



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΕΝΙΩΝ ΠΛΑΚΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΜΙΧΑΗΛ

Επιβλέπων: Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΕ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΕΝΙΩΝ ΠΛΑΚΩΝ
ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΜΙΧΑΗΛ

Τριμελής επιτροπή:

**ΣΠΥΡΙΔΩΝ Α.
ΜΑΥΡΑΚΟΣ**
Καθηγητής

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ.
ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ**
Καθηγητής

**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ι.
ΠΑΝΤΕΛΗΣ**
Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	Σελ.
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	1
1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ HAND LAY UP ΚΑΙ PRE-PREG.....	2
1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	8
1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	10
1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	15
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ PRE-PREG	
2.1 ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ	16
2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	25
2.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ WARP ΚΑΙ FILL	32
2.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ	40
2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	44
2.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	47
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΛΑΚΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	48
3.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	49
3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	52
3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	55
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	63
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	
 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	65
4.2 ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑ	66
4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	69
4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Ο όρος «σύνθετος» σημαίνει «αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη». Επομένως ένα υλικό το οποίο διαθέτει δύο ή περισσότερα συνιστώντα υλικά ή φάσεις μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθετο υλικό. Ειδικότερα ως σύνθετα αναγνωρίζονται σήμερα εκείνα τα υλικά, των οποίων τα συνιστώντα μέρη έχουν σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, έτσι ώστε και το ίδιο σύνθετο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συνιστώντων μερών (Τσούβαλης -1998).

Για την κατάταξη ενός υλικού στην κατηγορία του σύνθετου προϋπόθεση είναι αυτό να αποτελείται από συνδυασμό συστατικών μερών και οι ιδιότητες του ενός να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από των άλλων, ενώ η περιεκτικότητα κατ' όγκο του ενός να μην είναι ιδιαίτερα μικρή.

Τα σύνθετα υλικά γνωρίζουν τεράστια τεχνολογική πρόοδο τα τελευταία 30-40 χρόνια και προσφέρουν στους μηχανικούς μια νέα ελευθερία να βελτιστοποιήσουν την κατασκευαστική σχεδίαση και απόδοση. Επίσης μας προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών χαλύβδινων κατασκευών με μερικά από τα κυριότερα να είναι τα παρακάτω:

- Η χαμηλή πυκνότητα οδηγεί σε υψηλές τιμές ειδικής αντοχής και ειδικού μέτρου ελαστικότητας με συνέπεια τη δυνατότητα σχεδίασης κατασκευών υψηλής ακαμψίας και αντοχής με σημαντικά χαμηλότερο βάρος.
- Οι ίνες του σύνθετου υλικού δύναται να προσανατολιστούν στις διευθύνσεις των κυρίως τάσεων αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα της κατασκευής.
- Εξαιρετική αντίσταση σε περιβαλλοντικές συνθήκες και στην διάβρωση.
- Βελτιωμένη συμπεριφορά σε κραδασμούς.
- Δυνατότητα κατασκευής περίπλοκων κατασκευών με εργαλεία χαμηλού κόστους.
- Σχετικά μικρή και ελέγξιμη θερμική διαστολή.
- Άριστη αντοχή σε κόπωση.
- Προοπτική για ενεργειακής απορρόφησης κατασκευές ασφαλείας.
- Ευκολία επιδιόρθωσης βλαβών σε κατασκευές από σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα υλικά κατηγοριοποιούνται σε τρεις γενικές κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους, στα ινώδη σύνθετα υλικά, στα σύνθετα υλικά σωματιδίων και στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. Στη ναυπηγική είναι πολύ διαδεδομένη η χρήση πολύστρωτων σύνθετων υλικών με την κάθε στρώση να αποτελείται από ινώδη σύνθετα υλικά.

Δυο από τις διαδικασίες μορφοποίησης και κατασκευής τέτοιων υλικών παρουσιάζονται στο επόμενο εδάφιο.

1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ HAND LAY UP ΚΑΙ PRE-PREG

1.2.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΧΕΡΙ (HAND LAY UP)

Η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι είναι η παλαιότερη και απλούστερη μέθοδος μορφοποίησης σύνθετων υλικών. Ανήκει στις μεθόδους μορφοποίησης με απλή επαφή και ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι ο ελάχιστος δυνατός. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι σχετικά απλά και είναι τα εξής:

Αρχικά, προετοιμάζεται το καλούπι το οποίο ανάλογα με το μέγεθος της κατασκευής μπορεί να είναι από διάφορα υλικά όπως σύνθετα υλικά, χάλυβας, αλουμίνιο γυαλί κτλ. Έπειτα απλώνεται μια στρώση κερί για την επίτευξη ομαλής επιφάνειας και μια στρώση από κάποιο αποκολλητικό μέσο για να εξασφαλιστεί ο εύκολος διαχωρισμός καλουπιού-προϊόντος. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια χρωματισμένη εξωτερική επικάλυψη από ρητίνη καλής ποιότητας (gel coat) με ψεκασμό ή πινέλο, πάνω στο καλούπι. Ο σκοπός του gel coat είναι να παρέχει μια ομαλή χρωματισμένη επιφάνεια που θα προστατεύει τις επόμενες στρώσεις ινών-ρητίνης από την άμεση επαφή με το νερό, η επίστρωση των οποίων ξεκινά πριν την στερεοποίηση του και με μια από τις δυο παρακάτω μεθόδους:

α) Επίστρωση με ψεκασμό.

Σε αυτή τη μέθοδο δε θα επεκταθούμε περαιτέρω

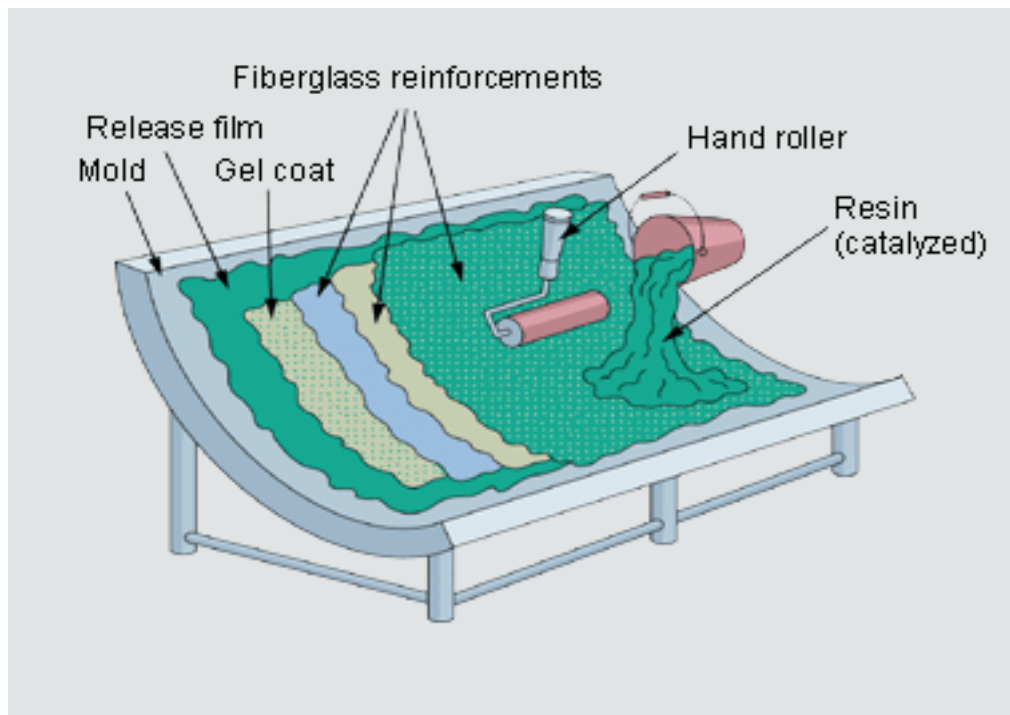
β) Επίστρωση με το χέρι

Στην αρχή κόβονται οι απαραίτητες ενισχυτικές ίνες, οι οποίες είναι σε μορφή υαλοπλήματος (chopped strand mat, CSM) υαλοϋφάσματος (woven roving, WR) ή μονοαξονικές (UD) και τοποθετούνται επάνω στο καλούπι. Οι ενισχυτικές ίνες αρχικά είναι τυλιγμένες σε ρολό με πλάτος συνήθως 1 έως 1,5 m απ' όπου και κόβονται σε κατάλληλες διαστάσεις. Υγρή ρητίνη αναμεμιγμένη με καταλύτη εναποτίθεται από πάνω και κατανέμεται ομοιόμορφα με τη βοήθεια πινέλου ή ειδικού ρολού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να τοποθετηθούν όλες οι προβλεπόμενες στρώσεις.

Σε αυτό το σημείο προσοχή πρέπει να δοθεί στις περιπτώσεις όπου το πλάτος της κατασκευής είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του ρολού των ινών, όπου και δεν θα πρέπει οι επάλληλες στρώσεις να βρίσκονται η μια πάνω στην άλλη αλλά να κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του πολύστρωτου ώστε να μην έχουμε τοπική αδυναμία της κατασκευής.

Αφού λάβει χώρα η διαδικασία πολυμερισμού της ρητίνης για επαρκές χρονικό διάστημα, είτε σε θερμοκρασία δωματίου είτε σε άλλη θερμοκρασία το προϊόν αφαιρείται από το καλούπι και υφίσταται επιπρόσθετη επεξεργασία για την τελική του διαμόρφωση.

Τελικά, η περιεκτικότητα σε ίνες του πολύστρωτου ανέρχεται σε $0,25 \div 0,35$ % κατά βάρος για υαλοπίλημα και σε $0,45 \div 0,55$ % κατά βάρος για υαλούφασμα. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται μια τυπική διάταξη της μεθόδου hand lay-up.



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up)

1.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΕΜΠΟΤΙΣΜΕΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ (PRE-PREGS)

Με τον όρο Pre-preg εννοούμε σύνθετα υλικά όπου οι ενισχυτικές ίνες, οι οποίες είναι συνήθως ανθρακονήματα, προεμποτίζονται με ρητίνη, σε ελεγχόμενη αναλογία, στην οποία έχουμε προσθέσει σκληρυντή και φυλάσσονται πριν την κατασκευή του τελικού προϊόντος. Η ρητίνη είναι μερικώς πολυμερισμένη και για αυτό το λόγο τα υλικά αυτά αναφέρονται ως B-stage και απαιτείται φύλαξη σε ψυχρό περιβάλλον (-18°C) για την αποφυγή πλήρους πολυμερισμού.

Τα βασικά είδη των Pre-pregs με βάση το είδος της ενίσχυσης τους είναι 3 και είναι τα εξής:

- Tow-preg, δηλαδή προεμποτισμένες μονές ίνες οι οποίες τυλίγονται σε μπομπίνες και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που εφαρμόζεται η μέθοδος περιέλιξης των ινών.

- Μονοαξονικά Pre-pregs στα οποία όλες οι ίνες έχουν τον ίδιο προσανατολισμό.
- Pre-pregs με ενίσχυση σε μορφή υφάσματος (αναφέρονται και ως broadgoods)

Ανάλογα με τον τύπο της ενίσχυσης αλλά και τον σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί, η περιεκτικότητα ρητίνης, κατά βάρος, μπορεί να διαφέρει σε ένα Pre-preg, αλλά συνήθως κυμαίνεται από 35 μέχρι 44 %.

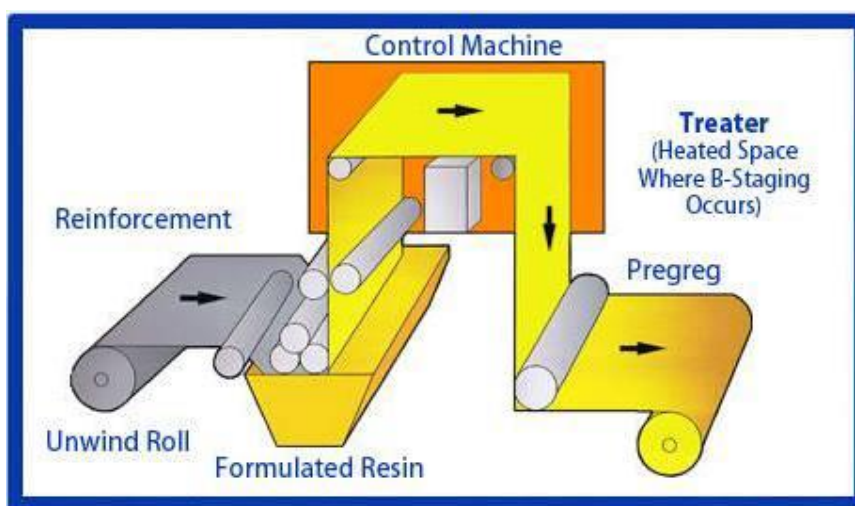
Τα προεμποτισμένα ανθρακονήματα παρέχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις μεθόδους επίστρωσης με το χέρι επειδή η ρητίνη εφαρμόζεται στις ίνες με ακριβή και ομοιόμορφο τρόπο, πετυχαίνοντας την βέλτιστη αναλογία ινών-ρητίνης.

Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενες ίνες στα Pre-pregs είναι από άνθρακα, γυαλί, βόριο και κεραμικές. Σε εξειδικευμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνδυασμοί αυτών (υβρίδια). Οι ενισχύσεις είναι σε μορφή δεσμών από μοναδιαίες ίνες και κάθε δέσμη αποτελείται από χιλιάδες ίνες, με το γράμμα K να συμβολίζει τις χιλιάδες. Έτσι δέσμες π.χ. με το σύμβολο 3K αποτελούνται από 3000 ίνες. Οι δέσμες μπορεί να είναι μονοαξονικές, ή να πλέκονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα ύφασμα. Η ρητίνη που χρησιμοποιείται στα Pre-pregs μπορεί να κυμαίνεται από χαμηλής θερμοκρασίας θερμοσκληρυνόμενη μέχρι υψηλής θερμοκρασίας θερμοπλαστική, ανάλογα με τον σκοπό για τον οποίο προορίζεται το προϊόν. Από τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες πιο συχνά χρησιμοποιούνται οι εποξικές, λόγω της αντοχής τους, της ανθεκτικότητας τους και του σχετικά χαμηλού κόστους. Από τις λιγότερο συνήθεις, οι φαινολικές ρητίνες έχουν εξαιρετική αντοχή στη θερμοκρασία, στη φλόγα και εξαιρετική συμπεριφορά κατά την απορρόφηση θερμότητας, ενώ το κόστος τους είναι κατά τι μικρότερο από τις εποξικές. Οι, υψηλότερου κόστους, κυανιδικοί εστέρες προσφέρουν εξαιρετική αντοχή και ακαμψία, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας και καλές ηλεκτρικές ιδιότητες. Για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται πολυαμιδικές ρητίνες. Από την οικογένεια των θερμοπλαστικών ρητινών διακρίνουμε τις PEEK, PEKK, PAI, PAS, PEI, PES, PPS και LCP οι οποίες έχουν καλή συμπεριφορά σε περιβάλλοντα υψηλών θερμοκρασιών και δεν απορροφούν, ούτε διαβρώνονται όταν εκτίθενται σε υγρασία. Επίσης αυτού του τύπου οι ρητίνες έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης κραδασμών και συγκρούσεων.

Τα Pre-pregs κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο με δυο μεθόδους, την εμβάπτιση των ινών σε ρητίνη (solution coating) και την θερμή έγχυση ρητίνης (hot melt coating). Συνήθως τα υλικά αυτά κατά την παραγωγή τους τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο φύλλα χαρτιού ή φιλμ πολυαιθυλενίου ώστε να μην κολλάνε μεταξύ τους και αποθηκεύονται σε μορφή ρολού.

Η μέθοδος εμβάπτισης σε ρητίνη (solution coating) ήταν από τις πρώτες μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή Pre-preg. Σε αυτή τη μέθοδο οι ίνες οδηγούνται με μεταλλικές μπάρες για να έχουμε ελεγχόμενη τάση τους και περνούν από διαλυμένο λουτρό ρητίνης. Διαλυμένο σημαίνει ότι έχει προστεθεί στο διάλυμα ρητίνης αλκοόλη, ασετόν ή κάποιο άλλο διαλυτικό για να μειωθεί το ιξώδες του και να επιτύχουμε καλή διαβροχή των ινών. Οι εμβαπτισμένες ίνες περνούν από σει περιστρεφόμενων κυλινδρικών οδηγών για να απομακρυνθεί η περίσσεια ρητίνης. Από εκεί οδηγούνται σε οριζόντιο φούρνο, που καλείται

και πύργος, στο εσωτερικό του οποίου με έλεγχο της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής του υλικού στο φούρνο εξασφαλίζεται ότι δε συμβαίνει πλήρης πολυμερισμός της ρητίνης με ταυτόχρονη εξάτμιση του διαλύτη. Μετά την έξοδο από το φούρνο το Pre-preg τυλίγεται σε ρολό. Σε αυτό το στάδιο (B-stage) το υλικό είναι εύπλαστο και κολλώδες. Αυτή η μέθοδος κατασκευής εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες και γίνεται προσπάθεια αντικατάστασής της. Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η μέθοδος εμφάντισης σε ρητίνη.



Σχήμα 1.2: Μέθοδος εμφάντισης σε ρητίνη

Η μέθοδος θερμής έγχυσης ρητίνης (hot melt coating) στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν μόνο για μονοαξονικές ταινίες αλλά σήμερα προεμποτίζονται και υφάσματα ινών με αυτή. Με τον καιρό η μέθοδος αυτή αντικαθιστά την μέθοδο εμφάντισης σε ρητίνη για να αποφευχθούν προβλήματα αποθήκευσης, απόρριψης, εκπομπών αερίων και πιθανών κινδύνων πυρκαγιάς. Σε μία τυπική παρασκευή Pre-preg με τη μέθοδο αυτή οι ίνες μεταφέρονται στη μηχανή θερμής έγχυσης από τις μπομπίνες ινών και περνούν από ειδικά χτένια τα οποία διασφαλίζουν την ευθυγράμμιση τους και την ίση κατανομή τους. Έπειτα, οι ίνες εναποτίθενται σε χαρτί μεταφοράς, που περιέχει ελεγχόμενη ποσότητα ρητίνης και ένα ακόμα χαρτί μεταφοράς τοποθετείται στην άνω πλευρά των ινών. Στο σάντουιτς ινών και χαρτιού εφαρμόζεται πίεση από θερμαινόμενα σελ κυλινδρικών ρολών συμπίεσης, τα οποία είναι ρυθμισμένα στο προβλεπόμενο πάχος του Pre-preg. Μέσω της συμπίεσης εξασφαλίζεται ότι οι ίνες κατανέμονται και διαβρέχονται ομοιόμορφα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση λαμβάνεται μέριμνα ώστε η ρητίνη να μην πολυμερίζεται πλήρως. Αφού το υλικό περάσει από την περιοχή συμπίεσης και θέρμανσης, ψύχεται από αντίστοιχα ρολά πριν αφαιρεθεί το χαρτί μεταφοράς. Σε αυτό το στάδιο το Pre-preg κόβεται στο κατάλληλο πλάτος και τυλίγεται σε φιλμ πολυαιθυλενίου πριν αποθηκευτεί σε μορφή ρολού. Η μέθοδος, αυτή, έχει σημαντικά λιγότερο παγιδευμένο ατμό, που μπορεί να οδηγήσει σε κενά. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μια μηχανή θερμής έγχυσης ρητίνης.



Σχήμα 1.3: Μηχανή θερμής έγχυσης ρητίνης (hot melt coating)

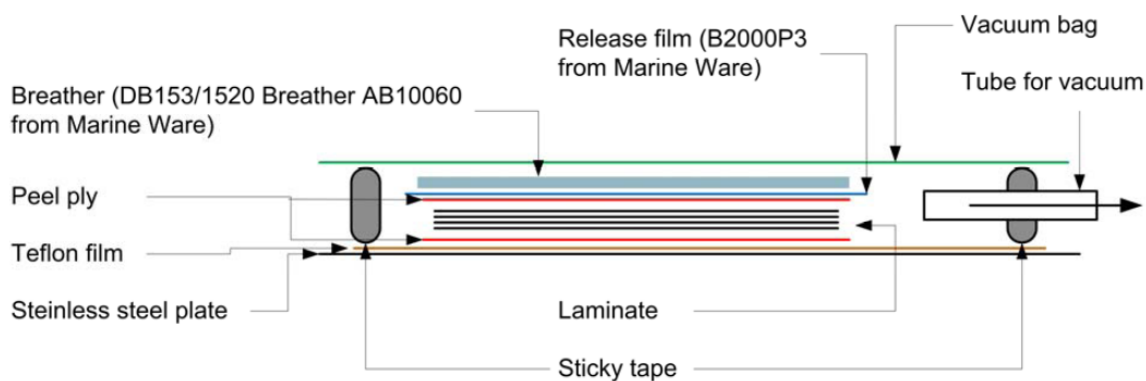
Τα περισσότερα Pre-preg με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη απαιτούν καταψύκτη για την αποθήκευσή τους ώστε να διατηρήσουν τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους. Για το λόγο αυτό, αμέσως μετά την παρασκευή τους φυλάσσονται σε κρύο περιβάλλον και με τον ίδιο τρόπο αποστέλλονται, ενώ μόλις φτάσουν στο σημείο κατανάλωσης τοποθετούνται σε καταψύκτη (-18°C) μέχρι τη χρήση τους. Πριν την κατασκευή προϊόντων από το συγκεκριμένο υλικό, πρέπει αυτό να θερμανθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ενώ τα μη χρησιμοποιούμενα κομμάτια να επανατοποθετηθούν στον καταψύκτη.

Για την κατασκευή των τελικών προϊόντων ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι πολυπλοκότερος της μεθόδου επίστρωσης με το χέρι. Η διαδικασία κατασκευής γίνεται ως εξής:

Αρχικά, διαμορφώνεται ειδικό καλούπι για το οποίο έχει υπολογιστεί ότι αντέχει στην ανώτερη θερμοκρασία που υποβάλλεται η διάταξη χωρίς να καίγεται ή να παραμορφώνεται. Στις περισσότερες των περιπτώσεων το καλούπι θα είναι από χάλυβα ή ειδικό πυρίμαχο γυαλί. Επάνω σε αυτό, αφού γίνει επάλειψη με κερί, τοποθετείται μια στρώση υλικού αποχωρισμού, όπως peel ply ή Teflon. Αμέσως μετά τοποθετούνται οι απαιτούμενες στρώσεις pre-preg, οι οποίες αποκόβονται με απλό ψαλίδι, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4, και ξανά μια στρώση αποκολλητικού μέσου, ακολουθούμενη από μια στρώση υλικού breather. Η όλη διάταξη σφραγίζεται με tacky tape και σακούλα κενού και επιβάλλεται κενό της τάξης του 1 bar. Η υποβολή κενού είναι απαραίτητη, ώστε το τελικό πολύστρωτο να έχει την απαιτούμενη γεωμετρία. Η διάταξη εισάγεται σε φούρνο όπου ακολουθείται κύκλος θέρμανσης με στόχο τον πολυμερισμό της ρητίνης. Συνήθως, για την επιτάχυνση της αντίδρασης πολυμερισμού χρησιμοποιείται φούρνος για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Ένα ενδεικτικό θερμοκρασιακό εύρος όπου το υλικό πολυμερίζεται πλήρως σε 1 ώρα περίπου είναι $120-130^{\circ}\text{C}$. Στο σχήμα 1.5 φαίνεται ενδεικτικά η αλληλουχία των στρώσεων που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 1.4: Κοπή στρώσεων Pre-preg



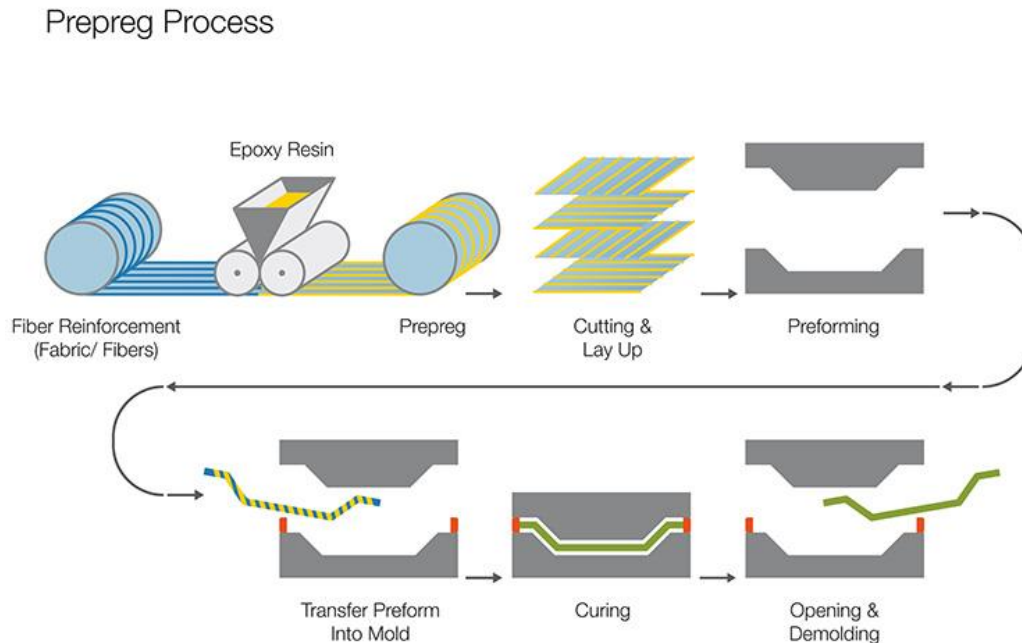
Σχήμα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση αλληλουχίας στρώσεων σε διάταξη για pre-preg

Τα βασικά πλεονεκτήματα των Pre-pregs συνοψίζονται παρακάτω:

- Ευκολία χρήσης
- Χαμηλό ποσοστό κενών
- Καλή αντοχή σε κόπωση
- Έλεγχος του πάχους των πολύστρωτων
- Καλή αντοχή στους περιβαλλοντικούς παράγοντες και στη διάβρωση
- Έλεγχος της αναλογίας ινών ρητίνης
- Ιδιαίτερα καθαρή διαδικασία
- Αυξημένη ποιότητα κατασκευών
- Υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και ειδική αντοχή

- Χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής
- Εξαιρετικά χαρακτηριστικά απόσβεσης κραδασμών

Η διαδικασία κατασκευής προϊόντων από Pre-preg παρουσιάζεται συνολικά στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Κατασκευή προϊόντων από Pre-preg

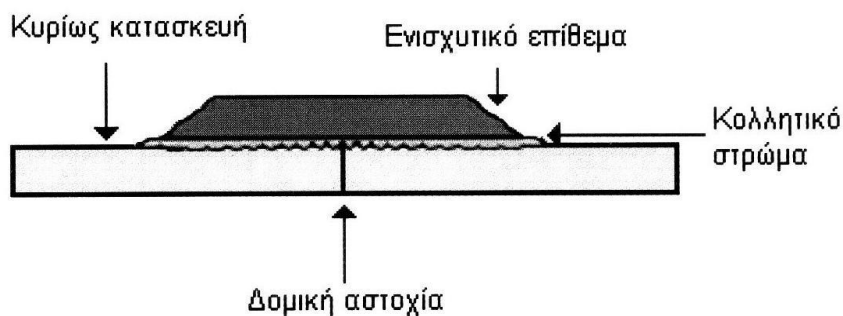
1.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΕΠΙΘΕΜΑΤΑ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Τα περισσότερα πλοία και πλωτά ναυπηγήματα παρουσιάζουν διαφόρων ειδών βλάβες κατά τη διάρκεια του επιχειρησιακού τους κύκλου, με κάποιες από αυτές να χαρακτηρίζονται ως κρίσιμες και να είναι απαραίτητη η επισκευή τους αμέσως αφού γίνουν αντιληπτές. Κάποιες από τις συχνότερα εμφανιζόμενες τέτοιες βλάβες, που αφορούν τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, είναι η διάβρωση και οι ρωγμές. Αυτές είναι αποτέλεσμα κυρίως του έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο δραστηριοποιούνται τα πλοία, του περιοδικού χαρακτήρα των επιβαλλόμενων φορτίσεων, των ατελειών κατά την συγκόλληση των μεταλλικών μερών και της συγκέντρωσης τάσεων σε διάφορα μέρη της μεταλλικής κατασκευής. Οι συμβατικές μέθοδοι επιδιόρθωσης αφορούν την ολοκληρωτική αντικατάσταση των προς επισκευή μερών, πράγμα το οποίο περιλαμβάνει θερμές κατεργασίες κοπής και συγκόλλησης. Αυτές οι μέθοδοι σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι μόνο χρονοβόρες αλλά και με μεγάλη πολυπλοκότητα, καθώς μπορεί να απαιτούν δεξαμενισμό του πλοίου και ειδικές άδειες όπως gas free κτλ, με αποτέλεσμα την τεράστια απώλεια εσόδων για τον πλοιοκτήτη.

Τα τελευταία χρόνια παράλληλα με την τεράστια άνθηση που γνωρίζει η τεχνολογία σύνθετων υλικών, με κύρια τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (FRP-Fibre Reinforced

Plastics), και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη κολλητικών ουσιών υψηλής αντοχής δημιουργήθηκε μια νέα επιστήμη ανθεκτικών επισκευών για μεταλλικές κατασκευές και όχι μόνο, που αποδεικνύεται αποτελεσματική στο να αποτρέπει την αστοχία τους για κάποιο ικανοποιητικό χρονικό διάστημα. Μέσω τέτοιων μεθόδων έχει γίνει δυνατή η αποτελεσματική αποκατάσταση βλαβών και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και η επέκταση του αρχικού χρόνου ζωής με αποδεδειγμένα αποτελέσματα κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία. Παρόλα αυτά υπάρχουν δομικές διαφορές ανάμεσα στην εφαρμογή τέτοιων μεθόδων ανάμεσα στην αεροπορική και την ναυπηγική βιομηχανία, οι οποίες και υπαγορεύουν την ανάγκη για μια διαφορετική προσέγγιση και διερεύνηση.

Η λογική της μεθόδου επισκευής με επίθεμα από σύνθετο υλικό είναι η κατασκευή επιθέματος κατάλληλων διαστάσεων και αντοχής από ρητίνη (συνήθως εποξική) και ίνες (γυαλιού, άνθρακα ή βορίου) πάνω στην προς επισκευή επιφάνεια με παρεμβολή ανάμεσα τους κάποιας κολλητικής ουσίας όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Επίθεμα από σύνθετα υλικά κολλημένο σε επιφάνεια με δομική αστοχία

Με αυτόν τον τρόπο το επίθεμα παραλαμβάνει μέρος των φορτίσεων ή ακόμα και ολόκληρο το φορτίο της κατασκευής μέσω της της κολλητικής ουσίας, ανακουφίζοντας την περιοχή που περιέχει την δομική αστοχία. Κάποια από τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας μεθόδου επισκευής εκτός από την απουσία θερμών κατεργασιών, με ότι αυτό συνεπάγεται, είναι τα εξής:

- Η δυνατότητα προσαρμογής του επιθέματος σε πολύπλοκες κατασκευές με εργαλεία χαμηλού κόστους.
- Το χαμηλό κόστος και βάρος της επισκευής
- Η εύκολη συντήρηση
- Η βελτιωμένη συμπεριφορά σε κραδασμούς.
- Η δυνατότητα προσανατολισμού των ινών του σύνθετου υλικού στις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αποδοτικότητα της κατασκευής.
- Η εξαιρετική συμπεριφορά του επιθέματος στη διάβρωση
- Η μεγάλη αντοχή σε κόπωση, πράγμα το οποίο έχει αυξημένη σημασία λόγω του περιοδικού χαρακτήρα των φορτίσεων.

Η μέθοδος επισκευής με σύνθετα υλικά είναι επίσης εξαιρετικά ευέλικτη καθώς επιτρέπει την επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, τον αριθμό των στρώσεων και του κολλητικού μέσου έτσι ώστε κάθε φορά να ικανοποιούνται οι ειδικές ανάγκες κάθε επισκευής.

Η τεχνολογία των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αποτελεί έναν ταχύτατα αναπτυσσόμενο κλάδο. Πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές πραγματοποιούνται για τη βελτιστοποίηση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των επιθεμάτων, ενώ παράλληλα αναπτύσσονται σχετικά αριθμητικά μοντέλα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της συνολικής επισκευασμένης διατομής. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται και η παρούσα διπλωματική εργασία, ο σκοπός της οποίας θα διασαφηνιστεί σε επόμενο εδάφιο.

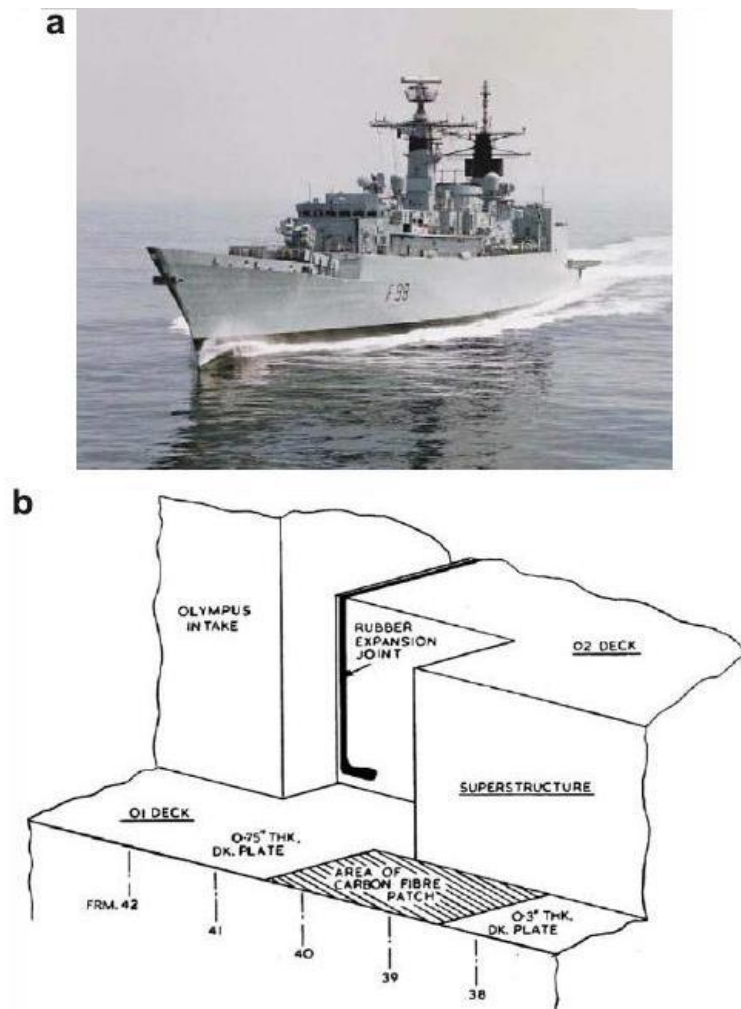
1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων της κόπωσης απασχολεί εδώ και δεκαετίες την αεροπορική βιομηχανία και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα στην επισκευή των αεροπορικών κατασκευών. Η χρήση των σύνθετων επιθεμάτων τόσο για ενίσχυση των ρωγματούσεων που παρουσιάζονται στην άτρακτο του αεροσκάφους από την κόπωση που υπόκεινται κατά την διάρκεια της πτήσης τους όσο και για παράταση του χρόνου υπηρεσίας ενός γηρασμένου αεροσκάφους, αποδείχθηκε μετά από πολλές μελέτες και επισκευές σε αεροσκάφη της πολεμικής αεροπορίας της Αυστραλίας και των ΗΠΑ ιδιαίτερα αποτελεσματική (Baker et al., 2002) και έχει επικρατήσει σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επισκευής.

Οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν σε αλουμίνιο 2024 T3 από το οποίο κατασκευάζονται οι άτρακτοι και τα πτερύγια των αεροσκαφών, ενισχυμένο με σύνθετο επίθεμα Boron/epoxy (Sabelkin et al-2006) έδειξαν ότι το επίθεμα αύξησε την διάρκεια ζωής κατά 5 φορές σε πάνελ με δοκούς ενίσχυσης και 10 φορές σε μη ενισχυμένα πάνελ αλουμινίου. Σε μια άλλη μελέτη του αεροπορικού ινστιτούτου τεχνολογίας (Sabelkin et al -2007) έγιναν πειραματικές δοκιμές σε πάνελ αλουμινίου 7075 T6 επισκευασμένο από την μία πλευρά με σύνθετο επίθεμα και αποδείχτηκε η αύξηση της αντοχής σε εναπομένουσες τάσεις και σε κόπωση. Σε πρόσφατη μελέτη (Benachour et al -2012) εξετάστηκε η επίδραση του σύνθετου επιθέματος Graphite/epoxy στην κόπωση και στην ταχύτητα διάδοσης της ρωγμής δοκιμίων αλουμινίου 2024 T351 και 7075 T74 και αποδείχτηκαν τα οφέλη από την δράση του επιθέματος στη ζωή της ρωγματομένης επιφάνειας.

Η χρήση της τεχνολογίας των σύνθετων επιθεμάτων έχει επεκταθεί τα τελευταία χρόνια και στις ναυπηγικές κατασκευές. Οι πρώτες πρακτικές μελέτες στη ναυπηγική βιομηχανία αφορούσαν την επισκευή ρωγμών στις αλουμινένιες υπερκατασκευές φρεγατών Amazon Class (Σχήμα 1.2) του πολεμικού ναυτικού της Μ. Βρετανίας τη δεκαετία του '80. Η επισκευή της ρωγμής με συγκόλληση δεν απέδωσε καθώς αστόχησε σε μικρό χρονικό διάστημα, ενώ η χρήση μεταλλικών επιθεμάτων δεν ήταν δυνατή λόγω αδυναμίας διαμόρφωσής τους στην απαιτούμενη γεωμετρία. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά επίθεμα από ίνες άνθρακα με εποξική ρητίνη για την επισκευή της ρωγμής, η οποία προηγουμένως είχε

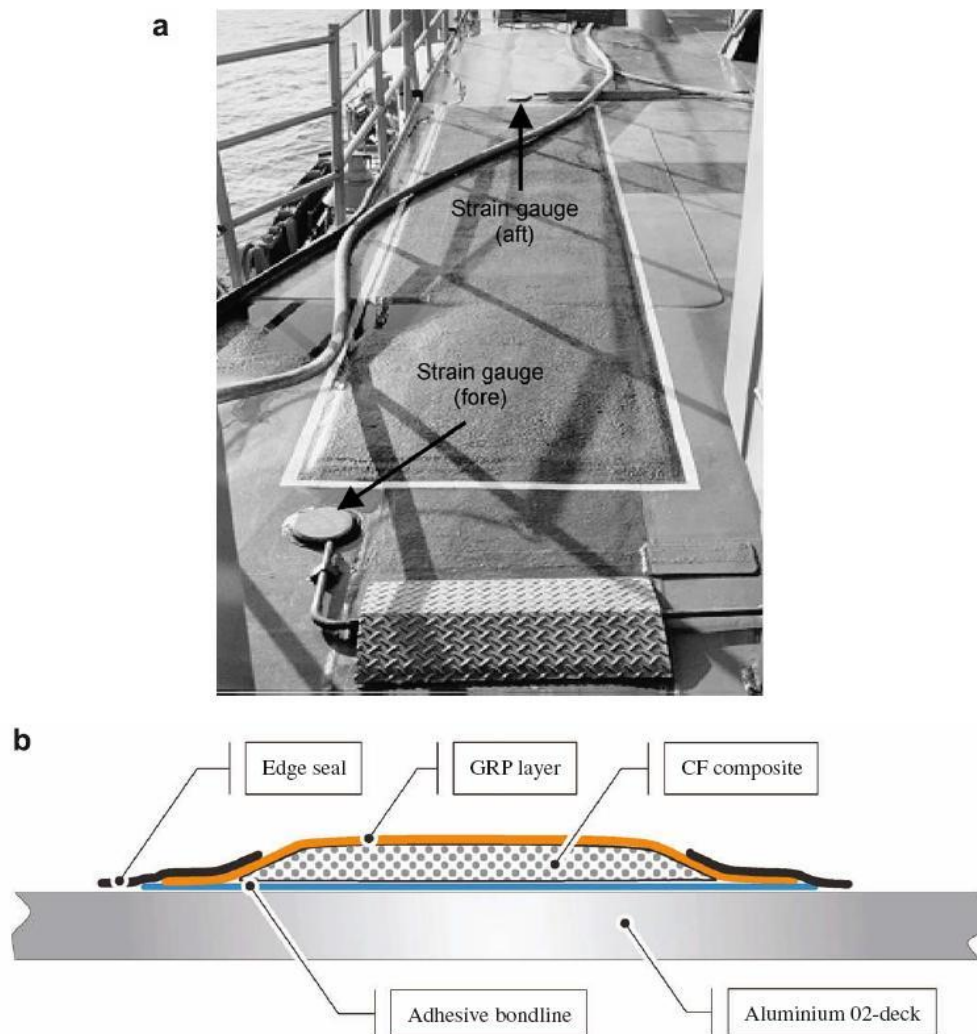
συγκολληθεί.. Η τεχνική αυτή απέδωσε και επεκτάθηκε και στις υπόλοιπες φρεγάτες ίδιου τύπου χωρίς να παρουσιαστεί επανεμφάνιση της ρωγμής για τα επόμενα 10 χρόνια κατά τα οποία τα πλοία ήταν εν ενεργεία [Turton-2005]. Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η φρεγάτα στην οποία έγινε η επισκευή και η σχηματική αναπαράσταση της επισκευής.



Σχήμα 1.8: (α) Φρεγάτα κλάσης Amazon, (β) τοποθεσία της ρωγμής στις υπερκατασκευές και τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος

Η επιτυχία αυτής της μεθόδου επισκευής την κατέστησε ιδανική σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 εμφανίστηκαν ρωγμές στις αλουμιένιες υπερκατασκευές των φρεγατών κλάσης FFG-7 του πολεμικού ναυτικού της Αυστραλίας (RAN). Οι προσπάθειες επισκευής των ρωγμών με συγκόλληση και με τοποθέτηση ενισχυτικών μεταλλικών επιθεμάτων ήταν ανεπιτυχείς με αποτέλεσμα την επανεμφάνιση των ρωγμών. Η λύση η οποία δόθηκε σε συνεργασία με τον οργανισμό Defence Science and Technology Organisation (DSTO) ήταν η τοποθέτηση σύνθετου επιθέματος με ίνες άνθρακα, το οποίο προστατεύεται από τη διάβρωση από ένα στρώμα GRP, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9. Ύστερα από 15 χρόνια σε ενεργό δράση δεν έγινε επανεμφάνιση των ρωγμών στις φρεγάτες και οι εργασίες συντήρησης αφορούσαν κυρίως την αποκατάσταση του προστατευτικού

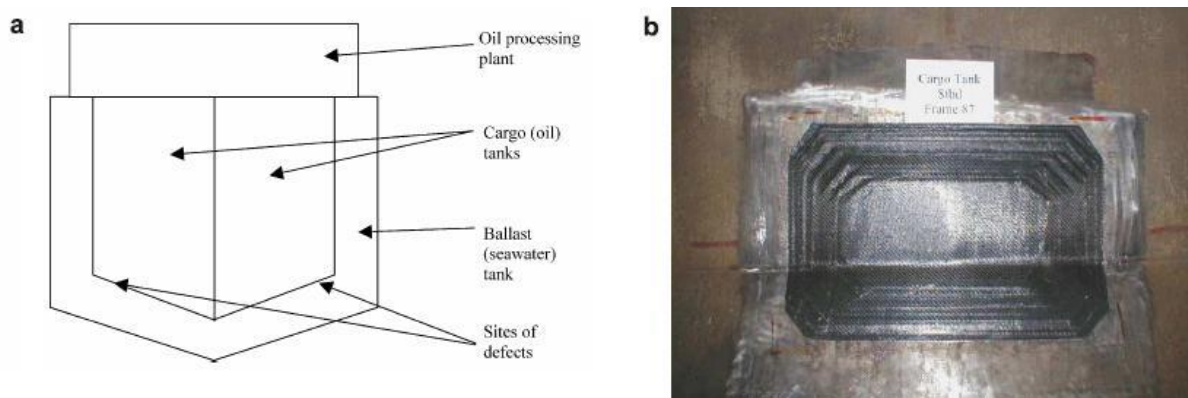
στρώματος GRP, το οποίο είχε υποστεί μηχανικές φθορές και είχε διαβρωθεί από το θαλάσσιο περιβάλλον [Grabovac-2003, 2009].



Σχήμα 1.9: (α) Επίθεμα τοποθετημένο στο διάδρομο υπερκατασκευής, (β) Σχηματική αναπαράσταση τομής του σύνθετου επιθέματος

Η χρήση σύνθετων επιθεμάτων στα εμπορικά πλοία δεν είναι ακόμα τόσο διαδεδομένη, τα πλεονεκτήματα όμως αυτής της μεθόδου επισκευής τα καθιστούν ιδανικά σε αρκετές περιπτώσεις. Το 2002 επισκευάστηκαν τρεις ρωγμές που προκλήθηκαν από κόπωση στις δεξαμενές φορτίου ενός πλοίου FPSO στη Νορβηγία με τη χρήση σύνθετων επιθεμάτων, τα οποία αποτελούνταν από ίνες άνθρακα σε εποξική μήτρα. Το FPSO είναι δεξαμενόπλοιο μόνιμα αγκυροβολημένο το οποίο χρησιμεύει σαν αποθήκη καυσίμων, οπότε επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος επισκευής έναντι της συγκόλλησης καθώς δεν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες (μέγιστη θερμοκρασία σκλήρυνσης της μήτρας: 60°C) και επομένως δε χρειάζεται να αδειάσουν και να καθαριστούν όλες οι δεξαμενές που συνορεύουν με την προς επισκευή δεξαμενή (για λόγους ασφαλείας), παρά μόνο η δεξαμενή που εμφάνισε τη ρωγμή. Με αυτόν

τον τρόπο η μείωση στην αποθηκευτική ικανότητα του πλοίου δεν ήταν μεγάλη κατά το διάστημα των εργασιών, διατηρώντας την επιχειρησιακή του ικανότητα και περιορίζοντας τις οικονομικές απώλειες στο ελάχιστο [Turton-2005]. Στο σχήμα 1.10 φαίνεται η μία τομή του πλοίου και τα σημεία στα οποία βρίσκονται οι ρωγμές, καθώς, επίσης και το επίθεμα τοποθετημένο σε μία από αυτές.

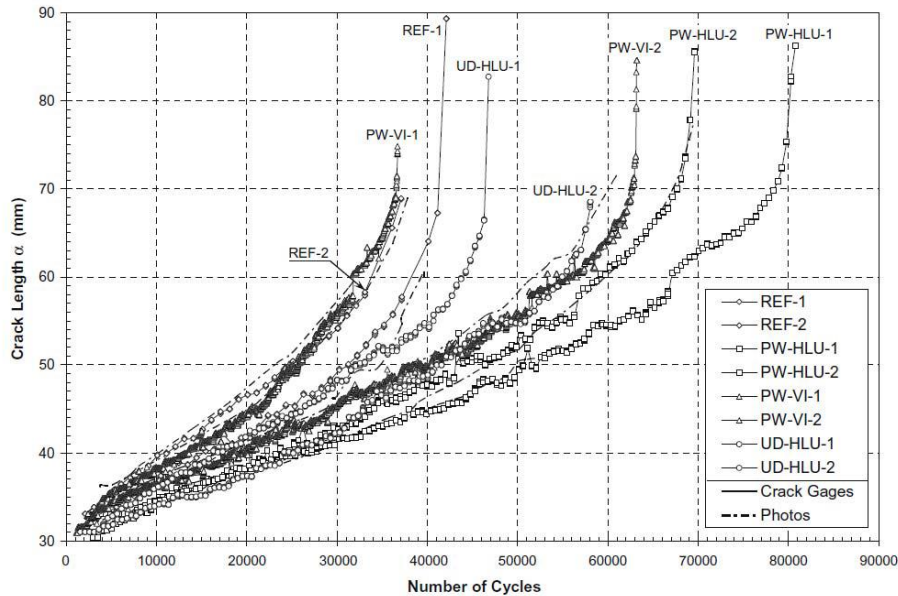


Σχήμα 1.10: (a) Εγκάρσια τομή πλοίου FPSO και τοποθεσία ρωγμών στις δεξαμενές, (b) σύνθετο επίθεμα διαστάσεων 750×250 mm τοποθετημένο σε δεξαμενή φορτίου πλοίου FPSO για την επισκευή ρωγμής

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης σύνθετων υλικών σε επισκευές δεξαμενών πλοίων χωρίς την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξετάζονται σε μελέτη Νορβηγικού νηογνώμονα (DNV) [McGeorge-2009].

Για την περαιτέρω διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της επισκευής ρωγμών κόπωσης με σύνθετα υλικά, παράλληλα με τις πρακτικές εφαρμογές σε πλοία που είδαμε ανωτέρω, έχουν πραγματοποιηθεί από τη διεθνή ερευνητική κοινότητα πληθώρα πειραματικών δοκιμών με σύνθετα επιθέματα όπου εξετάζονται διάφοροι παράγοντες όπως το προς επισκευή μέταλλο, τα υλικά των σύνθετων επιθεμάτων, η γεωμετρία κα, ενώ γίνεται και μοντελοποίηση των δοκιμών με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων, με σκοπό την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης μεθόδου υπολογισμού και πρόβλεψης της αποτελεσματικότητας της επισκευής.

Σε μια άλλη μελέτη στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ II [Tsouvalis-2009] πραγματοποιήθηκαν πειράματα κόπωσης σε κεντρικά ρωγματωμένα δοκίμια από Grade A ναυπηγικό χάλυβα, μονόπλευρα ενισχυμένα με διάφορες μεθόδους κατασκευής σύνθετου επιθέματος carbon-epoxy (PW/HLU, PW/VI και UD/HLU). Τα ενισχυμένα δοκίμια αύξησαν τη διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα μη ενισχυμένα κατά ένα παράγοντα της τάξεως του 2, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Διάρκεια ζωής σε κόπωση για τα ενισχυμένα και μη δοκίμια

Σε ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των σύνθετων επιθεμάτων καταλήγουν και άλλες έρευνες του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Σε παρόμοια χαλύβδινα δοκίμια τα οποία ενισχύθηκαν με μονόπλευρο σύνθετο επίθεμα από ίνες άνθρακα διενεργήθηκαν δοκιμές κόπωσης [Μυρισιώτης-2006]. Η διάρκεια ζωής των ενισχυμένων δοκιμών αυξήθηκε έως και δύο φορές σε σχέση με εκείνη των μη ενισχυμένων δοκιμών αναφοράς, παρά την εξαιρετικά χαμηλή τιμή του λόγου ακαμψίας.

Σε πειράματα κόπωσης ναυπηγικού χάλυβα [Κουτσούρης-2010], εφαρμόστηκε μονόπλευρο επίθεμα από CFRP (carbon/epoxy). Εξετάστηκαν δύο τρόποι κατασκευής επιθεμάτων, με επίστρωση με το χέρι και με σακούλα κενού, ενώ οι ενισχυτικές ίνες είχαν πλέξη plain weave (PW/HLU και PW/VB), ενώ παράλληλα μελετήθηκε η επίδραση της διάβρωσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τοποθετώντας τα δοκίμια σε θάλαμο αλατονέφωσης. Τα ενισχυμένα δοκίμια αύξησαν τη διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα μη ενισχυμένα κατά ένα συντελεστή της τάξης του 3. Επίσης στα πλαίσια των αντίστοιχων στατικών δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό με δοκίμια ίδιου τύπου [Νταμαδάκης-2010] παρατηρήθηκε αύξηση του φορτίου διαρροής κατά 30% περίπου.

Τέλος, το 2013 μια κοινοπραξία 15 οργανισμών από οκτώ Ευρωπαϊκές χώρες με συντονισμό από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, κήρυξε την έναρξη εργασιών ενός τριετούς ερευνητικού έργου σχετικού με την χρήση ενισχυτικών επιθεμάτων από σύνθετα υλικά (ανθρακονήματα με εποξειδική ή βινυλεστερική ρητίνη) για την επισκευή ναυπηγικών κατασκευών από χάλυβα. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος εκτελέστηκαν πληθώρα πειραματικών μετρήσεων και εκπονήθηκαν κατευθυντήριες οδηγίες για το σχεδιασμό, τη μέθοδο κατασκευής του σύνθετου υλικού, του κολλητικού μέσου, την προετοιμασία της επιφάνειας και την εφαρμογή τέτοιων επιθεμάτων σύνθετων υλικών.

1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα πολλά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι επισκευές με επιθέματα από σύνθετα υλικά σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους επισκευών καθιστούν πολύ ελκυστική την ιδέα για ευρύτερη καθιέρωση τους στην ναυπηγική βιομηχανία. Η εφαρμογή, ωστόσο, σε ευρύτερη κλίμακα απαιτεί την τυποποίηση της διαδικασίας επισκευής με επιθέματα από τη φάση της μελέτης και της κατασκευής, μέχρι τον έλεγχο ποιότητας. Η μέχρι τώρα προσέγγιση κάθε περίπτωσης ως ξεχωριστής αυξάνει σημαντικά το κόστος τέτοιων εργασιών και προσθέτει αβεβαιότητα ως προς το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι λοιπόν καθίσταται αναγκαία η θέσπιση κανονισμών και συγκεκριμένης μεθοδολογίας για την αποδοτικότερη εφαρμογή των μεθόδων επισκευής με επιθέματα από σύνθετα υλικά, αλλά και την υιοθέτησης τους από τους νηογνώμονες ως αποδεκτές λύσεις. Για να συμβούν όμως όλα αυτά θα πρέπει πρώτα να αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς μιας τέτοιας τεχνογνωσίας στην ναυπηγική βιομηχανία. Προς την κατεύθυνση αυτή κινείται η παρούσα διπλωματική εργασία, όπου με πειράματα εφελκυσμού ρωγματομένων πλακών αλουμινίου με επιθέματα από σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα (CFRP Carbon Fibre Reinforced Plastics) διερευνάται η αποτελεσματικότητα δυο μεθόδων κατασκευής επιθεμάτων. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (Hand lay-up) και η μέθοδος προεμποτισμένων ανθρακονημάτων (Pre-preg) επιστρατεύονται για τη δημιουργία των επιθεμάτων. Επίσης για το υλικό Pre-preg πραγματοποιήθηκαν και πειράματα χαρακτηρισμού του υλικού καθώς δεν είχε ξαναχρησιμοποιηθεί στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT).

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της εργασίας, περιγράφοντας συνοπτικά τι περιλαμβάνει και για ποιο λόγο έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των σύνθετων επιθεμάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με εφαρμογές των σύνθετων επιθεμάτων στη ναυπηγική και στην αεροναυπηγική και περίληψη σημαντικών δημοσιεύσεων με παρεμφερές θέμα μελέτης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι δοκιμές χαρακτηρισμού προεμποτισμένων ανθρακονημάτων Pre-preg. Γίνεται περιγραφή του τρόπου κατασκευής των απαραίτητων δοκιμίων και των δοκιμών που έγιναν για την εξαγωγή ιδιοτήτων όπως το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης και η αντοχή σε εφελκυσμό ενός υλικού που δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια γενική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας εφελκυσμού των ρωγματομένων πλακών αλουμινίου με επιθέματα από σύνθετα υλικά. Παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμίων, τα υλικά κατασκευής και οι ιδιότητές τους καθώς και η κατασκευή των δοκιμίων. Τέλος, αναλύονται οι παράμετροι των πειραματικών δοκιμών και οι μετρήσεις που έγιναν.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τη βοήθεια πινάκων και διαγραμμάτων και εξάγονται τα ανάλογα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της ενίσχυσης με σύνθετο επίθεμα στη μηχανική αντοχή των δοκιμίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΛΙΚΟΥ PRE-PREG

2.1 ΥΛΙΚΟ PRE-PREG ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την παρούσα διπλωματική εργασία και συγκεκριμένα για τη δημιουργία επιθεμάτων από προεμποτισμένα ανθρακονήματα αγοράστηκε από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας ρολό από την εταιρεία Fibermax με εμπορικό κωδικό C210Ppp και διαστάσεις 1×40 m. Με την παραλαβή του, το ρολό τοποθετήθηκε σε ψυγειοκαταψύκτη όπου και αναφέρεται ότι έχει διάρκεια ζωής 12 μήνες από την ημερομηνία παραλαβής του. Η συνοπτική περιγραφή του συγκεκριμένου pre-preg όπως εμφανίζεται στον κατάλογο της εταιρείας για το προϊόν δίνεται στον πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1 : Συνοπτική περιγραφή pre-preg

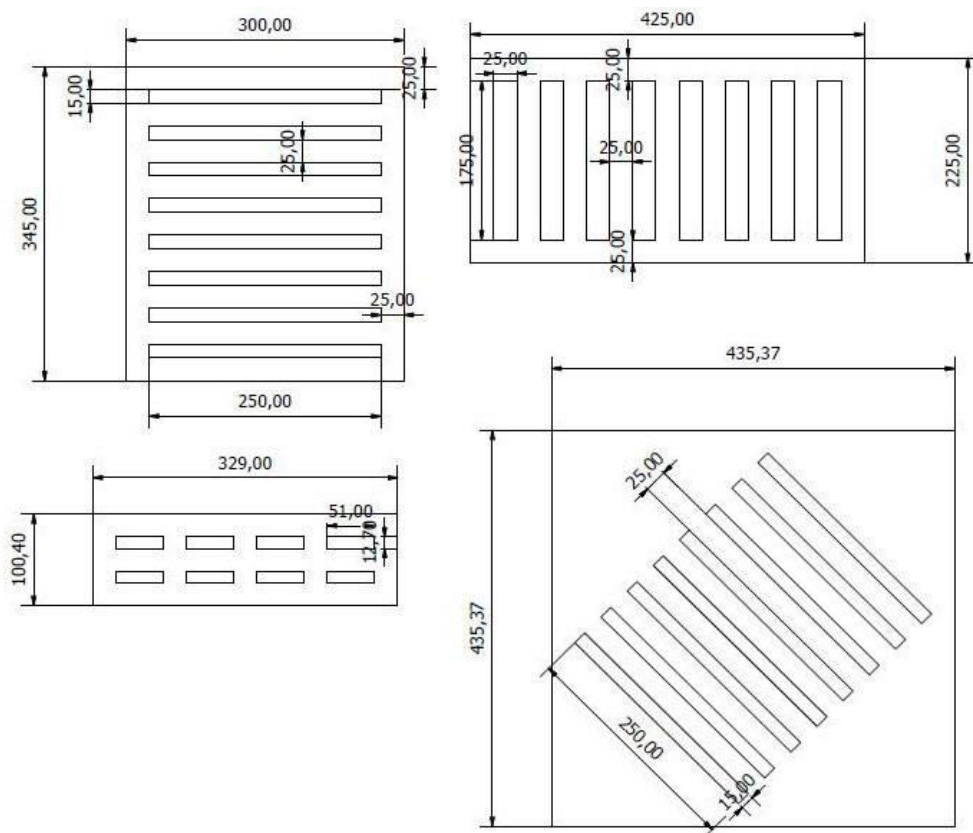
Βάρος ενισχυτικών ινών	205 gr/m ²
Βάρος pre-preg	394 gr/m ²
Περιεκτικότητα σε ρητίνη κατά βάρος	42%
Ίνες στη διεύθυνση warp	3K T300 carbon fiber , 50% , 5.25 ends/cm
Ίνες στη διεύθυνση fill	3K T300 carbon fiber , 50% , 5.25 ends/cm

Οι ίνες είναι σε μορφή υφάσματος, η πλέξη του οποίου είναι τύπου plain weave δηλαδή οι μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου θεωρούνται ίσες για τις δυο κύριες διευθύνσεις του (warp, fill). Η ρητίνη η οποία χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο pre-preg είναι εποξική θερμοσκληρυνόμενη σε θερμοκρασίες από 80 έως 150 °C και κατάλληλη για εφαρμογές με τις μεθόδους autoclave and press molding.

Εφόσον στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί pre-preg παλαιότερα αποφασίστηκε να γίνουν δοκιμές χαρακτηρισμού βασικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Έτσι λοιπόν έγιναν δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό, στις δυο κύριες διευθύνσεις, κάμψης, διάτμησης όπως επίσης και μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες. Για όλες τις δοκιμές επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τα αντίστοιχα πρότυπα ASTM λόγω του ότι έχουν χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν. Αρχικά ορίσαμε τις πλάκες που θα κατασκευαστούν από τις οποίες και θα κοπούν τα δοκίμια. Το πάχος της κάθε στρώσης του υλικού προς μελέτη μετρήθηκε από το ρολό πριν τη διαδικασία πολυμερισμού και είναι 0.25mm. Η κοπή των δοκιμίων ύστερα από την κατασκευή των πλακών έγινε με υδρολιπαινόμενο τροχό που βρίσκεται στο εργαστήριο και έτσι κρίθηκε απαραίτητο ανάμεσα στα δοκίμια αλλά και από τις άκρες της κάθε πλάκας να κρατηθούν 25 mm υλικού για την επίτευξη κατάλληλων διαστάσεων. Η απόσταση των 25 mm είναι τέτοια ώστε να μπορεί να στερεωθεί κάθε πλευρά προς κοπή στην εσοχή του πάγκου εργασίας απ' όπου εξέρχεται ο τροχός.

Σύμφωνα λοιπόν με το πρότυπο ASTM D3039 για δοκιμή του υλικού σε εφελκυσμό θα χρειαστεί να παρασκευάσουμε 8 δοκίμια για τον χαρακτηρισμό του υλικού στην διεύθυνση warp με πάχος 1 mm (4 στρώσεις) και 8 για την fill αντίστοιχα με πάχος 2 mm (8 στρώσεις).

Για την warp διεύθυνση το μήκος αποφασίστηκε να είναι 250 mm ενώ το πλάτος 15 mm για κάθε δοκίμιο. Έτσι η πλάκα θα έχει διαστάσεις 300 x 345 x 1 mm (l x b x t). Για τη διεύθυνση fill αποφασίστηκε μήκος 175 mm και πλάτος 25 mm οπότε αυτή η πλάκα θα έχει διαστάσεις 425 x 225 x 2 mm (l x b x t). Η δοκιμή του υλικού και στις δυο αυτές διευθύνσεις παρ' ότι έχουμε σαν δεδομένο ότι έχουμε συμμετρικό πολύστρωτο αποφασίστηκε αφενός μεν για την επαλήθευση αυτής της ιδιότητας και αφετέρου για τον καλύτερο χαρακτηρισμό του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό αφού τα δοκίμια για τις δοκιμές στις δυο διευθύνσεις διαφέρουν σε διαστάσεις και πάχος. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3518 για δοκιμή του υλικού σε ενδοστρωματική διάτμηση θα κατασκευάσουμε ξανά 8 δοκίμια με διαστάσεις που ορίζονται από το παραπάνω πρότυπο για εφελκυσμό με τη διαφορά ότι το πάχος θα οριστεί από τον τρόπο κατασκευής των δοκιμίων και ορίζεται η ακολουθία των στρώσεων ως εξής : [45/-45]_{4s} το οποίο σημαίνει 8 στρώσεις, δηλαδή περίπου 2mm. Επιλέγω το μήκος των δοκιμίων να είναι 250 mm και το πλάτος τους 15 mm πράγμα το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή πλάκας με τις διαστάσεις 435.37 x 435.37 x 2 mm (l x b x t). Τέλος, θα γίνει έλεγχος του υλικού για αντοχή σε κάμψη όπως ορίζει το πρότυπο ASTM D790. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο το κάθε δοκίμιο θα έχει διαστάσεις 51 x 12.7 x 2 mm και συνεπώς η πλάκα που θα χρειαστεί να κατασκευάσουμε θα έχει διαστάσεις 329 x 100.4 x 2 mm. Στο σχήμα 2.1 έχουμε ένα σκαρίφημα των πλακών που κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 2.1 : Σκαρίφημα πλακών

Μετά το σχεδιασμό των πλακών ξεκίνησε η διαδικασία κατασκευής τους. Αρχικά βγάλαμε το ρολό των 40 τ.μ. pre-preg από την κατάψυξη ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$) και κόψαμε τα κομμάτια που χρειαστήκαμε για την κατασκευή όλων των πλακών και επανατοποθετήσαμε το υπόλοιπο ρολό στην κατάψυξη. Για καλούπι χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα από πυρίμαχο γυαλί με διαστάσεις $45 \times 55\text{ cm}$ ώστε να χωράει στον κλίβανο του εργαστηρίου. Στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας υπάρχει κλίβανος της εταιρείας Thermawatt τύπου TG210 με μέγιστη δυνατή θερμοκρασία $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, με τον οποίο έχει συζευχθεί πίνακας αυτοματοποίησης τύπου dicon 501, που επιτρέπει προγραμματισμένους κύκλους θέρμανσης. Ο κλίβανος όπως και ο πίνακας αυτοματοποίησης φαίνονται στο σχήμα 2.2.



(α)

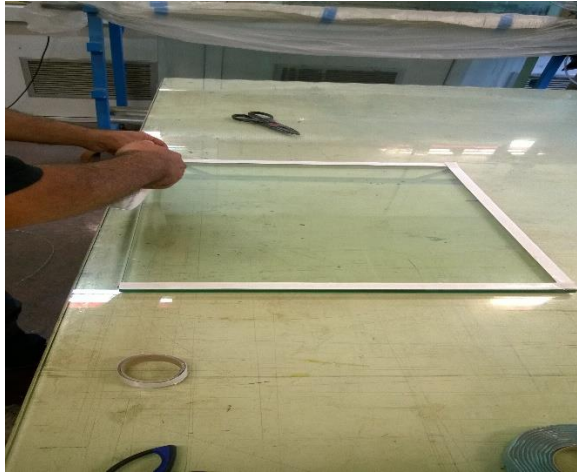
(β)

Σχήμα 2.2: (α) κλίβανος, (β) πίνακας αυτοματοποίησης

Το [Karatzas 2011] χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των βημάτων αλλά και των στρώσεων των απαραίτητων υλικών, όπως αυτά περιγράφονται παρακάτω, για την κατασκευή των πλακών.

Εφόσον το γυάλινο καλούπι ήταν μοναδικό αποφασίστηκε η πλάκα των δοκιμών για κάμψη και αυτή των δοκιμών για εφελκυσμό στη διεύθυνση warp να κατασκευαστούν μαζί, αφού έχουν και το ίδιο πάχος, ενώ η διαδικασία να επαναληφθεί για τις υπόλοιπες δυο πλάκες. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των δυο πλακών που κατασκευάστηκαν μαζί. Τα κομμένα κομμάτια αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για 2-3 ώρες ώστε να αποψυχθούν προτού αφαιρεθεί το ειδικό προστατευτικό πλαστικό και να αποφευχθεί η συμπίκνωση νερού στο πολύστρωτο. Η διαδικασία ξεκίνησε τοποθετώντας tacky tape στις

άκρες του καλουπιού μας με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης επιφάνειας του, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Έπειτα έγινε επάλειψη της επιφάνειας του καλουπιού με ειδικό κερί και τη βοήθεια ενός υφασμάτινου πανιού για τον ευκολότερο αποχωρισμό πλάκας-καλουπιού μετά τη διαδικασία πολυμερισμού.

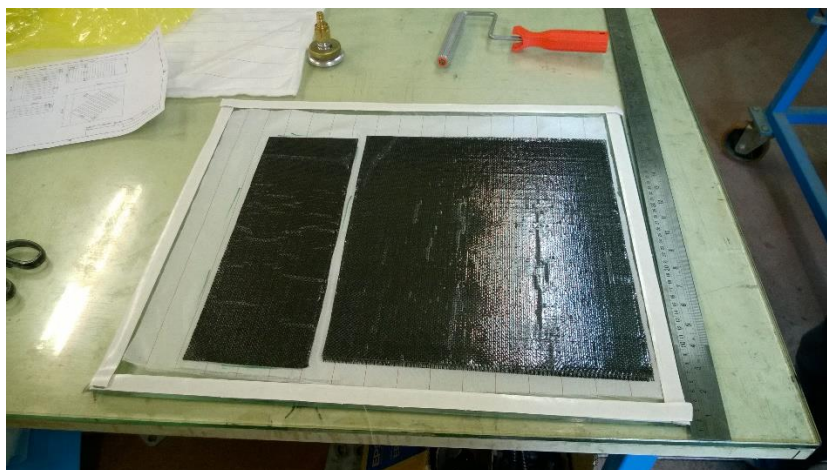


Σχήμα 2.3: Τοποθέτηση tacky tape στις άκρες του καλουπιού

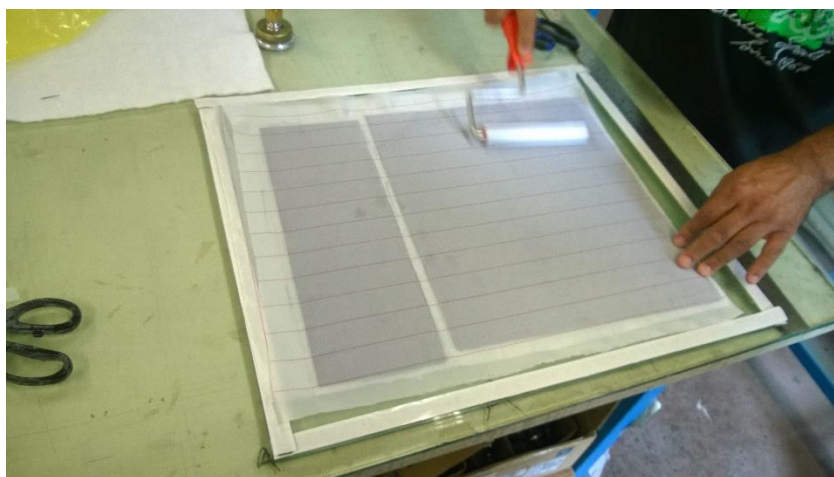
Στη συνέχεια ένα φύλλο peel ply κόπηκε στις διαστάσεις που υπαγορεύθηκαν από το tacky tape και τοποθετήθηκε επάνω στο κερί, όπως διακρίνεται και στο σχήμα 2.4. Μετά την τοποθέτηση του peel ply αφαιρέθηκε το προστατευτικό πλαστικό από το pre-preg και η στρώσεις για κάθε πλάκα τοποθετήθηκαν μία-μία με ιδιαίτερη προσοχή ώστε ο προσανατολισμός των ινών να είναι όπως έχει αναφερθεί παραπάνω. Με την τοποθέτηση κάθε στρώσης υπήρξε εφαρμογή πίεσης με ρολό ώστε να έχουμε καλύτερη συνάφεια μεταξύ των στρώσεων αλλά και για την αποφυγή, όσο είναι δυνατόν, των μεταξύ τους διάκενων. Πάνω στην τελευταία στρώση τοποθετήθηκε ξανά ένα φύλλο peel ply και ένα φύλλο breather ίδιων διαστάσεων. Στα σχήματα 2.5, 2.6, 2.7 παρατηρούμε την αλληλουχία των στρώσεων όπως αναφέρεται παραπάνω με χρονική σειρά.



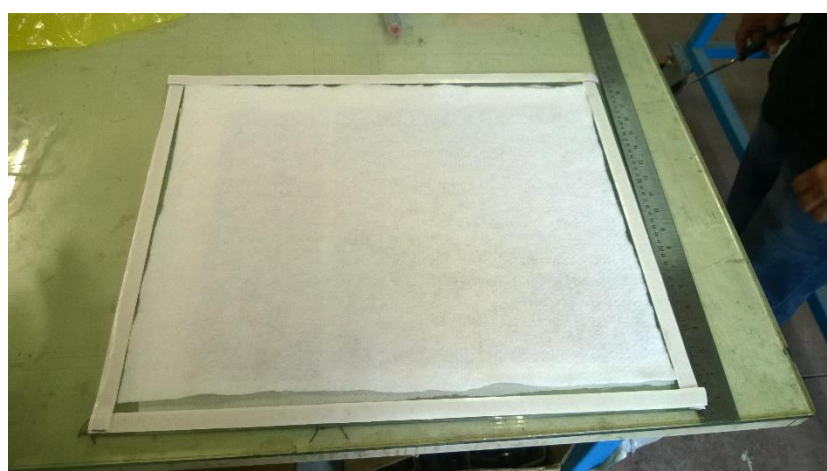
Σχήμα 2.4: Τοποθέτηση στρώσης peel ply επάνω στο κερί



Σχήμα 2.5: Τοποθέτηση στρώσεων πολυστρωτου



Σχήμα 2.6: Τοποθέτηση στρώσης peel ply επάνω στο πολυστρωτο



Σχήμα 2.7: Τοποθέτηση φύλλου breather

Ύστερα από την τοποθέτηση και του φύλλου breather έγινε αποκόλληση του προστατευτικού χαρτιού της πάνω μεριάς του tacky tape και η διάταξη σφραγίστηκε με σακούλα κενού, η οποία κολλήθηκε πάνω στο tacky tape με προσοχή ώστε να μην υπάρχουν διαρροές αέρα. Στην σακούλα κενού είχε τοποθετηθεί από πριν ανεπίστροφη βαλβίδα εξαγωγής αέρα η οποία τοποθετήθηκε στην διάταξη σε σημείο κάτω από το οποίο δεν υπήρχε πολύστρωτο για να μην έχουμε αναρρόφηση ρητίνης. Η διάταξη τοποθετήθηκε στον κλίβανο και η βαλβίδα αναρρόφησης συνδέθηκε με σωλήνα σε αντλία κενού του εργαστηρίου. Ο σωλήνας περάστηκε από την ψυκτική εσοχή του κλιβάνου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.8, και η σύνδεσή του με την βαλβίδα σφραγίστηκε με επιπλέον tacky tape για αποφυγή διαρροών αέρα. Το κενό το οποίο εφαρμόστηκε ήταν 0.6 – 0.7 bar και αφού διαπιστώθηκε ότι διατηρείται ξεκίνησε ο θερμικός κύκλος με στόχο τον πολυμερισμό της ρητίνης. Η μέγιστη θερμοκρασία αυτού του κύκλου όπως προτείνεται από τον προμηθευτή είναι 120 °C και έτσι όλα τα υλικά πριν την έναρξη της κατασκευής τοποθετήθηκαν στον κλίβανο σε θερμοκρασία 130 °C για 15 λεπτά όπου και επιβεβαιώθηκε η θερμική τους αντοχή. Η διάταξη μετά την εφαρμογή κενού και στο εσωτερικό του κλιβάνου απεικονίζεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.8: Πέρασμα σωλήνα αναρρόφησης από ψυκτική εσοχή κλιβάνου



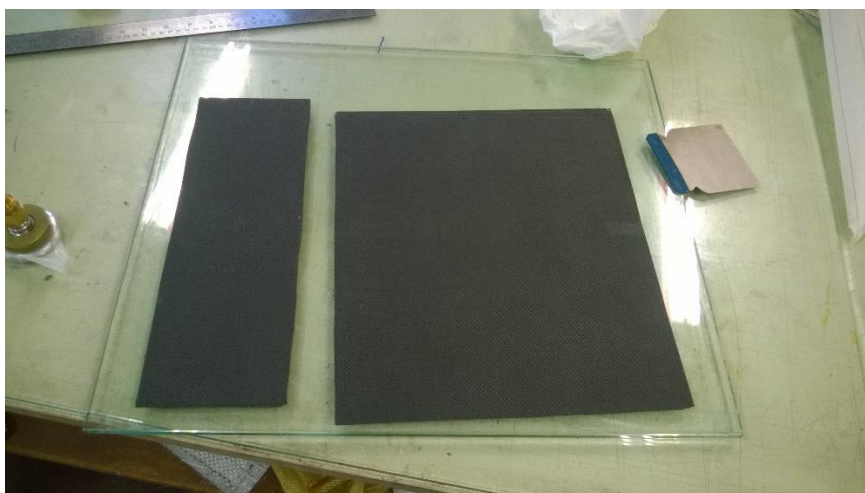
Σχήμα 2.9: Διάταξη κατασκευής πλακών pre-preg μετά την εφαρμογή κενού

Ο θερμικός κύκλος για τον πολυμερισμό της ρητίνης που ακολουθήθηκε και προτείνεται από τον προμηθευτή έχει ως εξής:

Προγραμματίσαμε τον κλίβανο ώστε να ανεβάσει θερμοκρασία με ρυθμό 5 °C/min μέχρι τους 120 °C, θερμοκρασία η οποία διατηρήθηκε για 1 ώρα και μετά η θερμοκρασία μειώθηκε με τον ίδιο ρυθμό μέχρι τους 60 °C. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει την τελική τιμή η εφαρμογή κενού δεν είναι πλέον απαραίτητη και η αντλία απενεργοποιείται. Η διάταξη αφαιρέθηκε από τον κλίβανο και αφέθηκε να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου. Έπειτα έγινε το ξεκαλούπωμα. Η διάταξη μετά το πέρας του θερμικού κύκλου φαίνεται στο σχήμα 2.10, ενώ οι πλάκες από τις οποίες θα κοπούν τα δοκίμια για τις δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό και κάμψη μετά την εξαγωγή τους από το καλούπι απεικονίζονται στο σχήμα 2.11.

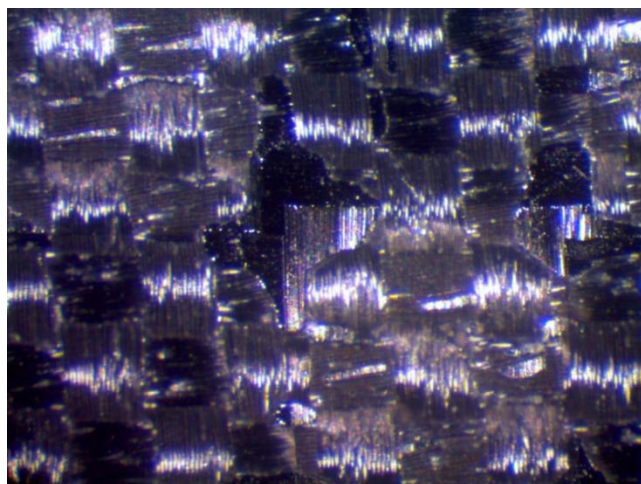


Σχήμα 2.10: Διάταξη μετά το πέρας του θερμικού κύκλου

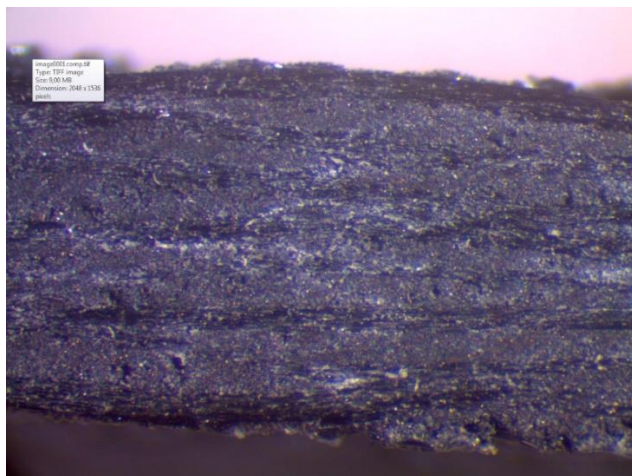


Σχήμα 2.11: Πλάκες δοκιμίων για αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη

Αξίζει να παρατηρηθεί σε αυτό το σημείο η απορρόφηση ρητίνης από το φύλλο breather κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού. Το σχήμα 2.12 παρουσιάζει την φωτογραφία από το ηλεκτρονικό στερεοσκόπιο του εργαστηρίου για δοκίμιο της πλάκας δοκιμίων εφελκυσμού στη διεύθυνση fill και απεικονίζει την επιφάνεια του, όπου φαίνεται ότι υπάρχουν κάποια σημεία (σκούρες περιοχές) στα οποία δεν έχουμε πλήρη επικάλυψη των ινών με ρητίνη. Στο σχήμα 2.13 έχουμε επίσης στερεοσκοπική φωτογραφία του ίδιου δοκιμίου σε πλάγια όψη όπου παρατηρείται ότι έχει γίνει πλήρης σύνδεση των στρώσεων μεταξύ τους και το υλικό έχει ικανοποιητική συνοχή.



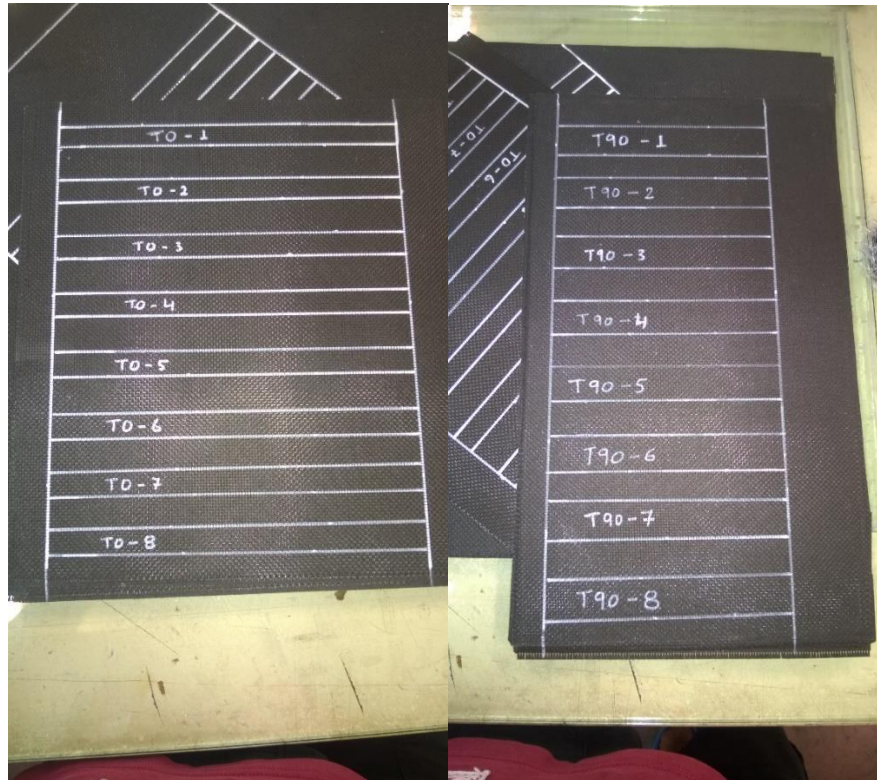
Σχήμα 2.12: Στερεοσκοπική φωτογραφία επιφάνειας δοκιμίου pre-preg



Σχήμα 2.13: Στερεοσκοπική φωτογραφία πλάγιας όψης δοκιμίου pre-preg

Η διαδικασία επαναλήφθηκε ακόμα 2 φορές για την κατασκευή των πλακών των δοκιμίων αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση fill και των δοκιμίων αντοχής σε ενδοστρωματική διάτμηση. Η διαφορά στην πρώτη είναι ότι χρησιμοποιήθηκαν 8 στρώσεις υλικού αντί τεσσάρων στις προηγούμενες, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 4

στρώσεις όμως τοποθετήθηκαν εναλλάξ οι δυο διευθύνσεις με σκοπό να πετύχουμε στο τέλος με την κατάλληλη σχεδίαση των δοκιμίων ένα πολύστρωτο $[+45,-45]_s$. Σε όλες τις πλάκες διαγραμμίστηκαν τα δοκίμια με άσπρο μαρκαδόρο και κόπηκαν σε υδρολιπαινόμενο τροχό. Στα σχήματα 2.14 (α), 2.14(β), 2.15, 2.16 μπορούμε να διακρίνουμε τα σχεδιασμένα δοκίμια πάνω στις αντίστοιχες πλάκες.



(α)

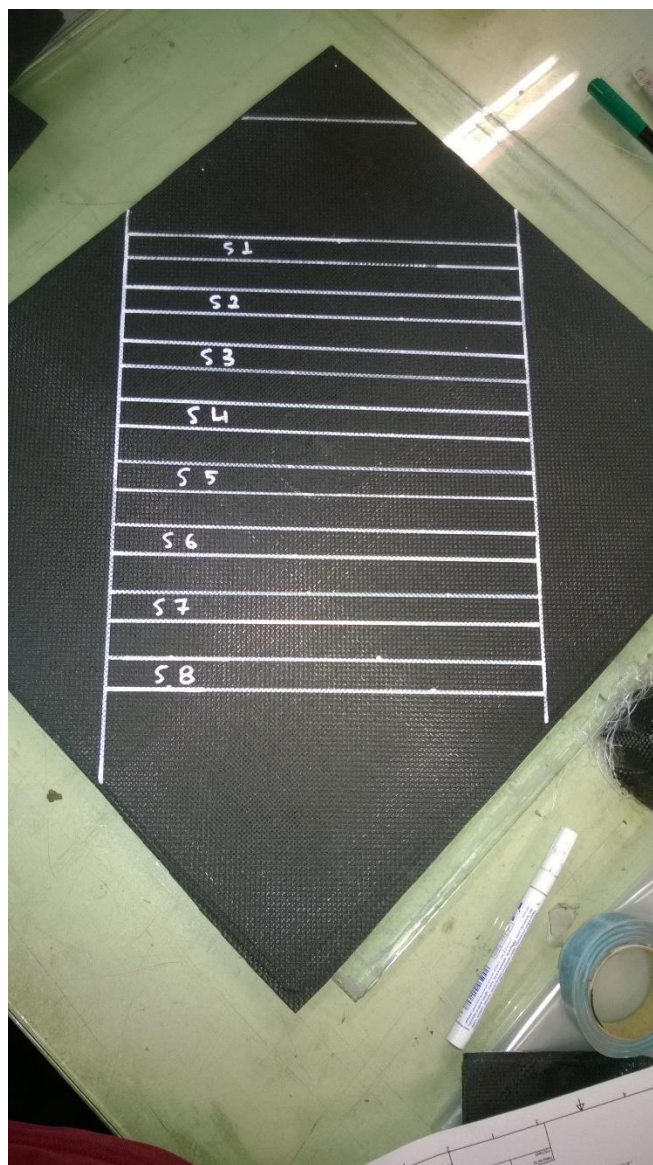
(β)

Σχήμα 2.14: (α) Δοκίμια αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση warp

(β) Δοκίμια αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση fill



Σχήμα 2.15: Δοκίμια αντοχής σε κάμψη



Σχήμα 2.16: Δοκίμια αντοχής σε ενδοστρωματική διάτμηση

2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι δοκιμές περιεκτικότητας σε ίνες του υλικού pre-preg έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3171, στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Στη μέθοδο αυτή αφαιρείται η μήτρα με χημική επεξεργασία ενός δοκιμίου και μετριέται η μάζα των εναπομεινάντων ινών η οποία συγκρινόμενη με την αρχική μάζα του δοκιμίου μας δίνει την, κατά βάρος, περιεκτικότητα σε ίνες του υλικού μας. Στην περίπτωση μας, αφού έχουμε εποξική ρητίνη, η αφαίρεση της γίνεται με τη βοήθεια διαλύματος νιτρικού οξέος 65% καθαρότητας, της εταιρείας Sigma-Aldrich, όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο και ειδικότερα από την

διαδικασία Α αυτού. Έγιναν τέσσερις δοκιμές περιεκτικότητας σε ίνες, από τα οποία τα δύο έγιναν με δοκίμια που προήλθαν από την πλάκα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση warp και τα υπόλοιπα δυο από την πλάκα δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση fill. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια για τις δοκιμές περιεκτικότητας ήταν από τα κομμάτια των πλακών ανάμεσα στα δοκίμια, δηλαδή από το κενό που ήταν απαραίτητο να αφηθεί ώστε να είναι δυνατή η κοπή των δοκιμών. Από αυτά τα κομμάτια υπολογίστηκαν δοκίμια περιεκτικότητας που ζύγιζαν περίπου 1 g και κόπηκαν με τον υδρολιπαινώμενο τροχό. Λόγω του ότι η λίπανση της κοπής γίνεται με νερό, τα δοκίμια έμειναν για λίγες μέρες σε θερμοκρασία δωματίου και πριν την έναρξη των πειραμάτων, με πιστολάκι θερμού αέρα, έγινε αφυδάτωσή τους.

Για κάθε πείραμα η διαδικασία ήταν ως εξής:

Αρχικά μετρήθηκε, με ακρίβεια χιλιοστού του γραμμαρίου, η μάζα του δοκιμίου, του φίλτρου συγκράτησης ινών και του Petri dish σε ζυγαριά ακριβείας, η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.17. Στη συνέχεια εναποτέθηκαν σε πυρίμαχο γυάλινο δοχείο, 250 ml νιτρικού οξέος, δύο μικρά μαγνητάκια ανάδευσης και το δοκίμιο μας. Τα μαγνητάκια ανάδευσης απεικονίζονται στο σχήμα 2.18. Το δοχείο με τα περιεχόμενά του τοποθετήθηκαν σε μαγνητικό θερμοαναδευτήρα, του σχήματος 2.19, με τον οποίο έχουμε την δυνατότητα να θερμαίνουμε το μείγμα μας και ταυτόχρονα, με το μαγνητικό πεδίο που αλληλοεπιδρά με τα μαγνητάκια ανάδευσης, να προσδίδουμε περιστροφική ταχύτητα σε αυτό. Η περιδίνηση που δημιουργούν τα μαγνητάκια ανάδευσης είναι απαραίτητη για την διάλυση της ρητίνης από το νιτρικό οξύ.



Σχήμα 2.17: Ζυγαριά ακριβείας



Σχήμα 2.18: Μαγνητάκια ανάδευσης



Σχήμα 2.19: Μαγνητικός θερμοαναδευτήρας

Με την έναρξη της διαδικασίας θέρμανσης και ανάδευσης του μείγματος παρατηρείται σταδιακή αλλαγή στον χρωματισμό του διαλύματος νιτρικού οξέος, από διάφανο σε κιτρινωπό, γεγονός που επιβεβαιώνει την διάλυση της ρητίνης. Σε πολλές δοκιμές τέτοιου τύπου είναι απαραίτητο να προσθέσουμε διάλυμα οξέος στο δοχείο κατά τη διάρκεια του πειράματος, όταν κριθεί ότι η διαδικασία επιβραδύνεται σημαντικά. Αυτή η φάση του πειράματος τερματίζεται όταν στο μείγμα υπάρχουν μόνο ίνες που δεν είναι κολλημένες μεταξύ τους και μπορούν να διαχωριστούν εύκολα με μια λαβίδα. Μετά το τέλος της διαδικασίας το φίλτρο συγκράτησης ινών τοποθετήθηκε σε ειδικό χωνί το οποίο καταλήγει σε δοχείο στο οποίο δημιουργείται υποπίεση μέσω ροής ύδατος με ειδική βαλβίδα και ξεκίνησε η περαιτέρω αραίωση του μείγματός μας. Το σχήμα 2.20 δείχνει το φίλτρο συγκράτησης ινών, ενώ το σχήμα 2.21 δείχνει το ειδικό χωνί, που υποδέχεται το φίλτρο, προσαρμοσμένο στο δοχείο υποπίεσης που καταλήγει το αραιωμένο διάλυμα νιτρικού οξέος.



Σχήμα 2.20: Φύλτρο συγκράτησης ινών



Σχήμα 2.21: Χωνί προσαρμοσμένο στο δοχείο υποπίεσης

Προσθέσαμε απιονισμένο νερό στο αρχικό μας διάλυμα ώστε αυτό να αραιωθεί και ρίξαμε το μίγμα στο ειδικό χωνί ώστε να στραγγιστούν οι ίνες από το αραιωμένο διάλυμα οξέος. Συνήθως επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αραιώσης τουλάχιστον 3 φορές, όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο αλλά και για να είμαστε σίγουροι ότι το τελικό διάλυμα δεν είναι πλέον καυστικό. Τα μαγνητάκια ανάδευσης αφαιρέθηκαν με μια λαβίδα και πλύθηκαν με νερό σχολαστικά πριν φυλαχθούν για επόμενες χρήσεις. Προσέχουμε στο τέλος να μην απομείνει καμία ίνα στο αρχικό δοχείο και έτσι το ξεπλένουμε αρκετές φορές. Όταν βεβαιωθήκαμε ότι το αρχικό δοχείο δεν είχε ίνες και αφού περιμέναμε να υποχωρήσει το νερό

από το χωνί αφαιρέσαμε προσεκτικά το φίλτρο μαζί με τις ίνες και τα τοποθετήσαμε στο Petri dish. Η όλη διάταξη τοποθετήθηκε στον κλίβανο του εργαστηρίου και παρέμεινε εκεί για 90 λεπτά σε θερμοκρασία 100 °C με στόχο την αφυδάτωση του φίλτρου και των ινών. Σε συνέχεια της προσπάθειας για μείωση της ύπαρξης ύδατος, το petri dish μαζί με τις ίνες και το φίλτρο τοποθετήθηκαν σε αφυγραντή, που φαίνεται στο σχήμα 2.22, όπου και παρέμειναν για περίπου 24 ώρες. Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται η τελική κατάσταση του petri dish με το φίλτρο και τις ίνες άνθρακα. Τελικά μετρήθηκε η μάζα της διάταξης στη ζυγαριά ακριβείας και αφού αφαιρέθηκαν οι μάζες του φίλτρου και του petri dish, βρέθηκε η μάζα των ινών του αρχικού δοκιμίου και συνεπώς και η ζητούμενη περιεκτικότητα κατά βάρος. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές.



Σχήμα 2.22: Αφυγραντής



Σχήμα 2.23: Τελική διάταξη προς μέτρηση

- Το δοκίμιο για το πρώτο πείραμα προήλθε από την πλάκα των δοκιμών εφελκυσμού στη διεύθυνση fill δηλαδή το πολύστρωτο είχε 8 στρώσεις υλικού. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι μάζες όπως μετρήθηκαν στη ζυγαριά ακριβείας

Πίνακας 2.2 : Αρχικές μάζες παραμέτρων πρώτου πειράματος

Μάζα δοκιμίου (M_1)	1.006 g
Μάζα φίλτρου συγκράτησης ινών (M_ϕ)	1.759 g
Μάζα petri dish (M_d)	72.769 g

Στο αρχικό δοχείο κατά την έναρξη του πειράματος προσθέσαμε 240 ml διαλύματος νιτρικού οξέος, η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 140 °C ενώ η περιστροφική ταχύτητα ρυθμίστηκε στην τιμή 3,5 rpm. Στο μέσο του πειράματος αποφασίστηκε να προστεθούν ακόμα 80 ml διαλύματος νιτρικού οξέος. Μετά την διάλυση της ρητίνης και την εξαγωγή του φίλτρου και των ινών, όπως περιγράφεται παραπάνω, τοποθετήσαμε το petri dish στον κλίβανο για 1 ώρα στους 100 °C. Έπειτα η διάταξη τοποθετήθηκε στον αφυγραντή και μετά το πέρας του προβλεπόμενου χρονικού διαστήματος μετρήθηκε η συνολική μάζα του petri dish, του φίλτρου και των ινών, το οποίο ήταν:

$$M_{cr} = 75.313 \text{ g}$$

Άρα το βάρος των ινών θα είναι:

$$M_f = M_{cr} - M_\phi - M_d = 0.785 \text{ g}$$

Και συνεπώς η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος του πρώτου δοκιμίου θα είναι:

$$W_f = (M_f / M_1) \times 100 = 78.03 \%$$

Η αλλιώς η περιεκτικότητα σε ρητίνη θα είναι:

$$W_m = 21.97 \%$$

- Το δοκίμιο για το δεύτερο πείραμα προήλθε από την ίδια πλάκα με το πρώτο. Οι αντίστοιχες μάζες φαίνονται στον πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 : Αρχικές μάζες παραμέτρων δεύτερου πειράματος

Μάζα δοκιμίου (M_1)	0.971 g
Μάζα φίλτρου συγκράτησης ινών (M_ϕ)	0.902 g
Μάζα petri dish (M_d)	72.769 g

Η αρχική ποσότητα διαλύματος νιτρικού οξέος ήταν 250 ml, ενώ η θερμοκρασία ρυθμίστηκε στους 150 °C με την τιμή της περιστροφικής ταχύτητας να είναι ξανά 3,5 rpm. Και σε αυτό το πείραμα απαραίτητη ήταν η προσθήκη 80 ml διαλύματος νιτρικού οξέος στο

χρονικό μέσο της διαδικασίας. Το πείραμα εκτελέστηκε με τον ίδιο τρόπο με το πρώτο και η συνολική μάζα που μετρήθηκε στο τέλος της διαδικασίας ήταν:

$$M_{cr} = 74.479 \text{ g}$$

Όπου βάρος ινών:

$$M_f = M_{cr} - M_{\phi} - M_d = 0.808 \text{ g}$$

Άρα η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος για το δεύτερο δοκίμιο θα είναι:

$$W_f = (M_f/M_1) \times 100 = 83.21 \%$$

Η αλλιώς η περιεκτικότητα σε ρητίνη θα είναι:

$$W_m = 16.79 \%$$

- Το δοκίμιο για το τρίτο πείραμα προήλθε από την πλάκα των δοκιμών αντοχής σε εφελκυσμό στη διεύθυνση warp. Οι αρχικές μάζες που αρχικά μετρήθηκαν δίνονται στο πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4 : Αρχικές μάζες παραμέτρων τρίτου πειράματος

Μάζα δοκιμίου (M_1)	0.986 g
Μάζα φίλτρου συγκράτησης ινών (M_{ϕ})	1.812 g
Μάζα petri dish (M_d)	73.148 g

Το διάλυμα νιτρικού οξέος στην αρχή ήταν 250 ml ενώ κατά τη διάρκεια του πειράματος προστέθηκαν άλλα 80 ml. Η θερμοκρασία στην οποία ρυθμίστηκε ο μαγνητικός θερμοαναδευτήρας ήταν 150 °C και η τιμή της περιστροφικής ταχύτητας 4 rpm. Μετά το τέλος του πειράματος η μάζα που ζυγίστηκε ήταν:

$$M_{cr} = 75.714 \text{ g}$$

Όπου βάρος ινών:

$$M_f = M_{cr} - M_{\phi} - M_d = 0.754 \text{ g}$$

Άρα η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος για το τρίτο δοκίμιο θα είναι:

$$W_f = (M_f/M_1) \times 100 = 76.47 \%$$

Η αλλιώς η περιεκτικότητα σε ρητίνη θα είναι:

$$W_m = 23.53 \%$$

- Στο τέταρτο και τελευταίο πείραμα χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο επίσης από την πλάκα των δοκιμίων εφελκυσμού στη διεύθυνση warp. Οι μάζες των αρχικών παραμέτρων μετρήθηκαν όπως δείχνει ο πίνακας 2.5:

Πίνακας 2.5 : Αρχικές μάζες παραμέτρων τέταρτου πειράματος

Μάζα δοκιμίου (M_1)	1.141 g
Μάζα φίλτρου συγκράτησης ινών (M_ϕ)	1.702 g
Μάζα petri dish (M_d)	72.565 g

Οι συνθήκες του πειράματος ήταν ακριβώς ίδιες με αυτές του τρίτου κατά σειρά δοκιμίου και τελικά η μάζα που μετρήθηκε ήταν:

$$M_{cr} = 75.165 \text{ g}$$

Όπου βάρος ινών:

$$M_f = M_{cr} - M_\phi - M_d = 0.898 \text{ g}$$

Άρα η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος για το τέταρτο δοκίμιο θα είναι:

$$W_f = (M_f/M_1) \times 100 = 78.7 \%$$

Η αλλιώς η περιεκτικότητα σε ρητίνη θα είναι:

$$W_m = 21.3 \%$$

Από τα πειράματα περιεκτικότητας προκύπτει μέσος όρος περιεκτικότητας, κατά βάρος, σε ίνες 80.62% για την πλάκα των δοκιμίων για τη διεύθυνση fill και 77.585% για τη πλάκα δοκιμίων στη διεύθυνση warp και ο μέσος όρος και από τα τέσσερα πειράματα θα είναι 79.103% περιεκτικότητας, κατά βάρος, σε ίνες. Για τα υλικά τέτοιου τύπου η περιεκτικότητα σε ίνες είναι εξαιρετικά υψηλή.

2.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΣΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ WARP ΚΑΙ FILL

Οι δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3039. Στη μέθοδο αυτή μια λεπτή λωρίδα υλικού τοποθετείται στις αρπάγες μια μηχανής δοκιμών και φορτίζεται μέχρι να επέλθει αστοχία της. Με την καταγραφή, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, της καμπύλης φορτίου μετατόπισης υπολογίζουμε έπειτα ιδιότητες του υλικού όπως το μέτρο ελαστικότητας και το μέγιστο φορτίο θραύσης. Οι δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό του υλικού pre-preg που έγιναν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίστηκαν σε δύο μέρη, στις δοκιμές εφελκυσμού στη διεύθυνση warp και στις δοκιμές εφελκυσμού στη διεύθυνση fill. Αυτή η πρακτική αποφασίστηκε παρότι

γνωρίζουμε ότι οι ενισχυτικές ίνες έχουν πλέξη της μορφής plain weave, που σημαίνει ότι οι ιδιότητες του υλικού είναι ίδιες στις δυο αυτές διευθύνσεις, αφενός για την επιβεβαίωση αυτού του γεγονότος και αφετέρου για τον ακριβέστερο υπολογισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων του υλικού μας. Αφού λοιπόν αποφασίστηκε να γίνουν δοκιμές και στις δυο διευθύνσεις, οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι οι προτεινόμενες για μονοαξονικά υλικά και όχι οι προτεινόμενες για συμμετρικά, πράγμα το οποίο όμως δεν επηρεάζει τον υπολογισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων, καθώς όλα τα δοκίμια ικανοποιούν τις γεωμετρικές απαιτήσεις του προτύπου. Στο εργαστήριο για τις εν λόγω δοκιμές κατασκευάστηκαν δυο ειδών πολύστρωτες πλάκες pre-preg, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 2.13, και από τις οποίες αποκόπηκαν 8 δοκίμια από την καθεμία για τις αντίστοιχες πειραματικές δοκιμές. Από τα 8 δοκίμια για κάθε διεύθυνση τελικά σε εφελκυσμό υποβλήθηκαν 5 από κάθε ομάδα, αριθμός που είναι και η ελάχιστη απαίτηση από το πρότυπο. Στον πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των 5 δοκιμίων της διεύθυνσης warp, ενώ στον πίνακα 2.7 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διαστάσεις για τα δοκίμια της διεύθυνσης fill. Για κάθε δοκίμιο, όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο, έγιναν μετρήσεις πάχους και πλάτους σε 3 σημεία:

1. Κοντά στο αριστερό άκρο
2. Στο κέντρο
3. Κοντά στο δεξί άκρο

Όλες οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό παχύμετρο εκτός από τις μετρήσεις μήκους που έγιναν με χάρακα. Το εμβαδόν τομής προέκυψε από τον μέσο όρο των εμβαδών στα σημεία 1,2,3.

Πίνακας 2.6: Διαστάσεις δοκιμίων διεύθυνσης warp

Ονοματολογία δοκιμίων	T0-1	T0-2	T0-3	T0-4	T0-5
Μήκος (mm)	249.0	249.0	250.0	250.0	250.0
Πλάτος 1 (mm)	15.3	16.1	16.0	15.2	16.1
Πλάτος 2 (mm)	15.1	15.1	15.4	14.5	15.7
Πλάτος 3 (mm)	15.6	14.7	15.8	15.2	16.2
Μέσος όρος πλάτους(mm)	15.3	15.3	15.7	15.0	16.0
Πάχος 1 (mm)	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
Πάχος 2 (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
Πάχος 3 (mm)	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9
Μέσος όρος πάχους(mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Πάχος κάθε στρώσης (mm)	0.224	0.216	0.228	0.213	0.213
Εμβαδόν τομής (mm ²)	13.7	13.2	14.4	12.7	14.3

Πίνακας 2.7: Διαστάσεις δοκιμίων διεύθυνσης fill

Ονοματολογία δοκιμίων	T90-1	T90-2	T90-3	T90-4	T90-5
Μήκος (mm)	177.0	176.0	176.0	176.0	176.0
Πλάτος 1 (mm)	26.0	25.4	26.3	26.3	26.0
Πλάτος 2 (mm)	25.9	25.2	26.0	25.9	25.4
Πλάτος 3 (mm)	26.1	25.7	26.3	26.3	25.4
Μέσος όρος πλάτους(mm)	26.0	25.4	26.2	26.2	25.6
Πάχος 1 (mm)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Πάχος 2 (mm)	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8
Πάχος 3 (mm)	1.8	1.8	1.7	1.7	1.8
Μέσος όρος πάχους(mm)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Πάχος κάθε στρώσης (mm)	0.226	0.223	0.220	0.222	0.225
Εμβαδόν τομής (mm ²)	47.0	45.3	46.2	46.5	46.1

Από τον πίνακα 2.6 προκύπτει ότι ο μέσος όρος για το πάχος μιας στρώσης για την πλάκα των δοκιμίων warp είναι 0.22 mm, ενώ από τον πίνακα 2.7 το αντίστοιχο πάχος για την πλάκα δοκιμίων fill είναι 0.223 mm, άρα η αρχική εκτίμηση που κάναμε για το πάχος κάθε στρώσης στα 0.25 mm είναι υπερβολική.

Επίσης στα δοκίμια 1 και 2, από κάθε ομάδα, κολλήθηκαν strain gages, στο κέντρο καθενός, επιπλέον του επιμηκυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δοκίμια. Στα πειράματά μας δεν υπήρχαν strain gauges και στις δυο πλευρές των δοκιμίων και έτσι δεν έγινε διόρθωση των αποτελεσμάτων για όποιο λάθος στη ευθυγράμμιση των αρπαγών υπήρξε. Επίσης δεν τοποθετήθηκαν strain gages στις κάθετες διευθύνσεις των δοκιμίων και έτσι από τα συγκεκριμένα πειράματα δεν υπολογίστηκε ο λόγος Poisson. Όλες οι δοκιμές έγιναν σε πειραματική υδραυλική μηχανή MTS, του εργαστηρίου, που είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [ISO 5893-2002] με μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο 100 kN, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24. Στο σχήμα 2.25 φαίνεται το πρώτο δοκίμιο για τις δοκιμές στη διεύθυνση warp, T0-1, πάνω στο οποίο έχει κολληθεί strain gauge και έχει τοποθετηθεί στην κάτω αρπάγη της μηχανής, ενώ στο σχήμα 2.26 φαίνεται το ίδιο δοκίμιο μετά την τοποθέτηση και του εξτενσιόμετρου αλλά και το κλείσιμο της άνω αρπάγης. Οι αρπάγες συγκρατούν τα δοκίμια με πίεση 4 MPa.



Σχήμα 2.24: Μηχανή δοκιμών MTS

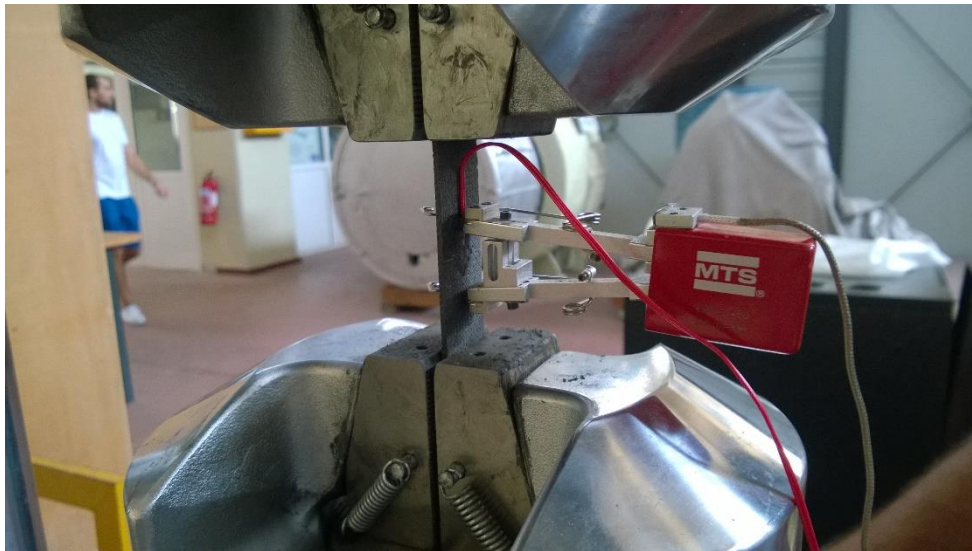


Σχήμα 2.25: Δοκίμιο T0-1 με strain gauge στην κάτω αρπάγη της μηχανής δοκιμών



Σχήμα 2.26: Δοκίμιο T0-1 με strain gauge και επιμηκυνσιόμετρο

Αντίστοιχα στο σχήμα 2.27 φαίνεται το δοκίμιο T90-1 τοποθετημένο στη μηχανή δοκιμών με τις αρπάγες κλειστές. Στο δοκίμιο έχει κολληθεί strain gauge και έχει τοποθετηθεί επιμηκυνσιόμετρο.



Σχήμα 2.27: Δοκίμιο T90-1 με strain gauge και επιμηκυνσιόμετρο στη μηχανή δοκιμών

Στις δοκιμές που έγιναν μετρήθηκαν η επιβαλλόμενη δύναμη, η αντίστοιχη μετατόπιση του εκάστοτε δοκιμίου και οι παραμορφώσεις (ϵ) στα σημεία που τοποθετήθηκαν τα strain gauges, με ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz. Ύστερα η διαίρεση της δύναμης με το εμβαδόν διατομής του κάθε δοκιμίου μας έδωσε την επιβαλλόμενη τάση. Δηλαδή ισχύει ο τύπος 2.1:

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

όπου σ η τάση [MPa], F η επιβαλλόμενη δύναμη [N], A εμβαδόν διατομής δοκιμίου [mm²].

Τα πειράματα γίνονται με σταθερή ταχύτητα απομάκρυνσης των αρπαγών της μηχανής. Από το πρότυπο δοκιμών προδιαγράφεται ότι τα πειράματα πρέπει να γίνουν με τέτοιο ρυθμό ώστε το κάθε δοκίμιο να αστοχεί σε χρόνο από 1 μέχρι 10 λεπτά. Έτσι η ταχύτητα που επιλέχθηκε για το πρώτο δοκίμιο της διεύθυνσης warp, T0-1, ήταν 1 mm/min, όπου το δοκίμιο αστόχησε σε περίπου 2 λεπτά. Αποφασίστηκε για τα υπόλοιπα πειράματα η ταχύτητα απομάκρυνσης των αρπαγών να γίνει 0,5 mm/min για μεγαλύτερη διάρκεια των δοκιμών. Για τα δοκίμια της διεύθυνσης fill η αντίστοιχη ταχύτητα για όλα τα δοκίμια ήταν 1 mm/min. Η μετατόπιση μετριέται από τη μηχανή δοκιμών, και παράλληλα γίνεται μέτρηση της παραμόρφωσης από το επιμηκυνσιόμετρο και από τα strain gages, σε όποια δοκίμια υπάρχουν, σε microstrain (με). Η παραμόρφωση σε μονάδες microstrain ορίζεται ως η μεταβολή μήκους του οργάνου διαιρεμένη με το αρχικό μήκος του και πολλαπλασιασμένη με 10⁶. Από το πρότυπο δοκιμών ορίζεται ότι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού προκύπτει από τον εξής τύπο 2.2:

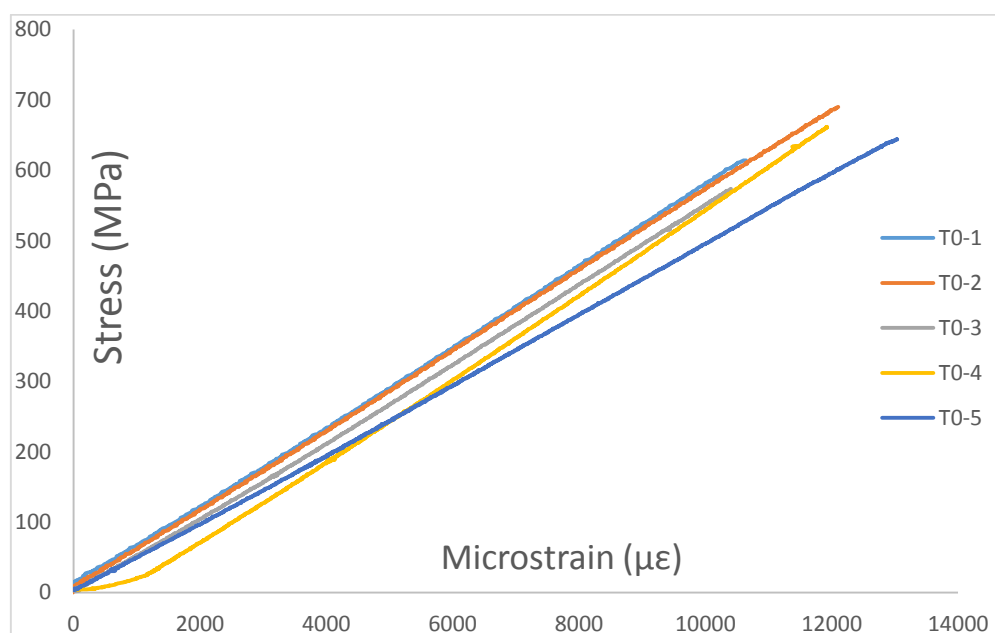
$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon \quad (2.2)$$

Όπου E το μέτρο ελαστικότητας [GPa], $\Delta\sigma$ είναι η διαφορά τάσης [MPa] ανάμεσα στα σημεία με microstrain 3000 και 1000, $\Delta\epsilon$ η διαφορά παραμόρφωσης ανάμεσα στα σημεία αυτά της οποίας η ενδεικτική τιμή είναι 0,002. Στον πίνακα 2.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τα δοκίμια της πλάκας warp, ενώ για κάθε μέγεθος παρουσιάζεται και ο

μέσος όρος (X_{mean}), η τυπική απόκλιση (S_{n-1}) και ο συντελεστής μεταβολής επί τις εκατό (CV). Στο σχήμα 2.28 φαίνονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο, όπως αυτά προέκυψαν από τα δεδομένα που συλλέξαμε από το επιμηκυνσιόμετρο για κάθε δοκίμιο, μέχρι το σημείο θραύσης.

Πίνακας 2.8: Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών $warp$ από επιμηκυνσιόμετρο

	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Φορτίο θραύσης (kN)	Τάση θραύσης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
T0-1	1.9	8.4	614.1	54932
T0-2	2.1	9.1	690.0	55187
T0-3	1.8	8.2	573.7	51881
T0-4	2.0	8.4	661.6	53091
T0-5	2.1	9.2	644.3	47410
Μέσος όρος (X_{mean})	1.992	8.676	636.752	52516
Τυπική απόκλιση (S_{n-1})	0.114	0.394	40.017	2.791
Συντελεστής μεταβολής % (CV)	5.741	4.538	6.285	5.315



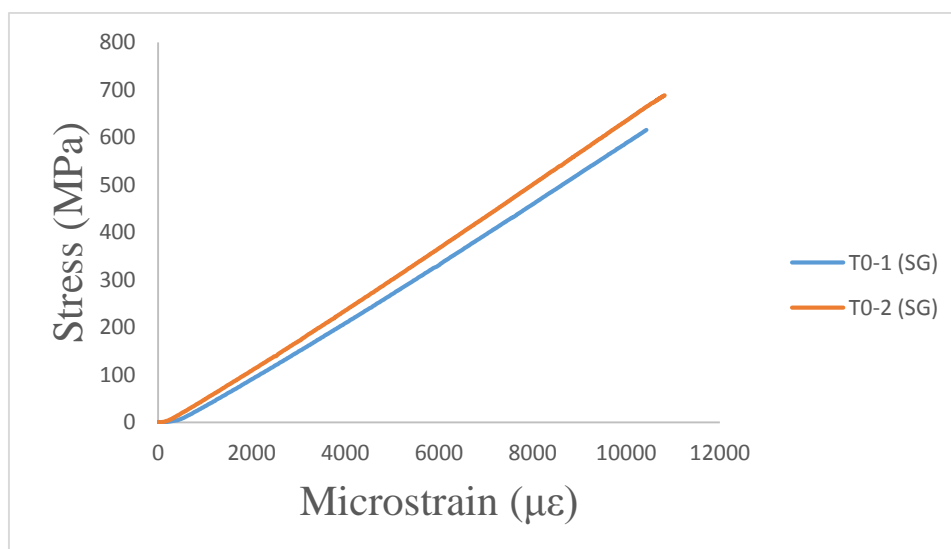
Σχήμα 2.28: Διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίων διεύθυνσης $warp$ από επιμηκυνσιόμετρο

Από τα strain gauges των δοκιμών T0-1 και T0-2 προέκυψαν επίσης τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών warp από strain gauges

Δοκίμιο	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Φορτίο θραύσης (kN)	Τάση θραύσης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
T0-1	1.9	8.5	615.7	57717
T0-2	2.1	9.1	688.6	61173

Επίσης τα διαγράμματα τάσης- microstrain που προκύπτουν από τα δεδομένα των εν λόγω strain gauges απεικονίζονται στο σχήμα 2.29.

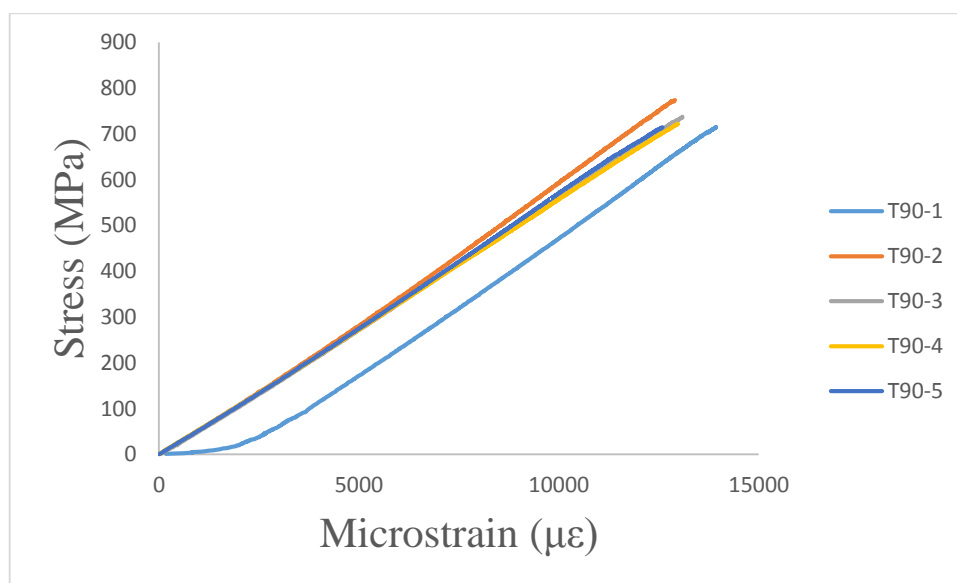


Σχήμα 2.29: Διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμών διεύθυνσης warp από strain gauges

Αντίστοιχα στον πίνακα 2.10 και στο σχήμα 2.30 φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και τα διαγράμματα για τα δοκίμια της διεύθυνσης fill, από τα δεδομένα που προέκυψαν από το επιμηκυνσιόμετρο.

Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμίων fill από επιμηκυνσιόμετρο

	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Φορτίο θραύσης (kN)	Τάση θραύσης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
T90-1	2.3	33.611	715.1	57561
T90-2	2.8	35.076	773.9	55141
T90-3	2.9	34.042	737.5	54012
T90-4	2.8	33.584	722.3	53168
T90-5	2.8	32.933	714.8	54041
Μέσος όρος (X_{mean})	2.7	33.849	732.7	54784
Τυπική απόκλιση (S_{n-1})	0.231	0.708	22.191	1.523
Συντελεστής μεταβολής % (CV)	8.4	2.1	3.0	2.8



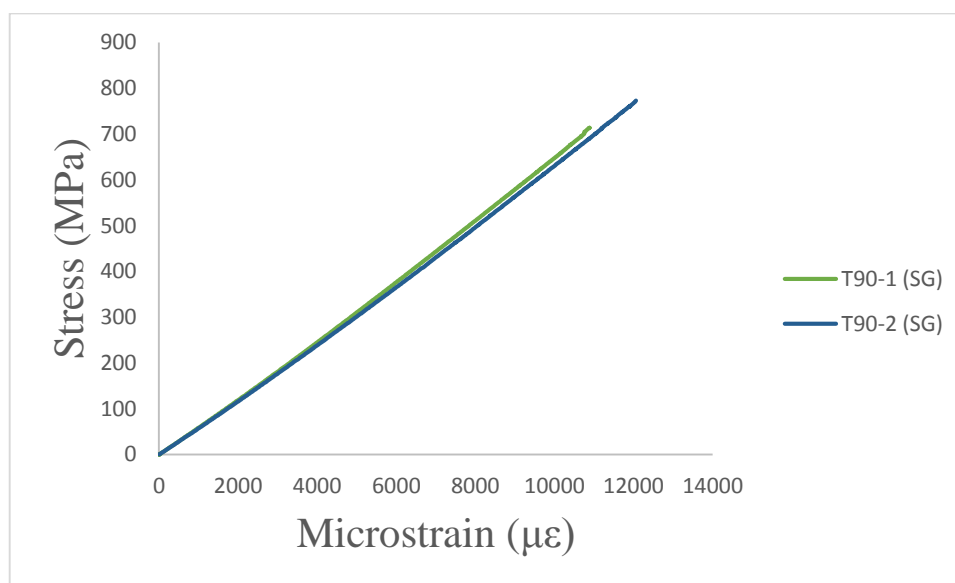
Σχήμα 2.30: Διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμίων διεύθυνσης fill από επιμηκυνσιόμετρο

Από τα strain gauges των δοκιμίων T90-1 και T90-2 προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 2.11.

Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών fill από strain gauges

Δοκίμιο	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Φορτίο θραύσης (kN)	Τάση θραύσης (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
T90-1	2.3	33.6	713.9	61376
T90-2	2.9	35.1	773.5	59907

Τα αντίστοιχα διαγράμματα των δυο strain gauges φαίνονται στο σχήμα 2.31.



Σχήμα 2.31: Διαγράμματα Τάσης – Παραμόρφωσης δοκιμών διεύθυνσης fill από strain gauges

2.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΜΨΗΣ

Οι δοκιμές κάμψης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D790. Στη μέθοδο αυτή γίνεται κάμψη 3 σημείων δοκιμίων του υλικού και καταγράφεται το φορτίο που δέχεται το δοκίμιο σε συνάρτηση με την μετατόπιση της κεφαλής της μηχανής. Τα πειράματα έγιναν στην ίδια μηχανή με τα πειράματα εφελκυσμού με την προσάρτηση στην μηχανή των κεφαλών κάμψης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.32.

Τα δοκίμια για τα πειράματα κάμψης που κατασκευάστηκαν ήταν 8 και αποκόπηκαν από τη πλάκα του σχήματος 2.14. Από τα 8 δοκίμια, σε κάμψη υποβλήθηκαν 5, που είναι και ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται από το πρότυπο. Οι διαστάσεις των δοκιμίων, όπως ορίζονται από το πρότυπο θα πρέπει να είναι: Μήκος = 50.8 mm, Πλάτος = 12.7 mm, Πάχος = 1 mm..

Κατασκευαστικά όμως είναι δύσκολο να επιτευχθούν οι ακριβείς διαστάσεις και έτσι στον πίνακα 2.12 φαίνονται οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν.

Το δοκίμιο 5F απορρίφθηκε λόγω μεγάλης απόκλισης από τις ζητούμενες διαστάσεις και αντικαταστάθηκε από το δοκίμιο 6F.

Πίνακας 2.12: Διαστάσεις δοκιμίων κάμψης

Ονοματολογία δοκιμίων	1F	2F	3F	4F	6F
Μήκος (mm)	49.7	49.9	50.1	50.4	50.4
Πλάτος 1 (mm)	13.1	13.1	12.9	12.8	13.7
Πλάτος 2 (mm)	13.0	13.0	12.8	12.9	13.7
Πλάτος 3 (mm)	13.1	13.0	12.8	12.9	13.5
Μέσος όρος πλάτους(mm)	13.0	13.0	12.8	12.9	13.7
Πάχος 1 (mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Πάχος 2 (mm)	0.9	0.9	1.0	0.8	0.9
Πάχος 3 (mm)	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9
Μέσος όρος πάχους(mm)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9



Σχήμα 2.32: Διάταξη πειραμάτων κάμψης

Η απόσταση των κάτω κεφαλών της μηχανής (support span) ήταν 26 mm. Πριν την έναρξη των πειραμάτων ορίστηκε η ταχύτητα της άνω κεφαλής της μηχανής δοκιμών, η οποία και είναι σταθερή κατά την διάρκεια των πειραμάτων, από την εξίσωση 2.3.

$$R = ZL^2/6d \quad (2.3)$$

Όπου R η ταχύτητα της κεφαλής (mm/min), L support span (mm), d το πάχος των δοκιμίων (mm), Z ο ρυθμός μετατόπισης της εξωτερικής ίνας και ίσος με 0.01.

Άρα η ταχύτητα κεφαλής θα είναι:

$$R=1.208 \text{ mm/min}$$

Επίσης από το πρότυπο ορίζεται πως το πείραμα θα πρέπει να τερματίζεται όταν το δοκίμιο φτάσει την τιμή strain 0.05 εκτός αν επέλθει θραύση του νωρίτερα. Η μετατόπιση θα δίνεται από την σχέση 2.4:

$$D = rL^2/6d \quad (2.4)$$

Όπου D η μετατόπιση (mm) και r η παραμόρφωση η οποία όταν φτάνει την τιμή 0.05 με τα υπόλοιπα μεγέθη ως έχουν στον τύπο της ταχύτητας κεφαλής έχουμε μετατόπιση:

$$D = 6.04 \text{ mm}$$

Το δοκίμιο του πρώτου πειράματος (1F), κατά τη διάρκεια του, φαίνεται στο σχήμα 2.33 στη μηχανή δοκιμών.



Σχήμα 2.33: Δοκίμιο 1F κατά τη διάρκεια πειράματος κάμψης

Στα δοκίμια που υποβάλλονται σε κάμψη η μεγαλύτερη φόρτιση παρατηρείται στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου στην περιοχή της μέσης τομής. Η τάση δίνεται από τον τύπο 2.5 (MPa).

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (2.5)$$

όπου b το πλάτος του δοκιμίου (mm) και τα υπόλοιπα μεγέθη ως έχουν.

Η μέγιστη τάση που παραλαμβάνει το δοκίμιο χαρακτηρίζεται ως τάση αντοχής σε κάμψη σ_{fm}

Η καμπτική παραμόρφωση στην εξωτερική επιφάνεια στην μέση τομή δίνεται από τη σχέση 2.6.

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (2.6)$$

όπου D η μετατόπιση της σχέσης 2.4 και τα υπόλοιπα μεγέθη ως έχουν.

Υπολογίζεται, σύμφωνα με το πρότυπο, το εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τη σχέση 2.7.

$$E_B \text{ (MPa)} = L^3 m / 4bd^3 \quad (2.7)$$

Όπου m είναι η κλίση της εφαπτόμενης του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης.

Επίσης υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας χορδής από δύο διακριτά σημεία της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης, τα οποία επιλέγονται ανάμεσα στα σημεία 1,2 με παραμόρφωση 0,06 και 0,04 αντίστοιχα, από τον τύπο 2.8.

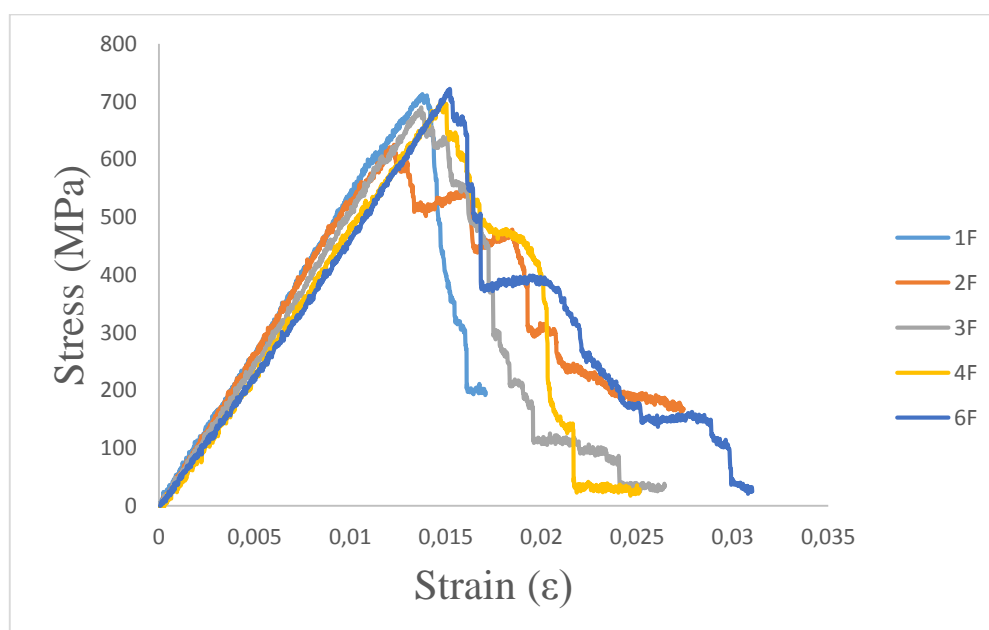
$$E_f \text{ (MPa)} = (\sigma_{f1} - \sigma_{f2}) / (\varepsilon_{f1} - \varepsilon_{f2}) \quad (2.8)$$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.13.

Πίνακας 2.13: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

	σ_{fm} (MPa)	E_B (MPa)	E_f (MPa)
1F	713.1	44925	55464
2F	625.0	36895	50274
3F	689.7	42513	50594
4F	697.9	38472	48936
6F	721.6	38128	46725
Μέσος όρος	689.4	40187	50399
Τυπική απόκλιση	34.1	3029.2	2875.6

Στο σχήμα 2.34 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης των δοκιμών.



Σχήμα 2.34: Διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών κάμψης

2.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Οι δοκιμές διάτμησης έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3518. Στη μέθοδο αυτή δοκίμια από πολύστρωτη πλάκα pre-preg με προσανατολισμό ινών $[+45^\circ/-45^\circ]_{ns}$ φορτίζονται στην κύρια διεύθυνση του πολύστρωτου και καταγράφονται οι παραμορφώσεις στην διεύθυνση warp και fill, καθώς και το φορτίο και η μετατόπιση που προκύπτει, μέχρις ότου το δοκίμιο σπάσει ή μέχρι η διατμητική παραμόρφωση να φτάσει το 5%. Η απαιτούμενη αλληλουχία στρώσεων επιτεύχθηκε βάζοντας διαδοχικά τις προβλεπόμενες στρώσεις τη μία πάνω στη άλλη με τον ίδιο προσανατολισμό και χαράσσοντας το κάθε δοκίμιο υπό γωνία 45° από την κύρια διεύθυνση της πολύστρωτης πλάκας όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.15. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν διαφορετικά από αυτά που ορίζει το πρότυπο. Συγκεκριμένα είχαν 4 στρώσεις αντί για 8, δηλαδή ήταν $[+45^\circ/-45^\circ]_s$ αντί για $[+45^\circ/-45^\circ]_{ns}$ και επομένως το απαιτούμενο πάχος ήταν διαφορετικό. Επίσης διαφοροποίηση από το πρότυπο παρουσιάστηκε και στο πλάτος με το πραγματικό πλάτος να είναι 15 mm, ενώ το οριζόμενο να είναι 25 mm. Τα τελικά αποτελέσματα, πάραυτα θεωρήθηκε ότι είχαν καλή επαναληψιμότητα και ορθότητα και έτσι αποφασίστηκε να μην επαναληφθούν τα πειράματα. Τα δοκίμια αποκόπηκαν από την πλάκα του σχήματος 2.15 με χρήση υδρολιπαινόμενου τροχού και μετρήθηκαν οι διαστάσεις καθενός από αυτά. Κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια και υποβλήθηκαν σε δοκιμή τα 5 από αυτά, καθώς αυτός είναι ο ελάχιστος αριθμός που απαιτείται από το πρότυπο. Οι διαστάσεις των 5 δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.14. Το πλάτος και το πάχος μετρήθηκαν σε 3 σημεία του δοκιμίου παρόμοια με τις δοκιμές εφελκυσμού.

Πίνακας 2.14: Διαστάσεις δοκιμίων διάτμησης

Ονοματολογία δοκιμίων	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Μήκος (mm)	250.5	251.0	250.5	250.5	251.0
Πλάτος 1 (mm)	15.1	15.3	15.1	15.2	16.1
Πλάτος 2 (mm)	14.5	14.7	14.9	15.1	15.4
Πλάτος 3 (mm)	15.4	15.2	15.2	15.9	15.9
Μέσος όρος πλάτους(mm)	15.0	15.1	15.0	15.4	15.8
Πάχος 1 (mm)	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
Πάχος 2 (mm)	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
Πάχος 3 (mm)	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
Μέσος όρος πάχους(mm)	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
Εμβαδόν τομής (mm ²)	14.2	13.7	14.9	14.4	14.3

Σε όλα τα δοκίμια κολλήθηκαν ροζέτες, ακριβώς στο κέντρο κάθε δοκιμίου, δηλαδή ειδικά διπλά strain gauges με τα οποία είναι δυνατόν να μετράμε την παραμόρφωση στις δυο

κάθετες, κύριες διευθύνσεις. Στο σχήμα 2.35 φαίνεται μια τέτοια ροζέτα, κολλημένη στο κέντρο ενός από τα εν λόγω δοκίμια.

Σύμφωνα με το πρότυπο υπολογίζεται η διατμητική τάση που ασκείται στο δοκίμιο από την σχέση 2.9.

$$\tau_{12i} = P_i / 2A \quad (2.9)$$

όπου

τ_{12i} = η διατμητική τάση στο σημείο i (MPa)

P_i = φορτίο στο σημείο i (N)

A = εμβαδόν διατομής όπως ορίζεται και στο πρότυπο αντοχής εφελκυσμού D3039 (mm²)

Επίσης ορίζεται η διατμητική παραμόρφωση από τη σχέση 2.10.

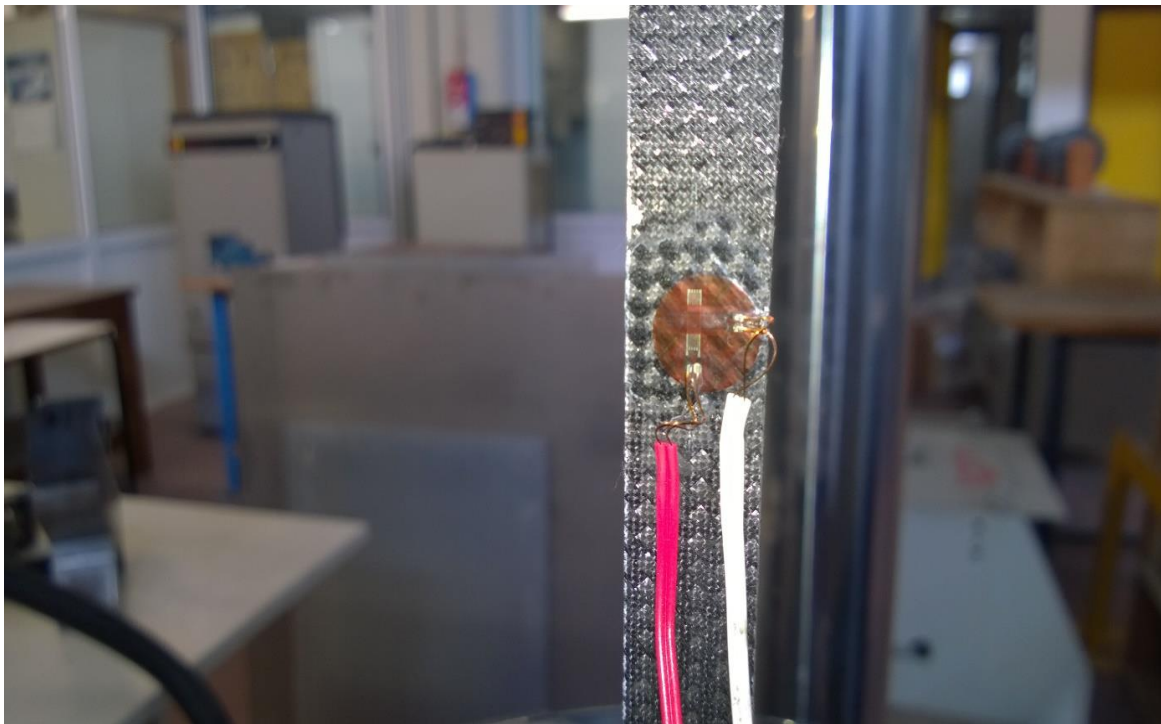
$$\gamma_{12i} = \epsilon_{\chi i} - \epsilon_{\psi i} \quad (2.10)$$

όπου

γ_{12i} = η διατμητική παραμόρφωση στο σημείο i (με)

$\epsilon_{\chi i}$ = η παραμόρφωση κατά τη διαμήκη διεύθυνση του δοκιμίου (με)

$\epsilon_{\psi i}$ = η παραμόρφωση κατά την εγκάρσια διεύθυνση του δοκιμίου (με)



Σχήμα 2.35: Ροζέτα κολλημένη στο κέντρο δοκιμίου προς διάτμηση

Από το πρότυπο υπολογίζεται το μέτρο διάτμησης σύμφωνα με τη σχέση 2.11.

$$G^{\text{chord}}_{12} = \Delta\tau_{12} / \Delta\gamma_{12}$$

Όπου

$$G^{\text{chord}}_{12} = \text{Μέτρο διάτμησης (GPa)}$$

$\Delta\tau_{12}$ = Διαφορά διατμητικής τάσης ανάμεσα στα δύο σημεία παραμόρφωσης που έχουν επιλεγεί (MPa)

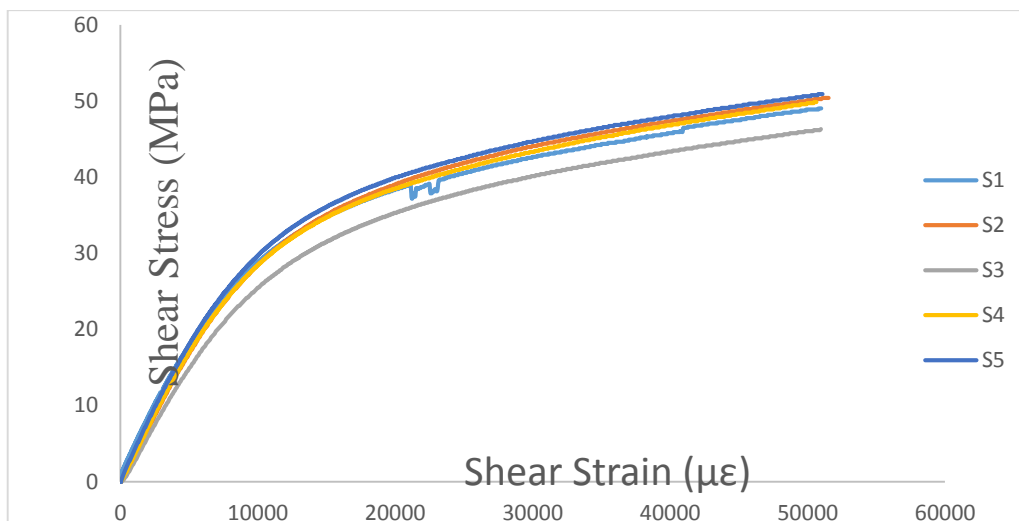
$\Delta\gamma_{12}$ = Διαφορά παραμόρφωσης ανάμεσα στα σημεία 6000 και 2000 με. Η συνήθης τιμή του μεγέθους αυτού είναι 0.004.

Για τα 5 δοκίμια που υποβλήθηκαν σε διάτμηση καταγράφηκαν και υπολογίστηκαν τα μεγέθη που φαίνονται στον πίνακα 2.15, καθώς και ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβολής επί τοις εκατό, όπως ορίζεται από το πρότυπο δοκιμών. Η ταχύτητα απομάκρυνσης των σιαγόνων της μηχανής δοκιμών ορίστηκε να είναι 0,5 mm/min για το δοκίμιο S1, όμως αποδείχτηκε ότι ήταν χαμηλή και έτσι τα υπόλοιπα πειράματα έγιναν με ταχύτητα απομάκρυνσης 2 mm/min.

Πίνακας 2.15: Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης

	Μέγιστο φορτίο (kN)	Μέγιστη Διατμητική τάση (Mpa)	Μέγιστη Διατμητική παραμόρφωση (με)	Μέτρο διάτμησης (MPa)
S1	1.4	48.9	50014	3046
S2	1.4	50.1	50040	3245
S3	1.4	46.1	50011	2905
S4	1.4	49.7	50015	3169
S5	1.4	50.6	50005	3250
Μέσος όρος (X_{mean})	1.4	49.1	50017	3123
Τυπική απόκλιση (S_{n-1})	0.03	1.6	12.0	131.7
Συντελεστής μεταβολής % (CV)	2.3	3.3	0.02	4.2

Στο σχήμα 2.36 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης (τ_{12} - γ_{12}) για τα 5 δοκίμια. Παρατηρούμε ότι όλα τα πειράματα τερματίστηκαν όταν η διατμητική παραμόρφωση έφτασε την τιμή 5% και δεν επήλθε θραύση των δοκιμίων.



Σχήμα 2.36: Διαγράμματα διατμητικής τάσης – διατμητικής παραμόρφωσης δοκιμίων διάτμησης

2.6 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τελικά από τις δοκιμές στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας και στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίστηκαν για το υλικό pre-preg της εταιρείας Fibermax με εμπορικό κωδικό C210Ppp οι ιδιότητες που φαίνονται στον πίνακα 2.16.

Πίνακας 2.16: Συγκεντρωτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού υλικού Pre-preg

Πειράματα περιεκτικότητας ASTM D 3171	
Περιεκτικότητα σε ίνες	79.1%
Πάχος στρώσης	0.22 mm
Πειράματα εφελκυσμού στη διεύθυνση warp ASTM D 3039	
Τάση θραύσης	636.8 MPa
Μέτρο ελαστικότητας	52516 MPa
Πειράματα εφελκυσμού στη διεύθυνση fill ASTM D 3039	
Τάση θραύσης	732.7 Mpa
Μέτρο ελαστικότητας	54784 MPa
Πειράματα κάμψης ASTM D 790	
Τάση αντοχής σε κάμψη	689.4 MPa
Εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας	40186 MPa
Μέτρο ελαστικότητας χορδής	50398 MPa
Πειράματα διάτμησης ASTM D 3518	
Μέγιστη διατμητική τάση	49.1 MPa
Μέτρο διάτμησης	3123 MPa

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΛΑΚΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά για προσωρινές επισκευές έχει ευρεία εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία, αλλά η μεταφορά της αντίστοιχης τεχνογνωσίας στις ναυπηγικές κατασκευές, παρότι είναι ελπιδοφόρα, απαιτεί περαιτέρω μελέτη. Τα πειράματα που θα περιγραφούν στο παρόν κεφάλαιο αποσκοπούν στο να συνδράμουν στην κατεύθυνση αυτή και να εισάγουν νέες μεθόδους επισκευής, με επιθέματα από ανθρακονήματα σε αλουμινένιες ναυπηγικές κατασκευές. Στόχος των δοκιμών είναι η μελέτη της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό προωγματομένης πλάκας από αλουμίνιο, ενισχυμένης με επίθεμα από σύνθετα υλικά. Οι παράγοντες που εξετάζονται είναι η επίδραση στην μηχανική αντοχή λόγω της ύπαρξης του επιθέματος σε συνδυασμό με τον τρόπο κατασκευής αυτού.

Το αλουμίνιο που επιλέχτηκε είναι το AL 1561, το οποίο είναι κράμα Al-Mg υψηλής αντοχής που συναντάται σε ορισμένες ναυπηγικές κατασκευές ειδικού τύπου. Τα επιθέματα κατά την παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν με δυο μεθόδους, τη μέθοδο hand lay-up και με χρήση προεμποτισμένων ανθρακονημάτων (pre-pregs). Η μέθοδος hand lay-up είναι η πλέον διαδεδομένη για τέτοιου τύπου προσωρινές επιδιορθώσεις, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί στον παρελθόν με επιτυχία. Η χρήση pre-pregs είναι περισσότερο συνηθισμένη στην αεροπορική βιομηχανία και η μελέτη του αν αυτού του τύπου επιθέματα θα ήταν κατάλληλο να χρησιμοποιηθούν και σε ναυπηγήματα είναι η κύρια διαφοροποίηση της εργασίας μας. Για κάθε μία από τις μεθόδους αυτές κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια, ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση της επαναληψιμότητας, στα οποία η προετοιμασία του μετάλλου, στην περιοχή τοποθέτησης του επιθέματος, έγινε με αμμοβολή. Επιπλέον κατασκευάστηκαν 2 δοκίμια χωρίς επίθεμα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δοκίμια αναφοράς. Συνολικά κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια στα οποία ελέγχθηκε η αντοχή τους σε στατική φόρτιση. Κατά την ίδια περίοδο στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, δοκίμια ίδιου τύπου δοκιμάστηκαν σε κόπωση σε παράλληλη διπλωματική εργασία με τίτλο «Πειραματική συμπεριφορά σε κόπωση ρωγματομένων πλακών αλουμινίου, ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά (Παναγόπουλος-2015)».

Σε όλα τα δοκίμια δόθηκαν ονόματα με τα οποία και θα αναφέρονται στη συνέχεια του κειμένου και φαίνονται στον πίνακα 3.1. Η ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε έχει ως εξής:

- Το πρώτο γράμμα (S) δηλώνει το είδος της καταπόνησης, δηλαδή στη περίπτωση μας στατική (Static).
- Το δεύτερο γράμμα δηλώνει τη μέθοδο κατασκευής του επιθέματος και μπορεί να είναι (H) για τη μέθοδο hand lay-up, (P) για τη μέθοδο pre-preg ή να μην υπάρχει () για τα δοκίμια αναφοράς χωρίς επίθεμα (Reference).

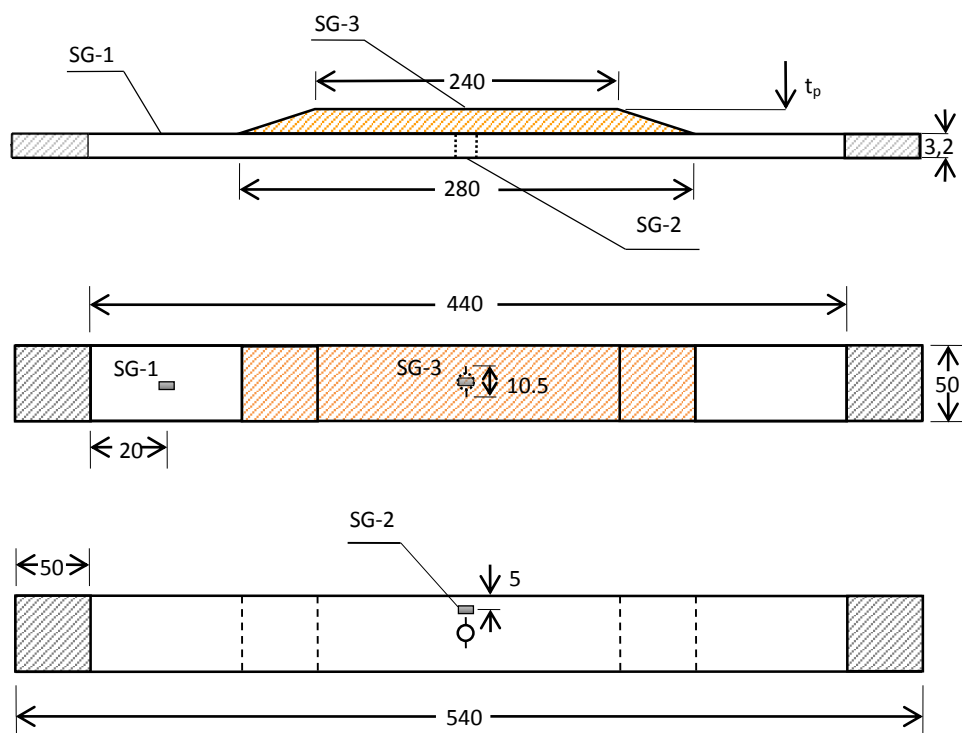
Για κάθε τύπο δοκιμίου η αρίθμηση έγινε με τυχαία σειρά. Άρα προέκυψαν τα δοκίμια S-1, S-2 χωρίς επίθεμα, SH-1, SH-2 με επίθεμα κατασκευασμένο με τη μέθοδο Hand lay-up και SP-1, SP-2 με χρήση επιθέματος από Pre-preg.

Πίνακας 3.1: Ονοματολογία δοκιμίων

Δοκίμιο	Επίθεμα	Μέθοδος Εφαρμογής	Είδος Φόρτισης	Προετοιμασία Επιφάνειας
S-1	Όχι	-	Στατική	-
S-2	Όχι	-	Στατική	-
SH-1	Ναι	Hand Lay-Up	Στατική	Αμμοβολή
SH-2	Ναι	Hand Lay-Up	Στατική	Αμμοβολή
SP-1	Ναι	Pre-Preg	Στατική	Αμμοβολή
SP-2	Ναι	Pre-Preg	Στατική	Αμμοβολή

3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η γεωμετρία των δοκιμίων και φαίνονται οι θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα strain gauges (SG).



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία δοκιμίων

Τα δοκίμια είναι ορθογώνιες παραλληλόγραμμες λωρίδες αλουμινίου στις οποίες έχουμε κάνει διαμπερή οπή στο κέντρο τους και σε όσα από αυτά χρειάζεται έχει κολληθεί επίθεμα.

Τα ονομαστικά μεγέθη των δοκιμίων είναι: Ελεύθερο μήκος $L = 540 \text{ mm}$, πλάτος $W = 50 \text{ mm}$, πάχος $t = 3.2 \text{ mm}$. Στα δοκίμια κατασκευάστηκε διαμπερής εγκοπή με μήκος $2a = 10.5 \text{ mm}$, κάθετη στη διεύθυνση του μήκους, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.2 σε μεγέθυνση. Αυτό επετεύχθη με τη δημιουργία οπής με διάμετρο 8.5 mm και 2 εγκοπές αντιδιαμετρικά μήκους 1 mm η καθεμία, με στόχο τη διάδοση της ρωγμής προς τη κατεύθυνση του πλάτους. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μήκος εγκοπής έχει άμεση σχέση με τα πειράματα κόπωσης που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παράλληλης διπλωματικής [Παναγόπουλος 2015], όπου αναλύεται και εκτενώς. Σύμφωνα με αυτή λοιπόν το μήκος της εγκοπής επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε τα πειράματα κόπωσης να ολοκληρωθούν σε εύλογο χρονικό διάστημα. Το επίθεμα αποτελείται από 3 ομάδες στρώσεων, οι οποίες επικαλύπτουν η μία την άλλη κατά 20 mm κάθε φορά και τα μήκη των ομάδων στρώσεων είναι $240, 260, 280 \text{ mm}$ αντίστοιχα. Το ενεργό μήκος του επιθέματος είναι 240 mm . Το πάχος του επιθέματος και ο αριθμός των στρώσεων διαφέρουν για τις μεθόδους hand lay-up και pre-preg και ο τρόπος υπολογισμού τους παρουσιάζεται στο επόμενο εδάφιο.



Σχήμα 3.2: Διαμπερής εγκοπή δοκιμίων σε μεγέθυνση

Στο εργαστήριο μετρήθηκε το μήκος των δοκιμίων με χάρακα, το πλάτος και το πάχος με παχύμετρο σε 3 σημεία από τα οποία προέκυψε ο μέσος όρος και τέλος υπολογίστηκε το πάχος του επιθέματος. Οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2, ενώ οι ακριβείς διαστάσεις της οπής και τελικά της εγκοπής μετρήθηκαν σε στερεοσκόπιο για κάθε δοκίμιο και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

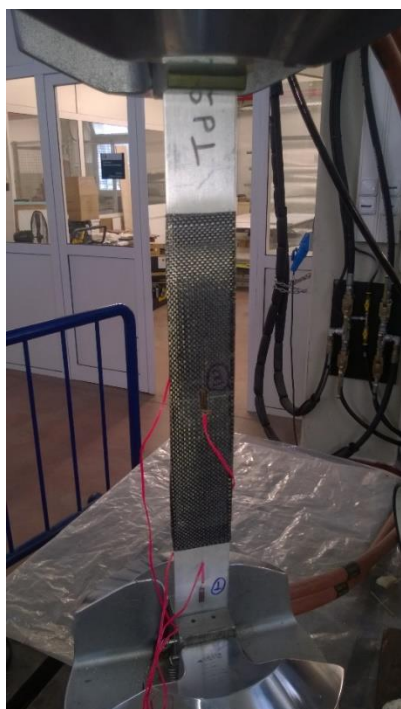
Πίνακας 3.2: Ακριβείς διαστάσεις δοκιμίων

Δοκίμιο	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Πάχος επιθέματος (mm)	Τελικό πάχος δοκιμίου (mm)
S-1	539.0	49.8	3.3	-	3.3
S-2	540.0	50.4	3.2	-	3.2
SH-1	541.0	50.2	3.1	2.2	5.4
SH-2	541.0	51.1	3.2	2.2	5.4
SP-1	541.0	50.6	3.2	2.0	5.2
SP-2	540.0	51.2	3.3	2.0	5.3

Πίνακας 3.3: Ακριβείς διαστάσεις οπής και ρωγμής

Δοκίμιο	Αρχικό μήκος οπής (mm)	Διαφορά αρχικού μήκους οπής (%)	Αρχικό μήκος ρωγμής 2a (mm)	Διαφορά αρχικού μήκους ρωγμής (%)
S-1	8.4	-1.0 %	11.0	-4.1 %
S-2	8.3		10.6	
SH-1	8.7	-3.0 %	10.5	+1.6 %
SH-2	8.4		10.7	
SP-1	8.3	+3.7 %	10.7	+2.9 %
SP-2	8.6		11.0	

Σε κάθε πλευρά του δοκιμίου δεσμεύτηκαν 50 mm για την τοποθέτηση του στις αρπάγες της μηχανής δοκιμών, τα οποία είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση μη ολίσθησης του δοκιμίου. Επίσης σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν strain gauges με gauge length 10 mm στη θέση 1, η οποία απέχει 70 mm από την πλευρά που μπαίνει στην κάτω αρπάγη και είναι στο μέσο του πλάτους, στη θέση 2, η οποία βρίσκεται στο κέντρο του μήκους και απέχει 5 mm από τις πλευρές του δοκιμίου. Επιπρόσθετα στα δοκίμια με επίθεμα τοποθετήθηκε strain gauge 10 mm στη θέση 3, η οποία βρίσκεται πάνω στο επίθεμα και στο κέντρο του δοκιμίου. Οι θέσεις 1,2,3 των strain gauges φαίνονται στο σχήμα 3.1. Στο σχήμα 3.3 (α) φαίνονται τα strain gauges στις θέσεις 1,3 τοποθετημένα στο δοκίμιο SP-1 και στο σχήμα 3.3 (β) φαίνεται το strain gauge στη θέση 2 για το ίδιο δοκίμιο.



(α)



(β)

Σχήμα 3.3(α): Strain gauges τοποθετημένα στις θέσεις 1,3 στο δοκίμιο SP-1

(β): Strain gauge τοποθετημένο στη θέση 2 στο δοκίμιο SP-1

Τα strain gauges είναι αισθητήρες, ορθογώνιου παραλληλόγραμμου σχήματος και μετράνε την παραμόρφωση στο σημείο όπου είναι τοποθετημένα, κατά τη διεύθυνση του μήκους τους. Αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα είχαν μήκος 10 mm και τοποθετήθηκαν έτσι ώστε οι άξονες x των strain gauges και του δοκιμίου να έχουν την ίδια διεύθυνση (άρα ίδια και με τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου). Οι άξονες x, y και z αντιστοιχούν στις διευθύνσεις μήκους, πλάτους και πάχους, αντίστοιχα.

3.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Όπως προαναφέρθηκε το αλουμίνιο που επιλέξαμε για τα πειράματά μας είναι το Al 1561, το οποίο είναι κράμα Al-Mg υψηλής αντοχής, κατάλληλο για ναυπηγικές κατασκευές, με ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Όλα τα δοκίμια αποκόπηκαν από την ίδια πλάκα μετάλλου (panel). Για τον ακριβή προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων καταπονήθηκαν σε εφελκυσμό τα 2 δοκίμια αναφοράς. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών αναφοράς

Δοκίμιο	Μέτρο ελαστικότητας E (MPa)	Όριο διαρροής σ_0 (MPa)
S-1	81742	233.0
S-2	79025	234.0

Από τον μέσο όρο των δυο προκύπτει για το αλουμίνιο: $E = 80.384 \text{ GPa}$, $\sigma_0 = 233.5 \text{ MPa}$

Ο τύπος του ανθρακοϋφάσματος που επιλέχτηκε για την κατασκευή των επιθεμάτων με την μέθοδο hand lay-up είχε προσανατολισμό ινών $0^\circ/90^\circ$, πλέξη Plain Weave (PW) και επιφανειακό βάρος 200 gr/m^2 της εταιρείας R&G Faserverbundwerkstoffe. Η ρητίνη είναι η εποξική ρητίνη R9330 της εταιρείας FIBERMAX, η οποία είναι πολύ λεπτόρρευστη (ιξώδες στους $20^\circ\text{C} = 6 \pm 2 \text{ mPa.s}$) και ο σκληρυντής με τον οποίο προσμείχθηκε είναι ο H9054 (γρήγορος, με Pot life σε 500 g μίξης στους $20^\circ\text{C} = 81 \text{ min}$ και με ιξώδες στους $20^\circ\text{C} = 9 \pm 3 \text{ mPa.s}$) της εταιρείας FIBERMAX με αναλογία πρόσμιξης 22 προς 100 κατά βάρος. Ο συνδυασμός του ανθρακοϋφάσματος και της ρητίνης (με τον σκληρυντή) χρησιμοποιήθηκε σε αναλογία 50/50 κατά βάρος. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται ο τύπος πλέξης plain weave του ανθρακοϋφάσματος.



Σχήμα 3.4: Πλέξη plain weave

Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο κατασκευάστηκαν τα επιθέματα με τη μέθοδο hand lay-up περιγράφονται σε παλαιότερη τεχνική έκθεση του εργαστηρίου [Μυρσιώτης-2006].

Τα επιθέματα από pre-preg κατασκευάστηκαν από το υλικό που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2, δηλαδή ίνες τύπου 3K T300 carbon fiber οι οποίες συνθέτουν ύφασμα σε πλέξη plain weave και εποξική θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη σε αρχική αναλογία 42 % περιεκτικότητα κατά βάρος σε ρητίνη. Οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου υλικού υπολογίστηκαν με τα πειράματα που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Οι μηχανικές ιδιότητες των επιθεμάτων που κατασκευάστηκαν συνοψίζονται στον πίνακα 3.5 όπου σ_u είναι η αντοχή του σύνθετου υλικού σε εφελκυσμό, E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό, W_f είναι η περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες άνθρακα και t_{ply} είναι το μέσο πάχος μιας στρώσης υλικού.

Πίνακας 3.5: Μηχανικές ιδιότητες υλικών επιθεμάτων

Μέθοδος κατασκευής επιθέματος	σ_u (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_p (MPa)	W_f (%)	t_{ply} (mm)
Hand lay-up	658.9	46300	56.0	0.30
Pre-preg	636.7	52516	79.1	0.22

Ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος άρα και το πάχος του (t_p) υπολογίστηκαν επιλέγοντας αρχικά μια τιμή για το λόγο ακαμψίας επιθέματος-πλάκας SR, ο οποίος δίνεται από τη σχέση 3.1:

$$SR = \frac{E_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s} \quad (3.1)$$

Από αυτή τη σχέση προκύπτει:

$$t_p = SR \cdot \frac{E_s \cdot t_s}{E_p} \quad (3.2)$$

Ο αριθμός των στρώσεων υπολογίζεται:

$$\text{Αριθμός στρώσεων} = t_p / t_{ply} \quad (3.3)$$

όπου:

$E_s = 69$ GPa, το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου Al 6061 (Al-Mg), πλησιέστερης στο Al 1561 σειράς

t_s είναι το πάχος του αλουμινίου

E_p είναι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου επιθέματος

t_p είναι το πάχος του σύνθετου επιθέματος

t_{ply} είναι το πάχος κάθε στρώσης του σύνθετου επιθέματος.

Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου για τους υπολογισμούς επιλέχθηκε να είναι αυτό του αλουμινίου της σειράς Al 6061 (Al-Mg), ως το πιο κοντινό κράμα στο Al 1561 και όχι αυτό που υπολογίστηκε πειραματικά λόγω του ότι οι δοκιμές αυτές έγιναν με δοκίμια με οπή και άρα υποθέτουμε ότι το πραγματικό μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου είναι ελαφρώς μικρότερο. Παρόλα αυτά αν βασιζόμασταν στην τιμή του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκε πειραματικά (80.384 MPa) θα οδηγούμασταν σε μεγαλύτερα πάχη επιθεμάτων και έτσι αποφασίστηκε να το αποφύγουμε. Το επιθυμητό θα ήταν να μπορούσαμε να επιτύχουμε SR=1 όπως και προτείνεται στη βιβλιογραφία [Turton, T.J.-2005]. Όμως σε αυτή την περίπτωση θα οδηγούμασταν σε πολύ μεγάλο πάχος επιθέματος σύμφωνα με τη σχέση 3.2, άρα και αριθμού στρώσεων, όπως υπαγορεύει η σχέση 3.3, πράγμα το οποίο είναι και μη πρακτικό όταν αναφερόμαστε σε πραγματικές συνθήκες αλλά ενέχει και κινδύνους για την ποιότητα της κατασκευής. Αν για παράδειγμα παίρναμε SR=1 για τη μέθοδο HLU θα καταλήγαμε σε πάχος επιθέματος 14.90 mm και αριθμό στρώσεων 15, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος για αυτή τη μέθοδο κατασκευής. Για την μέθοδο PP αντίστοιχα με το ίδιο SR θα καταλήγαμε σε πάχος επιθέματος 17.69 mm και αριθμό στρώσεων 17 που είναι επίσης μεγάλος. Επιλέχτηκε τελικά λόγος ακαμψίας SR=0.5, από τον οποίο προκύπτει πάχος επιθέματος $t_p=2.40$ mm για την μέθοδο HLU και 1.98 mm για την μέθοδο PP, από το οποίο διαιρώντας με το αντίστοιχο t_{ply} , προκύπτει ο αριθμός των στρώσεων του επιθέματος, ο οποίος είναι 8 στρώσεις για τη μέθοδο HLU και 9 στρώσεις για τη μέθοδο PP. Στον πίνακα 3.6 φαίνονται συγκεντρωτικά οι υπολογισθείσες τιμές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των επιθεμάτων.

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα υπολογισμών αριθμού στρώσεων

Επίθεμα	Μέτρο Ελαστικότητας E_p (GPa)	Πάχος του Επιθέματος t_p (mm)	Πάχος της στρώσης t_{ply} (mm)	Αριθμός Στρώσεων
Hand lay-up	46.3	2.40	0.30	8
Pre-preg	52	1.98	0.22	9

Σύμφωνα με το [Rodriguez 2013] ορίζεται ο βέλτιστος τρόπος υπολογισμού του ενεργού μήκους του επιθέματος, ο οποίος είναι 80 φορές το πάχος του αλουμινίου περίπου. Έτσι το ενεργό μήκος αποφασίστηκε να είναι 240 mm όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Επίσης από το ίδιο paper ορίζεται και το μέγεθος επικάλυψης της κάθε ομάδας στρώσεων από την επόμενη έτσι ώστε η γωνία που να σχηματίζεται στις άκρες να είναι περίπου 3-5° και συνεπώς το μήκος επικάλυψης σε κάθε πλευρά είναι 10 mm. Το πλάτος του επιθέματος αποφασίστηκε να είναι ίσο με το πλάτος του δοκιμίου. Η τμηματική διαστρωμάτωση και η επικάλυψη κάθε ομάδας στρώσεων από την επόμενη είναι σημαντική για την αποφυγή αποκόλλησης του επιθέματος στα άκρα του. Για τις δυο μεθόδους κατασκευής επιθεμάτων που επιλέχθηκαν οι ομάδες των στρώσεων, ο αριθμός στρώσεων, οι διαστάσεις τους και η σειρά με την οποία επιστρώθηκαν επάνω στο αλουμινένιο δοκίμιο για την κατασκευή του επιθέματος έχουν ως εξής:

- Μέθοδος HLU
 - 1η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 240 mm
 - 2η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 260 mm
 - 3η Ομάδα – 2 στρώσεις μήκους 280 mm
- Μέθοδος PP
 - 1η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 240 mm
 - 2η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 260 mm
 - 3η Ομάδα – 3 στρώσεις μήκους 280 mm

Επομένως, κάθε επόμενη ομάδα στρώσεων επικαλύπτει την προηγούμενη.

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα δοκίμια για τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής ήταν 6 από τα οποία τα 2 δεν είχαν επίθεμα, στα δυο τοποθετήθηκε επίθεμα από ανθρακονήματα με τη μέθοδο hand lay-up και στα υπόλοιπα 2 τοποθετήθηκε επίθεμα από προεμποτισμένα ανθρακονήματα (Pre-preg). Παράλληλα με αυτήν την εργασία πραγματοποιήθηκαν και πειράματα κόπωσης για όλες τις περιπτώσεις στο [Παναγόπουλος-2015]. Για τις ανάγκες λοιπόν και των δυο εργασιών τα δοκίμια κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα και ήταν συνολικά 12, δηλαδή τα 6 που προαναφέρθηκαν εις διπλούν.

Τα δοκίμια αποκόπηκαν από την αρχική πλάκα αλουμινίου με ειδικό ψαλίδι κοπής, λόγω μη διαθεσιμότητας άλλου μέσου κοπής. Στο εργαστήριο κατέφθασαν συνολικά 24 δοκίμια από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα 12 και τα υπόλοιπα αποθηκεύτηκαν ως εφεδρικά. Σε όλα τα δοκίμια, που χρησιμοποιήσαμε, έγινε χάραξη του κέντρου τους και ανοίχτηκε οπή με ηλεκτρικό τρυπάνι, ενώ στη συνέχεια έγιναν και οι αντίστοιχες εγκοπές όπως έχει περιγραφεί. Στη συνέχεια έγινε προετοιμασία των δοκιμίων στα οποία θα τοποθετούνταν επιθέματα, με αμμοβολή, με στόχο τη δημιουργία τραχύτητας στην επιφάνεια τους, έτσι ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν καλύτερη συνάφεια μεταξύ μετάλλου και επιθέματος. Η αμμοβολή έλαβε χώρα στην περιοχή που θα τοποθετούνταν το επίθεμα και έγινε με τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας και ειδική σκόνη οξειδίου αλουμινίου μεσαίου μεγέθους κόκκων (60-80) ή 250-180 microns. Μετά την αμμοβολή η επιφάνεια καθαρίστηκε με χαρτί κουζίνας εμποτισμένο με ασετόν Στο σχήμα 3.5 φαίνεται ένα δοκίμιο μετά την διάνοιξη εγκοπής και την δημιουργία τραχύτητας με αμμοβολή, στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η μηχανή αμμοβολής του εργαστηρίου και στο σχήμα 3.7 η συσκευασία της σκόνης οξειδίου του αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3.5: Δοκίμιο με εγκοπή μετά το πέρας της διαδικασίας αμμοβολής



Σχήμα 3.6: Μηχανή αμμοβολής



Σχήμα 3.7: Συσκευασία σκόνης οξειδίου του αλουμινίου

Η μέση τραχύτητα της επιφάνειας, Ra, των δοκιμίων μετρήθηκε με ειδικό φορητό εξοπλισμό του εργαστηρίου τύπου TIME TR100 Surface Roughness Tester, ο οποίος φαίνεται στο σχήμα 3.8. Όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν με τη σειρά στον πάγκο εργασίας, με την αμμοβολημένη επιφάνεια προς τα πάνω και τα γράμματα που υποδεικνύουν το κάθε δοκίμιο να διαβάζονται από τα αριστερά προς τα δεξιά. Έπειτα πάρθηκαν μετρήσεις κοντά στο αριστερό άκρο της αμμοβολημένης επιφάνειας, στο κέντρο αυτής και στο δεξιό άκρο της με τις θέσεις αυτές να αριθμούνται ως 1,2,3 αντίστοιχα. Οι μετρήσεις έγιναν παράλληλα με τον διαμήκη άξονα και η τραχύτητα μετρήθηκε με μήκος αποκοπής 0.8 mm, ενώ στον πίνακα 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε μm .



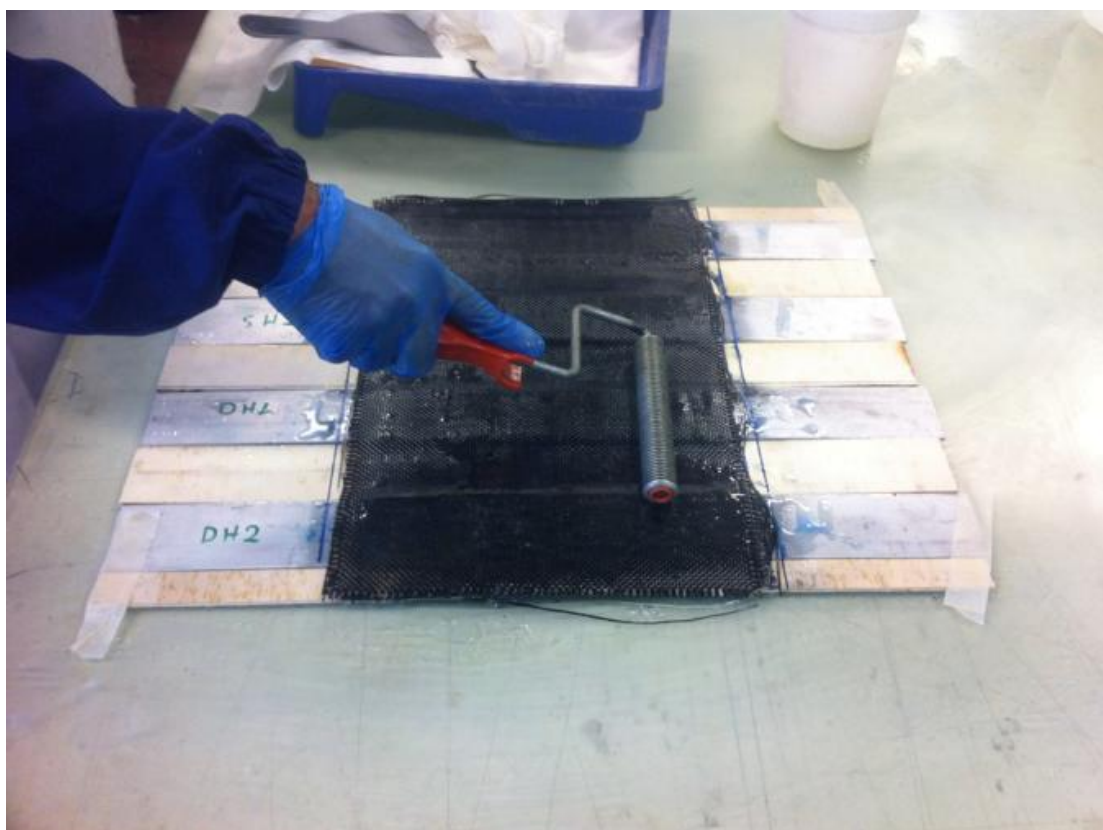
Σχήμα 3.8: Φορητός εξοπλισμός μέτρησης τραχύτητας TR100 Surface Roughness Tester

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα μετρήσεων τραχύτητας

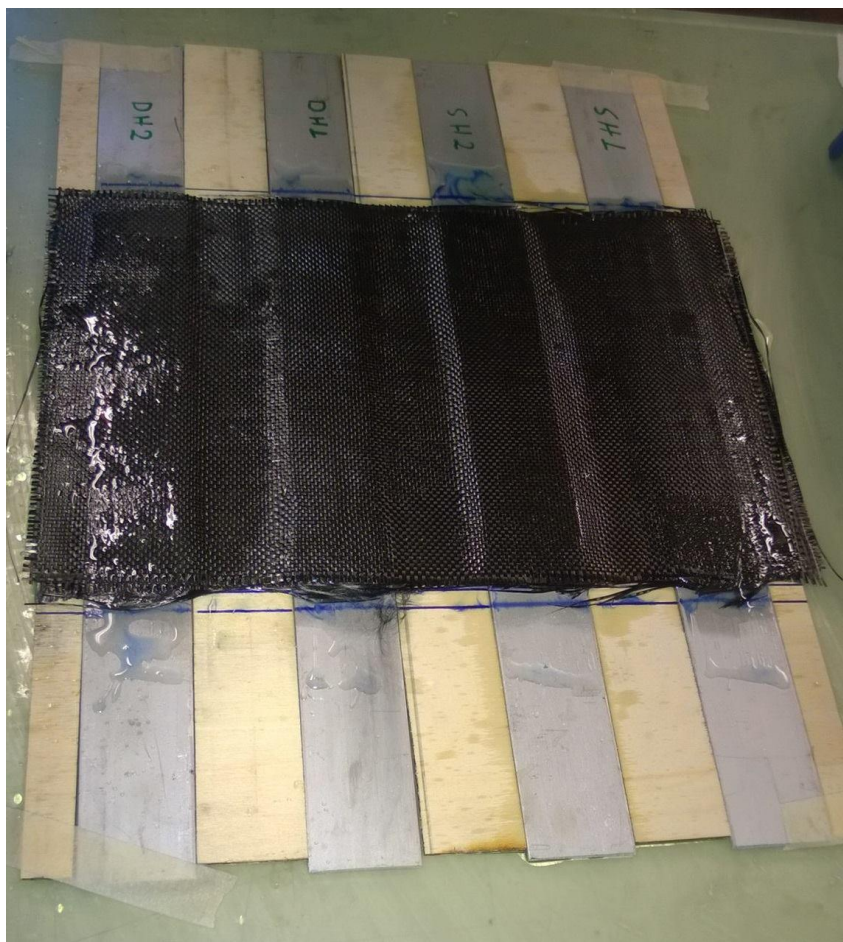
Δοκίμιο	Θέση 1 (μm)	Θέση 2 (μm)	Θέση 3 (μm)	Μέσος όρος (μm)
SH-1	1.75	2.87	3.01	2.54
SH-2	3.94	3.88	4.70	4.17
SP-1	3.75	3.80	4.29	3.95
SP-2	3.78	3.76	2.38	3.31

Η διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων συνεχίστηκε με την τοποθέτηση των επιθεμάτων με τις δυο μεθόδους που έχουν επιλεγεί, δηλαδή με τη μέθοδο Hand lay-up και με τη μέθοδο Pre-preg. Στη μέθοδο Hand lay-up τα δοκίμια κατασκευάστηκαν ταυτόχρονα για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και ομοιομορφίας. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν επάνω σε γυάλινο καλούπι στο οποίο είχε περαστεί μια στρώση αποκολλητικού κεριού για την διευκόλυνση απομάκρυνσής τους μετά την στερεοποίηση της ρητίνης. Ανάμεσα στα δοκίμια και στις άκρες του πρώτου και του τελευταίου, τοποθετήθηκαν παραλληλόγραμμες λωρίδες κόντρα πλακέ με πλάτος 20 mm, με στόχο την αποφυγή εγκάρσιας καμπυλότητας του επιθέματος αλλά και για τον ευκολότερο διαχωρισμό των δοκιμίων, αφού μετά το πέρας του πολυμερισμού αυτά θα κόβονταν με υδρολιπαινόμενο τροχό. Η συγκράτηση της διάταξης επιτεύχθηκε με μικρά

κομμάτια tacky tape κάτω από αυτή και με χαρτοταινία. Στη συνέχεια κόπηκαν λωρίδες ανθρακοϋφάσματος με μήκος όπως υπαγορεύεται από την αλληλουχία στρώσεων και πλάτος αρκετό ώστε να καλύπτεται το συνολικό πλάτος των δοκιμίων και των κομματιών του κόντρα πλακέ. Το βάρος του ανθρακοϋφάσματος που χρησιμοποιήθηκε μετρήθηκε σε ζυγαριά ακριβείας και βρέθηκε να είναι 162 g. Επίσης δημιουργήθηκε μείγμα ρητίνης-σκληρυντή στο οποίο, για την επίτευξη αναλογίας 22 προς 100 κατά βάρος, τοποθετήσαμε 54 g σκληρυντή και 246 g ρητίνης. Μέρος του μείγματος περιχύθηκε στην αρχική διάταξη ώστε να λειτουργήσει σαν συνδετικό υλικό ανάμεσα στο μέταλλο και στο επίθεμα και έπειτα τοποθετήθηκαν μια-μια και οι 8 στρώσεις, με προσοχή ώστε κάθε ομάδα στρώσεων να επικαλύπτει την προηγούμενη. Μετά την τοποθέτηση κάθε στρώσης έγινε προσπάθεια απαλοιφής των κενών αέρα με ειδικό ρολό, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, ενώ με σπάτουλα το μείγμα κατανεμήθηκε όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα στην υποκείμενη επιφάνεια. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η τελική διάταξη των τεσσάρων δοκιμίων με τη μέθοδο Hand lay-up για τις στατικές και τις δυναμικές δοκιμές. Η διάταξη αφέθηκε για πολυμερισμό σε θερμοκρασία δωματίου για τουλάχιστον 48 ώρες και τελικά τα δοκίμια αποκόπηκαν με τον τροχό του εργαστηρίου. Τέλος τοποθετήθηκαν strain gauges 10 mm στα δοκίμια στις επιθυμητές θέσεις.



Σχήμα 3.9: Επίστρωση με το χέρι και με βοήθεια ειδικού ρολού

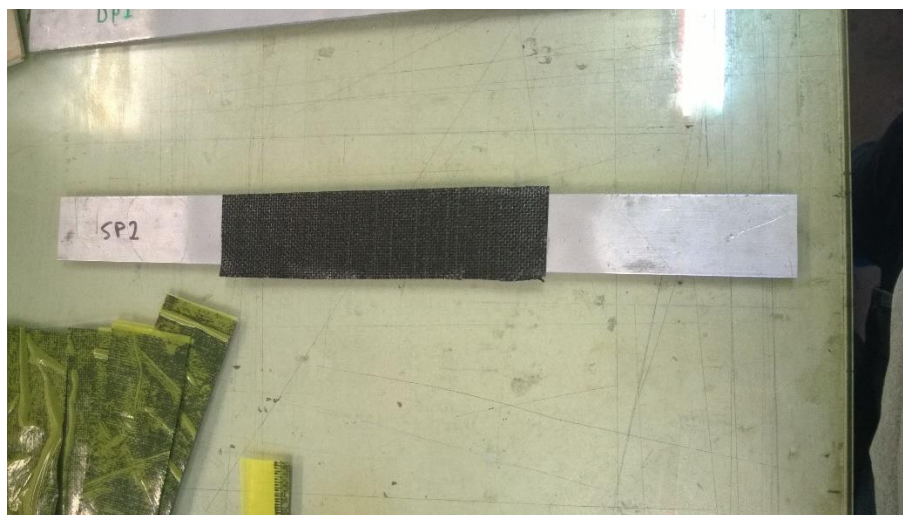


Σχήμα 3.10: Τελική διάταξη επίστρωσης με το χέρι

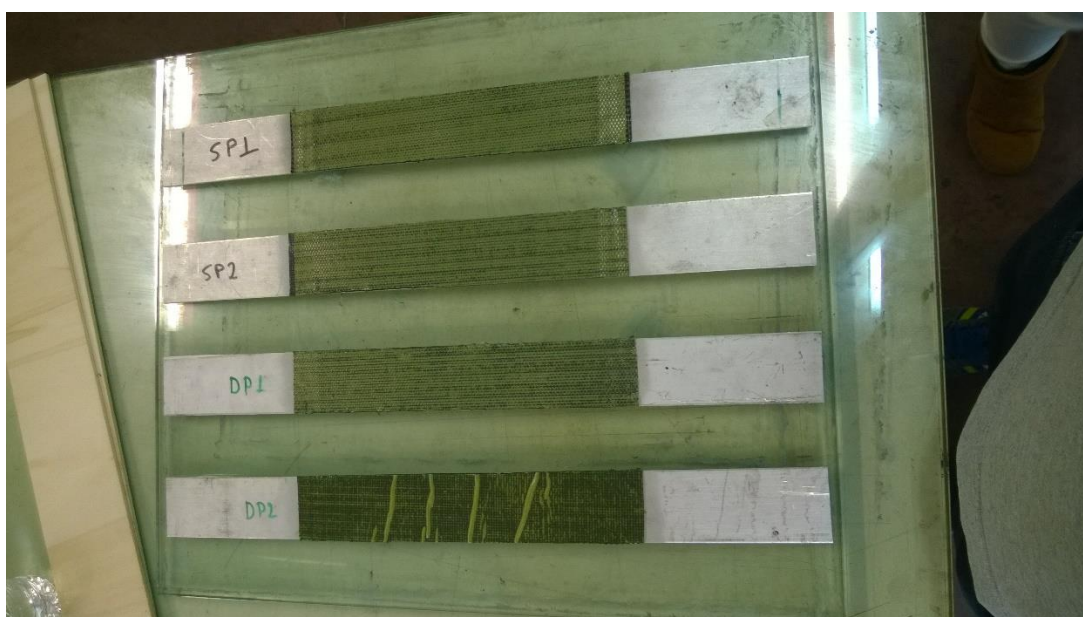
Στη διαδικασία κατασκευής των επιθεμάτων με προεμποτισμένα ανθρακονήματα (Pre-pregs) χρησιμοποιήθηκε πυρίμαχο γυάλινο καλούπι, πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν τα δοκίμια. Σε αυτή τη μέθοδο τα επιθέματα τοποθετήθηκαν σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Αρχικά αποκόπηκαν όλα τα απαραίτητα κομμάτια pre-preg από το ρολό που υπάρχει αποθηκευμένο στον καταψύκτη του εργαστηρίου, με πλάτος λίγο μεγαλύτερο από το πλάτος των δοκιμίων και μήκος όπως ορίζεται από την αλληλουχία στρώσεων. Τα απαραίτητα κομμάτια συγκεντρώθηκαν, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, και ξεκίνησε η επικόλληση των ομάδων στρώσεων πάνω στα δοκίμια, με τις στρώσεις να τοποθετούνται μία-μία στα κατάλληλα σημεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12. Μετά την τοποθέτηση όλων των στρώσεων τα επιθέματα κόπηκαν με κοπίδι, ώστε το πλάτος τους να γίνει ίσο με αυτό των δοκιμίων, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.11: Αποκομμένες στρώσεις Pre-preg

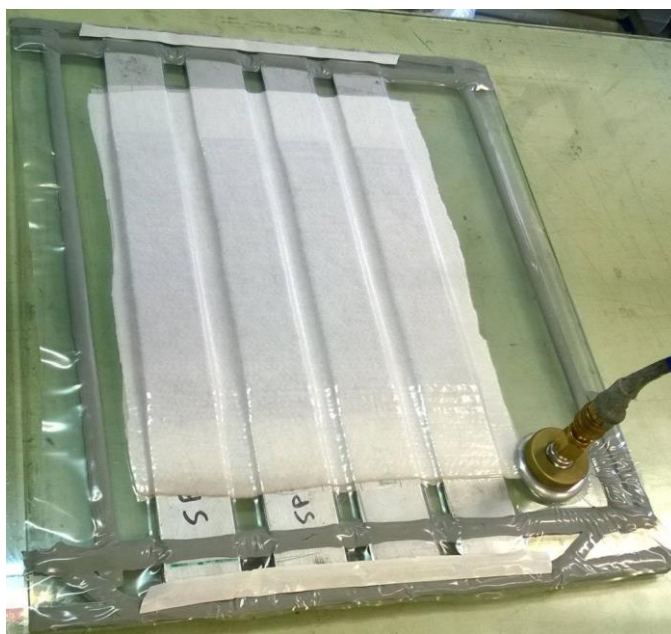


Σχήμα 3.12: τοποθέτηση στρώσεων Pre-preg



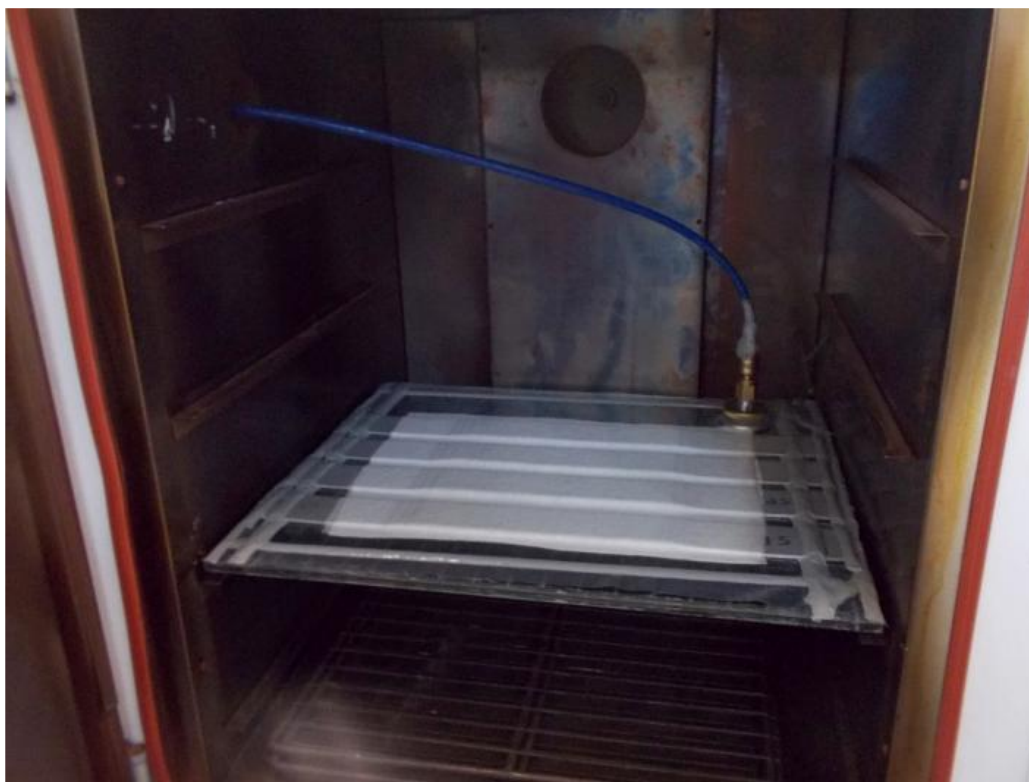
Σχήμα 3.13: Επιθέματα Pre-preg τοποθετημένα στα δοκίμια

Στη συνέχεια τοποθετήθηκε tacky tape περιμετρικά των δοκιμίων με στόχο την αεροστεγή απομόνωση της διάταξης. Σε σημεία τα οποία θεωρήθηκαν επισφαλή τοποθετήθηκε επιπλέον tacky tape, όπως για παράδειγμα στις γωνίες της διάταξης και εγκάρσια των δοκιμίων κοντά στις άκρες τους. Έπειτα αφαιρέθηκε η ειδική πλαστική συσκευασία από την τελευταία στρώση Pre-preg, που απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα στο σχήμα 3.13, και στην περιοχή των επιθεμάτων τοποθετήθηκε μια στρώση peel-ply και μία στρώση υλικού breather. Τέλος η διάταξη σφραγίστηκε με σακούλα κενού, η οποία κολλήθηκε με προσοχή στο tacky tape, ώστε να μην έχουμε διαρροές αέρα. Στην σακούλα κενού είχε προσαρτηθεί ανεπίστροφη βαλβίδα για την αναρρόφηση αέρα, η οποία με σωλήνα συνδέθηκε με αντλία κενού. Με την ενεργοποίηση της εν λόγω αντλίας δημιουργήθηκε υποπίεση 0.6 – 0.7 bar. Η διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Διάταξη δοκιμίων Pre-preg

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στον κλίβανο του εργαστηρίου, με το σωληνάκι της αναρρόφησης να περνά από την οπή εξαερισμού και ακολουθήθηκε ο θερμικός κύκλος για τον πολυμερισμό της ρητίνης των επιθεμάτων, όπως περιγράφεται και για την κατασκευή των δοκιμίων χαρακτηρισμού του υλικού. Ο θερμικός κύκλος ξεκίνησε με θέρμανση της διάταξης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 120 °C με ρυθμό 5 °C/min, όπου και παρέμεινε για μια ώρα, μέχρι τον πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης. Στη συνέχεια έγινε ψύξη της διάταξης με τον ίδιο ρυθμό μέχρι τους 60 °C. Από την έναρξη της διαδικασίας μέχρι η διάταξη να φτάσει τους 60 °C επιβλήθηκε υποπίεση, ενώ μετά τους 60 °C αποσύρθηκε η αντλία κενού και η διάταξη αφέθηκε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος να ψυχθεί με φυσικό τρόπο. Η διάταξη τοποθετημένη στο κλίβανο απεικονίζεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Τοποθέτηση δοκιμίων Pre-preg στον κλίβανο

Μετά το πέρας της διαδικασίας αφαιρέθηκαν τα δοκίμια από το καλούπι και κολλήθηκαν τα strain gauges μήκους 10 mm στις προβλεπόμενες θέσεις. Κατά το ξεκαλούπωμα παρατηρήθηκε δημιουργία καμπυλότητας 1 mm στο μέσο, στα δοκίμια με επιθέματα από Pre-preg με τα κοίλα προς την πλευρά στην οποία δεν υπήρχε επίθεμα. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε λόγω του ότι η ρητίνη στερεοποιήθηκε όταν το αλουμίνιο βρισκόταν στους 120 °C και αφού τα δύο υλικά έχουν διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής, κατά την ψύξη αναπτύχθηκε ένα πεδίο αρχικών τάσεων με αποτέλεσμα την δημιουργία καμπυλότητας. Θεωρήσαμε, όμως, ότι κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου και όταν αυτό ευθυγραμμίζεται, το πεδίο αρχικών τάσεων αναιρείται και έτσι τα αποτελέσματα από τα πειράματα με δοκίμια με επίθεμα Pre-preg είναι συγκρίσιμα με τις άλλες μεθόδους.

Για την τοποθέτηση των strain gauges στις θέσεις 1,2 σε όλα τα δοκίμια των στατικών πειραμάτων έγινε λείανση της επιφάνειας, στην οποία τοποθετήθηκαν, με γυαλόχαρτο, το οποίο έχει αριθμό 340 και είναι από καρβίδιο του πυριτίου (SiC). Μετά την λείανση της επιφάνειας έγινε καθαρισμός της με ασετόν και κολλήθηκαν τα strain gauges με κυανοακρυλική κόλλα στιγμής της KYOWA τύπου CC-33A, η οποία είναι κατάλληλη για strain gauges και για να στεγνώσει απαιτήθηκαν 4 ώρες. Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η επιφάνεια στην οποία τοποθετήθηκε strain gauge, στη θέση 2, μετά την λείανση της με γυαλόχαρτο και τον καθαρισμό της με ασετόν.



Σχήμα 3.16: Επιφάνεια λειασμένη και καθαρισμένη με ασετόν

3.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε όλα τα δοκίμια μετρήθηκε η αντοχή σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα αυτό που μας ενδιέφερε ήταν το κατά πόσο επηρεάζεται το όριο διαρροής και η αντοχή σε εφελκυσμό της αλουμινένιας ρωγματομένης πλάκας σε σχέση με την ύπαρξη του επιθέματος και τον τρόπο κατασκευής του. Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν σε υδραυλική μηχανή MTS, είναι σύμφωνα με τις απαιτήσεις Class C του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002 [ISO 5893-2002] και έχει μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο 200 kN. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στις υδραυλικές αρπάγες της μηχανής κατά 50 mm σε κάθε μεριά, με ιδιαίτερη προσοχή στην ευθυγράμμιση τους με τις άκρες των αρπαγών για την αποφυγή έκκεντρων φορτίσεων. Η συγκράτηση των δοκιμίων έγινε με τάση περίπου 4 MPa στις άκρες τους.

Σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν strain gauges, στις θέσεις που έχουμε προαναφέρει, όπως επίσης και επιμηκυνσιόμετρο στο κέντρο κάθε δοκιμίου. Στο σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα δοκίμια S-1 και SP-1, τα οποία έχουν τοποθετηθεί στις αρπάγες της μηχανής και στα οποία έχουν τοποθετηθεί τα strain gauges και το επιμηκυνσιόμετρο. Το επιμηκυνσιόμετρο είχε άνοιγμα περίπου 10 cm.



(α)

(β)

Σχήμα 3.17 (α): Δοκίμιο S-1 με επιμηκυνσιόμετρο και strain gauges, τοποθετημένο στη μηχανή δοκιμών (β): Δοκίμιο SP-1 με επιμηκυνσιόμετρο και strain gauges, τοποθετημένο στη μηχανή δοκιμών

Τα πειράματα έγιναν με την επιβολή γραμμικά αυξανόμενης εφελκυστικής μετατόπισης με ταχύτητα για όλα τα δοκίμια ίδια και ίση με 1.0 mm/min. Η λειτουργία της μηχανής εκτελείται αυτοματοποιημένα μέσω ψηφιακών ελεγκτών, ενώ μέσω λογισμικού πραγματοποιείται η ρύθμιση, η καταγραφή και η παρακολούθηση των μετρήσεων. Το κάθε πείραμα τερματίζεται με την αστοχία του εκάστοτε δοκιμίου. Μέσω των strain gauges και του επιμηκυνσιόμετρου πάρθηκαν μετρήσεις παραμόρφωσης (μm) σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη δύναμη F (kN), με ειδικό σύστημα τύπου spider-8 της εταιρίας HBM, στις θέσεις εκείνες, ενώ για την καταγραφή της επιμήκυνσης του δοκιμίου σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη δύναμη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων της ίδιας της μηχανής δοκιμών. Τα δυο συστήματα ήταν πλήρως συγχρονισμένα μεταξύ τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Σε όλα τα δοκίμια ασκήθηκε εφελκυστικό φορτίο, με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε επιμήκυνση με σταθερή ταχύτητα, έως ότου να επέλθει αστοχία τους. Ως αστοχία θεωρήθηκε η αδυναμία του δοκιμίου να φέρει φορτίο, δηλαδή η θραύση του. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το δοκίμιο S-1 μετά την αστοχία του και την εξαγωγή του από τη μηχανή δοκιμών, ενώ στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται αντίστοιχα το δοκίμιο SP-1 μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.



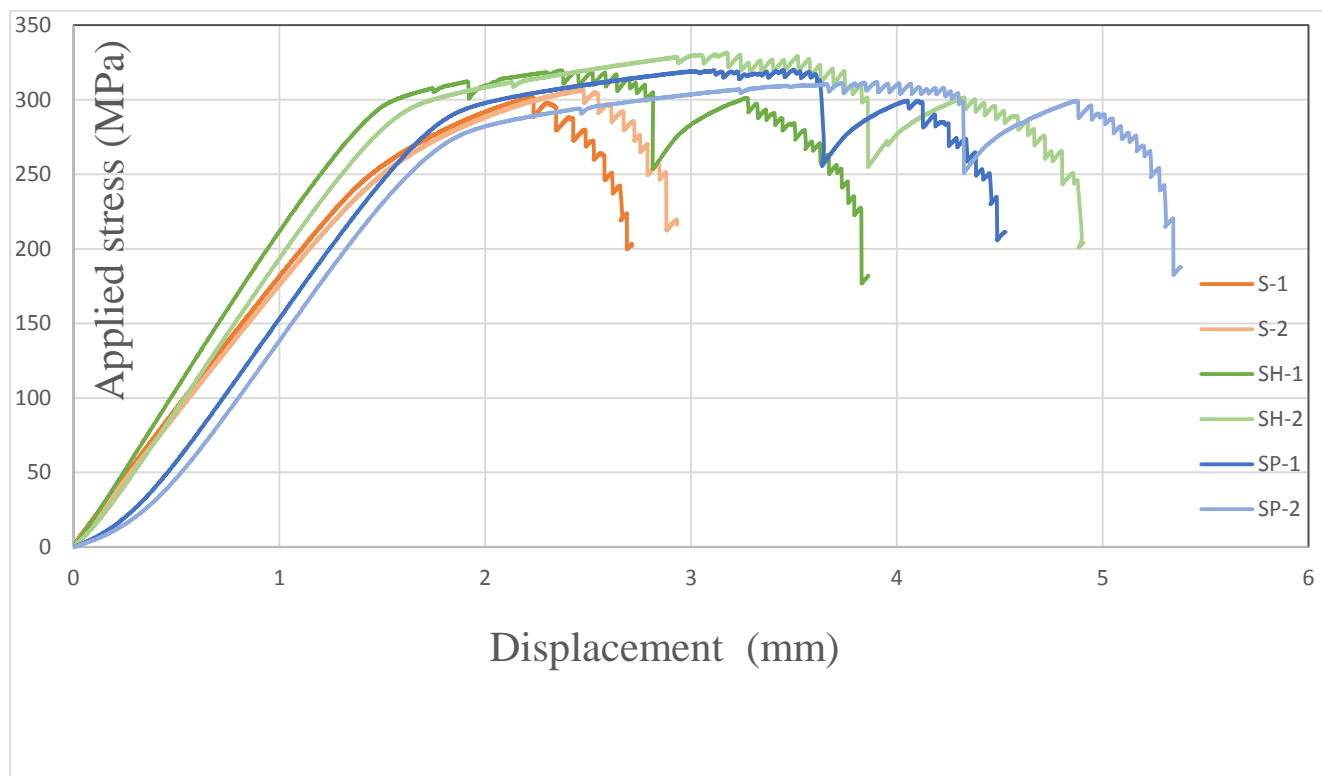
Σχήμα 4.1: Δοκίμιο S-1 μετά την δοκιμή του σε εφελκυσμό



Σχήμα 4.2: Δοκίμιο S-1 μετά την δοκιμή του σε εφελκυσμό

4.2 ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΑΚΑΜΨΙΑ

Όλα τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια με τη μορφή διαγραμμάτων και πινάκων. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα της επιβαλλόμενης ομοιόμορφης τάσης στο αλουμίνιο σε συνάρτηση με την επιμήκυνση του, η οποία γίνεται με σταθερό ρυθμό, για όλα τα δοκίμια. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί μια γενική εικόνα της συμπεριφοράς των δοκιμίων και μας βοηθά να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης – επιμήκυνσης όλων των δοκιμίων.

Από τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν για το παραπάνω διάγραμμα υπολογίσαμε την διαμήκη ακαμψία για κάθε δοκίμιο, δηλαδή την κλίση του αρχικού ευθύγραμμου τμήματος της κάθε καμπύλης. Αυτό έγινε με διαίρεση της διαφοράς επιβαλλόμενης τάσης με την διαφορά επιμήκυνσης ανάμεσα σε δύο σημεία του ευθύγραμμου τμήματος της ελαστικής περιοχής κάθε δοκιμίου. Οι διαμήκεις ακαμψίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Διαμήκης ακαμψία

Δοκίμιο	Διαμήκης ακαμψία (MPa/mm)	
S-1	173.3	-
S-2	172.9	
SH-1	211.2	+ 19.7 %
SH-2	203.0	
SP-1	194.1	+ 11.7 %
SP-2	192.5	

Από το σχήμα 4.3 αλλά και από τον πίνακα 4.1 αμέσως παρατηρούμε την διαφοροποίηση στη συμπεριφορά κάθε ομάδας δοκιμίων και την εξαιρετική επαναληψιμότητα της πειραματικής διαδικασίας. Οι δυνάδες δοκιμίων συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο, ενώ οι τιμές της διαμήκους ακαμψίας έλαβαν παρόμοιες τιμές. Επίσης παρατηρείται εμφανής αύξηση της εν λόγω ακαμψίας στα ενισχυμένα δοκίμια με την μεγαλύτερη αύξηση, της τάξης του 19.7%, να σημειώνουν τα δοκίμια στα οποία το επίθεμα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο Hand lay-up και να ακολουθούν τα δοκίμια με επίθεμα από Pre-preg με αύξηση της τάξης του 11.7%.

Τα δοκίμια αναφοράς επέδειξαν αναμενόμενη συμπεριφορά με γραμμική απόκριση αρχικά, κατά την ελαστική περιοχή, και περνώντας στη συνέχεια στην πλαστική περιοχή. Τα δοκίμια με επίθεμα από Hand lay-up συμπεριφέρθηκαν με παρόμοιο τρόπο. Αρχικά παραμορφώθηκαν ελαστικά, με την ελαστική περιοχή να είναι μεγαλύτερη από αυτή των δοκιμίων αναφοράς. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της παρουσίας του επιθέματος το αλουμίνιο φορτίζεται από χαμηλότερες τάσεις και έτσι έχουμε ελαστική συμπεριφορά για υψηλότερες τιμές επιβαλλόμενης τάσης. Στη συνέχεια η κόλληση αστοχεί με αποτέλεσμα το επίθεμα να μην παραλαμβάνει φορτίο. Στο σημείο αυτό έχουμε απότομη μείωση της επιβαλλόμενης τάσης και τα δοκίμια εισέρχονται απότομα στην πλαστική περιοχή ακολουθώντας την τυπική απόκριση των δοκιμίων χωρίς επίθεμα φτάνοντας σε μέγιστο φορτίο το οποίο είναι ίδιο για όλες τις περιπτώσεις.

Τα δοκίμια με επίθεμα από Pre-preg συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο με τα δοκίμια με επίθεμα από Hand lay-up με την διαφορά του ότι στην αρχή των καμπυλών παρατηρείται μια καμπυλότητα πριν τα δοκίμια εισέλθουν στην ελαστική περιοχή. Αυτό συμβαίνει λόγω της αρχικής καμπυλότητας που απέκτησαν, τα εν λόγω δοκίμια, κατά την κατασκευή τους. Τα δοκίμια μετά την ευθυγράμμιση τους εισέρχονται στην ελαστική περιοχή, όπου και έχουν γραμμική απόκριση.

Σε όλα τα δοκίμια με επίθεμα παρατηρείται, από το σχήμα 4.3, πιο απότομη μετάβαση από την ελαστική περιοχή στην πλαστική σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς, πράγμα το οποίο οφείλεται στην ενίσχυση. Επίσης από το ίδιο σχήμα φαίνεται η αντοχή της ενισχυμένης περιοχής για αρκετά μεγαλύτερη πλαστικότητα, των δοκιμίων.

Σε όλες τις καμπύλες του σχήματος 4.3 παρατηρείται ένα πριονωτό τμήμα στο τέλος καθεμιάς, πράγμα το οποίο οφείλεται στη θραύση των δοκιμίων. Τα πειράματα γίνονται με επιβολή επιμήκυνσης και για το λόγο αυτό αυξομειώνεται η τάση ανάλογα με την αντίσταση που προβάλλεται από το δοκίμιο ώστε η ταχύτητα απομάκρυνσης των σιαγόνων να παραμένει σταθερή. Με την θραύση του δοκιμίου το φορτίο της μηχανής θα πρέπει να μειωθεί με πολύ γρήγορο ρυθμό, ώστε να παραμείνει σταθερή η ταχύτητα της δοκιμής. Ο ρυθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό με τον οποίο δύναται η μηχανή να μειώσει τον ρυθμό, δηλαδή έχουμε αδυναμία του load cell της μηχανής να ακολουθήσει με ακρίβεια την αναγκαία μείωση φορτίου, με αποτέλεσμα να παρατηρείται το εν λόγω πριονωτό τμήμα και η πορεία προς μηδενισμό του φορτίου που φέρει το δοκίμιο.

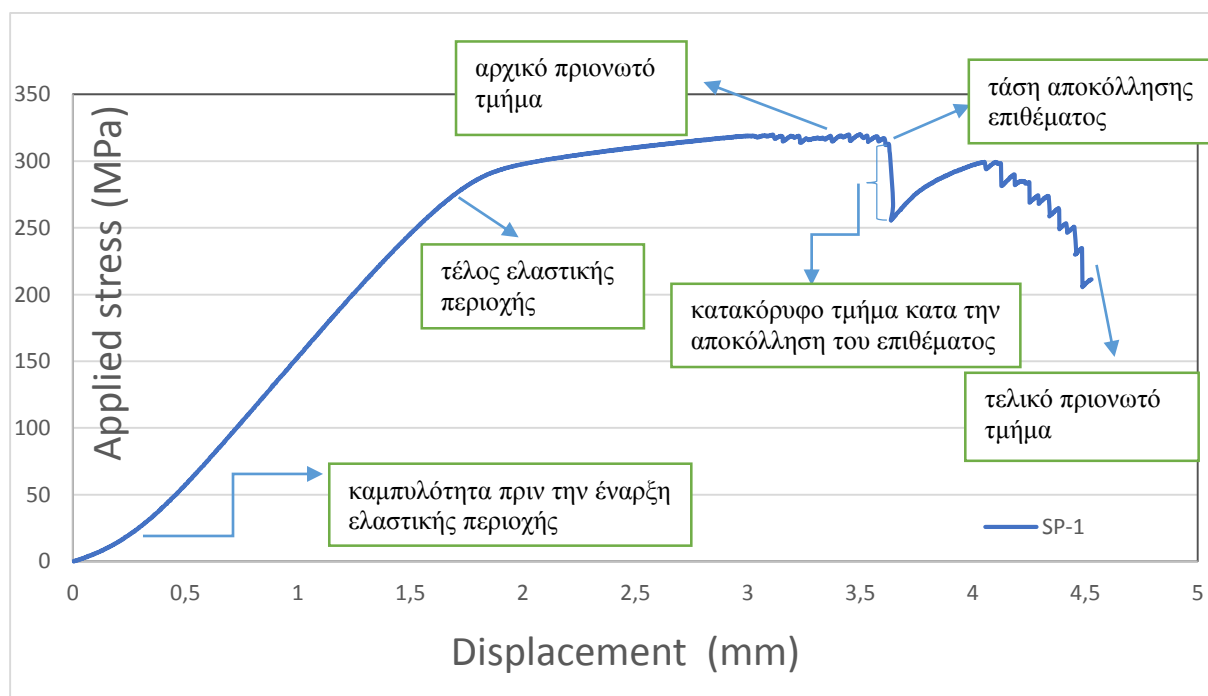
Επίσης στα δοκίμια με επίθεμα παρατηρείται ένα πριονωτό τμήμα πριν από την απότομη μείωση τάσης (κατακόρυφο τμήμα). Το φαινόμενο αυτό, κατά πάσα πιθανότητα, οφείλεται

στην σταδιακή αποκόλληση του επιθέματος και τελικά στην αποκόλληση του με αποτέλεσμα να μη φέρει πλέον φορτίο. Μετά την αποκόλληση του επιθέματος το συνολικό φορτίο που φέρει το δοκίμιο επιβάλλεται στο αλουμίνιο μέχρι την θραύση και αυτού. Η τάση στην οποία πιστεύεται ότι έχουμε αποκόλληση του επιθέματος είναι αυτή του ανώτερου σημείου του κατακόρυφου τμήματος στις καμπύλες του διαγράμματος επιβαλλόμενης τάσης – επιμήκυνσης υπολογίζεται από το σχήμα 4.3, για τα δοκίμια με επίθεμα, και παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2. Επίσης στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται και το ποσοστό μείωσης της επιβαλλόμενης τάσης κατά την αποκόλληση του επιθέματος.

Πίνακας 4.2: Τάση αποκόλλησης επιθεμάτων από διάγραμμα Τάσης - Επιμήκυνσης

Δοκίμιο	Τάση αποκόλλησης επιθέματος (MPa)	Ποσοστό μείωσης επιβαλλόμενης τάσης κατά την αποκόλληση
SH-1	302.11	- 15.8 %
SH-2	299.71	- 14.8 %
SP-1	309.88	- 17.2 %
SP-2	298.59	- 15.8 %

Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η καμπύλη επιβαλλόμενης τάσης – επιμήκυνσης για το δοκίμιο SP-1 ως αντιπροσωπευτική για την συμπεριφορά των ενισχυμένων δοκιμίων

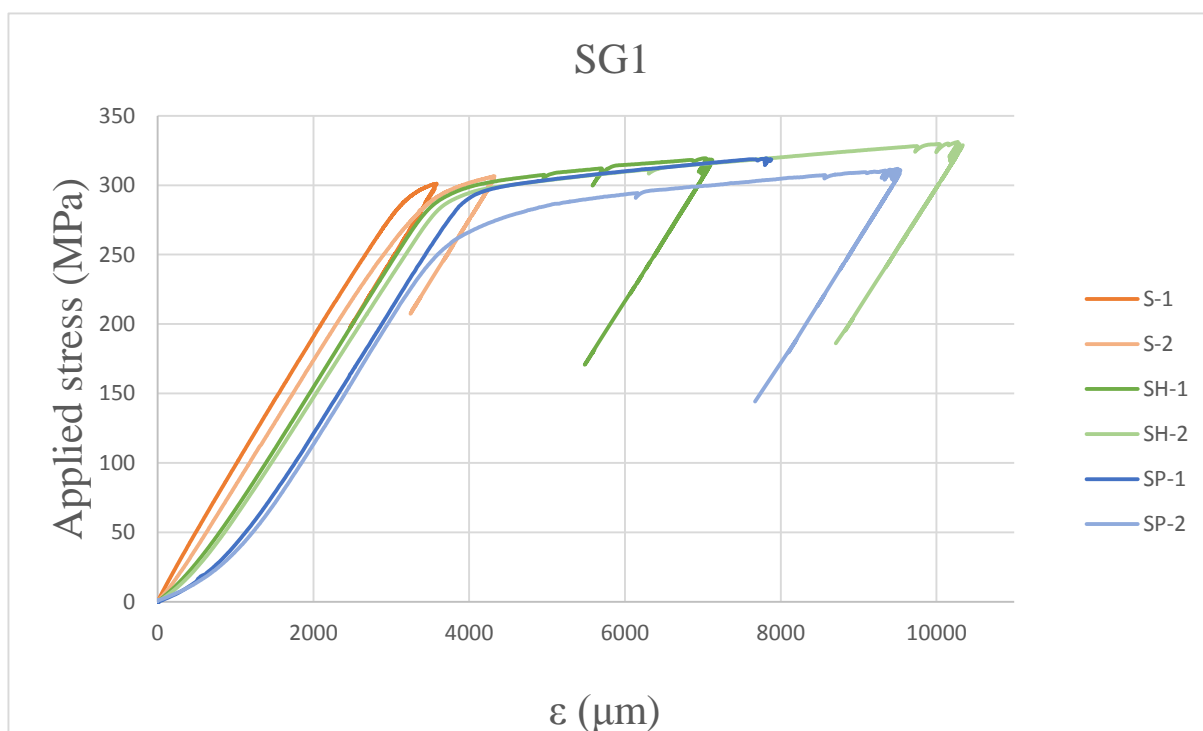


Σχήμα 4.4: Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης – επιμήκυνσης δοκιμίου SP-1.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκαν 2 strain gauges στις θέσεις 1,2, ενώ στα δοκίμια με επίθεμα τοποθετήθηκε από ένα επιπλέον strain gauge θέση 3. Οι ακριβείς θέσεις 1,2,3 φαίνονται στο σχήμα 3.1. Από τις μετρήσεις δημιουργήθηκαν διαγράμματα επιβαλλόμενης τάσης (MPa) – παραμόρφωσής (μm) για κάθε θέση στην οποία αναφέραμε και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω με τη μορφή σχημάτων και πινάκων. Για κάθε μια από τις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν strain gauges παρουσιάζονται οι καμπύλες όλων των δοκιμίων σε ένα διάγραμμα.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (μm) για το strain gauge της θέσης 1 όλων των δοκιμίων. Η θέση 1 είναι αυτή που απέχει 70 mm από το κάτω άκρο του κάθε δοκιμίου κατά το διάμηκες και στο μέσο του πλάτους. Στα δοκίμια μας, λόγω του γεγονότος της ύπαρξης εγκοπής, η κρίσιμη διατομή είναι αυτή της μέσης τομής και έτσι εκεί παρατηρούνται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Εφόσον η θέση 1 βρίσκεται μακριά από το κέντρο του δοκιμίου έχουμε μειωμένες παραμορφώσεις και μεταφερόμενο φορτίο. Έτσι από το διάγραμμα του σχήματος 4.5 είναι λίγες οι παρατηρήσεις που μπορούμε να κάνουμε αλλά εξίσου σημαντικές.

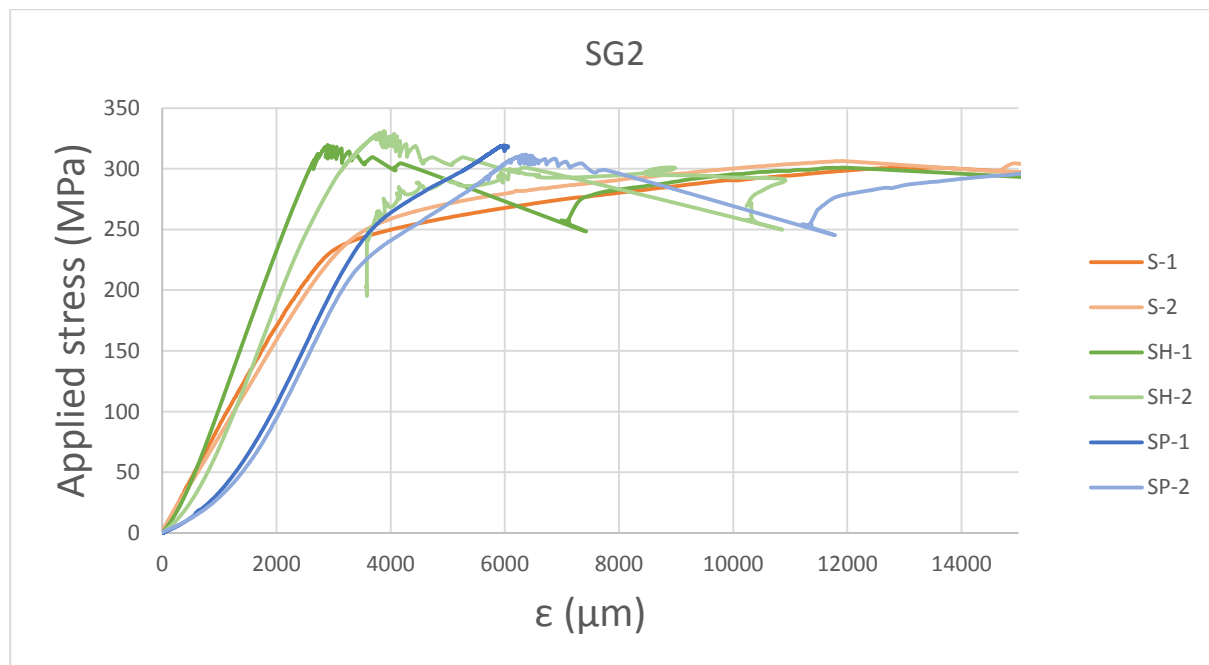


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης – παραμόρφωσης στη θέση 1

Το πρώτο συμπέρασμα από αυτό το σχήμα είναι η επιβεβαίωση της καλής επαναληψιμότητας που πετύχαμε ανάμεσα στις διάφορες ομάδες δοκιμίων. Από το διάγραμμα φαίνεται επίσης η επέκταση της πλαστικής περιοχής των ενισχυμένων δοκιμίων με επίθεμα. οι πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται σε πολύ μεγαλύτερο τμήμα της κατασκευής. Η

συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως λογική καθώς όταν δεν έχουμε επίθεμα η κρίσιμη διατομή παραλαμβάνει μεγαλύτερες τάσεις τοπικά με συνέπεια να έχει και μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Με την τοποθέτηση του επιθέματος η διατομή στην περιοχή της εγκοπής ενισχύεται με αποτέλεσμα την ομαλότερη κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων. Η παραμόρφωση των δοκιμών με επίθεμα Hand lay-up, μέχρι την θραύση, αυξήθηκε κατά 122%, ενώ αντίστοιχα αυτή των δοκιμών Pre-preg αυξήθηκε κατά 121%, στη θέση 1. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η παραμόρφωση στη θέση 1 δεν είναι παραμόρφωση θραύσης, παρά μόνο η παραμόρφωση στη θέση αυτή και η στιγμή που το strain gauge σταματά να καταγράφει δεδομένα. Η κατασκευή παραμορφώνεται μέγιστα σε άλλο σημείο και επομένως εκεί έχουμε θραύση. Η ανάλυση της παραμόρφωσης στη θέση 1 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ώστε να προειδοποιούμε για την αστοχία της κατασκευής πριν συμβεί (early warning).

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (μm) για το strain gauge της θέσης 2 όλων των δοκιμών. Η θέση 2 βρίσκεται στο κέντρο του δοκιμίου κατά το διάμηκες, ενώ απέχει 5 mm από το άκρο του δοκιμίου κατά τη διεύθυνση του πλάτους. Στα δοκίμια με επίθεμα, η θέση 2, βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά από αυτή του επιθέματος. Από αυτό το strain gauge είναι δυνατό να εξαχθούν και ποσοτικά συμπεράσματα καθώς βρίσκεται στο σημείο της κρίσιμης διατομής και περιγράφει με μεγαλύτερη αμεσότητα την συμπεριφορά κάθε δοκιμίου.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Τάσης – Παραμόρφωσης στη θέση 2

Σε αυτό το διάγραμμα επίσης παρατηρούμε την καλή επαναληψιμότητα και την ομαδοποίηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων. Φαίνεται ότι στα ενισχυμένα δοκίμια η διαρροή στη θέση 2, εμφανίζεται σε υψηλότερες τιμές της επιβαλλόμενης τάσης. Η διαρροή σε αυτή τη θέση και η πλαστική παραμόρφωση στην εν λόγω περιοχή αποτελούν και την αιτία αποκόλλησης του επιθέματος. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζεται η τάση έναρξης της διαρροής στη θέση 2 και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό κάθε δοκιμίου. Ως τάση έναρξης διαρροής στη θέση 2 θεωρήσαμε την τάση στην οποία παρατηρείται να τελειώνει το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης για κάθε δοκίμιο, ενώ ως μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό την μέγιστη τιμή της τάσης η οποία καταγράφηκε σε όλη την διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 4.3: Τάση διαρροής και μέγιστη αντοχή

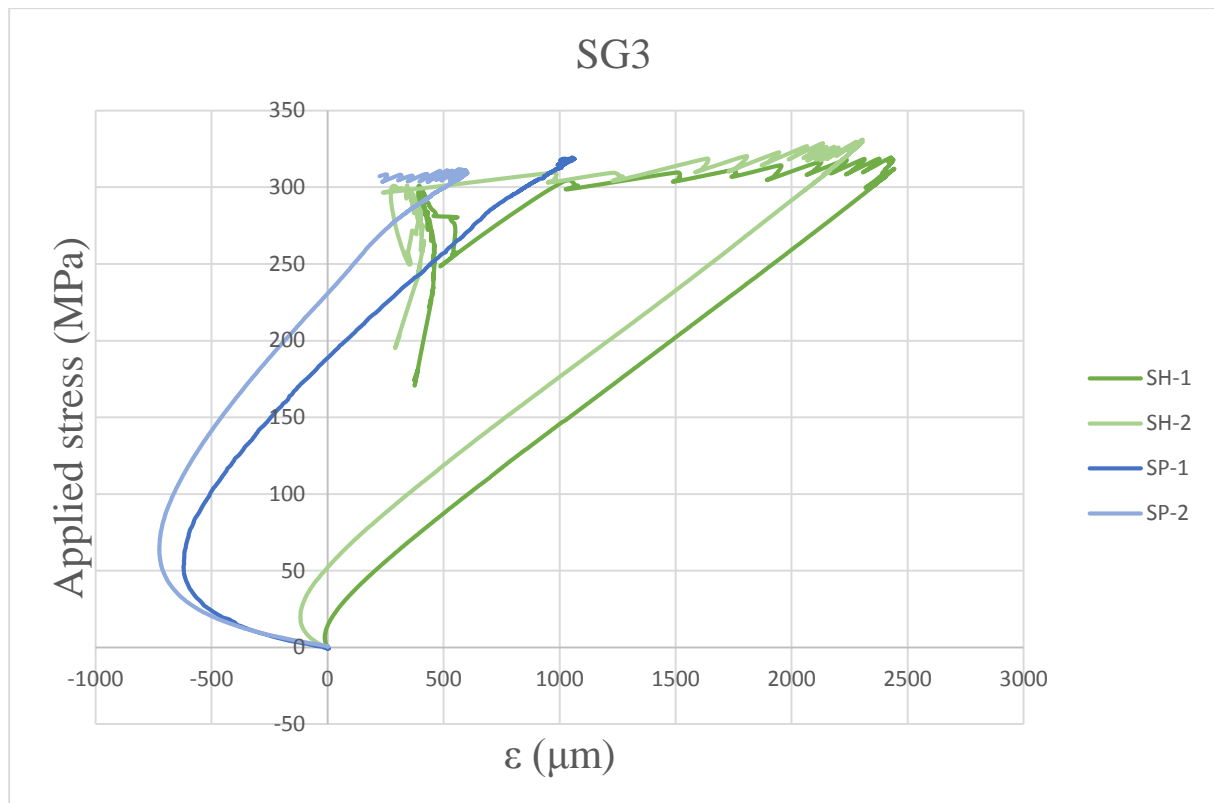
Δοκίμιο	Τάση διαρροής (MPa)	Μέσος όρος (MPa)	Ποσοστό αύξησης	Μέγιστη αντοχή (MPa)	Μέσος όρος (MPa)	Ποσοστό αύξησης
S-1	225.7	227.9	-	301.1	303.8	-
S-2	230.2			306.4		
SH-1	311.7	310.5	+36%	319.4	325.3	+7%
SH-2	309.4			331.1		
SP-1	247.1	233.6	+3%	319.4	315.6	+4%
SP-2	220.2			311.8		

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται η αύξηση της τάσης έναρξης διαρροής στα ενισχυμένα δοκίμια με επίθεμα Hand lay-up κατά ποσοστό 36%, ενώ στα δοκίμια με επίθεμα Pre-preg η αντίστοιχη αύξηση ήταν της τάξης του 3%. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται στην μη επαρκή ποσότητα ρητίνης μεταξύ των επιθεμάτων Pre-preg και του αλουμινίου στα δοκίμια αυτά με αποτέλεσμα την εύκολη αποκόλληση του επιθέματος. Αντίθετα το υψηλότερο ποσοστό ρητίνης μεταξύ των επιθεμάτων Hand lay-up και του αλουμινίου έχει ως συνέπεια την καλή επικόλληση των επιθεμάτων και την αύξηση της τάσης έναρξης διαρροής.

Επίσης παρατηρείται αύξηση στην μέγιστη αντοχή των ενισχυμένων δοκιμίων, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό και σε ποσοστά 7 % και 4 % για τις μεθόδους Hand lay-up και Pre-preg αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι η θραύση των δοκιμίων προκύπτει μετά την αποκόλληση του επιθέματος και ουσιαστικά η μέγιστη αντοχή εξαρτάται από το αλουμίνιο. Έτσι η τάση θραύσης παραμένει σχεδόν ίδια σε όλα τα δοκίμια με μια μικρή αύξηση των ενισχυμένων.

Ακόμα παρατηρούμε στο διάγραμμα του σχήματος 4.6, καμπυλότητα στο αρχικό κομμάτι των καμπυλών για τα δοκίμια Pre-preg. Αυτή οφείλεται στην δημιουργία καμπυλότητας κατά την κατασκευή των εν λόγω δοκιμίων και μετά το πέρας της το δοκίμιο ευθυγραμμίζεται και εισέρχεται στην ελαστική περιοχή.

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (μm) για το strain gauge της θέσης 3 των δοκιμίων με επίθεμα. Η θέση 3 βρίσκεται επάνω και στο κέντρο του επιθέματος.



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης – παραμόρφωσης στη θέση 3

Στη θέση 3, πάνω από την εγκοπή και στο κέντρο του επιθέματος, παρατηρείται ότι οι τάσεις που επιβάλλονται στα επιθέματα είναι αρχικά θλιπτικές και μετά από ένα σημείο εφελκυστικές. Η συμπεριφορά αυτή είναι εντονότερη στα δοκίμια με επίθεμα Pre-preg, αλλά παρατηρείται και στα δοκίμια με επίθεμα Hand lay-up, με το δοκίμιο SH-2 να ακολουθεί αυτή την περιγραφή, ενώ στο δοκίμιο SH-1 το φαινόμενο αυτό είναι μικρής έκτασης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συνολική κάμψη των δοκιμίων λόγω της μονόπλευρης ενίσχυσης από το επίθεμα, με το φαινόμενο να εξασθενεί όσο αυξάνεται το φορτίο. Επίσης επίδραση σε αυτή τη συμπεριφορά έχει και η ύπαρξη εγκοπής κάτω από το strain gauge της θέσης αυτής, καθώς είναι πολύ πιθανή η ύπαρξη τοπικής κάμψης στο σημείο αυτό. Στα δοκίμια με επίθεμα Pre-preg οι εφελκυστικές τάσεις πάνω στο επίθεμα υφίστανται για μεγαλύτερες τιμές φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι εκτός των παραγόντων που αναφέρονται παραπάνω στα δοκίμια αυτά έχει δημιουργηθεί έντονη καμπυλότητα κατά την κατασκευή τους για λόγους που έχουν εξηγηθεί. Από τις καμπύλες του σχήματος 4.7 μπορούμε να βρούμε την επιβαλλόμενη τάση στην οποία αποκολλάται το επίθεμα, λαμβάνοντας την ίση με την τάση στην οποία οι καμπύλες παραμορφώνονται έντονα με αδύνατη την παρακολούθησή τους. Αυτό θεωρούμε ότι συμβαίνει στο ανώτερο σημείο των καμπυλών και οι τάσεις αποκόλλησης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Τάση αποκόλλησης επιθεμάτων από διάγραμμα επιβαλλόμενη τάσης – παραμόρφωσης SG3

Δοκίμιο	Τάση αποκόλλησης επιθέματος (MPa)	Διαφορά με πίνακα 4.2
SH-1	306.86	+1.5 %
SH-2	318.15	+6.1 %
SP-1	316.43	+2.1 %
SP-2	307.73	+3.0 %

Οι τιμές αυτές συγκρινόμενες με αυτές του πίνακα 4.2 και με το δεδομένο ότι υπολογίστηκαν από τα διαγράμματα αποδεικνύουν το γεγονός του ότι το επίθεμα αποκολλάται όταν συμβαίνει η απότομη πτώση τάσης στα διαγράμματα των δοκιμών με επίθεμα του σχήματος 4.3, λόγω των μικρών διαφορών. Παρατηρείται επίσης ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις στα επιθέματα είναι πολύ μικρές σε σχέση με την παραμόρφωση θραύσης των υλικών από τα οποία κατασκευάστηκαν, πράγμα που σημαίνει ότι η φόρτιση των επιθεμάτων είναι χαμηλή. Πιο συγκεκριμένα η παραμόρφωση των επιθεμάτων Hand lay-up είναι το 17% της παραμόρφωσης θραύσης του υλικού, ενώ η παραμόρφωση των επιθεμάτων Pre-preg το 7% αντίστοιχα. Επομένως ο τρόπος αστοχίας είναι αποκόλληση του επιθέματος και στη συνέχεια διαρροή και θραύση του μετάλλου. Το ίδιο το επίθεμα δεν παθαίνει τίποτε.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την πειραματική μελέτη είναι τα εξής:

- Σε όλα τα δοκίμια με επίθεμα υπήρξε αποκόλληση αυτού και στη συνέχεια διαρροή του αλουμινίου και θραύση. Το επίθεμα παρέμεινε ανέπαφο σε κάθε περίπτωση, ενώ η αιτία αποκόλλησης του είναι η διαρροή στην περιοχή της εγκοπής.
- Η τάση έναρξης διαρροής αυξήθηκε σε όλα τα δοκίμια με την μεγαλύτερη αύξηση να σημειώνεται στα δοκίμια με επίθεμα από Hand lay-up και να είναι της τάξης του 36%, ενώ στα δοκίμια με επίθεμα από Pre-preg η αντίστοιχη αύξηση ήταν μόλις 3%. Η καλύτερη συμπεριφορά των επιθεμάτων από Hand lay-up οφείλεται πιθανότατα στο πολύ μεγαλύτερο ποσοστό ρητίνης τους με αποτέλεσμα αυτή να λειτουργεί ως κολλητικό μέσο.
- Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό αυξήθηκε σε όλα τα δοκίμια με επίθεμα κατά ένα μικρό ποσοστό.
- Στα δοκίμια με επίθεμα επεκτάθηκε η πλαστική περιοχή, ενώ αυξήθηκε η διαμήκης ακαμψία τους, πράγμα που αποδεικνύει την χρησιμότητα του επιθέματος.
- Η μονόπλευρη ενίσχυση των δοκιμών με επίθεμα οδήγησε στο φαινόμενο της κάμψης των δοκιμών λόγω ασύμμετρης διατομής.
- Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή έγινε πιο απότομα στα δοκίμια με επίθεμα, ενώ και η ελαστική περιοχή ήταν μεγαλύτερη.
- Η σύνδεση επέδειξε αντοχή για αρκετά μεγάλη πλαστικότητα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Τσούβαλης Ν. (1998), Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1998.
2. Παντελής Δ. (2006), Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία, Σημειώσεις του Μαθήματος, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τομέας Θαλασσίων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2006.
3. Ανδριανόπουλος Ν., Κυριαζή Ε., Λιακόπουλος Κ. (1991), Πειραματική Αντοχή των Υλικών, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1991.
4. Μυρσιώτης Λ., Τσούβαλης Ν. και Παπάζογλου Β. (2006), Πειραματική Διερεύνηση της Συμπεριφοράς σε Κόπωση Ρωγματομένων Πλακών Χάλυβα Ενισχυμένων με Επιθέματα από Σύνθετα Υλικά, Πυθαγόρας ΙΙ, Ενισχυση Ερευνητικών Ομάδων στα Πανεπιστήμια, 2.2.3.στ, Report No STL-228-F-06, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2006.
5. Παπάζογλου Β. (1995), Ναυπηγική Τεχνολογία, Σημειώσεις του Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1995.
6. Νταμαδάκης Α. (2010), Πειραματική μελέτη και αριθμητική μοντελοποίηση της αντοχής σε εφελκυσμό ρωγματομένων χαλύβδινων πλακών ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2010.
7. Κουτσούρης Σ. (2010), Πειραματική μελέτη και αριθμητική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς σε κόπωση ρωγματομένων χαλύβδινων πλακών ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2010.

8. Παναγόπουλος Ν. (2015), Πειραματική μελέτη συμπεριφοράς σε κόπωση ρωγματομένων πλακών αλουμινίου ενισχυμένων με επιθέματα από σύνθετα υλικά, Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2015.

Διεθνής

1. Chung K.H., Yang W.H. (2003), “Mixed Mode Fatigue Crack Growth in Aluminium Plates With Composite Patches”, Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University, International Journal of Fatigue, 25, 2003, 325-333.
2. Dalzel-Job, J., Sumpter, J.D.G. and Livingstone, F. (2003), “Composite Patch Repair of Steel Ships”, Proc. Advanced Marine Materials, Technology and Applications Conference, RINA, London, 2003.
3. Grabovac I (2002), “Case history: Bonded Composite Reinforcement of Ship Structure” Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure, 42, 2002, 1035-1050.
4. Grabovac I (2003), “Bonded Composite Solution to Ship Reinforcement”, Maritime Platforms Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Defence Science and Technology Organisation, Composites Part A, 34, 2003, 847-854.
5. Grabovac I, Whittaker D. (2009), “Application of Bonded Composites in the Repair of Ships Structures-A 15-Year Service Experience”, Department of Defence, Defence Science and Technology Organization, Australia, Composites Part A, 40, 2009, 1381-1398.
6. Hosseini H.- Toudeshky (2006), “Effects of Composite Patches on Fatigue Crack Propagation of Single-Side Aluminum Panels”, Composite Structures, 76, 2006, 243-251.
7. Hosseini H.- Toudeshky- B. Mohammadi (2006), “A Simple Method to Calculate the Crack Growth Life of Adhesively Repaired Aluminum Panels”, Composite Structures, 79, 2007, 234-241.
8. McGeorge D., Echtermeyer A.T., Leong K.H., Melve B., Robinson M., Fischer K.P. (2009), “Repair of Floating Offshore Units Using Bonded Fibre Composite Materials”, Det Norske Veritas AS, Composites Part A, 40, 2009, 1364-1380.
9. Tsouvalis N., Kouloukouras J., Dimou D. and Mirisiotis L. (2007), “Numerical Modeling of the Static and Dynamic Experimental Tests Performed in Composite Patch Reinforced Steel Plates with Defects”, Pithagoras II, Support of University Research Teams, 2.2.3.στ, Report No.STL-247-F-07, Athens, September 2007.

10. Turton T.J., Dalzel-Job, J. and Livingstone, F. (2005), “Oil Platforms, Destroyers and Frigates – Case Studies of QinetiQ’s Marine Composite Patch Repairs”, Composites Part A, 36, 2005, 1066-1072.
11. Rodriguez E., Palleiro C., Ruben de la Mano (2013), Best practice and application procedures, Co-Patch, AIMEN
12. Heth J. , From art to science: A prepreg overview, www.hpcomposites.com .
13. ASTM D 790, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
14. ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
15. ASTM D 3171, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials
16. ASTM D 3518, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a 645° Laminate

Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις

1. ASM International, Material Data Sheets, <http://products.asminternational.org/datasheets/index.jsp>
2. www.fibermax.gr

ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

DATABASE OF MATERIAL CHARACTERIZATION TESTS CONDUCTED

Property	Definition
W_f	Reinforcement content weight percent
t_{ply}	Thickness of each ply
E_1	Modulus of Elasticity in warp direction
σ_{u1}	Ultimate tension in warp direction
E_2	Modulus of Elasticity in fill direction
σ_{u2}	Ultimate tension in fill direction
ϵ_{u1}	Ultimate strain in warp direction
ϵ_{u2}	Ultimate strain in fill direction
G_{12}	Shear modulus of Elasticity
τ_{u12}	Ultimate shear stress
σ_f	Flexural strength
E_f	Flexural modulus of Elasticity
ν_{12}	Poisson ratio in warp direction
ν_{21}	Poisson ratio in fill direction

Material title: Pre-preg

- Fiber type : carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)	Pre-preg weight (g/m ²)
3K T300 carbon fiber	Plain weave	205	394

- Matrix type : Toray Semi-Toughened 350 °F Epoxy Resin
- Manufacturing method : Pre-preg method, imposed vacuum 0.6-0.7 bar till temperature reaches 60 °C at the final cooling stage
- Curing status : from room temperature 5 °C/min till 120 °C, then 1 hour at 120 °C and cooling with same rate
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	79.1 %	-
t_{ply}	-	0.22 mm	2.8
E_1	ASTM D 3039	52516 MPa	5.3
σ_{u1}	ASTM D 3039	636.8 MPa	6.3
E_2	ASTM D 3039	54784 MPa	2.8
σ_{u2}	ASTM D 3039	732.7 MPa	3.0
ϵ_{u1}	ASTM D 3039	1.1 %	7.9
ϵ_{u2}	ASTM D 3039	1.3 %	
G_{12}	ASTM D 3518	3123 MPa	4.2
τ_{u12}	ASTM D 3518	49.1 MPa	3.3
σ_f	ASTM D 790	689.4 MPa	4.9
E_f	ASTM D 790	50398 MPa	5.7
ν_{12}	-	-	-
ν_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: [Papadopoulos M.-2015]

Material title : Epoxy-Glass (WR+CSM) cold cured

- Fiber type : Agimat WRM-600.300/125cm glass fiber, which is a 600 g/m² woven roving combined with a 300 g/m² chopped strand mat.

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass fiber	Woven roving + chopped strand mat	600 + 300

- Matrix type : D.E.R. TM 353 liquid epoxy resin from Dow Chemical Company (“Dow”) + Epamine PC13 curing agent for epoxy systems from PO.INT.ER S.r.l.
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : cold cured at 25 °C for 24 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	48.6 %	-
t _{ply}	-	1.16 mm	-
E ₁	ISO 527-4	12964 MPa	4.7
σ _{u1}	ISO 527-4	271.8 MPa	4.1
E ₂	-	-	-
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Source : Stamatopoulos K., ‘MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCREMENTAL HOLE DRILLING METHOD’, Diploma thesis, NTUA, June2011.

Material title : Epoxy-Glass (WR+CSM) cold cured

- Fiber type : Agimat WRM-600.300/125cm glass fiber, which is a 600 g/m² woven roving combined with a 300 g/m² chopped strand mat.

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass fiber	Woven roving + chopped strand mat	600 + 300

- Matrix type : Matrix type : D.E.R. TM 353 liquid epoxy resin from Dow Chemical Company (“Dow”) + Epamine PC13 curing agent for epoxy systems from PO.INT.ER S.r.l.
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : cured at 25 °C for 24 hours and then post cured at 100 °C for 2 hours before left to cool down
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	48.4 %	-
t _{ply}	-	1.16 mm	-
E ₁	ISO 527-4	12635 MPa	2.0
σ _{u1}	ISO 527-4	262.3 MPa	3.9
E ₂	-	-	-
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Source : Stamatopoulos K., ‘MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCREMENTAL HOLE DRILLING METHOD’, Diploma thesis, NTUA, June2011.

Material title : Epoxy-Glass (WR+CSM) VB cold cured

- Fiber type : Agimat WRM-600.300/125cm glass fiber, which is a 600 g/m² woven roving combined with a 300 g/m² chopped strand mat.

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass fiber	Woven roving + chopped strand mat	600 + 300

- Matrix type : Matrix type : D.E.R. TM 353 liquid epoxy resin from Dow Chemical Company (“Dow”) + Epamine PC13 curing agent for epoxy systems from PO.INT.ER S.r.l.
- Manufacturing method : Vacuum Bagging, imposed pressure of 0.8 bar
- Curing status : cold cured at 25 °C for 24 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	63.5 %	-
t _{ply}	-	0.8 mm	-
E ₁	ISO 527-4	16949 MPa	1.6
σ _{u1}	ISO 527-4	352.1 MPa	3.9
E ₂	-	-	-
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
V ₁₂	-	-	-
V ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Source : Stamatopoulos K., ‘MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCREMENTAL HOLE DRILLING METHOD’, Diploma thesis, NTUA, June2011.

Material title : Epoxy-Glass (WR+CSM) VB post cured

- Fiber type : Agimat WRM-600.300/125cm glass fiber, which is a 600 g/m² woven roving combined with a 300 g/m² chopped strand mat.

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass fiber	Woven roving + chopped strand mat	600 + 300

- Matrix type : Matrix type : D.E.R. TM 353 liquid epoxy resin from Dow Chemical Company (“Dow”) + Epamine PC13 curing agent for epoxy systems from PO.INT.ER S.r.l.
- Manufacturing method : Vacuum Bagging, imposed pressure of 0.8 bar
- Curing status : cured at 25 °C for 24 hours and then post cured at 100 °C for 2 hours before left to cool down
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	64.8 %	-
t _{ply}	-	0.8 mm	-
E ₁	ISO 527-4	16980 MPa	2.8
σ _{u1}	ISO 527-4	359.0 MPa	4.3
E ₂	-	-	-
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Source : Stamatopoulos K., ‘MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCREMENTAL HOLE DRILLING METHOD’, Diploma thesis, NTUA, June2011.

Material title : Polyester-Glass (WR+CSM) VB cold cured

- Fiber type : Agimat WRM-600.300/125cm glass fiber, which is a 600 g/m² woven roving combined with a 300 g/m² chopped strand mat.

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass fiber	Woven roving + chopped strand mat	600 + 300

- Matrix type : PE-6/TC polyester resin + Appropriate hardener (MEKP 50) for the polyester
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : cold cured at 25 °C for 24 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ISO 1172	53.1 %	-
t_{ply}	-	1.04 mm	-
E_1	ISO 527-4	15583 MPa	2.8
σ_{u1}	ISO 527-4	272.0 MPa	2.3
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source : Stamatopoulos K., 'MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCREMENTAL HOLE DRILLING METHOD', Diploma thesis, NTUA, June2011.

Material title : Epoxy-Glass (UNID) VB cold cured

- Fiber type : UNIE600 Glass, Gavazzi Tessuti Technici, which is unidirectional glass fibers

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass E fiber	Unidirectional	604

- Matrix type : D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin + EPAMINE PC13 hardener
- Manufacturing method : Vacuum Bagging with imposed pressure of up to 1 bar
- Curing status : curing in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	-	-	-
t_{ply}	-	0.57 mm	1.8
E_1	ASTM D 3039	29658 MPa	2.2
σ_{u1}	ASTM D 3039	559.4 MPa	20.5
E_2	ASTM D 3039	6563 MPa	23.1
σ_{u2}	ASTM D 3039	60.8 MPa	19.0
ϵ_{u1}	ASTM D 3039	3.4 %	11.7
ϵ_{u2}	ASTM D 3039	2.8%	33.2
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source : Καρατζάς Β. ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΩΣΕΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ’, diploma thesis, NTUA, July 2009.

Material title : Epoxy-Glass (UNID) VB cold cured

- Fiber type : UNIE600 Glass, Gavazzi Tessuti Technici, which is unidirectional glass fibers

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass E fiber	Unidirectional	604

- Matrix type : D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin + EPAMINE PC13 hardener
- Manufacturing method : Vacuum Bagging with imposed pressure of up to 1 bar
- Curing status : curing in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ISO 1183	77.2 %	0.2
t_{ply}	-	0.45 mm	2.8
E_1	ISO 527	39217	3.6
σ_{u1}	ISO 527	689.8	10.5
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	1.9 %	12.7
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source : Καρατζάς Β. ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΩΣΕΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ’, diploma thesis, NTUA, July 2009.

Material title : Epoxy-Glass (UNID) HLU cold cured

- Fiber type : UNIE600 Glass, Gavazzi Tessuti Technici, which is unidirectional glass fibers

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Glass E fiber	Unidirectional	604

- Matrix type : D.E.R. 353 Liquid Epoxy Resin + EPAMINE PC13 hardener
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : curing in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ISO 1183	52.8 %	1.6
t_{ply}	-	0.7 mm	2.6
E_1	ISO 527	27433 MPa	7.8
σ_{u1}	ISO 527	574.0 MPa	7.7
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	2.4 %	8.5
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source : Καρατζάς Β. ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΩΣΕΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ’, diploma thesis, NTUA, July 2009.

Material title : Epoxy-Glass (UNID) VB

- Fiber type : UNI-CD-600 623g/m², Owens Corning

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-glass	Unidirectional	623 (50 weft-573 warp)

- Matrix type : D.E.R. 358(600-750 mPa.s at 25°C), Dow Plastics + EPAMINE PC13, PO.INT.ER
- Manufacturing method : Vacuum bagging with imposed pressure of 0.6 bar
- Curing status : cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	67.8 %	2.1
t _{ply}	-	0.613 mm	15.3
E ₁	ASTM D 3039	29658 MPa	11.0
σ _{u1}	ASTM D 3039	559 MPa	20.6
E ₂	ASTM D 3039	6563 MPa	23.4
σ _{u2}	ASTM D 3039	60 MPa	20.0
ε _{u1}	ASTM D 3039	3.5 %	11.7
ε _{u2}	ASTM D 3039	2.9 %	33.6
G ₁₂	ASTM D 5379	2034	7.3
τ _{u12}	ASTM D 5379	31	3.2
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	ASTM D 3039	0.290	36.6
ν ₂₁	ASTM D 3039	0.080	1.3

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=38671 MPa (CV=2.7%), σ_{1Cmax}=253 MPa (CV=23.3%), ε_{1Cmax}=0.58% (CV=37.9%), ν₁₂=0.269 (CV=13.4%)

E_{2C}=8501 MPa (CV=14.4%), σ_{2Cmax}=59 MPa (CV=16.9%), ε_{2Cmax}=0.72% (CV=35.4%), ν₂₁=0.075 (CV=5.3%)

Source : Δούκα Χ. ‘ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΛΑΚΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ’, Diploma thesis, NTUA, April 2009.

Material title : Epoxy-Carbon (UNID) VB

- Fiber type : C322U Carbon fiber fabric, Fibermax

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber fabric	Unidirectional Woven (warp : 12K TR50S carbon fiber, 94%, 3.80 ends (threads) / cm, fill: Glass thermoplastic 6%, 1.60 ends (threads) / cm)	322

- Matrix type : Epoxy matrix R9330 + Hardener H9054, FIBERMAX Epoxy system
- Manufacturing method : Vacuum bagging with imposed pressure of 0.6 bar
- Curing status : Cured in room temperature for 24 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	59 %	-
t_{ply}	-	0.35 mm	-
E_1	-	117400 MPa	3.9
σ_{u1}	-	-	-
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Kaltermidou K. ‘ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΚΟΛΛΗΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΑ-ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ’, postgraduate thesis, NTUA, March 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (12K) Filament winding

- Fiber type : Torayca T700S 12K

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 12K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	76.8 %	2.0
t_{ply}	-	-	-
E_1	ASTM D 3039	123600 MPa	3.7
σ_{u1}	ASTM D 3039	1009 MPa	9.0
E_2	ASTM D 3039	7500 MPa	6.2
σ_{u2}	ASTM D 3039	2.1 MPa	18.6
ε_{u1}	ASTM D 3039	8149 $\mu\varepsilon$	11.0
ε_{u2}	ASTM D 3039	261 $\mu\varepsilon$	20.1
G_{12}	ASTM D 3518	3400 MPa	21.0
τ_{u12}	ASTM D 3518	45 MPa	12.5
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
ν_{12}	ASTM D 3039	0.315	3.6
ν_{21}	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

$E_{1C}=97700$ MPa (CV=4.9%), $\sigma_{1Cmax}=507$ MPa (CV=2.2%), $\varepsilon_{1Cmax}=-5581\mu\varepsilon$ (CV=6.0%)

Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (12K) Filament winding (Cylindrical)

- Fiber type : Torayca T700S 12K

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 12K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	76.8 %	2.0
t_{ply}	-	-	-
E_1	-	-	-
σ_{u1}	-	-	-
E_2	ASTM D 3039	9200 MPa	5.6
σ_{u2}	ASTM D 3039	29.8 MPa	26.1
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	ASTM D 3039	3285 $\mu\epsilon$	28.4
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	ISO 14125	1127 MPa	6.6
E_f	ISO 14125	143700 MPa	7.0
ν_{12}	-	-	-
ν_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (60K) Filament winding

- Fiber type : Mitsubishi Pyrofil TRH50 60M

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 60K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	71.5 %	2.3
t _{ply}	-	-	-
E ₁	ASTM D 3039	108200 MPa	5.3
σ _{u1}	ASTM D 3039	779 MPa	11.5
E ₂	ASTM D 3039	6400 MPa	3.7
σ _{u2}	ASTM D 3039	24.0 MPa	13.4
ε _{u1}	ASTM D 3039	7051 με	8.0
ε _{u2}	ASTM D 3039	3746 με	16.0
G ₁₂	ASTM D 3518	2800 MPa	15.0
τ _{u12}	ASTM D 3518	34 MPa	20.4
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	ASTM D 3039	0.295	4.6
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=101600 MPa (CV=6.1%), σ_{1Cmax}=482 MPa (CV=3.8%), ε_{1Cmax}=-4755με (CV=6.0%)

E_{2C}=7000 MPa (CV=3.4%), σ_{2Cmax}=90 MPa (CV=11.7%), ε_{2Cmax}=-13684με (CV=11.5%),
ν₂₁=0.021 (CV=1.49%)

Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (60K) Filament winding (Cylindrical)

- Fiber type : Mitsubishi Pyrofil TRH50 60M

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 60K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	71.5 %	2.3
t _{ply}	-	-	-
E ₁	-	-	-
σ _{u1}	-	-	-
E ₂	ASTM D 3039	8500 MPa	2.2
σ _{u2}	ASTM D 3039	17.3 MPa	6.0
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	ASTM D 3039	2044 με	7.1
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	ISO 14125	1010 MPa	1.7
E _f	ISO 14125	147800 MPa	2.2
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information: Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (12K High modulus) Filament winding

- Fiber type : Mitsubishi Pyrofil HR40 12M

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 12K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	71.7 %	2.7
t _{ply}	-	-	-
E ₁	ASTM D 3039	204000 MPa	4.4
σ _{u1}	ASTM D 3039	707 MPa	9.6
E ₂	ASTM D 3039	6700 MPa	8.0
σ _{u2}	ASTM D 3039	9.6 MPa	35.2
ε _{u1}	ASTM D 3039	3467 με	8.0
ε _{u2}	ASTM D 3039	1447 με	40.2
G ₁₂	ASTM D 3518	2700 MPa	14.8
τ _{u12}	ASTM D 3518	34 MPa	8.4
σ _f	ISO 14126	1049 MPa	1.7
E _f	ISO 14126	228400	1.6
ν ₁₂	ASTM D 3039	0.235	7.9
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=177700 MPa (CV=7.1%), σ_{1Cmax}=391 MPa (CV=8.3%), ε_{1Cmax}=-2246με (CV=14.9%)

E_{2C}=4700 MPa (CV=12.0%), σ_{2Cmax}=58 MPa (CV=16.5%), ε_{2Cmax}=-10241με (CV=28.3%),
ν₂₁=0.019 (CV=3.72%)

Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Carbon (12K High modulus) Filament winding (Cylindrical)

- Fiber type : Mitsubishi Pyrofil HR40 12M

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional 12K	-

- Matrix type : Voraforce TW 100 Epoxy resin + Voraforce TW 150 Hardener + Voraforce TC 3000 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding process
- Curing status : After above process in room temperature, system cures at 150 °C for 3 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	71.7 %	2.7
t_{ply}	-	-	-
E_1	-	-	-
σ_{u1}	-	-	-
E_2	ASTM D 3039	7500 MPa	0.9
σ_{u2}	ASTM D 3039	21.7 MPa	20.0
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	ASTM D 3039	2895 $\mu\epsilon$	21.6
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	ISO 14125	1049 MPa	1.7
E_f	ISO 14125	228400	1.6
ν_{12}	-	-	-
ν_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Papadakis A. ‘Αποτελέσματα πειραμάτων δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού’, DEEP-CO-HOUS, NTUA, November 2014.

Material title : Epoxy – Glass HLU

- Fiber type : METYX LT800E10A-0/90

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	Biaxial	813

- Matrix type : WEST 105 epoxy resin + WEST 206 slow hardener
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	51.1 %	1.9
t_{ply}	-	1.14 mm	-
E_1	ASTM D 3039	17000 MPa	6.8
σ_{u1}	ASTM D 3039	324.5 MPa	9.6
E_2	ASTM D 3039	16000 MPa	6.6
σ_{u2}	ASTM D 3039	295.0 MPa	18.4
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	2100 MPa	3.8
τ_{u12}	ASTM D 3518	36.9 MPa	4.3
σ_f	ASTM D 790	550.6 MPa	9.5
E_f	ASTM D 790	19200 MPa	13.2
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C} =15900 MPa (CV=7.9%), σ_{1Cmax} =276.5 MPa (CV=6.8%)

E_{2C} =15400 MPa (CV=7.2%), σ_{2Cmax} =280.1 MPa (CV=5.4%)

Source: Kotsidis E. ‘Composite materials manufacturing and characterization’, MOSAIC, NTUA, July 2013.

Material title : Vinylester – Glass VB

- Fiber type : METYX LT800E10A-0/90

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	Biaxial	813

- Matrix type : SCOTT BADER CRYSTIC VE679PA vinylester resin
- Manufacturing method : Vacuum Bagging
- Curing status : Cured in room temperature for 12 hours under the set pressure
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	73.65 %	1.83
t _{ply}	-	0.75	-
E ₁	ASTM D 3039	26400 MPa	16.7
σ _{u1}	ASTM D 3039	445.1 MPa	6.0
E ₂	ASTM D 3039	25200 MPa	5.8
σ _{u2}	ASTM D 3039	436.6 MPa	6.3
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	ASTM D 3518	2200 MPa	4.1
τ _{u12}	ASTM D 3518	31.1 MPa	4.9
σ _f	ASTM D 790	548.9 MPa	13.7
E _f	ASTM D 790	20900 MPa	6.9
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=23400 MPa (CV=4.1%), σ_{1Cmax}=257.1 MPa (CV=11.9%)

E_{2C}=23000 MPa (CV=4.7%), σ_{2Cmax}=259.8 MPa (CV=6.1%)

Source: Kotsidis E. ‘Composite materials manufacturing and characterization’, MOSAIC, NTUA, July 2013.

Material title : Epoxy - Glass VB

- Fiber type : METYX LT800E10A-0/90

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	Biaxial	813

- Matrix type : WEST 105 epoxy resin + WEST 206 slow hardener
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	58.1 %	1.9
t_{ply}	-	0.81	-
E_1	ASTM D 3039	23500 MPa	5.2
σ_{u1}	ASTM D 3039	357.2 MPa	4.5
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	1800 MPa	5.1
τ_{u12}	ASTM D 3518	28.4 MPa	6.3
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
ν_{12}	-	-	-
ν_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Kotsidis E. 'Composite materials manufacturing and characterization', MOSAIC, NTUA, July 2013.

Material title : Vinylester - Glass RI

- Fiber type : METYX LT800E10A-0/90

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	Biaxial	813

- Matrix type : SCOTT BADER CRYSTIC VE679PA vinylester resin
- Manufacturing method : Resin infusion with imposed pressure of 1 bar
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	48.6 %	-
t_{ply}	-	0.65	-
E_1	ASTM D 3039	26700 MPa	10.4
σ_{u1}	ASTM D 3039	487.9 MPa	2.7
E_2	ASTM D 3039	24900 MPa	7.0
σ_{u2}	ASTM D 3039	470.4 MPa	4.9
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	ASTM D 790	665.7 MPa	5.6
E_f	ASTM D 790	26500 MPa	11.1
ν_{12}	ASTM D 3039	0.128	-
ν_{21}	ASTM D 3039	0.117	-

- Additional information:

Source: Kotsidis E. 'Composite materials manufacturing and characterization', MOSAIC, NTUA, July 2013.

Material title : Epoxy – Carbon HLU

- Fiber type : SGL GROUP CST 200 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional	200

- Matrix type : HAVEL LH 160 133 epoxy resin + HAVEL H 138 hardener
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	30.0%	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ASTM D 3039	38700 MPa	4.8
σ_{u1}	ASTM D 3039	660.1 MPa	5.3
E_2	ASTM D 3039	6500 MPa	7.7
σ_{u2}	ASTM D 3039	15.1 MPa	-
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	1700 MPa	4.0
τ_{u12}	ASTM D 3518	33.5 MPa	1.7
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
v_{12}	ASTM D 3039	0.355	-
v_{21}	ASTM D 3039	0.037	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C} =80700 MPa (CV=8.8%), σ_{1Cmax} =453.3 MPa (CV=9.8%)

E_{2C} =4900 MPa (CV=4.5%), σ_{2Cmax} =85.4 MPa (CV=3.7%)

Source: Karatzas V. 'Composite Materials Characterization Tests', Co-Patch, NTUA, February 2011.

Material title : Vinylester – Carbon HLU

- Fiber type : AMT DEVOLD L(X) 440-C10 [0]₂ carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional	208 (each)

- Matrix type : REICHHOLD DION 9500-M800
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	50.6 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ASTM D 3039	74000 MPa	4.3
σ_{u1}	ASTM D 3039	999.1 MPa	5.9
E_2	ASTM D 3039	5100 MPa	3.9
σ_{u2}	ASTM D 3039	16.0 MPa	6.4
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	2500 MPa	3.8
τ_{u12}	ASTM D 3518	41.3 MPa	0.8
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
v_{12}	ASTM D 3039	0.385	-
v_{21}	ASTM D 3039	0.038	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C} =67100 MPa (CV=9.2%), σ_{1Cmax} =511.4 MPa (CV=5.7%)

E_{2C} =5200 MPa (CV=9.1%), σ_{2Cmax} =71.8 MPa (CV=7.3%)

Source: Karatzas V. ‘Composite Materials Characterization Tests’, Co-Patch, NTUA, February 2011.

Material title : Epoxy – Carbon VI

- Fiber type : SGL GROUP CST 200 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional	200

- Matrix type : HAVEL LH 160 133 epoxy resin + HAVEL H138 Hardener
- Manufacturing method : Vacuum Infusion with imposed pressure of 0.75 bar
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	50.4%	-
t_{ply}	-		
E_1	ASTM D 3039	58600 MPa	7.5
σ_{u1}	ASTM D 3039	972.7 MPa	8.6
E_2	ASTM D 3039	5500 MPa	7.5
σ_{u2}	ASTM D 3039	14.4 MPa	-
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	2000 MPa	9.6
τ_{u12}	ASTM D 3518	42.4 MPa	2.4
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
v_{12}	ASTM D 3039	0.376	-
v_{21}	ASTM D 3039	0.046	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{2C} =3900 MPa (CV=4.0%), σ_{2Cmax} =76.3 MPa (CV=2.9%)

Source: Karatzas V. ‘Composite Materials Characterization Tests’, Co-Patch, NTUA, February 2011.

Material title : Vinylester – Carbon VI

- Fiber type : AMT DEVOLD L(X) 440-C10 [0]₂ carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional	208 (each)

- Matrix type : REICHHOLD DION 9500-M800
- Manufacturing method : Vacuum Infusion with imposed pressure of 0.7 bar during infusion and 0.3 bar during the curing
- Curing status : Cured in room temperature and post-cured at 50°C for 24 hours
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	60 %	-
t _{ply}	-	-	-
E ₁	ASTM D 3039	102600 MPa	8.5
σ _{u1}	ASTM D 3039	1691.6 MPa	8.1
E ₂	ASTM D 3039	7600 MPa	9.9
σ _{u2}	ASTM D 3039	15.0 MPa	2.0
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	ASTM D 3518	4500 MPa	2.1
τ _{u12}	ASTM D 3518	51.0 MPa	1.5
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	ASTM D 3039	0.488	-
ν ₂₁	ASTM D 3039	0.037	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=83200 MPa (CV=9.1%), σ_{1Cmax}=557.6 MPa (CV=11.6%)

E_{2C}=6300 MPa (CV=4.6%), σ_{2Cmax}=107.0 MPa (CV=7.6%)

Source: Karatzas V. ‘Composite Materials Characterization Tests’, Co-Patch, NTUA, February 2011.

Material title : Pre-Preg

- Fiber type : GRAFIL HS 40 ultra high modulus carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon fiber	Unidirectional	300

- Matrix type : SP GURIT SE84LV low temperature cure epoxy resin
- Manufacturing method : Pre-preg method with imposed pressure of 0.95 bar, constant till temperature reaches 30 °C of the cooling stage after curing
- Curing status : From room temperature heating with 0.3-2 °C/min to 85 °C, where cured for ten hours. After that cooled with 1 °C/min to 25 °C
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	72.6 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ASTM D 3039	228400 MPa	2.8
σ_{u1}	ASTM D 3039	2254.1 MPa	4.6
E_2	ASTM D 3039	6500 MPa	6.0
σ_{u2}	ASTM D 3039	20.7 MPa	5.1
ϵ_{u1}	-	-	-
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	ASTM D 3518	4500 MPa	2.1
τ_{u12}	ASTM D 3518	63.4 MPa	1.2
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
ν_{12}	ASTM D 3039	0.249	-
ν_{21}	ASTM D 3039	0.016	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

$E_{1C}=196900$ MPa (CV=6.3%), $\sigma_{1Cmax}=882.3$ MPa (CV=3.2%)

$E_{2C}=6800$ MPa (CV=0.8%), $\sigma_{2Cmax}=133.2$ MPa (CV=3.9%)

Source: Karatzas V. 'Composite Materials Characterization Tests', Co-Patch, NTUA, February 2011.

Material title : Epoxy Carbon HLU

- Fiber type : R&G Faserverbundwerkstoffe No. 43244 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Plain weave	240

- Matrix type : Dow D.E.R. 331 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PC 13
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	56 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	46300 MPa	1.8
σ_{u1}	ISO 527	658.9 MPa	10.6
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	1.36 %	9.1
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΪΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy Carbon VI

- Fiber type : R&G Faserverbundwerkstoffe No. 43244 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Plain weave	240

- Matrix type : Dow D.E.R. 358 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PA 43
- Manufacturing method : Vacuum Infusion
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	62.6 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	58000 MPa	3.0
σ_{u1}	ISO 527	759.6 MPa	5.0
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	1.35 %	8.2
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΪΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy Carbon HLU

- Fiber type : Twill 2x2 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Plain weave	160

- Matrix type : Dow D.E.R. 331 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PC 13
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	47.4 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	41500 MPa	5.0
σ_{u1}	ISO 527	478.1 MPa	22.8
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	1.12 %	22.1
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΨΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy Carbon VI

- Fiber type : Twill 2x2 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Plain weave	160

- Matrix type : Dow D.E.R. 358 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PA 43
- Manufacturing method : Vacuum Infusion
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	63.4 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	59300 MPa	1.6
σ_{u1}	ISO 527	866.3 MPa	8.4
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	1.41 %	10.3
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΨΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy Carbon HLU

- Fiber type : Hexcel No. G1059 carbon fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Unidirectional	205

- Matrix type : Dow D.E.R. 331 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PC 13
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	55.1 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	78900 MPa	4.6
σ_{u1}	ISO 527	744.3 MPa	17.0
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	0.90 %	15.2
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΨΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy Carbon VI

- Fiber type : Hexcel No. G1059 carbon fiber

• Fiber material	• Weaving style	• Fabric weight (g/m ²)
• Carbon	• Unidirectional	• 205

- Matrix type : Dow D.E.R. 358 epoxy resin + PO.INT.ER. Epamine PA 43
- Manufacturing method : Vacuum Infusion
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	64.5 %	-
t _{ply}	-	-	-
E ₁	ISO 527	114200 MPa	5.0
σ _{u1}	ISO 527	796.5 MPa	7.3
E ₂	-	-	-
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	ISO 527	0.91 %	10.3
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
v ₁₂	-	-	-
v ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. 'ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΨΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ', ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy – Carbon HLU

- Fiber type : Sika SikaWrap – 300C HiMod NW

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Unidirectional	300

- Matrix type : Sika Sikadur 300
- Manufacturing method : Hand lay-up
- Curing status : Cured in room temperature
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W_f	ASTM D 3171	23.8 %	-
t_{ply}	-	-	-
E_1	ISO 527	93000MPa	4.4
σ_{u1}	ISO 527	321.2 MPa	18.8
E_2	-	-	-
σ_{u2}	-	-	-
ϵ_{u1}	ISO 527	0.33 %	19.1
ϵ_{u2}	-	-	-
G_{12}	-	-	-
τ_{u12}	-	-	-
σ_f	-	-	-
E_f	-	-	-
V_{12}	-	-	-
V_{21}	-	-	-

- Additional information:

Source: Mirisiotis L. ‘ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΘΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΪΦΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ’, ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ 2, NTUA, November 2006.

Material title : Epoxy - Glass Filament winding

- Fiber type : Owens Corning single end, direct roving ADVANTEX R25H TYPE 30

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	-	-

- Matrix type : HEXION EPIKOTE Epoxy Resin 828LVEL, bisphenol A + Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917 CH Hardener + HUNTSMAN DY 070 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding
- Curing status :
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	67.2 %	-
t _{ply}	-	-	-
E ₁	-	-	-
σ _{u1}	ISO 527	618.1 MPa	0.1
E ₂	ISO 527	38140 MPa	0.03
σ _{u2}	-	-	-
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	-	-	-
τ _{u12}	-	-	-
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=3160 MPa (CV=24.0 %), σ_{1Cmax}=121.7 MPa (CV=16.0 %)

Also density tests conducted with measured properties as below (ASTM D 1577)

d= 1.664 gr/cm³

Also Brinnel Hardness was measured with a value of 28.8

Source : Volonakis S. ‘Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού από εποξειδική ρητίνη και ανθρακονήματα ή υαλονήματα – Συγκριτικά αποτελέσματα’, ‘Κουπόνια καινοτομίας για μικρομεσαίες επιχειρήσεις’, NTUA, November 2011.

Material title : Epoxy – Carbon Filament winding

- Fiber type : TORAYCA T700SC -1200-50C Carbon Fiber

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
Carbon	Unidirectional	-

- Matrix type : Araldite LY556 Epoxy resin + Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917 CH + HUNTSMAN DY 070 Catalyst
- Manufacturing method : Filament winding
- Curing status :
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ASTM D 3171	79.6 %	-
t _{ply}	-	-	-
E ₁	ISO 527	121230 MPa	7.0
σ _{u1}	ISO 527	901.3 MPa	10.0
E ₂	ISO 527	8120 MPa	3.0
σ _{u2}	ISO 527	21.1 MPa	20.0
ε _{u1}	-	-	-
ε _{u2}	-	-	-
G ₁₂	ASTM D 3518	7120 MPa	9.9
τ _{u12}	ASTM D 3518	77.4 MPa	12.6
σ _f	-	-	-
E _f	-	-	-
ν ₁₂	-	-	-
ν ₂₁	-	-	-

- Additional information:

Also compression tests conducted with measured properties as below (ISO 14126)

E_{1C}=111450 MPa (CV=8.5 %), σ_{1Cmax}=321.0 MPa (CV=13.4%), ν₁₂= 0.39 (CV=50.8 %)

E_{2C}=7730 MPa (CV=25.9 %), σ_{2Cmax}=70.8 MPa (CV=23.1%), ν₂₁= 0.02 (CV=31.6 %)

Also density tests conducted with measured properties as below (ASTM D 1577)

d= 1.492 gr/cm³

Also Brinnel Hardness was measured with a value of 63.96

Source : Volonakis S. ‘Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού από εποξειδική ρητίνη και ανθρακονήματα ή υαλονήματα – Συγκριτικά αποτελέσματα’, ‘Κουπόνια καινοτομίας για μικρομεσαίες επιχειρήσεις’, NTUA, November 2011.

Material title : Polyester - Glass

- Fiber type : Agimat 300/600 (3 layers) + MAT 450 [(300/600)₃/450] (1 layer)

Fiber material	Weaving style	Fabric weight (g/m ²)
E-Glass	Unidirectional	-

- Matrix type : Norsodyne G 703 Unsaturated polyester resin
- Manufacturing method : Vacuum infusion with imposed pressure of 0.96 atm
- Curing status :
- Measured properties

Property	Test Method	Value	CV %
W _f	ISO 1172	64.8 %	-
t _{ply}			
E ₁			
σ _{u1}		332.8 MPa	4.8
E ₂		17210 MPa	7.1
σ _{u2}			
ε _{u1}			
ε _{u2}			
G ₁₂			
τ _{u12}			
σ _f		280 MPa	13.7
E _f		14694 MPa	9.9
V ₁₂			
V ₂₁			

- Additional information:

Source: Kollarini M. 'ΜΕΛΕΤΗ ΤΑΣΕΩΝ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΘΕΜΑΤΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ SANDWICH', Diploma thesis, NTUA, March 2006