

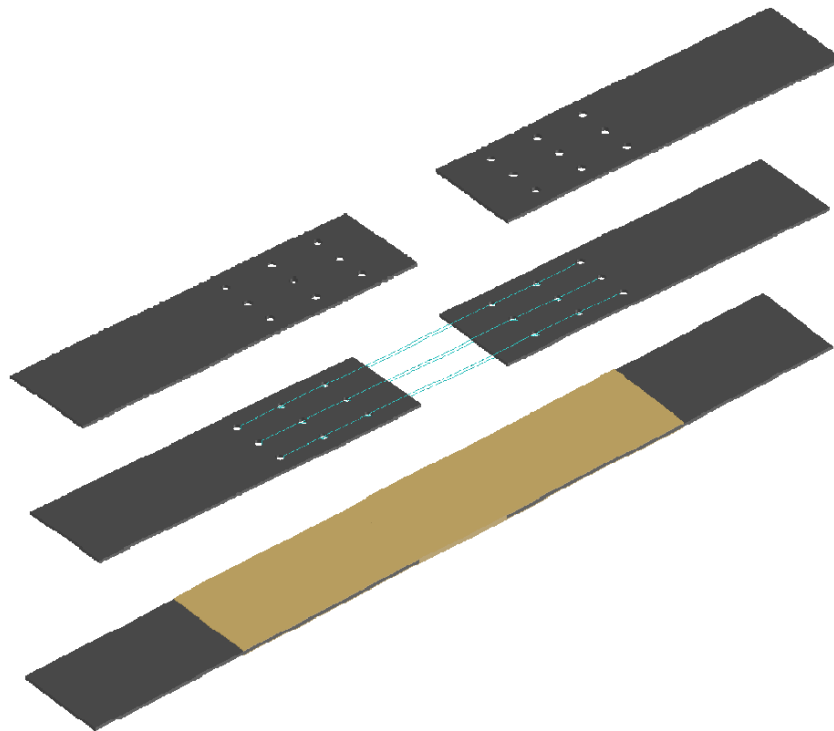


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική διερεύνηση συνδέσεων χαλύβδινων ελασμάτων με FRP υπό εφελκυστικά φορτία



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Δ. Δεσπότης

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2015

EMK ΔΕ 2015/22

Δεσπότης Δ. Θ. (2015).
Πειραματική διερεύνηση συνδέσεων χαλύβδινων ελασμάτων με FRP υπό
εφελκυστικά φορτία
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/22
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Despotis D. T. (2015).
Experimental investigation of steel plate connections using FRP subjected to tensile
loads
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015/22
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
1 Εισαγωγή.....	7
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Υπολογισμός αντοχής ενδεικτικής υπάρχουσας σύνδεσης.....	7
1.3 Σκοπός της εργασίας	9
1.4 Δομή της εργασίας	10
2 Θεωρητικό μέρος	11
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά	11
2.1.1 Εισαγωγή.....	11
2.1.2 Επιμέρους υλικά.....	11
2.2 Διαδικασία σχεδιασμού σύνθετων υλικών.....	13
2.3 Διαδικασίες παραγωγής	13
2.3.1 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης.....	14
2.3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις	14
2.3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος	15
2.3.4 Εκμαγείο συμπίεσης.....	16
2.3.5 Καλούπι ρητινένεσως	16
2.3.6 Διαδικασία παραγωγής με έλξη	17
2.3.7 Διαδικασία περιέλιξης.....	18
2.4 Ελαστικότητα σύνθετων υλικών	18
2.4.1 Γενικά.....	18
2.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις.....	20
2.4.3 Γενικευμένος νόμος του Hooke	20
2.4.4 Μηχανικές σταθερές	22
2.5 Επίπεδη εντατική κατάσταση.....	23
2.6 Νόμος σύνθεσης.....	26
2.7 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων.....	26
2.8 Μετασχηματισμοί.....	29
2.8.1 Γενικά.....	29
2.8.2 Μετασχηματισμός τάσεων	30
2.8.3 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων.....	32
2.8.4 Μετασχηματισμός των όρων ακαμψίας Q_{ij}	33
2.8.5 Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας S_{ij}	35
2.9 Μηχανικές σταθερές υλικού	37
2.10 Κριτήρια αστοχίας.....	38
2.10.1 Γενικά.....	38
2.10.2 Κριτήριο μέγιστης τάσης	38
2.10.3 Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης.....	39
2.10.4 Κριτήριο Tsai-Hill.....	40
2.10.5 Κριτήριο Tsai-Wu	41

2.11 Μεμβρανική ακαμψία	44
3 Πειραματική διερεύνηση.....	47
3.1 Γενικά.....	47
3.2 Υλικά, εξοπλισμός και μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν	47
3.3 Διαδικασίες παραγωγής δοκιμίων	53
3.3.1 Δοκίμια S3 - S10	53
3.3.2 Δοκίμια TT1 – TT5	61
3.4 Εκτέλεση πειραματικών ελέγχων.....	63
3.4.1 Κατηγοριοποίηση δοκιμίων S3 - S10	63
3.4.2 Χαρακτηριστικά Δοκιμίων.....	64
3.4.3 Πειραματικές δοκιμές.....	66
3.5 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	88
3.5.1 Γενικά.....	88
3.5.2 Χαρακτηριστικές τιμές.....	90
4 Συμπεράσματα	92
4.1 Σύγκριση δοκιμίων μεταξύ τους	92
4.2 Σύγκριση με την ενδεικτική υπάρχουσα σύνδεση	94
5 Βιβλιογραφία.....	96

Πειραματική διερεύνηση εφελκυστικής σύνδεσης χαλύβδινων ελασμάτων με χρήση FRP

Δεσπότης Δ. Θ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Στις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού και συγκεκριμένα στις Μεταλλικές Κατασκευές, είναι πολύ συνηθισμένο να προκύπτει ανάγκη για αποκατάσταση συνέχειας μελών μιας κατασκευής τα οποία υποβάλλονται σε εφελκυσμό. Για την ανάγκη αυτή έχουν επινοηθεί πολλές μορφές εφελκυστικών συνδέσεων. Τέτοιες συνδέσεις είναι οι κοχλιωτές, οι συγκολλητές, καθώς και οι συνδέσεις χαλύβδινων ελασμάτων με χρήση διαφόρων ειδών ρητίνης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια πειραματικής διερεύνησης των ιδιοτήτων και ιδιαίτερα της αντοχής ενός νέου τύπου σύνδεσης εφελκυσμού, στην οποία δύο χαλύβδινα ελάσματα συνδέονται με χρήση ινοπλισμένου πολυμερούς υλικού (Fiber Reinforced Plastic). Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζονται και δοκιμάζονται στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ, διάφορες παραλλαγές αυτού του τύπου σύνδεσης, που περιλαμβάνουν ενίσχυση αυτής με πλέξη από δέσμες ινών υάλου.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής αυτής διερεύνησης παρουσιάζονται, και στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων, συγκρίνοντας τις διάφορες παραλλαγές της νέας σύνδεσης μεταξύ τους, αλλά και ενδεικτικά με μία ήδη υπάρχουσα σύνδεση εφελκυσμού.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2015/22

Design of a multi-span cable-stayed bridge with composite deck

Despotis D. T. (supervised by Raftoyiannis I.)

Abstract

In Civil Engineering applications and specifically in Steel Structures, it is very common to encounter the need to restore the continuity of certain elements of the structure, particularly of those subjected to tensile stress. This need led to the invention of many types of tensile connections, such as bolted, welded, or connections using various types of resin.

In this thesis, there is an attempt to experimentally investigate the properties and particularly the strength of a new type of tensile connection, in which two steel plates are connected using Fiber Reinforced Plastic (FRP). Therefore, some variations of this connection are being produced and tested in the Institute of Steel Structures of the National Technical University of Athens. Those variations include the reinforcement of this connection with glass fiber bundles.

The results of this experimental investigation are presented, and are thus used in an effort to reach some conclusions, by comparing this new connection's variations to one another, but also to an existing tensile connection.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και το προσωπικό και ακαδημαϊκό ήθος που τον διέπει, ήταν καθοριστικά σε όλες τις φάσεις της εκπόνησης της εργασίας μου.

Ευχαριστώ επίσης όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών για το ενδιαφέρον και για την αμέριστη υλική και ψυχική συμπαράσταση που μου παρείχαν. Από την έναρξη αυτής της εργασίας ο υπεύθυνος του εργαστηρίου κ. Ξενοφώντας Λιγνός σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή, παρείχε εξαιρετικά χρήσιμες ιδέες και τεχνικές γνώσεις. Η παραγωγή των δοκιμίων και ο πειραματικός τους έλεγχος δεν θα ήταν δυνατός χωρίς τη βοήθεια και τις τεχνικές γνώσεις του κ. Στέλιου Κατσατζίδη, ο οποίος χωρίς την οποιαδήποτε ευθύνη και υποχρέωση, με καθοδηγούσε στη χρήση μηχανημάτων του Εργαστηρίου και προγραμματίζει πειράματα ακόμα και τις ημέρες υψηλού εργασιακού φόρτου.

Τέλος, ευχαριστώ όλους όσους, σε προσωπικό επίπεδο, μου συμπαράσθηκαν στην πορεία των σπουδών μου. Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου, και πάνω απ' όλα τους γονείς μου για την απεριόριστη αγάπη και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

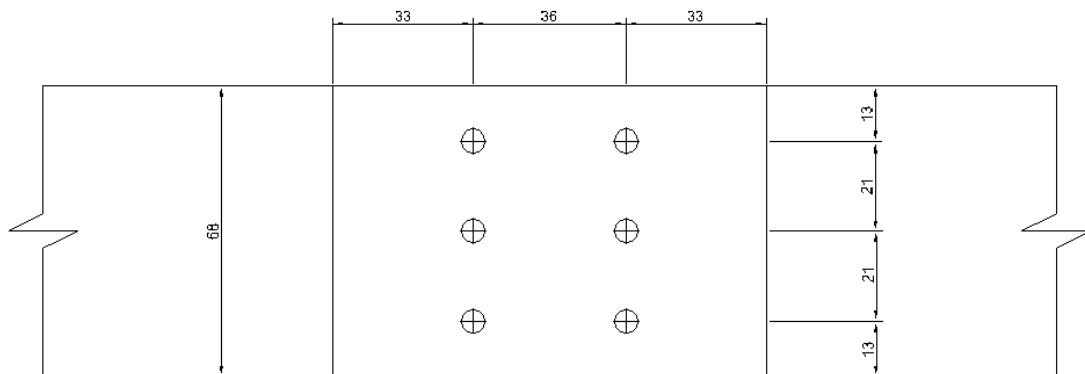
Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι υλικά που παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όταν χρησιμοποιούνται τόσο στις εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού, όσο και σε καθημερινές εφαρμογές, και γι' αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναδειχθεί πολύ. Έχουν μεγάλη αντοχή, μικρό βάρος, και σχετικά μικρό κόστος. Έτσι, προέκυψε η ιδέα για μία σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας δύο χαλύβδινων ελασμάτων, στην οποία χρησιμοποιείται ινοπλισμένο πολυμερές υλικό, με ίνες προσανατολισμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται μέγιστη αξιοποίηση της μεγάλης εφελκυστικής τους αντοχής.

Η σύνδεση αυτή σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, ελέγχθηκε πειραματικά, και τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα μέσα από συγκρίσεις, μεταξύ άλλων και με μία ήδη υπάρχουσα εφελκυστική σύνδεση. Στην επόμενη ενότητα γίνεται θεωρητικός υπολογισμός ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου τύπου σύνδεσης για μέλη που υποβάλλονται σε εφελκυσμό, της κοχλιωτής, ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση.

1.2 Υπολογισμός αντοχής ενδεικτικής υπάρχουσας σύνδεσης

Σύνδεση με διατεμνόμενους κοχλίες

Ακολουθεί υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής της σύνδεσης χαλύβδινων ελασμάτων με χρήση διατεμνόμενων κοχλιών. Η μορφή της σύνδεσης, καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των άκρων των ελασμάτων και των κέντρων των οπών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.1: Μορφή κοχλιωτής σύνδεσης

Οι διαστάσεις των χαλύβδινων ελασμάτων είναι ίδιες με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην υπό πειραματική διερεύνηση σύνδεση της παρούσας εργασίας (Μήκος $L=263\text{mm}$, Πλάτος $b=68\text{mm}$, Πάχος $t=2\text{mm}$), είναι ποιότητας S235 ($f_y = 235\text{MPa}$ και $f_u = 360\text{MPa}$), και έχει 6 οπές διαμέτρου $d_0=6\text{mm}$ (στα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα διανοίχθηκαν 9 οπές αλλά η επιπλέον σειρά έγινε για την καλύτερη αγκύρωση της πλέξης από τις δέσμες ινών. Οι κοχλίες που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν είναι M6 και ποιότητας 8.8 (ενδείκνυται για κατασκευές ψυχρής έλασης και για διαμέτρους κοχλιών M5 έως M16), με μέγιστη τάση διαρροής $f_{yb} = 640\text{MPa}$ και τάση αστοχίας $f_{ub} = 800\text{MPa}$. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας $\gamma_{M2}=1,25$ που λαμβάνεται στους τύπους υπολογισμού για το σχεδιασμό, εδώ θα ληφθεί ίσος με τη μονάδα ($\gamma_{M0}=1,00$), καθώς τα αποτελέσματα του υπολογισμού θα συγκριθούν με πειραματικά αποτελέσματα, στα οποία δεν έχουν προσδιοριστεί συντελεστές ασφαλείας. Ακολουθεί η μεθοδολογία υπολογισμού της αντοχής της σύνδεσης, προσδιορίζοντας την καθοριστική μορφή αστοχίας:

Έλεγχος αποστάσεων

$$e_1 > 1,2d_0 \rightarrow 33\text{mm} > 7,2\text{mm}$$

$$e_2 > 1,2d_0 \rightarrow 13\text{mm} > 7,2\text{mm}$$

$$p_1 > 2,2d_0 \rightarrow 36\text{mm} > 13,2\text{mm}$$

$$p_2 > 2,4d_0 \rightarrow 21\text{mm} > 14,4\text{mm}$$

Αντοχή πλήρους διατομής

$$N_{t,Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M_0}} = \frac{23,5\text{kN/cm}^2 \cdot 0,2\text{cm} \cdot 6,8\text{cm}}{1,00} = 31,96\text{kN}$$

Αντοχή καθαρής διατομής

$$F_n = \frac{\left[1 + 3r \left(\frac{d_0}{u} - 0,3 \right) \right] A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M_0}} = \frac{35,32\text{kN}}{1,00} = 35,32\text{kN}$$

όπου:

- $r = (\text{Αριθμός κοχλιών μίας διατομής} / \text{Συνολικός αριθμός κοχλιών σύνδεσης})$, $r=0,5$
- $u=2e_2$ αλλά $u \leq p_2$, $u=21\text{mm}$
- A_{net} το εμβαδόν της καθαρής διατομής, $A_{net}=1\text{cm}^2$

αλλά πρέπει

$$F_n \leq \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M_0}} = \frac{36\text{kN}}{1,00} = 36\text{kN}, \text{ που ισχύει.}$$

Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας (ανά κοχλία)

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M_0}} = \frac{10,8 kN}{1,00} = 10,8 kN$$

Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας της σύνδεσης = 6 κοχλίες x 10,8kN/κοχλία
= 64,8kN

Αντοχή διάτμησης άκρου

$$F_b = \frac{f_u \cdot e_1 \cdot t / 1,2}{\gamma_{M_0}} = \frac{19,8 kN}{1,00} = 19,8 kN$$

Συνολική αντοχή διάτμησης άκρου = 6 κοχλίες x 19,8kN/κοχλία
= 118,8kN > 64,8kN

Καθοριστική είναι η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας

Αντοχή κοχλία σε διάτμηση

$$F_v = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M_0}} = \frac{9,65 kN}{1,00} = 9,65 kN \quad , \text{όπου } A_s = 0,201 \text{ cm}^2$$

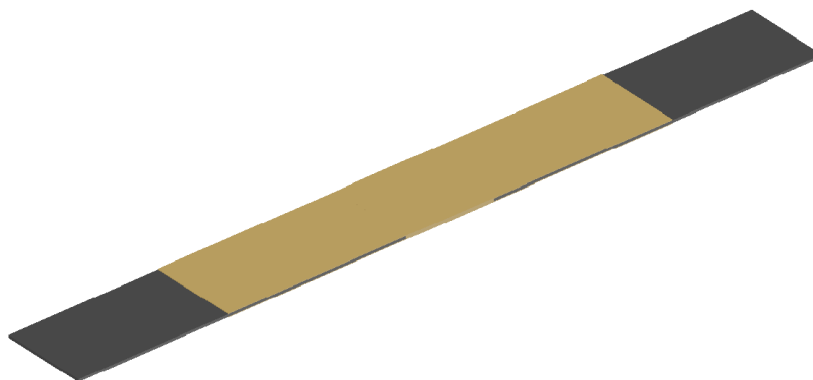
Συνολική αντοχή κοχλιών διατομής = 6 κοχλίες x 9,65kN/κοχλία
= 57,9kN

Καθοριστική είναι η εφελκυστική αντοχή των ελασμάτων στην καθαρή διατομή, και είναι ίση με:

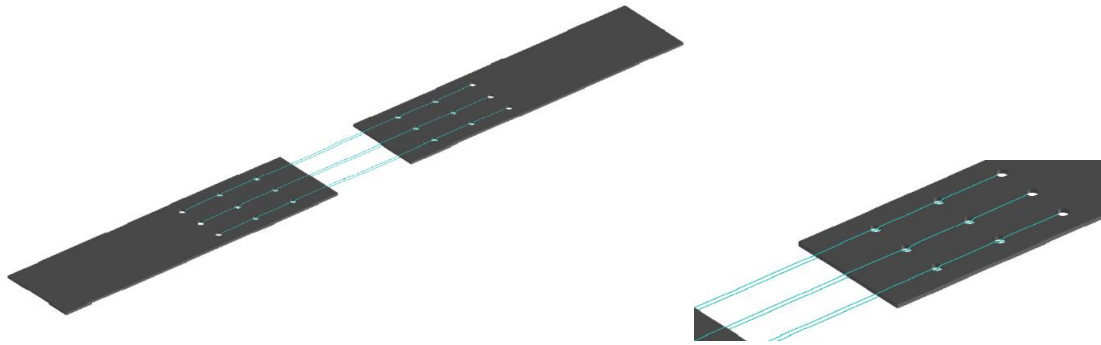
$$F_n = 35,32 kN$$

1.3 Σκοπός της εργασίας

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση του κατά πόσο η πλέξη ινών υάλου μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά και την αντοχή της εφελκυστικής σύνδεσης δύο χαλύβδινων ελασμάτων μέσω ινοπλισμένου πολυμερούς (Fiber Reinforced Plastic – FRP), η οποία στηρίζεται στο μηχανισμό της πρόσφυσης (χωρίς πλέξη – το εφελκυστικό φορτίο μεταβιβάζεται από το κάθε έλασμα στο FRP μέσω διατμητικών τάσεων).



Σχήμα 1.2: Μορφή Σύνδεσης υπό πειραματική διερεύνηση



Σχήμα 1.3: Η ενίσχυση της σύνδεσης με πλέξη από δέσμες ινών

Γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί αυτό συγκρίνοντας τους δύο παραπάνω τύπους συνδέσεων πειραματικά, καθώς και αντιπαραβάλλοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με την αντοχή της κοχλιωτής σύνδεσης που υπολογίστηκε. Για το σκοπό αυτό λοιπόν, κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ μια σειρά από δοκίμια των εφελκυστικών συνδέσεων αυτών και δοκιμάστηκαν.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που έγιναν, οι συγκρίσεις, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία αναπτύσσεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο παρόν (1^ο) κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στο σκοπό της εργασίας και στη μορφή της σύνδεσης. Επίσης γίνεται θεωρητικός υπολογισμός μίας υπάρχουσας και ευρέως χρησιμοποιούμενης σύνδεσης εφελκυσμού. Στο 2^ο κεφάλαιο (Θεωρητικό Μέρος) αναπτύσσονται πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά και το θεωρητικό υπόβαθρο που τα αφορά. Στο 3^ο κεφάλαιο (Πειραματική Διερεύνηση) παρουσιάζεται η μορφή της υπό πειραματική διερεύνηση σύνδεσης με τις επιμέρους διαφοροποιήσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο, περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής τόσο των βασικών δοκιμών της εργασίας όσο και της δοκιμής υλικού, και αναφέρονται τα υλικά και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπλέον, αναπτύσσονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν. Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο (Συμπεράσματα) γίνεται μία προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα, συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα των διαφόρων παραλλαγών της σύνδεσης μεταξύ τους, αλλά και με τις τιμές που έδωσε ο υπολογισμός της αντίστοιχης ήδη υπάρχουσας σύνδεσης.

2 Θεωρητικό μέρος

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία για τα σύνθετα υλικά

2.1.1 Εισαγωγή

Ο όρος σύνθετα υλικά σημαίνει συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών από διακριτή μορφή τα οποία συνεργάζονται και δημιουργούν ένα νέο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες. Παράδειγμα σύνθετου υλικού είναι η συνένωση των σκύρων με το τσιμέντο, με αποτέλεσμα να προκύψει το σκυρόδεμα, που έχει μεγάλη αντοχή. Τα πλέον συνήθη σύνθετα υλικά είναι αυτά που γίνονται με ισχυρές ίνες που συγκρατούνται από ένα συνδετικό υλικό. Για παράδειγμα τα σκάφη από fiberglass κατασκευάζονται από πολυεστερική ρητίνη οπλισμένη με ίνες γυαλιού. Το fiberglass είναι και το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου στην παρούσα πειραματική εργασία. Τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους, έχοντας ως κύριες παραμέτρους τις εξής:

1. Ενισχύσεις

- Συνεχείς επιμήκεις ίνες
 - Ίνες ενιαίου προσανατολισμού
 - Ίνες διπλού προσανατολισμού (woven, stitched mat)
 - Τυχαίου προσανατολισμού (continuous strand mat-CSM)
- Ασυνεχείς ίνες
 - Τυχαίου προσανατολισμού (κοντές δέσμες ινών)
 - Συγκεκριμένου προσανατολισμού (oriented strand mat)
- Κοντές ίνες και σωματίδια
 - Τυχαίου προσανατολισμού
 - Συγκεκριμένου προσανατολισμού

2. Διαμόρφωση διαστρωμάτωσης

- Ενιαίου προσανατολισμού με πολλές στρώσεις, με το ίδιο υλικό και προσανατολισμό σε όλες τις στρώσεις.
- Συνήθης διαστρωμάτωση, όπου κάποιες στρώσεις έχουν διαφορετικό προσανατολισμό ή υλικό.

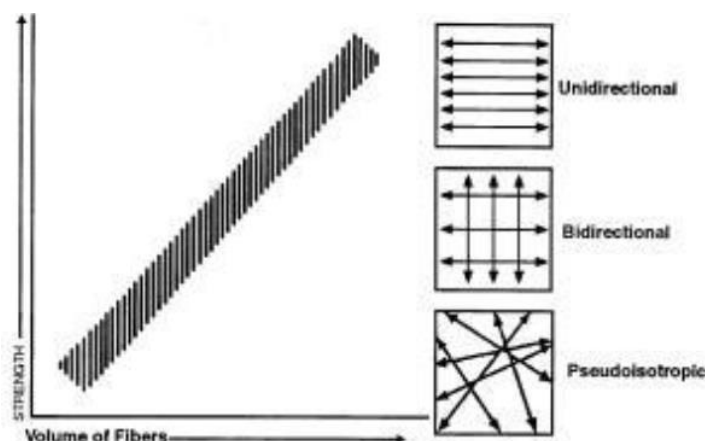
2.1.2 Επιμέρους υλικά

Ίνες

Οι ίνες χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά γιατί έχουν μικρό βάρος, είναι πιο δύσκαμπτες και έχουν μεγάλη αντοχή. Οι ίνες είναι πιο ισχυρές από το συμπαγές υλικό από το οποίο αποτελούνται. Αυτό οφείλεται στην προνομιακή κατεύθυνση των μορίων κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών και λόγω του σχετικά μειωμένου πλήθους ατελειών σε σχέση με το συμπαγές ακατέργαστο υλικό.

Οι ίνες χρησιμοποιούνται ως οπλισμός στα σύνθετα υλικά με ενιαίο προσανατολισμό, όπου ένας μεγάλος αριθμός ινών ευθυγραμμίζονται μέσα στο μικρό

πάχος ενός κελύφους ή πλάκας που ονομάζεται στρώση ή φύλο. Μία στρώση με ίνες ενιαίου προσανατολισμού έχει τη μέγιστη αντοχή και δυσκαμψία κατά τη διεύθυνση των ινών και την ελάχιστη για διεύθυνση κάθετη στις ίνες. Όταν είναι επιθυμητές οι ίδιες ιδιότητες σε κάθε διεύθυνση του επιπέδου της στρώσης επιλέγονται ίνες με τυχαίο προσανατολισμό.



Σχήμα 2.1: Σχέση αντοχής και προσανατολισμού των ινών

Συνήθεις τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι από γυαλί (glass), άνθρακα (carbon), οργανικές (Kevlar), βόριο, Silicon Carbide (SiC), αλουμίνιο και άλλα υλικά σε πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές. Η επιλογή του τύπου της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί γίνεται με βάση τις μηχανικές και περιβαλλοντικές της ιδιότητες, καθώς και το κόστος.

Συγκεκριμένα οι ίνες γυαλιού (οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία) είναι εύκαμπτες, ελαφρές και σχετικά φθηνές, και είναι ο πλέον συνήθης τύπος ινών που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρού κόστους. Όλες οι ίνες γυαλιού έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής και διαφορετική αντοχή σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1. E-glass (Electrical): Συνδυάζουν μηχανική απόδοση, αντοχή στη διάβρωση και μικρό κόστος
2. S-glass (Strength): Έχουν υψηλή αντοχή, αλλά είναι περιορισμένης εφαρμογής λόγω του υψηλού τους κόστους (3 έως 4 φορές ακριβότερες από τις E-glass)
3. C-glass (Corrosion): Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις για αντοχή σε διάβρωση.

Συνδετικά υλικά

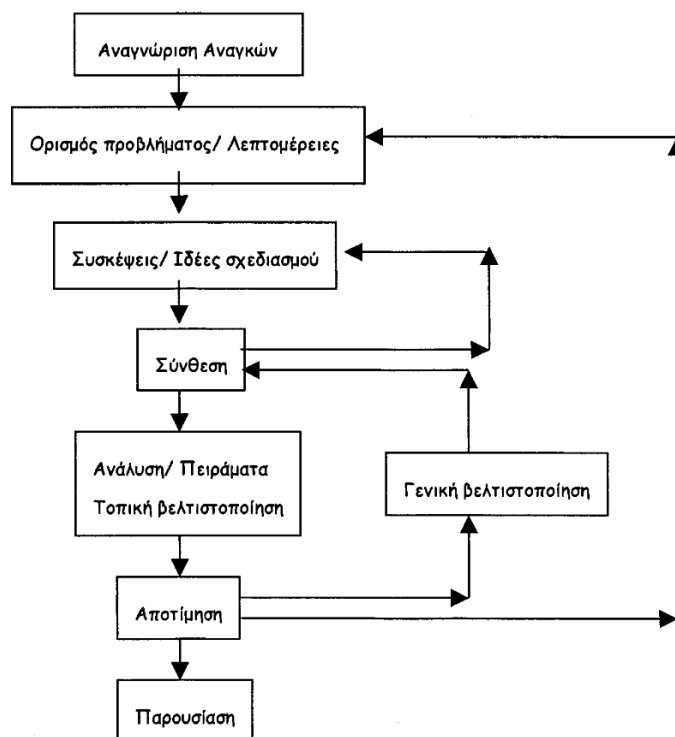
Το συνδετικό υλικό συγκρατεί τις ίνες μαζί, μεταφέρει το φορτίο μεταξύ των ινών, τις προστατεύει από το περιβάλλον και τις μηχανικές τριβές και παραλαμβάνει μέρος του φορτίου, κυρίως τις εγκάρσιες τάσεις και την εντός επιπέδου διάτμηση. Τα συνδετικά υλικά μπορεί να είναι πολυμερή, μεταλλικά ή κεραμικά.

Ο τύπος συνδετικού υλικού που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (thermosetting resins) που σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού και σκλήρυνσης τους (curing), και έχουν χαμηλό ιξώδες, που επιτρέπει τον γρήγορο εμποτισμό των ινών κατά τη διαδικασία. Οι πιο συνήθεις από τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι: πολυεστερικές (polyester), εποξικές

(epoxy), βινυλεστερικές (vinylester) και φαινολικές (phenolic). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε πολυεστερική ρητίνη.

2.2 Διαδικασία σχεδιασμού σύνθετων υλικών

Ο σχεδιασμός είναι μία διαδικασία που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες αποφάσεις για την κατασκευή, τον χειρισμό, τη συντήρηση και τη διάθεση ενός προϊόντος. Ο σχεδιασμός ξεκινάει με την αναγνώριση των αναγκών. Ορίζονται επίσης κριτήρια απόδοσης υπό την έννοια ότι κάθε λύση που θα προταθεί αργότερα θα πρέπει να ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια για να θεωρείται αποδεκτή. Ο σχεδιασμός στηρίζεται στην ανάλυση της πιθανής συμπεριφοράς του τελικού προϊόντος. Η βέλτιστη λύση στη συνέχεια αποτιμάται σε σχέση με τα κριτήρια απόδοσης που διατυπώθηκαν στον ορισμό του προβλήματος. Τα κριτήρια απόδοσης γίνονται με το μέτρο βαθμονόμησης, με το οποίο η απόδοση ή η επιλογή υπέρ οποιασδήποτε προτεινόμενης λύσης μετρώνται. Η διαδικασία φαίνεται σε μορφή διαγράμματος στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα της διαδικασίας σχεδιασμού

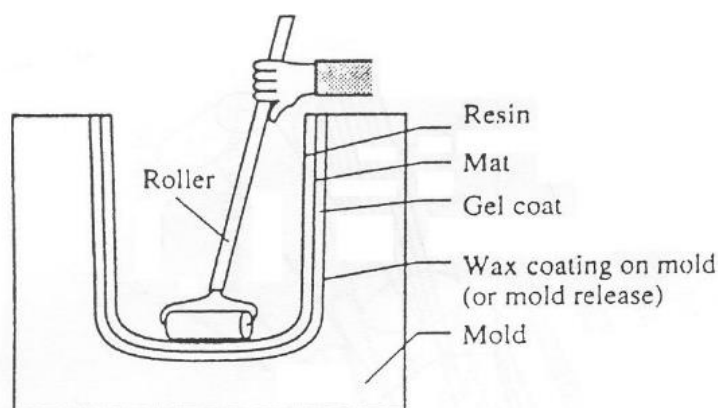
2.3 Διαδικασίες παραγωγής

Η επιλογή της διαδικασίας παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο των ινών και του συνδετικού υλικού, τη θερμοκρασία που απαιτείται για το σχηματισμό του τμήματος και την στερεοποίηση του συνδετικού υλικού, καθώς επίσης και από την επίδραση του κόστους. Η κάθε μέθοδος επεξεργασίας έχει εγγενή πλεονεκτήματα και περιορισμούς που επηρεάζουν την κατασκευή και το σχεδιασμό του τελικού προϊόντος.

2.3.1 Χειρωνακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης (Hand lay-up)

Η τεχνική της χειρωνακτικής διαδικασίας μόρφωσης μιας διαστρωμάτωσης (hand lay-up), ονομάζεται και wet hand lay-up, είναι η πιο απλή και διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής. Περιλαμβάνει την χειρωνακτική τοποθέτηση των ξηρών ενισχύσεων στο εκμαγείο και την ταυτόχρονη εφαρμογή – εμποτισμό της ρητίνης. Στη συνέχεια, το υπό υγρή μορφή σύνθετο υλικό διαμορφώνεται χειροκίνητα με τη βοήθεια ρολών ώστε να διευκολυνθεί η ομοιόμορφη διάστρωση και η απομάκρυνση των θυλάκων αέρα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσες στρώσεις χρειάζεται μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Έτσι προκύπτει μία κατασκευή με διαδοχικές στρώσεις. Η έκλυση πτητικών ουσιών, όπως το στυρένιο (styrene), είναι υψηλή όπως και σε κάθε άλλη ανοικτή μέθοδο με καλούπια. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε κατά την παραγωγή των δοκιμίων στην παρούσα εργασία. Τα 4 βασικά βήματα εφαρμογής της μεθόδου είναι:

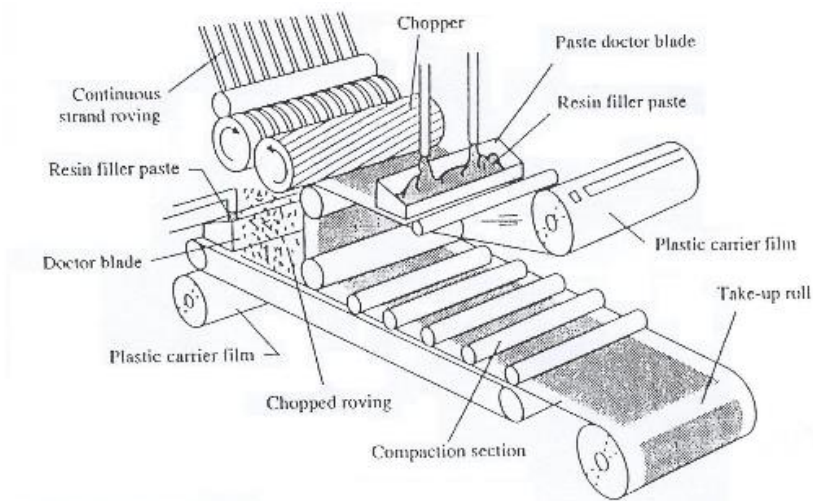
- α) προετοιμασία εκμαγείου
- β) επικάλυψη με ζελατίνη (gel coating)
- γ) διάστρωση (lay-up)
- δ) στερεοποίηση (curing)



Σχήμα 2.3: Χειρωνακτική διαδικασία διαστρωμάτωσης

2.3.2 Διαστρωμάτωση με προκατασκευασμένες στρώσεις (Prepreg lay-up).

Η προκατασκευασμένη στρώση (prepreg) είναι προ-εμποτισμένο υλικό ενισχυμένο με ίνες (pre-impregnated fiber reinforced material) όπου η ρητίνη έχει μερικώς στερεοποιηθεί ή είναι πιά παχύρρευστη. Οι ίνες είναι τακτοποιημένες σε μία ταινία μονού προσανατολισμού (unidirectional tape), ένα πλεκτό ύφασμα (woven fabric) ή σε φύλλα με κοντές ίνες τυχαίου προσανατολισμού (random chopped fiber sheets). Η βασική διαφορά μεταξύ της μεθόδου διαστρωμάτωσης με προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg lay-up) και της συμβατικής μεθόδου χειρωνακτικής μόρφωσης διαστρωμάτωσης (hand lay-up) είναι ότι χρησιμοποιώντας προκατασκευασμένες στρώσεις (prepreg) ο εμποτισμός (impregnation) των ινών γίνεται πριν το καλούπωμα. Τα prepregs χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή υψηλών απαιτήσεων τμημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία στην αεροναυπηγική.

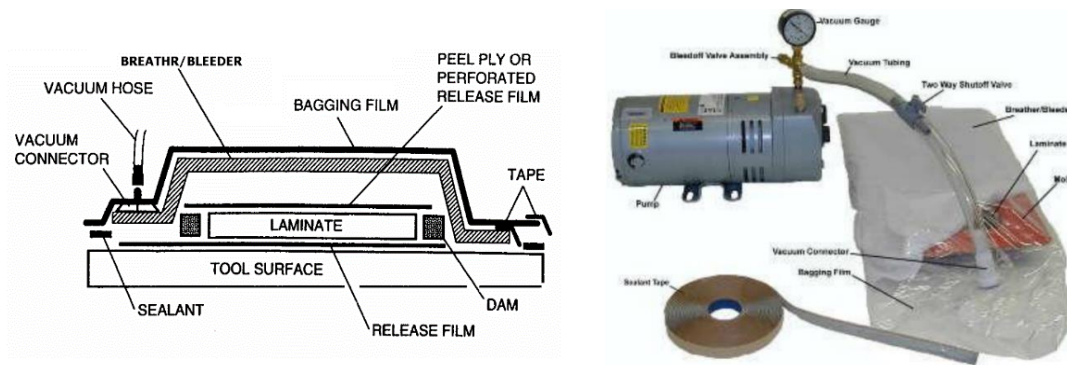


Σχήμα 2.4: Prepreg lay-up

2.3.3 Μόρφωση σύνθετου υλικού μέσω περιβλήματος (Bag molding)

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι στην εφαρμογή της πίεσης στη διαστρωμάτωση: α) Pressure bag β) vaccumbag και γ) διαδικασία με κλίβανο (autoclave processing), με τις δύο τελευταίες να είναι οι πιο δημοφιλείς.

Στη διαστρωμάτωση, και πριν αυτή στερεοποιηθεί, εφαρμόζεται μία ομοιόμορφη πίεση βελτιώνοντας την σταθεροποίηση των ινών και την απομάκρυνση της περιττής ρητίνης, του αέρα και των πτητικών ουσιών από το συνδετικό υλικό. Η πίεση εφαρμόζεται με τη βοήθεια ενός εύκαμπτου διαφράγματος ή ενός περιβλήματος (bag). Οι στρώσεις απλώνονται πρώτα στο καλούπι και ακολουθεί η ρητίνη. Μια απελευθερωτική μεμβράνη ή μέσο (releasefilm ή agent) χρησιμοποιείται και στις δύο πλευρές της διαστρωμάτωσης για να την αποτρέψει να κολλήσει στο καλούπι ή στο breather. Μερικές φορές χρησιμοποιείται ένα peel-ply για να αφήσει σημάδι (imprint) ή ένα σχέδιο/πατρόν (pattern) στην επιφάνεια ώστε να δυναμώσει ο συγκολλητικός δεσμός(δευτερέων δεσμός) αργότερα. Ο συνδυασμός breather bleeder βοηθά στην διάδοση της αναρρόφησης (vacuum) ή των διόδων (channels) των πτητικών ουσιών και της περιττής ρητίνης στην έξοδο αναρρόφησης (vacuum port). Η διαστρωμάτωση μετά καλύπτεται με ένα εύκαμπτο περίβλημα (flexible bag), το οποίο είναι τέλεια σφραγισμένο στο εργαλείο. Στη συνέχεια εφαρμόζεται αναρρόφηση (vacuum) και το τμήμα στερεοποιείται με θέρμανση και πίεση. Με την εφαρμογή της αναρρόφησης (vacuum) κάτω από το περίβλημα (bag), η ατμοσφαιρική πίεση ασκείται ομοιόμορφα πάνω στη διαστρωμάτωση.

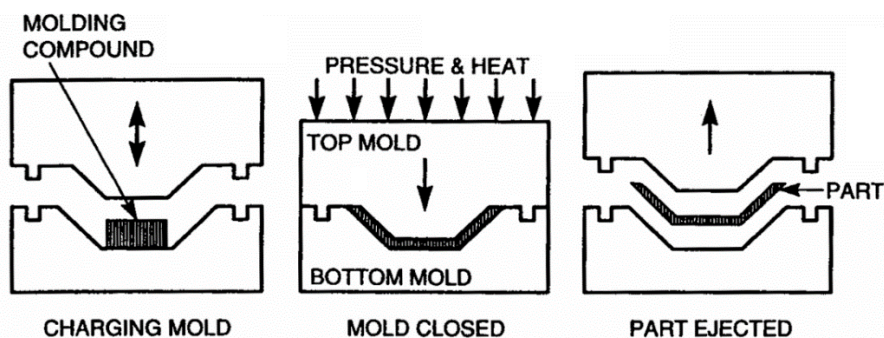


Σχήμα 2.5: Bag molding

2.3.4 Εκμαγείο συμπίεσης (Compression molding)

Η διαδικασία μέσω ενός εκμαγείου συμπίεσης (compression molding) χρησιμοποιεί εφαρμογές αρσενικού-θηλυκού τύπου και μεταλλικές μήτρες για το σχηματισμό του καλούπιού. Μια προμετρημένη ποσότητα του μίγματος (ίνες και ρητίνες) γεμίζει αρχικά το καλούπι. Κατόπιν χρησιμοποιείται μία υδραυλική πρέσα με θερμότητα και σχετικά υψηλή πίεση για τη στερεοποίηση των ινών και ρητινών κλείνοντας το αρσενικό και θηλυκό τμήμα του καλούπιού. Αφού το υλικό έχει στερεοποιηθεί, χαλαρώνει η πίεση και το τμήμα βγαίνει από το καλούπι.

Είναι μια απλή και καλά εδραιωμένη διαδικασία. Ελαχιστοποιεί το κόστος συναρμολόγησης του τμήματος, σχεδόν εξαλείφει τα πλεονάζοντα υλικά, μειώνει τις δευτερογενείς τελικές επεξεργασίες και απαιτεί ελάχιστο φόρτο εργασίας. Η διαδικασία μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, επιτρέποντας υψηλό όγκο παραγωγής με πολύ καλή ομοιομορφία.

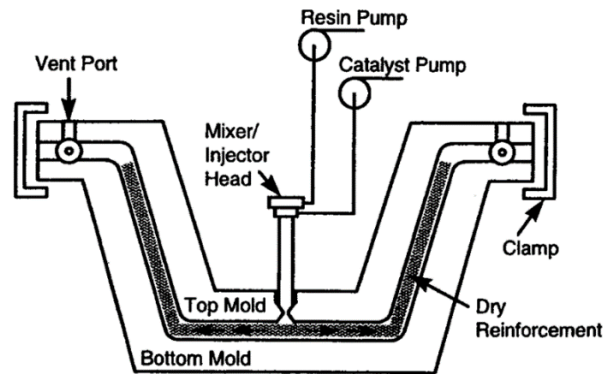


Σχήμα 2.6: Εκμαγείο συμπίεσης

2.3.5 Καλούπι ρητινένεσεως (Resin transfer molding – RTM)

Η διαδικασία με το καλούπι ρητινένεσεως – Resin Transfer Molding (RTM) χρησιμοποιεί ένα καλούπι με εισόδους για την εισαγωγή της ρητίνης και εξόδους που επιτρέπουν τη διαφυγή του αέρα. Οι ίνες ενίσχυσης τοποθετούνται ξηρές στο καλούπι και αυτό κλείνεται. Από την είσοδο αντλείται υγρή ρητίνη μέσα στο καλούπι, εμποτίζοντας τις ίνες και γεμίζοντας την κοιλότητα του καλούπιού. Όταν αυτό γεμίσει, η παροχή ρητίνης σταματά, οι εισοδοί και έξοδοι σφραγίζονται και εφαρμόζεται

θέρμανση ώστε να στερεοποιηθεί η ρητίνη. Στη συνέχεια, το καλούπι ανοίγεται και το τελικό τμήμα του σύνθετου υλικού απομακρύνεται.

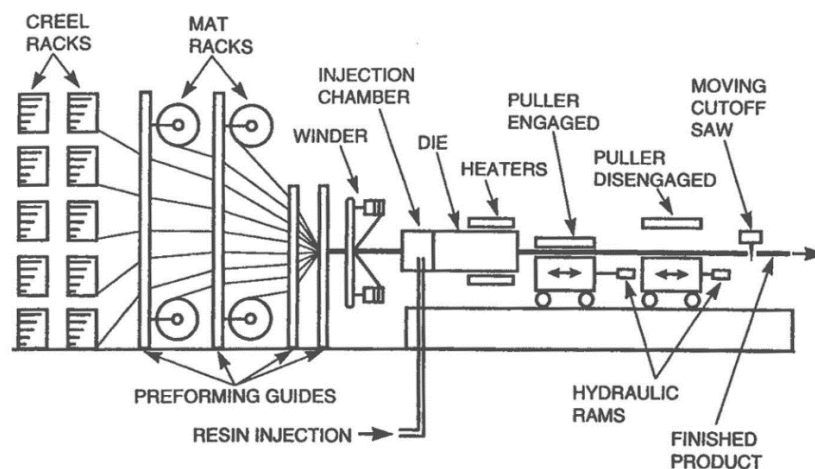


Σχήμα 2.7: Καλούπι ρητινένεσεως

2.3.6 Διαδικασία παραγωγής με έλξη (Pultrusion)

Η διαδικασία παραγωγής με έλξη (pultrusion) είναι μία συνεχής διαδικασία που χρησιμοποιείται για να κατασκευάζει σταθερές πρότυπες διατομές οιοδήποτε μήκους. Οι ίνες είναι εμποτισμένες με ρητίνη και έλκονται μέσω μιας θερμαινόμενης μήτρας, από όπου περνώντας σχηματίζεται και στερεοποιείται το τελικό προϊόν.

Στην απλούστερη γραμμή παραγωγής με έλξη (pultrusion), οι δέσμες των ινών τεντώνονται και οδηγούνται σε καλούπια προσχηματισμού. Τα performing guides θέτουν τις ίνες με κατάλληλη διάταξη μέσα στη διατομή (cross-section) του προϊόντος, όπως ορίζεται από τον σχεδιαστή. Οι ενισχύσεις εισέρχονται ξηρές στο θάλαμο έγχυσης (injection chamber), όπου εμποτίζονται με παροχετευόμενη ρητίνη υπό πίεση. Η διατομή (cross-section) της μήτρας δίνει το τελικό σχήμα του προϊόντος. Καθώς οι εμποτισμένες ίνες κινούνται διαμέσου της μήτρας, η στερεοποίηση γίνεται με τη βοήθεια παρεχόμενης θερμότητας από μία σειρά θερμαντήρων. Όπως προκύπτει το σύνθετο υλικό, συρρικνώνεται και ξεχωρίζει από τα τοιχώματα της μήτρας και αφήνοντας τη μήτρα είναι ένα τελικό προϊόν.

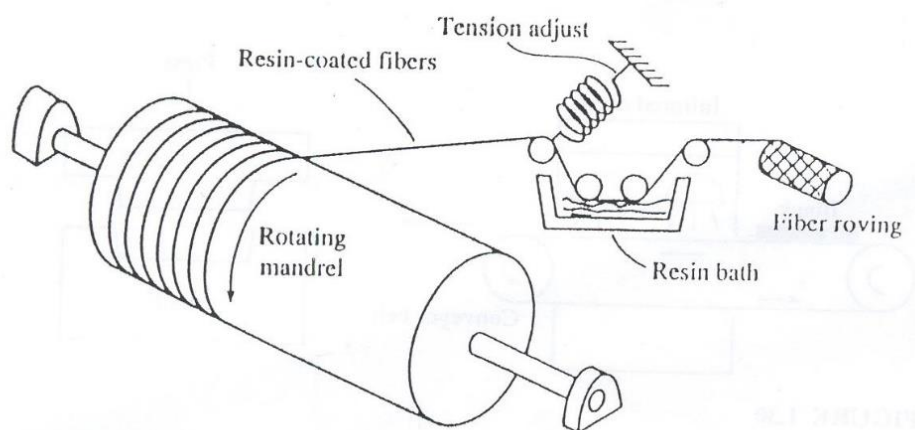


Σχήμα 2.8: Pultrusion

2.3.7 Διαδικασία περιέλιξης (Filament winding)

Τα περισσότερα σχήματα που μορφώνονται μέσω αυτής της διαδικασίας είναι επιφάνειες κυλινδρικών ή σφαιρικών κελυφών, όπως σωλήνες, κύλινδροι και σφαίρες. Στη διαδικασία της περιέλιξης (filament winding), συνεχείς ενισχύσεις όπως δέσμες ινών (toning) περιτυλίγονται γύρω από έναν περιστρεφόμενο καλούπι/άξονα (mandrel) μέχρι η επιφάνεια να καλυφθεί και να επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται ακατέργαστα υλικά, ίνες και ρητίνες, σε μια σχεδόν αυτοματοποιημένη μορφή με μικρό κόστος εργασίας που συνεισφέρει στο μικρό κόστος παραγωγής. Η εκ των προτέρων προγραμματισμένη περιστροφή του άξονα και η οριζόντια μετακίνηση του στομίου παροχής (delivery eye) παράγει ένα ελικοειδές σχήμα, που είναι η απλούστερη μέθοδος λειτουργίας της ελικοειδούς μηχανής περιέλιξης (helical winding machine).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι των μηχανών περιέλιξης: η ελικοειδής και η πολική ως προς σημείο (polar).



Σχήμα 2.9: Διαδικασία περιέλιξης

2.4 Ελαστικότητα σύνθετων υλικών

2.4.1 Γενικά

Στη μηχανική του παραμορφώσιμου στερεού εξετάζονται τα ακόλουθα τέσσερα πεδία:

- α. το πεδίο μετατοπίσεων u
- β. το πεδίο παραμορφώσεων ϵ
- γ. το πεδίο τάσεων σ
- δ. το πεδίο δυνάμεων f

Ένα παραμορφώσιμο σώμα που υποβάλλεται σε δεδομένο πεδίο εξωτερικών δυνάμεων f θα αναπτύξει εσωτερικές τάσεις σ και παραμορφώσεις ϵ , και θα μετατοπιστεί κατά u . Τα πεδία μετατοπίσεων, παραμορφώσεων, τάσεων και δυνάμεων εκφράζονται σε ένα τρισδιάστατο κύριο σύστημα 1-2-3 υπό διανυσματική μορφή ως ακολούθως:

- ε. Μετατοπίσεις u_i
- στ. Παραμορφώσεις ϵ_{ij}

- ζ. Τάσεις σ_{ij}
- η. Δυνάμεις f_{ij}

όπου οι δείκτες παίρνουν τιμές $i,j=1,2,3$.

Τα πεδία αυτά συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων ελαστικότητας.

Οι τάσεις συνδέονται με τις δυνάμεις μέσω των εξισώσεων ισοροπίας, οι παραμορφώσεις με τις τάσεις μέσω του νόμου ελαστικότητας και οι μετατοπίσεις με τις παραμορφώσεις μέσω των κινηματικών σχέσεων και των εξισώσεων συμβιβαστού.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_{ij}}{\partial x_{ij}} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad (2.3)$$

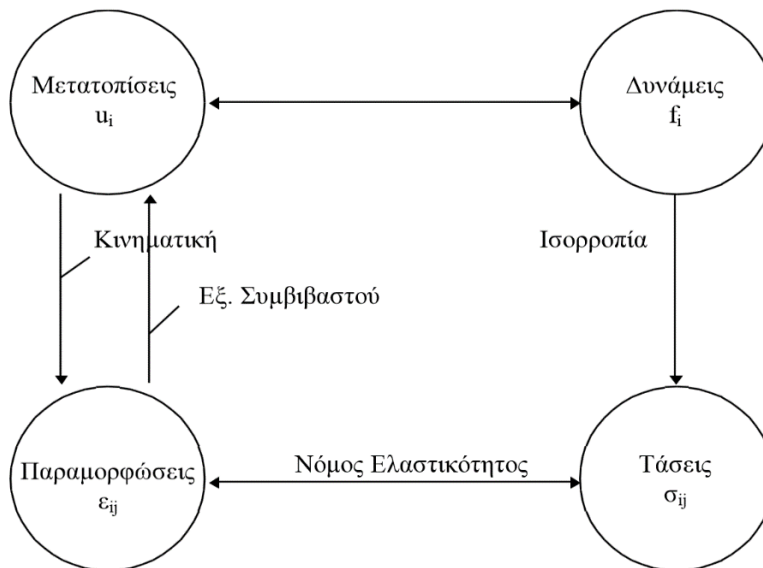
$$\frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial x_k \partial x_l} + \frac{\partial^2 \epsilon_{kl}}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 \epsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 \epsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} \quad (2.4)$$

όπου $i,j,k,l=1,2,3$.

Με βάση τη θεωρία μικρών παραμορφώσεων, η κινηματική σχέση (2.3) απλοποιείται στην ακόλουθη:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

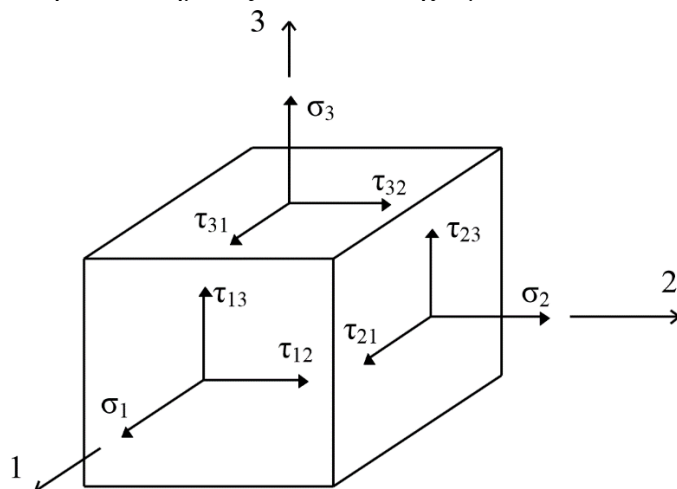
Το διάγραμμα αντιμετώπισης ενός κλασσικού προβλήματος ελαστικότητας είναι:



Σχήμα 2.10: Τα τέσσερα πεδία της μηχανικής

2.4.2 Τάσεις και παραμορφώσεις

Θεωρώντας το κύριο σύστημα αξόνων 1-2-3 έχουμε:



Σχήμα 2.11: Τάσεις στο κύριο σύστημα 1-2-3

όπου σ_i είναι οι ορθές τάσεις και τ_{ij} είναι οι διατμητικές τάσεις, για $i,j=1,2,3$. Οι τάσεις γράφονται υπό διανυσματική μορφή ως εξής:

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \tau_{23} \quad \tau_{31} \quad \tau_{12}\} \quad (2.6)$$

Ομοίως, οι αντίστοιχες παραμορφώσεις συμβολίζονται με ε_i (ορθές) και γ_{ij} (διατμητικές). Ισχύει ότι:

$$\gamma_{ij} = 2 \varepsilon_{ij} \quad (2.7)$$

Το διάνυσμα παραμορφώσεων είναι:

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad \gamma_{23} \quad \gamma_{31} \quad \gamma_{12}\} \quad (2.8)$$

Ακριβώς ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για ένα τυχόν σύστημα x-y-z, όπου οι δείκτες λαμβάνουν τιμές $i,j=x,y,z$.

2.4.3 Γενικευμένος νόμος του Hooke

Ο νόμος ελαστικότητας, συνδέει τάσεις και παραμορφώσεις με 81 ελαστικές σταθερές C_{ijkl} ($i,j,k,l=1,2,3$). Επειδή όμως οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι συμμετρικές ($\sigma_{ij}=\sigma_{ji}$ και $\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}$), ο νόμος γίνεται:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

Αυτή η έκφραση είναι η πλέον γενική για ένα ανισότροπο γραμμικώς ελαστικό υλικό. Οι 36 ελαστικές σταθερές όμως δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Αν θεωρήσουμε την ενέργεια παραμορφώσεως W

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (2.10)$$

και παραγωγίσουμε ως προς τις παραμορφώσεις, έχουμε:

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{ij} \varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} \quad (2.11\alpha)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ji}} = C_{ji} \varepsilon_{ji} = \sigma_{ji} \quad (2.11\beta)$$

Όμως είναι $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, επομένως για τις ελαστικές σταθερές ισχύει $C_{ij} = C_{ji}$. Άρα, οι ανεξάρτητες σταθερές είναι 21. Το υλικό στην περίπτωση αυτή λέγεται τρικλινικό.

Αν υπάρχει ένα επίπεδο συμμετρίας, τότε το υλικό λέγεται μονοκλινικό, και ο νόμος ελαστικότητας απλοποιείται σε:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ C_0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{54} & C_{55} & 0 \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

και στην περίπτωση αυτή οι ανεξάρτητες σταθερές είναι 13.

Αν υπάρχει συμμετρία ως προς 3 ορθογωνικά επίπεδα, το υλικό λέγεται ορθότροπο. Ο νόμος ελαστικότητας γίνεται:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

και περιέχει 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Πίνακας 2.1: Ελαστικές σταθερές

Υλικό	Ανεξάρτητες	1-2-3	x-y-z	Μη μηδενικές
Τρικλινικό	21	36	36	36
Μονοκλινικό	13	20	36	36
Ορθότροπο	9	12	20	36
Εγκ. Ισότροπο	5	12	20	36
Ισότροπο	2	12	12	12

Αντιστρέφοντας τη σχέση τάσεων παραμορφώσεων εξ. (2.9) έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

όπου S_{ij} είναι όροι ευκαμψίας.

2.4.4 Μηχανικές σταθερές

Οι μηχανικές σταθερές (μέτρα ελαστικότητας) προσδιορίζονται με απλά πειράματα.

- Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ_1 όπου ($\sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$), έχουμε:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} \quad \varepsilon_2 = -\nu_{12}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{12}}{E_1}\sigma_1 \quad \varepsilon_3 = -\nu_{13}\varepsilon_1 = -\frac{\nu_{13}}{E_1}\sigma_1 \quad (2.15\alpha)$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0$$

- Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ_2 όπου ($\sigma_1 = \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$), έχουμε:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} \quad \varepsilon_1 = -\nu_{21}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{21}}{E_2}\sigma_2 \quad \varepsilon_3 = -\nu_{23}\varepsilon_2 = -\frac{\nu_{23}}{E_2}\sigma_2 \quad (2.15\beta)$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0$$

- Εφαρμόζοντας μονοαξονικά τάση σ_3 όπου ($\sigma_1 = \sigma_2 = \tau_{23} = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$), έχουμε:

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3} \quad \varepsilon_1 = -\nu_{31}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{31}}{E_3}\sigma_3 \quad \varepsilon_2 = -\nu_{32}\varepsilon_3 = -\frac{\nu_{32}}{E_3}\sigma_3 \quad (2.15\gamma)$$

$$\gamma_{12} = \gamma_{23} = \gamma_{31} = 0$$

- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ_{23} όπου ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{31} = \tau_{12} = 0$), έχουμε:

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad (2.15\delta)$$

- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ_{31} όπου ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{12} = 0$), έχουμε:

$$\gamma_{31} = \frac{\tau_{31}}{G_{13}} \quad (2.15\epsilon)$$

- Εφαρμόζοντας καθαρή διάτμηση τ_{12} όπου ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$), έχουμε:

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad (2.15\sigma\tau)$$

Έτσι, το αντίστροφο του νόμου ελαστικότητας συναρτήσει των μηχανικών σταθερών είναι:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ C_0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.16)$$

Οι λόγοι Poisson ορίζονται ως εξής:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i}$$

όπου $i, j=1, 2, 3$.

Επειδή το μητρώο ελαστικότητας είναι συμμετρικό, θα ισχύει:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_j} = \frac{\nu_{ji}}{E_i} \quad (2.17)$$

όπου $i, j=1, 2, 3$.

Για εγκάρσια - ισότροπα υλικά είναι:

$$G_{13} = G_{12}, \quad E_2 = E_3, \quad \nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{32}, \quad \text{και} \quad G_{23} = \frac{E_2}{2(1+\nu_{32})}$$

Για ισότροπα υλικά είναι:

$$G = G_{ij}, \quad E = E_{ij}, \quad \nu = \nu_{ij} \quad \text{και} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

2.5 Επίπεδη εντατική κατάσταση

Ορθότροπο υλικό

Έστω ένα ορθότροπο υλικό σε επίπεδη εντατική κατάσταση δηλαδή $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$. Τότε η σχέση εξ.(2.16) γράφεται:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

Οι ανεξάρτητες σταθερές είναι πλέον τέσσερις, δηλαδή E_1 , E_2 , ν_{12} , G_{12} και ισχύει

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2.19)$$

Τετραγωνικώς συμμετρικό υλικό

Στην περίπτωση αυτή είναι $E_1 = E_2$ και κατ' επέκταση $\nu_{12} = \nu_{21}$. Η εξ.(2.18) απλοποιείται και παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Το υλικό έχει τρεις ανεξάρτητες σταθερές E_1 , ν_{12} , G_{12} . Αξίζει να σημειωθεί ότι στα τετραγωνικώς συμμετρικά υλικά είναι:

$$G_{12} \neq \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})} \quad (2.21)$$

Ισότροπο υλικό

Η σχέση (2.21) γίνεται πλέον ισότητα, και έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{E_1} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.22)$$

με δύο ανεξάρτητες σταθερές E_1 , ν_{12} .

Αντιστρέφοντας τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων (2.18) έχουμε για τη γενική περίπτωση ορθότροπου υλικού:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \begin{Bmatrix} E_1 & \nu_{21}E_1 & 0 \\ \nu_{12}E_2 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu_{12}\nu_{21})G_{12} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

και ορίζοντας τους όρους ακαμψίας Q_{ij} ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} = Q_{21}, \quad Q_{66} = G_{12} \end{aligned} \quad (2.24)$$

έχουμε τη σχέση υπό την ακόλουθη συμβολική μορφή:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

Χρησιμοποιώντας τους όρους ευκαμψίας S_{ij} , η εξ.(2.22) γράφεται:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

όπου

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \\ S_{12} &= S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned}$$

Εξαιρέσει ορισμένων περιπτώσεων όπου απαιτείται η χρήση τρισδιάστατης θεωρίας (3D), τα σύνθετα υλικά αντιμετωπίζονται συνήθως σαν δισδιάστατα (2D) ελαστικά υλικά. Ειδικότερα στα ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με προσανατολισμένες ίνες, κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από την κύρια διεύθυνση (1) που είναι παράλληλη στις ίνες, από την εγκάρσια διεύθυνση (2) η οποία είναι κάθετη στις ίνες, και την εκτός επιπέδου 1-2 διεύθυνση (3).

2.6 Νόμος σύνθεσης

Ο νόμος της σύνθεσης (rule of mixtures) εκφράζει τα ποσοστά συμμετοχής ινών και μητρώου στο τελικό προϊόν. Χρησιμοποιείται δε στην πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Έστω σύνθετο υλικό για το οποίο ορίζονται:

V : συνολικός όγκος

V_f : όγκος ινών

V_m : όγκος μητρώου

V_v : όγκος κενών

όπου $V = V_f + V_m + V_v$

Ορίζονται οι λόγους v_f , v_m και v_v ως εξής:

$$v_f: \text{λόγος όγκου ινών (fiber volume fraction)} \quad v_f = \frac{V_f}{V} \quad (2.27)$$

$$v_m: \text{λόγος όγκου μητρώου (matrix volume fraction)} \quad v_m = \frac{V_m}{V} \quad (2.28)$$

$$v_v: \text{λόγος όγκου κενών (void volume fraction)} \quad v_v = \frac{V_v}{V} \quad (2.29)$$

για τα οποία ισχύει $v_f + v_m + v_v = 1$

Αν W είναι το συνολικό βάρος ενός κομματιού υλικού, W_f το βάρος των ινών και W_m το βάρος του μητρώου, τότε ορίζονται οι ακόλουθοι λόγοι:

$$w_f: \text{λόγος βάρους ινών} \quad w_f = \frac{W_f}{W} \quad (2.30)$$

$$w_m: \text{λόγος βάρους μητρώου} \quad w_m = \frac{W_m}{W} \quad (2.31)$$

και είναι $w_f + w_m = 1$

Έστω ρ_f η πυκνότητα των ινών και ρ_m η πυκνότητα του μητρώου, τότε η συνολική πυκνότητα ρ του σύνθετου υλικού ορίζεται ως εξής:

$$\rho = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (2.32)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο λόγος όγκου κενών v_v υπολογίζεται από:

$$v_v = 1 - v_f - v_m = 1 - \frac{w_f / \rho_f}{V} - \frac{w_m / \rho_m}{V} \quad (2.33)$$

2.7 Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων

Με τον όρο μηχανικές ιδιότητες εννοούμε τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού σαν ομογενές σώμα. Για τον προσδιορισμό τους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

- Εμπειρικές και ημιανλυτικές μέθοδοι, στηρίζονται σε απλές αρχές και πειραματική επαλήθευση

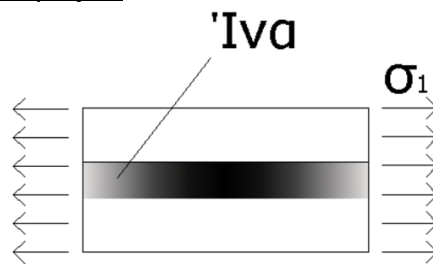
- Ενεργειακές μέθοδοι, λεπτομερειακή ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Μηχανική προσέγγιση

Η μηχανική προσέγγιση ανήκει στην κατηγορία των ημιαναλυτικών μεθόδων και στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

- Οι ίνες είναι ομογενές (όχι ακριβής παραδοχή) ισότροπο, γραμμικώς ελαστικό με κανονική διάταξη και προσανατολισμένες
- Το μητρώο είναι ομογενές ισότροπο γραμμικώς ελαστικό (όχι ακριβής παραδοχή).

Διαμήκες μέτρο ελαστικότητας E_1



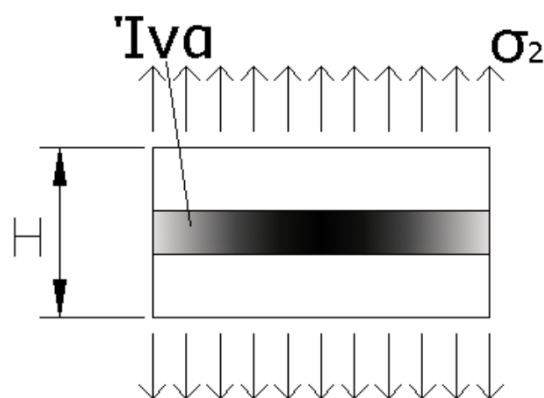
Σχήμα 2.12: Διαμήκες μέτρο ελαστικότητας E_1

σ_1 : μέση τάση, $\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1$

$$\text{Είναι: } \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \rightarrow \sigma_1 = \sigma_f \frac{A_f}{A} + \sigma_m \frac{A_m}{A}$$

$$\text{δηλαδή: } E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad \text{και} \quad E_1 = \nu_f E_f + \nu_m E_m \quad (2.34)$$

Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας E_2



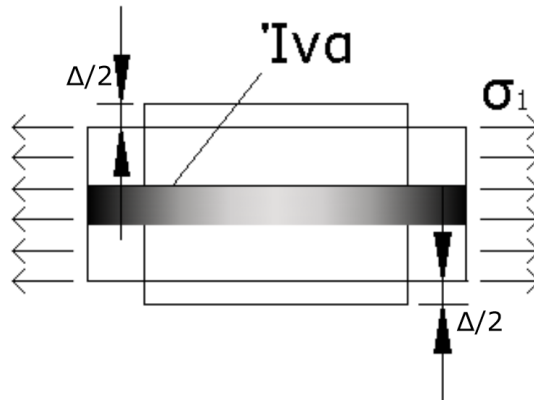
Σχήμα 2.13: Εγκάρσιο μέτρο ελαστικότητας

$$\varepsilon_2 = \nu_f \varepsilon_f + \nu_m \varepsilon_m = \nu_f \frac{\sigma_2}{E_f} + \nu_m \frac{\sigma_2}{E_m}$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = E_2 \left(\nu_f \frac{\sigma_2}{E_f} + \nu_m \frac{\sigma_2}{E_m} \right)$$

Άρα: $\frac{1}{E_2} = \frac{\nu_f}{E_f} + \frac{\nu_m}{E_m}$ ή $E_2 = \frac{E_f E_m}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}$ (2.35)

Λόγος Poisson ν_{12} (εξ' ορισμού $\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$)



Σχήμα 2.14: Λόγος Poisson

Εφαρμόζουμε ορθή τάση σ_1 οπότε η εγκάρσια βράχυνση είναι Δ :

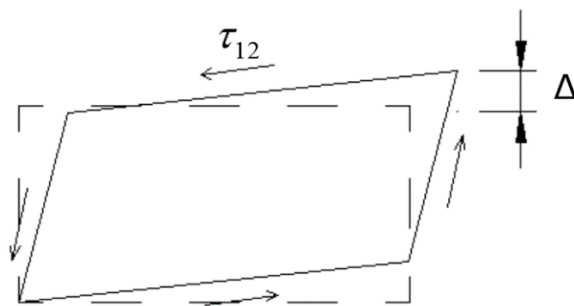
$$\Delta = -H \varepsilon_2 = H \nu_{12} \varepsilon_1 \quad \text{και} \quad \Delta = \Delta_m + \Delta_f$$

$$\Delta_m = H \nu_m \nu_m \varepsilon_1 \quad \text{και} \quad \Delta_f = H \nu_f \nu_f \varepsilon_1$$

Άρα:

$$\nu_{12} = \nu_f \nu_f + \nu_m \nu_m$$
 (2.36)

Μέτρο διάτμησης G_{12}



Σχήμα 2.15: Μέτρο διάτμησης

$$\Delta = \gamma_{12} H, \quad \Delta_m = H \nu_m \gamma_m, \quad \Delta_f = H \nu_f \gamma_f, \quad \Delta = \Delta_m + \Delta_f$$

$$\gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \quad \gamma_m = \frac{\tau_{12}}{G_m}, \quad \gamma_f = \frac{\tau_{12}}{G_f}, \quad \gamma_{12} = \nu_m \gamma_m + \nu_f \gamma_f$$

Άρα:

$$\frac{\tau_{12}}{G_{12}} = v_m \frac{\tau_{12}}{G_m} + v_f \frac{\tau_{12}}{G_f} \rightarrow \frac{1}{G_{12}} = \frac{v_m}{G_m} + \frac{v_f}{G_f} \quad (2.37)$$

Η μηχανική προσέγγιση είναι ακριβής για τα E_1 και ν_{12} , αλλά όχι και για τα E_2 και G_{12} . Για το λόγο αυτό προτάθηκαν βελτιώσεις βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα.

Βελτίωση κατά Halpin & Tsai

Χρησιμοποιείται ο διορθωτικός όρος $\eta = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \xi}$, όπου ξ μία παράμετρος προσδιοριζόμενη από πειραματικά δεδομένα. Τότε τα μέτρα E_2 και G_{12} υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f} \quad (2.38\alpha)$$

$$\frac{G_2}{G_m} = \frac{1 + \xi \eta v_f}{1 - \eta v_f} \quad (2.38\beta)$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου $\xi=2$ υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Βελτίωση κατά Tsai & Hahn

Εισάγεται η παράμετρος διαχωρισμού τάσεων η_2 και με βάση αυτήν υπολογίζονται τα μέτρα E_2 και G_{12} από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{E_f} + \frac{\eta_2 v_m}{E_m} \right] \quad (2.39)$$

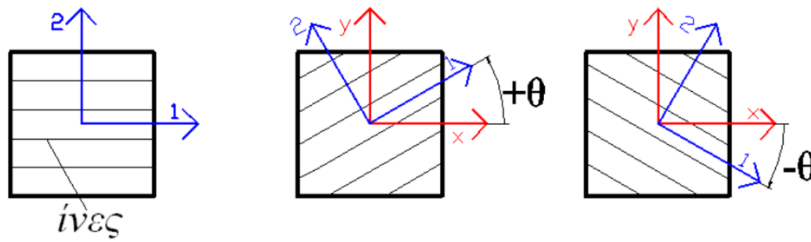
$$\frac{1}{G_2} = \frac{1}{v_f + \eta_2 v_m} \left[\frac{v_f}{G_f} + \frac{\eta_2 v_m}{G_m} \right] \quad (2.40)$$

Παρατηρήθηκε ότι για τιμή της παραμέτρου διαχωρισμού τάσεων $\eta_2=0.50$ υπάρχει πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα.

2.8 Μετασχηματισμοί

2.8.1 Γενικά

Γνωρίζοντας τη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2 που αντιστοιχεί στην διεύθυνση των ινών και στην κάθετη αυτής, θέλουμε να προσδιορίσουμε την ανάλογη σχέση σε ένα άλλο σύστημα x-y υπό γωνία θ ως προς το σύστημα 1-2. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των σχέσεων μετασχηματισμού για τις τάσεις και τις παραμορφώσεις από το σύστημα 1-2 στο σύστημα x-y. Η θετική φορά για την γωνία θ καθορίζεται στο ακόλουθο σχήμα:

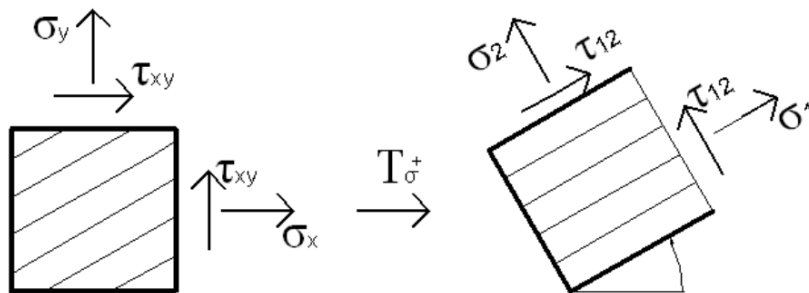


Σχήμα 2.16: Σύστημα υλικού 1-2 και τυχόν σύστημα x-y, με γωνία μετασχηματισμού θ

Ο μετασχηματισμός των τάσεων παραμορφώσεων είναι απαραίτητος για τους παρακάτω λόγους:

- Οι ιδιότητες υλικού επηρεάζονται από τον προσανατολισμό των ινών.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων στο σύστημα υλικού 1-2.
- Ο μετασχηματισμός είναι αναγκαίος για τον προσδιορισμό των όρων ακαμψίας και ευκαμψίας καθώς και των ισοδύναμων μέτρων ελαστικότητας.

2.8.2 Μετασχηματισμός τάσεων



Σχήμα 2.17: Μετασχηματισμός τάσεων

Παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού των μητρώων μετασχηματισμού $[T_{\sigma}^+]$ και $[T_{\sigma}^-]$.

1. Κάνουμε μία τομή α-α κάθετα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου. Θέτουμε για απλουστευτικούς λόγους $s = \sin\theta$ και $c = \cos\theta$.

- a. Ισορροπία κατά τον άξονα x ($\Sigma F_x = 0$) δίνει:

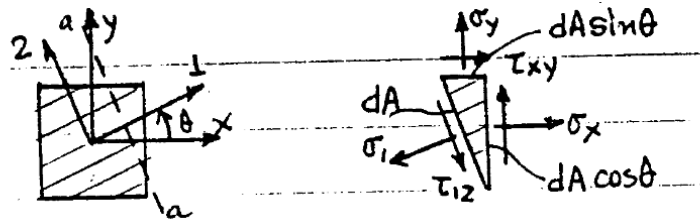
$$c\sigma_x + s\tau_{xy} = c\sigma_1 - s\tau_{12} \quad (2.41)$$

- b. Ισορροπία κατά τον άξονα y ($\Sigma F_y = 0$) δίνει:

$$s\sigma_y + c\tau_{xy} = s\sigma_1 + c\tau_{12} \quad (2.42)$$

- c. Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς τις τάσεις σ_2 και τ_{12} προκύπτει:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= c^2\sigma_x + s^2\sigma_y + 2cs\tau_{xy} \\ \tau_{12} &= -cs\sigma_x + cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.43)$$



Σχήμα 2.18: Τομή α-α και ισορροπία δράσεων

2. Κάνουμε μία τομή β-β παράλληλα στη διεύθυνση των ινών και θεωρούμε την ισορροπία του τριγωνικού στοιχείου:

a. Ισορροπία κατά τον άξονα x ($\Sigma F_x = 0$) δίνει:

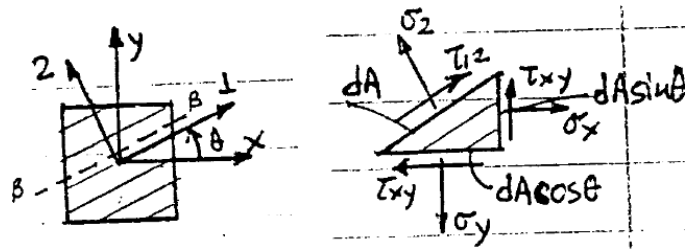
$$s\sigma_x - c\tau_{xy} = s\sigma_2 - c\tau_{12} \quad (2.44)$$

b. Ισορροπία κατά τον άξονα y ($\Sigma F_y = 0$) δίνει:

$$c\sigma_y - s\tau_{xy} = c\sigma_2 + s\tau_{12} \quad (2.45)$$

c. Λύνοντας τις παραπάνω δύο εξισώσεις ως προς τις τάσεις σ_2 και τ_{12} παίρνουμε την ήδη γνωστή έκφραση για την τ_{12} και:

$$\sigma_2 = s^2\sigma_x + c^2\sigma_y - 2cs\tau_{xy} \quad (2.46)$$



Σχήμα 2.19: Τομή β-β και ισορροπία δυνάμεων

Οι εξισώσεις (2.43) και (2.46) μπορούν να γραφούν και ως ακολούθως:

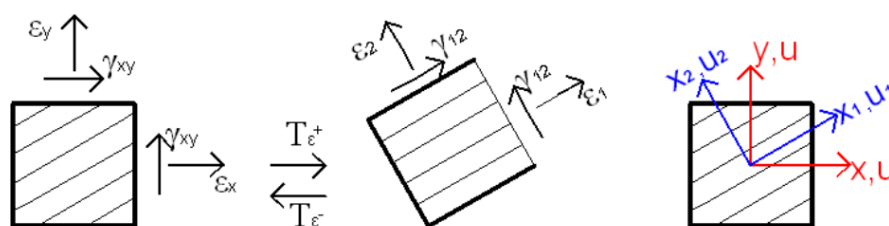
$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.47)$$

όπου $[T_\sigma^+]$ είναι το μητρώο μετασχηματισμού των τάσεων σ_x , σ_y , και τ_{xy} από το στραμμένο σύστημα x-y στο σύστημα υλικού 1-2. Έτσι προσδιορίζονται οι τάσεις σ_1 , σ_2 και τ_{12} (η γωνία στροφής θ είναι θετικά ορισμένη).

Το μητρώο αντίστροφου μετασχηματισμού $[T_\sigma^-]$ προσδιορίζεται είτε με αντιστροφή του μητρώου $[T_\sigma^+]$, είτε θέτοντας αρνητική τη γωνία στροφής θ . Χρησιμοποιώντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό, οι τάσεις σ_x , σ_y , και τ_{xy} υπολογίζονται από τις από τις τάσεις σ_1 , σ_2 και τ_{12} . Έτσι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2cs \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^-] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

2.8.3 Μετασχηματισμός παραμορφώσεων



Σχήμα 2.20: Μετασχηματισμός παραμορφώσεων

Οι παραμορφώσεις ορίζονται βάσει των μετατοπίσεων ως ακολούθως:

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad \text{και} \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \quad (2.49)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{και} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.50)$$

Για τα συστήματα συντεταγμένων ισχύει:

$$\begin{aligned} x_1 &= x \cos \theta + y \sin \theta = cx + sy \\ x_2 &= -x \sin \theta + y \cos \theta = -sx + cy \end{aligned} \quad (2.51)$$

Και αντιστρόφως:

$$\begin{aligned} x &= cx_1 - sx_2 \\ y &= sx_1 + cx_2 \end{aligned} \quad (2.52)$$

Ομοίως για τις μετατοπίσεις ισχύει:

$$\begin{aligned} u_1 &= cu + sv \\ u_2 &= -su + cv \end{aligned} \quad (2.53)$$

και αντιστρόφως:

$$\begin{aligned} u &= cu_1 - su_2 \\ v &= su_1 + cu_2 \end{aligned} \quad (2.54)$$

Συνεπώς, για την παραμόρφωση ε_1 είναι:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial (cu + sv)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_1} + \frac{\partial (cu + sv)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial x_1} = \\ &= \frac{\partial u}{\partial x} c^2 + \frac{\partial v}{\partial x} sc + \frac{\partial u}{\partial y} cs + \frac{\partial v}{\partial y} s^2 = \varepsilon_x c^2 + cs \gamma_{xy} + s^2 \varepsilon_y \end{aligned} \quad (2.55)$$

Με αντίστοιχο τρόπο προσδιορίζονται και οι εκφράσεις των παραμορφώσεων ε_2 και γ_{12} . Άρα συνολικά έχουμε:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^2 & s^2 & cs \\ s^2 & c^2 & -cs \\ -2cs & 2cs & c^2 - s^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^+] \{\varepsilon\} \quad (2.56)$$

Ο μετασχηματισμός αυτός των παραμορφώσεων είναι επίσης ένας καθαρά γεωμετρικός μετασχηματισμός και το μητρώο $[T_\varepsilon^-]$ του αντίστροφου μετασχηματισμού υπολογίζεται θέτοντας αρνητική γωνία στο $[T_\varepsilon^+]$, δηλαδή:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & -cs \\ s^2 & c^2 & cs \\ 2cs & -2cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\varepsilon^-] \{\varepsilon\} \quad (2.57)$$

Η διαφορά μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού $[T_\sigma]$ και $[T_\varepsilon]$ έγκειται στον ορισμό της διαμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{12} = 2\varepsilon_{12}$. Γενικά ισχύει:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{1}{2}\gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T_\sigma^+] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.58)$$

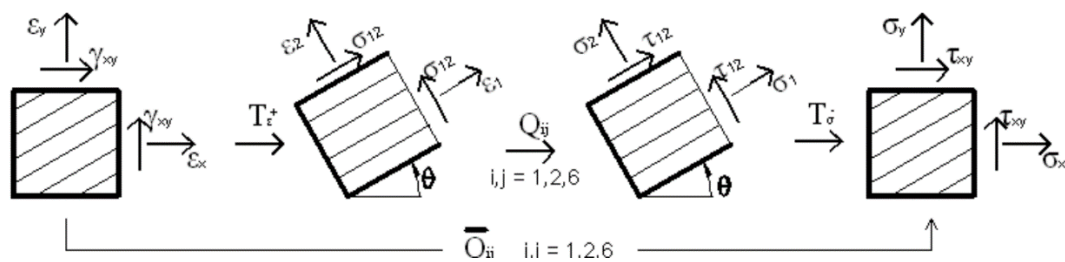
Εισάγοντας το συντελεστή $\frac{1}{2}$, ο οποίος πολλαπλασιάζει τις παραμορφώσεις γ , στους όρους του μητρώου μετασχηματισμού των τάσεων $[T_\sigma^+]$ παίρνουμε το μητρώο μετασχηματισμού των παραμορφώσεων $[T_\varepsilon^+]$.

2.8.4 Μετασχηματισμός των όρων ακαμψίας Q_{ij}

Στο σύστημα υλικού 1-2, η σχέση που συνδέει τάσεις και παραμορφώσεις είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.59)$$

Έστω σύστημα x-y στραμμένο κατά γωνία θ σε σχέση με το σύστημα υλικού. Θα προσδιορίσουμε τη σχέση που συνδέει τις τάσεις σ_x, σ_y , και τ_{xy} με τις παραμορφώσεις $\varepsilon_x, \varepsilon_y$, και γ_{xy} στο στραμμένο σύστημα x-y. Αυτό συνίσταται στο πως εκφράζονται οι όροι ακαμψίας Q_{ij} στο σύστημα x-y.



Σχήμα 2.21: Διάγραμμα μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας Q

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Εκφράζουμε τις παραμορφώσεις ε_1 , ε_2 , και γ_{12} ως προς τις παραμορφώσεις ε_x , ε_y , και γ_{xy} στο σύστημα x-y μέσω του θετικού μετασχηματισμού τάσεων $[T_\varepsilon^+]$

$$\varepsilon_1 = c^2 \varepsilon_x + s^2 \varepsilon_y + cs \gamma_{xy}$$

$$\varepsilon_2 = s^2 \varepsilon_x + c^2 \varepsilon_y - cs \gamma_{xy}$$

$$\gamma_{12} = -2cs \varepsilon_x + 2cs \varepsilon_y + (c^2 - s^2) \gamma_{xy}$$

- Εκφράζουμε τις σ_1 , σ_2 , τ_{12} ως προς τις ε_x , ε_y , γ_{xy} .

$$\sigma_1 = (c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12}) \varepsilon_y + (Q_{11} - Q_{12}) cs \gamma_{xy}$$

$$\sigma_2 = (c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22}) \varepsilon_y + (Q_{12} - Q_{22}) cs \gamma_{xy}$$

$$\tau_{12} = -2cs Q_{66} \varepsilon_x + 2cs Q_{66} \varepsilon_y + (c^2 - s^2) Q_{66} \gamma_{xy}$$

- Εκφράζουμε τα σ_x , σ_y , τ_{xy} ως προς τις ε_x , ε_y , γ_{xy} (αρνητικό $[T_\sigma^-]$)

$$\sigma_x = c^2 \sigma_1 + s^2 \sigma_2 - 2sc \tau_{12} =$$

$$= c^2 \left[(c^2 Q_{11} + s^2 Q_{12}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{11} + c^2 Q_{12}) \varepsilon_y + (Q_{11} - Q_{12}) cs \gamma_{xy} \right] +$$

$$+ s^2 \left[(c^2 Q_{12} + s^2 Q_{22}) \varepsilon_x + (s^2 Q_{12} + c^2 Q_{22}) \varepsilon_y + (Q_{12} - Q_{22}) cs \gamma_{xy} \right] -$$

$$- 2cs \left[-2cs Q_{66} \varepsilon_x + 2cs Q_{66} \varepsilon_y + (c^2 - s^2) Q_{66} \gamma_{xy} \right]$$

Και αντικαθιστώντας έχουμε:

$$\sigma_x = \left[c^4 Q_{11} + s^4 Q_{22} + 2c^2 s^2 Q_{12} + 4c^2 s^2 Q_{66} \right] \varepsilon_x +$$

$$+ \left[c^2 s^2 Q_{11} + c^2 s^2 Q_{22} + (c^4 + s^4) Q_{12} - 4c^2 s^2 Q_{66} \right] \varepsilon_y +$$

$$+ \left[c^3 s Q_{11} - cs^3 Q_{22} + (cs^3 - c^3 s) Q_{12} + 2(cs^3 - c^3 s) Q_{66} \right] \gamma_{xy} =$$

$$= \overline{Q_{11}} \varepsilon_x + \overline{Q_{12}} \varepsilon_y + \overline{Q_{16}} \gamma_{xy}$$

Ομοίως, αναπτύσσουμε τα σ_y και τ_{xy} και προσδιορίζουμε τις εκφράσεις:

$$\sigma_y = \overline{Q_{12}} \varepsilon_x + \overline{Q_{22}} \varepsilon_y + \overline{Q_{26}} \gamma_{xy}$$

$$\tau_{xy} = \overline{Q_{16}} \varepsilon_x + \overline{Q_{26}} \varepsilon_y + \overline{Q_{66}} \gamma_{xy}$$

Οι μετασχηματισμένοι όροι ακαμψίας $\overline{Q_{ij}}$ υπολογίζονται συναρτήσει των Q_{ij} ως ακολούθως:

$$\begin{Bmatrix} \overline{Q_{11}} \\ \overline{Q_{22}} \\ \overline{Q_{12}} \\ \overline{Q_{66}} \\ \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{26}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2 s^2 & 4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & c^4 + s^4 & -4c^2 s^2 \\ c^2 s^2 & c^2 s^2 & -2c^2 s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ c^3 s & -cs^3 & cs^3 - c^3 s & 2(cs^3 - c^3 s) \\ cs^3 & -c^3 s & c^3 s - cs^3 & 2(c^3 s - cs^3) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{Bmatrix} \quad (2.60)$$

Η σχέση μετασχηματισμού των όρων ακαμψίας γράφεται υπό συμβολική μορφή:
 $\overline{Q}_{ij} = [T_Q] Q_{ij}$, όπου το $[T_Q]$ είναι ένα μητρώο 6x4.

Παρατηρήσεις:

- Στο σύστημα 1-2 δεν υπάρχουν οι όροι Q_{16} και Q_{26} (είναι μηδενικοί)
- Ο ανωτέρω μετασχηματισμός ισχύει μόνο για στροφή από τους άξονες υλικού 1-2 προς ένα τυχαίο σύστημα x-y.
- Ο μετασχηματισμός ισχύει για θετική γωνία θ , όπως στο παραπάνω σχήμα. Αν η θ είναι αρνητική τότε απαιτείται αλλαγή προσήμων στη σχέση (2.60).
- Θετικό ή αρνητικό πρόσημο στη γωνία θ επηρεάζει μόνο το πρόσημο των όρων \overline{Q}_{16} , \overline{Q}_{26} .

Τελικά, η σχέση (2.59) στο σύστημα 1-2 μετασχηματίζεται στην ακόλουθη σχέση τάσεων παραμορφώσεων στο σύστημα x-y:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.61)$$

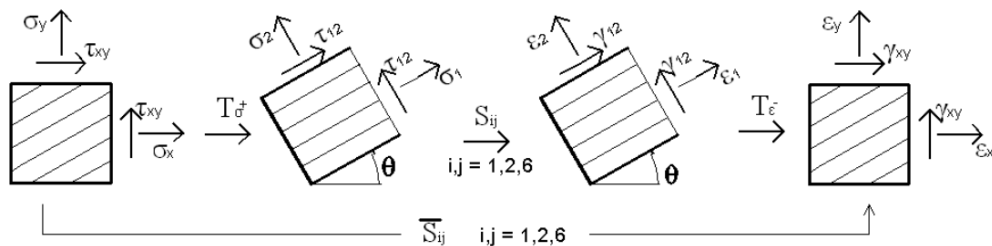
Το μητρώο ακαμψίας $[\overline{Q}]$ είναι συμμετρικό:

$$\overline{Q}_{12} = \overline{Q}_{21}, \overline{Q}_{16} = \overline{Q}_{61}, \overline{Q}_{26} = \overline{Q}_{62}$$

2.8.5 Μετασχηματισμός των όρων ευκαμψίας S_{ij}

Για τους άξονες υλικού 1-2, η σχέση είναι:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.62)$$



Σχήμα 2.22: Διάγραμμα μετασχηματισμού των όρων ευκαμψίας S

Η διαδικασία περιλαμβάνει 3 βήματα:

- Εκγράφουμε τις τάσεις σ_1 , σ_2 , τ_{12} ως προς τις σ_x , σ_y , τ_{xy} με θετικό $[T_\sigma^+]$

$$\sigma_1 = c^2 \sigma_x + s^2 \sigma_y + cs \tau_{xy}$$

$$\sigma_2 = s^2 \sigma_x + c^2 \sigma_y - cs \tau_{xy}$$

$$\tau_{12} = -2cs\sigma_x + 2cs\sigma_y + (c^2 - s^2)\tau_{xy}$$

- Εκφράζουμε τις $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$ ως προς τις $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$

$$\varepsilon_1 = (c^2 S_{11} + s^2 S_{12})\sigma_x + (s^2 S_{11} + c^2 S_{12})\sigma_y + (S_{11} - S_{12})cs\tau_{xy}$$

$$\varepsilon_2 = (c^2 S_{12} + s^2 S_{22})\sigma_x + (s^2 S_{12} + c^2 S_{22})\sigma_y + (S_{12} - S_{22})cs\tau_{xy}$$

$$\gamma_{12} = -2csS_{66}\sigma_x + 2csS_{66}\sigma_y + (c^2 - s^2)S_{66}\tau_{xy}$$

Και αναδιατάσσοντας έχουμε:

$$\varepsilon_1 = (c^2 S_{11} + s^2 S_{12})\sigma_x + (s^2 S_{11} + c^2 S_{12})\sigma_y + (S_{11} - S_{12})2cs\tau_{xy}$$

$$\varepsilon_2 = (c^2 S_{12} + s^2 S_{22})\sigma_x + (s^2 S_{12} + c^2 S_{22})\sigma_y + (S_{12} - S_{22})2cs\tau_{xy}$$

$$\gamma_{12} = -2csS_{66}\sigma_x + 2csS_{66}\sigma_y + (c^2 - s^2)S_{66}\tau_{xy}$$

- Εκφράζουμε τις $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ ως προς $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ με αρνητικό $[T_\varepsilon^-]$

π.χ. για την εχ είναι: $\varepsilon_x = c^2 \varepsilon_1 + s^2 \varepsilon_2 - cs\gamma_{12}$

Αναπτύσσοντας και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει η ακόλουθη σχέση μετασχηματισμού για τους όρους ευκαμψίας:

$$\begin{Bmatrix} \overline{S_{11}} \\ \overline{S_{22}} \\ \overline{S_{12}} \\ \overline{S_{66}} \\ \overline{S_{16}} \\ \overline{S_{26}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c^4 & s^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ s^4 & c^4 & 2c^2s^2 & c^2s^2 \\ c^2s^2 & c^2s^2 & c^4 + s^4 & -c^2s^2 \\ 4c^2s^2 & 4c^2s^2 & -8c^2s^2 & (c^2 - s^2)^2 \\ 2c^3s & -2cs^3 & 2(cs^3 - c^3s) & cs^3 - c^3s \\ 2cs^3 & -2c^3s & 2(c^3s - cs^3) & c^3s - cs^3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{12} \\ S_{66} \end{Bmatrix} \quad (2.63)$$

ή υπό συμβολική μορφή:

$$\overline{S}_{ij} = [T_S] S_{ij}$$

Οι παρατηρήσεις για τους όρους ακαμψίας \overline{Q}_{ij} ισχύουν επίσης και για τους όρους ευκαμψίας \overline{S}_{ij} . Οι διαφορές μεταξύ των μητρώων μετασχηματισμού $[T_S]$ και $[T_Q]$ οφείλονται στον ορισμό της διαμητικής παραμόρφωσης $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$. Τελικά, η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων με όρους ευκαμψίας γίνεται στο στραμμένο σύστημα x-y η παρακάτω:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{S_{11}} & \overline{S_{12}} & \overline{S_{16}} \\ \overline{S_{12}} & \overline{S_{22}} & \overline{S_{26}} \\ \overline{S_{16}} & \overline{S_{26}} & \overline{S_{66}} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.64)$$

2.9 Μηχανικές σταθερές υλικού

Για να έχουμε μία εικόνα για τη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού οι ίνες του οποίου σχηματίζουν γωνία θ με το σύστημα x-y, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τα μέτρα ελαστικότητας, τους λόγους Poisson και το μέτρο διάτμησης που αντιστοιχούν στο στραμμένο σύστημα x-y. Οι ιδιότητες αυτές στο στραμμένο σύστημα x-y ονομάζονται μηχανικές σταθερές του υλικού και ορίζονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{12} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & \nu_{sx}/G_{xy} \\ -\nu_{xy}/E_x & 1/E_y & \nu_{sy}/G_{xy} \\ \nu_{xs}/E_x & \nu_{ys}/E_y & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

Εμφανίζονται οι όροι ν_{xs} και ν_{ys} που εμπλέκουν κύριες και διατμητικές παραμορφώσεις. Οι όροι αυτοί δεν υπάρχουν στα ισότροπα υλικά. Επίσης αξίζει να παρατηρηθεί ότι το παραπάνω μητρώο είναι συμμετρικό, αλλά οι λόγοι του Poisson είναι διαφορετικοί.

Πειραματικά, οι μηχανικές σταθερές μπορούν να προσδιοριστούν ως εξής:

- Μονοαξονικός εφελκυσμός κατά x

Ορίζονται:

$$\varepsilon_x = \overline{S}_{11}\sigma_x, \quad \varepsilon_y = \overline{S}_{21}\sigma_x, \quad \gamma_{xy} = \overline{S}_{61}\sigma_x$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\overline{S}_{21}}{\overline{S}_{11}}, \quad \nu_{xs} = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x} = \frac{\overline{S}_{61}}{\overline{S}_{11}}$$

Άρα:

$$\overline{S}_{21} = -\nu_{xy}\overline{S}_{11} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x}$$

$$\overline{S}_{61} = \nu_{xs}\overline{S}_{11} = \frac{\nu_{xs}}{E_x} \quad (2.66)$$

- Μονοαξονικός εφελκυσμός κατά y

Ορίζονται:

$$\varepsilon_x = \overline{S}_{12}\sigma_x, \quad \varepsilon_y = \overline{S}_{22}\sigma_x, \quad \gamma_{xy} = \overline{S}_{62}\sigma_x$$

$$\nu_{yx} = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{\overline{S}_{12}}{\overline{S}_{22}}, \quad \nu_{ys} = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_y} = \frac{\overline{S}_{62}}{\overline{S}_{22}}$$

Άρα:

$$\overline{S}_{12} = -\nu_{yx}\overline{S}_{22} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \overline{S}_{62} = \nu_{ys}\overline{S}_{22} = \frac{\nu_{ys}}{E_y} \quad (2.67)$$

- Καθαρή διάτμηση

Ορίζονται:

$$\varepsilon_x = \overline{S}_{16}\tau_{xy}, \quad \varepsilon_y = \overline{S}_{26}\tau_{xy}, \quad \gamma_{xy} = \overline{S}_{66}\tau_{xy}$$

$$\nu_{sx} = \frac{\varepsilon_x}{\gamma_{xy}} = \frac{\overline{S}_{16}}{\overline{S}_{66}}, \quad \nu_{sy} = \frac{\varepsilon_y}{\gamma_{xy}} = \frac{\overline{S}_{26}}{\overline{S}_{66}}$$

Άρα:

$$\begin{aligned}\overline{S}_{16} &= \nu_{sx} \overline{S}_{66} = \frac{\nu_{sx}}{G_{xy}} \\ \overline{S}_{26} &= \nu_{sy} \overline{S}_{66} = \frac{\nu_{sy}}{G_{xy}}\end{aligned}\quad (2.68)$$

2.10 Κριτήρια αστοχίας

2.10.1 Γενικά

Από μια απλή σύγκριση μεταξύ των συνήθων υλικών (ισότροπα) και των συνθέτων υλικών (ορθότροπα ή ανισότροπα) ως προς τις μηχανικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά τους, προκύπτει η ανάγκη καθορισμού νέων κριτηρίων αστοχίας για τα σύνθετα υλικά.

Στα συνήθη υλικά (ισότροπα):

- Ίδιες ιδιότητες προς κάθε κατεύθυνση.
- Δεδομένου ότι ο λόγος Poisson είναι συνήθως $\nu=0.3$, χρειαζόμαστε μόνο την τιμή του μέτρου ελαστικότητας E .
- Επίσης, αρκεί να γνωρίζουμε την σ_y διότι $\tau_y=0.5\sigma_y$ έως $0.6\sigma_y$ (όπου η τάση διαρροής σ_y αντιστοιχεί σε μονοαξονικό εφελκυσμό).
- Εκτιμάται η τάση σε κάποια θέση αστοχίας του υλικού και γίνεται ο έλεγχος

Στα σύνθετα υλικά (ορθότροπα ή ανισότροπα)

- Οι ιδιότητες είναι συνάρτηση του προσανατολισμού στο γενικό σύστημα $x-y$.
- Απαιτούνται 4 ελαστικές σταθερές για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς.
- Επίσης, απαιτούνται 6 σταθερές για τον έλεγχο αστοχίας.
- Τα κριτήρια αστοχίας ισότροπων υλικών δεν μπορούν να εφαρμοστούν απ' ευθείας στα σύνθετα υλικά.

Ορίζονται οι ακόλουθες κρίσιμες τάσεις αστοχίας:

- X τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά x
- X' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά x
- Y τάση αστοχίας σε μονοαξονικό εφελκυσμό κατά y
- Y' τάση αστοχίας σε μονοαξονική θλίψη κατά y
- S τάση αστοχίας σε καθαρή διάτμηση

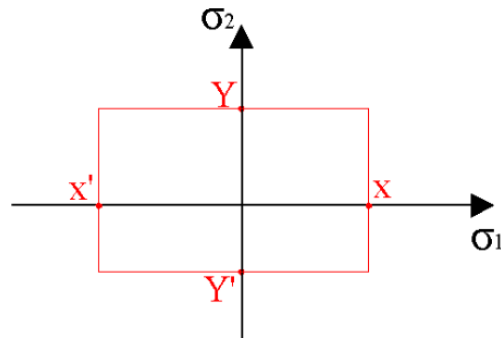
Οι παραπάνω κρίσιμες τάσεις προσδιορίζονται πειραματικά.

2.10.2 Κριτήριο μέγιστης τάσης

Διατυπώθηκε υπό του Jenkins (1920) για τα ορθότροπα υλικά και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου Rankine για τα ισότροπα. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία λαμβάνει χώρα όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X' < \sigma_1 < X, \quad Y' < \sigma_2 < Y, \quad |\tau_{12}| < S \quad (2.69)$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης μπορεί να παρασταθεί γραφικά στο επίπεδο (σ_1, σ_2) με $\tau_{12} = 0$.

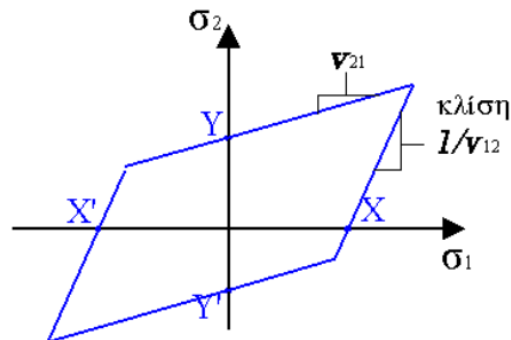


Σχήμα 2.23: Κριτήριο μέγιστης τάσης

2.10.3 Κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης

Διατυπώθηκε από τον Waddoups (1967) και αποτελεί επέκταση του κριτηρίου St. Venant για τα ισότροπα υλικά. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, αστοχία του υλικού επέρχεται όταν δεν ικανοποιείται έστω μία από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$e'_x \langle \varepsilon_1 \langle e_x, \quad e'_y \langle \varepsilon_2 \langle e_y, \quad |\gamma_{12}| \langle \gamma_s \quad (2.70)$$



Σχήμα 2.24: Γραφική απεικόνιση κριτηρίου μέγιστης παραμόρφωσης

Μια άλλη διατύπωση του κριτηρίου αυτού συναρτήσει των κρίσιμων τάσεων είναι:

$$\frac{X'}{E_1} \langle \varepsilon_1 \langle \frac{X}{E_1}, \quad \frac{Y'}{E_2} \langle \varepsilon_2 \langle \frac{Y}{E_2}, \quad |\gamma_{12}| \langle \frac{S}{G_{12}} \quad (2.71)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\nu_{12}\sigma_2}{E_1} = \frac{X}{E_1} \quad \rightarrow \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_1 - X}{\nu_{12}} \quad (\text{κλίση } 1/\nu_{12})$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\nu_{21}\sigma_1}{E_2} = \frac{Y}{E_2} \quad \rightarrow \quad \sigma_2 = Y + \nu_{21}\sigma_1 \quad (\text{κλίση } \nu_{21})$$

2.10.4 Κριτήριο Tsai-Hill

Ο Hill (1950) παρουσίασε μια θεωρία αστοχίας για ανισότροπα υλικά:

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{31}^2 + 2N\tau_{12}^2 \leq 1$$

Όπου οι G, H, F, L, M και N είναι σταθερές του υλικού. Το κριτήριο αυτό είναι:

- Τετραγωνικό κριτήριο και παρόμοιο με το κριτήριο von-Mises για ισότροπα.
- Το von-Mises συνδέεται με την ενέργεια στρέβλωσης.
- Στα ανισότροπα υλικά, η ενέργεια στρεβλώσεως και η ενέργεια μεταβολής όγκου δεν μπορούν να απομονωθούν διότι υπάρχει αλληλεπίδραση.
- Οι έξι σταθερές υλικού μπορούν να αντιστοιχισθούν με τις τάσεις αστοχίας.
- Το κριτήριο αυτό είναι γενικό για τρισδιάστατη καταπόνηση.

Στη συνέχεια, ο Tsai (1968) συνέδεσε τις σταθερές υλικού στο κριτήριο Hill με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας.

Εφαρμόζοντας μόνο τάση σ_1 έχουμε $(G+H)X^2=1$ οπότε:

$$G+H = \frac{1}{X^2} \quad (2.72)$$

Εφαρμόζοντας μόνο τάση σ_2 προκύπτει

$$F+H = \frac{1}{Y^2} \quad (2.73)$$

Εφαρμόζοντας μόνο τάση σ_3 προκύπτει

$$F+G = \frac{1}{Z^2} \quad (2.74)$$

Όπου Z είναι η τάση αστοχίας κατά τη διεύθυνση 3. Επιλύοντας τις 3 παραπάνω εξισώσεις ως προς τις σταθερές H, G και F προκύπτει

$$2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \quad (2.75)$$

$$2G = \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} \quad (2.76)$$

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} \quad (2.77)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας μόνο τάσεις τ_{23} , τ_{31} , τ_{12} , προκύπτουν αντίστοιχα

$$2L = \frac{1}{S_{yz}^2} \quad (2.78)$$

$$2M = \frac{1}{S_{zx}^2} \quad (2.79)$$

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (2.80)$$

Για ένα σύνθετο υλικό με προσανατολισμένες ίνες κατά τη διεύθυνση x, οι ιδιότητες κατά y είναι ίδιες με αυτές κατά z και συνεπώς:

$$2H = \frac{1}{X^2}$$

$$2G = \frac{1}{X^2}$$

$$2F = \frac{2}{Y^2} - \frac{1}{X^2} \quad (2.81)$$

Το κριτήριο Tsai-Hill εκφρασμένο στο επίπεδο απλοποιείται στη μορφή

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 + 2N\tau_{12}^2 \leq 1 \quad (2.82)$$

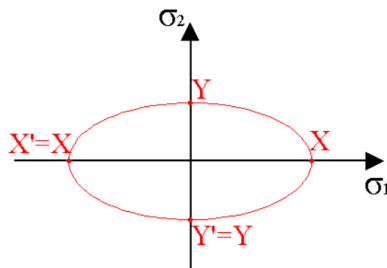
και αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.81) στην (2.82) έχουμε:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} \leq 1 \quad (2.83)$$

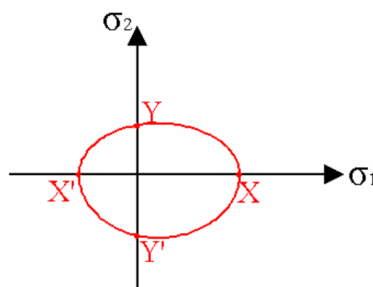
Αστοχία υλικού συμβαίνει όταν δεν πραγματοποιείται η παραπάνω σχέση.

Παρατηρήσεις:

- Υπάρχει αλληλεπίδραση ορθών και διατμητικών τάσεων.
- Το κριτήριο μπορεί να εφαρμοσθεί επίσης όταν $X \neq X'$ και $Y \neq Y'$, αν στη σχέση (2.83) αντικατασταθούν οι αντίστοιχες κρίσιμες τάσεις όταν $\sigma_1 < 0$ και $\sigma_2 < 0$.
- Το κριτήριο αυτό στο επίπεδο (σ_1, σ_2) με $\tau_{12} = 0$ αναπαρίσταται με συμμετρική έλλειψη όταν $X = X'$ και $Y = Y'$ και με στρεβλή έλλειψη όταν $X \neq X'$ και $Y \neq Y'$.



Σχήμα 2.25: Συμμετρική έλλειψη



Σχήμα 2.26: Στρεβλή έλλειψη

2.10.5 Κριτήριο Tsai-Wu

Το κριτήριο αυτό παρουσιάστηκε από τους Tsai και Wu (1971) ως μια πλέον γενικευμένη μορφή του κριτηρίου Tsai-Hill. Εκφράζεται με τη μορφή τάσεων και παραμορφώσεων ως εξής:

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i \leq 1$$

$$G_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j + G_i\varepsilon_i \leq 1 \quad (2.84)$$

Θεωρώντας την πρώτη έκφραση ως προς τις τάσεις και αναπτύσσοντας προκύπτει

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{16}\sigma_1\tau_{12} + 2F_{26}\sigma_2\tau_{12} + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\tau_{12} \leq 1 \quad (2.85)$$

Η αλλαγή προσήμου της διατμητικής τάσης τ_{12} δεν πρέπει να επηρεάζει το κριτήριο, άρα οι όροι $F_{16}=F_{26}=F_6=0$.

Έτσι η σχέση (2.84) απλοποιείται:

$$F_{11}\sigma_1^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + \leq 1 \quad (2.86)$$

Οι έξι παράμετροι που περιέχονται στη σχέση (2.83) συσχετίζονται με τις κρίσιμες τάσεις αστοχίας του υλικού μέσω απλών πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού, θλίψης και καθαρής διάτμησης.

Εφαρμόζοντας μόνο $\sigma_1 = X$ ή $\sigma_1 = X'$ έπεται

$$F_{11}X^2 + F_1X = 1$$

$$F_{11}X'^2 + F_1X' = 1$$

Απ' όπου προκύπτει

$$F_{11} = \frac{1}{XX'} \quad (2.87)$$

$$F_1 = \frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \quad (2.88)$$

Ομοίως, εφαρμόζοντας μόνο $\sigma_2 = Y$ ή $\sigma_2 = Y'$ έπεται

$$F_{22}Y^2 + F_2Y = 1$$

$$F_{22}Y'^2 + F_2Y' = 1$$

απ' όπου προκύπτει

$$F_{22} = \frac{1}{YY'} \quad (2.89)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y} - \frac{1}{Y'} \quad (2.90)$$

Τέλος, εφαρμόζοντας μόνο $\tau_{12}=S$ έπεται $F_{66}S^2=1$ απ' όπου προκύπτει

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (2.91)$$

Παραμένει ακόμα προς υπολογισμό η σταθερά F_{12} για την οποία απαιτείται ένα διαξονικό πείραμα. Μπορούμε όμως να εκτιμήσουμε θεωρητικά την F_{12} με τον ακόλουθο τρόπο. Η εξίσωση $F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i = 1$ είναι μία κωνική επιφάνεια. Θεωρώντας την τομή της με το επίπεδο $\tau_{12}=0$ έχουμε μία καμπύλη της μορφής

$$a \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \dots = 0$$

$$|\Delta| = b^2 - 4ac$$

Το πρόσημο της διακρίνουσας $|\Delta| = 4F_{12}^2 - 4F_{11}F_{22}$ χαρακτηρίζει την μορφή της καμπύλης, η οποία είναι έλλειψη για $|\Delta| < 0$, υπερβολή για $|\Delta| > 0$ και παραβολή για $|\Delta| = 0$. Οι μορφές της παραβολής και της υπερβολής αντιστοιχούν θεωρητικά σε

υλικό με άπειρη αντοχή. Συνεπώς η μόνη αποδεκτή μορφή της καμπύλης είναι η έλλειψη με $|\Delta| < 0$. Αδιαστατοποιώντας την σταθερά F_{12} ως εξής:

$$F_{12}^* = \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{11}F_{22}}}$$

Προκύπτει ότι για να είναι η μορφή της καμπύλης έλλειψη θα πρέπει $-1 < F_{12}^* < 1$. Έχουμε λοιπόν προσδιορίσει ένα κάτω όριο για τη σταθερά F_{12} . Ορίζοντας επίσης $x = \sigma_1 \sqrt{F_{11}}$, $y = \sigma_2 \sqrt{F_{22}}$, $z = \tau_{12} \sqrt{F_{66}}$, το κριτήριο γίνεται:

$$x^2 + 2F_{12}^* xy + y^2 + z^2 + F_1^* x + F_2^* y \leq 1$$

$$\text{Όπου } F_1^* = \frac{F_1}{\sqrt{F_{11}}} = \frac{X' - X}{\sqrt{XX'}}, \quad F_2^* = \frac{F_2}{\sqrt{F_{22}}} = \frac{Y' - Y}{\sqrt{YY'}}$$

Στο επίπεδο $z=0$ (δηλαδή για $\tau_{12}=0$) έχουμε:

$$x^2 + 2F_{12}^* xy + y^2 + F_1^* x + F_2^* y = 1$$

Και συγκρίνοντας με το κριτήριο von-Mises για ισότροπα υλικά που είναι

$$x^2 - xy + y^2 = 1$$

Παρατηρούμε ότι για τα ισότροπα υλικά είναι $F_{12}^* = -\frac{1}{2}$. Άρα η τιμή $F_{12}^* = -\frac{1}{2}$ είναι

επίσης μία αποδεκτή τιμή για τα σύνθετα υλικά.

Θεωρώντας την έκφραση του κριτηρίου Tsai-Wu ως προς τις παραμορφώσεις (2.84), μπορούμε να προσδιορίσουμε τις σταθερές G_{ij} και G_i αντικαθιστώντας τις εκφράσεις $\sigma_1 = Q_{11}\varepsilon_1 + Q_{12}\varepsilon_2$, $\sigma_2 = Q_{12}\varepsilon_1 + Q_{22}\varepsilon_2$, $\tau_{12} = Q_{66}\gamma_{12}$ στην αρχική μορφή (2.86). Από αυτήν προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές για τις σταθερές G_{ij} και G_i .

$$\begin{aligned} G_{11} &= F_{11}Q_{11}^2 + 2F_{12}Q_{11}Q_{12} + F_{22}Q_{12}^2 \\ G_{22} &= F_{11}Q_{12}^2 + 2F_{12}Q_{12}Q_{22} + F_{22}Q_{22}^2 \\ G_{12} &= F_{11}Q_{11}Q_{12} + 2F_{12}(Q_{12}Q_{22} + Q_{12}^2) + F_{22}Q_{12}Q_{22} \\ G_{66} &= F_{66}Q_{66}^2 \\ G_1 &= F_1Q_{11} + F_2Q_{12} \\ G_2 &= F_1Q_{12} + F_2Q_{22} \end{aligned} \quad (2.92)$$

Και η αντίστοιχη έκφραση της (2.86) είναι:

$$G_{11}\varepsilon_1^2 + 2G_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 + G_{22}\varepsilon_2^2 + G_{66}\gamma_{12}^2 + G_1\varepsilon_1 + G_2\varepsilon_2 \leq 1 \quad (2.93)$$

Τα πλεονεκτήματα της έκφρασης του κριτηρίου Tsai-Wu ως προς τις παραμορφώσεις είναι:

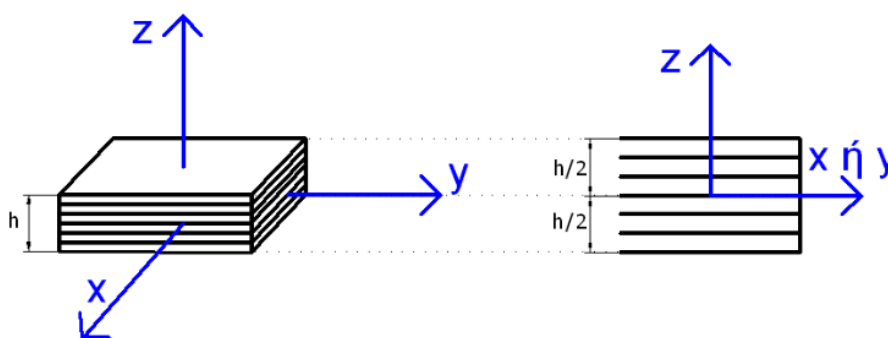
- Οι σταθερές G_{ij} και G_i είναι αδιάστατες
- Οι παραμορφώσεις είναι σταθερές ή μεταβάλλονται γραμμικά σε μία διαστρωμάτωση και συνεπώς ο έλεγχος των παραμορφώσεων είναι πιο ευχερής από τον έλεγχο των τάσεων σε κάθε στρώση.

2.11 Μεμβρανική ακαμψία

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκαν οι ιδιότητες μιας μεμονωμένης στρώσης με προσανατολισμένες ίνες. Το πάχος της στρώσης είναι πολύ μικρότερο των άλλων δύο διαστάσεων, γι' αυτό και έχουμε μία επίπεδη εντατική κατάσταση. Στην πράξη, ενώνουμε πολλές στρώσεις μαζί, ώστε να σχηματίσουμε μία λεπτή πλάκα, ένα κέλυφος ή ένα δομικό μέλος. Μορφώνουμε λοιπόν μία διαστρωμάτωση θέτοντας πολλές στρώσεις μαζί σε συνεργασία κάθε μία εκ των οποίων έχει τις δικές της ιδιότητες και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως πάχος, κατεύθυνση ινών, συνδετικό υλικό – ίνες και λόγο συμμετοχής όγκου ινών.

Δεχόμαστε σταθερή παραμόρφωση κατά το πάχος της διαστρωμάτωσης, δηλαδή είναι:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x(z) &= \varepsilon_x(0) = \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y(z) &= \varepsilon_y(0) = \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}(z) &= \gamma_{xy}(0) = \gamma_{xy}^0\end{aligned}\tag{2.94}$$



Σχήμα 2.27: Σύστημα αξόνων υλικού διαστρωμάτωσης

Επίσης, ορίζουμε βοηθητικά την μέση τάση $\bar{\sigma}$, οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_x &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \\ \bar{\sigma}_y &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \\ \bar{\tau}_{xy} &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz\end{aligned}\tag{2.95}$$

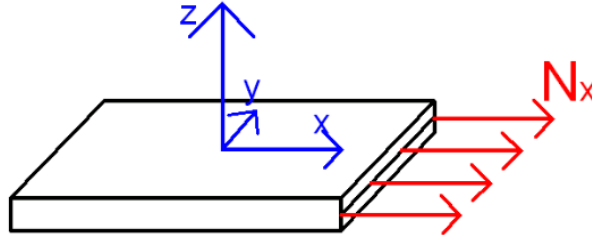
και αντικαθιστώντας τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων $\{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\}$, π.χ. στη πρώτη εκ των (2.95) προκύπτει:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_x &= \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{11}\varepsilon_x + \bar{Q}_{12}\varepsilon_y + \bar{Q}_{16}\gamma_{xy}) dz = \\ &= \frac{1}{h} \left[\int \bar{Q}_{11} dz \varepsilon_x + \int \bar{Q}_{12} dz \varepsilon_y + \int \bar{Q}_{16} dz \gamma_{xy} \right] = \frac{1}{h} (A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy})\end{aligned}$$

Μεταθέτοντας στο αριστερό μέλος της παραπάνω σχέσεως το πάχος h και ορίζοντας την μεμβρανική δύναμη N_x , ως το γινόμενο $\bar{\sigma}_x h$ έχουμε την έκφραση:

$$N_x = \bar{\sigma}_x h = A_{11}\varepsilon_x + A_{12}\varepsilon_y + A_{16}\gamma_{xy}$$

Η μεμβρανική δράση N_x είναι αξονική δύναμη ανά μονάδα μήκους που εφαρμόζεται στο μέσο επίπεδο της διαστρωμάτωσης και ουσιαστικά αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση. Καθ' όμοιο τρόπο ορίζονται οι μεμβρανικές δυνάμεις N_y και N_{xy} .



Σχήμα 2.28: Μεμβρανική δύναμη N_x σε μία διαστρωμάτωση

Ορίζοντας λοιπόν τους όρους μεμβρανικής ακαμψίας

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz \quad \text{όπου } i, j = 1, 2, 6 \quad (2.96)$$

Μπορούμε να γράψουμε την σχέση τάσεων παραμορφώσεων που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση των τάσεων ως προς το πάχος της διαστρωμάτωσης ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (2.97)$$

όπου οι όροι A_{ij} λέγονται μεμβρανικές ακαμψίες της διαστρωμάτωσης και έχουν μονάδες κατανεμημένης δύναμης.

Αντιστρέφοντας την παραπάνω σχέση παίρνουμε

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.98)$$

όπου οι όροι α_{ij} είναι οι μεμβρανικοί όροι ευκαμψίας της διαστρωμάτωσης.

Αν κάθε στρώση k έχει πάχος t_k τότε η σχέση (2.96) γίνεται

$$A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k t_k \quad (2.99)$$

3 Πειραματική διερεύνηση

3.1 Γενικά

Η βασική ιδέα προς πειραματική διερεύνηση στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν μία μορφή εφελκυστικής σύνδεσης δύο χαλύβδινων ελασμάτων με χρήση ινοπλισμένου πολυμερούς, με επιπλέον ενίσχυση μέσω πλέξης από δέσμες ινών υάλου. Ελήφθη η απόφαση να χρησιμοποιηθούν υλικά με μικρό πάχος, και γι' αυτό οι διαστάσεις των ελασμάτων επιλέχθηκαν να είναι 263mm (μηκός) x 68mm (πλάτος) x 2mm (πάχος), ποιότητας χάλυβα S235. Ως συνδετικό υλικό μεταξύ των δύο χαλύβδινων ελασμάτων, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το υαλοϋφασμα δύο διευθύνσεων (0-90) σε συνδυασμό με την πολυεστερική ρητίνη, καθώς είναι υλικά που έχουν ευρεία εφαρμογή, σχετικά υψηλή αντοχή, και σχετικά χαμηλό κόστος.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί η σύνδεση με κάποιες διαφορετικές παραλλαγές, στις οποίες καταλήξαμε σταδιακά. Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα δοκίμια που θα παρουσιαστούν παρακάτω, κατασκευάστηκαν και άλλα δύο (S1 και S2), τα οποία είχαν πιο πολύ χαρακτήρα εξοικείωσης με τη διαδικασία παραγωγής, αλλά και σαν ευκαιρία να συλλεχθούν κάποιες πρώτες πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές φάνηκαν χρήσιμες στη διαδικασία ανασχεδιασμού, που οδήγησε στα τελικά δοκίμια, και ουσιαστικά αποτέλεσαν την πρώτη επαφή με το υλικό της σύνδεσης και τη συμπεριφορά του.

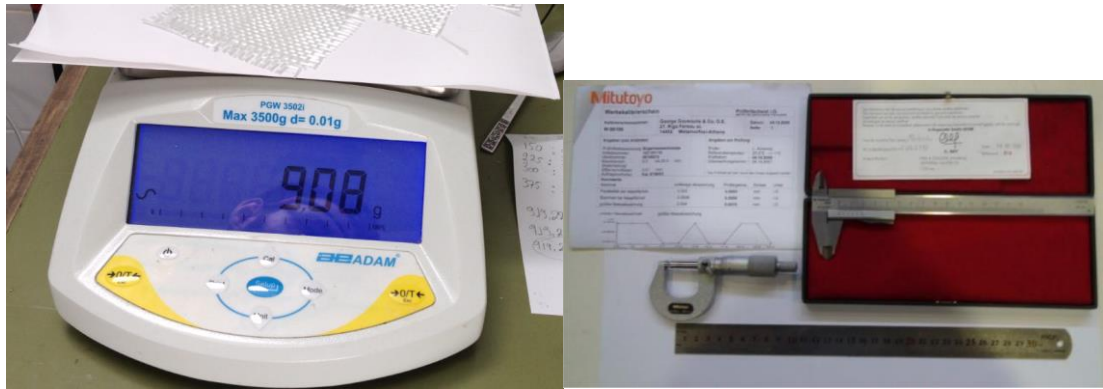
Επίσης, όπως θα παρουσιαστεί σε παρακάτω ενότητα, αποφασίστηκε να γίνει και δοκιμή του ινοπλισμένου πολυμερούς, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 527-1:1996, έτσι ώστε να είναι στη διάθεση μας πληροφορίες για το υλικό όπως το μέτρο ελαστικότητας E (modulus of elasticity) οι οποίες θα ήταν αδιευκρίνιστες χωρίς τη δοκιμή αυτή. Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό, θα αναφερθούν τα υλικά, ο εξοπλισμός, και τα μηχανήματα του Εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων καθώς και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, και θα γίνει μία στατιστική επεξεργασία αυτών.

3.2 Υλικά, εξοπλισμός και μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας έχουν να κάνουν τόσο με τη φάση παραγωγής των δοκιμίων, όσο και με τη φάση των μετρήσεων και των πειραματικών ελέγχων. Παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα καθώς παρακάτω γίνονται συχνές αναφορές σε αυτά.

Όργανα μετρήσεων

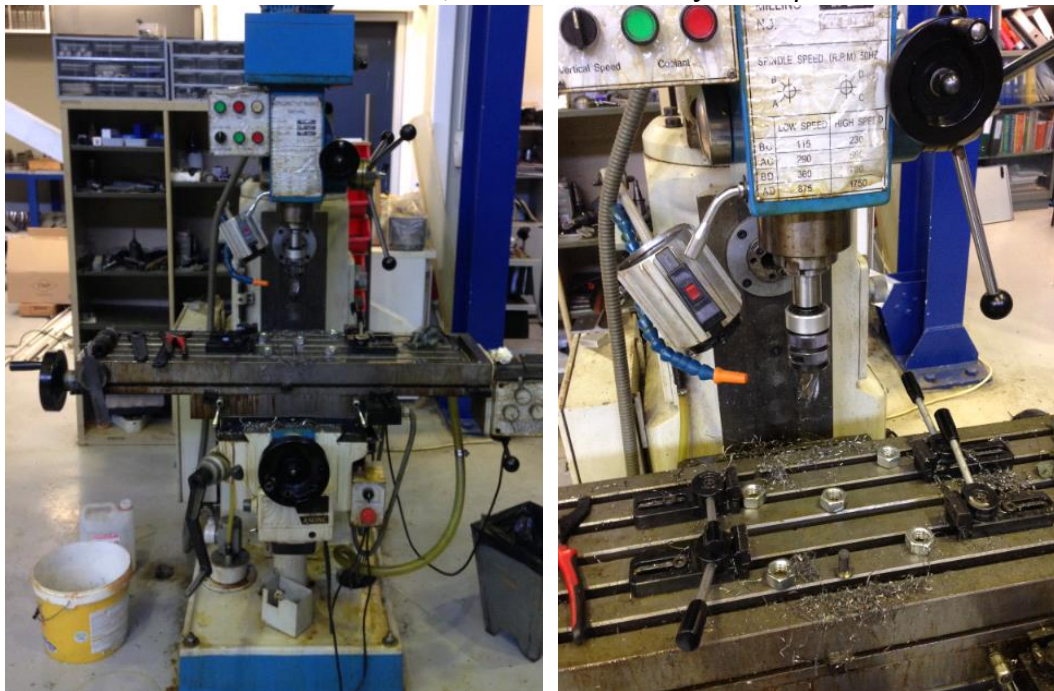
Για τις απαραίτητες μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων, καθώς και για το βάρος του σε διάφορες φάσεις της διαδικασίας παραγωγής, χρησιμοποιήθηκαν τα εικονιζόμενα διαπιστευμένα όργανα μετρήσεων (μικρόμετρο, ζυγαριά ακριβείας, κλπ)



Σχήμα 3.1: Διαπιστευμένα όργανα μετρήσεων

Φρεζοδράπανο

Για να γίνει εφικτή η ενίσχυση της σύνδεσης μέσω την πλέξης με ίνες υάλου, ήταν απαραίτητη η διάνοιξη οπών στα χαλύβδινα ελάσματα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του φρεζοδραπάνου που διαθέτει το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.2: Φρεζοδράπανο Εργαστηρίου

Μηχανή Αμμοβολής

Για να εξασφαλιστεί καλύτερη πρόσφυση του ινοπλισμένου πολυμερούς πάνω στην επιφάνεια του χαλύβδινου ελάσματος, αποφασίστηκε να καθαριστούν και να αμμοβολιστούν. Αυτό επετεύχθη με τη χρήση της μηχανής αμμοβολής του Εργαστηρίου, Express KA 400 Sandblast Cabin, που φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 3.3: Express KA 400 Sandblast Cabin

Instron LX300 (Μηχανή επιβολής εφελκυστικών φορτίων)

Για την πραγματοποίηση όλων των ελέγχων εφελκυσμού που απαιτούνταν στα πλαίσια της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Instron LX300. Η συγκεκριμένη μηχανή έχει δυνατότητα επιβολής εφελκυστικού φορτίου έως 300kN, καθώς και θλιπτικού φορτίου έως 100kN. Επιπλέον, έχει το πλεονέκτημα της υδραυλικής ρύθμισης του ύψους μεταξύ των δύο της στελεχών.



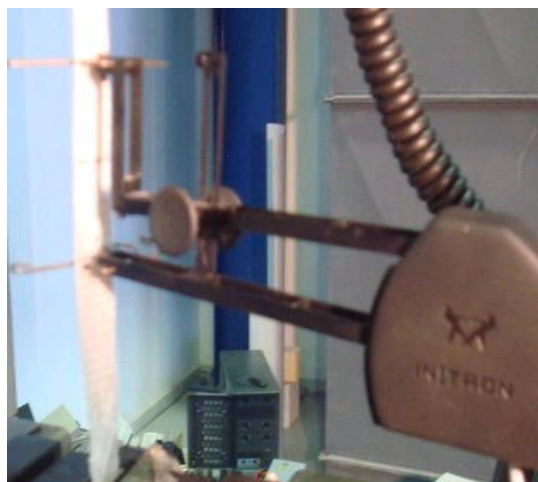
Σχήμα 3.4: Instron LX300

Λογισμικό συλλογής αποτελεσμάτων Bluehill 3

Bluehill ® 3 είναι η πιο πρόσφατη έκδοση του δημοφιλούς λογισμικού Bluehill Instron, και περιέχει βελτιώσεις και χαρακτηριστικά που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για τις απαιτήσεις του χρήστη.

Instron Extensometer

Συγκεκριμένα στη δοκιμή υλικού (σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527-1), όπου υπάρχει απαίτηση για πολύ μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις μετατοπίσεων, χρησιμοποιήθηκε το μηκυνσιόμετρο Instron Extensometer, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5: Instron Extensometer

Χαλύβδινα Ελάσματα

Ως συνδεόμενα μέλη σε όλα τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινα ελάσματα ποιότητας S235 και διαστάσεων 263mm x 68mm x 2mm.

Υαλοϋφασμα (200g/m²)

Οι στρώσεις του σύνθετου υλικού είναι υαλοϋφασμα δύο διευθύνσεων (unidirectional – 0/90), δηλαδή οι ίνες είναι προσανατολισμένες προς δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, και προσφέρει ίδια αντοχή και συμπεριφορά και κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις. Το υαλοϋφασμα αυτό αγοράστηκε από το κατάστημα της εταιρείας ΑΛΦΑΚΕΜ ΕΠΕ και είναι ποιότητας 200g/m². Η σύνθεση του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.6: Ρολό υαλοϋφάσματος 200g/m²

Δέσμες ινών υάλου (από ύφασμα 480g/m²)

Για την πλέξη χρησιμοποιήθηκαν δέσμες ινών που αποσπάστηκαν προσεκτικά από τη διαμήκη διεύθυνση ταινίας υαλοϋφάσματος ποιότητας 480g/m². Ο συγκεκριμένος τρόπος επιλέχθηκε διότι οι ίνες υάλου δεν διατίθεται σε μορφή τυλιγμένου νήματος παρά μόνο σε πολύ μεγάλες συσκευασίες. Το ύφασμα από το οποίο αποσπάστηκαν οι δέσμες ινών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.7: Δέσμες ινών υάλου (διαμήκης διεύθυνση)

Αποκολλητικό υγρό PVA

Το PVA (Polyvinyl Alcohol) είναι ένα υγρό το οποίο επιστρώνεται στη λεία επιφάνεια του καλουπιού περίπου 30 λεπτά πριν τη διαδικασία του εμποτισμού της ρητίνης, το οποίο στεγνώνει και δημιουργεί μία λεπτή διαφανή κρούστα.

Χρησιμοποιείται γιατί διευκολύνει την αποκόλληση του ινοπλισμένου πολυμερούς μετά τη σκλήρυνση.



Σχήμα 3.8: Αποκολλητικό υγρό PVA

Πολυεστερική ρητίνη

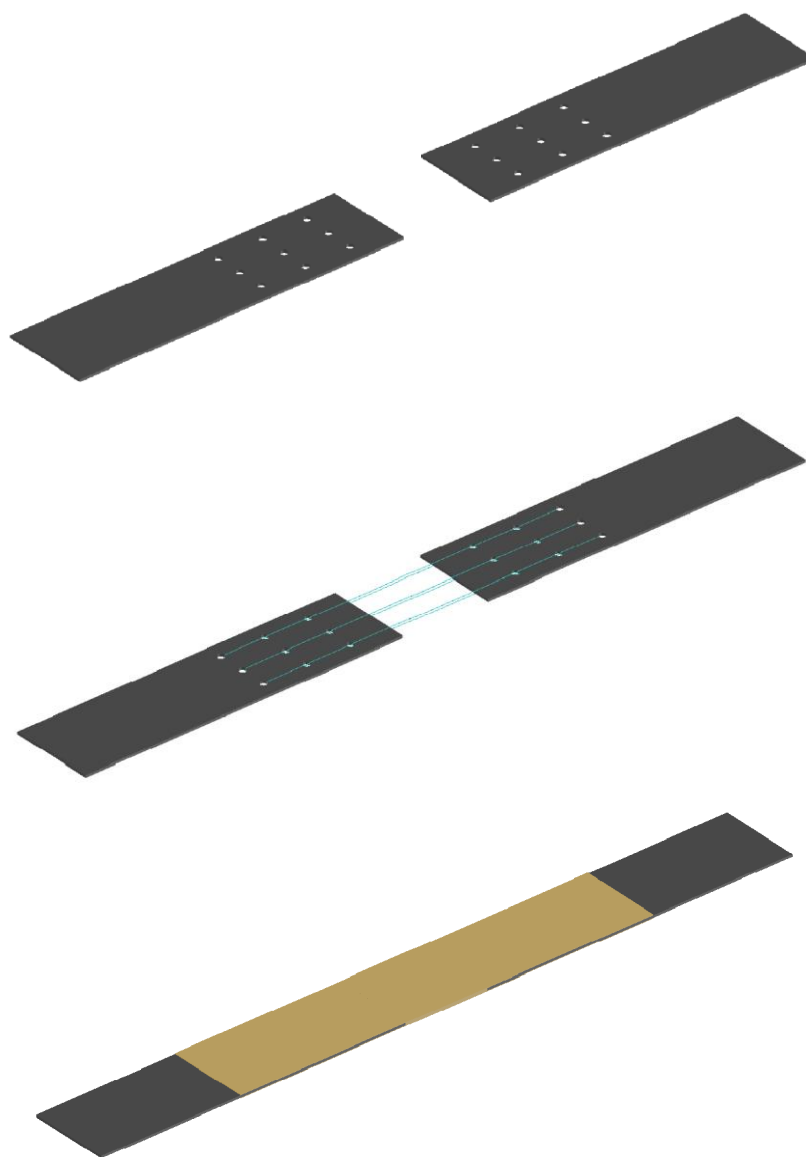
Ως μητρώο του σύνθετου υλικού χρησιμοποιήθηκε πολυεστερική ρητίνη της εταιρείας ΑΛΦΑΚΕΜ ΕΠΕ. Η σκλήρυνση της ρητίνης επιτυγχάνεται με χρήση καταλύτη σε αναλογία 2% w/w (κατά βάρος). Με τη συγκεκριμένη αναλογία καταλύτη-ρητίνης επιτυγχάνεται ικανοποιητικός χρόνος εργασιμότητας του προϊόντος, περίπου 20 λεπτά.



Σχήμα 3.9: Πολυεστερική ρητίνη της ΑΛΦΑΚΕΜ ΕΠΕ

3.3 Διαδικασίες παραγωγής δοκιμίων

3.3.1 Δοκίμια S3 - S10

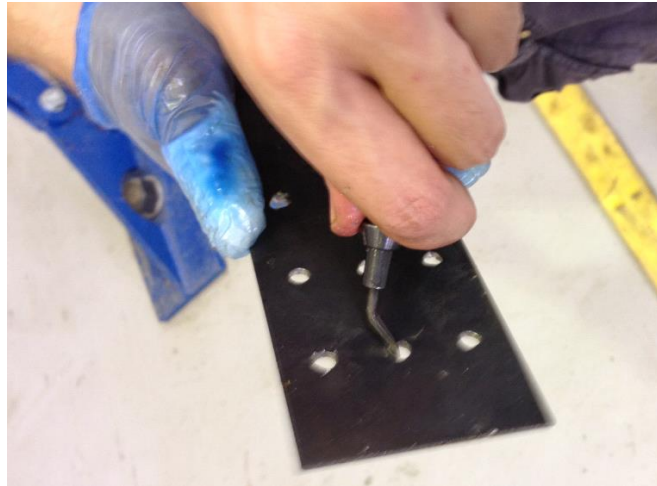


Σχήμα 3.10: Απεικόνιση τυπικής ενισχυμένης εφελκυστικής σύνδεσης

Τα δοκίμια S3 έως S10 είναι τα βασικά δοκίμια της παρούσας εργασίας. Αν και η φιλοσοφία κατασκευής τους είναι παρόμοια, είναι ελαφρώς διαφορετικά μεταξύ τους καθώς χωρίζονται σε κατηγορίες λόγω παραλλαγών, οι οποίες θα αναλυθούν σε παρακάτω ενότητα. Παρά το γεγονός αυτό, η διαδικασία παραγωγής όλων αυτών των δοκιμίων στηρίχθηκε στα ίδια βασικά βήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Διάνοιξη οπών στα χαλύβδινα ελάσματα:** για να γίνει εφικτή η πλέξη των χαλύβδινων ελασμάτων με τις δέσμες ινών υάλου, ήταν απαραίτητο να διανοιχθούν οπές σε αυτά. Αρχικά, με χρήση του υψομετρικού χαρακτήρα του Εργαστηρίου, χαράχθηκαν πάνω στα ελάσματα ευθείες που αντιστοιχούν στις στάθμες των κέντρων των οπών, δημιουργώντας έτσι ένα κανάβο. Έτσι, τοποθετώντας τα ελάσματα στο φρεζοδράπανο, ήταν εύκολο να κεντραριστεί

το τρυπάνι και να τρυπήσει το έλασμα ακριβώς στα προβλεπόμενα σημεία. Χρησιμοποιήθηκε για όλα τα ελάσματα κεφαλή τρυπανιού 6mm (όλες οι οπές είναι διαμέτρου 6mm). Κατά τη διάνοιξη των οπών ήταν απαραίτητη η χρήση του ψυκτικού υγρού που διαθέτει το φρεζοδράπανο λόγω της θερμοκρασίας που αναπτυσσόταν από την τριβή. Έπειτα, η επιφάνεια της άντυγας στην κάθε οπή εξομαλύνθηκε, καθώς υπήρχαν αρκετά αιχμηρά σημεία και ατέλειες. Κάτι τέτοιο ήταν σκόπιμο να αποφευχθεί, καθώς υπήρχε μεγάλος κίνδυνος να «τραυματιστούν» οι ίνες της πλέξης που θα διέρχονταν από τις οπές με αποτέλεσμα να απομειωθεί η «διατομή» της δέσμης και να επέλθει επίπτωση στην αντοχή.



Σχήμα 3.11: Εξομάλυνση άντυγας των οπών

- **Αμμοβολή:** για να εξασφαλιστεί καλύτερη πρόσφυση μεταξύ χαλύβδινου ελάσματος και ινοπλισμένου πολυμερούς, κρίθηκε σκόπιμο να αμμοβολιστούν τα ελάσματα στη επιφάνεια η οποία θα καλυπτόταν. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή αμμοβολής του Εργαστηρίου, και στη συνέχεια οι κόκκοι άμμου που τυχόν είχαν παραμείνει στην επιφάνεια απομακρύνθηκαν με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα.



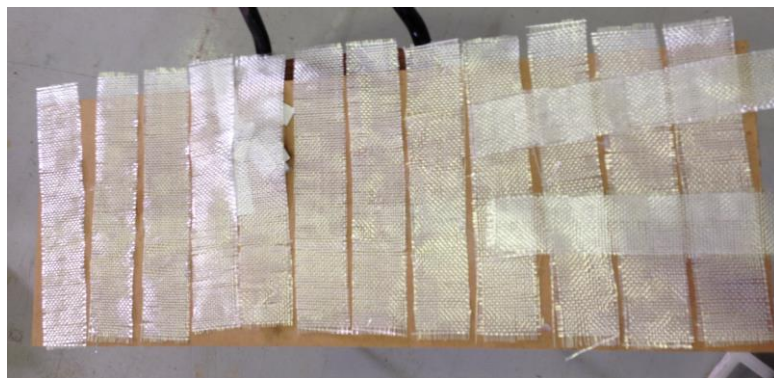
Σχήμα 3.12: Όψη αμμοβολισμένου ελάσματος (αριστερό τμήμα)

- **Κοπή υαλοϋφάσματος:** υπήρξε η ανάγκη για κοπή του υαλοϋφάσματος σε στρώσεις δύο ειδών, με διαφορετικούς σκοπούς και διαστάσεις. Πρώτον, κόπηκαν οι κυρίως στρώσεις με διαστάσεις 356mm x 68mm, οι οποίες είναι

ζωτικής σημασίας τμήματα της σύνδεσης καθώς υπερκαλύπτουν τα χαλύβδινα ελάσματα και μεταφέρουν εφελκυστικές δυνάμεις. Δεύτερον, κόπηκαν στρώσεις διαστάσεων 70mm x 68mm, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως υλικό για να γεμίσει την ενδιάμεση περιοχή μεταξύ των ελασμάτων (filler), έτσι ώστε να υπάρχει κατά το δυνατόν ομοιομορφία πάχους κατά μήκος της σύνδεσης για να μην δημιουργείται εκκεντρότητα. Για την κοπή του υφάσματος που αποτέλεσε τη διαστρωμάτωση του ινοπλισμένου πολυμερούς χρησιμοποιήθηκε κοπίδι. Διαμορφώθηκε τμήμα χαρτονιού στις προβλεπόμενες διαστάσεις και χρησιμοποιήθηκε ως οδηγός για το κοπίδι. Η διαδικασία έγινε με προσεκτικές και αργές κινήσεις έτσι ώστε να αποφευχθεί η διαταραχή των ινών του υφάσματος και ανεπιθύμητη αλλαγή του προσανατολισμού τους, πράγμα εύκολο λόγω της φύσης του υλικού. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν πλαστικά γάντια κατά την κοπή και το χειρισμό του υαλοϋφάσματος, καθώς οι ίνες γυαλιού μπορούν να σπάσουν σε πολύ μικρά τμήματα (μη ορατά δια γυμνού οφθαλμού) και να δημιουργήσουν κνησμό στο δέρμα.



Σχήμα 3.13: Κοπή υαλοϋφάσματος με το κοπίδι



Σχήμα 3.14: Έτοιμες προς χρήση στρώσεις υαλοϋφάσματος

- **Προετοιμασία των ινών και πλέξη τους:** οι δέσμες από ίνες γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν ως ενίσχυση της σύνδεσης των ελασμάτων, αποσπάστηκαν προσεκτικά από ταινία υαλοϋφάσματος ποιότητας 480g/m². Η ποιότητα αυτή επιλέχθηκε γιατί χαρακτηρίζεται από σχετικά μεγάλο βάρος ανά επιφάνεια υφάσματος, και άρα οι δέσμες ινών από τις οποίες αποτελείται έχουν μεγαλύτερη «διατομή». Το κάθε χαλύβδινο έλασμα έχει τρεις σειρές οπών μέσα από τις οποίες μπορεί να διέρχεται μία δέσμη, και ανάλογα με την

κατηγορία δοκιμίου, αποφασίστηκε να διέρχονται είτε δύο είτε τέσσερις δέσμες ινών ανά σειρά οπών. Δηλαδή έξι, ή δώδεκα δέσμες ανά έλασμα. Αφού λοιπόν η ταινία υφάσματος κόπηκε στο προβλεπόμενο μήκος (370mm) και οι δέσμες ινών αποσπάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε κοινή υγρή κόλλα (uhu) για να ενωθούν οι άκρες των δύο (ή τεσσάρων) δεσμών που διέρχονται από μία σειρά οπών, με σκοπό να διευκολυνθεί η διαδικασία της πλέξης και οι πολλαπλές δέσμες να διέρχονται από τις οπές ως μία.

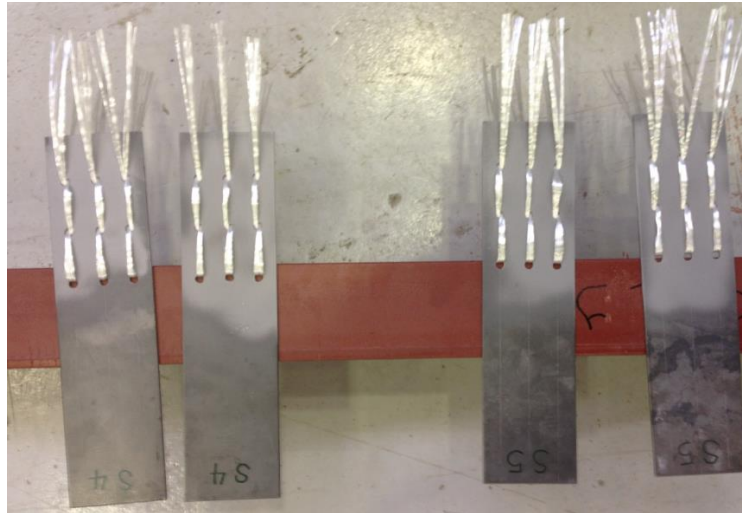


Σχήμα 3.15: Τετραπλές δέσμες μετά την ένωση των άκρων τους

Αφού στέγνωσε η κόλλα, ακολούθησε η φάση της πλέξης. Η διαδικασία αυτή έγινε με προσεκτικές και αργές κινήσεις για να περιοριστεί το φαινόμενο να κόβονται ίνες καθώς διέρχονται από τις οπές, και να έχουμε έτσι μόνο αμελητέες απώλειες στην αντοχή τους. Επίσης, γίνεται προσπάθεια οι δέσμες ινών να είναι κατά το δυνατόν τεντωμένες. Η διαδρομή που ακολουθεί η δέσμη αφού διέλθει από την πρώτη οπή θυμίζει «ημιτονοειδή» γραφική παράσταση, και στην τρίτη οπή γυρνάει και επαναλαμβάνει την αντίστοιχη διαδρομή για να καταλήξει στην πλευρά απ' όπου εισήλθε. Η πρόβλεψη του μήκους της δέσμης ήταν τέτοια ώστε να εξέχει (και από την πάνω και από την κάτω πλευρά) κατά 70mm, όσο δηλαδή αποφασίστηκε να είναι το μήκος αγκύρωσης της μέσα στην ενδιάμεση περιοχή ινοπλισμένου πολυμερούς ανάμεσα στα χαλύβδινα ελάσματα. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο μήκος αγκύρωσης των 70mm με σκοπό να αντιμετωπιστεί ο κίνδυνος ολίσθησης των δεσμών κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής εφελκυσμού.

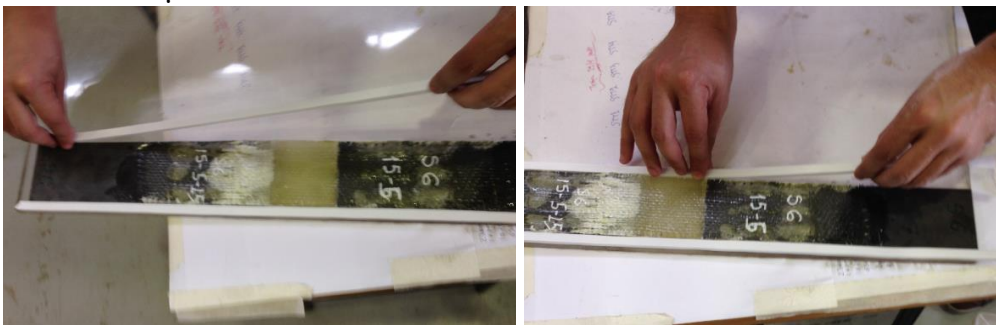


Σχήμα 3.16: Η διαδικασία της πλέξης των δεσμών



Σχήμα 3.17: Ελάσματα με την πλέξη

- **Διαμόρφωση καλουπιού – επίστρωση της επιφάνειας με PVA:** για την παραγωγή των δοκιμίων ήταν απαραίτητη μία επιφάνεια εργασίας λεία, χωρίς ατέλειες. Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν λείες, διάφανες, πλαστικές πλάκες, επιφάνειας επαρκών διαστάσεων που διαθέτει το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Με το σκεπτικό να μην συμβούν πλευρικές διαρροές ρητίνης κατά τη διάρκεια της φάσης εμποτισμού των στρώσεων, χρησιμοποιήθηκε αυτοκόλλητη μονωτική ταινία με πάχος περίπου 10mm, που εξυπηρέτησε αυτό το σκοπό ικανοποιητικά. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε ένα είδος απλού καλουπιού, διαμορφωμένο στις διαστάσεις των δοκιμίων.



Σχήμα 3.18: Διαμόρφωση καλουπιού με μονωτική ταινία

Στη συνέχεια, αφού κολλήθηκαν οι μονωτικές ταινίες, η επιφάνεια επιστρώθηκε με αποκολλητικό υγρό PVA, με τη χρήση πινέλου. Το υγρό αυτό μετά από αναμονή 20 – 30 λεπτών, στεγνώνει και δημιουργεί μία πολύ λεπτή διαφανή στρώση, που διευκολύνει την αποκόλληση των δοκιμίων μετά τη σκλήρυνση της ρητίνης.



Σχήμα 3.19: Επίστρωση επιφάνειας με PVA

- **Ανάμειξη πολυεστερικής ρητίνης με τον καταλύτη:** μετά από υπολογισμό της ποσότητας ρητίνης που απαιτεί το κάθε δοκίμιο, έγινε η προετοιμασία της ρητίνης για το επόμενο βήμα της παραγωγής, τον εμποτισμό. Χρησιμοποιήθηκε η ζυγαριά ακριβείας του Εργαστηρίου, καθώς και ένα πλαστικό δοχείο μίας χρήσεως και μία μικρή μεταλλική ράβδος για να γίνει καλή ανάδευση. Για να επιτευχθεί χρόνος εργασιμότητας 20 λεπτά για τη ρητίνη, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθεί η σωστή ποσότητα καταλύτη (2% w/w – κατά βάρος).



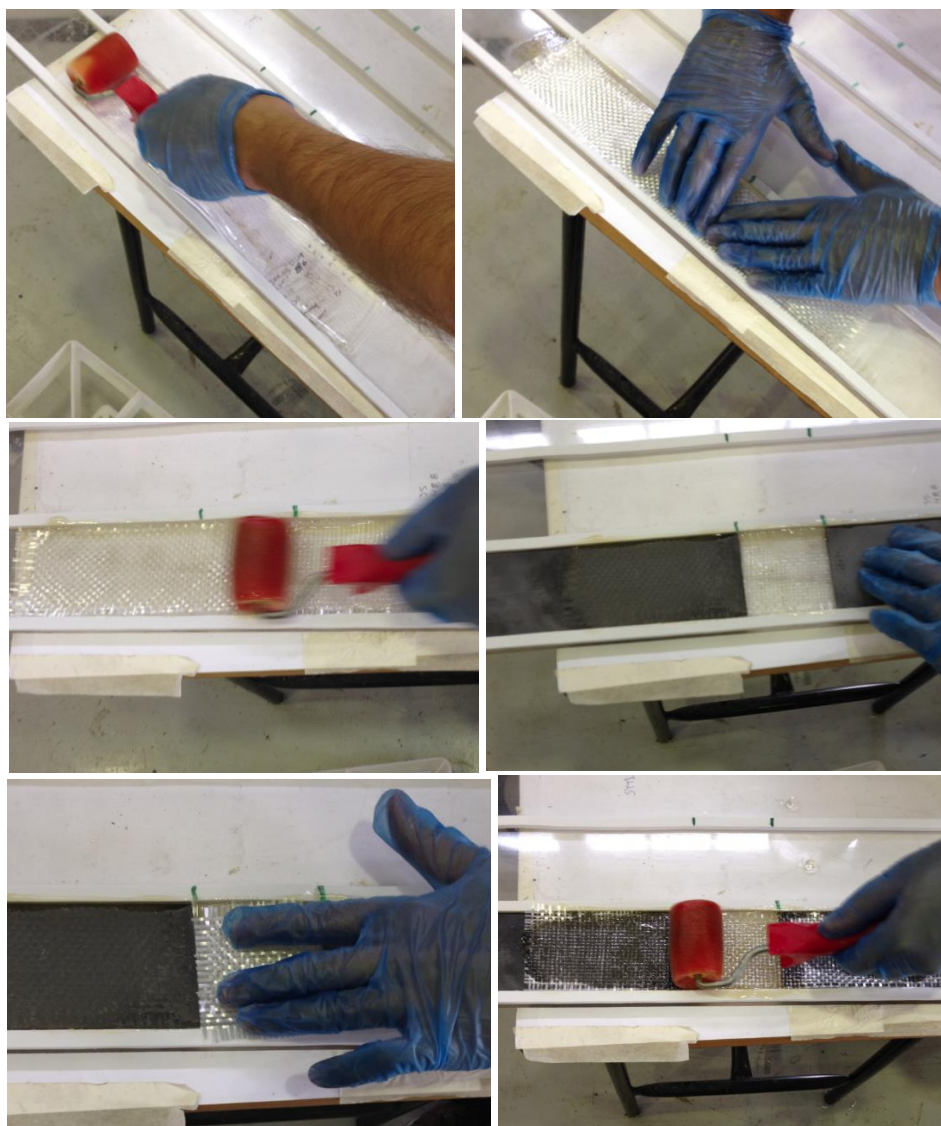
Σχήμα 3.20: Ανάμειξη ρητίνης-καταλύτη με χρήση ζυγαριάς ακριβείας

- **Τοποθέτηση στρώσεων υαλοϋφάσματος και εμποτισμός με ρητίνη:** ήταν σημαντικό το συγκεκριμένο βήμα της διαδικασίας παραγωγής να γίνει να μεν με προσοχή και επιμέλεια, αλλά και με ταχύτητα, διότι από τη στιγμή που αναμειγνύεται η ρητίνη με τον καταλύτη ο χρόνος εργασιμότητας είναι περιορισμένος (20 λεπτά) και μετά το πέρας του η ρητίνη έχει πήξει αρκετά με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί και να εμποτίσει πλήρως τις ίνες. Στο βήμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ρολό με σφουγγάρι μίας χρήσεως για την εφαρμογή και τον εμποτισμό της ρητίνης. Η σειρά των ενεργειών που απαιτήθηκαν για την παραγωγή ενός δοκιμίου με πλέξη από δέσμες ινών, είναι η εξής:
 - Επίστρωση της λείας επιφάνειας, εντός των ορίων του καλουπιού και εντός του μήκους στο οποίο θα εκτείνονται οι στρώσεις υαλοϋφάσματος, με αρκετή ποσότητα ρητίνης. Είναι απαραίτητο για να

εμποτιστεί καλά η κάτω πλευρά της πρώτης στρώσης που θα τοποθετηθεί.

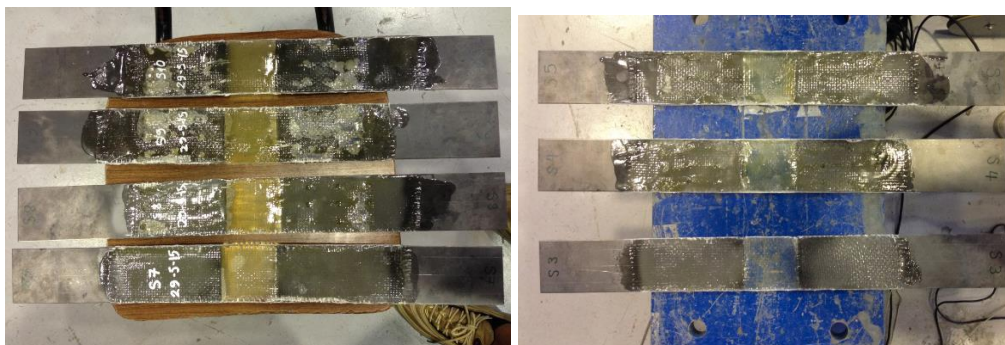
- Τοποθέτηση της πρώτης (κάτω) στρώσης υαλοϋφάσματος (διαστάσεων 356mm x 68mm). Έγιναν χειρισμοί με το ρολό ή και το χέρι (με χρήση γαντιών) ώστε να έρθει στη σωστή θέση, και εκ νέου εμποτισμός με ρητίνη.
- Τοποθέτηση των δύο ελασμάτων στη σωστή θέση (απόσταση μεταξύ τους 70mm). Οι δέσμες της πλέξης που εξέχουν από τα ελάσματα στην κάτω τους πλευρά αφήνονται ελεύθερες στα όρια της ενδιάμεσης περιοχής και εμποτίζονται με ρητίνη, ενώ αυτές που εξέχουν από την πάνω πλευρά των ελασμάτων συγκρατούνται προσωρινά με κάποιο αντικείμενο, για να αγκυρωθούν σε άλλο επίπεδο της διαστρωμάτωσης (πιο πάνω).
- Τοποθέτηση των στρώσεων για το γέμισμα της ενδιάμεσης περιοχής (filler – διαστάσεων 70mm x 68mm) και εμποτισμός με αρκετή ποσότητα ρητίνης πριν και μετά την κάθε στρώση. Σε αυτό το σημείο αφήνονται ελεύθερες μέσα στα όρια της ενδιάμεσης περιοχής οι δέσμες που εξέχουν από την πάνω πλευρά των ελασμάτων, ώστε να αγκυρωθούν, και εμποτίζονται με ρητίνη.
- Τοποθέτηση και της τελικής (πάνω) στρώσης και εμποτισμός της με αρκετή ποσότητα ρητίνης, προσέχοντας να έχουν εμποτιστεί καλά όλες οι στρώσεις του δοκιμίου.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας όλα τα δοκίμια αφέθηκαν για χρονικό διάστημα 7 ημερών για την πλήρη σκλήρυνση της ρητίνης ώστε τα δοκίμια να έχουν αναπτύξει την πλήρη αντοχή τους πριν την πειραματική δοκιμή. Η ίδια ακριβώς διαδικασία αλλά με απλούστερα βήματα εφαρμόστηκε και για τα δοκίμια χωρίς πλέξη (S3 και S7). Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων μέσα από μία σειρά φωτογραφιών.



Σχήμα 3.21: Διαδικασία παραγωγής δοκιμίων S3 – S10

- **Αποκόλληση και περιποίηση των δοκιμίων:** μετά την πάροδο του χρόνου σκλήρυνσης (curing), τα δοκίμια αποκολλήθηκαν από την λεία πλαστική επιφάνεια με προσοχή. Η αποκόλληση έγινε εύκολα λόγω του PVA που είχε επιστρωθεί νωρίτερα. Στη συνέχεια ακολούθησε «λιμάρισμα» των δοκιμίων, ώστε να εξαλειφθούν οι ατέλειες που θα μπορούσαν δυνητικά να αποτελέσουν πρόβλημα στην πρόσφυση με την αρπάγη της μηχανής επιβολής εφελκυστικών φορτίων κατά την πειραματική δοκιμή.
- **Μετρήσεις:** στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του πάχους του ινοπλισμένου πολυμερούς στην ενδιάμεση περιοχή αγκύρωσης των δεσμών μεταξύ των ελασμάτων. Αυτό έγινε για τυπικούς κυρίως λόγους, καθώς έπρεπε να εισαχθούν δεδομένα διατομής μέλους στην μηχανή επιβολής εφελκυσμού. Ελήφθησαν 20 μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα (ελάχιστο, μέγιστο και μέσο) πάχος για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 3.22: Δοκίμια μετά την αποκόλληση, έτοιμα για πειραματικό έλεγχο

3.3.2 Δοκίμια TT1 – TT5

Για την παραγωγή καθενός από τα δοκίμια TT1 έως TT5, ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του Ευρωπαϊκού προτύπου ελέγχου των ιδιοτήτων πλαστικών και ινοπλισμένων πολυμερών, ISO 527-1:1996. Εφαρμόστηκε λοιπόν η διαδικασία παραγωγής, τα βήματα της οποίας περιγράφονται, αναλύονται και επεξηγούνται παρακάτω, και είναι τα εξής:

- **Κοπή υαλοϋφάσματος:** χρησιμοποιήθηκε ψαλίδι για να κοπούν οι στρώσεις του υαλοϋφάσματος των δοκιμίων στις απαιτούμενες διαστάσεις. Η κοπή έγινε με προσοχή ώστε να προκύψουν τμήματα που περιείχαν 4 πλήρεις δέσμες ινών το κάθε ένα κατά τη διαμήκη διεύθυνση (η διεύθυνση που παραλαμβάνει τα εφελκυστικά φορτία που μας ενδιαφέρουν) και να είναι, στο μέτρο του δυνατού, απολύτως παράλληλες μεταξύ τους. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO, το πλάτος των δοκιμίων πρέπει να είναι της τάξεως των 15mm, δηλαδή αρκετά μικρό, κατά την κοπή επήλθε μία διαταραχή στις εγκάρσιες ίνες (μήκους 15mm), γεγονός που έγιναν προσπάθειες να περιοριστεί, αλλά δεν ήταν απολύτως εφικτό λόγω της φύσης του υλικού (οι ίνες γυαλιού όταν κοπούν σε πολύ μικρά μήκη χάνουν τη συνοχή τους και κατά συνέπεια χάνεται η μορφή της δέσμης στην οποία βρίσκονται αρχικά στο ύφασμα).
- **Επίστρωση λείας επιφάνειας με PVA:** λόγω του πολύ μικρού πάχους των δοκιμίων (<1mm), δεν είναι απαραίτητη ούτε και δυνατή η δημιουργία καλουπιού που θα διευκόλυνε τη διαδικασία εμποτισμού της ρητίνης χωρίς πλευρικές απώλειες. Χρειάστηκε όμως μία μεγάλη λεία επιφάνεια για να εξασφαλιστεί ότι τα δοκίμια που θα προκύψουν θα είναι ευθύγραμμα και λεία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν λείες πλαστικές διάφανες πλάκες που διέθετε το Εργαστήριο. Για να διευκολυνθεί όμως η αποκόλληση των δοκιμίων μετά τη σκλήρυνση τους, η επιφάνεια επιστρώθηκε με το αποκολλητικό υγρό PVA. Ένας άλλος λόγος που ήταν απαραίτητη η εύκολη και όσο γίνεται ανεμπόδιστη αποκόλληση των δοκιμίων, είναι το γεγονός ότι είναι πολύ ευάλωτα σε οποιαδήποτε καταπόνηση εκτός της διαμήκους τους διεύθυνσης (όπου λειτουργούν οι ισχυρές ίνες γυαλιού εφελκυστικά), λόγω του πολύ μικρού τους πάχους.
- **Ανάμειξη πολυεστερικής ρητίνης με τον καταλύτη:** η διαδικασία είναι η ίδια με αυτή που περιεγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα (για την παραγωγή των δοκιμίων S3 – S10). Υπολογίστηκε η ποσότητα ρητίνης και

καταλύτη που αναλογεί στη συνολική επιφάνεια υαλοϋφάσματος που χρησιμοποιήθηκε και έγινε η ανάμειξη. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή για να επιτευχθεί η σωστή αναλογία ρητίνης – καταλύτη (2% w/w), λόγω της αρκετά μικρής ποσότητας ρητίνης που αναλογεί στα συγκεκριμένα δοκίμια (λιγότερο από 1 γραμμάριο καταλύτη).

- **Τοποθέτηση στρώσεων υαλοϋφάσματος και εμποτισμός με ρητίνη:** όπως και στη διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων S3 – S10 που περιεγράφηκε παραπάνω, έτσι και εδώ ήταν κρίσιμο να γίνει γρήγορα η διαδικασία, εντός του περιθωρίου του χρόνου εργασιμότητας του μείγματος πολυεστερικής ρητίνης – καταλύτη. Και εδώ ο εμποτισμός έγινε με χρήση ρολού με σφουγγάρι μίας χρήσεως. Πριν την τοποθέτηση μίας στρώσης υαλοϋφάσματος, είναι απαραίτητο η από κάτω επιφάνεια να έχει επιστρωθεί με αρκετή ποσότητα ρητίνης. Αφού τοποθετηθεί προσεκτικά η στρώση, με μέριμνα να προκύψει ένα ευθύγραμμο και με όσο το δυνατόν λιγότερες ατέλειες δοκίμιο, εφαρμόζεται επιπλέον ποσότητα ρητίνης για να εμποτιστεί καλά και η πάνω πλευρά της στρώσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις στρώσεις. Στα συγκεκριμένα δοκίμια (TT1 – TT5) οι απαιτούμενες στρώσεις υαλοϋφάσματος ήταν δύο. Μόλις ολοκληρωθεί αυτό το βήμα, το υλικό αφέθηκε για ένα χρονικό διάστημα μίας εβδομάδας (7 ημέρες) ώστε να επέλθει σκλήρυνση (curing) και τα δοκίμια να έχουν αποκτήσει τις πλήρεις μηχανικές τους ιδιότητες πριν την αποκόλληση.
- **Αποκόλληση και περιποίηση των δοκιμίων:** μετά την πάροδο επτά ημερών, έγινε η αποκόλληση των δοκιμίων πολύ προσεκτικά με μικροκινήσεις, χρησιμοποιώντας ένα λεπτό κοπίδι. Η αποκόλληση έγινε αρκετά εύκολα με τη λεπίδα του κοπιδιού, χάρη στο λεπτό λείο στρώμα που είχε δημιουργηθεί από το PVA. Στη συνέχεια έγινε μία περιποίηση των δοκιμίων με σκοπό να εξομαλυνθούν οι ατέλειες και να έρθει το δοκίμιο στις διαστάσεις που προβλέπονται. Αυτό έγινε με χρήση ψαλιδιού και μεταλλικού χάρακα, ως οδηγό για να επιτευχθεί ευθυγραμμία στις πλευρές του κάθε δοκιμίου, καθώς και να είναι παράλληλες μεταξύ τους.
- **Μετρήσεις διαστάσεων:** σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527-1, πρέπει να γίνουν μετρήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κάθε δοκιμίου με μεγάλη ακρίβεια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα διαπιστευμένα όργανα μετρήσεων που διαθέτει το Εργαστήριο. Ελήφθησαν μετρήσεις πάχους και πλάτους για το κάθε δοκίμιο σε 3 διαφορετικά σημεία (μέσον του μήκους και σε απόσταση 5mm από το κάθε άκρο) και σημειώθηκε η μέγιστη τιμή για κάθε μέγεθος, η ελάχιστη, και η μέση τιμή. Επιπλέον, μετρήθηκε με ακρίβεια το μήκος του κάθε δοκιμίου, καθώς και το καθαρό μήκος (από tab σε tab). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών παρουσιάζονται με τη μορφή πίνακα στην επόμενη ενότητα.
- **Εφαρμογή Tabs στα άκρα των δοκιμίων:** το πρότυπο ISO προβλέπει κάλυψη των άκρων των δοκιμίων με tabs (μεταλλικά ή από γυαλόχαρτο) και στις δύο πλευρές τους. Τα tabs είναι απαραίτητα για την ευκολότερη τοποθέτηση των δοκιμίων στη μηχανή επιβολής εφελκυσμού την ώρα της πειραματικής δοκιμής, καθώς το πάχος των δοκιμίων αυτών είναι πολύ μικρό,

και επίσης απαιτείται μία επιφάνεια που προσφέρει καλή πρόσφυση με την αρπάγη της μηχανής. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το υαλόχαρτο. Ταυτόχρονα, απαραίτητη προϋπόθεση σύμφωνα με τον κανονισμό είναι να μην υπάρχει ολίσθηση των tabs πάνω στην επιφάνεια των δοκιμίων. Συνεπώς κολλήθηκαν με χρήση δυνατής εποξεικής κόλλας που διαθέτει το Εργαστήριο, και αφέθηκαν για διάστημα τριών ημερών για να ισχυροποιηθεί πλήρως η κόλλα πριν την πειραματική δοκιμή.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, τα δοκίμια για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλέον έτοιμα για τη δοκιμή σε εφελκυσμό, η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

3.4 Εκτέλεση πειραματικών ελέγχων

3.4.1 Κατηγοριοποίηση δοκιμίων S3 - S10

Για να διερευνηθεί η επίδραση της ενίσχυσης που αφορά η παρούσα εργασία, τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν πειραματικά, έγιναν με κάποιες παραλλαγές ως προς το πλήθος των δεσμών ινών που περιλαμβάνει η ενίσχυση της σύνδεσης, αλλά και ως προς τη διαστρωμάτωση του ινοπλισμένου πολυμερούς. Με βάση τις παραλλαγές αυτές, τα δοκίμια μπορούν να χωριστούν στις 5 παρακάτω κατηγορίες.

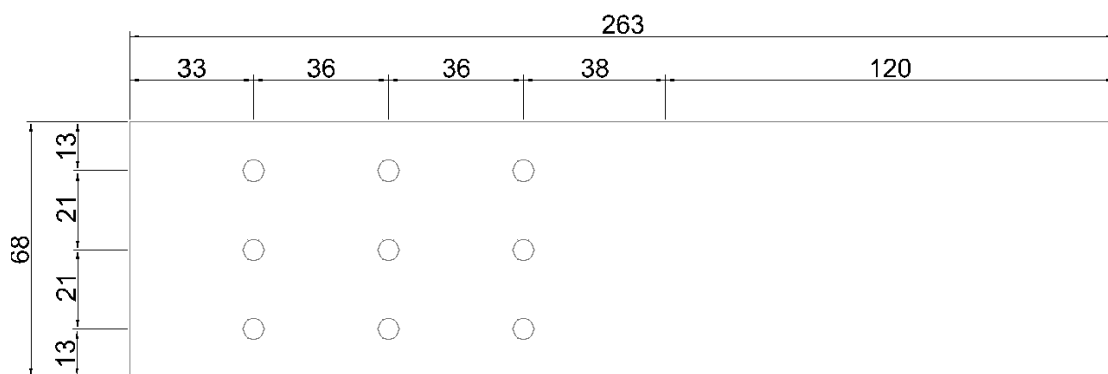
- **Κατηγορία 1 (Δοκίμιο S3):** τα δύο συνδεόμενα χαλύβδινα ελάσματα δεν ενισχύονται με την πλέξη από δέσμες ινών υάλου, και δεν έχουν διανοιχθεί οπές σε αυτά. Η σύνδεση τους γίνεται με δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος. Σκοπός του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι να προσδιοριστεί η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της μη ενισχυμένης σύνδεσης.
- **Κατηγορία 2 (Δοκίμιο S7):** είναι παρόμοιο με το δοκίμιο S3, αφού και αυτό δεν είναι ενισχυμένο με την πλέξη από δέσμες ινών. Η διαφοροποίηση τους έγκειται στον αριθμό των στρώσεων υαλοϋφάσματος, καθώς στο συγκεκριμένο δοκίμιο η σύνδεση γίνεται με τέσσερις στρώσεις, δύο από την κάθε πλευρά.
- **Κατηγορία 3 (Δοκίμια S4, S5 και S8):** σε αυτή την ομάδα δοκιμίων τα συνδεόμενα χαλύβδινα ελάσματα ενισχύονται με πλέξη από δέσμες ινών υάλου. Στο κάθε έλασμα έχουν διανοιχθεί εννέα οπές σε διάταξη τρία επί τρία, δηλαδή υπάρχουν τρεις σειρές οπών. Κατά τη διαμήκη διεύθυνση κάθε ελάσματος διέρχονται έξι δέσμες ινών οι οποίες αγκυρώνονται στην περιοχή μεταξύ των ελασμάτων, δηλαδή η ενίσχυση γίνεται με δύο δέσμες ινών ανά σειρά οπών. Επιπλέον, υπάρχουν δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος, δηλαδή μία στρώση στην κάθε πλευρά του δοκιμίου.
- **Κατηγορία 4 (Δοκίμια S6, S9, S10):** τα δοκίμια αυτής της ομάδας είναι ενισχυμένα με πλέξη από δέσμες ινών, όπως και της προηγούμενης. Η διαφοροποίηση έγκειται σε δύο σημεία. Πρώτον, η ενίσχυση γίνεται με πλέξη

που περιλαμβάνει το διπλάσιο αριθμό δεσμών ινών. Διέρχονται δηλαδή τέσσερις δέσμες ινών ανά σειρά οπών, δώδεκα δέσμες ανά έλασμα. Δεύτερον, οι στρώσεις υαλοϋφάσματος είναι επίσης διπλάσιες, δηλαδή υπάρχουν τέσσερις, δύο από κάθε πλευρά.

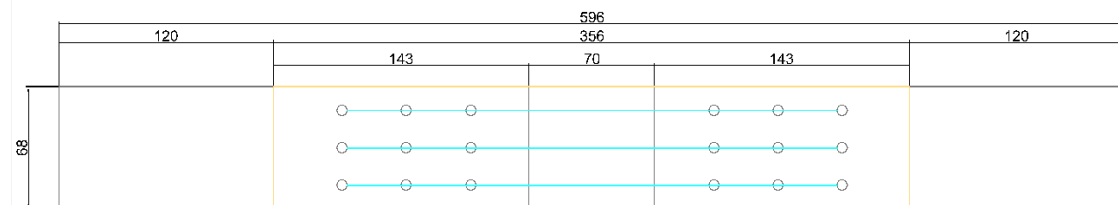
3.4.2 Χαρακτηριστικά Δοκιμίων

Δοκίμια S3 – S10

Οι διαστάσεις σχεδιασμού τόσο των χαλύβδινων ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τα δοκίμια, όσο και για ολόκληρη τη σύνδεση, φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 3.23: Διαστάσεις χαλύβδινου ελάσματος με τις οπές



Σχήμα 3.24: Διαστάσεις σύνδεσης

Κατά τη διαδικασία της παραγωγής των δοκιμίων, για κάθε ένα από αυτά γινόντουσαν μετρήσεις του βάρους των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και του τελικού βάρους των δοκιμίων μετά τη σκλήρυνση (curing) της ρητίνης, την αποκόλληση τους από το καλούπι και την περιποίηση των ατελειών με τη λίμα. Για τη μέτρηση του βάρους σε όλες τις φάσεις χρησιμοποιήθηκε η ζυγαριά ακριβείας του Εργαστηρίου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με ακρίβεια δεκάτου του γραμμαρίου:

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις βάρους για τα δοκίμια S3 – S10

Δοκίμιο	Βάρος Ελάσματος (gr)	Βάρος Υφάσματος (gr)	Τελικό Βάρος (gr)
S3	552,1	11,8	581,3
S4	549,8	12,1	602,2
S5	553	12	610,6
S6	554,4	21,5	613,5
S7	557	21,9	607,8
S8	548,7	12,4	598,6
S9	549,6	22,1	639,6
S10	550,5	22,2	650,8

Επίσης, με χρήση του μικρομέτρου του Εργαστηρίου, έγιναν μετρήσεις πάχους στην ενδιάμεση περιοχή της σύνδεσης. Από τις είκοσι μετρήσεις που έγιναν ανά δοκίμιο, παρουσιάζεται το ελάχιστο, το μέγιστο, και το μέσο πάχος της περιοχής αυτής. Το μέσο πάχος κάθε δοκιμίου εισήχθη ως δεδομένο στο πρόγραμμα Bluehill 3 γιατί ήταν απαραίτητο να προσδιοριστεί η δοκιμαζόμενη διατομή για το πείραμα.

Πίνακας 3.2: Μετρήσεις πάχους για τα δοκίμια S3 – S10

Δοκίμιο	Ελάχιστο πάχος (mm)	Μέγιστο πάχος (mm)	Μέσο πάχος (mm)
S3	1,01	1,6	1,31
S4	1,54	2,27	1,93
S5	1,76	3,33	2,28
S6	2,36	3,01	2,63
S7	1,76	2,35	2,07
S8	1,83	2,91	2,42
S9	3,1	4,03	3,55
S10	3,47	3,95	3,76

Δοκίμια TT1 – TT5

Αντίστοιχα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων πάχους και πλάτους για τα δοκίμια TT1 – TT5. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527 – 1, οι μετρήσεις έγιναν σε τρία σημεία κάθε δοκιμίου (στο μέσον, και σε απόσταση 5mm από το κάθε άκρο).

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις πάχους για τα δοκίμια TT1 – TT5

Δοκίμιο	Πάχος στο μέσον (mm)	Πάχος στο αρ. άκρο (mm)	Πάχος στο δεξ. Άκρο	Μέσο πάχος (mm)
TT1	0,56	0,57	0,65	0,59
TT2	0,63	0,64	0,66	0,64
TT3	0,64	0,57	0,62	0,61
TT4	0,51	0,55	0,54	0,53
TT5	0,56	0,61	0,62	0,6

Πίνακας 3.4: Μετρήσεις πλάτους και μήκους για τα δοκίμια TT1-TT5

Δοκίμιο	Πλάτος στο μέσον (mm)	Πλάτος στο αρ. άκρο (mm)	Πλάτος στο δεξ. Άκρο (mm)	Μέσο πλάτος (mm)	Καθαρό μήκος (mm)	Ολικό μήκος με tabs (mm)
TT1	17	18	17	17.3	149.5	250
TT2	17	18	18.5	17.8	148	248.5
TT3	16	17	15.5	16.2	151.5	251
TT4	16	18	18	17.3	150	250
TT5	18	18.5	16.5	17.7	150	250.5

3.4.3 Πειραματικές δοκιμές

3.4.3.1 Δοκίμια S3 – S10

Εδώ παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν για το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Δίνονται εικόνες για τα δοκίμια πριν και μετά την αστοχία τους, καθώς και τα δεδομένα που κατέγραψε το πρόγραμμα Bluehill 3 κατά τη διάρκεια των δοκιμών, με τη μορφή διαγραμμάτων. Σε όλα τα δοκίμια (S3 – S10) εφαρμόστηκε η ίδια ταχύτητα μετατόπισης των στελεχών της μηχανής Instron LX300, ίση με 1mm/min.

Δοκίμιο S3

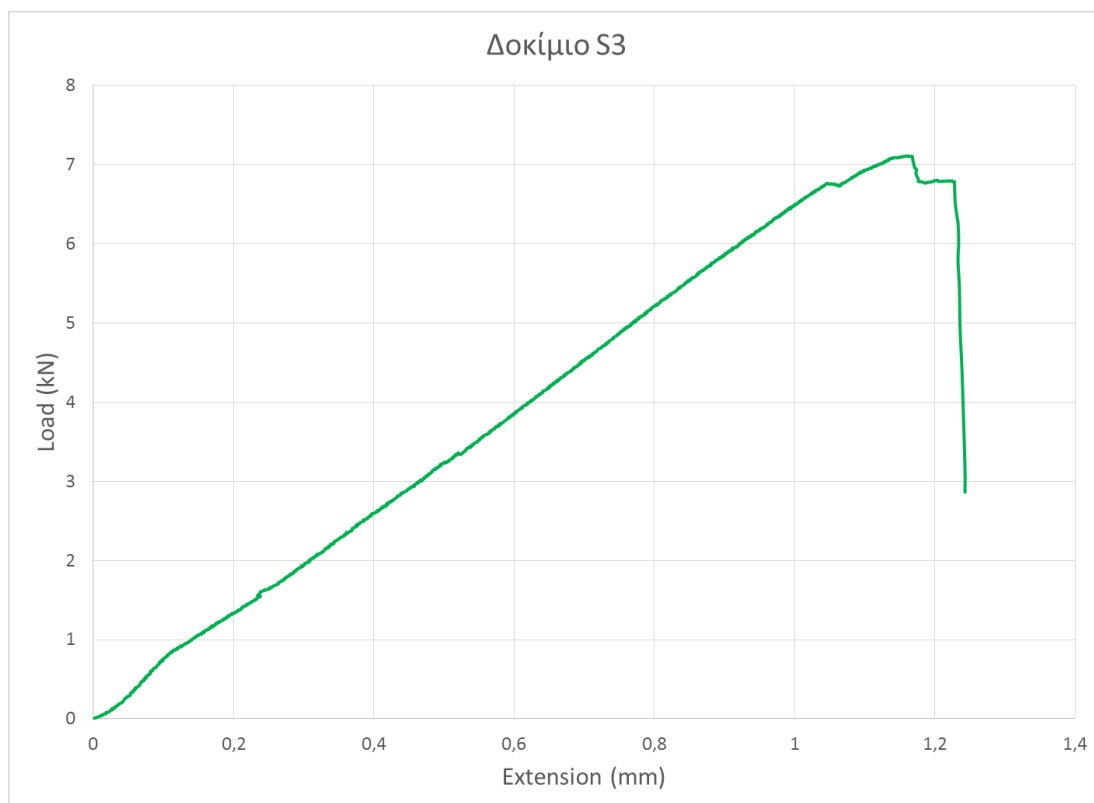
Το δοκίμιο S3 έχει 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος, μία σε κάθε πλευρά, και δεν είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών υάλου. Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 581,3 γραμμάρια και το μέσο πάχος της ενδιάμεσης περιοχής ινοπλισμένου πολυμερούς είναι 1,31mm.



Σχήμα 3.25: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S3 πριν την αστοχία

Η δοκιμή έγινε την Τετάρτη 6 Μαΐου του 2015. Αφού ρυθμίστηκαν οι δύο αρπάγες της μηχανής στο σωστό ύψος, μπήκε το δοκίμιο, και αφού ορίστηκαν όλες οι

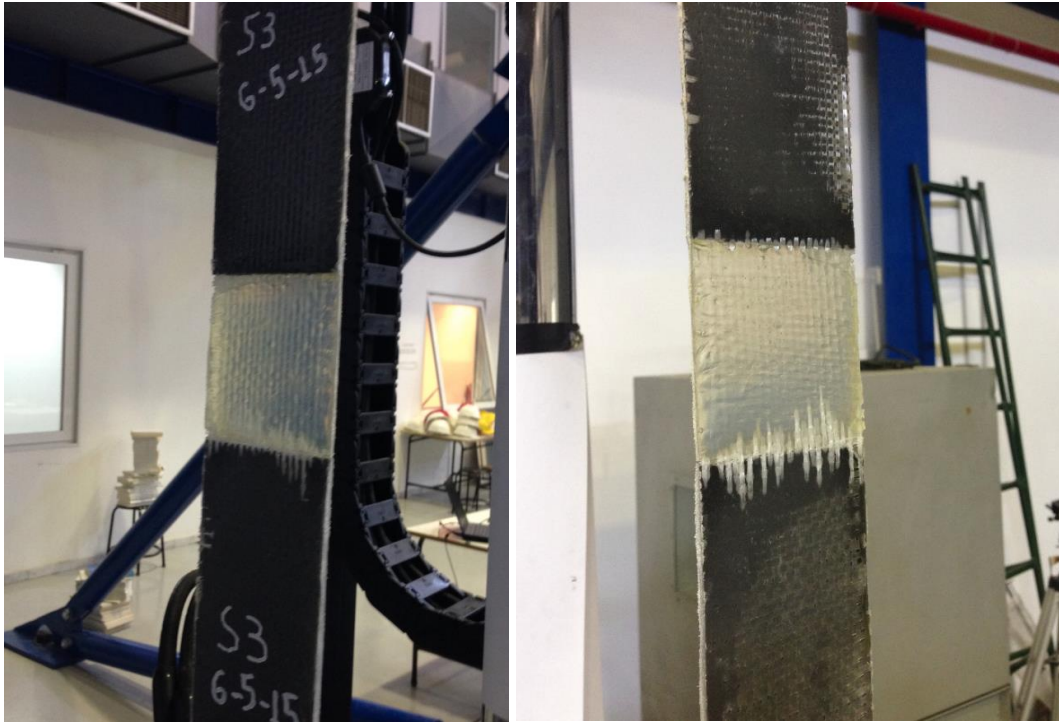
παράμετροι στο πρόγραμμα ξεκίνησε η δοκίμη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.26: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S3

Η καμπύλη αστοχίας του δοκιμίου είναι σε γενικές γραμμές γραμμική – ελαστική με ψαθυρή μορφή αστοχίας αμέσως μετά την επίτευξη της μέγιστης δύναμης. Μικρές διαταραχές στην ευθεία της καμπύλης οφείλονται πιθανότατα σε μικρές αστοχίες ινών που είχαν τοπικό χαρακτήρα. Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που παρέλαβε η σύνδεση ήταν 7,11 kN, με παραμόρφωση (επιμήκυνση) 1,16mm. Η μέγιστη παραμόρφωση που παρατηρήθηκε, κατά την οποία ταυτόχρονα να διατηρείται υψηλό ποσοστό της μέγιστης δύναμης (6,75 kN – 95% της μέγιστης δύναμης), ήταν 1,23mm. Αμέσως μετά παρατηρείται απότομη κατάρρευση στην καμπύλη, με αποτέλεσμα η σύνδεση να χάσει την αντοχή της σε εφελκυσμό.

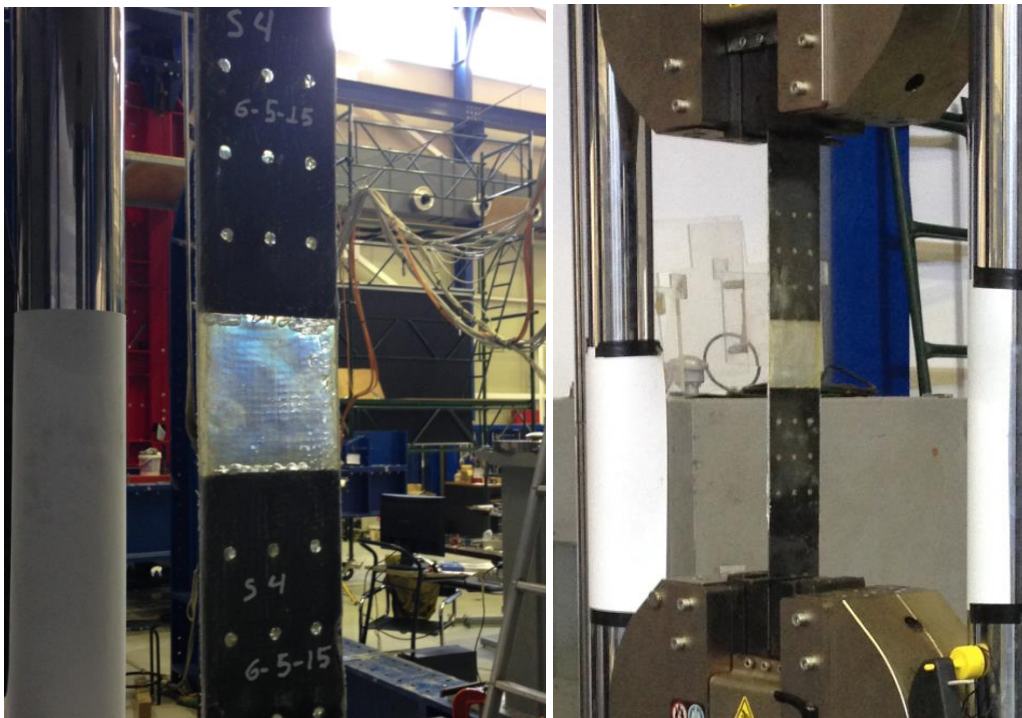
Κατά τη διάρκεια της επιβολής εφελκυστικών φορτίων στο δοκίμιο, και κοντά στην περιοχή της αστοχίας, ακούγονταν χαρακτηριστικοί ήχοι σπασίματος, και παρατηρήθηκε το χαρακτηριστικό «θόλωμα» σε κάποιες περιοχές της σύνδεσης. Το θόλωμα αυτό έγινε σταδιακά και υποδεικνύει ότι υπήρξε αστοχία των ινών υάλου, και φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες του δοκιμίου S3 μετά την αστοχία.



Σχήμα 3.27: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S3 μετά την αστοχία

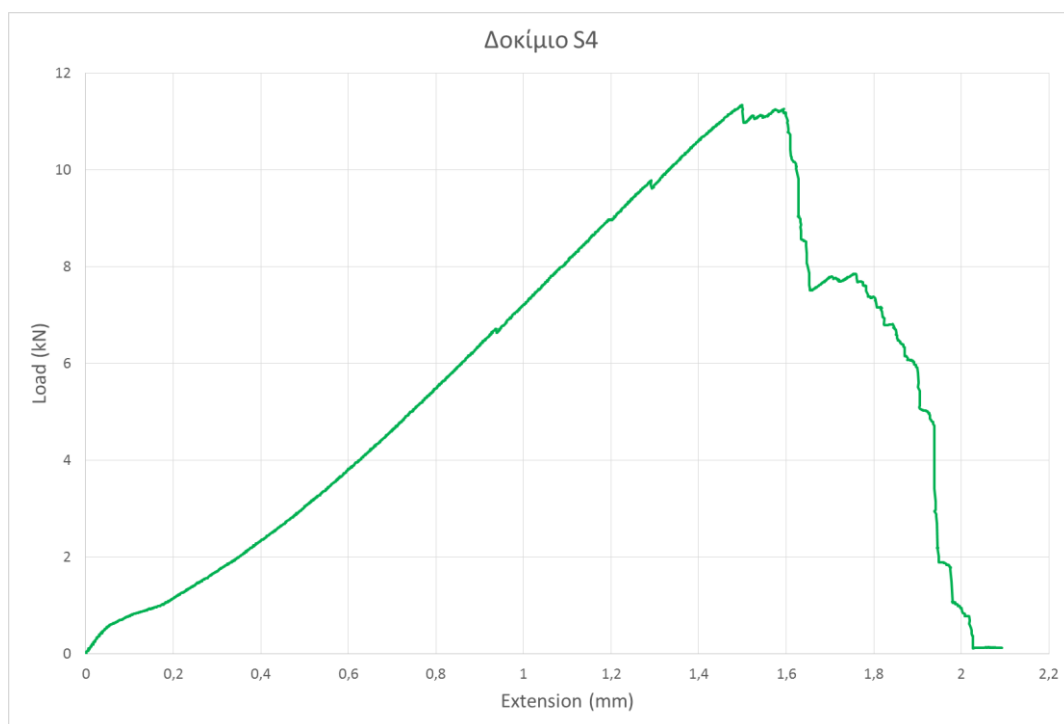
Δοκίμιο S4

Το δοκίμιο S4 έχει δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος, μία από κάθε πλευρά, και είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών, δύο ανά σειρά οπών. Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 602,2 γραμμάρια και το μέσο πάχος της ενδιάμεσης περιοχής είναι 1,93mm.



Σχήμα 3.28: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S4 πριν την αστοχία

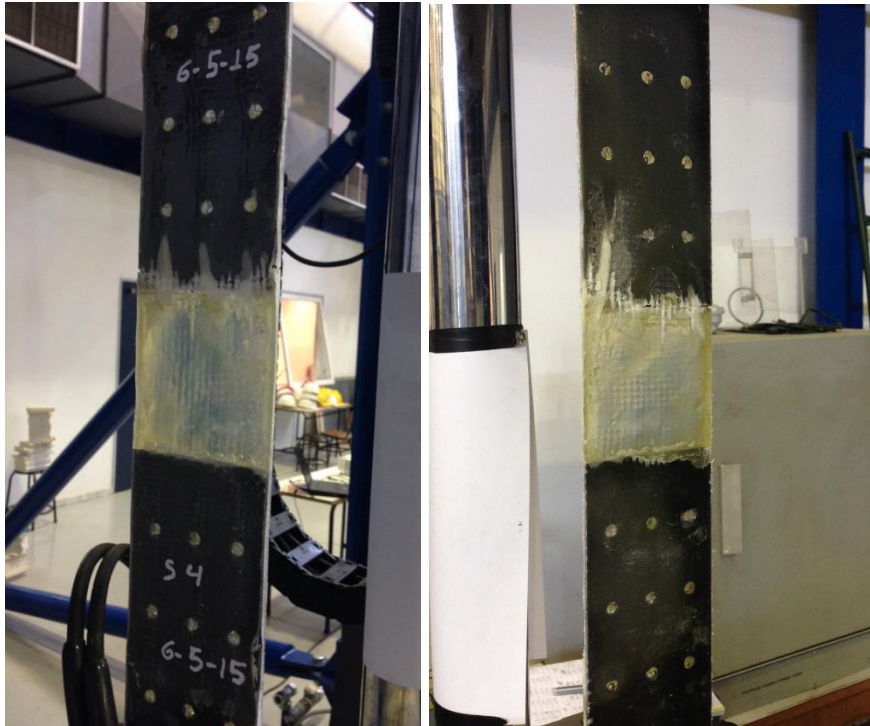
Η δοκιμή έγινε την Τετάρτη 6 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο πρόγραμμα ξεκίνησε η δοκιμή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.29: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S4

Η καμπύλη και σε αυτό το δοκίμιο είναι σε γενικές γραμμές γραμμική ελαστική. Παρατηρούνται και εδώ μικρές διαταραχές πιθανόν λόγω μικρών αστοχιών τοπικού χαρακτήρα χωρίς επίδραση στην αντοχή της σύνδεσης. Η μέγιστη εφελκυστική αντοχή που σημειώθηκε ήταν 11,34 kN με αντίστοιχη επιμήκυνση 1,50mm. Μετά τη μέγιστη τιμή η επιμήκυνση συνεχίστηκε, ενώ ένα υψηλό ποσοστό της αντοχής διατηρήθηκε για παραμόρφωση 1,61mm (10,76 kN – 95% της μέγιστης αντοχής). Για μεγαλύτερες επιμηκύνσεις η αντοχή της σύνδεσης μειώθηκε κατακόρυφα, επήλθε δηλαδή αστοχία.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής και κοντά στην περιοχή της αστοχίας παρατηρήθηκε το χαρακτηριστικό σταδιακό θόλωμα στην περιοχή των στρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς σε συνδυασμό με τους χαρακτηριστικούς ήχους. Επιπλέον, παρατηρήθηκε θόλωμα και στις δέσμες ινών από τις οποίες αποτελείται η ενίσχυση.



Σχήμα 3.30: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S4 μετά την αστοχία

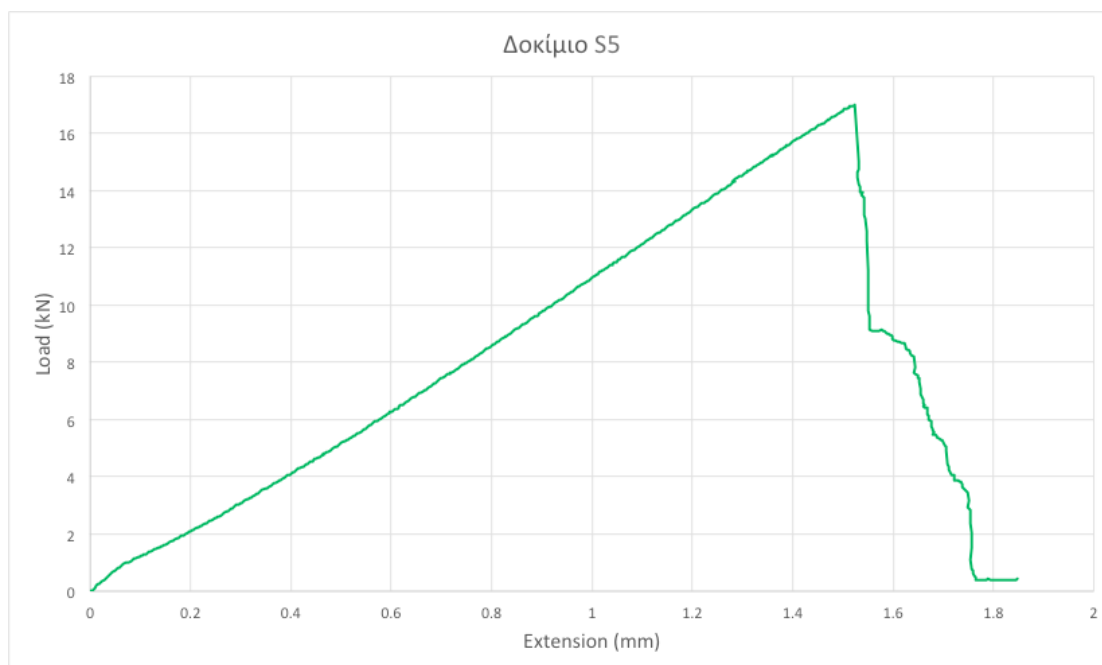
Δοκίμιο S5

Το δοκίμιο S5 περιλαμβάνει και αυτό δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος και ενίσχυση με δέσμες ινών (ανήκει στην ίδια κατηγορία με το S4). Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 610,6 γραμμάρια και το μέσο πάχος της ενδιάμεσης περιοχής μεταξύ των ελασμάτων είναι 2,28mm.



Σχήμα 3.31: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S5 πριν την αστοχία

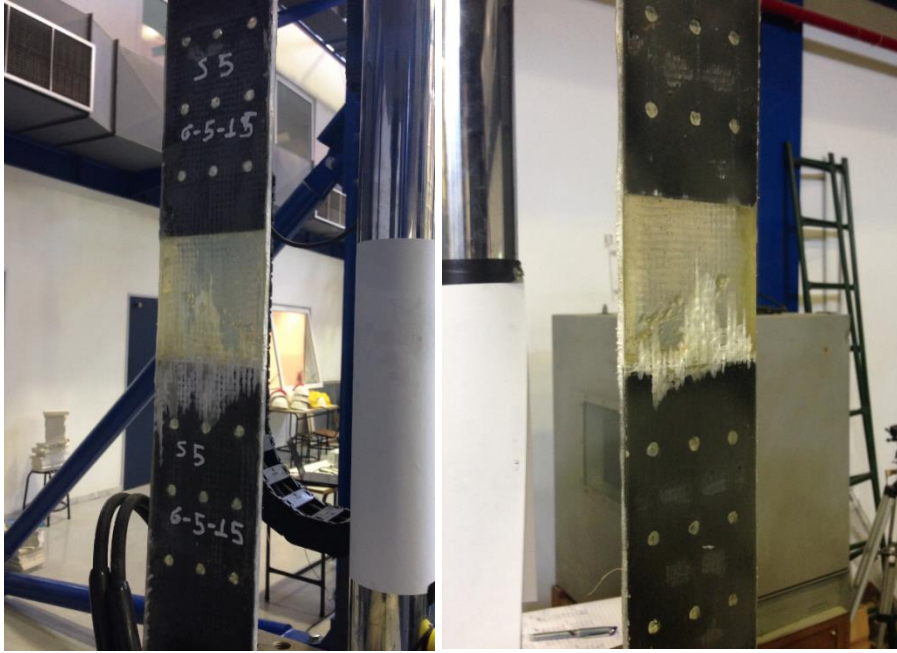
Η δοκιμή έγινε την Τετάρτη 6 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και μετά την εισαγωγή των παραμέτρων στο πρόγραμμα ξεκίνησε η δοκιμή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S5

Η καμπύλη είναι γραμμική ελαστική με ελάχιστες μικρές διαταραχές τοπικού χαρακτήρα, και η μέγιστη εφελκυστική αντοχή που σημειώθηκε ήταν 17,00 kN, με αντίστοιχη παραμόρφωση 1,53mm. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου δοκιμίου η αστοχία ήταν απότομη και δεν υπήρξε διατήρηση μεγάλου ποσοστού της μέγιστης αντοχής για μεγαλύτερες παραμορφώσεις.

Κατά τη δοκιμή, κοντά στην περιοχή της αστοχίας παρατηρήθηκε το γνωστό θόλωμα σε διάφορες περιοχές των στρώσεων, και διαφαίνεται και θόλωμα στις δέσμες ινών της ενίσχυσης.



Σχήμα 3.33: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S5 μετά την αστοχία

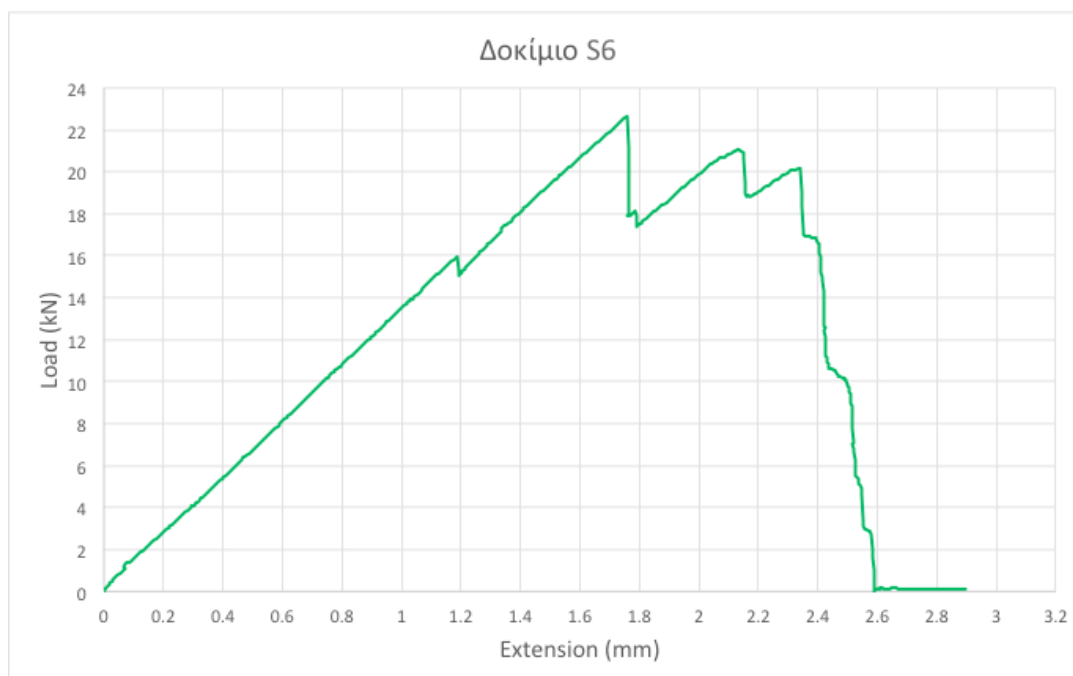
Δοκίμιο S6

Το δοκίμιο S6 περιλαμβάνει τέσσερις στρώσεις υαλοϋφάσματος, δύο από την κάθε πλευρά, και η σύνδεση είναι ενισχυμένη με πλέξη από δέσμες ινών, τέσσερις ανά σειρά οπών. Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 613,5 γραμμάρια και το μέσο πάχος της ενδιάμεσης περιοχής είναι 2,63mm.



Σχήμα 3.34: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S6 πριν την αστοχία

Η δοκιμή έγινε την Παρασκευή 15 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή επιβολής εφελκυστικών φορτίων και μετά την εισαγωγή των παραμέτρων στο πρόγραμμα ξεκίνησε η πειραματική δοκιμή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.35: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S6

Η μορφή της καμπύλης είναι γραμμική – ελαστική μέχρι η επιμήκυνση του δοκιμίου να φτάσει την τιμή 1,19mm όπου παρουσιάστηκε μία μικρή αστοχία. Όμως, η αντοχή αμέσως άρχισε να ξανανεβαίνει με την ίδια κλίση ευθείας, μέχρι που έπιασε την μέγιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής τους, η οποία είναι 22,61 kN με αντίστοιχη παραμόρφωση 1,76mm. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε άλλες 3 φορές όσο αυξανόταν η επιμήκυνση, φαίνονται δηλαδή στην καμπύλη τέσσερις «κορυφές», χωρίς όμως να ξεπεραστεί η μέγιστη αντοχή που σημειώθηκε στη δεύτερη κορυφή. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «διαδοχικές αστοχίες τοπικού χαρακτήρα» (successive ply failure).

Κατά τη δοκιμή παρατηρήθηκε σταδιακό θόλωμα σε κάποιες περιοχές της διαστρωμάτωσης του ινοπλισμένου πολυμερούς, καθώς και στις δέσμες ινών της πλέξης που ενίσχυσε τη σύνδεση. Αυτό φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες του δοκιμίου μετά την αστοχία.



Σχήμα 3.36: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S6 μετά την αστοχία

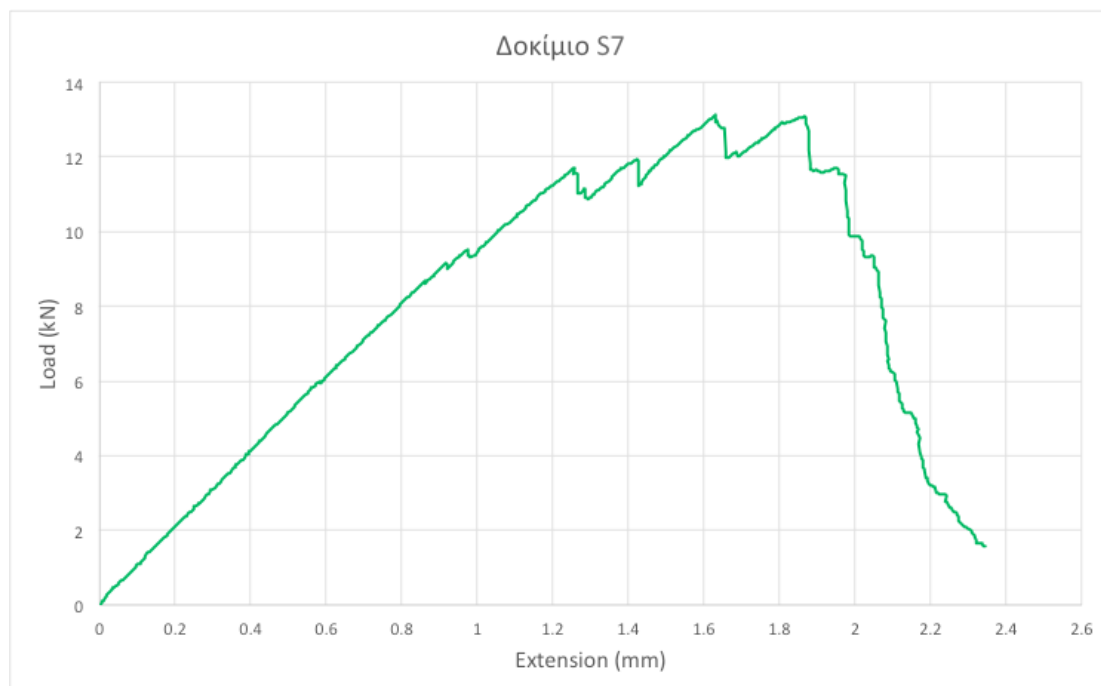
Δοκίμιο S7

Το δοκίμιο S7 έχει τέσσερις στρώσεις υαλοϋφάσματος, δύο από κάθε πλευρά και δεν είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών. Το τελικό του βάρος είναι 607,8 γραμμάρια και το μέσο πάχος της ενδιάμεσης περιοχής αγκύρωσης των ινών είναι 2,07mm.



Σχήμα 3.37: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S7 πριν την αστοχία

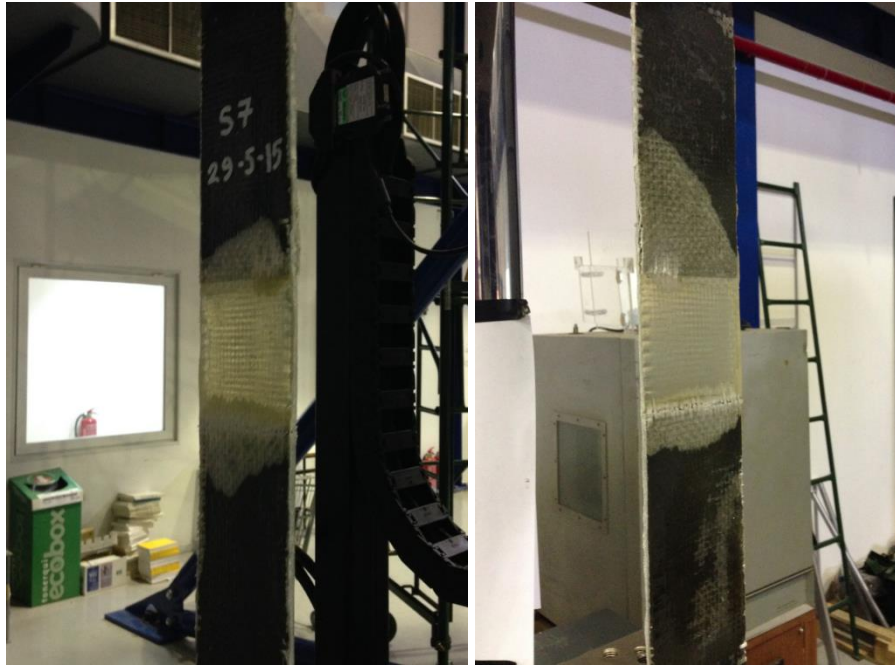
Η δοκιμή έγινε την Παρασκευή 29 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο πρόγραμμα Bluehill 3 ξεκίνησε το πείραμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.38: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S7

Η καμπύλη ακολουθεί σε γενικές γραμμές γραμμική – ελαστική μορφή μέχρι την τιμή επιμήκυνσης 1,24mm. Στη συνέχεια παρατηρείται το φαινόμενο διαδοχικών αστοχιών τοπικού χαρακτήρα, όπως φαίνεται από τις τέσσερις «κορυφές» που υπάρχουν στο διάγραμμα. Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής της σύνδεσης παρατηρείται στην τρίτη κορυφή του διαγράμματος και είναι 13,13 kN με αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης 1,63mm.

Και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρήθηκε το σταδιακό θόλωμα στη διαστρωμάτωση του ινοπλισμένου πολυμερούς που υποδηλώνει αστοχία των ινών υάλου σε συνδυασμό με τους χαρακτηριστικούς ήχους κατά τη διάρκεια της αστοχίας.



Σχήμα 3.39: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S7 μετά την αστοχία

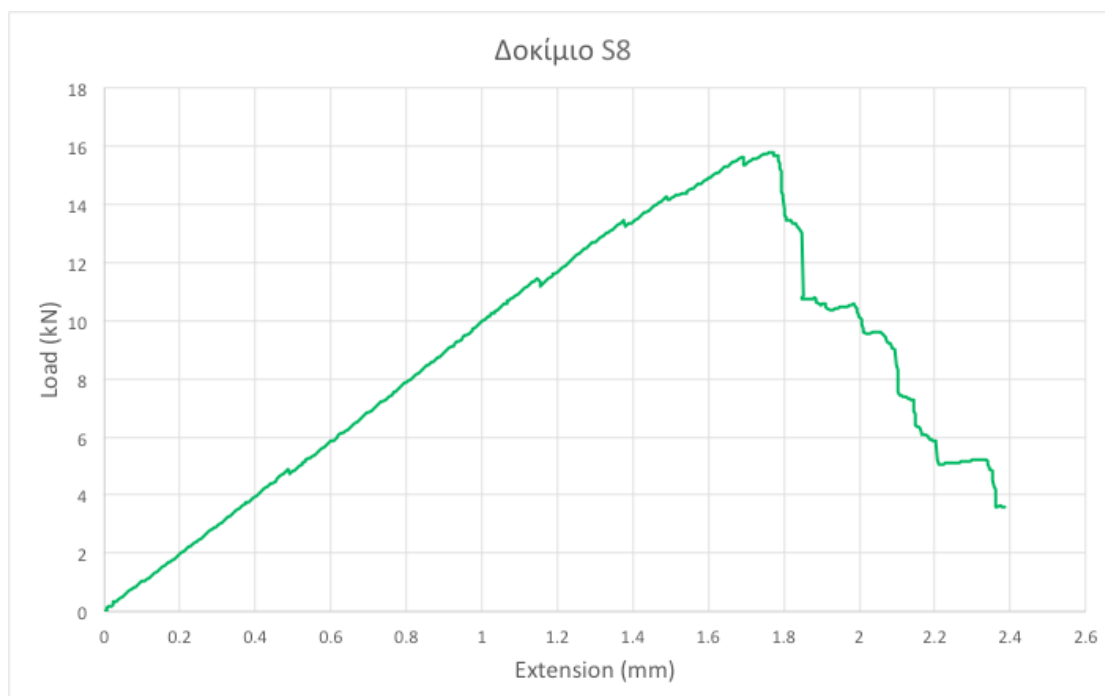
Δοκίμιο S8

Το δοκίμιο S8 έχει δύο στρώσεις υαλοϋφάσματος, μία από την κάθε πλευρά και είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών υάλου, δύο ανά σειρά οπών (ανήκει στην ίδια κατηγορία με τα δοκίμια S4 και S5). Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 598,6 γραμμάρια και το πάχος της ενδιάμεσης περιοχής μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων είναι 2,42mm.



Σχήμα 3.40: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S8 πριν την αστοχία

Η δοκιμή έγινε την Παρασκευή 29 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο πρόγραμμα Bluehill 3 ξεκίνησε το πείραμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.41: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S8

Η καμπύλη ακολουθεί προσεγγιστικά τη γραμμική – ελαστική μορφή, με μικρές διαταραχές τοπικού χαρακτήρα μέχρι την τιμή επιμήκυνσης 1,77mm. Στη ίδια τιμή επιμήκυνσης παρουσιάζεται και η μέγιστη τιμή αντοχής της σύνδεσης, η οποία είναι 15,80 kN. Για μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης η αντοχή πέφτει απότομα, δηλαδή επέρχεται η αστοχία.

Κατά τη δοκιμή, κοντά στην περιοχή της αστοχίας παρατηρήθηκε το χαρακτηριστικό θόλωμα σε διάφορες περιοχές των στρώσεων, καθώς επίσης φαίνεται και θόλωμα στις δέσμες ινών της ενίσχυσης που υποδηλώνει την αστοχία του από το εφελκυστικό φορτίο.



Σχήμα 3.42: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S8 μετά την αστοχία

Δοκίμιο S9

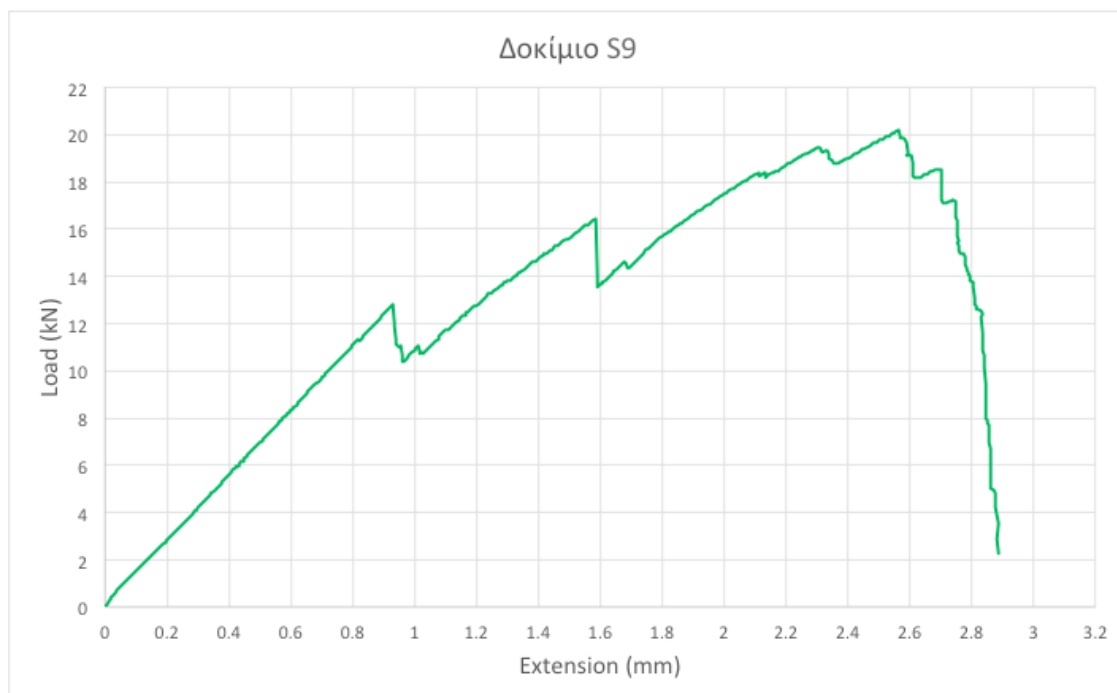
Το δοκίμιο S9 έχει τέσσερις στρώσεις υαλοϋφάσματος, δύο από την κάθε πλευρά και είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών υάλου, τέσσερις ανά σειρά οπών. Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 639,6 γραμμάρια και το πάχος της ενδιάμεσης περιοχής μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων είναι 3,55mm.



Σχήμα 3.43: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S9 πριν την αστοχία

Η δοκιμή έγινε την Παρασκευή 29 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο πρόγραμμα Bluehill 3 ξεκίνησε το πείραμα. Τα

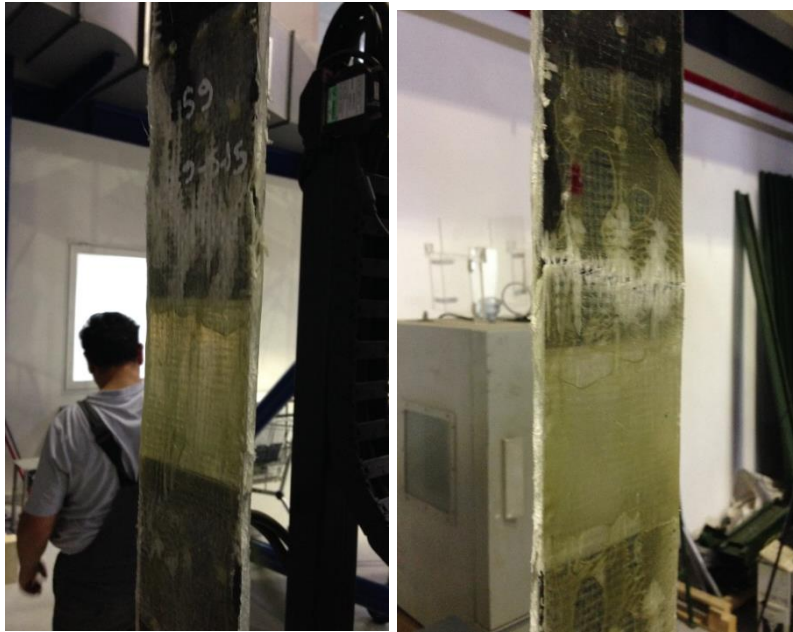
αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.44: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S9

Η καμπύλη ακολουθεί σε γενικές γραμμές γραμμική – ελαστική μορφή μέχρι την τιμή επιμήκυνσης 0,90mm όπου παρατηρείται η πρώτη κορυφή του διαγράμματος. Στη συνέχεια παρατηρείται το φαινόμενο διαδοχικών αστοχιών τοπικού χαρακτήρα, όπως φαίνεται από τις τέσσερις «κορυφές» που υπάρχουν στο διάγραμμα. Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής της σύνδεσης παρατηρείται στην τέταρτη κορυφή του διαγράμματος και είναι 20,19 kN με αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης 2,57mm.

Και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρήθηκε το σταδιακό θόλωμα στη διαστρωμάτωση του ινοπλισμένου πολυμερούς που υποδηλώνει αστοχία των ινών υάλου σε συνδυασμό με τους χαρακτηριστικούς ήχους κατά τη διάρκεια της αστοχίας. Επίσης, φαίνεται ότι αστόχησαν και κάποιες δέσμες ινών της ενίσχυσης.



Σχήμα 3.45: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S9 μετά την αστοχία

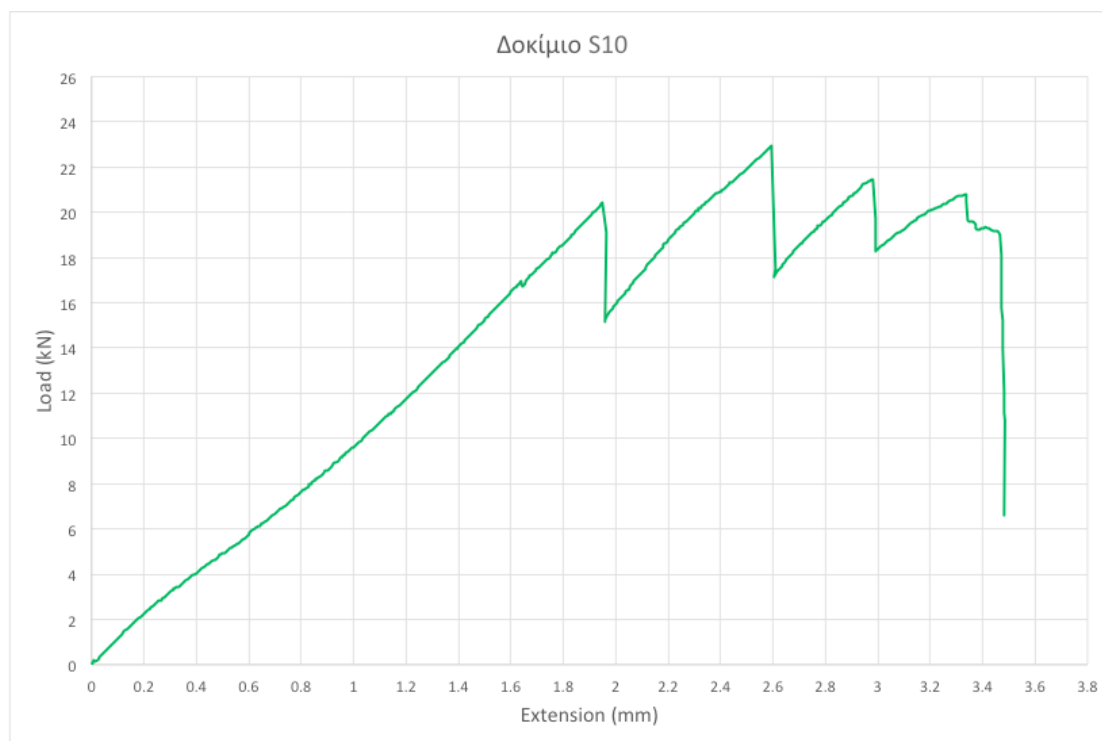
Δοκίμιο S10

Το δοκίμιο S10 έχει τέσσερις στρώσεις υαλοϋφάσματος, δύο από την κάθε πλευρά και είναι ενισχυμένο με πλέξη από δέσμες ινών υάλου, τέσσερις ανά σειρά οπών (ανήκει στην ίδια κατηγορία με τα δοκίμια S6 και S9). Το τελικό βάρος του δοκιμίου είναι 650,8 γραμμάρια και το πάχος της ενδιάμεσης περιοχής μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων είναι 3,78mm.



Σχήμα 3.46: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S10 πριν την αστοχία

Η δοκιμή έγινε την Παρασκευή 29 Μαΐου του 2015. Το δοκίμιο μπήκε στη μηχανή και αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο πρόγραμμα Bluehill 3 ξεκίνησε το πείραμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm).



Σχήμα 3.47: Διάγραμμα Δύναμης (kN) – Παραμόρφωσης (mm) για το δοκίμιο S10

Η καμπύλη ακολουθεί σε γενικές γραμμές γραμμική – ελαστική μορφή μέχρι την τιμή επιμήκυνσης 1,95mm όπου παρατηρείται η πρώτη κορυφή του διαγράμματος. Στη συνέχεια παρατηρείται το φαινόμενο διαδοχικών αστοχιών τοπικού χαρακτήρα (successive ply failure), όπως φαίνεται από τις τέσσερις «κορυφές» που υπάρχουν στο διάγραμμα. Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής αντοχής της σύνδεσης παρατηρείται στην δεύτερη κορυφή του διαγράμματος και είναι 22,96 kN με αντίστοιχη τιμή παραμόρφωσης 2,60mm.

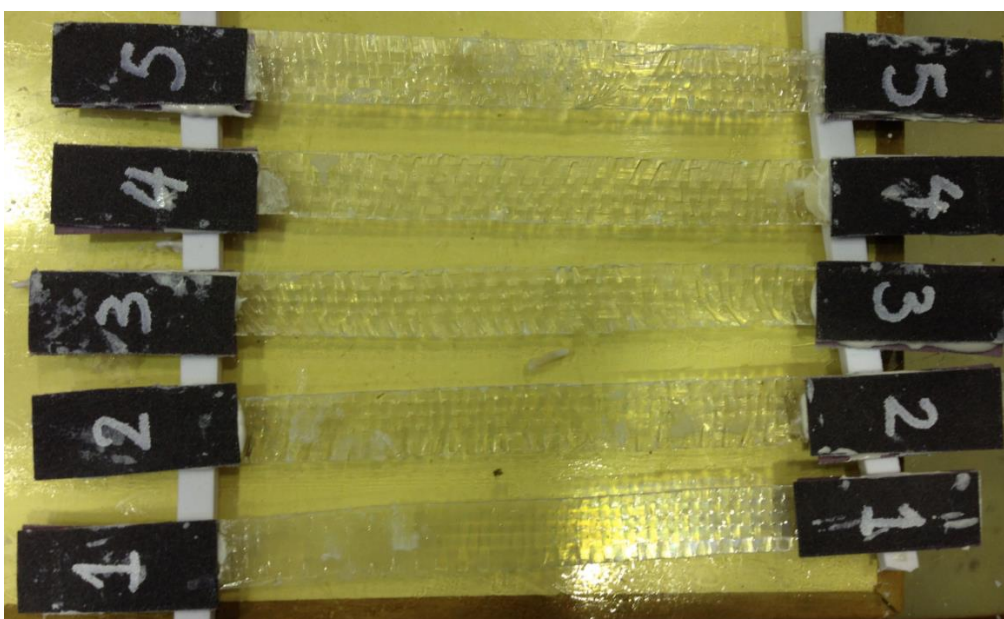
Και σε αυτό το δοκίμιο παρατηρήθηκε το σταδιακό θόλωμα στη διαστρωμάτωση του ινοπλισμένου πολυμερούς που υποδηλώνει αστοχία των ινών υάλου σε συνδυασμό με τους χαρακτηριστικούς ήχους κατά τη διάρκεια της αστοχίας. Επίσης, φαίνεται ότι αστόχησαν και κάποιες δέσμες ινών της ενίσχυσης.



Σχήμα 3.48: Οι δύο όψεις του δοκιμίου S10 μετά την αστοχία

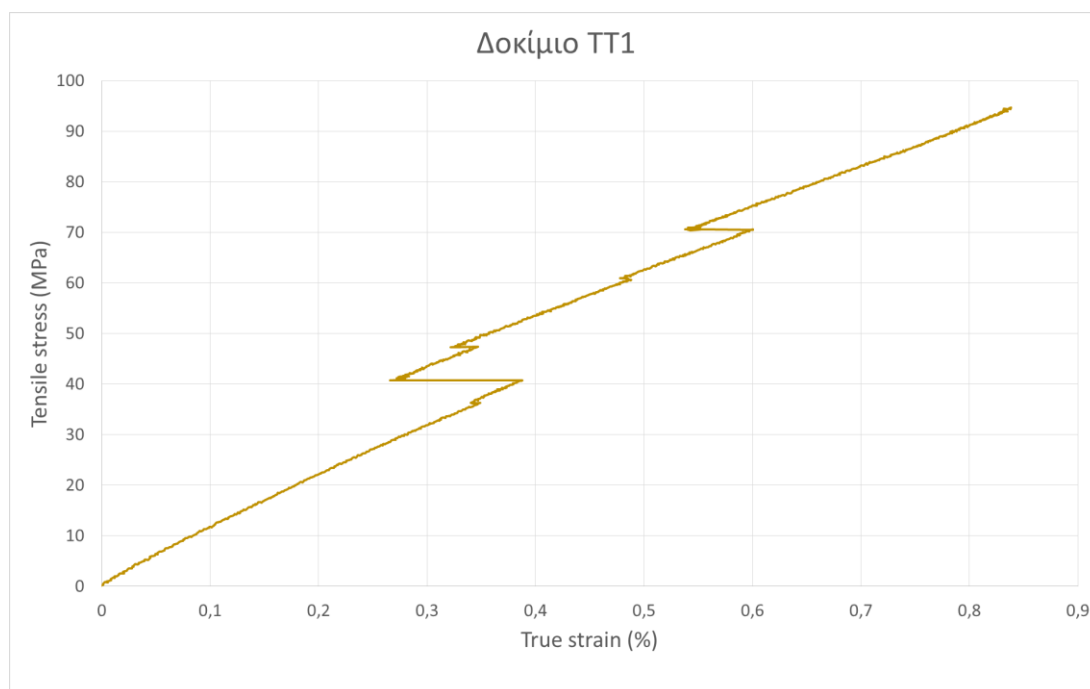
3.4.3.2 Δοκίμια TT1 – TT5

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής υλικού, μετά τη θραύση των δοκιμίων TT1 – TT5. Οι δοκιμές έγιναν στη μηχανή επιβολής εφελκυστικών φορτίων Instron LX300. Όλα τα δοκίμια περιλαμβάνουν 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος (επιδιώχθηκε να υπάρχουν 4 λεπτές δέσμες ινών ανά στρώση για τη διαμήκη διεύθυνση), και στα άκρα τους έχουν εφαρμοστεί tabs από υαλόχαρτο. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 527-1 η ταχύτητα σχετικής μετατόπισης των στελεχών της μηχανής ορίστηκε για τις δοκιμές 2mm/min. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το μηκυνσιόμετρο ακριβείας της μηχανής, με άνοιγμα 50mm, 25mm εκατέρωθεν του μέσου του κάθε δοκιμίου. Για την ευκολότερη τοποθέτηση του μηκυνσιομέτρου στη σωστή θέση, σημειώθηκαν πάνω στα δοκίμια βοηθητικά σημεία με μαρκαδόρο.



Σχήμα 3.49: Η εικόνα των δοκιμίων TT1 – TT5 πριν την αστοχία

Δοκίμιο TT1



Σχήμα 3.50: Διάγραμμα Τάσεων – Ανηγμένων Παραμορφώσεων για το TT1



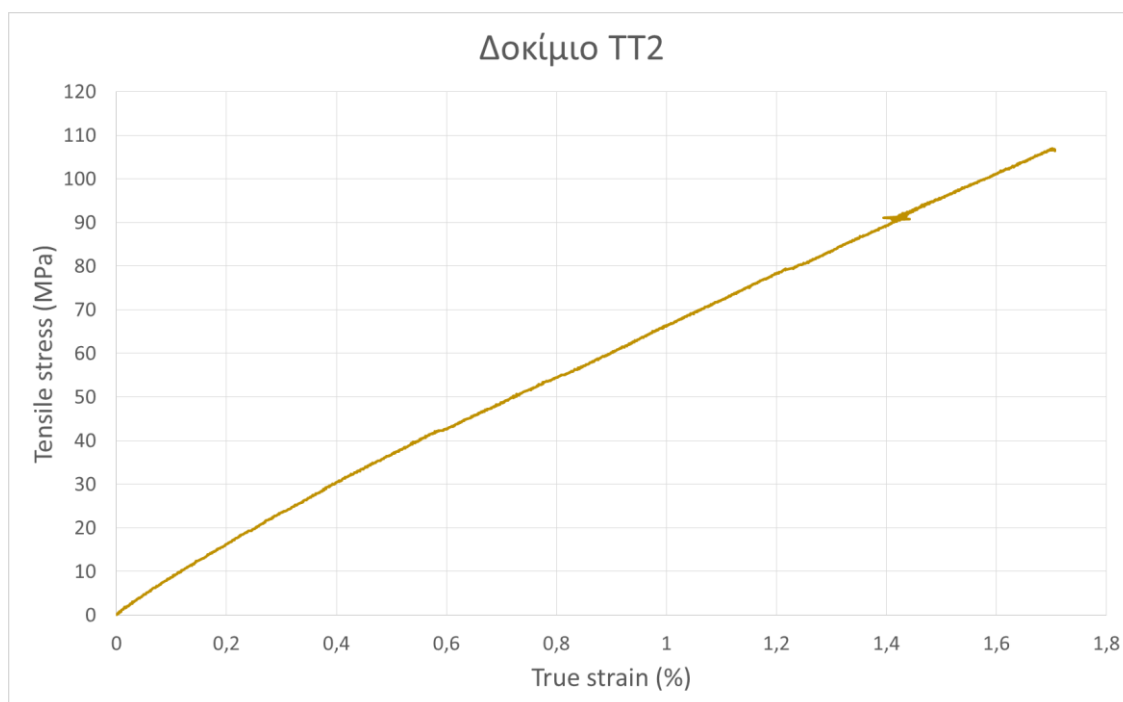
Σχήμα 3.51: Δοκίμιο TT1 μετά την αστοχία

Το δοκίμιο TT1 σημείωσε μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με 94,43 MPa σε αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση 0,83%. Η αστοχία σημειώθηκε στο άκρο του δοκιμίου στα όρια με το tab από θραύση των ινών υάλου, χωρίς να παρατηρηθεί ολίσθηση μεταξύ του ινοπλισμένου πολυμερούς και του tab. Το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO ως εξής:

$$E_{TT1} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{27,136 - 6,349}{0,0025 - 0,0005} = 10393,5 MPa = 10,39 GPa$$

$$E_{TT1} = 10,39 GPa$$

Δοκίμιο TT2



Σχήμα 3.52: Διάγραμμα Τάσεων – Ανηγμένων Παραμορφώσεων για το TT2



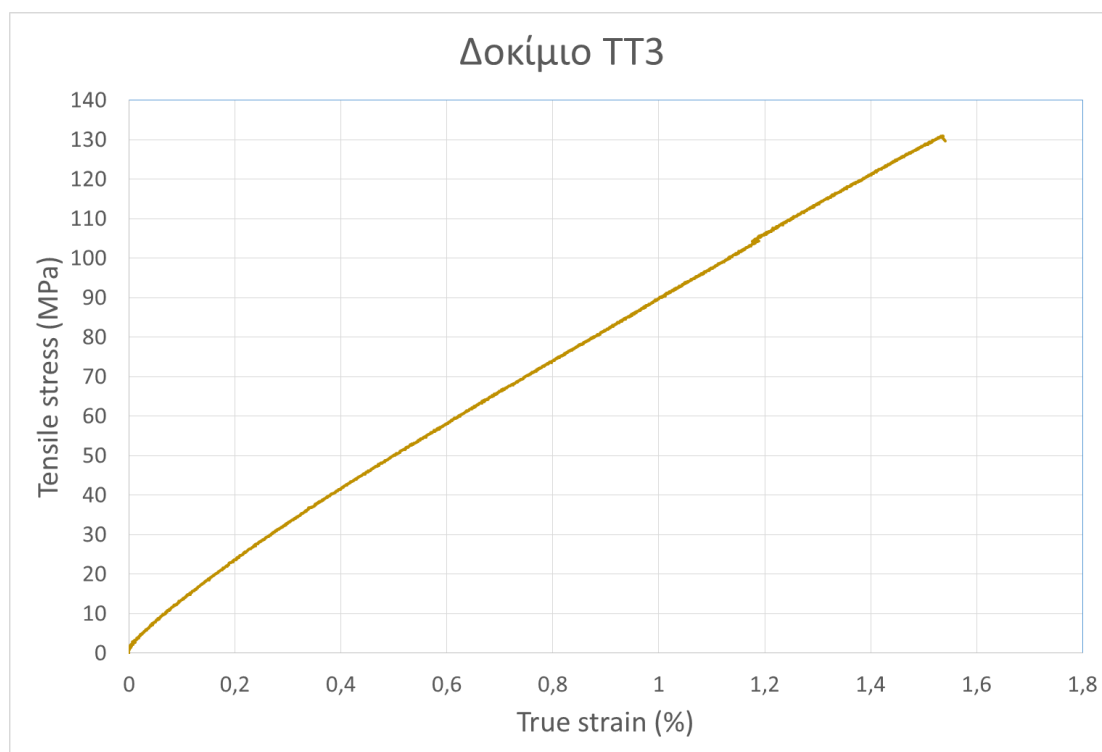
Σχήμα 3.53: Δοκίμιο TT2 μετά την αστοχία

Το δοκίμιο TT2 σημείωσε μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με 106,52 MPa σε αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση 1,71%. Η αστοχία έγινε κοντά στο άκρο του δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών υάλου, χωρίς να παρατηρηθεί ολίσθηση του tab. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{TT2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{19,771 - 4,733}{0,0025 - 0,0005} = 7519 \text{MPa} = 7,52 \text{GPa}$$

$$E_{TT2} = 7,52 \text{GPa}$$

Δοκίμιο TT3



Σχήμα 3.54: Διάγραμμα Τάσεων – Ανηγμένων Παραμορφώσεων για το TT3



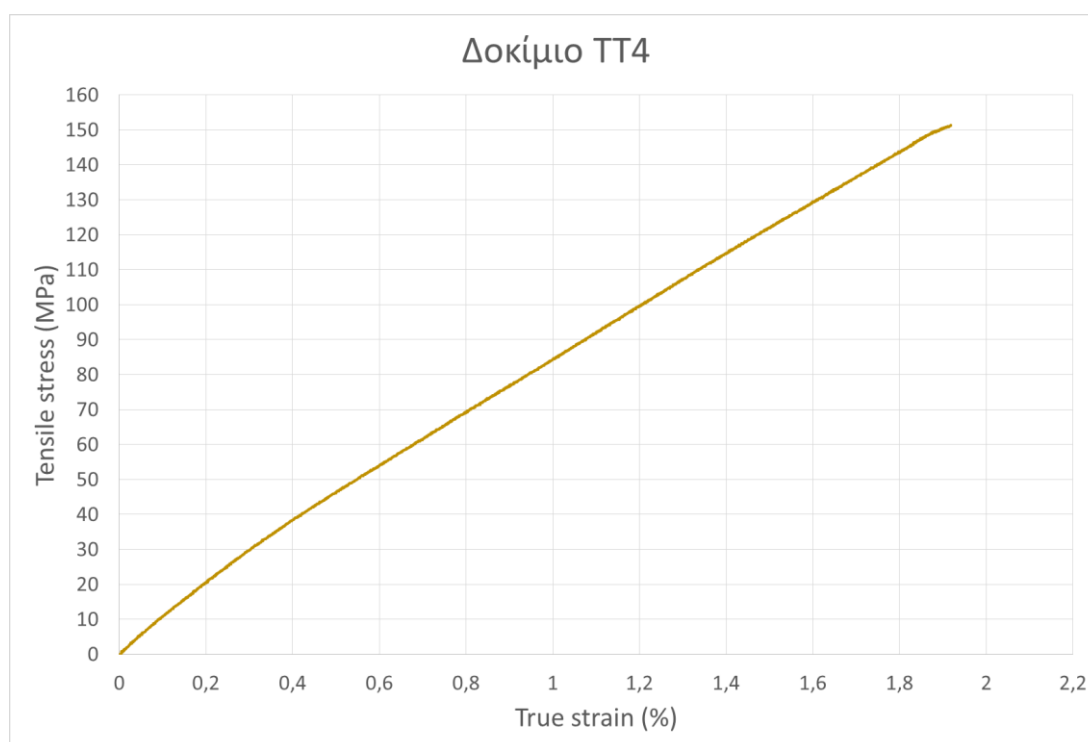
Σχήμα 3.55: Δοκίμιο TT3 μετά την αστοχία

Το δοκίμιο TT3 σημείωσε μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με 130,95 MPa σε αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση 1,53%. Η αστοχία έγινε κοντά στο άκρο του δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών υάλου, όπως φαίνεται από το χαρακτηριστικό θόλωμα και δεν παρατηρήθηκε ολίσθηση του tab. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως εξής:

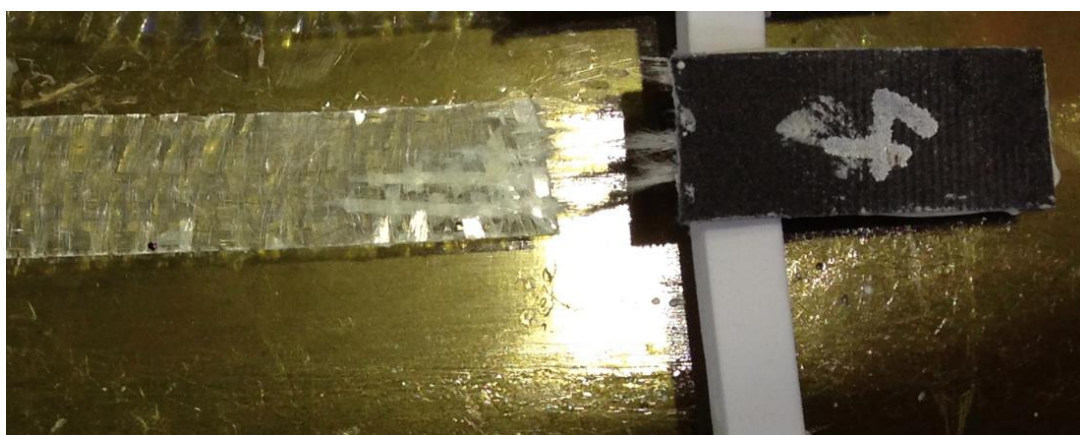
$$E_{TT3} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{28,394 - 8,187}{0,0025 - 0,0005} = 10103,5 \text{ MPa} = 10,1 \text{ GPa}$$

$$E_{TT3} = 10,1 \text{ GPa}$$

Δοκίμιο TT4



Σχήμα 3.56: Διάγραμμα Τάσεων – Ανηγμένων Παραμορφώσεων για το TT4

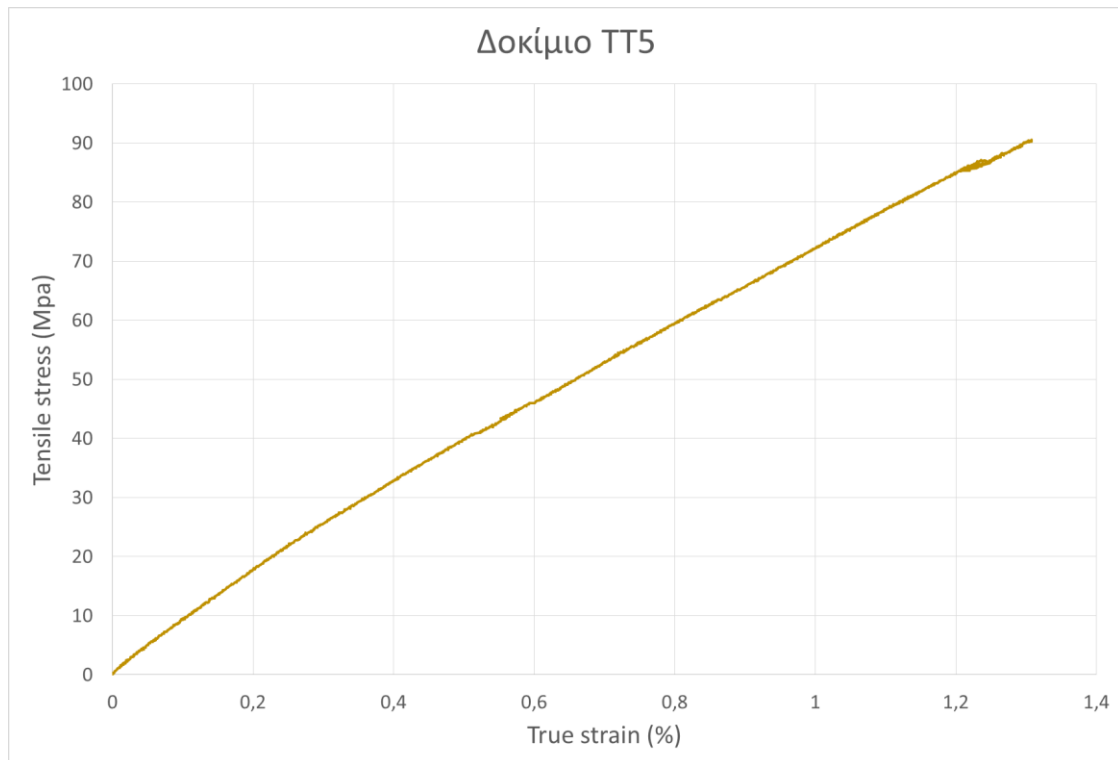


Το δοκίμιο TT4 σημείωσε μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με 151,31 MPa σε αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση 1,53%. Η αστοχία έγινε κοντά στο άκρο του δοκιμίου, ακριβώς στην εσωτερική παρειά του tab (όπως στην περίπτωση του TT1) λόγω θραύσης των ινών υάλου, χωρίς ωστόσο να παρατηρηθεί ολίσθηση του tab. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως εξής:

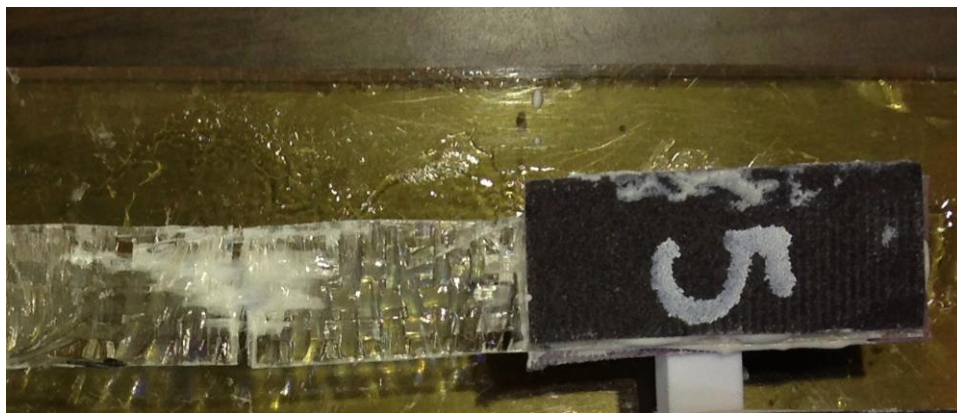
$$E_{TT4} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{25,075 - 5,833}{0,0025 - 0,0005} = 9621 \text{MPa} = 9,62 \text{GPa}$$

$$E_{TT4} = 9,62 \text{GPa}$$

Δοκίμιο TT5



Σχήμα 3.58: Διάγραμμα Τάσεων – Ανηγμένων Παραμορφώσεων για το TT5

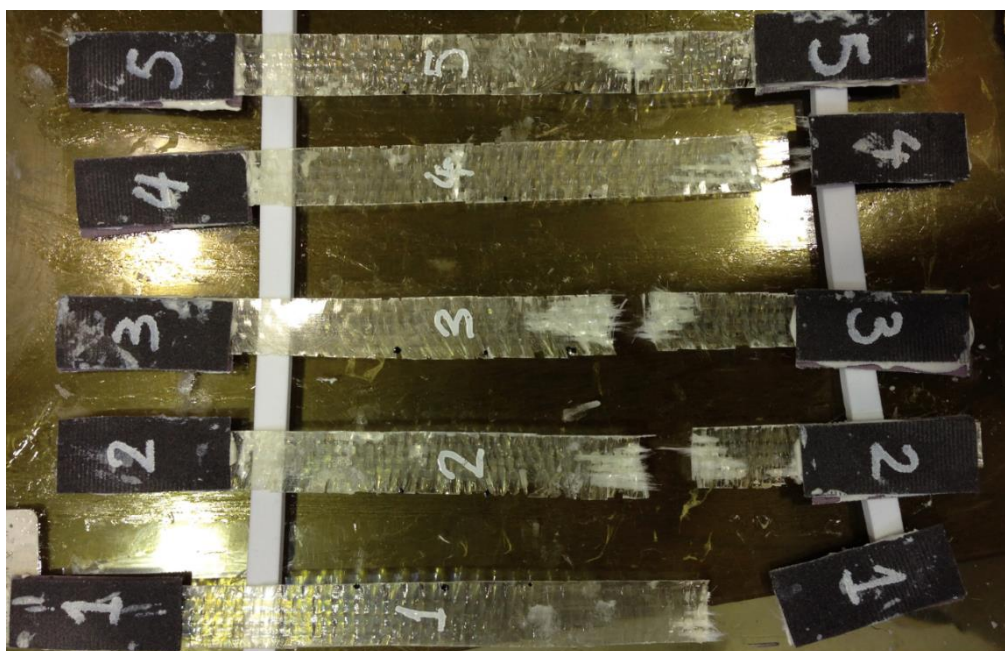


Το δοκίμιο TT3 σημείωσε μέγιστη εφελκυστική τάση ίση με 90,12 MPa σε αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση 1,30%. Η αστοχία έγινε κοντά στο άκρο του δοκιμίου λόγω θραύσης των ινών υάλου, όπως φαίνεται από το χαρακτηριστικό θόλωμα και δεν παρατηρήθηκε ολίσθηση του tab. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{TT5} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{21,774 - 5,009}{0,0025 - 0,0005} = 8382,5 \text{MPa} = 8,38 \text{GPa}$$

$$E_{TT5} = 8,38 \text{GPa}$$

Παρατηρήσεις: Τα δοκίμια TT1 – TT5 που κατασκευάστηκαν για τον προσδιορισμό της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του ινοπλισμένου πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, παρουσίασαν σημαντικές διακυμάνσεις κυρίως ως προς τη μέγιστη τάση θραύσης τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει κατανοητό, λαμβάνοντας υπόψη κάποιους πρακτικούς παράγοντες που έπαιξαν σημαντικό ρόλο. Τέτοιοι παράγοντες είναι η χειρωνακτική παραγωγή των δοκιμίων, η απουσία δηλαδή κάποιας τυποποιημένης – βιομηχανοποιημένης διαδικασίας παραγωγής. Επίσης, σημαντικό ρόλο έπαιξε η απειρία στην κατασκευή και το χειρισμό δοκιμίων από ινοπλισμένο πολυμερές, καθώς ήταν η πρώτη επαφή με αυτό το υλικό στην πράξη. Γι' αυτό το λόγο ήταν αναπόφευκτες κάποιες κατασκευαστικές ατέλειες σε όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Λόγω όμως των υπερβολικά μικρών διαστάσεων των δοκιμίων TT1 – TT5, οι ατέλειες αυτές απέκτησαν όπως φαίνεται περισσότερο καθοριστικό χαρακτήρα και οδήγησαν σε αυτές τις διακυμάνσεις.



Σχήμα 3.60: Η εικόνα των δοκιμίων TT1 – TT5 μετά την αστοχία

3.5 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων

3.5.1 Γενικά

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που παρουσιάστηκαν παραπάνω, αποφασίστηκε να γίνει μία στατιστική επεξεργασία ώστε να υπολογισθεί η χαρακτηριστική τιμή για κάθε κατηγορία δοκιμίων. Η στατιστική επεξεργασία γίνεται με χρήση κανονικής ή λογαριθμοκανονικής κατανομής, καθώς θεωρούνται οι πιο αντιπροσωπευτικές για μεγέθη όπως οι ιδιότητες ενός υλικού ή γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Οι μέθοδοι υπολογισμού της χαρακτηριστικής τιμής για τις δύο αυτές κατανομές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

Κανονική κατανομή

Η σχέση που δίνει την χαρακτηριστική τιμή ενός μεγέθους χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα είναι η εξής:

$$X_k = m(1 - k_n V)$$

όπου:

- m η μέση τιμή του μεγέθους
- V συντελεστής διασποράς. Εάν δεν είναι γνωστός για το σύνολο του πληθυσμού (όπως στην περίπτωση μας) τότε εκτιμάται ο συντελεστής διασποράς V του δείγματος $V = s/m$
- k_n συντελεστής στον οποίον υπεισέρχεται το πλήθος των δειγμάτων n , και η πιθανότητα μη υπέρβασης της τιμής 5%. Στην περίπτωση μας, όπου ο συντελεστής διασποράς V του πληθυσμού είναι άγνωστος, ο συντελεστής k_n

υπολογίζεται από τον τύπο $k_n = -t_p \sqrt{\frac{1}{n} + 1}$, όπου t_p το 5% ποσοστημόριο της

κατανομής t του Student. Οι τιμές του συντελεστή για διαφορετικά πλήθη δοκιμιών μπορούν να ληφθούν από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.5: Συντελεστής k_n για την 5% χαρακτηριστική τιμή

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
Vx γνωστός	2,31	2,01	1,89	1,83	1,8	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
Vx άγνωστο	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2	1,92	1,76	1,73	1,64

Λογαριθμοκανονική κατανομή

Στην περίπτωση λογαριθμοκανονικής κατανομής του μεγέθους X το αντικαθιστούμε με μία καινούργια μεταβλητή Y μέσω του μετασχηματισμού $Y = \ln X$. Αρά η Y ακολουθεί κανονική κατανομή και η X λογαριθμοκανονική κατανομή με κατώτατο όριο το $x_0 = 0$. Για τον υπολογισμό των m_Y και s_Y του δείγματος χρησιμοποιούμε το μετασχηματισμό $y_i = \ln x_i$ για όλες τις τιμές του δείγματος και στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέση τιμή m και την τυπική απόκλιση s σύμφωνα με τον ορισμό τους:

$$m_Y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{και} \quad s_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - m_Y)^2}{n-1}$$

Τελικά, φτάνουμε στη ζητούμενη χαρακτηριστική τιμή μέσω του αντίστροφου υπολογισμού:

$$Y_k = m_Y - k_n s_Y \Leftrightarrow X_k = e^{m_Y - k_n s_Y}$$

Ο συντελεστής k_n είναι ίδιος στην περίπτωση της κανονικής και της λογαριθμοκανονικής κατανομής.

3.5.2 Χαρακτηριστικές τιμές

Με βάση την παραπάνω πορεία υπολογισμού έγινε η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την αντοχή των ομάδων δοκιμίων S4-S5-S8 και S6-S9-S10 και για τη μέγιστη τάση θραύσης των δοκιμίων TT1 – TT5.

Ομάδες δοκιμίων S4-S5-S8 και S6-S9-S10

Οι τιμές αντοχής που σημειώθηκαν για τις δύο ομάδες δοκιμίων φαίνονται στους παρακάτω συγκεντρωτικούς πίνακες:

Πίνακας 3.6: Τιμές αντοχής δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέγιστη αντοχή (kN)	Δοκίμιο	Μέγιστη αντοχή (kN)
S4	11.34	S6	22.61
S5	17	S9	20.19
S6	15.8	S10	22.96

Με χρήση της κανονικής κατανομής, προέκυψαν οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές για τις δύο κατηγορίες:

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικές τιμές με χρήση της Κανονικής κατανομής

Κατηγορία Δοκιμίων	Τυπική απόκλιση s_X	Συντελεστής διασποράς V	Συντελεστής k_n	Μέση τιμή m_X (kN)	Χαρακτηριστική τιμή X_k (kN)
S4, S5, S8	3	0.203	3.37	14.7	4.7
S6, S9, S10	1.5	0.1	3.37	21.9	14.5

Με χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής, προέκυψαν οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές:

Πίνακας 3.8: Χαρακτηριστικές τιμές με χρήση της Λογαριθμοκανονικής κατανομής

Κατηγορία Δοκιμίων	Τυπική απόκλιση s_Y	Μέση τιμή m_Y	Συντελεστής k_n	Μέση τιμή m_X (kN)	Χαρακτηριστική τιμή X_k (kN)
S4, S5, S8	0.18	2.674	3.37	14.7	8
S6, S9, S10	0.06	3.09	3.37	21.9	18

Δοκίμια TT1 – TT5

Οι τιμές της μέγιστης τάσης που παρατηρήθηκε για τα δοκίμια προσδιορισμού των ιδιοτήτων του υλικού, TT1-TT5 είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 3.9: Μέγιστες τάσεις δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
TT1	94.43	10.39
TT2	106.52	7.52
TT3	130.95	10.1
TT4	151.31	9.62
TT5	90.12	8.38

Με χρήση της κανονικής κατανομής, η χαρακτηριστική τιμή της τάσης θραύσης υπολογίστηκε:

Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστική τιμή με χρήση της Κανονικής κατανομής

Δοκίμιο	Τυπική απόκλιση sX	Συντελεστής διασποράς V	Συντελεστής kn	Μέση τιμή mX (Mpa)	Χαρακτηριστική τιμή Xk (MPa)
TT1-TT5	25.9	0.226	2.34	114.7	54.1

Με χρήση της λογαριθμοκανονικής κατανομής η χαρακτηριστική τιμή της τάσης θραύσης υπολογίστηκε:

Πίνακας 3.11: Χαρακτηριστική τιμή με χρήση της Λογαριθμοκανονικής κατανομής

Δοκίμιο	Τυπική απόκλιση sY	Μέση τιμή mY	Συντελεστής kn	Μέση τιμή mX (Mpa)	Χαρακτηριστική τιμή Xk (MPa)
TT1-TT5	0.22	4.72	2.34	114.7	67.2

Για το μέτρο ελαστικότητας E δεν υπολογίζεται η χαρακτηριστική τιμή, αλλά απλώς η μέση τιμή. Αυτή είναι:

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^5 E_i}{5} = 9,2GPa$$

Παρατηρήσεις: Είναι φανερό ότι οι χαρακτηριστικές τιμές που προκύπτουν είναι πολύ συντηρητικές εκτιμήσεις σε σύγκριση με τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων, ακόμα και σε σύγκριση με την ελάχιστη τιμή που παρατηρήθηκε ανά κατηγορία. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, αφού τόσο ο αρκετά μικρός αριθμός των δειγμάτων, όσο και οι μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ δοκιμίων της ίδιας κατηγορίας, συνδράμουν προς αυτή την κατεύθυνση.

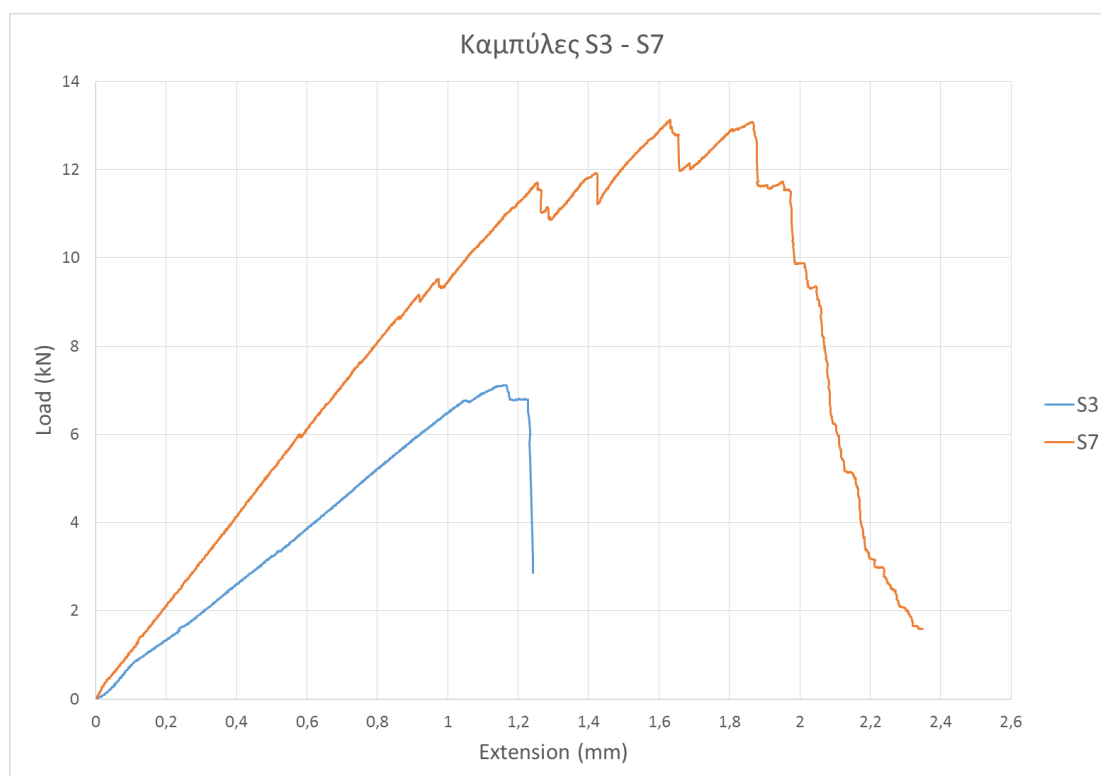
4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

4.1 Σύγκριση δοκιμών μεταξύ τους

S3 – S7

Αρχικά, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο δοκιμών που δεν έχουν ενίσχυση με πλέξη. Αυτά τα δοκίμια είναι το S3 (2 στρώσεις υαλοϋφάσματος) και το S7 (4 στρώσεις υαλοϋφάσματος), διαφοροποιούνται δηλαδή μόνο ως προς τη διαστρωμάτωσή τους. Παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες Φορτίου – Επιμήκυνσης (Load – Extension) που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές:



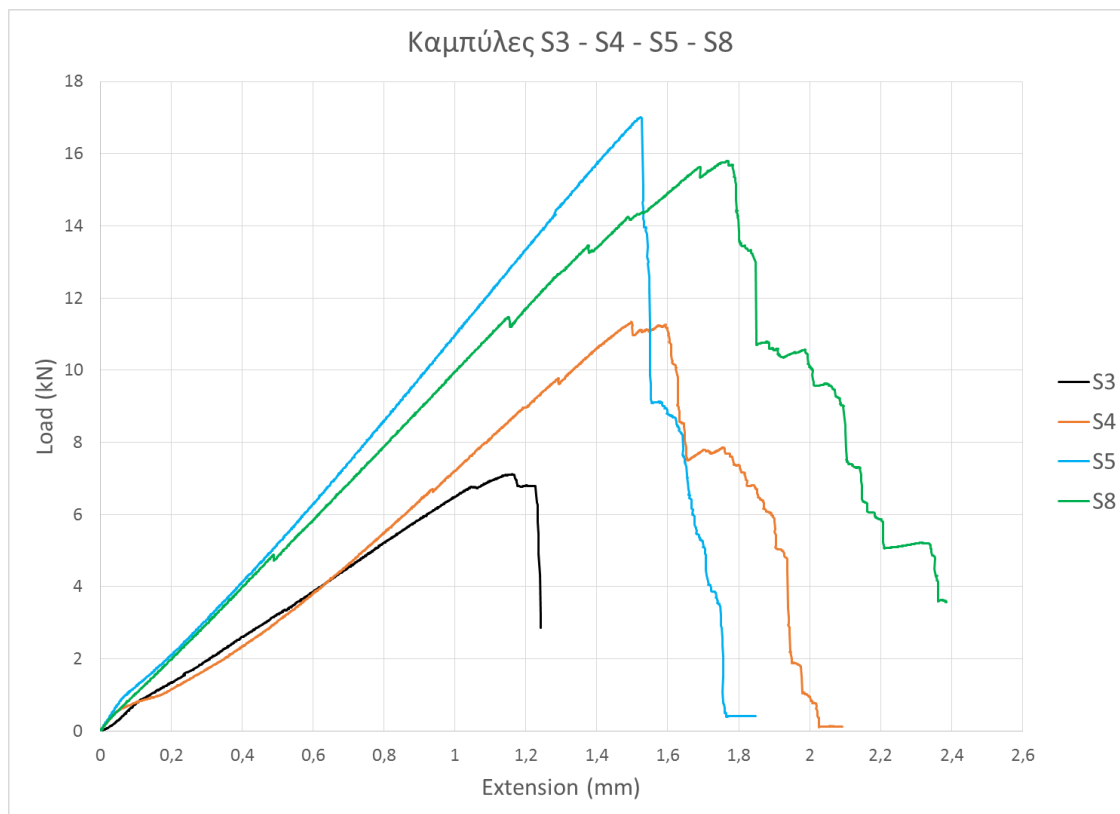
Σχήμα 4.1: Συνδυαστικό διάγραμμα δοκιμών S3 και S7

Παρατηρούμε ότι με τις επιπλέον στρώσεις που έχει το δοκίμιο S7 σε σχέση με το S3, σημειώνεται αύξηση της αντοχής ως προς τη μέγιστη τιμή της κατά 84,7%. Ταυτόχρονα, είναι σαφές ότι αυξήθηκε και η δυνατότητα παραμόρφωσης του δοκιμίου μέχρι την αστοχία.

S3 – S4 – S5 – S8

Στη συνέχεια, συγκρίνουμε την καμπύλη του δοκιμίου S3, το οποίο έχει 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος και δεν είναι ενισχυμένο, με αυτές των δοκιμών S4, S5 και S8, τα

οποία έχουν τον ίδιο αριθμό στρώσεων υαλοϋφάσματος αλλά περιλαμβάνουν ενίσχυση με πλέξη από δέσμες ινών (2 δέσμες ανά σειρά οπών).

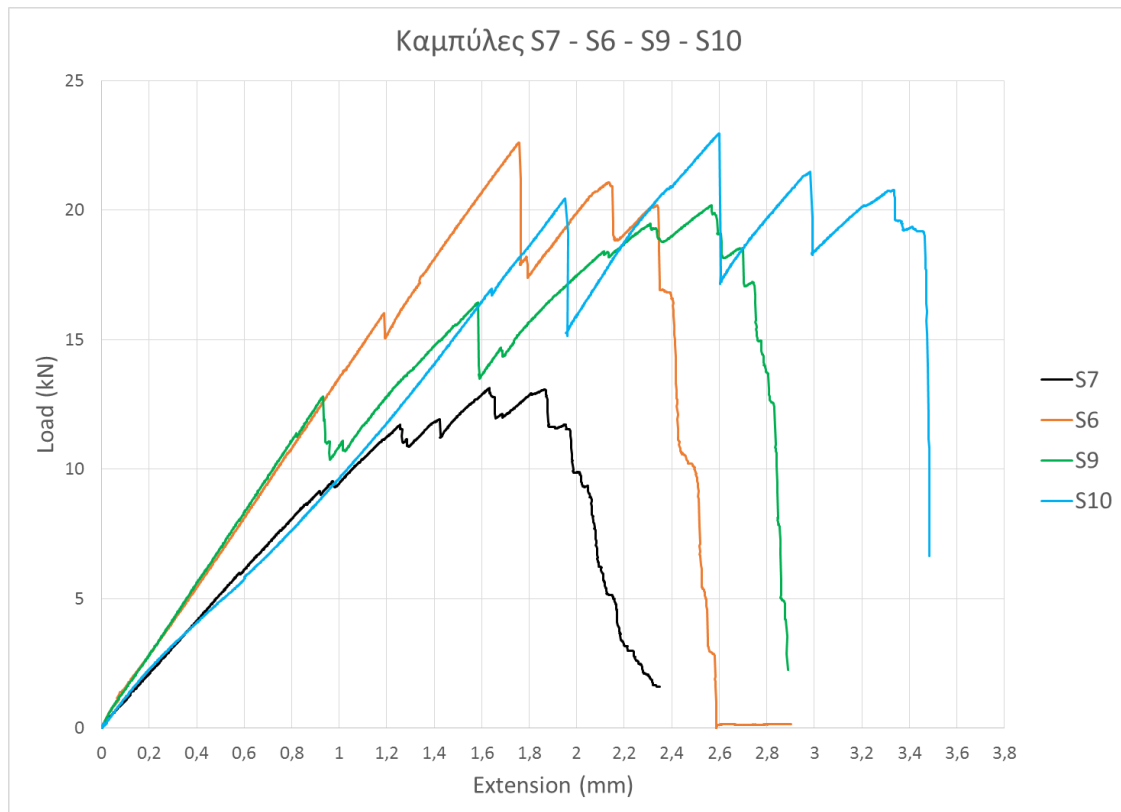


Σχήμα 4.2: Συνδυαστικό διάγραμμα δοκιμών S3, S4, S5 και S8

Η μέγιστη τιμή που παρατηρούμε από το δοκίμιο χωρίς ενίσχυση (S3 – 7,11 kN), συγκρινόμενη με το μέσο όρο των μέγιστων τιμών των ενισχυμένων δοκιμών (S3, S4, S8 – 14,71 kN), δείχνει ότι η ενίσχυση αύξησε την αντοχή της σύνδεσης κατά 106,9%, με εμφανή αύξηση της δυνατότητας παραμόρφωσης.

S7 – S6 – S9 – S10

Συγκρίνουμε την καμπύλη του δοκιμίου S7, που δεν περιλαμβάνει ενίσχυση και έχει 4 στρώσεις υαλοϋφάσματος, με τις καμπύλες των δοκιμών S6, S9 και S10, που έχουν ίδια διαστρωμάτωση αλλά είναι και ενισχυμένα με πλέξη από δέσμες ινών γυαλιού (4 δέσμες ανά σειρά οπών). Οι καμπύλες φαίνονται στο παρακάτω συνδυαστικό διάγραμμα.



Σχήμα 4.3: Συνδυαστικό διάγραμμα δοκιμών S7, S6, S9 και S10

Η μέγιστη τιμή της αντοχής που σημειώθηκε κατά τον πειραματικό έλεγχο του δοκιμίου S7 είναι 13,13 kN. Αντίστοιχα, ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών αντοχής που σημειώθηκαν για τα ενισχυμένα δοκίμια S6, S9 και S10, είναι 21,9 kN. Δηλαδή, μετά την ενίσχυση της σύνδεσης, παρατηρείται αύξηση της αντοχής της κατά 66,8%. Και στα τρία ενισχυμένα δοκίμια, παρατηρήθηκε επίσης αυξημένη παραμορφωσιμότητα.

Παρατήρηση: Παρά το γεγονός ότι στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές της αντοχής για την κάθε κατηγορία δοκιμίων, η σύγκριση με την αντοχή των δοκιμίων χωρίς ενίσχυση έγινε με τις μέσες τιμές, και όχι με τις χαρακτηριστικές. Αυτό έγινε γιατί οι χαρακτηριστικές τιμές προέκυψαν πολύ συντηρητικές, κάτι που είναι λογικό αν λάβει κανείς υπόψη τον μικρό αριθμό δειγμάτων ανά κατηγορία δοκιμίων, λόγω περιορισμών τόσο από οικονομική άποψη, όσο και από πλευράς εργαστηριακού χρόνου.

4.2 Σύγκριση με την ενδεικτική υπάρχουσα σύνδεση

Στην εισαγωγή της εργασίας (Κεφάλαιο 1.2) είχε γίνει θεωρητικός υπολογισμός μίας ευρέως χρησιμοποιούμενης σύνδεσης εφελκυσμού, της κοχλιωτής. Θα γίνει μία ενδεικτική σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα για τη σύνδεση που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, με την αντοχή της κοχλιωτής ως σημείο αναφοράς.

Ο υπολογισμός της αντοχής της κοχλιωτής σύνδεσης έγινε αμελώντας το συντελεστή ασφαλείας που λαμβάνεται συνήθως κατά το σχεδιασμό ($\gamma_{M2}=1,25$) και αυτό γιατί η σύγκριση έγινε με αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών όπως ελήφθησαν από τη μηχανή, χωρίς να υπεισέρχεται σε αυτά η έννοια οποιουδήποτε συντελεστή ασφαλείας. Έτσι, η αντοχή σε εφελκυσμό της κοχλιωτής σύνδεσης υπολογίστηκε 35,32 kN, με καθοριστική μορφή αστοχίας την αντοχή της καθαρής διατομής του ελάσματος. Αντίστοιχα, στις 2 κατηγορίες ενισχυμένων δοκιμών της παρούσας εργασίας, οι μέσες τιμές των αντοχών είναι 14,71 kN και 21,9 kN. Στην περίπτωση όμως των δοκιμών, η καθοριστική μορφή αστοχίας είναι εμφανώς η αστοχία του ινοπλισμένου πολυμερούς, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις τα χαλύβδινα ελάσματα έμειναν ανέπαφα, αφού άλλωστε δεν πρόλαβαν να αναπτυχθούν οι δυνάμεις που θα αντιστοιχούσαν σε πλαστικές παραμορφώσεις.

Αυτή η παρατήρηση, οδηγεί στην υπόθεση ότι ενδεχομένως αν αυξανόταν ο αριθμός των στρώσεων υαλοϋφάσματος καθώς και η ενίσχυση με επιπλέον δέσμες ινών στην πλέξη, πιθανόν να οδηγούσε σε αλλαγή της κρίσιμης μορφής αστοχίας, καθιστώντας καθοριστική την αστοχία της καθαρής διατομής των χαλύβδινων ελασμάτων.

Η παραπάνω υπόθεση θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

5 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Dubina D. (2004). «Σιδηρές κατασκευές από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής διαμόρφωσης». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Ραυτογιάννης Ι. (2009). «Σύνθετα υλικά». Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
3. Bank L. (2006). «Composites for construction: structural design with FRP materials». John Wiley & Sons, Inc.
4. CEN (2002) EN 1990 Eurocode «Basis of structural design».
5. Daniel M., Ishai O. (1994). «Engineering Mechanics of composite materials». Oxford University Press, New York.
6. European Standard EN ISO 527-1:1996. «General principles for the determination of tensile properties».
7. Kollar L., Springer G. (2003). «Mechanics of composite structures». Cambridge University Press, Cambridge.
8. Rudd C. D. (1990). «Mechanical properties of weft knit glass fibre / polyester laminates». Composite science and Technology 39 (1990) 261-277
9. Tsai S., Hahn T., (1980). «Introduction to composite materials». Technomic, Lancaster, PA