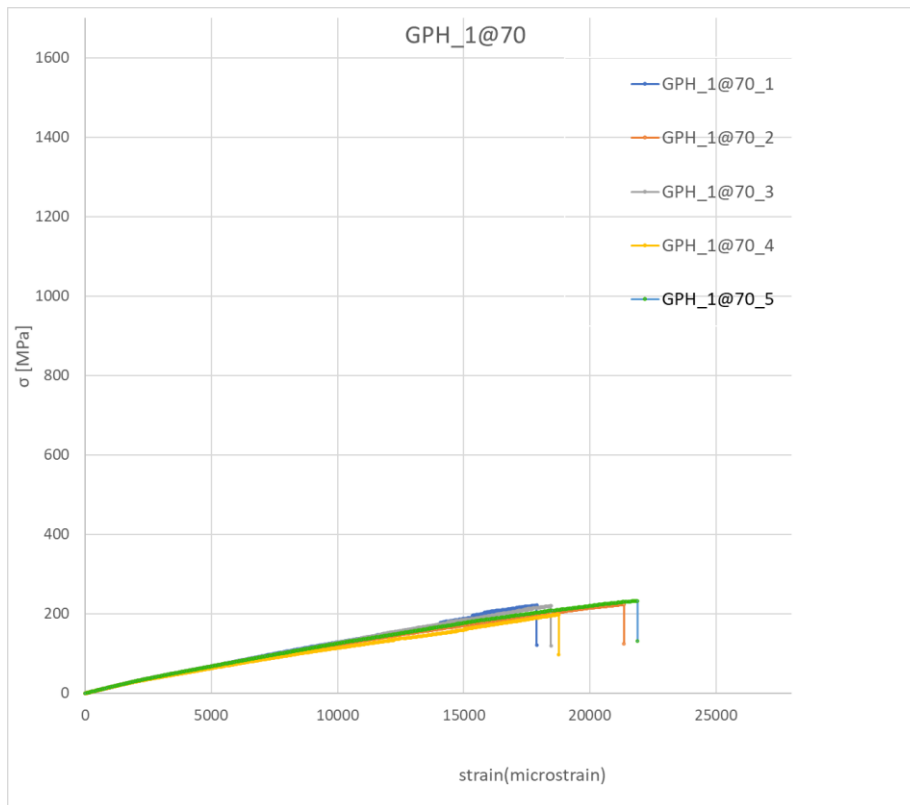


**Σχήμα 3.33:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEV\_2@130.

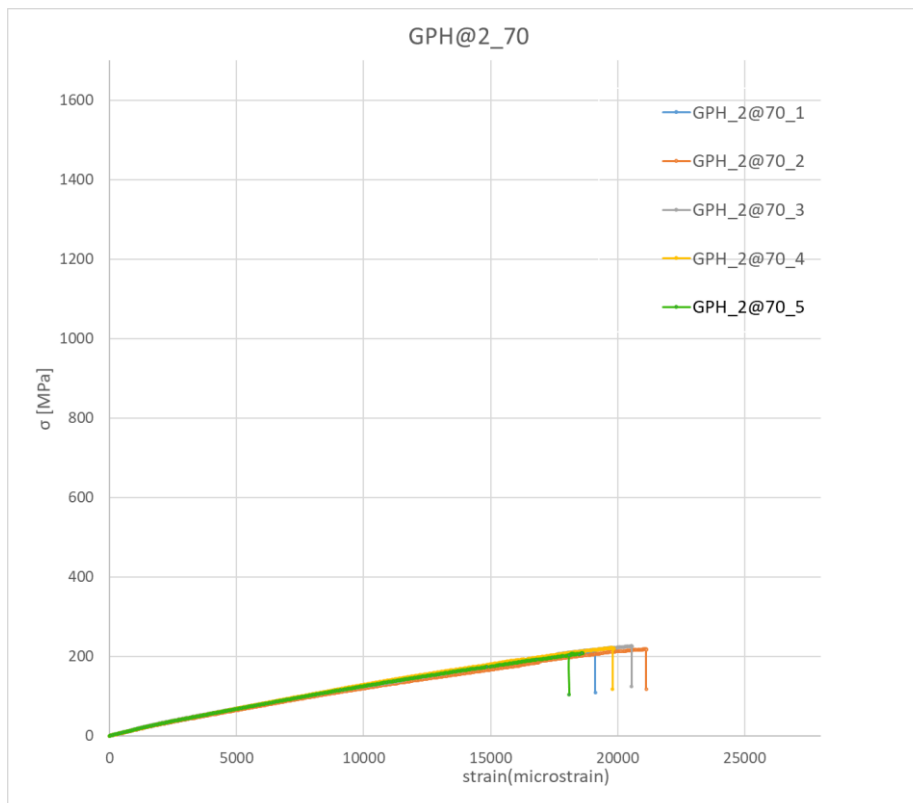


**Σχήμα 3.34:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια CEVAT.

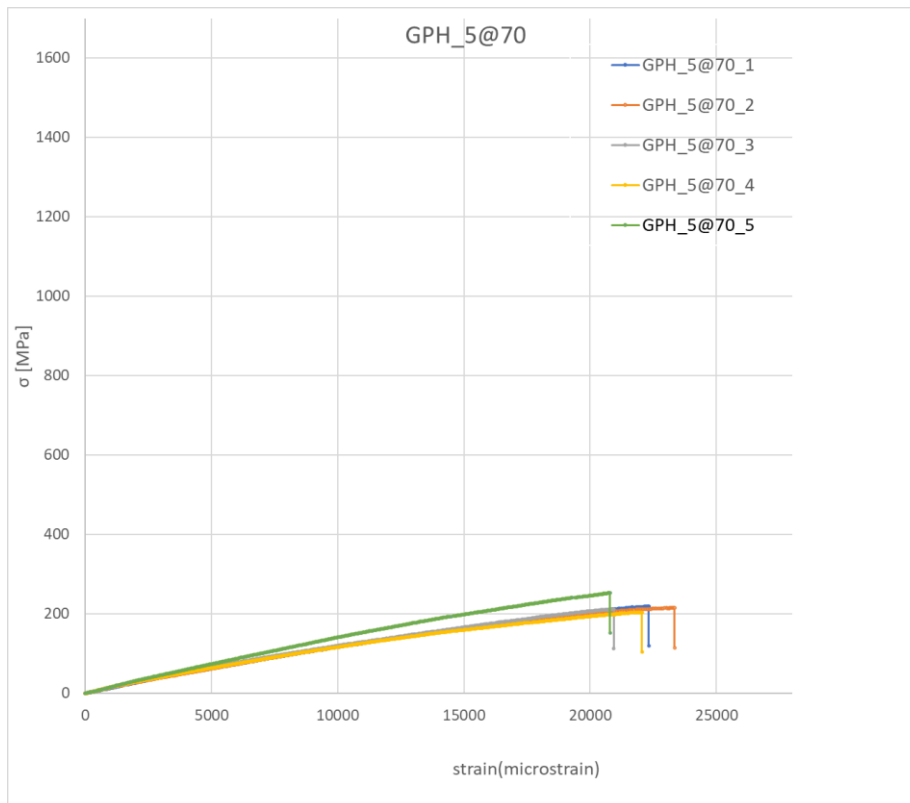
### Δοκίμια GPH (Glass Polyester Hand Lay - Up)



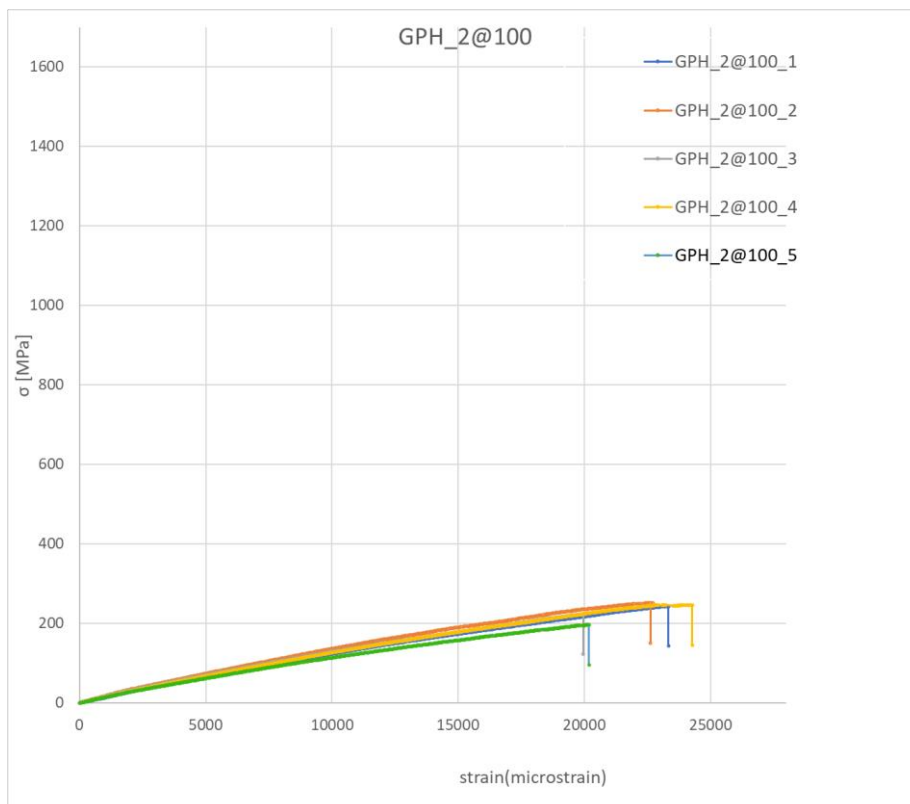
**Σχήμα 3.35:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPH\_1@70.



**Σχήμα 3.36:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPH\_2@70.

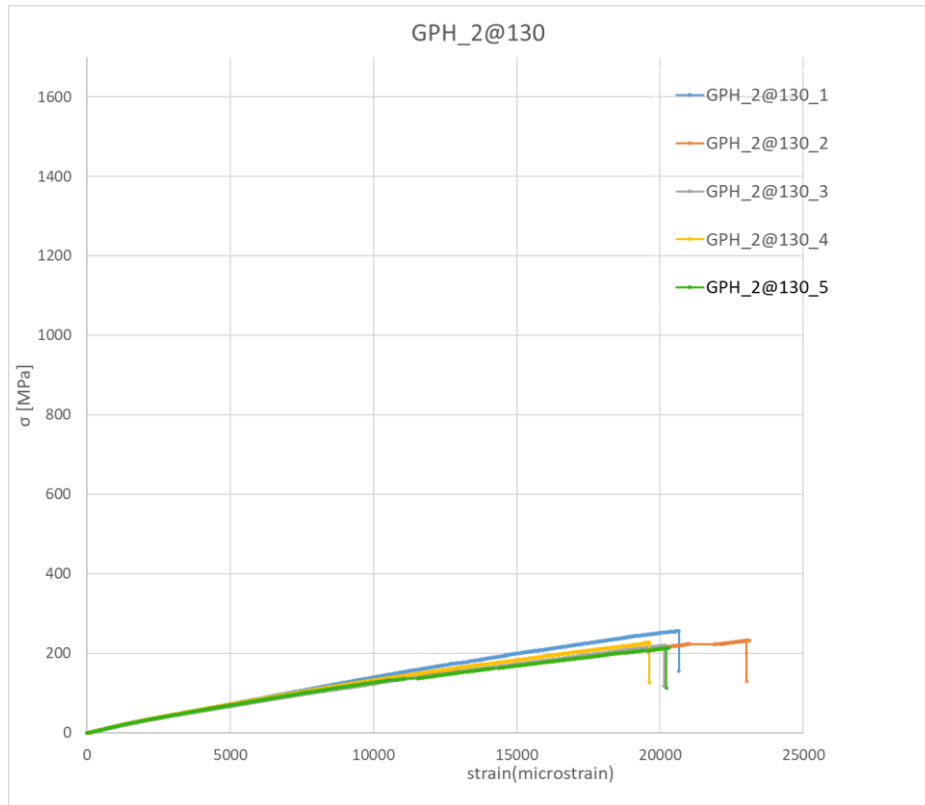


**Σχήμα 3.37:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPH\_5@70.

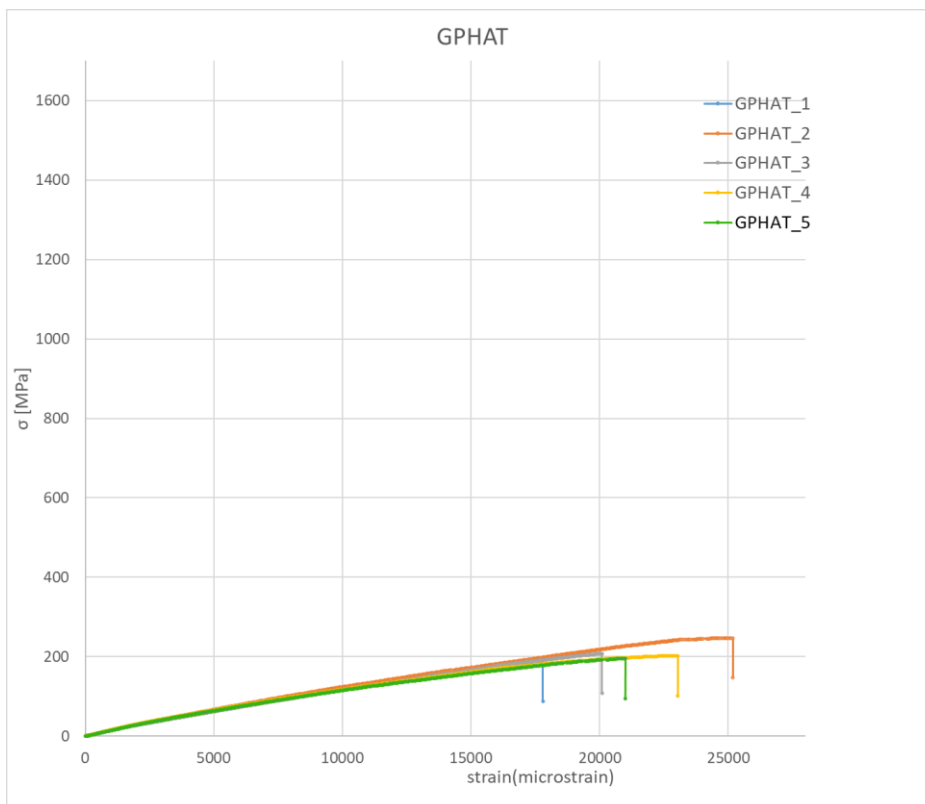


**Σχήμα 3.38:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPH\_2@100.





**Σχήμα 3.39:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPH\_2@130.



**Σχήμα 3.40:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPHAT.

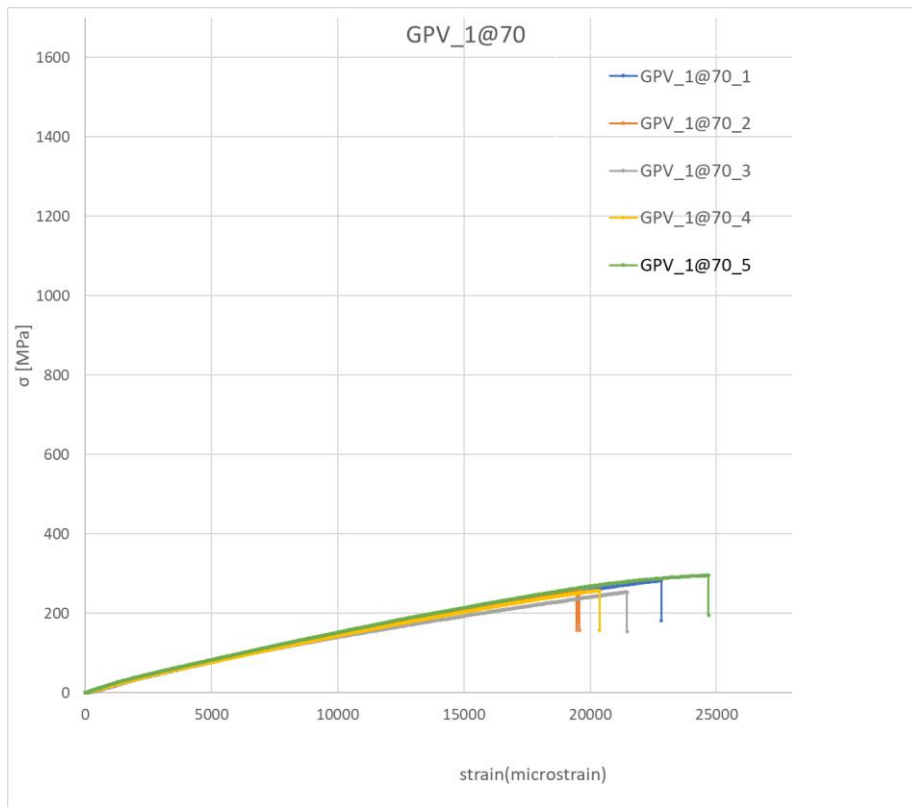
### Αστογίες – Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο GPH\_5@70\_5 παρουσίασε μεγαλύτερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα δοκίμια του ιδίου σεναρίου. Σε αυτήν την περίπτωση η θραύση γίνεται μακριά από τις αρπάγες. Είναι ένα ιδανικό/επιθυμητό σενάριο όπου το δοκίμιο παραλαμβάνει την μέγιστη τάση που μπορεί. Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος έπαιξε ρόλο είναι το ότι η σύσφιξη ήταν σωστή. Από το αποτύπωμα της σύσφιξης φαίνεται ότι δεν ολίσθαινε το δοκίμιο (βλέπε σχήμα 3.41).

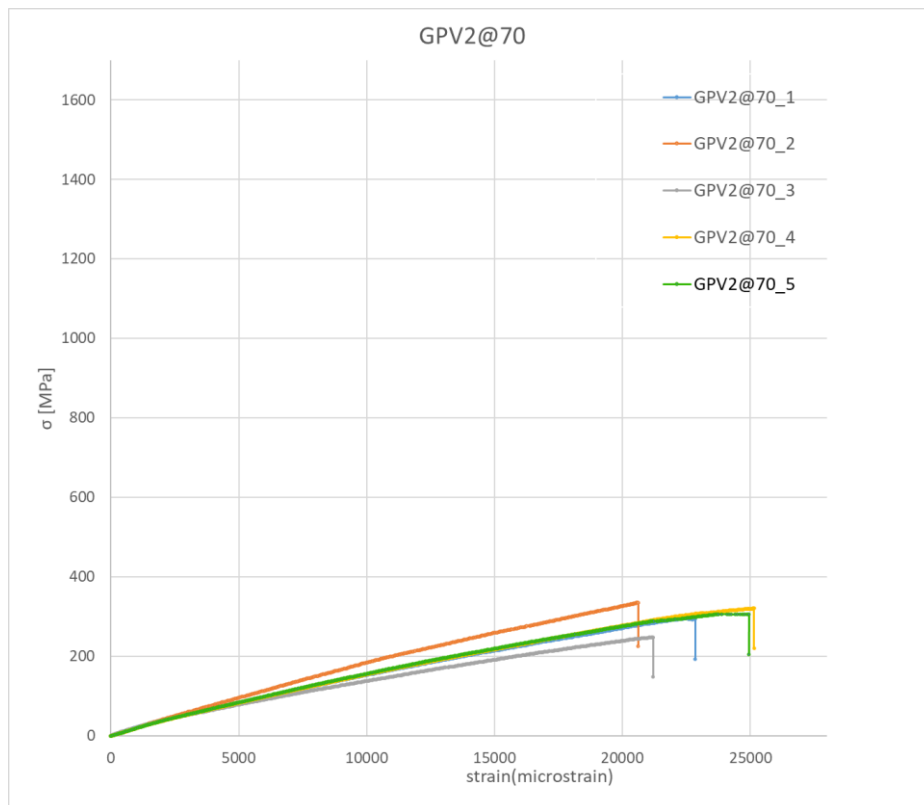


Σχήμα 3.41: Δοκίμιο GPH\_5@70\_5.

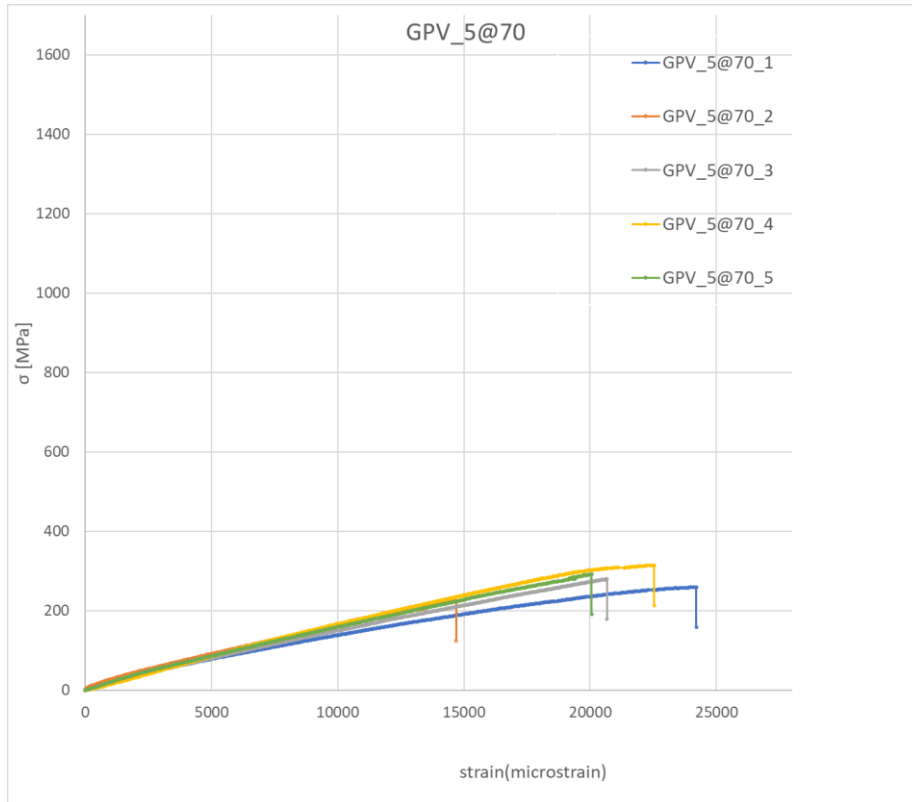
### Δοκίμια GPV (Glass Polyester Vacuum Bagging)



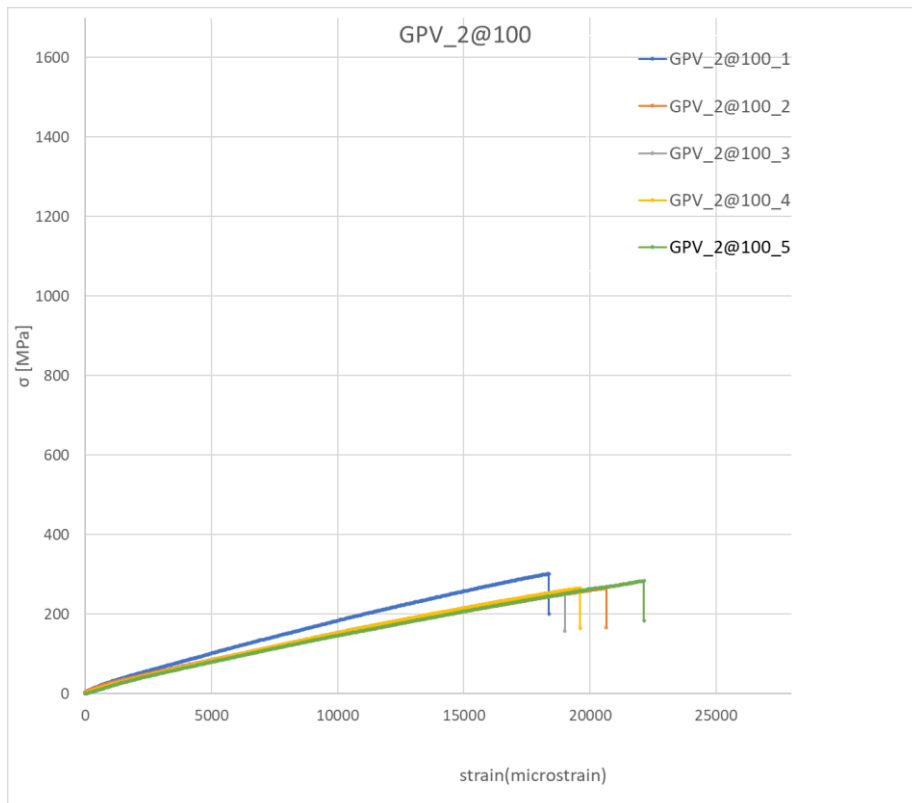
**Σχήμα 3.42:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPV\_1@70.



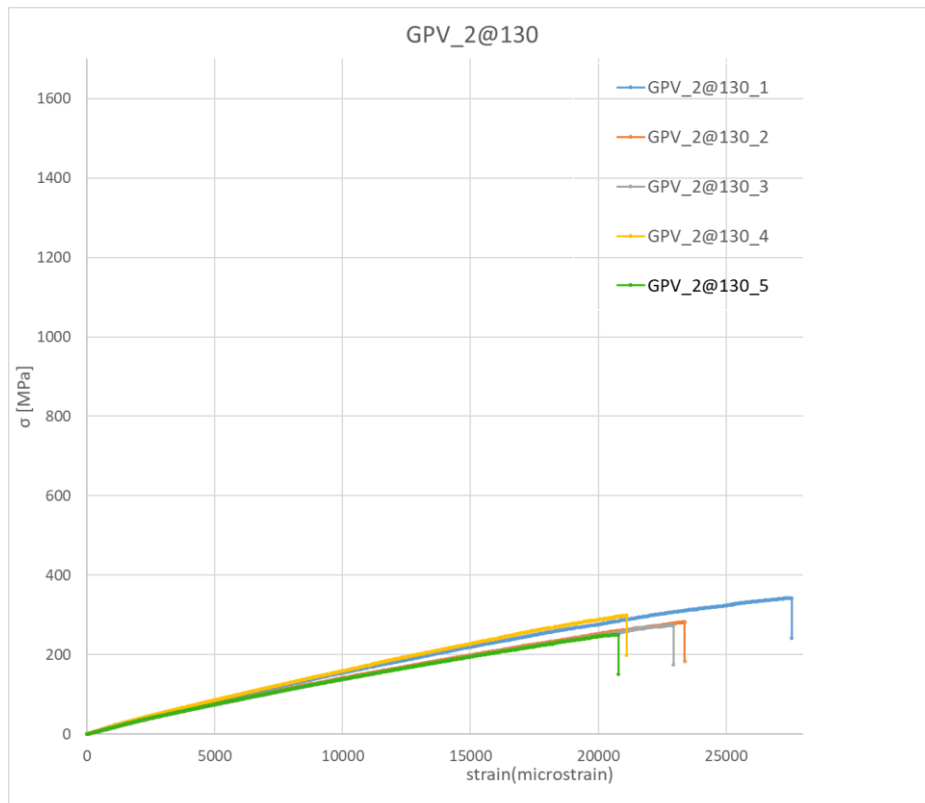
**Σχήμα 3.43:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPV\_2@70.



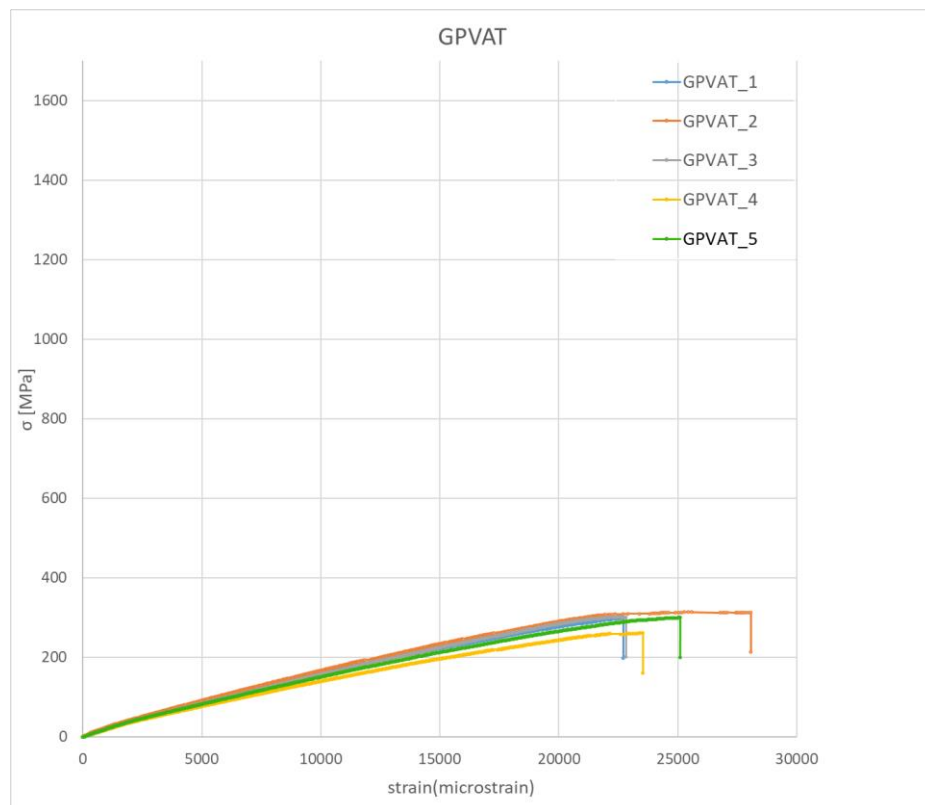
**Σχήμα 3.44:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPV\_5@70.



**Σχήμα 3.45:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPV\_2@100.



**Σχήμα 3.46:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPV\_2@130.



**Σχήμα 3.47:** Γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για τα 5 δοκίμια GPVAT.

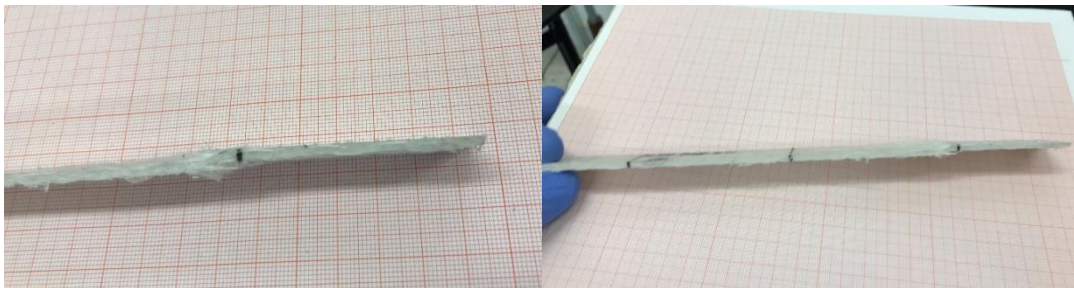
### Αστογίες – Επεξηγήσεις

Το δοκίμιο GPV\_@100\_1 παρουσίασε μεγαλύτερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα δοκίμια του ίδιου σεναρίου. Σε αυτήν την περίπτωση η θραύση γίνεται μακριά από τις αρπάγες. Είναι ένα ιδανικό/επιθυμητό σενάριο όπου το δοκίμιο παραλαμβάνει την μέγιστη τάση που μπορεί. Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος έπαιξε ρόλο είναι το ότι η σύσφιξη ήταν σωστή. Από το αποτύπωμα της σύσφιξης φαίνεται ότι δεν ολίσθαινε το δοκίμιο (βλέπε σχήμα 3.48).



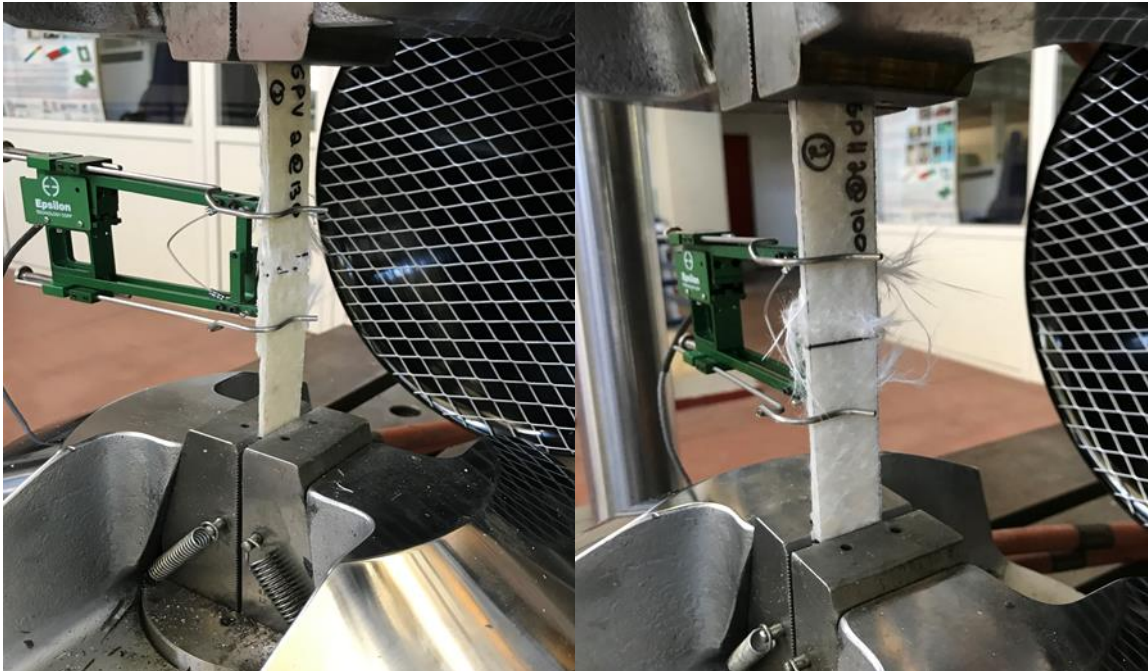
**Σχήμα 3.48:** Δοκίμιο GPV\_2@100\_1 μετά τη θραύση.

Το δοκίμιο GPV\_5@70\_2 παρουσίασε μικρότερη τάση θραύσης από τα υπόλοιπα 4 δοκίμια του ίδιου σεναρίου. Αυτό οφείλεται στο ότι υπήρχε τοπική ανομοιομορφία πάχους στο άκρο του δοκιμίου με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη επιφάνεια σύσφιξης και η θραύση να αρχίζει από το σημείο σύσφιξης (βλέπε σχήμα 3.49).



**Σχήμα 3.49:** Δοκίμιο GPV\_5@70\_2 μετά τη θραύση.

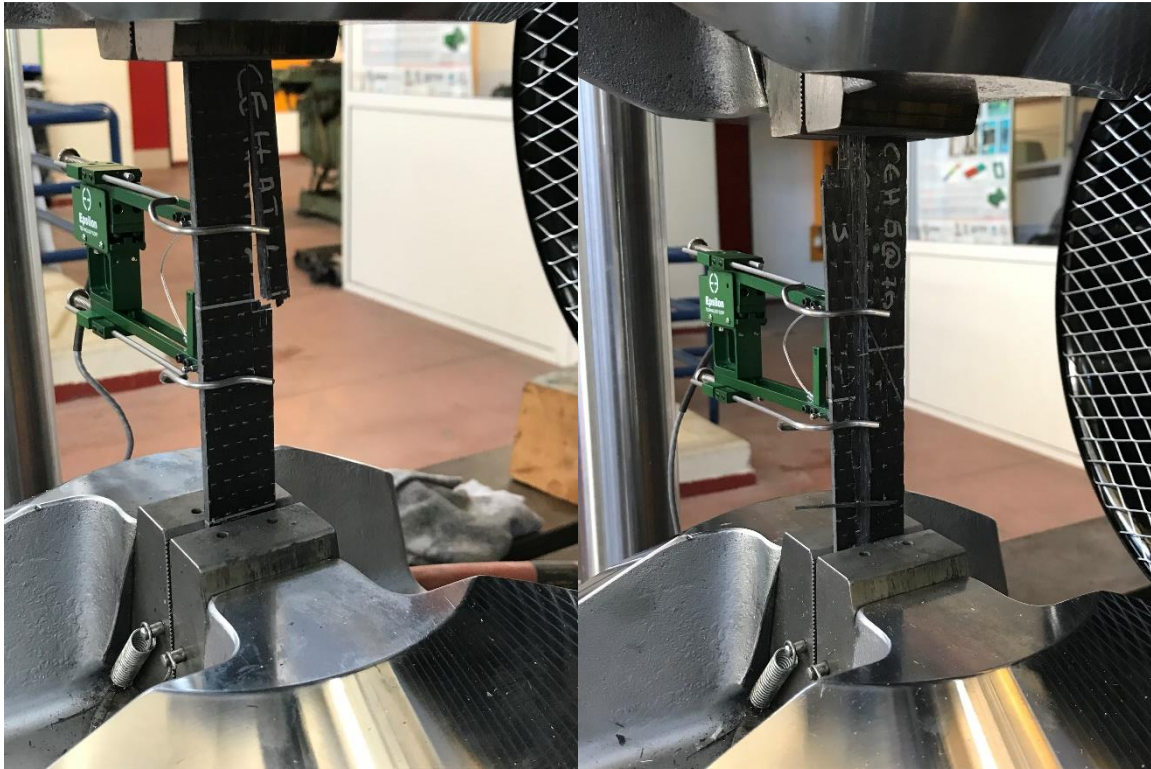
Στην συνέχεια παρατίθεται φωτογραφικό υλικό που αφορά διαφορετικούς τρόπους που έσπασαν τα δοκίμια κατά το πείραμα εφελκυσμού.



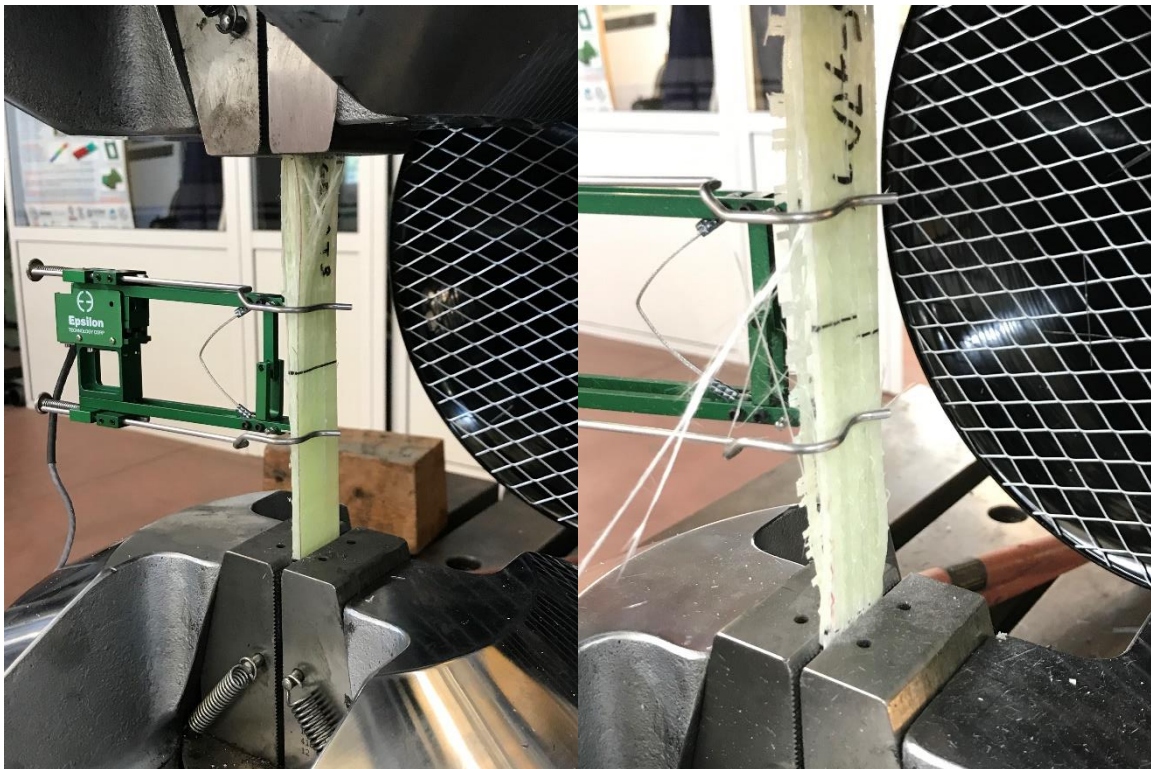
**Σχήμα 3.50:** Δοκίμια που έσπασαν στη μέση.  
Είναι ο επιθυμητός τρόπος θραύσης όπως αναφέρεται στο πρότυπο ISO527



**Σχήμα 3.51:** Δοκίμια που έσπασαν στις αρτάγες.  
Αυτό το είδος θραύσης δεν είναι επιθυμητό καθώς θα έπρεπε να σπάσει στη μέση ούτως ώστε να καταφέρει να παραλάβει το μέγιστο φορτίο.



**Σχήμα 3.52:** Δοκίμα που παρουσίασαν μερική θραύση.  
Η ρωγμή διαδόθηκε μέχρι ενός σημείου και έπειτα αποκόλληθηκε ένα μέρος του δοκιμίου από το υπόλοιπο.



**Σχήμα 3.53:** Δοκίμα που έσπασαν και είχαμε αποκόλληση στρώσεων.



### 3.2.2 Μέγιστη εφελκυστική αντοχή

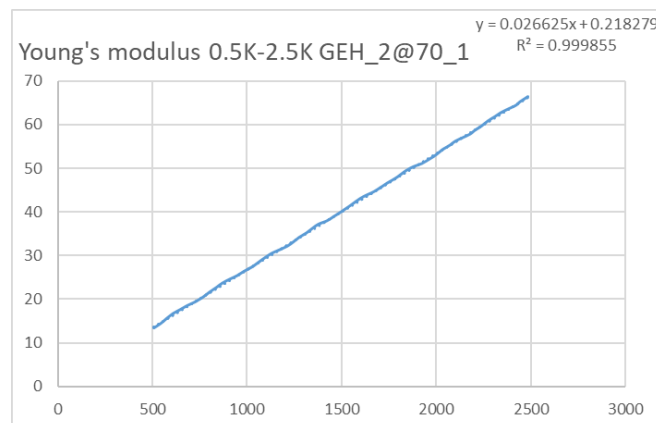
Στην επόμενη σελίδα δίνεται ο πίνακας 3.2 όπου αναγράφεται η τάση θραύσης όλων των δοκιμίων, καθώς και ο μέσος όρος αυτής για τα ομοειδή πέντε δοκίμια της κάθε περίπτωσης. Στην τελευταία στήλη παρουσιάζεται ο συντελεστής διασποράς των τιμών της τάσης θραύσης.

### 3.2.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας

Στο υποεδάφιο αυτό υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας των 180 διαφορετικών δοκιμίων με τη χρήση της εξίσωσης που ακολουθεί: (Δημήτρης Ι. Παντελής 2008)

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3.2)$$

Στα γραφήματα «Τάσης – Παραμόρφωσης» του υποεδαφίου 3.2.1 πραγματοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή (προσαρμογή) για το διάστημα της καμπύλης 500-2500 microstrains όπως προνοεί το ISO\_527-4. Η κλίση λοιπόν της ευθείας που δημιουργήθηκε αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας. Ακολουθεί ενδεικτικά σχήμα με το γράφημα υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου με κωδικό ονομασίας GEH\_2@70\_1, το οποίο είναι ίσο με 26.625 GPa.



**Σχήμα 3.54:** Γραμμική παρεμβολή στο γράφημα Τάσης ( $\sigma$ ) – Παραμόρφωσης ( $\varepsilon$ ) του δοκιμίου GEH\_2@70\_1, για το διάστημα 500-2500 microstrains

Πίνακας 3.2: Τάση θραύσης-Μέσος όρος-Συντελεστής απόκλισης

A/A	Τάση Θραύσης_ $\sigma$ -max (MPa)						COEF.OF VARIANCE
	1	2	3	4	5	Average	
CEH_1@70	771	890	792	827	812	818	6%
CEH_2@70	759	738	959	922	853	846	12%
CEH_5@70	807	987	1049	828	909	916	11%
CEH_2@100	731	931	653	824	1012	830	17%
CEH_2@130	1020	786	818	751	746	824	14%
CEHAT	816	599	944	690	763	762	17%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
CEV_1@70	1627	1598	1484	1562	1499	1554	4%
CEV_2@70	1590	1519	1450	1563	1527	1530	3%
CEV_5@70	1620	1541	1511	1438	1513	1524	4%
CEV_2@100	1544	1576	1465	1481	1536	1520	3%
CEV_2@130	1526	1456	1525	1485	1508	1500	2%
CEVAT	1532	1512	1478	1409	1540	1494	4%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GEH_1@70	531	566	505	566	462	526	8%
GEH_2@70	553	550	530	504	512	530	4%
GEH_5@70	554	491	510	524	563	528	6%
GEH_2@100	528	598	568	508	582	557	7%
GEH_2@130	563	570	555	526	337	510	19%
GEHAT	378	538	524	577	570	517	16%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GEV_1@70	476	478	486	368	405	442	12%
GEV_2@70	406	385	403	338	397	386	7%
GEV_5@70	467	406	414	408	292	397	16%
GEV_2@100	417	419	413	444	381	415	5%
GEV_2@130	432	401	467	427	419	429	6%
GEVAT	414	403	347	405	415	397	7%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GPH_1@70	221	224	220	199	233	219	6%
GPH_2@70	208	217	225	219	204	215	4%
GPH_5@70	219	216	212	204	253	221	8%
GPH_2@100	243	251	223	246	197	232	10%
GPH_2@130	256	230	219	228	214	229	7%
GPHAT	189	248	208	202	195	209	11%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GPV_1@70	282	258	254	257	296	269	7%
GPV_2@70	294	336	248	321	306	301	11%
GPV_5@70	260	225	280	314	292	274	12%
GPV_2@100	301	266	257	265	283	274	6%
GPV_2@130	343	283	275	299	250	290	12%
GPVAT	299	313	301	261	300	295	7%

Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε για όλα τα δοκίμια, το μέσο όρο για κάθε σενάριο θέρμανσης, καθώς και τον συντελεστή διασποράς των τιμών του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκαν.

Πίνακας 3.3: Μέτρο ελαστικότητας-Μέσοι όροι-Συντελεστής διασποράς

A/A	Young's Modulus (Gpa)						COEF.OF VARIANCE
	1	2	3	4	5	Average	
CEH_1@70	61.90	69.14	62.87	68.63	61.04	64.71	6%
CEH_2@70	60.31	60.84	76.90	69.71	71.16	67.78	10%
CEH_5@70	59.71	73.42	79.08	68.65	68.14	69.80	10%
CEH_2@100	60.13	71.20	63.42	67.33	74.34	67.28	9%
CEH_2@130	69.42	65.55	64.31	66.03	59.86	65.03	5%
CEHAT	67.86	65.22	73.80	64.77	64.08	67.15	6%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
CEV_1@70	106.26	104.16	104.12	104.89	102.96	104.48	1%
CEV_2@70	105.65	102.26	108.31	103.49	100.04	103.95	3%
CEV_5@70	102.13	106.87	100.44	104.78	103.54	103.55	2%
CEV_2@100	102.40	105.10	98.42	107.82	108.23	104.40	4%
CEV_2@130	102.55	101.04	102.47	99.15	101.30	101.30	1%
CEVAT	103.61	100.10	109.38	100.45	99.55	102.62	4%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GEH_1@70	25.33	26.20	24.39	25.93	26.26	25.62	3%
GEH_2@70	26.63	26.43	25.61	25.17	24.57	25.68	3%
GEH_5@70	25.30	24.31	24.92	25.37	27.41	25.46	5%
GEH_2@100	25.18	27.04	24.24	23.55	27.36	25.47	7%
GEH_2@130	24.85	26.46	26.02	25.09	25.39	25.56	3%
GEHAT	26.38	27.01	26.86	26.17	25.91	26.47	2%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GEV_1@70	28.88	28.63	29.39	28.48	28.45	28.76	1%
GEV_2@70	27.09	27.94	29.08	29.16	28.40	28.33	3%
GEV_5@70	27.71	30.12	28.90	28.51	28.13	28.67	3%
GEV_2@100	29.15	28.42	27.95	27.77	29.47	28.55	3%
GEV_2@130	27.87	26.83	27.29	28.60	26.88	27.49	3%
GEVAT	29.79	27.36	28.77	28.74	29.14	28.76	3%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GPH_1@70	14.47	15.14	14.84	13.81	14.90	14.63	4%
GPH_2@70	14.01	14.11	15.11	14.75	14.54	14.50	3%
GPH_5@70	13.67	13.54	14.49	13.66	15.96	14.27	7%
GPH_2@100	14.19	16.29	15.24	14.49	13.23	14.69	8%
GPH_2@130	15.29	14.53	14.92	15.59	15.05	15.08	3%
GPHAT	14.49	14.46	13.10	14.38	14.11	14.11	4%
A/A	1	2	3	4	5	Average	
GPV_1@70	17.83	18.19	17.33	17.21	18.00	17.71	2%
GPV_2@70	17.85	20.61	16.10	18.14	18.29	18.20	9%
GPV_5@70	18.19	18.20	17.69	17.25	19.16	18.10	4%
GPV_2@100	20.68	17.49	18.58	16.88	17.64	18.25	8%
GPV_2@130	17.25	16.42	16.07	18.36	16.35	16.89	6%
GPVAT	18.64	18.51	18.71	17.13	18.13	18.22	4%

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4–ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 4.1 Ανασκόπηση

#### 4.1.1 Γενική εικόνα

Στο εδάφιο αυτό γίνεται ανασκόπηση σχετικά με τα αποτελέσματα που αναγράφονται στους πίνακες 3.2 και 3.3, οι οποίοι σχετίζονται με την τάση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας των σύνθετων υλικών που κατασκευάστηκαν.

Μια αρχική γενική παρατήρηση αφορά το σενάριο AT που αντιστοιχεί στα δοκίμια στα οποία έγινε Post Curing χωρίς περαιτέρω επιβολή θερμότητας. Η παρατήρηση αυτή ισχύει για όλα τα σενάρια θέρμανσης (1,2,5@70 και 2@100) πλην αυτού που ξεπέρασε κατά πολύ την Tg (2@130). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σενάριο AT παρουσιάζει χαμηλότερο E από τα υπόλοιπα σενάρια θέρμανσης για τα δοκίμια CEH, CEV, GPH, GPV. Παρατηρήθηκε το αντίστοιχο φαινόμενο και στην τάση θραύσης για τα ίδια σενάρια θέρμανσης, με τη διαφορά ότι αυτό ίσχυε μόνο στα δοκίμια CEH, CEV και GPH. Αυτό δεν αποτελεί απόδειξη, αλλά μια εικόνα ότι η περαιτέρω επιβολή θερμότητας σε θερμοκρασίες κατώτερες ή και ελαφρώς ψηλότερες της Tg, επιδρά θετικά όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας και την τάση θραύσης.

Ο μέσος όρος του συντελεστή διασποράς της τιμής του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο H.L-U μετρήθηκε στο 5,4%, ενώ αυτών που φτιάχτηκαν με V.B μετρήθηκε στο 3,6%.

Στα δοκίμια GEV μετρήθηκαν χαμηλότερα μέτρα ελαστικότητας και τάσεις θραύσης από τα δοκίμια GEH ενώ θεωρητικά θα έπρεπε να συμβεί το αντίθετο. Αυτό συνέβη λόγω του ότι τα δοκίμια GEV ήταν ‘φτωχά’ σε ρητίνη διότι έγινε λάθος κατά τη διαδικασία V.B. και απορρίφθηκε περισσότερη ρητίνη. Συγκεκριμένα υπήρχε διαρροή αέρα σε κάποιο σημείο και λόγω του ότι δεν κατέστη δυνατόν να βρεθεί το σημείο αυτό, αφήσαμε τον απορροφητήρα εν λειτουργία περισσότερη ώρα από όσο θα έπρεπε για να επιτευχθεί η σωστή πίεση στο εσωτερικό.

## 4.2 Συμπεράσματα πειραματικών δοκιμών

Στο εδάφιο αυτό εξάγονται κάποια ειδικά συμπεράσματα που δείχνουν το πώς επηρεάζουν η επιβολή θερμότητας και ο χρόνος έκθεσης αυτής, το μέτρο ελαστικότητας (E) και την τάση θραύσης ( $\sigma$ -max) στα διαφορετικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν.

### 4.2.1 Συμπεράσματα που αφορούν το μέτρο ελαστικότητας (E)

CEH: Σε σταθερή θερμοκρασία 70 °C για τους χρόνους 1, 2 και 5 ωρών παρατηρείται αύξηση του E όσο αυξάνεται ο χρόνος. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEH\_2@70 καταγράφηκε αύξηση 4.7% και στο δοκίμιο CEH\_5@70 καταγράφηκε αύξηση 7.8% σε σχέση με το CEH\_1@70. Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι σταθερός στις 2 ώρες και αλλάζει η θερμοκρασία στους 70, 100 και 130 °C παρατηρείται μείωση του E όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEH\_2@100 καταγράφηκε μείωση 0.7% και στο δοκίμιο CEH\_2@130 καταγράφηκε μείωση 4% σε σχέση με το CEH\_2@70.

CEV: Σε σταθερή θερμοκρασία 70 °C για τους χρόνους 1, 2 και 5 ωρών παρατηρείται πολύ μικρή μείωση του E όσο αυξάνεται ο χρόνος. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEV\_2@70 καταγράφηκε μείωση 0.45 % και στο δοκίμιο CEV\_5@70 καταγράφηκε μείωση 0.89% σε σχέση με το CEV\_1@70.

GPH: Σε σταθερή θερμοκρασία 70 °C για τους χρόνους 1, 2 και 5 ωρών παρατηρείται μικρή μείωση του E όσο αυξάνεται ο χρόνος. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο GPH\_2@70 καταγράφηκε μείωση 0.8% και στο δοκίμιο GPH\_5@70 καταγράφηκε μείωση 2.4% σε σχέση με το GPH\_1@70. Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι σταθερός στις 2 ώρες και αλλάζει η θερμοκρασία στους 70, 100 και 130 °C παρατηρείται αύξηση του E όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο GPH\_2@100 καταγράφηκε αύξηση 1.3% και στο δοκίμιο GPH\_2@130 καταγράφηκε αύξηση 4% σε σχέση με το GPH\_2@70. Εδώ σημειώνεται ότι διαφορές μικρότερες από 2-3% κατατάσσονται μέσα στο περιθώριο πειραματικού λάθους και επομένως θεωρούνται αμελητέες.

Στα δοκίμια GEV, GEH και GPV δεν παρατηρήθηκε μια σαφής αύξηση ή μείωση της τιμής του E. Οι διαφορές ήταν πολύ μικρές και συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η τιμή του E δεν επηρεάστηκε.

### 4.2.2 Συμπεράσματα που αφορούν τη τάση θραύσης ( $\sigma$ -max)

CEH: Σε σταθερή θερμοκρασία 70 °C για τους χρόνους 1, 2 και 5 ωρών παρατηρείται αύξηση της τάσης θραύσης όσο αυξάνεται ο χρόνος. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEH\_2@70 καταγράφηκε αύξηση 3.4% και στο δοκίμιο CEH\_5@70 καταγράφηκε αύξηση 11,9% σε σχέση με το CEH\_1@70. Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι σταθερός στις 2 ώρες και αλλάζει η θερμοκρασία 70,100 και 130 °C παρατηρείται μείωση της τάσης θραύσης όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEH\_2@100 καταγράφηκε μείωση 1.8% και στο δοκίμιο CEH\_2@130 καταγράφηκε μείωση 2.7% σε σχέση με το CEH\_2@70.

CEV: Σε σταθερή θερμοκρασία 70 °C για τους χρόνους 1, 2 και 5 ωρών παρατηρείται μείωση της τάσης θραύσης όσο αυξάνεται ο χρόνος. Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι σταθερός στις 2 ώρες και αλλάζει η θερμοκρασία 70,100 και 130 °C παρατηρείται μείωση της τάσης θραύσης όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο CEV\_2@100 καταγράφηκε μείωση 0.7% και στο δοκίμιο CEV\_2@130 καταγράφηκε μείωση 1.9% σε σχέση με το CEV\_2@70.

GEV: Στην περίπτωση που ο χρόνος είναι σταθερός στις 2 ώρες και αλλάζει η θερμοκρασία 70,100 και 130 °C παρατηρείται μικρή αύξηση της τάσης θραύσης όσο η θερμοκρασία αυξάνεται. Συγκεκριμένα στο δοκίμιο GEV\_2@100 καταγράφηκε αύξηση 7.5% και στο δοκίμιο GEV\_2@130 καταγράφηκε αύξηση 11.1% σε σχέση με το GEV\_2@70.

Στα δοκίμια GEH, GPH και GPV δεν παρατηρήθηκε μια σαφής αύξηση ή μείωση της τιμής της τάσης θραύσης. Οι διαφορές ήταν πολύ μικρές και συνεπώς μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η τιμή της  $\sigma$ -max δεν επηρεάστηκε.

### 4.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη και επέκταση εργασίας

Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και τη συνεπακόλουθη εξαγωγή τελικών συμπερασμάτων, είναι εφικτό να γίνει παράθεση προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση και μελλοντική έρευνα.

Αρχικά, προτείνεται να επαναληφθεί η διαδικασία, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι η επιβολή θερμότητας θα γίνεται ταυτόχρονα με τη δοκιμή εφελκυσμού. Με αυτό τον τρόπο τα αποτελέσματα θα αντικατοπτρίζουν πιο πολύ την πραγματικότητα εφόσον αυτό παρατηρείται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επιρροή που έχει το post curing στην αντοχή των σύνθετων υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία ενός μόνο σεναρίου θέρμανσης και πολλών διαφορετικών σεναρίων post curing.

Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον να καταγραφεί πώς επιδρά η θερμοκρασία και σε άλλες μορφές καταπόνησης, όπως κάμψη, στρέψη, κ.ά., καθώς επίσης και σε διαφορετικές παραμέτρους κατασκευής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα.

Δημήτρης Ι. Παντελής(2008). Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Παπασωτηρίου, Ελλάδα.

Παπανικολάου Γ, Μουζάκης Δ (2007). Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Ελλάδα.

ISO527-4 (1997). Plastics – Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, Copenhagen.

ISO527-1 (1996). Plastics – Determination of tensile properties. Part 1: General Principles, Copenhagen.

Martin R. Tant Hugh L. N. McManus, Martin E. Rogers (1995). High-Temperature Properties and Applications of Polymeric Materials, American Chemical Society, U.S.A.

Northam G. Burton, Ransone Philip O, Schwind Francis A, Rivers H. Kevin (1999). Carbon-Carbon Piston Architectures, NASA, US.

A.H. Cardon, G. Verchery (1985). Mechanical Characterisation of Load Bearing Fibre Composite Laminates, Elsevier Applied Science Publishers, London-New York.

Carlos J Hilado (1990). Flammability Handbook for Plastics, Technomic Publishing Company, U.S.A

Mangalgiri (1999). Composite Materials for Aerospace Applications, Aeronautical Development Agency, India



**BUTANOX M-50  
Resin hardener MEKP 50**



ABL (STEVENS) Resin & Glass  
Unit 4, Millbuck Way,  
Springvale Industrial Estate,  
Sandbach, Cheshire, CW11 3HT  
Tel/Fax: 01270 766685

**1. Identification of the product and the company.**

Substance or preparation trade name: Methyl Ethyl Ketone Peroxide 33% in Dimethyl Phthalate  
Unique reference numbers(s):  
Company/undertaking name & address: As above

Telephone: 01270 766685  
Emergency telephone number:

**2. Information on ingredients**

Substance Name	Value	CAS No	Symbol	R-Phrases
Methyl ethyl ketone peroxide	>33%	1338-23-4	CE	R2-22-34-7
Dimethyl phthalate	>63%	131-11-3		
Methyl ethyl ketone	>1%	78-93-3	FXi	R11-36/37
Balance non hazardous				

**3. Hazards Identification**

May cause fire.  
Harmful if swallowed.  
Causes burns.

**4. First aid measures**

Symptoms and effects:	Harmful if swallowed. Causes burns. Risk of serious damage to eyes.
General:	Call a physician immediately.
Inhalation:	Move to fresh air, rest, half upright position, loosen clothing. Oxygen or artificial respiration if there is difficulty breathing. Seek medical advice after significant exposure.
Skin:	Remove all contaminated clothing immediately. Wash off with plenty of soap and water. Always seek medical advice. Launder clothes before reuse.
Eye: should medical	Rinse immediately and as long as possible with plenty of water. Eyelids be held away from the eyeball to ensure thorough rinsing. Always seek advice.

Ingestion Only when conscious, rinse mouth, give plenty of water to drink (approx. 500ml). DO NOT induce vomiting. Seek medical advice.

Advice to physician. No additional information available.

## 5. Fire fighting measures

Extinguishing media: Waterspray, foam, fire-extinguishing powder, carbon dioxide. Extinguish a small fire with powder or carbon dioxide then apply water to prevent re-ignition.

Unsuitable extinguishing media: Halones

Special exposure hazards: If involved in a fire, it will support combustion. In case of fire and/or explosion do not breathe fumes.

Hazardous decomposition/ Carbon Dioxide, Water, Acetic Acid, Formic Acid, Propanoic Acid, Methyl ethyl ketone

Protective equipment: Wear suitable protective clothing. Wear self contained breathing apparatus.

Other information: Cool closed containers with water.

## 6. Accidental release measures

Personal precautions: Spill should be handled by trained personnel properly equipped with respiratory and eye protection.

Environmental precautions: Notify authorities if liquid enters sewers or public waters. Prevent entry to sewers and public waters.

Methods for cleaning: Clean up any spills as soon as possible, using an absorbent material to collect it, use suitable disposable containers

## 7. Handling and storage

Handling: Never weigh out in the storage room. Keep product and emptied container away from heat and sources of ignition. No sparking tools should be used. Avoid shock and friction. Confinement must be avoided. Do not pipet by mouth. Do not inhale. Never bring peroxide into direct contact with accelerator during processing. Weigh out and add peroxide and accelerator separately.

Fire and explosion: Use explosion protected equipment. Keep away from sources of ignition. No smoking.

Storage requirements: compounds (e.g. regulations. Store in a dry, well-ventilated place away from sources of heat and direct sunlight. Do not mix with peroxide accelerators. Do not mix with reducing agents. Keep container tightly closed in a cool, well-ventilated place. Keep container upright to prevent leakage. Confinement must be avoided.

Other information: When using do not eat, drink or smoke. Wash thoroughly after handling. Keep working separate and do not take them home.

## 8. Exposure Controls / Personal protection

Engineering controls: Ensure good ventilation and local exhaust of the working area. Explosion proof ventilation recommended.

Exposure limits: Methyl ethyl ketone peroxide OES-STEL 1.5 mg/m<sup>3</sup>  
Methyl ethyl ketone QES-TWA 600.0 mg/m<sup>3</sup> Can be absorbed through skin  
OES-STEL 899 mg/m<sup>3</sup> Can be absorbed through skin.

Personal protection:

Respiratory: Do not breathe vapour. Ensure good ventilation and local exhaust of the working area.

Hand: Wear suitable protective gloves of neoprene or synthetic rubber.

Eye: Wear eye/face protection. A face shield is preferred over goggles.

Skin and body: Wear suitable protective clothing and gloves. Take off contaminated clothing immediately.

Other information: Launder clothes before reuse.

## 9. Physical and chemical properties

Appearance:	Liquid
Colour:	Colourless
Odour:	Faint
pH value:	Weak acid
Viscosity:	20 mPa.s
Solubility in water:	Material partially soluble in water.
Flash point (°C):	52 (setaflash ISO 3679)
Autoignition temperature: 1180kg/m <sup>3</sup>	218°C Density:
Peroxide content:	33%
Active oxygen content:	8.8-9%

## 10. Stability and reactivity

Stability:	A dangerous self-accelerating decomposition reaction and, under certain circumstances, explosion or fire can be caused by direct contact with incompatible substances or by thermal decomposition at and above the following temperature: +60° C.
Conditions to avoid:	Violent reactions may be expected with acid, alkali, heavy metals and reducing agents. Avoid contact with rust. Confinement must be avoided. Do not mix with peroxide accelerators Do not mix with reducing agents.
Materials to avoid:	Use only Stainless steel 316, PVC, polyethylene or glass-lined equipment.
Hazardous decomposition products:	Acetic acid. Formic acid, Propanoic acid. Methyl ethyl ketone.
Other Information:	The SADT (self accelerating decomposition temperature) is an experimentally derived temperature at which the product in a typical package will undergo self accelerating decomposition.

## 11. Toxicological information

Name:	Methyl ethyl ketone peroxide 33%
Acute toxicity	
Oral LD50:	rat: 1017 mg/kg (Methyl ethyl ketone peroxide 40%)
Dermal LD50:	rat: 4000mg/kg (Methyl ethyl ketone peroxide 40%)
Inhalation LD50:	rat: 17 mg/1:4 hours exposure time (Methyl ethyl ketone peroxide 40%)
Irritation	
Skin:	Corrosive (Methyl ethyl ketone peroxide 33%)
Eyes:	Severely irritating / Corrosive (Methyl ethyl ketone peroxide 33%)
Genotoxicology:	Ames test Not mutagenic
Name:	Dimethyl phthalate.
Acute toxicity	
Oral LD50:	rat: > 2400 mg/kg
Dermal LD50:	rabbit: >10.000mg/kg
Inhalation LC50:	9300 mg/m <sup>3</sup> (6.5 hours)
Irritation:	
Skin:	Moderately irritating
Eyes:	Minimally irritating
Name:	Methyl ethyl ketone
Acute toxicity:	
Oral LD50:	rat: 2737 mg/kg
Dermal LC50:	rabbit: 6480 mg/kg
Inhalation LC50:	rat: 23.5000 mg/m <sup>3</sup>

## 12. Ecological information

Name:	Based on: Methyl ethyl ketone peroxide 33%
Ecotoxicity	
Fish:	Acute toxicity, 96h-LC50 =44.2 mg/l. (Poecilia reticulata.)
Bacteria:	Activated sludge respiration inhibition test EC50 = 48.0 mg/l
Degradable biotic:	Readily biodegradable (Closed bottle test)
Name:	Based on: Dimethyl phthalate
Ecotoxicity	
Algae:	Selenastrum capricornutum: 39.8 mg/l (96h-IC50)
Other Info:	Bio Concentration Factor (BCF) fish 5.4 (24 hours)
Name:	Based on: Methyl ethyl ketone
Ecotoxicity	
Fish:	Lepomis macrochinis: 96h-LC50:3.22 g/l
Degradable biotic: info:	Readily biodegradable Other Naturally occurring substance

## 13 Disposal Considerations

Product:	Probably in controlled incineration but according to local regulations. The waste should NOT be confined. Absorb the remainder with e.g. vermiculite.
Contaminated packaging:	Collect for recycling or most probably controlled incineration.
Other info:	Dilute before burning with organic solvents. Controlled incineration according to local regulations is always preferred. If not possible burn in small portions on a remote place, using a torch with a long rod to ignite the material.

## 14. Transport information

Hazard labels:	Corrosive, Oxidising		
Land transport			
ADR class:	5.2	ADR item No	5b
RID class:	5.2	RID item No:	5b
Trem-card	Cefic tec @-52G01B	UN No:	3105
Proper shipping name:	Organic peroxide type d, liquid (Methyl Ethyl Ketone Peroxide)		
Sea transport			
IMO/IMDG code:	Page 5225a	Class:	5.2
Packaging group:	11	UN No:	3105
EMS:	5.2 – 01	MFAG	735
Marine pollutant:	No		
Proper shipping name:	Organic peroxide type d, liquid (Methyl Ethyl Ketone Peroxide)		
Air transport			
ICAO-TI/IATA-DGR		UN No:	3105
Class:	5.2	packing group:	11
Proper shipping name:	Organic peroxide type d, liquid (Methyl Ethyl Ketone Peroxide)		

## 15. Regulatory information

Symbols:	Corrosive, Oxidising.
Risk phrases:	R7. May cause fire. R22. Harmful if swallowed.

S Phrases: S3/7 Keep container tightly closed in a cool place.  
S14. Keep away from reducing agents (e.g. amines), acids, alkalis and heavy metal compounds (e.g. accelerators, driers, metal soaps).  
S36/37/39. Wear suitable protective clothing, gloves, and eye/face protection.  
S45. In case of accident or if you feel unwell, seek medical advice immediately (show the label where possible).  
S50. Do not mix with peroxide-accelerators or reducing agents 1 (Internal assessment)

## 16. Other Information

Recommendations/restrictions: None  
The contents and format of this MSDS are in accordance with EEC Commission Directive 2001/58/EC.

**DISCLAIMER OF LIABILITY** The information in this MSDS was obtained from sources which we believe are reliable, However the information is provided without any warranty, Express or implied, regarding its correctness. The conditions or methods of handling, Storage, use or disposal of the [product are beyond our control and may be beyond our knowledge. For this and other reasons, we do not assume responsibility and expressly disclaim liability for loss, damage or expense arising out of or in any way connected with handling, Storage, Use or disposal of the product. This MSDS was prepared and is to be used only for this product. If the product is used as a component in another product, this MSDS information may not be acceptable.

---

## UPR IS 970 TA

---

**Type**

UPR IS 970 TA is a thixotropic pre-accelerated unsaturated polyester resin based on isophthalic acid. Its good chemical resistance in combination with very good mechanical properties make IS 970 TA ideal for the construction of boats, tanks, pipes and foodstuff containers. Post curing is needed especially in the case of foodstuff containers (three hours at 80oC).

**Principal properties**

- Excellent wetting properties.
- Good chemical resistance.
- Very good mechanical properties.

**Specifications**

Colour .....	bluish
Viscosity	
Brookfield RVF, 25°C, spindle 2 at 2 rpm (ASTM D 2196) .....	2.800 m.Pas (cP)
Brookfield RVF, 25°C, spindle 2 at 20 rpm (ASTM D 2196) .....	700 m.Pas (cP)
Thixotropy index, sp.2, speed 2/20 (ASTM D 2196) .....	4,0
Styrene content (ISO 3251).....	42%
Acid value (DIN 53402).....	17
Density, 25°C.....	1,1 gr/cm <sup>3</sup>
Flash point.....	33°C
Minimum stability, in dark .....	5 months
Gel time, 20°C (ASTM D 2471) [UPR IS 970 TA with 1,5% MEKP] .....	20 - 30 min

**Typical properties of cured resin:**

Barcol hardness.....	47
Heat distortion temperature (ASTM D 648) .....	87°C
Density .....	1.17gr/cm <sup>3</sup>
Tensile strength .....	70 N/mm <sup>2</sup>
Tensile modulus of elasticity .....	3500 N/mm <sup>2</sup>
Flexural strength .....	125 N/mm <sup>2</sup>
Flexural modulus .....	3800 N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break .....	2.2%

**Typical properties of laminates with mat 450 (glass content 33%):**

Density .....	1.49 gr/cm <sup>3</sup>
Tensile strength .....	130 N/mm <sup>2</sup>
Tensile modulus.....	8600 N/mm <sup>2</sup>
Flexural strength .....	210 N/mm <sup>2</sup>
Flexural modulus .....	7800 N/mm <sup>2</sup>
Compressive strength .....	120 N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break .....	2.3%

All information is given in good faith but without warranty. We cannot accept responsibility or liability for any damage, loss or patent infringement resulting from the use of this information.

Revision date: 01/06/2009

TCK Chemicals  
38th km NEOAK, 19100, Megara (PO Box 29), Greece

Tel.: +30 22960 83311, Fax: +30 22960 83335  
E-mail: tck@otenet.gr

## R9430 / H843\_ Laminating epoxy system

The 9430 / 843\_ system exhibits high mechanical properties, low odor during application and low cost. The maximum temperature resistance is at least 90 °C; however, some post curing is required in order to have service temperature of 60 – 70 °C.

### Fast hardener H8436

Offers fast hardening at low temperature, low surface pollution, demolding of small parts after one night at 20 - 25 °C and excellent mechanical properties after post curing at 40 to 60 °C.

### Hardeners H8433

Offers fast hardening of laminates at ambient temperature for hand laminating, press or vacuum. Good mechanical properties at ambient temperature, excellent after post cure.

### Epoxy resin R9430

Aspect / colour		Clear liquid
Viscosity (mPa.s) <i>Rheometer</i> <i>CP 50 mm</i> <i>Shear rate 10 s<sup>-1</sup></i>	15 °C	5600 ± 1 000
	20 °C	2900 ± 600
	25 °C	1600 ± 300
	30 °C	900 ± 200
	40 °C	400 ± 100
Density <i>Pycnometer</i> <i>NF EN ISO 2811-1</i>	20 °C	1.175 ± 0.01
		24 months, do not crystallize
Storage		

### Hardeners H843\_

		H8436	H8433
Reactivity		<b>"ultra fast"</b>	<b>"standard"</b>
Aspect / colour		Yellow liquid	Yellow liquid
Viscosity (mPa.s) <i>Rheometer</i> <i>CP 50 mm</i> <i>Shear rate 10 s<sup>-1</sup></i>	15 °C	1 100 ± 200	190 ± 40
	20 °C	650 ± 120	120 ± 25
	25 °C	400 ± 80	90 ± 20
	30 °C	250 ± 50	60 ± 15
Density <i>Pycnometer</i> <i>NF EN ISO 2811-1</i>	20 °C	1.04 ± 0.01	1.01 ± 0.01



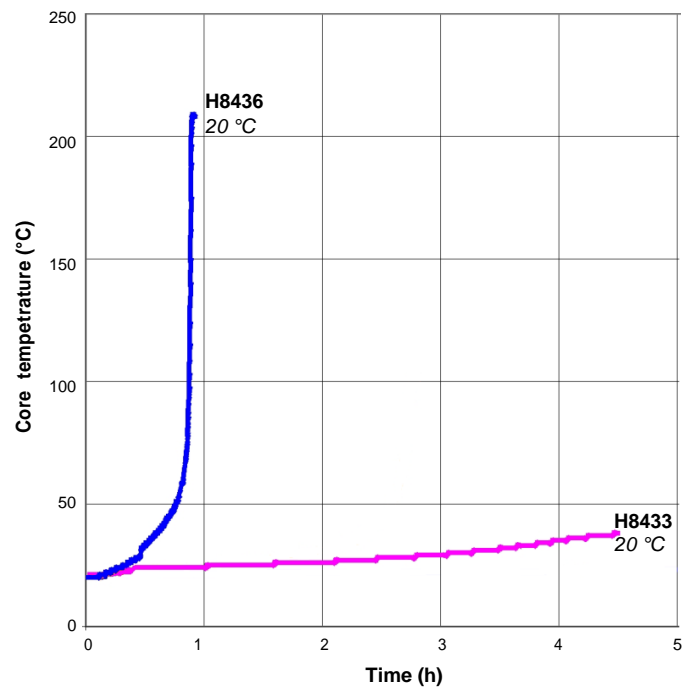
### R9430 / H843\_ mix properties

		R9430 / H8436	R9430 / H8433
Weight ratio		100 / 37 g	100 / 37 g
Volume ratio		100 / 42 ml	100 / 43 ml
Mix viscosity	20 °C	1200 ± 250	1050 ± 200
<i>Rheometer</i>	25 °C	850 ± 200	620 ± 100
<i>PP 50 mm</i>			
<i>Shear rate 10 s<sup>-1</sup></i>	30 °C	700 ± 100	430 ± 100

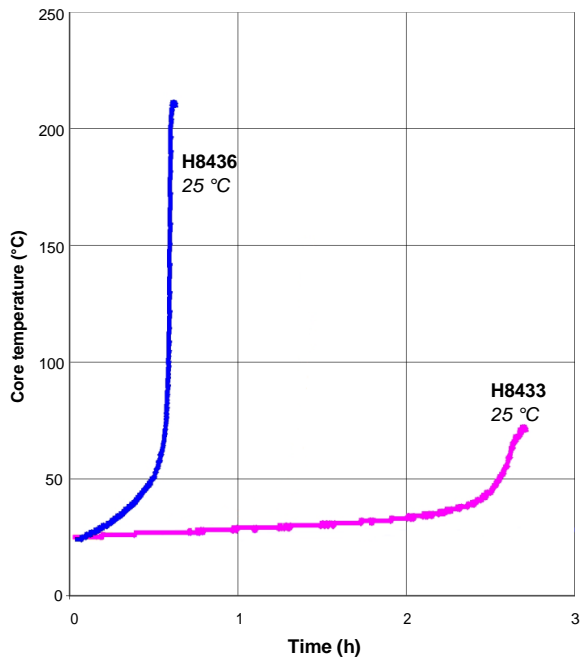
### R9430 / H843\_ mix reactivity

		R9430 / H8436	R9430 / H8433
Exothermic temperature for 100 g mix:			
	30 °C	> 200 °C	150 °C
	25 °C	> 200 °C	70 °C
	20 °C	> 200 °C	40 °C
Time to reach exothermic peak for 100 g mix:			
	30 °C	16'	1 h 28'
	25 °C	37'	2 h 41'
	20 °C	54'	4 h 26'
	30 °C	12'	1 h 09'
	25 °C	29'	2 h 33'
	20 °C	46'	na

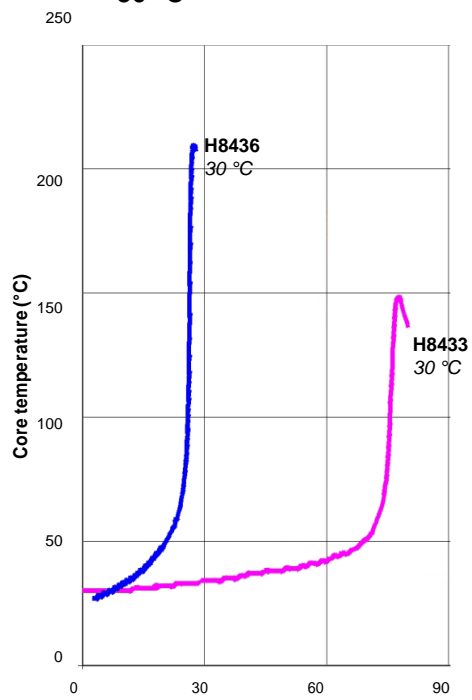
### Mass reactivity – core temperature evolution for 100 g mix - 20 °C



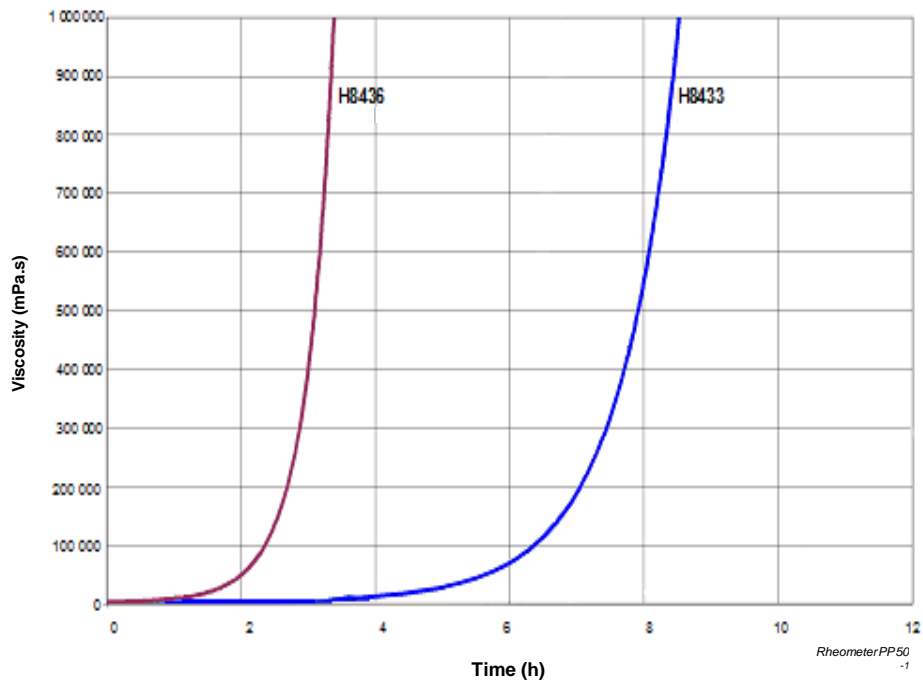
**Mass reactivity – core temperature evolution for 100 g mix - 25 °C**



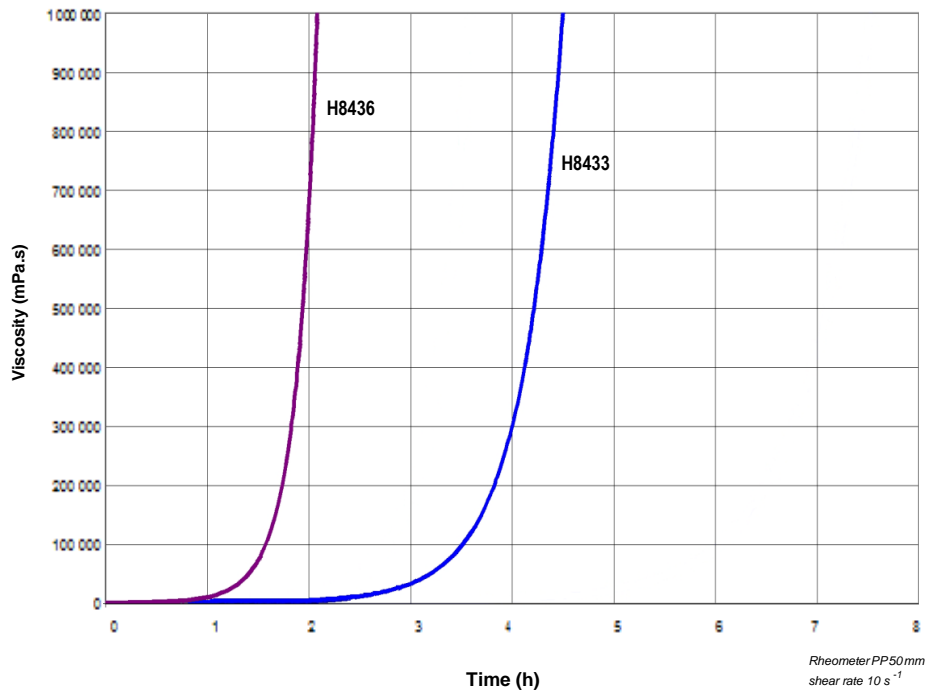
**- 30 °C**



### Reactivity – 1 mm film viscosity evolution - 20 °C



- 30 °C



**Mechanical properties of non reinforced resin system:**

		<b>R9430 / H8436</b>			
		10 days 23 °C	24 h 23°C. + 24h 40°C	24 h 23°C + 16 h 60°C	24 h 23°C + 8 h 80 °C
<b>Tensile</b>					
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3500	3240	3040	2950
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	47	79	87	84
Resistance at break	N/mm <sup>2</sup>	47	79	81	77
Elongation at max. resistance	%	1.3	3	5	5
Elongation at break	%	1.3	3	6	8
<b>Flexion</b>					
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3800	3500	3500	3300
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	99	118	135	123
Elongation at max. load	%	3	4	6	6
Elongation at break	%	3	6	12	12
<b>Charpy impact strength</b>					
Resilience	kJ/m <sup>2</sup>	12	20	28	34
<b>Glass transition</b>					
Tg1	°C	50	69	89	91
Tg1 max.	°C				94

Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates. Measures undertaken according to the following norms:

Tension:

NF T 51-034

Flexion:

NF T 51-001

Charpy impact strength:

NF T 51-035

Glass transition DSC:

ISO 11357-2: 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz

Tg1 or Onset: 1st point at 20 °C/mn

**Mechanical properties of non reinforced resin system:**

		<b>R9430 / H8433</b>			
		10 days 23 °C	24 h 23 °C + 24h 40°C	24 h 23°C + 16 h 60° C	24 h 23°C + 8 h 80 °C
<b>Post cure cycles</b>					
<b>Tensile</b>					
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	2900	3010	2900	2640
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	39	70	69	70
Resistance at break	N/mm <sup>2</sup>	39	70	67	70
Elongation at max. resistance	%	1.5	3.0	3.6	4.3
Elongation at break	%	1.5	3.1	4.1	4.5
<b>Flexion</b>					
Modulus of elasticity	N/mm <sup>2</sup>	3438	3200	3070	2570
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	69	104	117	108
Elongation at max. load	%	2.0	3.6	5.5	6.4
Elongation at break	%	2.1	3.8	9.2	8.4
<b>Charpy impact strength</b>					
Resilience	kJ/m <sup>2</sup>	7	12	16	30
<b>Glass transition</b>					
Tg1	°C	59	71	87	89
Tg1 max.	°C				92

*Tests carried out on samples of pure cast resin, without prior degassing, between steel plates.*

*Measures undertaken according to the following norms :*

*Tension:*

*NF T 51-034*

*Flexion:*

*NF T 51-001*

*Charpy impact strength:*

*NF T 51-035*

*Glass transition DSC:*

*ISO 11357-2: 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz*

*Tg1 or Onset: 1st point at 20 °C/mn*

## R9430 based laminate mechanical properties

Samples Matrix		<b>R9430 / H8436</b>	<b>R9430 / H8433</b>
Reinforcement material		3300	3300
Number of layers		15	15
Method		Press	Press
Weight of reinforcement	%	68	66
Cure Schedule		8 h 60 °C	8 h 60 °C
<b>Flexion</b>			
Modulus	N/mm <sup>2</sup>	25 700	25 740
Maximum resistance	N/mm <sup>2</sup>	734	670
Maximum elongation	%	3.2	3
<b>Shear strength</b>			
Shear load at rupture	N/mm <sup>2</sup>	60	55
<b>Charpy impact strength</b>			
Resilience	kJ/m <sup>2</sup>	217	190
<b>Water absorption</b>			
	%	0.10	0.12
<b>Glass transition</b>			
Tg 1	°C	90	92
Tg1 max.	°C	94	92

Tests carried out in accordance with the following norms:

Flexion: NF T 57-105

Shear: NF T 57-104

Charpy Impact Strength: NF T 57-108

Glass transition DSC: ISO 11357-2: 1999 -5°C to 180°C under nitrogen gaz

Tg1 or Onset: 1st point at 20 °C/mn

Tg1 maximum or Onset: second passage

Water absorption: Internal. Polymerisation according to cycle, machining,

weighting, time spent in distilled water at 70 °C / 48 hours,

weighting 1 hour after emerging,

drying 24 h at 40°C, weighting, mechanical tests on 10 samples

Reinforcement 3300: Twill 2/2 E Glass, weight 300 g/m<sup>2</sup>

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. Since conditions of product use are outside our control, no warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risks and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user. In any case, all liability for damage or loss is only for the materials supplied by Fibermax Composites.